UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA

*Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAr)*

Dottorato di ricerca nazionale in Difesa dai rischi naturali e transizione ecologica del costruito (XXXVIII ciclo)

# TUTELA, TRANSIZIONE ECOLOGICA E RIQUALIFICAZIONE SOSTENIBILE DEL PATRIMONIO STORICO DELLA DIFESA.

*Protocolli integrati per il monitoraggio e la gestione.*

Candidata: Giulia Leoni
Supervisor: Donatella Rita Fiorino, Andrea Frattolillo
International Co-Supervisor: Marie-Thérèse van Thoor
Sede operativa: Università degli Studi di Cagliari

*Anno Accademico 2024/2025*

# STRUTTURA DELLA RICERCA

## INTRODUZIONE

La definizione dell'ambito di ricerca
Gli obiettivi della ricerca

## PARTE I | LA SOSTENIBILITA' NELLA RIQUALIFICAZIONE DELL'EDILIZIA STORICA

1. Il cambiamento climatico e gli impatti sul patrimonio culturale
2. Il quadro normativo
3. Prassi operative per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'edilizia storica
4. La gestione del patrimonio immobiliare pubblico. I beni del demanio militare
5. Il contesto internazionale e la scelta olandese

## PARTE II | LA PRASSI METODOLOGICA

1. Metodi e strumenti di analisi e documentazione
2. La modellazione HBIM
3. La modellazione energetica
4. Analisi di compatibilità
5. Indicatori dello stato di conservazione dell'elemento
6. Valutazione critica e limiti del metodo

## PARTE III | I CASI DI STUDIO

1. La Caserma Villasanta a Cagliari
2. La Caserma Promers a Naarden

**Conclusioni**
**Bibliografia**

# INDICE


## INTRODUZIONE

La definizione dell'ambito di ricerca
Gli obiettivi della ricerca

## PARTE I | LA SOSTENIBILITA' NELLA RIQUALIFICAZIONE DELL'EDILIZIA STORICA ..... 15

**1. IL CAMBIAMENTO CLIMATICO E GLI IMPATTI SUL PATRIMONIO CULTURALE** ..... 15
1.1 Lo scenario attuale ..... 15
1.2 Le tipologie di rischio a cui è esposto il patrimonio storico ..... 16
1.2.1 Processi derivanti dai cambiamenti di temperatura ..... 17
1.2.2 Processi derivanti dai cambiamenti delle precipitazioni ..... 18
1.2.3 Processi derivanti dai cambiamenti nell'intensità e nella direzione del vento ..... 21
1.3 Le strategie per la salvaguardia del patrimonio mondiale ..... 23
1.4 La questione dell'efficientamento energetico del patrimonio storico ..... 26

**2. IL QUADRO NORMATIVO DELLA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA NEL CONTESTO CULTURALE DELLA TUTELA E SALVAGUARDIA DEL PATRIMONIO COSTRUITO** ..... 31
2.1 La tutela dei beni culturali ..... 31
2.1.1 Le carte del restauro ..... 31
2.1.2 L'evoluzione legislativa nazionale nella tutela dei beni culturali ..... 35
2.1.3 Il concetto di deroga ..... 42
2.1.4 La tutela a livello locale: il caso della Regione Sardegna ..... 44
2.2 Il quadro normativo di riferimento per la riqualificazione energetica ..... 47
2.2.1 Gli impegni internazionali ..... 48
2.2.2 Le azioni e le normative a livello europeo ..... 52
2.2.3 Il quadro normativo italiano ..... 56
2.2.4 Competenze regionali e recepimento della normativa a livello locale ..... 61
2.2.5 Il quadro normativo olandese ..... 64

**3. PRASSI OPERATIVE PER IL MIGLIORAMENTO DELL'EFFICIENZA ENERGETICA NELL'EDILIZIA STORICA** ..... 68
3.1 Isolamento delle chiusure verticali opache ..... 69
3.1.1 Isolamento esterno ..... 70
3.1.2 Isolamento interno ..... 74
3.2 Isolamento delle chiusure verticali trasparenti ..... 78
3.3 Isolamento delle strutture orizzontali opache ..... 83
3.3.1 Chiusure orizzontali superiori ..... 83
3.3.2 Solai interpiano ..... 87
3.3.3 Soletta inferiore ..... 87

3.4 Adeguamento impiantistici ..... 90
3.4.1 Impianti di climatizzazione ..... 91
3.5 Fonti rinnovabili ..... 95
3.5.1 Energia solare ..... 95
3.6 Limiti di applicabilità ..... 98
3.7 Conservazione sostenibile e risparmio energetico: buone pratiche ..... 100
3.7.1 Rainhof, Valle di Casies (BZ), Italia ..... 100
3.7.2 Villa Castelli, Bellano (LC), Italia ..... 103
3.7.3 Orangerie, Bolzano (BZ), Italia ..... 106

**4. LA GESTIONE DEL PATRIMONIO IMMOBILIARE PUBBLICO. I BENI DEL DEMANIO MILITARE ..... 109**
4.1 L'evoluzione dell'architettura militare: dalle fortificazioni alle caserme ..... 109
4.2 L'evoluzione delle tecniche costruttive ..... 111
4.2.1 Fondazioni ..... 113
4.2.2 Strutture di elevazione orizzontali ..... 116
4.2.3 Strutture di copertura ..... 120
4.2.4 Strutture di elevazione verticali ..... 122
4.2.5 Elementi di collegamento verticale ..... 123
4.3 La ricognizione delle tipologie infrastrutturali storiche e attuali ..... 124
4.4 Le tipologie edilizie analizzate e la scelta dei casi di studio ..... 127
4.4.1 Le caserme a padiglione: la Caserma Villasanta ..... 127

**5. IL CONTESTO INTERNAZIONALE E LA SCELTA OLANDESE ..... 128**
5.1 I sistemi di difesa olandesi: Naarden e la New Dutch Waterline ..... 128
5.2 Evoluzione storica, architettonica e urbana della città-fortezza ..... 130
5.2.1 La Fondazione di Naarden (XIV secolo) ..... 130
5.2.2 Il Massacro di Naarden e la sua ricostruzione (XVI secolo) ..... 131
5.2.3 La costruzione della Vecchia Linea di Difesa Olandese (XVII secolo) ..... 132
5.2.4 La costruzione della nuova linea di galleggiamento Olandese, NDW (XIX secolo) ..... 135
5.2.5 La dismissione della fortezza militare (XX secolo) ..... 137
5.3 La configurazione attuale ..... 139
5.3.1 Il centro storico ..... 139
5.3.2 Le fortificazioni ..... 139
*5.3.3* I bastioni ..... 141
5.3.4 I rivellini ..... 145
*5.3.5* Le cortine ..... 146
5.4 Il caso di studio ..... 147

PARTE II | LA PRASSI METODOLOGICA ..... 150

1. METODI E STRUMENTI DI ANALISI E DOCUMENTAZIONE ..... 150
1.1 L'analisi storico documentale e le fonti archivistiche militari ..... 150
1.2 Il rilievo ..... 152
1.2.1 Il rilievo geometrico ..... 152
1.2.2 L'analisi materico-degrado ..... 153
1.2.3 Il rilievo funzionale ..... 154
1.3 L'analisi crono-tipologica e delle trasformazioni ..... 155
1.4 La sistematizzazione della conoscenza: il metodo Raumbuch ..... 156
1.4.1 L'analisi e la catalogazione degli elementi costruttivi ..... 157
1.4.2 L'analisi dei valori ..... 159
1.4.3 L'analisi della consistenza ..... 161
1.5 I descrittori tematici per la codifica della fabbrica e dei suoi elementi costruttivi ..... 164
1.5.1 Descrittori storico-archivistici e documentali ..... 166
1.5.2 Descrittori cronotipologici, delle fasi costruttive e successive modificazioni ..... 167
1.5.3 Descrittori morfologici e dimensionali ..... 168
1.5.4 Descrittori degli elementi costruttivi, loro consistenza e livelli di performance ..... 171
1.5.5 Descrittori strutturali ..... 174
1.6 I descrittori del comportamento tecnico-prestazionale in ambito energetico ..... 175
1.6.1 Descrittori climatici della località: ..... 175
1.6.2 Descrittori identificativi: ..... 176
1.6.3 Strutture opache verticali ..... 177
1.6.4 Strutture opache orizzontali ..... 179
1.6.5 Chiusure trasparenti ..... 180
1.6.6 Ponti termici ..... 182
1.6.7 Zone climatiche ..... 183
1.6.8 Gruppi termici ..... 184
1.6.9 Impianti da FER ..... 185
1.6.10 Fabbisogno e apporti termici ..... 186
1.6.11 Riscaldatori ..... 186
1.6.12 Impianto di smaltimento aeriformi ..... 187
1.6.13 Impianto di illuminazione ..... 187
1.6.14 Impianto fisso di trasporto ..... 187

2 LA MODELLAZIONE HBIM ..... 189
2.1 L'approccio metodologico BIM ..... 189
2.1.1 L'adozione nel BIM nel panorama internazionale ..... 191
2.1.2 Il BIM in Italia ..... 194
2.2 Il quadro normativo ..... 196
2.2.1 Norme ISO ..... 196

2.2.2 Norme CEN ..... 198
2.2.3 Norme UNI ..... 198
2.3 HBIM per la gestione e la valorizzazione dei grandi complessi militari ..... 200
2.4 Dal Raumbuch al BIM ..... 201
2.4.1 La codifica dei dati ..... 202
2.5 La creazione del modello e la gestione dei dati ..... 206
2.5.1 La costruzione delle librerie di progetto ..... 207
2.5.2 La creazione del modello parametrico ..... 209
2.5.3 Gestione ed estrapolazione dei dati ..... 209

**3 LA MODELLAZIONE ENERGETICA ..... 210**
3.1 Localizzazione e dati generali dell'edificio ..... 211
3.2 Definizione degli edifici oggetto di certificazione ..... 212
3.2.1 La localizzazione delle zone termiche ..... 213
3.2.2 L'individuazione e la definizione dei ponti termici ..... 213
3.2.3 L'inserimento degli impianti ..... 214
3.2.4 L'analisi dei consumi ..... 214
3.3 I risultati ottenuti dalla simulazione dello stato di fatto in condizioni standard ..... 216

**4. L'ANALISI DI COMPATIBILITÀ ..... 217**
4.1 Indicatori del valore storico-architettonico ..... 217
4.2 Indicatori prestazionali del potenziale di risparmio energetico ..... 219
4.3 Matrice di efficacia energetico-patrimoniale ..... 223
4.4 La scelta degli interventi ..... 225

**5. INDICATORI DELLO STATO DI CONSERVAZIONE DELL'ELEMENTO ..... 227**
5.1 Dettaglio delle patologie ..... 227
5.2 Macro valutazione ..... 228
5.3 Classi stato di conservazione ..... 228
5.4 Priorità degli interventi ..... 230

**6. VALUTAZIONE CRITICA DEI LIMITI DEL METODO ..... 233**
6.1 Tempi operativi e condizioni al contorno ..... 233
6.2 Limiti conoscitivi del rilievo e margini di soggettività ..... 234
6.3 Interoperabilità dei dati e limiti degli ambienti software ..... 234

PARTE III | I CASI DI STUDIO ..... 236

1. LA CASERMA RIVA VILLASANTA ..... 236

1.1 METODI E STRUMENTI DI ANALISI E DOCUMENTAZIONE ..... 236
1.1.1 L'analisi storico documentale e le fonti archivistiche militari ..... 236
1.1.2 Il rilievo ..... 239
1.1.3 L'analisi crono-tipologica e delle trasformazioni ..... 252
1.1.4 La sistematizzazione della conoscenza: il metodo Raumbuch ..... 257
1.1.5 L'analisi dei valori ..... 271
1.1.6 L'analisi della consistenza ..... 275

1.2 LA MODELLAZIONE HBIM ..... 279
1.2.1 Dal Raumbuch al BIM ..... 279
1.2.2 La creazione del modello parametrico ..... 295
1.2.3 Gli abachi per la gestione ed estrapolazione dei dati ..... 300

1.3 LA MODELLAZIONE ENERGETICA ..... 303
1.3.1 Localizzazione, dati climatici della località e descrittori identificativi: ..... 303
1.3.2 La libreria di progetto ..... 306
1.3.3 La definizione dell'edificio oggetto di certificazione ..... 345
1.3.4 L'inserimento degli impianti e i relativi descrittori ..... 350
1.3.5 I risultati ottenuti dalla simulazione dello stato di fatto in condizioni standard ..... 370

1.4 L'ANALISI DI COMPATIBILITÀ ..... 374
1.4.1 Indicatori del valore storico-architettonico ..... 374
1.4.2 Indicatori prestazionali del potenziale di risparmio energetico ..... 376
1.4.3 Matrice di efficacia energetico-patrimoniale ..... 379
1.4.4 La scelta degli interventi ..... 380
1.4.5 Indicatori dello stato di conservazione dell'elemento ..... 382
1.4.6 Priorità degli interventi ..... 383

1.5 GLI INTERVENTI MIGLIORATIVI ..... 385
1.5.1 Il miglioramento prestazionale dell'involucro ..... 385
1.5.2 L'adeguamento impiantistico ..... 395
1.5.3 I risultati ottenuti dalla simulazione post-interventi ..... 403

ALLEGATI ..... 406

2 LA CASERMA PROMERS ..... 428

Introduzione ..... 428

2.1 LA MODELLAZIONE ENERGETICA ..... 430
2.1.1 Individuazione della località climatica di riferimento ..... 430
2.1.2 Localizzazione, dati climatici e descrittori identificativi dell'edificio ..... 432
2.1.3 Descrizione dell'edificio e definizione delle zone termiche ..... 436
2.1.4 L'inserimento degli impianti ..... 439
2.1.5 La definizione dell'involucro ..... 445
2.1.6 I ponti termici ..... 501
2.1.7 I risultati ottenuti dalla simulazione dello stato di fatto in condizioni standard ..... 518

2.2 L'INTERVENTO DI RIQUALIFICAZIONE ..... 520
2.2.1 L'inserimento degli impianti ..... 520
2.2.2 I risultati ottenuti dalla simulazione post interventi ..... 527

3 CONCLUSIONI ..... 398

4 BIBLIOGRAFIA ..... 534

## La definizione dell'ambito di ricerca

Il cambiamento climatico rappresenta una minaccia significativa per l'ambiente, l'economia e il patrimonio storico, il quale è fondamentale per plasmare l'identità individuale e collettiva, offrendo testimonianze di epoche passate e contribuendo alla memoria storica di un paese (UNESCO, 2007). Le evidenze tangibili degli effetti del cambiamento climatico si manifestano anche sull'edilizia storica, che costituisce circa un quarto dei beni architettonici in Europa (Hao, et al. 2020). I rischi ambientali espongono il patrimonio a fenomeni degradativi che possono causare danni significativi o addirittura la distruzione di beni culturali (Bertolin 2019).
Nonostante la crescente urgenza nella lotta al cambiamento climatico, il numero di pubblicazioni che esaminano il coinvolgimento del patrimonio nella transizione ecologica rimane limitato rispetto a quelle che approfondiscono gli impatti su agricoltura, risorse idriche, industria, energia, trasporti e salute (Bonazza, Palmira, Sabbioni, Grossi, & Brimblecombe, 2009; Gandini, Garmendia, & San Mateos, 2016; Orr, Richards, & Fatorić, 2021). In aggiunta, la maggior parte degli studi esamina singoli edifici storici proponendo misure per ridurre il consumo energetico, ma pochi considerano un raggio d'azione più ampio e sistemico (Lidelow, et al. 2019).

È essenziale integrare il risparmio energetico nelle politiche di conservazione del patrimonio, soprattutto in vista dell'aumento di eventi climatici estremi come siccità e inondazioni, che colpiranno con maggiore intensità l'edificato storico (Rajcic, Skender e Damjanovic 2018). Intervenire sul patrimonio storico però significa operare sull'insieme di beni culturali e paesaggistici, che costituiscono la ricchezza di un luogo e che hanno un particolare interesse a livello artistico, storico, bibliografico, etno-antropologico o archivistico. È cruciale stabilire un equilibrio tra le esigenze di conservazione e quelle di innovazione e risparmio energetico (Moschella, et al. 2013).
Tuttavia, la letteratura evidenzia una lacuna importante: gli interventi di miglioramento energetico spesso non integrano adeguatamente i valori culturali e storico-artistici, proponendo soluzioni che non rispettano la compatibilità dei materiali o la reversibilità degli interventi (De Santoli, Guidelines on energy efficiency of cultural heritage 2015) (Litti, Audenaert e Braet 2013). Gli edifici storici, frutto di stratificazioni culturali e architettoniche, richiedono un approccio consapevole che rispetti la loro integrità e valorizzi la loro storia (ICOMOS, 2020). Un approccio multidisciplinare, come suggerito dalla Commissione Brundtland (1987), deve integrare il risparmio energetico come parte di un processo di valorizzazione sostenibile del patrimonio.

Questa lacuna nella letteratura non solo evidenzia la necessità di ulteriori studi, ma anche l'urgenza di sviluppare linee guida e sistemi di supporto decisionale per guidare i professionisti nella distinzione tra i diversi paradigmi di conservazione e nella comprensione di come questi possano influenzare l'integrazione delle misure di efficienza energetica negli edifici storici (Lidelow, et al. 2019). Sebbene vi sia una crescente richiesta di approcci interdisciplinari, multidisciplinari e transdisciplinari nella gestione e conservazione del patrimonio culturale, l'analisi della letteratura rivela che, dal punto di vista metodologico, tali collaborazioni restano limitate. Le pubblicazioni interdisciplinari spesso non sono sottoposte a revisione paritaria e non sono indicizzate, riducendo la diffusione delle migliori pratiche. Tuttavia, queste sinergie potrebbero rappresentare un terreno fertile per sviluppi innovativi, esplorando gli impatti dei cambiamenti climatici sui valori culturali e patrimoniali (Orr, Richards e Fatorić 2021).

Nonostante questa revisione abbia messo in luce come il valore culturale degli edifici storici venga spesso dato per scontato, emerge come sia essenziale adottare buone pratiche, metodologie, strumenti e procedure che possano evidenziare la diversità dei paradigmi di conservazione. Questo consentirebbe un'integrazione più trasparente nel processo di selezione, informata e cosciente, delle misure volte a migliorare l'efficienza energetica degli edifici storici. Inoltre, comprendere appieno il valore dei beni storici non può prescindere da analisi qualitative, ma è necessario anche ricorrere a valutazioni quantitative che non si limitino alle sole caratteristiche temporali, come l'età della costruzione.

Partendo dall'urgenza di limitare i consumi energetici di cui è responsabile l'edilizia storica e dalla necessità di mettere in atto un processo di transizione ecologica, lo studio si concentra sul patrimonio immobiliare appartenente al demanio pubblico dello Stato e assegnato alle Forze Armate. L'obiettivo è coniugare il miglioramento delle prestazioni energetiche del patrimonio architettonico storico con la corretta tutela e conservazione delle sue peculiarità artistiche e culturali, indagando il complesso legame tra restauro e il raggiungimento di nuovi livelli di benessere. Il patrimonio militare, in particolare, si configura come una realtà complessa e dinamica, di grande rilevanza strategica, che occupa aree significative all'interno del tessuto di molte realtà urbane (Brikou, Zavraka e Vitopoulou 2021). Costituito in gran parte da beni risalenti al secondo dopoguerra, solo di recente questo complesso di opere ha iniziato a essere studiato con maggiore sensibilità (Gatti e Cacciaguerra 2016); oggi, si comincia a

riconoscere come appartenenti a questa categoria numerosi beni militari di grande interesse architettonico, paesistico e simbolico, che si identificano come testimonianze di memorie collettive e individuali, fondamentali per la memoria storica dei luoghi (Gawyluk e Zagroba 2017). La ricerca si concentra su questo importante tessuto edilizio, focalizzandosi in particolare sugli edifici costruiti a cavallo tra Ottocento e Novecento, che nella maggior parte dei casi non sono mai stati oggetto di riqualificazione energetica e presentano caratteristiche funzionali e livelli di comfort inadeguati (Lidelow, et al. 2019). Il progetto mira allo sviluppo di interventi di manutenzione, restauro e adeguamento necessari per contenere la spesa pubblica, ridurre i costi di esercizio e l'impatto ambientale degli edifici.

Il Ministero della Difesa ha dimostrato interesse nell'accogliere e sostenere studi accademici, come evidenziato dai numerosi accordi di collaborazione, tra cui quello con l'Università di Cagliari, sottoscritto nel 2018 e tuttora attivo (Fiorino, D.R., Iannotti, P., & Mellano, P., 2019).

## Gli obiettivi della ricerca

Il progetto di ricerca intende proporre una metodologia di analisi e intervento per la tutela e la protezione del costruito storico, che tenga conto delle peculiarità energetiche e storico-costruttive del patrimonio infrastrutturale della Difesa. L'obiettivo generale è creare un protocollo innovativo di monitoraggio e governance del patrimonio, che consenta di applicare modelli funzionali e logistici scalabili su tutto il territorio nazionale. Il fine ultimo non è solo il miglioramento energetico degli edifici esistenti, ma l'elaborazione di un approccio che permetta di definire gli interventi più idonei, attraverso un processo basato sulla conoscenza approfondita dei beni oggetto di studio.

Nel perseguire tale obiettivo, è stato condotto un lavoro di codifica, con particolare attenzione alla ricognizione dei modelli tipologici storici sviluppati nel tempo dal Genio Militare. Data la varietà del parco infrastrutturale della Difesa – che comprende Esercito, Aeronautica e Marina – la ricerca si concentrerà su una tipologia di edifici rappresentative dell'Esercito: le caserme a padiglioni.
Le **caserme a padiglioni** sono una tipologia che, grazie alla sua forte predominanza e modalità seriale di edificazione, è presente in diversi contesti del panorama identitario militare italiano. Questi compendi si caratterizzano per la presenza di più corpi di fabbrica (casermette) generalmente di uguale dimensione e con conformazione a "U", allineati ai lati della piazza d'armi, dotati di copertura a doppia falda. Solitamente, il Palazzo del Comando, con ingresso monumentale, è posizionato su un lato corto della piazza d'armi, mentre sull'altro lato si trovano altri fabbricati di servizio, come mensa, cucina e refettori (Paolini, Le caserme unitarie: progetto e costruzione 2007). Concepite per l'addestramento dei reparti, queste strutture erano realizzate lontane dai centri abitati, con ampie aree per le esercitazioni.
La ricerca si concentrerà su un edificio rappresentativo della tipologia di patrimonio sopra descritta, scelto come caso di studio: la **Caserma Alberto Riva Villasanta a Cagliari**. Inserita nel contesto delle architetture militari costruite tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento, la caserma si trova tra il colle di San Bartolomeo e il Viale Poetto. Sebbene la datazione esatta della costruzione non sia ancora nota, l'arco cronologico di riferimento è stato ricostruito e si colloca tra il 1930 e il 1940.
La Caserma Riva Villasanta è stata selezionata come sito pilota per ospitare programmi di rifunzionalizzazione. L'obiettivo della ricerca è sviluppare una metodologia che bilanci le esigenze di conservazione del patrimonio con la necessità di rispondere ai rischi naturali e di adeguarsi alle normative energetiche moderne. La metodologia proposta prevede un'analisi distinta delle componenti storiche ed energetiche dell'edificio, che saranno successivamente integrate in una matrice finale. Questo approccio permetterà di delineare un piano di intervento capace di rispettare i valori storico-culturali, rispondendo al tempo stesso alle esigenze contemporanee di efficienza e sostenibilità.

Un ulteriore caso di studio si trova a **Naarden**, nei Paesi Bassi, una località situata in una zona climatica differente rispetto a quella dei due edifici italiani. Questa diversificazione climatica rappresenta un'opportunità per testare la validità della prassi metodologica in un contesto che si distacca dal clima mediterraneo. Durante il periodo di studio all'Università di Delft, la ricerca si è focalizzata su Naarden, una città fortificata considerata un capolavoro dell'arte militare olandese. Situata a circa 25 chilometri da Amsterdam, Naarden è nota per la sua storia e il suo patrimonio architettonico unico, ed è stata riconosciuta come patrimonio dell'umanità dall'UNESCO, insieme alla storica Nuova Linea di Galleggiamento Olandese.

L'obiettivo finale della tesi è quello di sviluppare un metodo integrato per la riqualificazione energetica degli edifici storici, con particolare riferimento alle architetture militari, che possa conciliare la necessità di preservare il valore storico e culturale del patrimonio edilizio con le esigenze contemporanee di efficienza energetica. Le linee guida, che si propongono come esito conclusivo del lavoro di tesi, rappresentano il risultato di un'attenta analisi delle specificità architettoniche e funzionali delle architetture militari. Il fine ultimo è fornire un quadro operativo che permetta di intervenire in modo calibrato e rispettoso del carattere di ciascun edificio, promuovendo soluzioni di risanamento energetico che rispecchino tanto la storia quanto le esigenze di comfort moderno. Queste linee guida, pur essendo il frutto di un percorso di ricerca approfondito, sono pensate come uno strumento dinamico e suscettibile di aggiornamenti futuri, con l'obiettivo di adattarsi ai continui sviluppi delle conoscenze e delle pratiche nell'ambito della conservazione e valorizzazione del patrimonio edilizio esistente, in particolare delle strutture storiche ad uso militare.

# PARTE I | LA SOSTENIBILITA' NELLA RIQUALIFICAZIONE DELL'EDILIZIA STORICA

## 1. IL CAMBIAMENTO CLIMATICO E GLI IMPATTI SUL PATRIMONIO CULTURALE

### 1.1 Lo scenario attuale

La consapevolezza della precarietà ambientale è ampiamente riconosciuta nella letteratura scientifica contemporanea. Secondo la sesta relazione di sintesi dell'IPCC, il cambiamento climatico rappresenta una minaccia concreta per il benessere umano e la salute del pianeta, riducendo rapidamente le possibilità di garantire un futuro vivibile e sostenibile per tutti (IPCC 2023). Le proiezioni più pessimistiche prevedono un aumento della temperatura superficiale globale tra i 2,6 e i 4,8 °C entro la fine del XXI secolo rispetto al periodo 1986–2005 (Hao, et al. 2020). Oltre agli impatti ambientali e sociali, i cambiamenti climatici rappresentano oggi una delle sfide più significative anche per la conservazione del patrimonio culturale, in particolare per i siti iscritti nella Lista del Patrimonio Mondiale (Sesana, et al. 2021). Questi beni, spesso già fragili, sono esposti a nuove forme di degrado e a rischi crescenti di danneggiamento o perdita irreversibile (Bertolin 2019). La loro tutela è fondamentale, poiché costituiscono un'eredità culturale che plasma le identità collettive, testimonia il passato e contribuisce alla memoria storica dei luoghi.
Nonostante ciò, il patrimonio culturale riceve ancora scarsa attenzione nei dibattiti sul cambiamento climatico, rispetto a settori come agricoltura, energia o salute (Bonazza, Palmira, et al. 2009). Il numero di studi che indagano il ruolo del patrimonio nella transizione ecologica rimane limitato (Gandini, Garmendia e San Mateos 2016); (Orr, Richards e Fatorić 2021), nonostante sia evidente che fenomeni come inondazioni, siccità e danni strutturali colpiranno sempre più anche l'edificato storico (Rajcic, Skender e Damjanovic 2018).
È quindi essenziale integrare strategie di salvaguardia dei beni culturali nelle politiche di adattamento e mitigazione, riconoscendone il valore come risorsa culturale e sociale, oltre che come componente vulnerabile del territorio. Negli ultimi anni si registra una crescente attenzione su questo fronte (Martinez-Molina, et al. 2016), ma resta molto da fare per colmare il divario tra la consapevolezza del rischio e le azioni di tutela.

## 1.2 Le tipologie di rischio a cui è esposto il patrimonio storico

Nonostante le iniziative volte alla riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, gli effetti del cambiamento climatico sono destinati a perdurare nei prossimi decenni, a causa dell'accumulo pregresso di emissioni in atmosfera e dell'inerzia intrinseca del sistema climatico (Aboulnaga, et al. 2024).
I beni del patrimonio culturale, già soggetti a fisiologici processi di degrado dovuti all'interazione con l'ambiente, risultano oggi particolarmente vulnerabili agli impatti amplificati del cambiamento climatico. Quest'ultimo accelera il deterioramento dei materiali costitutivi e favorisce l'insorgenza di nuovi fenomeni di degrado, rendendo tale condizione una criticità rilevante per i beni del patrimonio culturale mondiale. Eventi estremi come siccità, inondazioni, frane e l'innalzamento del livello del mare rappresentano un rischio crescente, soprattutto per le aree costiere (Sabbioni, Bonazza, et al. 2010).
A tali minacce si aggiungono le variazioni di temperatura, le precipitazioni, l'umidità atmosferica, l'intensità del vento e l'inquinamento atmosferico, identificati dall'Organizzazione delle Nazioni Unite per l'Educazione, la Scienza e la Cultura (UNESCO) come ulteriori fattori di rischio per il patrimonio culturale (W. H. UNESCO 2007).

Nel contesto del patrimonio culturale, i rischi possono essere distinti in due tipologie principali: rischi cronici e rischi catastrofici.

- I rischi cronici producono un degrado progressivo e cumulativo, il cui impatto aumenta nel tempo. Tali rischi sono strettamente legati ai cambiamenti climatici, che possono intensificare i meccanismi di deterioramento dei materiali. Ad esempio, l'innalzamento delle temperature invernali può favorire infestazioni di insetti e attacchi fungini, deformazioni degli elementi in legno e fenomeni di macchiatura e scolorimento della muratura (Gandini, Garmendia e San Mateos 2016).
- I rischi catastrofici, invece, si manifestano improvvisamente e comportano danni gravi e potenzialmente irreversibili, fino alla perdita del bene culturale. Eventi come inondazioni, frane e incendi rappresentano esempi di minacce catastrofiche che possono colpire edifici storici e strutture esposte a pericoli naturali.

Sebbene i rischi catastrofici attirino maggiore attenzione per l'immediatezza delle perdite, i rischi cronici stanno assumendo un ruolo sempre più rilevante a causa dell'intensificazione e della maggiore frequenza dei fenomeni climatici. Tale evoluzione non solo accelera i processi di degrado esistenti, ma può anche innescare nuovi meccanismi di deterioramento, amplificando le perdite di patrimonio culturale.

Sesana et al., nella review della letteratura condotta nel 2020, individuano tre tipologie principali di impatti climatici sul patrimonio culturale (Sesana, et al. 2021). In particolare, i rischi cronici, definiti come rischi da impatto graduali, vengono distinti in base all'ambiente di esposizione, sia all'aperto che indoor. Ai fini di questo studio, ci si concentra sull'analisi delle prime tipologie di rischio dedicando particolare attenzione all'analisi della letteratura riguardante l'effetto dei cambiamenti climatici sul deterioramento dell'involucro esterno del costruito storico. I fattori di rischio individuati sono riassumibili in tre distinte categorie: processi derivanti dai cambiamenti di temperatura, processi derivanti dai cambiamenti delle precipitazioni e processi derivanti dai cambiamenti nell'intensità e nella direzione del vento (Sesana, et al. 2021).

### 1.2.1 Processi derivanti dai cambiamenti di temperatura

La temperatura e le sue variazioni rappresentano uno dei principali fattori responsabili dei processi di degrado degli edifici. Ad esempio, i cicli di gelo-disgelo causati dall'acqua intrappolata nelle pietre porose, la frammentazione dei marmi (sgranatura), la termoclastia, la migrazione dei sali e lo sviluppo di organismi biologici sono tutti fenomeni strettamente legati alle variazioni termiche (Blavier, et al. 2023).

#### *Cicli di gelo-disgelo*

Le frequenti variazioni di temperatura dovute all'alternarsi del giorno e la notte o delle stagioni generano fenomeni di condensazione, evaporazione e cicli di gelo/disgelo dell'acqua presente nei materiali lapidei, laterizi o ceramici. La formazione di cristalli di ghiaccio all'interno degli spazi porosi determina forti pressioni che, a lungo andare, provocano stress interno e la conseguente rottura del materiale (Fig. 1) (Sabbioni, Bonazza, et al. 2010). Sebbene si ipotizza che il meccanismo di gelo-disgelo si verifichi meno frequentemente a causa dell'innalzamento delle temperature previsto nella maggior parte dei paesi Europei (Brimblecombe e Grossi 2007), potrebbe comunque essere un problema invalidante soprattutto in alcune regioni del Nord dell'Europa dove un clima più caldo consentirebbe alle temperature di oscillare sopra e sotto il punto di congelamento, mettendo in pericolo i materiali porosi presenti in siti archeologici ed edifici storici (Haugen e Mattsson 2011).

#### *Termoclastismo*

Il termoclastismo è un processo di disgregazione meccanica delle rocce causato delle variazioni termiche indotte dai cambiamenti stagionali e dalle oscillazioni diurne della temperatura dell'aria e dell'insolazione diretta, soprattutto quando queste oscillazioni sono rapide e intense (Yaldiz 2010); (Bonazza, Sabbioni, et al. 2009). Questo processo di danneggiamento dipende dalla conduttività termica dei materiali, che varia in relazione alla loro composizione mineralogica e tessitura e può provocare microfessurazioni, esfoliazione delle pietre ed erosione delle superfici dei materiali da costruzione (Sabbioni, Bonazza, et al. 2010). Il marmo e il granito sono le pietre più vulnerabili alla termoclastia (Gómez-Heras, Smith e Fort 2006) e, in generale, il rischio è previsto in aumento nelle regioni mediterranee a causa del cambiamento climatico (Camuffo 2019).



*Fig. 1. Fessurazioni in una muratura in laterizio. L'espansione e contrazione dei materiali, amplificata da cicli di gelo-disgelo, provoca la formazione di crepe verticali lungo i giunti di malta.*

### 1.2.2 Processi derivanti dai cambiamenti delle precipitazioni

Le precipitazioni costituiscono un rilevante fattore di rischio per il patrimonio culturale (Sesana, et al. 2021). L'acqua provoca danni diversi a seconda della composizione del materiale (corrosione dei metalli, espansione del legno, ecc.) e favorisce l'interazione con agenti inquinanti, la proliferazione di micro-organismi, batteri, muffe e piante invasive, oltre a trasportare e depositare sali corrosivi.
L'aumento delle precipitazioni legato ai cambiamenti climatici può causare sia danni diretti che indiretti alle strutture storiche. I danni diretti includono l'erosione meccanica o la saturazione dei suoli e il sovraccarico di grondaie e pluviali, che aumentano il rischio di infiltrazioni di umidità nei materiali costruttivi, comprese le murature (Sabbioni, Cassar, et al., Vulnerability of cultural heritage to climate change 2019). Tra i danni indiretti rientrano invece i cicli di gelo-disgelo, la corrosione chimica e il degrado biologico (Wang, et al. 2022).
L'infiltrazione d'acqua nei materiali porosi può essere favorita dalla condensa e dall'azione capillare in presenza di terreni umidi, accelerando i processi di deterioramento attraverso fenomeni di corrosione, proliferazione biologica e cristallizzazione salina (Grossi e Brimblecombe 2007).
I danni possono essere più o meno importanti e dipendono dalla resistenza all'acqua, dalla struttura porosa e dalla composizione dei materiali; La resistenza all'acqua dei materiali decresce nell'ordine pietra, calcestruzzo, mattone, legno e terra (Huang e Ma 2003). La maggiore porosità del legno (50%–80%) e della terra (43%–54%) rispetto al mattone (12%–34%), al calcestruzzo (2%–4%) e alla pietra (0,5%–3%) li rende più vulnerabili all'umidità. I monumenti in muratura sono particolarmente soggetti ai danni da cristallizzazione salina a causa della presenza di sostanze alcaline e sali nei materiali di legame (Wang, et al. 2022).

#### *Corrosione dei metalli e delle superfici lapidee*

La corrosione (Fig. 2) è un fenomeno chimico che provoca il deterioramento graduale dei materiali attraverso l'azione dell'acqua, solitamente in combinazione con la deposizione di sali. Un aumento delle precipitazioni incrementa la corrosione dei metalli e dei materiali vetrosi e accelera il degrado delle pietre carbonatiche come il calcare e il marmo (P. e Grossi 2011)
Il cambiamento climatico potrebbe intensificare la corrosione di metalli nel Nord Europa a causa di condizioni più calde e umide, mentre nel Sud Europa, condizioni più secche potrebbero mitigare questo effetto (Grøntoft, Climate change impact on building surfaces and facades 2011). Sabbioni et al. evidenziano un aumento della corrosione di zinco, rame e piombo nelle aree costiere e in quelle con uso di sali antigelo (Sabbioni, Bonazza, et al. 2010), mentre Tidblad conferma l'aumento della corrosione per l'acciaio al carbonio nelle zone costiere settentrionali e per lo zinco nelle aree costiere meridionali (Tidblad 2013).
Per le facciate degli edifici in pietra nel Nord Europa, dove si prevede un aumento delle precipitazioni, esiste il rischio che questo fenomeno aggravi ulteriormente la corrosione delle superfici in particolare per il calcare di Portland e le pietre carbonatiche a bassa porosità come marmo e calcare compatto (Sesana, et al. 2021).
Anche l'inquinamento atmosferico contribuisce al degrado delle superfici lapidee storiche (Fig. 3), poiché è spesso associato a fenomeni di annerimento superficiale delle pietre, che può avere anche effetti corrosivi (Grossi e Brimblecombe 2007). I principali inquinanti coinvolti sono il diossido di zolfo ($SO_2$) e gli ossidi di azoto (NOx), che reagiscono con l'acqua piovana formando acidi che abbassano ulteriormente il pH delle precipitazioni, favorendo il fenomeno delle piogge acide (Sabbioni, Cassar, et al. 2006). Con l'aumento delle concentrazioni di $CO_2$ nell'atmosfera dovuto alle attività antropiche, Bonazza et al. (2009) hanno previsto un aumento della recessione carsica delle pietre carbonatiche a causa dell'ulteriore acidificazione delle precipitazioni (Bonazza, Palmira, et al. 2009). Tuttavia, poiché in Europa si prevede una riduzione dell'inquinamento atmosferico grazie a normative più restrittive, l'effetto dell'inquinamento potrebbe risultare meno significativo rispetto a quello del cambiamento climatico. Questo è stato confermato da Brimblecombe e Grossi (2009), che hanno osservato come a Londra il miglioramento della qualità dell'aria negli ultimi decenni dovrebbe spostare l'attenzione della ricerca dai danni causati dall'inquinamento atmosferico agli impatti legati ai cambiamenti climatici (Brimblecombe e Grossi 2009).

#### *Degrado biologico*

Le variazioni climatiche influenzano la crescita di microrganismi su materiali lapidei (Fig. 4) e lignei del patrimonio culturale, con un aumento del rischio di biodeterioramento (Camuffo 2019) (Grøntoft, 2019; Prieto et al., 2020) specialmente nelle regioni in cui è previsto un clima più umido e caldo dove si prevede un incremento di condizioni favorevoli per l'insorgere di funghi, alghe e insetti (Sabbioni, Bonazza, et al. 2010); (P. e Grossi 2011). L'aumento

di temperatura e umidità, insieme a precipitazioni più intense e pioggia battente (WDR), incrementa il rischio di attacchi fungini sugli edifici in legno, soprattutto nel Nord e nell'Est Europa e nel Nord-Ovest delle Isole Britanniche (Haugen e & Mattsson 2011).
Nelle aree in cui il clima diventerà probabilmente più secco, come il Mediterraneo, il Medio Oriente, i Caraibi e l'Africa meridionale, si prevede una riduzione del rischio di degrado biologico, poiché le condizioni ambientali influenzano la composizione e l'attività delle comunità biotiche, con il tipo di substrato che assume un ruolo secondario (Viles e Cutler 2012).
Grøntoft ha previsto un aumento del rischio di marciume per gli edifici storici in legno nelle regioni settentrionali (Grøntoft 2019), mentre la distribuzione dei licheni potrebbe mutare con un possibile aumento della loro abbondanza nelle regioni settentrionali e una riduzione nel sud Europa, dove temperature più alte e minore umidità possono causare la disidratazione dei talli (Ariño 2010). Lo sviluppo dei licheni su superfici lapidee porta alla solubilizzazione dei minerali e alla disgregazione del substrato, contribuendo al deterioramento delle superfici (Sabbioni, Bonazza, et al. 2010).

### *Cicli di cristallizzazione del sale*

I sali solubili presenti sui muri in pietra o in mattoni possono dissolversi e ricristallizzarsi a causa delle variazioni di temperatura e umidità, causando cicli di cristallizzazione che generano croste bianche (Fig. 5) e la presenza di stress meccanici, nonché deterioramento a lungo termine (Brimblecombe 2013). Alcuni sali, come il solfato di sodio e la mirabilite, esercitano pressioni elevate durante questi cicli, aumentando il danno (Espinosa, Franke e Deckelmann 2008). Piccole variazioni dell'umidità relativa influenzano significativamente questi processi, con danni che si manifestano sia internamente (subflorescenza) sia in superficie (efflorescenza) (Brimblecombe, Grossi e Harris 2011). A causa dei cambiamenti climatici, soprattutto nella stagione estiva in Europa centrale, si prevede un aumento di questi cicli di cristallizzazione, con conseguente maggiore rischio di degrado (Brimblecombe e Grossi 2007); (Sabbioni, Bonazza, et al. 2010).



*Fig. 2. Superfice metallica attaccata dalla ruggine e dalla corrosione a causa dell'esposizione in ambiente umido.*



*Fig. 3. Esempio di degradazione per corrosione di un elemento decorativo in pietra, dovuta all'azione di piogge acide e degli inquinanti atmosferici che generano acidificazione e dissoluzione del materiale, nonché annerimenti e croste nere.*



*Fig. 4. Crescita di licheni e microrganismi su superficie lapidea esposta agli agenti atmosferici. La colonizzazione biologica, favorita da condizioni di umidità e temperatura elevate, provoca alterazioni cromatiche e microdisgregazione del substrato, contribuendo al biodeterioramento del materiale.*

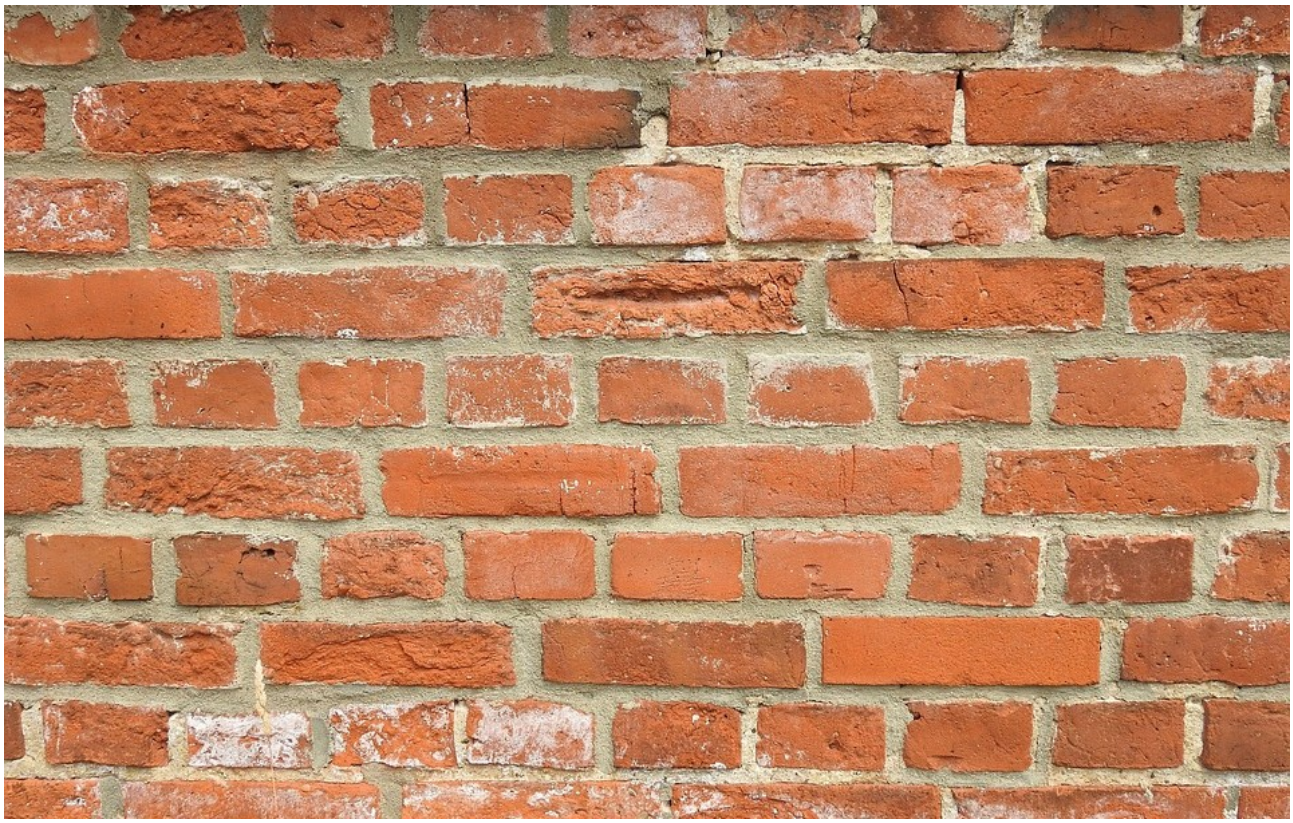


*Fig. 5. Formazione di efflorescenze saline su superficie muraria.*

### 1.2.3 Processi derivanti dai cambiamenti nell'intensità e nella direzione del vento

I cambiamenti climatici, alterando in modo significativo i regimi meteorici in tutto il mondo, intensificano fenomeni quali forti raffiche di vento e cambiamenti nella velocità, direzione e intensità del vento. Queste modifiche hanno conseguenze dirette sul patrimonio culturale in quanto aggravano i processi di degrado di edifici storici e siti archeologici, spesso già vulnerabili per età, materiali e tecniche costruttive originarie. In particolare, l'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi ventosi durante le tempeste può compromettere la stabilità strutturale degli edifici storici e dei siti archeologici, fino a provocarne il crollo (Yidan, et al. 2022) (Hegyi, et al. 2022). Il vento, inoltre, trasporta inquinanti, sali e particelle abrasive come sabbia e polvere, che possono accelerare il degrado dei materiali del patrimonio culturale, specialmente in ambienti aridi dove è più marcata l'erosione eolica (Fig. 6) (Sabbioni, Bonazza, et al. 2010); (Hughes, et al. 2023). Tra i fenomeni più dannosi rientrano la progressiva erosione delle superfici in pietra, l'alveolizzazione, l'alterazione della texture originaria della pietra e la micro-picchiettatura delle superfici, oltre a processi di degrado indotti dalla combinazione di vento e pioggia in contesti di architettura in terra cruda. Questi meccanismi possono compromettere non solo la leggibilità estetica, ma anche l'integrità fisica delle superfici (Bonazza, Sabbioni, et al. 2009); (Richards, et al. 2020).
Particolarmente dannosa è poi anche la pioggia battente obliqua (Wind-Driven Rain – WDR), un fenomeno meteorologico sempre più frequente e intenso. La WDR combina l'azione del vento con precipitazioni diagonali che colpiscono direttamente le superfici verticali esposte. Oltre a causare abrasione superficiale su materiali edilizi e pitture rupestri, può determinare l'accumulo di umidità a lungo termine all'interno delle murature, fenomeni di infiltrazione, cicli di bagnato/asciutto e gelo/disgelo e favorire processi di migrazione e cristallizzazione dei sali (Dukhan e Sushama 2021); (Erkal, D'Ayala e Sequeira 2012). Questi, a loro volta, possono provocare efflorescenze saline, decolorazione, distacchi di intonaci e danni estetici e strutturali (ICOMOS 2019). Inoltre, un'alterazione dell'efficienza igrotermica dell'involucro edilizio può compromettere le prestazioni termiche e la conservazione del patrimonio architettonico, aggravando ulteriormente i fenomeni di degrado in un contesto di mutamenti climatici globali.



*Fig. 6. Erosione meccanica su muratura in mattoni. Si nota la perdita di materiale e l'arrotondamento degli spigoli dovuti all'azione combinata del vento e delle piogge che causano la progressiva disgregazione superficiale.*

| RISCHI CRONICI | RISCHI CLIMATICI | PROCESSI COINVOLTI | IMPATTI SUL PATRIMONIO |
|---|---|---|---|
| | Cambiamenti di temperatura | Cicli di gelo-disgelo | Danni strutturali ai materiali da costruzione; erosione delle superfici di pietra, laterizi e ceramiche. |
| | | Termoclastismo | Microfessurazione e esfoliazione della pietra; erosione superficiale dei materiali lapidei. |
| | Cambiamenti delle precipitazioni | Corrosione | Corrosione e ossidazione dei metalli; indebolimento strutturale.<br><br>Recessione superficiale dei materiali lapidei; dissoluzione del calcare; formazione di croste nere e annerimenti. |
| | | Degrado biologico | Crescita di alghe, muschi e licheni con alterazioni cromatiche; marcescenza del legno per funghi; deterioramento da insetti xilofagi. |
| | | Cicli di cristallizzazione del sale | Efflorescenze e subflorescenze sulle superfici. |
| | Cambiamenti nell'intensità e direzione del vento | Erosione eolica | Erosione superficiale dei materiali lapidei. |
| | | Pioggia battente (WDR) | Infiltrazioni; azione capillare amplificata dall'umidità del terreno; periodi prolungati di umidità; accumulo di umidità nelle pareti. |

*Tabella 1. Rischi cronici e climatici che influenzano il patrimonio culturale, con i processi fisico-chimici e biologici coinvolti e gli impatti sui materiali da costruzione e sulle superfici lapidee.*

## 1.3 Le strategie per la salvaguardia del patrimonio mondiale

La questione degli impatti del cambiamento climatico sul patrimonio è stata portata all'attenzione del Comitato del Patrimonio Mondiale, per la prima volta, nel 2004. In questa occasione, diverse organizzazioni non governative (ONG) di vari Paesi presentarono quattro petizioni al Comitato del Patrimonio Mondiale, chiedendo l'inserimento di alcuni siti[1] nella Lista del Patrimonio Mondiale in Pericolo a causa dei danni subiti dal cambiamento climatico (Thorson 2007).
Nel 2005, in risposta alle segnalazioni ricevute, l'UNESCO ha riconosciuto il cambiamento climatico come una minaccia per l'integrità dei siti e causa di deterioramento del loro valore universale eccezionale. Pertanto, ha esortato gli Stati membri a includere, nei dossier di candidatura, misure di risposta adeguate[2]. Sempre in quell'occasione, l'UNESCO ha inoltre richiesto la creazione di un gruppo di esperti per studiarne gli effetti sul patrimonio mondiale[3] (UNESCO, World Heritage Committee, decision 29 COM 7B.a 2005).
Nel 2006, in collaborazione con gli organi consultivi del Comitato (ICCROM, ICOMOS, IUCN), è stata redatta la relazione "*Predicting and Managing the Effects of climate change on World Heritage*", accompagnata dalla "*Strategy to Assist States Parties to the Convention to Implement Appropriate Management Responses",* una strategia di supporto agli Stati membri per l'attuazione di risposte adeguate finalizzate a proteggere il valore universale eccezionale, l'integrità e l'autenticità dei siti del patrimonio dagli effetti negativi dei cambiamenti climatici[4] (UNESCO 2006).
Questo percorso ha portato, nel 2007, all'adozione del "*Policy Document on the Impacts of Climate Change on World Heritage Properties" incentrato* sugli impatti del cambiamento climatico sui beni del Patrimonio Mondiale, la cui applicazione viene caldamente raccomandata a tutti gli Stati membri. Il documento evidenzia come, per tutelare il patrimonio mondiale, sia essenziale adottare un approccio integrato basato sulla collaborazione con esperti e partner specializzati nel settore del cambiamento climatico. I siti UNESCO devono inoltre svolgere un ruolo attivo nella sensibilizzazione sull'impatto del clima e nella diffusione di buone pratiche di gestione. Il cambiamento climatico deve essere preso in considerazione in tutte le fasi della gestione dei siti, utilizzando gli strumenti esistenti per affrontarne le minacce e aggiornando le linee guida operative quando necessario (UNESCO 2007).

Parallelamente, in presenza di una consapevolezza crescente, la comunità scientifica ha continuato negli anni successivi a produrre evidenze sempre più allarmanti sull'entità e sulle conseguenze della crisi climatica. Tuttavia, nonostante le numerose iniziative intraprese nel 2006 e 2007, il cambiamento climatico è stato ufficialmente integrato nelle Linee Guida Operative solo un decennio più tardi (Lafrenz Samuels e Platts 2023).
Le Operational Guidelines, aggiornate costantemente, hanno incluso nel 2019 il cambiamento climatico tra i rischi da considerare nei piani di gestione dei siti del Patrimonio Mondiale. Da allora è obbligatorio effettuare Valutazioni di Impatto sul Patrimonio (HIA) e/o Valutazioni Ambientali Strategiche (SEA) come prerequisito per ogni progetto di sviluppo nei siti o nelle aree circostanti[5]. Queste valutazioni devono identificare alternative meno impattanti, analizzare effetti positivi e negativi sul Valore Universale Eccezionale (OUV) e proporre misure di mitigazione per prevenire il degrado. L'obiettivo è garantire la protezione a lungo termine del patrimonio e rafforzarne la resilienza a disastri e cambiamenti climatici (UNESCO 2019).

---

*[1] I siti coinvolti erano il Parco nazionale di Sagarmatha (Nepal), il Parco nazionale di Huascarán (Perù), la Grande Barriera Corallina (Australia), il Parco Internazionale della Pace Waterton-Glacier (USA e Canada) e la Barriera Corallina del Belize. Questi luoghi subiscono due gravi effetti del cambiamento climatico: sbiancamento dei coralli e scioglimento dei ghiacciai.*
*2 UNESCO, decision 29 COM 7B.a, punto 6 (2005), "The World Heritage Committee encourages all States Parties to seriously consider the potential impacts of climate change within their management planning, in particular with monitoring, and risk preparedness strategies, and to take early action in response to these potential impacts".*
*3 UNESCO, decision 29 COM 7B.a, punto 6 (2005), "The World Heritage Committee requests the World Heritage Centre […] to establish a broad working group of experts to: a) review the nature and scale of the risks posed to World Heritage properties arising specifically from climate change; and b) jointly develop a strategy to assist States Parties to implement appropriate management responses".*
*4 UNESCO, decision 30 COM 7.1, punto 6 (2006), "The World Heritage Committee endorses the Strategy to assist States Parties to implement appropriate management responses described in Document WHC-06/30.COM/7.1, and requests the Director of the World Heritage Centre to lead the implementation of the Global level actions described in the Strategy through extrabudgetary funding and also takes note of the report on Predicting and managing the impacts of Climate Change on World Heritage".*
*5 UNESCO, decision 43 COM 11A, punto 118bis, "States Parties shall ensure that Environmental Impact Assessments, Heritage Impact Assessments, and/or Strategic Environmental Assessments be carried out as a prerequisite for development projects and activities that are planned for implementation within or around a World Heritage property. […] This will ensure the long-term safeguarding of the Outstanding Universal Value, and the strengthening of heritage resilience to disasters and climate change."*

Nel 2023, durante la 24ª sessione dell'assemblea generale degli stati parti alla convenzione sulla protezione del patrimonio culturale e naturale mondiale, viene pubblicato nella sua versione definitiva il documento di policy *Policy Document on the Impacts of Climate Change on World Heritage Properties*. Il documento viene elaborato per colmare le lacune presenti nella sua precedente versione del 2007, tenendo conto delle politiche e delle strategie internazionali già adottate, come l'Agenda 2030 delle Nazioni Unite per lo Sviluppo Sostenibile (2015), l'Accordo di Parigi adottato nell'ambito della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (2015) e i rapporti dell'IPCC, il Documento Policy per l'Integrazione di una Prospettiva di Sviluppo Sostenibile nei Processi della Convenzione sul Patrimonio Mondiale (2015), la Nuova Strategia dell'UNESCO per l'Azione sul Cambiamento Climatico (2017) e la Dichiarazione dell'UNESCO sui Principi Etici in Relazione al Cambiamento Climatico (2017) (UNESCO 2023). Al suo interno fornisce un quadro strategico-operativo volto a supportare gli Stati Parte nella piena integrazione delle misure di contrasto e adattamento climatico nella gestione dei beni del Patrimonio. Tale documento non introduce nuovi vincoli giuridici per gli Stati Parte, ma rafforza l'efficacia dei meccanismi esistenti individuando un insieme di obiettivi da conseguire entro il 2030.

Tali obiettivi si fondano su:

- *Valutazione del rischio climatico*

Entro il 2030, gli Stati Parte dovranno sviluppare, adottare e condividere strumenti metodologici e potenziare le competenze necessarie per valutare in maniera sistematica i rischi derivanti dai cambiamenti climatici, identificando impatti potenziali – reversibili e irreversibili – sugli attributi che conferiscono *Valore Universale Eccezionale* (VUE) ai beni iscritti. Le valutazioni effettuate dovranno essere integrate nei processi ufficiali della Convenzione, quali il *Rapporto Periodico* e le relazioni sullo stato di conservazione (rif. Sezione D.1).

- *Adattamento climatico*

Entro la stessa scadenza, gli Stati Parte sono chiamati a sviluppare e implementare, a scala multilivello, solidi quadri normativi e operativi per l'adattamento climatico, da integrare nei *Piani Nazionali di Adattamento* (NAP). Tali strumenti dovranno dimostrare efficacia nel monitoraggio dei rischi, nella valutazione delle vulnerabilità e nella loro riduzione, contribuendo al rafforzamento della resilienza climatica dei beni culturali, naturali e misti (rif. Sezione D.2).

- *Mitigazione climatica*

Nel rispetto degli impegni assunti attraverso l'Accordo di Parigi, gli Stati Parte dovranno sviluppare e attuare misure di mitigazione coerenti, volte a ridurre le emissioni nette di gas serra generate direttamente o indirettamente dai beni del Patrimonio Mondiale. Le strategie dovranno includere, ove pertinente, interventi di conservazione e ripristino degli ecosistemi naturali con funzione di *carbon sink* (serbatoi di carbonio), assicurando al contempo la protezione degli attributi del VUE (rif. Sezione D.3).

- *Condivisione delle conoscenze, rafforzamento delle capacità e sensibilizzazione*

Infine, entro il 2030, gli Stati Parte dovranno aver implementato programmi strutturati di capacity building, sensibilizzazione e divulgazione, orientati alla promozione della consapevolezza pubblica e istituzionale sui rischi climatici per il patrimonio. Tali attività dovranno comprendere iniziative di scambio di buone pratiche, formazione e promozione dei beni Patrimonio Mondiale come casi studio emblematici di azione climatica efficace (rif. Sezione D.4).

In questo quadro più ampio di azione e consapevolezza, tra le molteplici strategie volte alla salvaguardia e protezione del patrimonio mondiale dai rischi naturali, questa tesi pone particolare attenzione all'importanza di un utilizzo consapevole e sostenibile delle risorse, alla promozione della resilienza climatica e alla gestione efficace delle emissioni di gas a effetto serra. In particolare, il focus sarà rivolto agli edifici storici, nei quali tali strategie rappresentano leve fondamentali per contrastare gli impatti del cambiamento climatico e preservare il valore culturale e materiale nel tempo.
Il patrimonio storico, infatti, contribuisce in modo significativo alle emissioni globali di gas serra, anche a causa dell'elevata quota di edifici costruiti prima dell'introduzione di normative energetiche moderne, che presentano quindi consumi energetici elevati e inefficienti. Migliorare l'efficienza energetica di questo patrimonio rappresenta

pertanto una leva strategica non solo per la conservazione, ma anche per la mitigazione degli effetti del cambiamento climatico. In questo contesto si inseriscono le recenti direttive europee, come la revisione della Direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia (EPBD), che stabilisce obiettivi vincolanti per il miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici, inclusi quelli storici, in vista della neutralità climatica al 2050.

## 1.4 La questione dell'efficientamento energetico del patrimonio storico

La dipendenza da fonti energetiche, a livello globale, è aumentata a un ritmo allarmante (Martinez-Molina, et al. 2016). Secondo l'International Energy Agency (IEA), nel 2024 la domanda energetica è cresciuta del 2,2%, un tasso significativamente superiore alla media annua dell'1,3% registrata tra il 2013 e il 2023. Sebbene gran parte di questa crescita sia stata soddisfatta da fonti a basse emissioni di carbonio, le emissioni di anidride carbonica ($CO_2$) del settore energetico sono comunque aumentate. Seppur l'innalzamento sia avvenuto con un ritmo più contenuto rispetto all'anno precedente, a causa dell'aumento dello 0,8% nel 2024 si è raggiunto il picco storico di 37,8 Gt di $CO_2$. Questo incremento ha contribuito a livelli record di concentrazione atmosferica di $CO_2$ pari a 422,5 ppm nel 2024, circa 3 ppm in più rispetto al 2023 e il 50% in più rispetto ai livelli preindustriali (IEA, 2024).
Questo scenario evidenzia il delicato equilibrio tra sicurezza energetica e riduzione delle emissioni, una sfida particolarmente rilevante per il settore dell'edilizia, responsabile di oltre un terzo del consumo finale globale di energia e delle relative emissioni. Gli edifici rivestono quindi un ruolo cruciale nella decarbonizzazione e nella resilienza a livello comunitario, ma sarà necessaria una svolta significativa per allineare il settore all'obiettivo della neutralità climatica entro il 2050. Secondo lo Scenario Net Zero Emissions by 2050 (NZE Scenario) dell'IEA, le emissioni operative e incorporate dovranno diminuire rispettivamente di almeno il 45% e il 25% entro il 2030 (IEA 2024).
L'Unione Europea ha adottato negli anni varie direttive per migliorare l'efficienza energetica degli edifici e ridurre le emissioni, promuovendo l'uso di fonti rinnovabili. Un passaggio chiave è la nuova Direttiva EPBD 2024/1275, parte del pacchetto "Fit for 55", che impone edifici a zero emissioni entro il 2030 e punta alla neutralità climatica del patrimonio edilizio entro il 2050.
La normativa prevede eccezioni per gli edifici storici, che possono essere esclusi dagli obblighi se gli interventi comprometterebbero il loro valore culturale. Ogni Stato membro può quindi adattare le prescrizioni per tutelare il patrimonio architettonico e artistico.
Tuttavia, considerando il rilevante peso del patrimonio storico europeo – con l'Italia al primo posto per numero di siti UNESCO – e la diffusione capillare dell'edilizia storica che caratterizza gran parte del tessuto edilizio minore nei centri storici, risulta fondamentale non trascurare questo settore nelle strategie di riqualificazione energetica (Almeida, et al. 2025).
Gli edifici storici — definiti come tali quelli costruiti prima del 1945 — rappresentano circa un quarto del patrimonio edilizio europeo (Cecchini, Magrini e Morandotti 2020) e saranno fondamentali per il raggiungimento degli obiettivi energetici futuri (Hao, et al. 2020). Più in particolare, lo studio European Building Stock Analysis di Gevorgian et al. (2021) evidenzia come, nel settore residenziale, il 31% della superficie sia occupato da edifici costruiti prima del 1945 e un ulteriore 20% da quelli costruiti tra il 1945 e il 1969, per un totale del 51%. Gli edifici costruiti negli anni 2000 rappresentano il 16%, quelli post-2010 il 12%, mentre quelli degli anni '70, '80 e '90 coprono percentuali inferiori (9%, 6% rispettivamente). Per il patrimonio pubblico, gli edifici pre-1945 coprono il 29% della superficie, seguiti da quelli degli anni 2000 (17%), anni '90 (15%), anni '80 (13%) e post-2010 (11%) (Gevorgian, et al. 2021). La maggior parte di essi (quasi il 75%) risulta inefficiente dal punto di vista energetico secondo gli standard edilizi attuali, principalmente a causa dell'obsolescenza delle strutture e degli impianti (Filippidoou e Jimenez Navarro 2019). Solo circa l'1% di questo patrimonio viene ristrutturato ogni anno, pertanto, il suo potenziale di risparmio energetico è elevato (E. Lucchi 2022).
Il tutto viene reso ancora più esplicito dai dati che mostrano che il consumo specifico di energia finale (FEC) per il riscaldamento degli ambienti (SH) e l'acqua calda sanitaria (DHW) nell'UE mostra una diminuzione dagli edifici costruiti prima del 1945 fino a quelli post-2010. In generale, gli edifici residenziali costruiti prima del 1945 e tra il 1945 e il 1969 consumano rispettivamente circa 252 e 223 kWh/m² all'anno di FEC specifico. Al contrario, quelli costruiti negli anni 2000 e post-2010 consumano rispettivamente circa 125 e 99 kWh/m² all'anno. Gli edifici del settore dei servizi costruiti prima del 1945 e tra il 1945 e il 1969 consumano circa 171 e 162 kWh/m² all'anno. In confronto, quelli costruiti negli anni 2000 le post-2010 consumano rispettivamente circa 112 e 99 kWh/m² all'anno (Gevorgian, et al. 2021).
Nel caso specifico dell'Italia gli edifici pre-industriali costruiti prima del 1945 rappresentano circa il 30% del totale nazionale. La quota più consistente del patrimonio edilizio italiano, circa il 60%, è però costituita dagli edifici realizzati tra il 1946 e il 1991, ovvero prima dell'entrata in vigore della Legge n. 10/1991, la prima normativa nazionale finalizzata alla riduzione dei consumi energetici nel settore edilizio. Gli edifici costruiti successivamente, tra il 1991 e il 2001, presentano in genere prestazioni energetiche superiori (Fabbri, Zuppiroli e Ambrogio 2012)..

È soprattutto nel periodo della ricostruzione post-bellica e del boom economico che si registra una forte espansione edilizia. In quegli anni, la necessità di rispondere rapidamente alla domanda abitativa portò all'impiego di materiali economici e a tecniche costruttive poco attente all'isolamento termico. Questo approccio determinò la nascita di un parco edilizio fortemente energivoro. Come evidenziato dallo studio di Pezzutto et al. (2018), il periodo compreso tra il 1945 e il 1960 rappresenta il picco nei consumi energetici specifici. Durante questi anni si diffusero strutture in cemento armato con tamponamenti in muratura, infissi a vetro singolo e impianti termici poco efficienti, con rendimenti inferiori al 70%.
A partire dagli anni '60 e in maniera più significativa dagli anni '90, si è invece assistito a una graduale riduzione dei consumi grazie all'introduzione di normative sull'efficienza energetica e alla diffusione di pratiche costruttive più sostenibili (Pezzutto, et al. 2018).
Considerata la predominanza del costruito risalente a questi decenni e il suo impatto sui consumi nazionali, è evidente quanto sia prioritario concentrarsi sulla riqualificazione energetica degli edifici esistenti (Vieites, Vassileva e Arias 2015). Intervenire potrebbe sembrare relativamente semplice, poiché molti di questi edifici sono stati realizzati prima dell'introduzione di normative specifiche in materia di efficienza energetica, con un uso molto limitato di materiali isolanti, soprattutto negli edifici costruiti prima del 1980 (Mazzarella 2015).
Le carenze dell'involucro edilizio emergono anche dalla tipologia di vetri installati: il vetro singolo è largamente diffuso negli edifici storici (pre-1945) e in quelli realizzati tra il 1945 e il 1990, mentre il vetro doppio inizia a comparire con maggiore frequenza solo successivamente. Nei fabbricati più recenti (anni 2000 e post-2010), prevale l'uso di vetro basso-emissivo, mentre il vetro triplo, seppur più performante, è ancora poco diffuso (Gevorgian, et al. 2021).
Analogamente, anche i sistemi impiantistici riflettono un'evoluzione graduale: il gas rappresenta ancora oggi il principale combustibile per il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria, seguito dal combustibile liquido. Le fonti rinnovabili, come le pompe di calore (HP) e i sistemi solari termici, mostrano una penetrazione molto limitata — rispettivamente circa l'8% e il 13% — e sono presenti principalmente negli edifici di nuova costruzione (Gevorgian et al. 2021).
In questo contesto, l'efficientamento energetico del patrimonio edilizio storico rappresenta una sfida prioritaria, ma anche particolarmente complessa. L'ottimizzazione delle prestazioni energetiche deve infatti essere perseguita nel pieno rispetto delle caratteristiche strutturali e dei valori culturali che definiscono questi edifici. Come evidenziato anche da Lidelöw et al. (2019), l'incremento dell'efficienza energetica negli edifici storici è spesso ostacolato dalla necessità di tutelarne l'integrità fisica e l'autenticità architettonica, limitando o escludendo del tutto l'applicazione di soluzioni standard (Lidelow, et al. 2019). Per questo motivo, è fondamentale adottare approcci integrati, capaci di combinare tecnologie appropriate e strategie di gestione dei comportamenti d'uso, riducendo al minimo l'impatto sugli edifici e garantendone la conservazione nel tempo. In tal senso, progetti dimostrativi e la condivisione di buone pratiche rappresentano strumenti efficaci per promuovere interventi consapevoli e replicabili.

Negli ultimi anni, il tema della riqualificazione energetica degli edifici storici ha visto un importante cambiamento di prospettiva, come sottolineato dalla revisione della letteratura condotta da Amanda L. Webb (2017). Oggi questi interventi non sono più visti solo come un rischio per l'integrità degli edifici, ma come un'opportunità strategica per conciliare la tutela del patrimonio con la necessità di affrontare le sfide ambientali contemporanee. Tuttavia, Webb evidenzia come il miglioramento energetico debba bilanciare molteplici aspetti: la conservazione storica, il comfort degli utenti, la sostenibilità economica e l'impatto ambientale complessivo, rendendo la pianificazione degli interventi complessa e spesso unica per ogni edificio. Questo rende la pianificazione degli interventi molto complessa e spesso diversa da caso a caso. Per affrontare questa complessità, la ricerca sottolinea l'importanza di migliorare gli strumenti di analisi e simulazione, sviluppando software e metodi che tengano conto delle caratteristiche uniche degli edifici storici. Inoltre, è fondamentale raccogliere dati reali, come le proprietà dei materiali o le condizioni climatiche interne, per ottenere previsioni più precise e quindi interventi più efficaci (Webb 2017).

Questo aspetto emerge anche negli studi di Ruggeri et al. (2022). La ricerca, che sottolinea la necessità di strategie e metodologie che rispondano agli obiettivi europei di efficienza energetica, spostando il focus da singoli edifici a interi patrimoni, quartieri e distretti integrati, individua cinque aspetti chiave per il retrofit su larga scala. Questi aspetti riguardano: la modellazione e valutazione energetica, la progettazione degli interventi, i criteri per supportare le decisioni, l'allocazione ottimale delle risorse e la gestione del rischio e dell'incertezza. Tuttavia, la maggior parte degli studi si concentra su uno solo di questi aspetti, senza adottare una visione realmente integrata. Le tecniche impiegate sono spesso quelle standard suggerite dalla normativa europea – come l'uso di edifici di riferimento per

stimare la domanda energetica, l'approccio cost-optimal per selezionare le strategie di retrofit più vantaggiose e l'analisi di sensitività per gestire il rischio – che, pur essendo efficaci e ampiamente applicate, mostrano margini di miglioramento. In particolare, emerge la necessità di metodologie di valutazione energetica più robuste e affidabili, capaci di coniugare velocità ed efficacia con una ragionevole richiesta di dati (Ruggeri, Gabrielli e Scarpa 2020).

Lo studio condotto da Nair et al. (2022) approfondisce le sfide tecniche e le potenzialità legate alla riqualificazione energetica degli edifici storici, sottolineando la complessità dell'argomento e la necessità di approcci personalizzati. Dalla revisione della letteratura da loro condotta emerge che gli interventi di retrofit possono portare a risparmi energetici significativi, ma la loro efficacia è fortemente dipendente dal contesto: non esiste una soluzione universale, poiché ogni edificio presenta caratteristiche uniche. In particolare, vi è ancora mancanza di consenso, ad esempio, sui materiali più adatti per l'isolamento delle pareti nei beni culturali.
I lavori analizzati evidenziano anche le principali criticità tecniche legate al retrofit, come il rischio di formazione di muffa, danni strutturali, alterazioni estetiche, problemi alla conservazione degli interni e variazioni nei livelli di illuminazione. Tuttavia, la letteratura suggerisce che esistono soluzioni per superare molti di questi ostacoli, purché l'intervento sia ben pianificato e adeguatamente monitorato.
Per supportare il processo decisionale in contesti così complessi, vengono suggeriti strumenti come l'analisi multicriterio e toolkit digitali, oltre a risorse tecniche disponibili tramite enti come Historic England o Historic Environment Scotland, inclusi webinar e linee guida specifiche.
Lo studio sottolinea, inoltre, che molte ricerche si concentrano su singoli interventi tecnici, senza considerare la necessità di un approccio integrato e sistemico all'edificio. La norma europea EN 16883 fornisce linee guida utili in questo senso, ma resta ancora limitata la quantità di ricerche che analizzano l'impatto del retrofit su tutto il sistema edificio, considerando anche l'interazione con l'utenza (Nair, Verde e Olofsson 2022).

Anche lo studio di Panakaduwa et al. (2024), approfondendo le sfide legate alla riqualificazione energetica degli edifici storici, con particolare attenzione alla durabilità e alla conservazione dei materiali originali, pone l'accento sulla necessità di un approccio multidisciplinare che integri conoscenze di conservazione, ingegneria strutturale e termotecnica per garantire interventi efficaci e compatibili. Lo studio propone l'adozione di metodi diagnostici avanzati, come il monitoraggio microclimatico in situ e l'analisi dei materiali, per definire strategie di retrofit calibrate sulle specifiche condizioni di ogni edificio. Panakaduwa conclude sottolineando che il successo della riqualificazione energetica nei beni storici passa attraverso un equilibrio delicato tra miglioramento delle prestazioni energetiche e salvaguardia dell'identità materiale e culturale dell'edificio. Lo studio sottolinea come interventi mal progettati possano compromettere la traspirabilità delle murature tradizionali, favorendo l'accumulo di umidità e il conseguente degrado fisico e biologico. Panakaduwa evidenzia quindi l'importanza di adottare soluzioni di isolamento che rispettino le caratteristiche igrotermiche degli edifici storici, favorendo la regolazione naturale dell'umidità e prevenendo fenomeni di condensa interstiziale (Panakaduwa, Caates e Munir 2024).

In linea con queste riflessioni, anche lo studio di Pereira et al. (2021) propone un quadro metodologico multidisciplinare per la riabilitazione sostenibile e la riqualificazione energetica degli edifici storici culturali destinati all'istruzione superiore. È emerso come questi edifici debbano necessariamente essere aggiornati per rispondere alle nuove esigenze d'uso, garantendo comfort termico, qualità ambientale interna (IEQ) ed efficienza energetica. Le strategie di intervento devono inoltre tenere conto delle sfide imposte dai cambiamenti climatici e dal crescente flusso turistico, senza però compromettere la conservazione del patrimonio culturale e l'identità storica degli edifici. Un elemento centrale del lavoro è l'importanza del coinvolgimento attivo di tutti gli attori interessati nel processo decisionale, tra cui proprietari, professionisti, ingegneri, architetti, comunità accademica e utenti o visitatori. Il quadro metodologico proposto punta alla riduzione dei consumi energetici e delle emissioni di $CO_2$, promuovendo allo stesso tempo l'impiego di tecnologie costruttive innovative e sistemi impiantistici più efficienti.
La ricerca sottolinea inoltre il valore delle metodologie multidisciplinari digitalizzate, suggerendo di convertirle in librerie virtuali open-access, come quelle basate su HBIM (Historic Building Information Modeling), per favorire interventi sostenibili su scala globale.
Infine, lo studio evidenzia alcuni passaggi fondamentali da includere nel processo di riqualificazione: la caratterizzazione in situ del patrimonio edilizio, lo sviluppo di campagne di monitoraggio nelle diverse fasi dell'intervento, la creazione di modelli di simulazione validati per prevedere il comportamento dell'edificio in diversi scenari e la valutazione delle prestazioni termiche ed energetiche prima e dopo l'intervento. Questi elementi sono

considerati essenziali per garantire interventi efficaci, sostenibili e rispettosi del valore storico degli edifici (Pereira, Tavares e Soares 2021).

In continuità con questi contributi, Herrera-Avellanosa et al. (2024) hanno analizzato 69 casi di riqualificazione energetica di edifici storici in 12 Paesi, al fine di individuare sfide e buone pratiche per coniugare efficienza energetica e tutela del patrimonio. Gli edifici considerati variano per localizzazione, dimensioni, destinazione d'uso, livello di tutela ed epoca di costruzione, dal pre-1600 al contemporaneo e tutti mirano a elevati standard prestazionali. Lo studio evidenzia che l'isolamento interno delle pareti perimetrali è stato l'intervento quasi unanime, scelto per preservare le finiture esterne, spesso integrato con sistemi di controllo dell'umidità per evitare condensa. L'uso crescente di materiali ecocompatibili come canapa, legno e cellulosa rappresenta una tendenza positiva. L'isolamento esterno, meno diffuso per ragioni conservazionistiche, ha comunque mostrato prestazioni superiori. Anche coperture e solai sono stati riqualificati mantenendo la forma originaria, mentre per gli infissi si è variato tra restauro, sostituzione con vetrocamera e produzione artigianale per preservare l'estetica nei contesti vincolati. Gli impianti termici sono stati ammodernati prevalentemente con caldaie a biomassa e pompe di calore, con tendenza all'integrazione di reti di teleriscaldamento da fonti rinnovabili. Oltre il 65% dei progetti ha incluso l'installazione di fonti rinnovabili, in particolare fotovoltaico e biomassa. La ventilazione meccanica controllata con recupero di calore, adottata in oltre quaranta casi, si è rivelata tecnicamente fattibile anche negli edifici storici, soprattutto in contesti urbani (Herrera-Avellanosa, et al. 2024).

Galatioto (2017) analizza specificamente il contesto italiano, sottolineando come le rigide normative e i vincoli conservativi limitino le possibilità di intervento, soprattutto sull'involucro edilizio, ma non impediscano l'adozione di strategie diversificate e mirate. Tra le azioni più significative, l'isolamento dell'involucro edilizio risulta la più complessa, soprattutto per i vincoli legati all'intervento sulle facciate esterne; spesso si preferisce un isolamento interno, pur con attenzione ai rischi di condensa. La sostituzione degli infissi è un intervento efficace che consente una riduzione significativa del consumo energetico. Anche il miglioramento degli impianti HVAC è considerato più facilmente realizzabile, specialmente in edifici con riscaldamento centralizzato. Inoltre, le strategie di controllo intelligente di illuminazione e climatizzazione stanno emergendo come strumenti importanti per il risparmio energetico.
Galatioto inoltre pone attenzione al fatto che le fonti rinnovabili e sistemi di accumulo, pur promettenti, trovano ostacoli nell'integrazione nei centri storici; la loro integrazione resta problematica, soprattutto per via delle limitazioni tecniche e normative.
Aggiunge infine un aspetto cruciale: il lungo tempo di ritorno economico di molti interventi, che rappresenta una barriera per i proprietari, sottolineando la necessità di politiche incentivanti e piani energetico-finanziari dedicati (Galatioto, Ciulla e Ricciu 2017).

Parallelamente, anche la ricerca di Buda et al. (2021) analizza le difficoltà legate all'implementazione di soluzioni di riqualificazione energetica negli edifici storici, mettendo in luce come la complessità del contesto normativo – tra vincoli legislativi, esenzioni regolatorie e esigenze di tutela – renda particolarmente difficile la selezione di soluzioni tecniche appropriate. A questo si aggiunge la necessità di conciliare le esigenze energetiche con le esigenze di conservazione, sostenibilità economica e qualità ambientale interna. Buda presenta il progetto IEA-SHC Task 59, che offre un approccio multidisciplinare basato su casi concreti e una vasta gamma di soluzioni testate, favorendo un retrofit compatibile con la tutela del patrimonio. La forza del progetto risiede proprio nel suo approccio multidisciplinare, che ha consentito di identificare interventi energeticamente efficienti e compatibili con la conservazione, offrendo un ampio ventaglio di tecniche e tecnologie concrete.
Un importante risultato del progetto è la creazione dello strumento di supporto alle decisioni HiBERtool, che consente di esplorare e identificare soluzioni di retrofit a livello di dettaglio (es. materiali, sistemi, modalità di installazione), superando il limite degli strumenti esistenti, spesso troppo generici. Il tool rende possibile la trasferibilità delle conoscenze, permettendo a nuovi progetti di attingere all'esperienza accumulata in interventi precedenti. Inoltre, è pensato per essere ampliabile nel tempo con nuovi esempi.
La ricerca evidenzia anche come i criteri di valutazione previsti dalla norma UNI EN 16883:2017 – la quale contiene le linee guida per il miglioramento dell'efficienza energetica edifici storici - necessitino di essere adattati per supportare meglio l'analisi pratica delle soluzioni. Nonostante gli sforzi compiuti nell'ambito del progetto per adattare tali criteri, il processo di valutazione resta complesso, richiedendo attenzione al contesto, agli obiettivi progettuali e agli elementi storici da preservare (Buda, et al. 2021).

Il quadro che emerge converge su alcuni punti chiave: la necessità di un approccio integrato e multidisciplinare, l'importanza della personalizzazione degli interventi in base alle caratteristiche specifiche di ciascun edificio e il ruolo centrale di strumenti avanzati di diagnosi e simulazione per pianificare soluzioni efficaci e compatibili con la conservazione. È evidente che la riqualificazione non rappresenta più solo un rischio per l'identità storica, ma anche un'opportunità per coniugare sostenibilità ambientale e tutela del patrimonio. Tuttavia, persistono criticità tecniche – come la gestione dell'umidità, il rischio di condensa e la scelta dei materiali isolanti – che richiedono valutazioni attente e mirate. L'interesse crescente verso interventi su scala urbana, il coinvolgimento attivo degli stakeholder e la digitalizzazione tramite piattaforme come HBIM indicano un'evoluzione verso processi più partecipativi, documentati e replicabili. In parallelo, l'adozione di fonti rinnovabili, sistemi impiantistici efficienti e materiali naturali testimonia la possibilità di ottenere prestazioni elevate senza compromettere il valore culturale dell'edificio. In quest'ottica, salvaguardare il valore universale eccezionale degli edifici storici si integra con l'impegno globale verso la mitigazione climatica, ponendo il patrimonio costruito come risorsa chiave per uno sviluppo più resiliente e consapevole. In definitiva, il successo della riqualificazione energetica nel contesto storico risiede nella capacità di bilanciare esigenze tecniche, funzionali e conservative, guardando al futuro senza dimenticare il passato.

## 2. IL QUADRO NORMATIVO DELLA RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA NEL CONTESTO CULTURALE DELLA TUTELA E SALVAGUARDIA DEL PATRIMONIO COSTRUITO

Quando si tratta di beni storico-architettonici, le scelte progettuali sono vincolate dalle norme di tutela, che garantiscono la protezione e conservazione per la pubblica fruizione, come stabilito dall'articolo 3, comma 1, del Codice dei Beni Culturali. Tuttavia, l'esigenza di riqualificare il patrimonio edilizio storico solleva interrogativi sull'applicabilità delle norme per il contenimento dei consumi energetici, creando sovrapposizioni tra le normative di tutela e quelle energetiche. Per affrontare queste sfide è fondamentale una conoscenza approfondita di entrambe le normative e delle loro interazioni.

### 2.1 La tutela dei beni culturali

#### 2.1.1 Le carte del restauro

Prima di esaminare la normativa sulla tutela dei beni architettonici, è essenziale considerare le carte del restauro. Sebbene prive di valore legislativo, queste forniscono linee guida fondamentali per la conservazione e il restauro dei beni culturali.

In particolare, sono rilevanti le indicazioni sulla tutela del costruito e dei centri storici, un tema affrontato già dal 1931 con la **Carta di Atene** che rappresentò una prima sintesi delle esperienze europee nella conservazione dei monumenti. Tuttavia, per quanto «*la conferenza constata che nelle condizioni della vita moderna i monumenti del mondo intero si trovano sempre più minacciati dagli agenti esterni*»[6], la carta si concentrava esclusivamente sui monumenti considerati come opere isolate, senza un'attenzione specifica alle città o all'ambiente urbano. Solo poche prescrizioni riguardavano anche il contesto circostante (Nigllio 2012).

La **Carta Italiana del Restauro**, emanata nel 1932, introduce il tema delle integrazioni, sottolineando la necessità di interventi minimi e discreti. Sebbene il documento si riferisca principalmente alle opere di consolidamento o reintegrazione totale o parziale della fabbrica, il principio espresso nell'articolo 7 può essere interpretato in chiave contemporanea anche per le aggiunte tecnologiche. Il testo afferma infatti che «*nelle aggiunte che si dimostrassero necessarie (...) per la pratica utilizzazione del monumento, il criterio essenziale da eseguirsi debba essere, oltre quello di limitare tali elementi nuovi al minimo possibile, anche quello di dare ad essi un carattere di nuda semplicità*»[7]. Questo concetto può essere applicato all'integrazione di impianti di illuminazione, climatizzazione o pannelli per l'efficienza energetica, garantendo che tali interventi siano non invasivi e rispettosi dell'estetica dell'edificio storico, senza alterarne le caratteristiche architettoniche originali.

La **Carta di Venezia** del 1964 amplia il concetto di monumento storico, includendo non solo le opere architettoniche isolate, ma anche il loro contesto urbano e paesaggistico. L'articolo 1 sottolinea come «*la nozione di monumento storico comprende tanto la creazione architettonica isolata quanto l'ambiente urbano o paesistico che costituisca la testimonianza di una civiltà particolare, di un'evoluzione significativa o di un avvenimento storico. Questa nozione si applica non solo alle grandi opere ma anche alle opere modeste che, con il tempo, abbiano acquistato un significato culturale*»[8]. Si sottolinea quindi come il patrimonio culturale debba essere considerato nella sua interezza, comprendendo sia le grandi realizzazioni architettoniche sia le costruzioni più modeste che, nel tempo, hanno acquisito un valore culturale.

Sempre secondo la Carta di Venezia, La conservazione di un bene architettonico è possibile solo assegnandogli funzioni compatibili con le sue caratteristiche strutturali[9]. Questo implica adattarlo a esigenze moderne diverse da

---

[6] *Articolo IV, Carta del Restauro di Atene, Conferenza Internazionale di Atene del 1931.*
[7] *Articolo 8, Carta Italiana del Restauro del 1932.*
[8] *Carta di Venezia del 1964, art. 1, «La nozione di monumento storico comprende tanto la creazione architettonica isolata quanto l'ambiente urbano o paesistico che costituisca la testimonianza di una civiltà particolare, di un'evoluzione significativa o di un avvenimento storico. Questa nozione si applica non solo alle grandi opere ma anche alle opere modeste che, con il tempo, abbiano acquistato un significato culturale».*
*9 Carta di Venezia del 1964, art. 5, «La conservazione dei monumenti è sempre favorita dalla loro utilizzazione in funzioni utili alla società: una tale destinazione è augurabile ma non deve alterare la distribuzione e l'aspetto dell'edificio. Gli adempimenti pretesi dall'evoluzione degli usi e dei costumi devono essere contenuti entro questi limiti».*

quelle che erano pensate per lui in origine, accettando inevitabili trasformazioni, purché non compromettano i suoi caratteri originari.

Nel 1972, nei dodici articoli della **Carta Italiana del Restauro**, in cui si riconosce prevalente, pur se non esclusiva, la mano di Cesare Brandi, si riconoscono i centri storici come opere d'arte, enfatizzando non solo il valore architettonico, ma anche quello urbanistico. L'articolo 2 afferma che, oltre alle opere già menzionate «*sono assimilate, per assicurarne la salvaguardia e il restauro, i complessi di edifici d'interesse monumentale, storico o ambientale, particolarmente i centri storici*»[10]. Del tutto nuova è poi l'attenzione posta dalla Carta Italiana del Restauro sui danni causati dall'inquinamento atmosferico e dalle condizioni termo-igrometriche. L'articolo 10 infatti stabilisce che gli interventi di conservazione non devono alterare sensibilmente l'aspetto materiale e il colore delle superfici, né modificare in modo permanente l'ambiente storico delle opere. Se modifiche fossero necessarie per la conservazione, devono essere eseguite con discrezione e senza creare confusione riguardo al periodo in cui sono state realizzate[11]. Non si fa tuttavia riferimento alle cause specifiche dei danni o alle opere preventive per evitarli.
L'Allegato d "Istruzioni per la tutela dei Centri Storici" sottolinea poi che per Centri Storici, non si devono considerare solo i vecchi centri urbani, ma anche tutti gli insediamenti che, pur trasformati nel tempo, conservano un valore storico, urbanistico o architettonico. Questo implica una riorganizzazione dell'area nel contesto urbano più ampio[12]. Tuttavia, mentre vengono fornite indicazioni teoriche per la tutela dei centri storici, manca ancora un approccio pratico alla loro conservazione. Nonostante il riconoscimento del valore dei centri storici, la tutela pratica degli edifici abitativi resta carente.

La **Carta di Amsterdam**, emanata nel 1975 in occasione del congresso sul patrimonio architettonico europeo svoltosi ad Amsterdam in quello stesso anno, introduce per la prima volta il concetto di conservazione integrata. La conservazione integrata dev'essere vista come parte della pianificazione urbana, non escludendo l'uso di un linguaggio architettonico moderno nei contesti storici, a condizione che si rispetti il contesto ambientale, le proporzioni, la forma, i volumi e i materiali tradizionali [13].
La **Carta di Machu Picchu** del 1978 affronta le sfide poste da tecnologia, trasporti e inquinamento, sottolineando la necessità di un'architettura armoniosa con la natura. In particolare sottolinea come l'inquinamento atmosferico, idrico e acustico, così come la degradazione delle aree urbane, rappresentano gravi rischi per la salute e il benessere umano. Si chiede quindi che la politica urbana includa misure per contrastare questo degrado, incentivando «*immediate misure per evitare che si accentui questa degradazione ambientale e per incentivare il restauro di un ambiente consono alle norme dell'igiene e del benessere umano*»[14]. Tuttavia, la carta non fornisce indicazioni concrete, limitandosi a promuovere la progettazione bioclimatica.

---

*[10] Carta Italiana del Restauro del 1972, art. 2, «Oltre alle opere indicate nell'articolo precedente vengono a queste assimilati, per assicurarne la salvaguardia e il restauro, i complessi di edifici d'interesse monumentale, storico o ambientale, particolarmente i centri storici, le collezioni artistiche e gli arredamenti conservati nella loro disposizione tradizionale; i giardini e i parchi che vengono considerati di particolare importanza».*

*[11] Ministero della Pubblica Istruzione, Carta Italiana del Restauro del 1972, art. 10, «I provvedimenti intesi a conservare dalle azioni inquinanti e dalle variazioni atmosferiche, termiche e igrometriche, le opere di cui agli artt. 1, 2, 3, non dovranno essere tali da alterare sensibilmente l'aspetto della materia e il colore delle superfici, o da esigere modifiche sostanziali e permanenti dell'ambiente in cui le opere storicamente sono state trasmesse. Qualora tuttavia modifiche del genere fossero indispensabili per il superiore fine della conservazione, tali modifiche dovranno essere fatte in modo da evitare qualsiasi dubbio sull'epoca in cui sono state eseguite e con le modalità più discrete».*

*[12] Ministero della Pubblica Istruzione, Carta Italiana del Restauro del 1972, allegato d, Istruzioni per la tutela dei Centri Storici, «Ai fini dell'individuazione dei Centri Storici, vanno presi in considerazione, non solo i vecchi centri urbani tradizionalmente intesi, ma (...) tutti gli insediamenti umani le cui strutture (...) siano state costituite nel passato o, tra quelle successive, quelle eventuali aventi particolare valore di testimonianza storica. Il carattere storico va riferito all'interesse che detti insediamenti presentano quali testimonianze di civiltà del passato e quali documenti di cultura urbana, anche indipendentemente dall'intrinseco pregio artistico o formale».*

*[13] Carta di Amsterdam del 1975, art. 7, «La conservazione integrata è il risultato dell'azione congiunta delle tecniche del restauro e della ricerca delle funzioni appropriate. (...) È necessario notare che questa conservazione integrata non esclude affatto tutta l'architettura moderna dagli insiemi antichi, ma essa dovrà tenere in gran conto il contesto ambientale esistente, rispettare le proporzioni, la forma e la disposizione dei volumi, nonché i materiali tradizionali».*

*[14] Carta di Machu Picchu del 1978, art. 7, «Una delle più serie minacce contro la natura è determinata oggi dall'inquinamento ambientale (...). Tra le caratteristiche inaccettabili delle odierne aree urbane si annoverano eccessive quantità di sostanze tossiche nell'atmosfera, nell'acqua e negli alimenti nonché dannosi livelli di rumore. La politica di piano che sovrintende allo sviluppo urbano deve includere immediate misure per evitare che si accentui questa degradazione ambientale e per incentivare il restauro di un ambiente consono alle norme dell'igiene e del benessere umano. Queste misure possono e devono riflettersi nella programmazione economica e urbanistica, nella progettazione architettonica, nei criteri e nelle normative tecniche, in genere nella politica di sviluppo».*

La **Dichiarazione di Washington**, stilata nel 1987, riconosce che tutte le città, sia nate da uno sviluppo spontaneo che da progetti pianificati, sono espressioni materiali della diversità sociale attraverso la storia e sono, quindi, tutte storiche. La Carta si concentra sulla protezione dei centri storici, minacciati dal degrado e dalla distruzione causati da un modello di urbanizzazione industriale. Il Consiglio Internazionale dei Monumenti e dei Siti (ICOMOS) ha redatto questa Carta per salvaguardare la qualità delle città storiche, preservando il loro valore culturale e sociale e favorendo un adattamento armonioso alla vita contemporanea, attraverso misure di protezione, conservazione, restauro e sviluppo coerente.
Sempre nel 1987, la **Carta C.N.R.** (Conservazione e Restauro degli Oggetti d'Arte e di Cultura), aggiorna la Carta Italiana del Restauro (1972), sostituisce e aggiorna la Carta Italiana del Restauro del 1972, estendendo il concetto di conservazione e restauro a un vasto insieme di oggetti di interesse artistico, storico e culturale soggetti a degrado fisico, chimico e antropico, ma affronta solo marginalmente il tema del recupero tecnologico.
Anche le più recenti **Carte di Cracovia** (2000) e **Betlemme** (2008) non trattano il miglioramento dell'efficienza energetica e il riadeguamento tecnologico. Ne emerge la necessità di aggiornare le carte del restauro, prendendo spunto dalla Carta di Machu Picchu (1978), ancora oggi unico riferimento per l'integrazione tecnologica nel patrimonio costruito.

Di seguito si presenta una sintesi evolutiva delle principali Carte del Restauro e documenti normativi che hanno influenzato la tutela dei beni architettonici e dei centri storici, evidenziandone i contributi chiave e le principali criticità nel corso dei decenni (Tabella 2).

| Decennio | Carta / Documento | Anno | Temi principali e contributi normativi | Note e limiti |
|---|---|---|---|---|
| 1930s | Carta di Atene | 1931 | Prima sintesi europea per la conservazione dei monumenti. Protezione dei monumenti come opere isolate. | Attenzione limitata al contesto urbano e ai centri storici. |
| | Carta Italiana del Restauro | 1932 | Introduzione del principio di interventi minimi e discreti. Integrazione con carattere di "nuda semplicità" per aggiunte necessarie (es. impianti). | Focus principale su consolidamenti e reintegrazioni delle fabbriche. |
| 1960s | Carta di Venezia | 1964 | Estensione del concetto di monumento a contesto urbano e paesaggistico. Importanza delle funzioni compatibili con caratteristiche strutturali. | Introduzione del valore dei contesti urbani, non solo monumenti isolati. |
| 1970s | Carta Italiana del Restauro (Brandi) | 1972 | Riconoscimento dei centri storici come opere d'arte. Attenzione ai danni da inquinamento e alle condizioni termo-igrometriche. | Manca ancora un approccio pratico per la tutela abitativa nei centri storici. |
| | Carta di Amsterdam | 1975 | Introduzione del concetto di conservazione integrata come parte della pianificazione urbana. Accettazione di linguaggio architettonico moderno se rispettoso del contesto. | Primo approccio integrato urbano-architettonico. |
| | Carta di Machu Picchu | 1978 | Prima attenzione ai rischi di inquinamento e degradazione ambientale. Promozione della progettazione bioclimatica. | Indicazioni generali senza indicazioni operative precise. |
| 1980s | Dichiarazione di Washington | 1987 | Riconoscimento di tutte le città come espressioni storiche. Protezione dei centri | Promozione di sviluppo coerente e tutela culturale. |

| Decennio | Carta / Documento | Anno | Temi principali e contributi normativi | Note e limiti |
|---|---|---|---|---|
| | | | storici da degrado e urbanizzazione industriale. | |
| | Carta C.N.R. (Conservazione e Restauro Oggetti d'Arte e Cultura) | 1987 | Aggiornamento della Carta Italiana del Restauro. Estensione a oggetti artistici e culturali soggetti a degrado fisico, chimico, antropico. | Poco approfondimento sul recupero tecnologico. |
| 2000s | Carta di Cracovia | 2000 | Aggiornamenti generali su conservazione e restauro, senza trattare efficienza energetica o riadeguamento tecnologico. | Necessità di aggiornamenti per integrazione tecnologica. |
| | Carta di Betlemme | 2008 | Focus sulla conservazione del patrimonio culturale, senza affrontare il tema dell'efficienza energetica. | Conferma il gap su tecnologia e sostenibilità. |

*Tabella 2. Tabella riassuntiva dell'evoluzione normativa delle Carte del Restauro e documenti di riferimento per la tutela del patrimonio architettonico e urbano, dal 1931 ad oggi, con l'indicazione dei temi principali e delle aree ancora da aggiornare.*

### 2.1.2 L'evoluzione legislativa nazionale nella tutela dei beni culturali

In tutte le civiltà, il patrimonio artistico è sempre stato considerato una ricchezza collettiva, tutelata attraverso vincoli e regolamenti. La sensibilità nei confronti di questo patrimonio ha infatti radici profonde (Vacca 2017).
Nell'Antica Roma, le prime leggi di protezione del patrimonio vennero emanate a partire dal IV secolo e miravano a tutelare il decoro urbano. Il rescritto antoniniano, ad esempio, incentivava l'abbellimento architettonico promuovendo l'uso di materiali pregiati come il marmo e di elementi decorativi. Questa visione si consolidò ulteriormente con il *senatus consultum Acilianum* del 122 d.C., che vietava la separazione degli ornamenti dagli edifici di appartenenza tramite vendita o lasciti testamentari, sancendone così per la prima volta la tutela giuridica come parte integrante del patrimonio architettonico. Questo principio anticipava l'idea moderna di tutela del patrimonio architettonico, secondo cui ogni componente contribuisce all'integrità storica e artistica dell'opera, rendendola un'unità inscindibile e meritevole di protezione (Russo 2021).
Tuttavia, è nel Rinascimento che emerge la piena consapevolezza della necessità di tutelare il patrimonio artistico. Francesco Petrarca, nella *Horatoria a Cola di Rienzo* (1347), denunciava il degrado dei monumenti di Roma e la perdita delle testimonianze della grandezza passata[15].
Questo spirito di tutela si sviluppò progressivamente, raggiungendo un'importante tappa nel 1515, quando Papa Leone X nominò Raffaello Sanzio Prefectus marmorum et lapidum omnium, cioè il primo soprintendente delle Antichità Romane. Raffaello, come punto di riferimento per la tutela del patrimonio artistico, contribuì a consolidare l'idea che lo Stato dovesse avere un controllo sui beni artistici e archeologici.
Questa visione, già presente nella legislazione avanzata dello Stato Pontificio, si consolidò e si articolò ulteriormente nel corso del XIX secolo, a partire dal Chirografo di Papa Pio VII del 1° ottobre 1802, passando per l'**Editto Doria Pamphilj** dello stesso anno, fino a culminare nell'**Editto Pacca** del 1820. Il Chirografo introdusse misure innovative per la salvaguardia dei beni artistici e archeologici, tra cui il divieto di esportazione, il controllo degli oggetti d'arte privati — con l'obbligo per i proprietari di redigere inventari aggiornati e sottoporsi a ispezioni annuali — e il divieto di demolizione di monumenti antichi. Inoltre, disciplinava gli scavi archeologici, imponendo il rilascio di autorizzazioni preventive. L'Editto Pacca del 1820 rappresentò una svolta normativa più strutturata, con l'istituzione di una Commissione centrale di Belle Arti e commissioni locali e l'introduzione di un sistema organico di catalogazione dei beni. Rafforzava il controllo sulle esportazioni e sugli scavi, ribadendo l'obbligo di denuncia dei reperti ritrovati e la necessità di ottenere apposite licenze per ogni attività di scavo. Con esso, il concetto di tutela assumeva una valenza sistemica e amministrativa che avrebbe influenzato profondamente la legislazione successiva (Granara 2020).

Fino al 1861, l'Italia era divisa in numerosi Stati, ciascuno dotato di una propria normativa in materia di tutela del patrimonio. Con l'unificazione, la costruzione di un'identità nazionale divenne un obiettivo prioritario, anche attraverso la selezione di monumenti da riconoscere come patrimonio condiviso dell'intera nazione.
Dopo l'Unità d'Italia, la tutela del patrimonio storico-artistico non fu una priorità per il nuovo Stato a causa di un clima liberista che evitava l'ingerenza pubblica nella proprietà privata. L'unica misura legislativa emanata in questo contesto fu l'art. 83 della Legge 25 giugno 1865, n. 2359, che permetteva l'espropriazione di monumenti storici che fossero in pericolo di conservazione, se posseduti da privati cittadini. Entro la prima decade del XX secolo, però, furono definiti i principi fondamentali della tutela dei beni culturali in Italia, che hanno influenzato la legislazione successiva.
Tra il 1871 e il 1902 furono emanate diverse leggi volte a istituire un sistema di tutela uniforme su scala nazionale. In un primo momento vennero istituite commissioni provinciali; in seguito, dopo lunghi dibattiti sul tema del restauro, furono creati uffici tecnici regionali, nei quali operarono architetti dotati di competenze specifiche nel campo della conservazione. In questo contesto nacque una nuova figura professionale: lo specialista nella tutela e nel restauro del patrimonio storico-artistico (Della Torre 2010).
La prima disposizione legislativa dell'Italia unita, espressamente dedicata alla tutela del patrimonio storico-artistico che stabiliva non solo misure per la conservazione e protezione dei beni culturali, ma anche l'organizzazione e le modalità operative per la gestione del patrimonio, fu la **Legge Nasi** (Legge 12 giugno 1902, n. 1855). La Legge istituì un regime di protezione per monumenti, edifici e oggetti d'arte di valore storico o artistico, introducendo il

[15] *Nella lettera che Francesco Petrarca invia a Cola di Rienzo, si sottolineava con amarezza la perdita irreparabile del patrimonio artistico. Egli infatti scriveva che «Poco a poco non solo i monumenti ma le stesse rovine se ne vanno. Così si perdono testimonianze ingenti della grandezza dei padri e voi, migliaia di forti, voi faceste (…) non dico come servi ma come pecore e lasciate che si facesse strazio delle membra della Madre comune».*

concetto di "tutela indiretta", ossia la possibilità di regolamentare, previo indennizzo, l'edificazione nelle vicinanze di monumenti tutelati e stabilendo un limite di 50 anni, dalla creazione dell'oggetto, affinché la tutela potesse svolgere i suoi effetti. La Legge Nasi, tuttavia, pur introducendo innovazioni importanti nella protezione del patrimonio storico-artistico, ebbe un impatto limitato. Non solo escludeva la tutela delle opere contemporanee, concentrandosi solo su quelle storiche, ma affrontò difficoltà pratiche nella creazione di un catalogo nazionale dei monumenti, fondamentale per l'efficacia della Legge. A causa della difficoltà di completare il catalogo e dei tempi di attuazione lenti, la Legge non riuscì a garantire una protezione adeguata, lasciando lacune nella conservazione dei beni culturali (Maida, Trimarchi e Neri 2020).
Nel 1907, la **Legge n. 386**, istituì le Soprintendenze ai monumenti, agli scavi, ai musei archeologici, alle gallerie e agli oggetti d'arte come uffici del Ministero dell'Istruzione. Questo sistema di controllo e amministrazione, pur con successive modifiche, rappresenta ancora oggi la struttura portante della tutela del patrimonio culturale in Italia (Visconti 2024).
Stanti le difficoltà di applicazione della Legge Nasi, il successivo Ministro della pubblica Istruzione, Bianchi, elaborò una nuova legge di tutela che vide la luce nel 1909. La **Legge Rosaldi**, o Legge n. 364/1909, riformò profondamente la tutela del patrimonio storico e artistico, sostituendo il sistema del catalogo con la dichiarazione di interesse culturale. Questo significava che la protezione di un bene non dipendeva più dall'iscrizione in un elenco, ma veniva ufficializzata tramite un meccanismo di notifica, applicato caso per caso ai beni individuati. La legge ampliò l'oggetto di tutela, includendo non solo i monumenti, ma anche beni immobili e mobili di interesse storico, archeologico, paletnologico o artistico. Inoltre, dichiarò inalienabili i beni di valore storico appartenenti alle istituzioni statali e introdusse restrizioni più rigide sull'esportazione di opere d'arte da parte dei privati. Un'altra innovazione fu il superamento del concetto di "pregio" a favore di "interesse culturale", rendendo più chiaro il criterio di tutela. Infine, eliminò il diritto di indennizzo per i proprietari delle aree limitrofe soggette a vincoli. Con la Legge del 1912, la protezione fu estesa anche a ville, parchi e giardini di valore paesaggistico.

Con l'ascesa del Fascismo, la legislazione italiana sui beni culturali subì un rafforzamento significativo, che si inseriva nell'idea di costruire un'identità nazionale forte e funzionale alle ambizioni autoritarie e imperiali del regime. Nel 1939, questo processo raggiunse un punto di svolta con l'emanazione della **Legge Bottai** (Legge n. 1089/39) e della Legge n. 1497/39. La prima, voluta dal Ministro Giuseppe Bottai, si concentrava sulla tutela delle "cose di interesse artistico o storico", ampliando il campo di intervento rispetto alla legislazione precedente. Non solo vennero inclusi i beni storici e artistici, ma per la prima volta fu presa in considerazione anche l'arte contemporanea, il patrimonio sportivo, gli archivi, la Discoteca di Stato e il diritto di stampa e d'autore. Inoltre, la legge affrontava temi mai trattati prima, come l'urbanistica e le relative organizzazioni amministrative, introducendo una disciplina organica che comprendeva non solo la tutela, ma anche la valorizzazione e la gestione dei beni culturali. Questa legge cercava di consolidare il controllo culturale del regime, ma al tempo stesso gettava le basi per un sistema di protezione e promozione del patrimonio che si sarebbe evoluto nei decenni successivi.
La **Legge n. 1497/39**, d'altro canto, segnò un passo importante nell'inclusione del paesaggio come parte integrante del patrimonio nazionale, stabilendo misure di tutela per le bellezze naturali come montagne, laghi, fiumi e altri luoghi di rilevante valore ambientale. Con questa legge, il regime non solo enfatizzava l'importanza del patrimonio storico e artistico, ma riconosceva anche il valore estetico e simbolico del paesaggio come componente fondamentale dell'identità nazionale.
Le due leggi, pur avendo finalità politiche e ideologiche precise, ebbero un impatto duraturo sulla legislazione italiana, tanto che ogni legge successiva, pur modificando e abrogando taluni articoli, ha sempre mantenuto intatta la struttura di base stabilita dalla Legge Bottai, rendendo questo impianto normativo un pilastro fondamentale per la protezione dei beni culturali in Italia.

Mentre trend analoghi possono riscontrarsi anche in altri Paesi europei, come la Francia, la Germania e l'Olanda, la tutela del patrimonio culturale non è elevata a principio fondamentale nelle rispettive Costituzioni, ma viene regolamentata attraverso leggi specifiche. In Italia, invece, le leggi n. 1089/1939 (Legge Bottai) e n. 1497/1939 hanno influito sulla formulazione dell'**art. 9 della Costituzione Italiana**[16], approvata nel 1947, evidenzia il recepimento dei concetti espressi nelle leggi del 1939 all'interno dei principi fondamentali della Costituzione e sottolinea la necessità di una transizione da una concezione statica e conservativa del patrimonio culturale a una

[16] *Costituzione Italiana, art. 9, «La Repubblica promuove lo sviluppo della cultura e la ricerca scientifica e tecnica. Tutela il paesaggio e il patrimonio storico e artistico della Nazione».*

più dinamica, orientata al pubblico e alla promozione culturale, pur mantenendo l'esigenza di tutela (Gargallo di Castel Lentini 2000).

Nel 1954, a seguito dell'adozione da parte dell'UNESCO della prima Convenzione per la protezione dei beni culturali in caso di conflitto armato, l'Italia, membro fondatore dell'UNESCO, inizia a recepire e adeguare le proprie politiche di tutela, riconoscendo il patrimonio culturale non solo come risorsa nazionale ma come patrimonio dell'umanità. Successivamente, con la Convenzione UNESCO del 1970, volta a prevenire il traffico illecito di beni culturali, l'Italia si impegna a contrastare la dispersione illegale del patrimonio artistico.
Nel 1972, la ratifica della Convenzione del Patrimonio Mondiale rafforza ulteriormente l'impegno italiano nella conservazione e valorizzazione dei siti di eccezionale valore universale, promuovendo la cooperazione internazionale. La Convenzione promuove la cooperazione internazionale per garantire la conservazione, la valorizzazione e la trasmissione di questo patrimonio alle generazioni future (Rodwell 2013). Essa ha istituito la World Heritage List, che raccoglie i beni riconosciuti dal Comitato del Patrimonio Mondiale come dotati di Valore Universale Eccezionale. L'UNESCO definisce patrimonio mondiale "un bene che possiede un valore eccezionale universale sotto il profilo storico, artistico, scientifico, estetico, etnologico o antropologico". Sono inclusi monumenti, opere architettoniche, elementi o strutture archeologiche, iscrizioni, grotte e complessi edilizi che si distinguono per la loro architettura, coerenza e integrazione nel paesaggio.
A partire dagli anni '70, la legislazione nazionale sui beni culturali e paesaggistici diventa frequente ma frammentata, con molte normative che non sempre risultano applicabili efficacemente. Il Parlamento, consapevole del problema, affida a diverse commissioni (**Franceschini, Papaldo, Giannini**) progetti per riorganizzare la materia, lavori che contribuiranno alla successiva produzione legislativa.

Un passaggio fondamentale si ha con il Decreto Legge del 14 dicembre 1974, n. 657, convertito nella Legge 29 gennaio 1975, n. 5, che istituisce il Ministero per i beni culturali e per l'ambiente, separando definitivamente le competenze in materia di tutela dal Ministero della Pubblica Istruzione. Questo atto segna un punto di svolta nella gestione del patrimonio, centralizzando le attività di tutela, valorizzazione e diffusione e promuovendo una visione più organica e strutturata del settore.

In questo stesso periodo si afferma la figura di Giovanni Urbani (1925–1994), storico dell'arte e direttore dell'Istituto Centrale per il Restauro (ICR) dal 1973. Allievo di Cesare Brandi, Urbani fu promotore di un approccio radicalmente innovativo alla tutela, fondato non più solo sul restauro, ma sulla conservazione preventiva e programmata, intesa come strategia di lungo periodo per garantire la salvaguardia dei beni culturali in relazione al loro contesto ambientale e territoriale. Nel 1975, in occasione dell'Anno Europeo del Patrimonio Architettonico, lanciò il Piano pilota per la conservazione programmata dei beni culturali in Umbria, accompagnato da riflessioni pionieristiche che miravano a superare la visione estetizzante del restauro a favore di una pianificazione integrata, fondata su valutazioni oggettive e rischi concreti.
Nel 1983 organizzò la mostra La protezione del patrimonio monumentale dal rischio sismico, frutto di un'intensa attività di ricerca all'interno dell'ICR sulla vulnerabilità sismica dei monumenti italiani, stimolata anche dai tragici terremoti del 1976 in Friuli e del 1980 in Irpinia. Tuttavia, la mostra venne accolta con freddezza: solo due soprintendenze su 73 si offrirono di ospitarla, rivelando una diffusa resistenza culturale all'adozione di misure preventive, spesso vissute come portatrici di "sventura". Di fronte a tale mancanza di sensibilità istituzionale, Urbani decise di dimettersi dalla direzione dell'ICR, dodici anni prima della scadenza del mandato. Nonostante ciò, le sue idee gettano le basi per una nuova cultura della tutela, fondata su una visione sistemica del patrimonio, inteso non come somma di singoli capolavori da proteggere con vincoli, ma come un insieme interconnesso di beni culturali e paesaggio. L'adozione del termine beni culturali – già introdotto dalla Commissione Franceschini ma diffuso e definito da Urbani – segna una rivoluzione concettuale ancora in corso, che sposta il baricentro della protezione dalla singolarità dell'oggetto alla rete di relazioni tra i beni, il territorio e la comunità. Questo approccio territoriale avrebbe ispirato, decenni dopo, l'elaborazione del Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio del 2004, noto anche come Codice Urbani (dal ministro Giuliano Urbani), segnando una continuità ideale con la visione pionieristica di Giovanni Urbani (Della Torre 2010).

La **Legge 8 agosto 1985, n. 431**, conosciuta come legge Galasso, rappresenta un'innovazione significativa nella tutela del paesaggio. Essa introduce vincoli specifici e strumenti per combattere l'abusivismo edilizio in aree di

particolare valore ambientale e storico, integrando così la tutela del paesaggio con la conservazione del patrimonio culturale.

Il **Progetto della Carta del Rischio** è stato l'erede diretto dell'approccio innovativo promosso da Giovanni Urbani e nasce come strumento scientifico e amministrativo per supportare le autorità nella tutela del patrimonio culturale. Sviluppato dall'Istituto Centrale per il Restauro (ICR), il progetto prende ispirazione dal Piano Pilota per la Conservazione Programmata dei Beni Culturali in Umbria (1975) e viene formalizzato nel documento Memorabilia (1987), per poi ricevere finanziamenti attraverso la Legge 84/1990, che assegna 28 miliardi di lire al progetto.
Tra il 1992 e il 1996, l'ICR implementa il sistema informativo geografico chiamato **MARIS** (MAppa RISchio), pensato per le Soprintendenze come strumento di pianificazione e prevenzione a scala territoriale. Il sistema permette di valutare il rischio di perdita per ciascun bene culturale e rappresentarne la distribuzione geografica tramite mappe tematiche aggiornabili. Tuttavia, il progetto presenta limiti strutturali: è costoso, richiede molto tempo per raccogliere dati (che spesso risultano già obsoleti) e gli aggiornamenti sono onerosi. Inoltre, non coinvolge gli stakeholder e si basa su dati spesso approssimativi, raccolti in modo veloce ed economico. Anche sistemi più evoluti, come quelli per la valutazione della vulnerabilità sismica, risultano insufficienti se le informazioni non vengono condivise e se il rafforzamento strutturale non è una priorità concreta (Della Torre 2010).

Nonostante i limiti operativi, il **Progetto della Carta del Rischio** ha avuto un ruolo fondamentale nel **mantenere vivo il dibattito** sulla conservazione preventiva. Oltre al sistema informatico dell'ICR, alcune **Regioni** (come Lombardia e Sicilia) hanno sviluppato strumenti tecnici, sistemi di incentivi e nuove figure professionali, favorendo sperimentazioni innovative e preparando il terreno per il **Codice dei Beni Culturali del 2004**.

Nel 1999, il **Decreto Legislativo n. 490** istituisce un **Testo Unico** che raccoglie, coordina e aggiorna la legislazione nazionale sui beni culturali e ambientali, integrando le disposizioni nazionali con le Convenzioni internazionali e le normative comunitarie. Il Testo Unico conferma e sviluppa i principi della Legge 1089/1939, allargando la finalità alla valorizzazione del patrimonio culturale. Tra le innovazioni più rilevanti vi è la riforma del procedimento di dichiarazione di interesse per i beni privati, che separa l'identificazione del bene dalla notifica e introduce termini e garanzie procedurali conformi alla Legge 241/1990 sul procedimento amministrativo.

Il **Decreto Legislativo n. 42 del 22 gennaio 2004**, noto come **Codice dei beni culturali e del paesaggio**, rappresenta una svolta nella legislazione italiana sui beni culturali e paesaggistici. Il codice, frutto di una delega del Parlamento, abroga il precedente testo unico del 1999 e attribuisce alla Repubblica il compito di tutelare e valorizzare il patrimonio culturale; Stato, Regioni, Città ed Enti territoriali, quindi, "*assicurano e sostengono la conservazione del patrimonio culturale e ne favoriscono la pubblica fruizione e la valorizzazione*" [17], mentre i privati proprietari "possessori o detentori di beni appartenenti al patrimonio culturale, sono tenuti a garantirne la conservazione"[18].
Il Codice dei beni culturali e del paesaggio distingue tra la tutela dei beni culturali e la tutela del paesaggio, regolando in modo specifico le modalità di protezione per ciascuna categoria.
La tutela dei beni culturali, in particolare, ai sensi dell'articolo 10, riguarda "*le cose immobili e mobili appartenenti allo Stato, alle regioni, agli altri enti pubblici territoriali […] che presentano interesse artistico, storico, archeologico o etnoantropologico*". Sono altresì soggetti a tutela monumentale, quando sia intervenuta la dichiarazione prevista dall'articolo 13, gli immobili, pubblici o privati, che abbiano almeno 70 anni e non siano opera di autori viventi. Anche le cose di eccezionale interesse artistico, storico, archeologico o etnoantropologico, realizzate da autori non più viventi da oltre 50 anni, possono essere tutelate dopo la specifica dichiarazione di interesse culturale.
La tutela di tali beni si estende, per mezzo della cosiddetta tutela indiretta, anche alle immediate vicinanze dell'edificio stesso, per preservarne la prospettiva, la luce e l'armonia con l'ambiente circostante.
Parallelamente alla tutela monumentale, la normativa prevede la tutela dei beni paesaggistici. Sono beni paesaggistici gli immobili e le aree che hanno cospicui caratteri di bellezza naturale; le ville, i giardini e i parchi di particolare pregio estetico, purché non già tutelati come beni culturali. Inoltre, sono considerati meritevoli di tutela i complessi di edifici che costituiscono un insieme armonico dal punto di vista estetico e tradizionale, come i centri e nuclei storici; infine, la legge tutela anche le bellezze panoramiche e i punti di osservazione, accessibili al pubblico, dai quali è possibile godere della vista di questi paesaggi [19].

[17] *Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, art. 1, comma 3.*
[18] *Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, art. 1 comma 5.*
[19] *Decreto Legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, art. 136.*

La tutela dei beni culturali comporta l'obbligo di conservarli e proteggerli integralmente. Ogni intervento, sia esso di restauro, manutenzione o modifica, deve essere autorizzato preventivamente dalla Soprintendenza competente. Il Ministero dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo esercita queste funzioni di tutela attraverso i suoi organi periferici, in particolare le Soprintendenze per i Beni Architettonici e Paesaggistici, responsabili del controllo e della validazione degli interventi sul patrimonio architettonico storico.
La protezione di tali edifici implica il divieto di distruzione, danneggiamento o utilizzo improprio. Nei casi più gravi, come demolizioni o rimozioni definitive, è necessaria anche l'approvazione della Commissione regionale per il patrimonio culturale. In situazioni urgenti, il Soprintendente può rilasciare un'autorizzazione provvisoria, informando il Segretario regionale. Le autorizzazioni devono essere concesse entro 120 giorni dalla richiesta, salvo sospensioni tecniche che non possono superare i 30 giorni.
Gli interventi devono mirare a mantenere l'integrità del bene. L'esecuzione di lavori non autorizzati comporta sanzioni amministrative, come il ripristino o multe, e, nei casi di danno al valore storico-artistico, anche sanzioni penali. L'uso improprio del bene è anch'esso perseguibile penalmente se compromette la sua conservazione.
Le Soprintendenze sono chiamate ad esprimersi anche riguardo al tema della riqualificazione energetica dell'esistente. Sebbene il Decreto Legislativo 29 dicembre 2006 n. 311 sul contenimento dei consumi energetici escluda l'applicazione della norma per "*gli immobili ricadenti nell'ambito della disciplina della parte seconda e dell'art. 136, comma 1, lettere b) e c), del decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, recante il codice dei beni culturali e del paesaggio nei casi in cui il rispetto delle prescrizioni implicherebbe una alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto con particolare riferimento ai caratteri storici o artistici*"[20], al contempo prevede una possibilità di dialogo con le soprintendenza l fine di individuare quali possano essere gli interventi ammissibili in termini di miglioramento dell'efficienza energetica del costruito e quindi definire quali siano i gradi di compatibilità accettabili (Lucchi e Pracchi, Efficienza energetica e patrimonio costruito. La sfida del miglioramento delle prestazioni energetiche nell'edilizia storica. 2013).

La legge italiana per la prima volta introduce la definizione di manutenzione come "insieme di attività e interventi orientati al controllo delle condizioni del bene culturale e alla conservazione della sua integrità, funzionalità e identità". Questa definizione è più ampia rispetto al significato internazionale, dove manutenzione indica soprattutto le riparazioni, mentre in Italia include anche il controllo e le ispezioni, riflettendo un dibattito sull'autenticità e sui rischi di interventi mal pianificati.
La restaurazione è definita come "intervento diretto sul bene, volto a garantirne l'integrità materiale e a recuperare, proteggere e trasmettere i valori culturali", includendo anche il miglioramento strutturale in zone sismiche. La restaurazione è vista come una fase integrata in una strategia più ampia che comprende prevenzione e manutenzione, richiedendo nuovi strumenti di gestione dell'informazione.
L'articolo 29 della legge, pur non cambiando immediatamente le pratiche quotidiane, ha importanti implicazioni pratiche e politiche:

- Rappresenta una nuova direzione scelta dallo Stato verso la conservazione programmata.
- Abilita lo Stato a finanziare non solo restauri, ma anche attività di prevenzione e manutenzione (controlli, ispezioni, monitoraggio).
- Fornisce un riferimento normativo per armonizzare altre leggi, favorendo un approccio preventivo alla conservazione del patrimonio.

A partire dal 2006, con la pubblicazione del rapporto **Predicting and Managing the Effects of Climate Change on World Heritage** da parte del Comitato del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO, anche l'Italia ha iniziato a recepire e integrare le indicazioni internazionali per affrontare le minacce poste dai cambiamenti climatici sul patrimonio culturale. Il rapporto individua tre azioni fondamentali — prevenzione, adattamento e condivisione della conoscenza — che rappresentano le linee guida per la gestione sostenibile e resiliente dei siti patrimonio mondiale.
Questi indirizzi sono stati ribaditi e approfonditi nel 2007 con l'adozione del *Policy Document on the Impacts of Climate Change on World Heritage Properties*, da parte dell'Assemblea Generale degli Stati Parte. Il documento evidenzia l'impatto crescente dell'aumento delle emissioni di gas serra, che ha già causato un innalzamento medio delle temperature globali di circa **1°C** rispetto all'epoca preindustriale. Tale riscaldamento sta generando mutamenti profondi e duraturi nel sistema climatico: variazioni nei regimi delle piogge, innalzamento del livello del

[20] *Decreto Legislativo 29 dicembre 2006 n. 311, art. 1, comma 3*

mare, acidificazione degli oceani, aumento di eventi estremi come uragani, incendi, inondazioni e siccità. Secondo l'IPCC, "alcuni impatti possono essere di lunga durata o irreversibili".
Il documento sottolinea, ad esempio, come la stabilità del suolo sia fortemente influenzata dalle variazioni climatiche, con effetti diretti sui siti archeologici vulnerabili a mutamenti idrologici, chimici o biologici. Inoltre, la **porosità dei materiali storici** facilita la penetrazione di umidità e sali, aumentando i rischi di danni dovuti alla cristallizzazione del sale e all'azione prolungata dell'acqua in caso di inondazioni.
Nel 2016, alla luce del numero crescente di siti del Patrimonio Mondiale minacciati dal cambiamento climatico, il Centro del Patrimonio Mondiale ha avviato, insieme agli organi consultivi IUCN e ICCROM, una revisione del documento. Nella versione aggiornata, vengono fissati obiettivi da raggiungere entro il **2030**, incentrati su prevenzione, uso efficiente delle risorse, promozione della **resilienza climatica** e riduzione delle emissioni nel settore immobiliare.
In Italia, queste direttive si sono tradotte in una progressiva integrazione delle strategie di adattamento climatico nella gestione del patrimonio storico e culturale, con particolare attenzione al degrado causato da eventi estremi quali alluvioni, ondate di calore e frane, rischi intensificati dall'innalzamento delle temperature e dalla variabilità climatica. Il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC), aggiornato nel 2022, rappresenta il principale strumento nazionale che recepisce gli obiettivi del rapporto UNESCO, ponendo in evidenza il ruolo cruciale dell'acqua come fattore di degrado e sottolineando l'urgenza di interventi mirati per la salvaguardia del patrimonio culturale.
L'Italia, come Stato Parte della Convenzione sul Patrimonio Mondiale, ha inoltre partecipato attivamente alla definizione e all'attuazione di strategie basate sul monitoraggio continuo, la mitigazione dei rischi e lo sviluppo di capacità di resilienza, allineandosi agli obiettivi internazionali di riduzione delle emissioni e di promozione di buone pratiche. Parallelamente, le politiche europee, grazie anche a programmi di finanziamento e progetti di cooperazione, hanno rafforzato il coordinamento tra le istituzioni italiane e il contesto internazionale, favorendo la conservazione e valorizzazione del patrimonio culturale in un'ottica sostenibile e climato-resiliente.

Entro il 2030, in quanto Stato parte, l'Italia si impegna a:

- Istituire e attuare solidi accordi per l'adattamento climatico, con progressi misurabili nella valutazione e riduzione dei rischi e nel potenziamento della capacità di resilienza in tutti i siti del patrimonio;
- Implementare contesti operativi globali per la mitigazione climatica, riducendo del 50% l'impronta di carbonio nella gestione dei siti del patrimonio rispetto ai valori del 2020;
- Sviluppare quadri normativi per affrontare perdite e danni, con strategie adeguate ai rischi climatici più gravi, oltre i limiti dell'adattamento;
- Integrare gli obiettivi e le azioni climatiche negli strumenti e nelle metodologie di gestione del patrimonio;
- Contribuire attivamente all'inversione delle tendenze negative legate al cambiamento climatico, anche mediante una maggiore collaborazione e un'applicazione efficace delle normative internazionali e delle politiche locali.

Negli ultimi anni, la normativa italiana ha iniziato a riconoscere esplicitamente i rischi legati ai cambiamenti climatici per la conservazione del patrimonio culturale. Il Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC, 2022) dedica un capitolo specifico a questo tema, evidenziando come eventi climatici estremi quali alluvioni, frane e siccità rappresentino minacce concrete e sempre più frequenti per i beni storici e artistici.
Il PNACC sottolinea l'importanza di sviluppare strategie di adattamento volte a proteggere i materiali storici, in particolare quelli particolarmente vulnerabili all'umidità e ai danni strutturali. Inoltre, invita a integrare la gestione del patrimonio culturale con le politiche ambientali e climatiche, per una tutela più efficace e sostenibile.
In Italia, un complesso sistema normativo, sia nazionale che locale, regola la conservazione del patrimonio architettonico, considerandone la centralità e la vulnerabilità. Il PNACC (versione dicembre 2022) mette in luce il ruolo cruciale dell'acqua come fattore di degrado: eventi meteorologici intensi come piogge torrenziali, alluvioni e tempeste causano danni strutturali significativi, in particolare agli elementi decorativi come guglie, pinnacoli, sculture e finiture. Parallelamente, il riscaldamento globale altera gli ecosistemi, accelerando fenomeni di desertificazione con conseguente perdita di paesaggi e patrimoni storici. Le frane costituiscono un rischio rilevante: un'analisi ISPRA del 2021 ha stimato che il 17,9% dei beni culturali italiani è esposto a questo pericolo.

Di seguito si presenta una tabella riassuntiva che sintetizza l'evoluzione normativa italiana in materia di tutela del patrimonio storico, artistico e paesaggistico, evidenziando le principali leggi, documenti e tappe fondamentali dal periodo romano fino agli interventi più recenti legati all'adattamento climatico (Tabella 3).

| Periodo | Principali normative e interventi | Note e significato principale |
|---|---|---|
| IV secolo d.C. | Rescritto Antoniniano; Senatus Consultum Acilianum (122 d.C.) | Prime leggi di tutela del patrimonio in epoca romana; tutela integrale degli ornamenti architettonici |
| Rinascimento | Horatoria di Petrarca (1347); nomina di Raffaello Sanzio Prefectus marmorum et lapidum omnium (1515) | Prima consapevolezza culturale e amministrativa di tutela del patrimonio artistico |
| XIX secolo | Chirografo di Pio VII (1802); Editto Doria Pamphilj (1802); Editto Pacca (1820) | Istituzione di commissioni di tutela, catalogazione e regolamentazione degli scavi e delle esportazioni |
| 1861-1900 | Legge 25 giugno 1865, n. 2359 (art. 83); Legge Nasi (1902); Legge n. 386/1907 | Prima legislazione italiana unificata; protezione monumenti e istituzione Soprintendenze |
| 1909-1939 | Legge Rosaldi (364/1909); Legge Bottai (1089/1939); Legge n. 1497/1939 | Ampliamento tutela a beni mobili e paesaggio; inclusione arte contemporanea; struttura organica di tutela |
| 1947 | Art. 9 Costituzione Italiana | Inserimento della tutela del patrimonio culturale tra i principi fondamentali della Repubblica |
| 1954-1975 | Convenzioni UNESCO (1954, 1970, 1972); Legge 29 gennaio 1975, n. 5 (istituzione Ministero Beni Culturali e Ambientali) | Internazionalizzazione tutela e creazione organi specifici per gestione e valorizzazione del patrimonio |
| 1975-1996 | Piano Pilota ICR per conservazione programmata (1975); Progetto Carta del Rischio e sistema MARIS (1990-1996) | Approccio innovativo a tutela preventiva e monitoraggio del rischio; strumenti GIS per pianificazione |
| 1999 | Decreto Legislativo n. 490/1999 (Testo Unico Beni Culturali) | Coordinamento e aggiornamento della legislazione nazionale |
| 2004 | Decreto Legislativo n. 42/2004 (Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio) | Riforma organica della tutela e valorizzazione del patrimonio culturale e paesaggistico |
| 2006-2022 | DLgs 311/2006 (efficienza energetica); Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC, 2022) | Integrazione della tutela con politiche energetiche e climatiche; riconoscimento rischi legati ai climatici per la conservazione del patrimonio. |

*Tabella 3. Tabella riassuntiva dell'evoluzione normativa per decennio relativa alla tutela del patrimonio culturale in Italia, con indicazione delle principali leggi, normative e strumenti adottati per la conservazione, valorizzazione e gestione del patrimonio storico, artistico e paesaggistico.*

### 2.1.3 Il concetto di deroga

La questione dell'applicazione delle normative tecniche agli edifici storici è particolarmente complessa, perché si scontra con l'unicità architettonica e materica di questi beni. Le normative, infatti, nascono per edifici contemporanei e sono costruite su parametri standardizzati legati principalmente alla destinazione d'uso, senza considerare le peculiarità dei manufatti storici. Ciò porta a una tensione costante tra il rispetto formale delle prescrizioni – come quelle antincendio, antisismiche o relative all'efficienza energetica – e la salvaguardia del valore culturale, estetico e identitario dell'immobile.
In molti casi, l'applicazione rigida di questi standard comporta interventi estremamente invasivi, come l'inserimento di scale antincendio esterne o l'adeguamento impiantistico forzato, che alterano la forma e i materiali originari. Questo accade perché l'approccio prescrittivo delle norme, seppur utile per garantire uniformità e semplicità di controllo, è poco adatto alle situazioni particolari e complesse che caratterizzano il patrimonio esistente. Ne derivano spesso soluzioni progettuali pensate più per "mettere a norma" l'edificio che per migliorarne davvero la funzionalità o la sicurezza, sacrificando l'integrità storica. In questo contesto, la deroga – intesa come strumento per adattare i requisiti tecnici al valore culturale dell'immobile – diventa un elemento chiave per conciliare tutela e uso contemporaneo.
Dagli anni Ottanta è emersa con chiarezza la necessità di prevedere strumenti normativi più flessibili per affrontare i casi in cui l'applicazione rigida delle disposizioni generali risultava impossibile, soprattutto negli interventi sugli edifici storici. In questo contesto si è cominciato a introdurre la possibilità di derogare alle norme tecniche, adottando soluzioni alternative purché garantissero un livello di sicurezza equivalente a quello previsto dalla legge. Tuttavia, l'utilizzo del concetto di deroga ha generato un equivoco diffuso: quello di considerare l'intervento sugli edifici tutelati come in qualche modo esonerato dal rispetto delle norme, quasi che fossero zone franche dove tutto è lecito in nome della tutela. In realtà, la deroga dovrebbe essere uno strumento eccezionale, da usare con consapevolezza e senso di responsabilità, solo quando è dimostrato che l'applicazione rigorosa delle norme comprometterebbe l'integrità dell'edificio. In questi casi, il progettista ha il compito di individuare soluzioni alternative capaci di mantenere il giusto equilibrio tra rispetto normativo e salvaguardia dei valori culturali.
Partendo però da un'interpretazione soggettiva delle disposizioni di legge e in assenza di criteri chiari e univoci per valutare l'adeguatezza delle soluzioni alternative proposte, il ricorso alla deroga è stato spesso frainteso e strumentalizzato. È stato inteso come una sorta di "sconto" normativo nei confronti degli edifici storici, ovvero come l'occasione per limitare gli interventi richiesti o addirittura esonerarsene del tutto. Un caso emblematico di questa distorsione è rappresentato dalla normativa sul superamento delle barriere architettoniche: ancora oggi, troppo spesso si assiste all'adozione di soluzioni provvisorie, posticce, talvolta del tutto inadeguate, o peggio ancora si rileva la totale assenza di accessibilità in molti edifici e siti di interesse culturale.
È importante sottolineare che un uso generalizzato e non critico della deroga non può rappresentare la soluzione. Al contrario, la fruizione piena e sicura di un bene culturale – intesa sia come accessibilità per il pubblico che come protezione dell'edificio e dei suoi contenuti – è parte integrante della sua valorizzazione e, in ultima istanza, della sua tutela.
Un altro ambito particolarmente significativo in cui questa dinamica emerge con forza è quello del risparmio energetico. Diverse normative europee e nazionali riconoscono esplicitamente che gli edifici storici possono essere esclusi dall'obbligo di rispettare i requisiti minimi di prestazione energetica, proprio per evitare che interventi troppo invasivi alterino in modo inaccettabile il loro carattere o aspetto. Questo principio è stato ribadito, ad esempio, nella Direttiva europea 2002/91/CE[21], nella successiva 2010/31/UE[22], nel Decreto Legislativo 192/2005[23] (e successive modifiche, es. D.Lgs. 311/2006).

---

*[21] Direttiva Europea 2002/91/CE, art. 4, comma 3, «Gli Stati membri possono decidere di non istituire o di non applicare i requisiti di cui al paragrafo 1 per le seguenti categorie di fabbricati: edifici e monumenti ufficialmente protetti come patrimonio designato o in virtù del loro speciale valore architettonico o storico, nei casi in cui il rispetto delle prescrizioni implicherebbe un'alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto».*
*[22] Direttiva Europea 2010/31/UE, art. 4, comma 2, «Gli Stati membri possono decidere di non fissare o di non applicare i requisiti […] per le seguenti categorie edilizie: difici ufficialmente protetti come patrimonio designato o in virtù del loro particolare valore architettonico o storico, nella misura in cui il rispetto di determinati requisiti minimi di prestazione energetica implichi un'alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto».*
*Il concetto di deroga è quindi confermato e chiaramente legato al principio di tutela del valore culturale, subordinando l'esonero a una valutazione tecnica di compatibilità tra intervento energetico e conservazione.*
*[23] Decreto Legislativo 192/2005, art. 3, comma 3, «Gli edifici di cui al comma 3, lettera a), sono esclusi dall'applicazione del presente decreto ai sensi del comma 3-bis, solo nel caso in cui, previo giudizio dell'autorità competente al rilascio dell'autorizzazione ai sensi del codice di cui al decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, il rispetto delle prescrizioni implichi un'alterazione sostanziale del loro carattere o aspetto, con particolare riferimento ai profili storici, artistici e paesaggistici».*

Ma anche in questo caso, non intervenire affatto non è la soluzione più corretta. Gli edifici storici, spesso energivori per loro natura, comportano costi di gestione molto alti e contribuiscono in modo significativo agli sprechi energetici. Se si vuole garantirne un uso continuo, sicuro e confortevole, è necessario trovare soluzioni per migliorarne l'efficienza energetica, compatibilmente con le esigenze di tutela.

Le normative più recenti, anche alla luce degli orientamenti europei, hanno abbracciato sempre più l'approccio prestazionale: non si richiede più necessariamente l'adozione di una specifica misura tecnica, salvo per alcune prescrizioni minime previste per legge, ma si chiede piuttosto di dimostrare l'adeguatezza delle scelte progettuali rispetto agli obiettivi da perseguire. In questa logica, a partire da un'attenta analisi delle caratteristiche del singolo bene culturale, è possibile valutarne le potenzialità e le relative prestazioni. Se queste non risultano conformi ai requisiti normativi, si possono prevedere interventi coerenti con le istanze del restauro, ricorrendo anche a soluzioni innovative e su misura. In ultima istanza, qualora gli interventi necessari risultassero comunque troppo impattanti, si può anche valutare di limitare la fruibilità del bene, bilanciando così esigenze di conservazione, sicurezza e accessibilità.

In definitiva, il ricorso alla deroga non deve essere visto come una scappatoia, ma come un'opportunità per ripensare gli interventi in modo più consapevole, partendo da una conoscenza approfondita del bene culturale e del suo contesto. Solo così sarà possibile garantirne una tutela effettiva e duratura, senza rinunciare a renderli funzionali e sostenibili.

In quest'ottica, anche nell'ambito delle misure di efficientamento energetico, si stanno aprendo nuove possibilità che permettono di coniugare conservazione e innovazione. Un esempio significativo è rappresentato dalla Legge 27 aprile 2022, n. 34, che ha qualificato l'installazione di impianti solari fotovoltaici e termici come interventi di manutenzione ordinaria, liberalizzandone l'esecuzione in gran parte del territorio, incluse le zone A dei centri storici e semplificando le procedure autorizzative anche per i beni vincolati[24]. Questa normativa offre così uno strumento concreto per migliorare la sostenibilità energetica degli edifici storici, senza compromettere la loro tutela, favorendo interventi calibrati e rispettosi del valore culturale.

---

*Anche qui si prevede un regime di esclusione condizionata, che però nella prassi tecnica e autorizzativa si traduce in una deroga motivata, da valutarsi caso per caso, spesso con l'intervento delle Soprintendenze.*

*[24] Legge 27 aprile 2022, n. 34, "L'installazione, con qualunque modalità di impianti solari fotovoltaici e termici sugli edifici [...] e la realizzazione delle opere funzionali alla connessione alla rete elettrica nei predetti edifici o strutture e manufatti sono considerate interventi di manutenzione ordinaria e non sono subordinate all'acquisizione di permessi, autorizzazioni o atti amministrativi di assenso comunque denominati, ivi compresi quelli previsti dal codice dei beni culturali e del paesaggio [...]. In presenza dei vincoli di cui al primo periodo, la realizzazione degli interventi ivi indicati è consentita previo rilascio dell'autorizzazione da parte dell'amministrazione competente ai sensi del citato codice di cui al decreto legislativo n. 42 del 2004".*

### 2.1.4 La tutela a livello locale: il caso della Regione Sardegna

Accanto alla legislazione nazionale, molte Regioni italiane hanno adottato proprie normative e piani per la tutela del patrimonio culturale, con particolare attenzione alle vulnerabilità locali e agli effetti del cambiamento climatico, in linea con le indicazioni del PNACC e con le direttive europee. Tuttavia, la tutela del patrimonio culturale a livello locale varia a seconda delle competenze riconosciute a ciascuna Regione.

Nel caso della Regione Sardegna, la questione è particolarmente interessante perché il suo Statuto Speciale le attribuisce competenze esclusive in alcuni settori culturali. Tuttavia, per quanto riguarda i beni culturali immobili e la tutela vincolistica, la competenza rimane principalmente in capo allo Stato. L'**articolo 117** della Costituzione Italiana disciplina la ripartizione delle competenze legislative tra Stato e Regioni, stabilendo che lo Stato ha legislazione esclusiva sulla tutela dell'ambiente, dell'ecosistema e dei beni culturali[25]. Le Regioni possono intervenire solo su materie non riservate espressamente allo Stato, rispettando i principi costituzionali e gli obblighi derivanti dal diritto comunitario e internazionale, ma possono adottare misure di controllo più rigorose, adattandole ai contesti locali.

In questo contesto, lo **Statuto Speciale della Sardegna**, approvato con la legge costituzionale n. 3 del 26 febbraio 1948 e pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 58 del 9 marzo 1948, gioca un ruolo fondamentale. Esso regola l'ordinamento autonomo della Regione Autonoma della Sardegna, stabilendo le sue competenze e poteri distintivi rispetto alle altre regioni italiane, ma non modifica le competenze statali in materia di tutela dei beni culturali immobili[26]. In altre parole, pur conferendo alla Regione un'ampia autonomia in ambito culturale, l'ordinamento della Sardegna deve comunque rispettare le normative statali che riguardano la conservazione e la protezione dei beni culturali di interesse nazionale.

Con l'articolo 1, comma 1, del titolo I della **Legge Regionale n. 45** "Norme per l'uso e la tutela del territorio regionale" del 1989 si stabilisce che la Regione autonoma della Sardegna assicura «*la più rigorosa tutela delle risorse territoriali, con particolare riguardo alla salvaguardia del patrimonio naturale, ambientale, artistico culturale, ai fini della loro valorizzazione*». Il Titolo II della legge regionale, nell'art. 10bis stabilisce poi la suddivisione delle competenze nella pianificazione del territorio, con la Regione responsabile della tutela ambientale.

L'emanazione della Legge Galasso del 1985 ha rappresentato un passo significativo nella pianificazione paesaggistica in Italia, imponendo l'obbligo di predisporre **Piani Territoriali Paesistici (PTP)** per proteggere i beni paesaggistici di valore. Nel contesto della pianificazione paesaggistica in Sardegna, tra il 1985 e il 2003, furono sviluppati e approvati diversi Piani Territoriali Paesistici che miravano a proteggere le aree di rilevanza paesaggistica e a guidare lo sviluppo del territorio in modo rispettoso del paesaggio naturale e culturale. Tuttavia, questi piani furono spesso messi in discussione dal Tribunale Amministrativo Regionale (TAR) della Sardegna. Nel 1998, i PTP furono però annullati, per effetto di decreti del Presidente della Repubblica e sentenze del TAR, a causa della loro disomogeneità che aveva creato incertezze nella pianificazione e nella tutela del territorio. Questo infatti risultava differenziato: alcuni comuni avevano Piani Urbanistici Comunali (PUC) elaborati in coerenza con i precedenti PTP, altri ricadevano nell'ambito del PTP n. 7 del Sinis, mentre altri ancora avevano Piani Regolatori o Programmi di Fabbricazione non adeguati alla legge regionale e alle norme d'attuazione dei PTP.

Per risolvere il caos legislativo derivante dall'annullamento dei PTP, nel 2004 fu introdotta la **Legge Regionale n. 8** del 25 novembre 2004, nota come Legge Salvacoste. Questa, prevedeva l'adozione del **Piano Paesaggistico Regionale (PPR)** come strumento fondamentale per legge per garantire la tutela del territorio. Il primo PPR della Sardegna viene approvato nel 2006. Questo, mira a preservare, tutelare e valorizzare l'identità ambientale, storica, culturale e insediativa del territorio sardo, promuovendo uno sviluppo sostenibile. I[27]l Il Piano include, tra le varie

---

[25] *Costituzione Italiana, art. 117, comma 2, «La potestà legislativa è esercitata dallo Stato [70 e segg.] e dalle Regioni nel rispetto della Costituzione, nonchè dei vincoli derivanti dall'ordinamento comunitario e dagli obblighi internazionali. Lo Stato ha legislazione esclusiva nelle seguenti materie: [...] s) tutela dell'ambiente, dell'ecosistema e dei beni culturali».*

[26] *Lo Statuto riconosce alla Regione Sardegna alcune competenze in materia di gestione e valorizzazione dei beni culturali presenti sul suo territorio. Ad esempio,* l'articolo 3 dello Statuto assegna alla Regione competenze in materia di istruzione, musei e biblioteche di interesse locale, mentre l'articolo 5 prevede la possibilità di emanare leggi regionali su vari aspetti della cultura. Questo significa che, pur non avendo il potere di modificare i vincoli di tutela stabiliti dallo Stato, la Sardegna può adottare norme di valorizzazione e promozione del proprio patrimonio culturale, integrando le disposizioni nazionali *con regolamenti specifici per il contesto regionale.*

[27] *Legge regionale 25 novembre 2004, n. 8, art. 1, «La Giunta regionale, entro dodici mesi dall'entrata in vigore della presente legge, adotta il Piano Paesaggistico Regionale (PPR) principale strumento della pianificazione territoriale regionale ai sensi dell'articolo 135 del decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42 (Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137), al fine di assicurare un'adeguata tutela e valorizzazione del paesaggio».*

cose, anche il "*Repertorio del Mosaico*" che, suddiviso in diverse sezioni, classifica i beni tutelati secondo il loro natura e rilevanza. Il Repertorio contiene una classificazione specifica per i beni culturali architettonici e archeologici vincolati ai sensi della parte II del D.Lgs. n. 42/2004, che comprende edifici storici e siti di interesse archeologico sottoposti a vincolo e tutela con appositi provvedimenti amministrativi. La Regione Sardegna, in collaborazione con il Ministero, aggiorna costantemente il Repertorio attraverso specifiche deliberazioni della Giunta Regionale, rendendolo uno strumento in continua evoluzione.
Nel 2013 la Giunta regionale ha avviato un aggiornamento e una revisione del PPR, approvando in via preliminare l'atto n. 45/2 il 25 ottobre 2013. Tuttavia, a oggi, non risulta che l'aggiornamento sia stato completato. Anzi, nel 2021, la Corte Costituzionale ha dichiarato illegittima la legge regionale 13 luglio 2020, n. 21, che avrebbe consentito la riscrittura del PPR nelle sue parti fondamentali. Pertanto, il PPR attualmente in vigore è quello approvato nel 2006, con gli aggiornamenti e le revisioni avviate nel 2013 che non sono stati completati.
Ad oggi, sebbene le norme di tutela siano rigorose per i beni monumentali, valutare progetti su edifici storici minori è più complesso. Inoltre, la Soprintendenza non valuta interventi interni agli edifici, se non modificano l'aspetto esterno.

Di seguito si riporta una tabella che riassume i principali momenti normativi e interventi legislativi, evidenziando le peculiarità della normativa sarda e i loro significati nel contesto della gestione e conservazione dei beni culturali e ambientali (Tabella 4).

| Periodo | Principali normative e interventi | Note e significato principale |
|---|---|---|
| 1948 | Statuto Speciale della Regione Sardegna (Legge Costituzionale n. 3/1948) | Attribuisce competenze esclusive in alcuni settori culturali alla Sardegna, ma tutela vincolistica dei beni culturali immobili rimane statale. Regione deve rispettare le norme statali. |
| 1985 | Legge Galasso | Introduzione obbligo Piani Territoriali Paesistici (PTP) per la tutela paesaggistica a livello nazionale. |
| 1985–2003 | Sviluppo e approvazione di Piani Territoriali Paesistici (PTP) in Sardegna | PTP mirano a proteggere il paesaggio e guidare lo sviluppo territoriale, ma sono risultati disomogenei e conflittuali sul territorio sardo. |
| 1998 | Annullamento dei PTP da parte del TAR Sardegna e decreti del Presidente della Repubblica | I PTP vengono cancellati per disomogeneità e incertezze nella pianificazione, con conflitti tra PUC, PTP e altri strumenti urbanistici comunali. |
| 1989 | Legge Regionale Sardegna n. 45 “Norme per l’uso e tutela del territorio regionale” | Regione garantisce rigorosa tutela delle risorse territoriali, con particolare attenzione al patrimonio naturale, ambientale e culturale. Regione responsabile della tutela ambientale. |
| 2004 | Legge Regionale Sardegna n. 8 (Legge Salvacoste) | Introduzione obbligatoria del Piano Paesaggistico Regionale (PPR) come strumento fondamentale di tutela territoriale. |
| 2006 | Approvazione primo Piano Paesaggistico Regionale (PPR) Sardegna | Il PPR tutela e valorizza l’identità ambientale, storica e culturale, promuovendo uno sviluppo sostenibile. Include il “Repertorio del Mosaico” per la classificazione dei beni culturali. |
| 2013 | Avvio aggiornamento e revisione del PPR (atto n. 45/2, 25 ottobre 2013) | Aggiornamento non completato, in attesa di ulteriori sviluppi. |
| 2020–2021 | Legge regionale n. 21/2020 (dichiarata illegittima dalla Corte Costituzionale nel 2021) | Tentativo di riscrittura del PPR, giudicato incostituzionale, blocca la revisione del Piano. |

| Periodo | Principali normative e interventi | Note e significato principale |
|---|---|---|
| Attuale | Stato vigente della normativa | Il PPR del 2006 è ancora valido, con aggiornamenti parziali non conclusi; la tutela è rigorosa per i beni monumentali, più complessa per edifici storici minori; la Soprintendenza tutela principalmente l'esterno degli edifici. |

*Tabella 4. Sintesi delle principali normative e interventi per la tutela del patrimonio culturale e paesaggistico in Sardegna.*

## 2.2 Il quadro normativo di riferimento per la riqualificazione energetica

Tra la lunga serie di possibili azioni finalizzate alla salvaguardia del patrimonio e alla difesa dai rischi naturali, un'accorta utilizzazione delle risorse, la promozione della resilienza climatica e la gestione delle emissioni di gas a effetto serra, soprattutto nel caso degli edifici storici, sono scelte che giocano un ruolo fondamentale nel limitare e contrastare i cambiamenti climatici. L'anidride carbonica (CO2) è tra i gas ad effetto serra che maggiormente contribuiscono al riscaldamento del pianeta, ma se la domanda globale di energia dovesse continuare a crescere rapidamente continuando ad essere soddisfatta, come attualmente sta accadendo, principalmente attraverso l'uso di combustibili fossili, le emissioni di anidride carbonica potrebbero raggiungere o superare i 75 miliardi di tonnellate l'anno entro la fine del secolo. Ciò porterebbe ad avere una concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera che potrebbe raggiungere o superare 800 ppm, una condizione che non si osserva sulla Terra da quasi 50 milioni di anni (Lindsey, 2023). Secondo il quinto rapporto di valutazione dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), si prevede che nell'ipotesi più pessimistica, l'incremento della temperatura superficiale globale entro la fine del 21° secolo supererà i 2,6–4,8 °C rispetto al periodo 1986-2005 (Pachauri, et al. 2014).
Intervenire è possibile ed è necessario focalizzare l'attenzione proprio sulle emissioni del patrimonio edilizio che ha un impatto ambientale molto negativo. Dall'analisi della letteratura emerge infatti un quadro chiaro che mette in luce come, in Europa, la metà dell'energia sia attualmente impiegata nel funzionamento degli edifici, i quali a loro volta costituiscono il 40% del consumo energetico totale e alla produzione del 50% delle emissioni atmosferiche inquinanti (C. S. Polo Lopez 2021), ma ancora più rilevante è il fatto che proprio il patrimonio storico contribuisce al 18,4% delle emissioni globali totali di gas serra di origine antropica. Tra gli edifici costruiti prima del 1945, quelli residenziali rappresentano infatti il 22,7%, mentre quelli costruiti tra il 1945 e il 1969 costituiscono il 26,2%.

Di fatto, una considerevole parte del patrimonio edilizio in Europa ha un'età superiore ai 50 anni; Oltre il 40% dei nostri edifici residenziali è stato costruito prima degli anni '60, quando le normative sull'edilizia energetica erano molto limitate (Mazzarella 2015) e, ad oggi, a stragrande maggioranza di questi edifici non ha beneficiato di alcuna opera di ristrutturazione energetica, pertanto emettono molto più gas serra rispetto agli edifici di nuova costruzione o più recenti (Hao, et al. 2020).
Migliorare l'efficienza energetica del parco immobiliare è quindi fondamentale per ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e per arrivare al raggiungimento della neutralità climatica nel 2050, uno degli obiettivi del Parlamento europeo il quale, il 14 marzo 2023, ha approvato la proposta di revisione della Direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD) avanzata dalla Commissione (European Commission, 2016). L'obiettivo delle istituzioni è di mitigare l'impatto ambientale del settore, attraverso l'adeguamento del patrimonio edilizio ai moderni standard di efficienza energetica quasi a zero. In vista del 2050, l'EPBD stabilisce che gli edifici e le unità immobiliari di proprietà di enti pubblici, così come gli edifici e le unità immobiliari non residenziali, conseguano al più tardi dal primo gennaio 2027, almeno la classe di prestazione energetica E e dal primo gennaio 2030, almeno la classe di prestazione energetica D. Questi obbiettivi mirano a evitare il dispendio di una considerevole quantità di combustibili fossili non rinnovabili, che potrebbero scarseggiare per le future generazioni, nel riscaldamento e condizionamento degli edifici storici esistenti, senza raggiungere gli auspicati livelli di efficienza energetica e comfort.

### 2.2.1 Gli impegni internazionali

L'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), creato nel 1988 dalla WMO e dall'UNEP, è stato istituito per studiare il riscaldamento globale. Nel suo primo report del 1990, l'IPCC ha evidenziato il rischio di un riscaldamento globale causato dall'aumento delle emissioni di gas serra, derivanti principalmente dall'uso di combustibili fossili. Da questa analisi è emersa la necessità di ridurre tali emissioni, con particolare attenzione ai paesi più industrializzati.
In occasione della **Conferenza delle Nazioni Unite sull'Ambiente e lo Sviluppo**, nota anche come Vertice della Terra, tenutasi a Rio de Janeiro dal 3 al 14 giugno 1992, è stata ulteriormente sottolineata la necessità di una collaborazione globale per contrastare i cambiamenti climatici e stabilizzare le concentrazioni di gas serra nell'atmosfera, principalmente derivanti dall'uso di combustibili fossili. Durante questo storico summit, sono stati adottati vari documenti significativi, tra cui la **Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC)**, che ha rappresentato la prima risposta globale alla sfida dei cambiamenti climatici. In questa occasione, l'Unione Europea si è impegnata a stabilizzare le emissioni di anidride carbonica entro il 2000, mantenendo i livelli registrati nel 1990[28]. Gli Stati membri sono stati chiamati a pianificare e attuare iniziative per la protezione ambientale e per migliorare l'efficienza energetica (ISPRA). L'accordo è entrato in vigore il 21 marzo 1994, ma non imponeva limiti obbligatori sulle emissioni di gas serra per i singoli paesi e, pertanto, non aveva carattere giuridicamente vincolante.
Cinque anni dopo la Conferenza di Rio, il cambiamento climatico torna nuovamente al centro de dibattito internazionale in occasione della "Terza Conferenza delle Parti della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sul cambiamento climatico" che si terrà a Kyoto nel dicembre 1997. In questa occasione si promosse un'ulteriore riduzione delle emissioni di gas serra, tramite il **Protocollo di Kyoto**, sottoscritto nel 1997 da oltre 160 paesi durante la COP3 dell'UNFCCC. Entrato in vigore nel 2005, a differenza della Convenzione quadro sui cambiamenti climatici, è giuridicamente vincolante. Per l'Unione Europea, il Protocollo stabilisce l'obiettivo di una riduzione dell'15% delle emissioni dei gas ad effetto serra, entro il 2012, rispetto ai livelli del 1990[29]. Gli obblighi sono stati distribuiti tra i paesi membri sulla base di diversi criteri, con l'Italia chiamata a ridurre le proprie emissioni del 6,5% nel periodo 2008-2012. In Italia, il Protocollo è stato ratificato nel 2002 con la Legge 120, che prevedeva la preparazione di un Piano di Azione Nazionale per la riduzione delle emissioni.
Nel 2009, con la Direttiva 2009/28/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, è stato approvato il "**Pacchetto clima-energia 20-20-20**" come impegno per contrastare i cambiamenti climatici nell'era post-Kyoto. Gli obiettivi fissati per il 2020 sono racchiusi nella sigla "20-20-20" che indica la volontà dell'UE di raggiungere: la riduzione del 20% delle emissioni di gas serra; il risparmio energetico del 20%; l'incremento al 20% della quota di consumo energetico proveniente da fonti rinnovabili[30].
Il pacchetto stabilisce misure per contenere le emissioni di gas serra, tra cui revisioni del sistema di scambio di quote di emissione (EU ETS) e l'allocazione di quote per i settori non inclusi nel sistema. Vengono anche definiti obiettivi nazionali di riduzione delle emissioni, offrendo agli Stati membri la possibilità di utilizzare una parte delle emissioni consentite per l'anno successivo o di scambiare diritti di emissione tra di loro. Inoltre, il pacchetto introduce direttive per regolamentare il confinamento geologico della $CO_2$ e incentivare l'adozione di energie rinnovabili, fissando target vincolanti per garantire che entro il 2020 almeno il 20% del consumo energetico dell'UE provenga da fonti rinnovabili.
Nel gennaio 2008, il Parlamento Europeo ha denunciato la mancanza di progressi concreti a livello politico e nazionale nel raggiungimento degli obiettivi di mitigazione, criticando anche la scarsa priorità data all'attuazione della legislazione sull'efficienza energetica. Ha quindi sottolineato la necessità di strategie efficaci per affrontare la sfida di un'energia sicura in Europa. Tuttavia, analisi condotte nel 2009 dalla Commissione Europea hanno evidenziato che le misure fino ad allora adottate avrebbero consentito un risparmio di risorse pari solo al 10%, contro l'obiettivo del 20% inizialmente fissato (Lucchi e Pracchi, Efficienza energetica e patrimonio costruito. La sfida del miglioramento delle prestazioni energetiche nell'edilizia storica. 2013).

---

*[28] Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC), art. 4, «each of these Parties shall communicate, within six months of the entry into force of the Convention [...] detailed information on its policies and measures [...] on its resulting projected anthropogenic emissions by sources and removals by sinks of greenhouse gases not controlled [...] with the aim of returning individually or jointly to their 1990 levels these anthropogenic emissions of carbon dioxide and other greenhouse gases not controlled».*
*[29] Protocollo di Kyoto, art. 3, «Le Parti [...] assicureranno, individualmente o congiuntamente, che le loro emissioni antropiche aggregate [...] dei gas ad effetto serra indicati nell'Allegato A, non superino le quantità che sono loro attribuite [...] al fine di ridurre il totale delle emissioni di tali gas almeno del 15% rispetto ai livelli del 1990, nel periodo di adempimento 2008-2012».*
*[30] Nel "Pacchetto clima-energia 20-20-20" le riduzioni del 20% delle emissioni di gas serra sono esplicitamente menzionate in vari documenti chiave, come la Direttiva 2009/28/CE e il Regolamento (CE) n. 406/2009.*

Nel marzo 2011, la Commissione Europea, prendendo atto della possibilità di ottenere un risparmio energetico massimo pari alla metà di quanto inizialmente previsto, in seguito alle misure finora adottate dagli Stati membri, ha introdotto il nuovo **Piano di Efficienza Energetica (PEE)**. Il piano invita gli Stati membri a rispettare gli obiettivi in materia di efficienza energetica, fondamentali per il conseguimento del traguardo dell'Unione Europea di migliorare l'efficienza del 20% entro il 2020. Nel 2013, la Commissione Europea valuterà i risultati raggiunti per verificare se i programmi in atto consentiranno di conseguire l'obiettivo del 20%. Se emergeranno basse probabilità di successo, verrà avviata una seconda fase con la proposta di obiettivi nazionali giuridicamente vincolanti, tenendo conto della situazione di partenza, delle condizioni economiche e delle misure già adottate da ciascuno Stato membro (Europea 2011).

Il fallimento delle strategie adottate per la riduzione delle emissioni, evidenziato dalla difficoltà di raggiungere gli obiettivi previsti, ha spinto la comunità internazionale ad adottare nuove misure. In particolare, è stata estesa la durata del Protocollo di Kyoto fino al 2020, con l'intento di proseguire gli sforzi globali per combattere i cambiamenti climatici. Parallelamente, è stato previsto l'avvio di una serie di nuovi accordi internazionali, noti come l'**Accordo di Parigi**, che sono stati progettati per essere giuridicamente vincolanti per i paesi sottoscrittori.
L'Accordo di Parigi, approvato nel dicembre 2015 durante la COP21 a Parigi, ha fissato nuovi impegni globali per ridurre le emissioni di gas serra. L'obiettivo principale dell'accordo è quello di mantenere l'aumento della temperatura media globale al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali e possibilmente limitare l'aumento a 1,5°C[31]. L'accordo ha richiesto che i paesi sviluppati e quelli in via di sviluppo adottassero misure concrete per ridurre le loro emissioni, con impegni da aggiornare periodicamente. Ogni paese deve presentare i propri piani di azione (Nationally Determined Contributions, NDC) per la riduzione delle emissioni e la promozione di un'economia a basse emissioni di carbonio. L'obiettivo finale è quello di raggiungere la neutralità climatica entro la metà del secolo.
Nel marzo 2012, il Parlamento Europeo ha poi approvato il progetto "**roadmap 2050**" della European Climate Foundation, che propone politiche per ridurre le emissioni di CO2 e rendere l'economia europea competitiva e meno dipendente dalle energie fossili. La roadmap suggerisce una riduzione dell'80-95% delle emissioni di CO2 entro il 2050, con tappe di riduzione del 40% entro il 2030, del 60% entro il 2040 e dell'80% entro il 2050. Il Parlamento riconosce che l'ETS deve migliorare e propone di "congelare" i permessi di inquinare. Nonostante l'Europa contribuisca solo all'11% delle emissioni globali, è importante dimostrare la fattibilità di un'economia a basse emissioni di carbonio.
Nel 2015, le Nazioni Unite hanno adottato l'**Agenda 2030**, che include 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDGs). Gli SDGs chiedono agli Stati membri di intraprendere azioni concrete per ridurre le emissioni di gas serra, migliorare la resilienza ai cambiamenti climatici e promuovere la sostenibilità ambientale. L'Obiettivo 13, in particolare, si concentra su azioni per affrontare i cambiamenti climatici. Prevede di rafforzare la capacità di adattamento ai rischi climatici, integrare le politiche climatiche nelle strategie nazionali e migliorare l'istruzione e la sensibilizzazione. Inoltre, impegna i Paesi sviluppati a mobilitare 100 miliardi di euro annui per i Paesi in via di sviluppo e a rendere operativo il Fondo Verde per il Clima. Infine, promuove la pianificazione climatica nei Paesi meno sviluppati, con particolare attenzione a donne, giovani e comunità vulnerabili.

Le conferenze annuali delle Parti della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (COP), infine, continuano ad essere eventi chiave per i negoziati internazionali sul clima. In particolare, la **COP26**, svoltasi a Glasgow nel 2021, ha visto l'impegno dei paesi a rivedere periodicamente i loro obiettivi di riduzione delle emissioni attraverso il meccanismo degli NDC. La **COP27**, tenutasi nel 2022 a Sharm El-Sheikh, ha evidenziato la necessità di garantire un finanziamento adeguato per i paesi in via di sviluppo e ha spinto per un impegno maggiore nella finanza climatica e nella giustizia climatica.
La tabella che segue sintetizza le tappe principali di questo processo, evidenziando le caratteristiche fondamentali di ciascun intervento e il loro ruolo nel contesto della politica climatica globale (Tabella 5).

[31] *Accordo di Parigi, art. 2, comma 1, «Il presente Accordo [...] mira a rafforzare la risposta globale alla minaccia dei cambiamenti climatici [...] anche tramite: (a) il mantenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto di 2 °C rispetto ai livelli preindustriali e proseguire l'azione volta a limitare l'aumento di temperatura a 1,5° C rispetto ai livelli pre-industriali, riconoscendo che ciò potrebbe ridurre in modo significativo i rischi e gli effetti dei cambiamenti climatici».*

| Periodo | Normativa/Evento | Note e significato principale |
|---|---|---|
| 1988 | Istituzione IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) | Primo organismo internazionale dedicato allo studio del riscaldamento globale, che nel 1990 evidenzia il ruolo delle emissioni di gas serra. |
| 1992 | Vertice della Terra, Rio de Janeiro | Adozione della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC). Prima risposta globale alla sfida climatica. |
| 1994 | Entrata in vigore UNFCCC | Convenzione non vincolante, impegna i paesi a stabilizzare le emissioni di $CO_2$ senza limiti obbligatori per singoli stati. |
| 1997 | Protocollo di Kyoto | Primo accordo vincolante per ridurre le emissioni di gas serra, con obiettivi differenziati per paesi. UE: -15% emissioni entro 2012 rispetto al 1990. |
| 2002 | Ratifica italiana Protocollo di Kyoto (Legge 120/2002) | Impegno formale con Piano di Azione Nazionale per la riduzione delle emissioni. |
| 2009 | Direttiva 2009/28/CE (Pacchetto clima-energia 20-20-20) | Obiettivi UE per il 2020: -20% emissioni gas serra, +20% efficienza energetica, +20% energia da fonti rinnovabili. |
| 2008 | Parlamento Europeo denuncia mancanza di progressi concreti | Critica per la scarsa attuazione delle politiche di efficienza energetica. |
| 2011 | Piano di Efficienza Energetica (PEE) da Commissione Europea | Nuovi obiettivi di efficienza energetica vincolanti, con revisione prevista nel 2013. |
| 2012 | Roadmap 2050 della European Climate Foundation | Piano per ridurre le emissioni UE dell'80-95% entro il 2050, con tappe intermedie e miglioramento del sistema ETS. |
| 2013 | Valutazione della Commissione Europea sui risultati delle misure adottate | Indicazione che i risparmi energetici raggiunti sono solo il 10% rispetto all'obiettivo del 20%. |
| 2015 | Accordo di Parigi (COP21) | Impegno globale per mantenere il riscaldamento sotto i 2°C, con obiettivo ideale a 1,5°C; piani nazionali (NDC) e neutralità climatica entro metà secolo. |
| | Agenda 2030 delle Nazioni Unite | Introduzione degli SDGs, con particolare attenzione all'Obiettivo 13 su azioni per il clima e sostegno ai Paesi in via di sviluppo. |

| Periodo | Normativa/Evento | Note e significato principale |
|---|---|---|
| 2020 | Estensione Protocollo di Kyoto e avvio Accordi di Parigi | Prosecuzione degli sforzi globali, con nuovi accordi vincolanti e revisione periodica degli impegni nazionali. |
| 2021 | COP26, Glasgow | Rafforzamento degli impegni NDC e maggiore attenzione alla finanza climatica per i paesi in via di sviluppo. |
| 2022 | COP27, Sharm El-Sheikh | Conferma della necessità di finanziamenti adeguati e giustizia climatica. |

*Tabella 5. Principali tappe normative e accordi internazionali, europei e nazionali per il contrasto ai cambiamenti climatici.*

### 2.2.2 Le azioni e le normative a livello europeo

A livello europeo, negli anni '80, un interesse nascente per le questioni ambientali ed energetiche, probabilmente influenzato dalla Conferenza di Rio, emerge con particolare rilevanza il 7 giugno 1985 quando il Parlamento Europeo emanò la **Direttiva 85/337/CEE** riguardante la valutazione di impatto ambientale (VIA) al fine di garantire che i progetti con un potenziale impatto significativo sull'ambiente siano sottoposti a una valutazione prima della loro approvazione[32].
Il 13 settembre 1993 è stata adottata la **Direttiva 93/76/CEE**, che ha l'obiettivo di ridurre le emissioni di biossido di carbonio migliorando l'efficienza energetica. A tal fine, gli Stati membri devono attuare specifici programmi, tra l'isolamento termico degli edifici di nuova costruzione. Alla Direttiva si deve infine il merito di aver introdotto, per la prima volta, il concetto di certificazione energetica[33]. Le due direttive furono le prime a introdurre i concetti di valutazione di impatto ambientale e di certificazione energetica.

La Direttiva EPDB I o **Direttiva 2002/91/CE**, conosciuta come Energy Performance of Buildings Directive (EPBD), rappresenta uno dei pilastri fondamentali del quadro normativo dell'Unione Europea per la riduzione dei consumi energetici nel settore edilizio. La EPBD si propone di: promuovere il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici all'interno dell'UE, attraverso l'adozione di una metodologia di calcolo del rendimento energetico (Energy Performance – EP); stabilire requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici di nuova costruzione e per quelli esistenti di grande metratura sottoposti a ristrutturazioni importanti; introdurre la certificazione energetica, con una validità massima di 10 anni e obbligatoria sia per gli edifici di nuova costruzione che per quelli esistenti in caso di compravendita o locazione. La certificazione deve essere aggiornata ogni volta che un intervento di ristrutturazione modifica le prestazioni energetiche dell'edificio.
Un aspetto cruciale della Direttiva 2002/91/CE è l'attenzione dedicata alla riqualificazione del patrimonio edilizio esistente, imponendo specifici requisiti di efficienza energetica per gli edifici con una superficie superiore a 1000 $m^2$. Tuttavia, la normativa consente agli Stati membri di escludere alcune categorie di edifici, come quelli riconosciuti come patrimonio storico o architettonico, qualora l'applicazione dei requisiti energetici comporti un'alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto[34]. Questa disposizione offre dunque margine di flessibilità agli operatori, consentendo loro di valutare caso per caso l'applicazione delle norme.
La **Direttiva 2003/87/CE**, nota anche come Emissions Trading, stabilisce il sistema di scambio delle emissioni (ETS) dell'Unione Europea, un meccanismo chiave per ridurre le emissioni di gas a effetto serra in modo economicamente efficiente. Basato sul principio di limitazione e scambio, il sistema impone un tetto massimo alle emissioni, consentendo alle aziende di acquistare o vendere quote di $CO_2$.

La **Direttiva 2006/32/CE** mira a rendere l'uso finale dell'energia più economico ed efficiente, eliminando gli ostacoli nel mercato e creando condizioni favorevoli per lo sviluppo di un mercato dei servizi energetici. Si concentra sulla promozione di programmi di risparmio energetico e altre misure per migliorare l'efficienza energetica rivolte agli utenti finali. La direttiva stabilisce un obiettivo indicativo di risparmio energetico del 9% da raggiungere entro il 2016, attraverso l'adozione di un Piano Nazionale per l'Efficienza Energetica (PNAEE)[35]. Inoltre, richiede agli Stati membri di designare un'agenzia o autorità responsabile per monitorare e garantire il raggiungimento di questi obiettivi.

La **Direttiva 2009/28/CE** sulla promozione dell'energia da fonti rinnovabili abroga le direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE e stabilisce obiettivi per l'energia da fonti rinnovabili per il 2020, includendo: 20% di energia da fonti

---

*[32] Direttiva 85/337/CEE, art. 2, comma 1, «Gli stati membri adottano le disposizioni necessarie affinché, prima del rilascio dell'autorizzazione, i progetti per i quali si prevede un impatto ambientale importante, segnatamente per la loro natura, le loro dimensioni o la loro ubicazione, formino oggetto di una valutazione del loro impatto».*
*[33] Direttiva 93/76/EEC, art. 2, «Gli Stati membri stabiliscono e attuano programmi concernenti la certificazione energetica degli edifici. La certificazione energetica degli edifici, consistente nella descrizione dei loro parametri energetici, deve permettere l'informazione dei potenziali utenti di un edificio circa la sua efficienza energetica».*
*[34] Direttiva 2002/91/CE, art. 4, «Gli Stati membri possono decidere di non istituire o di non applicare i requisiti […] per le seguenti categorie di fabbricati: edifici e monumenti ufficialmente protetti come patrimonio designato o in virtù del loro speciale valore architettonico o storico, nei casi in cui il rispetto delle prescrizioni implicherebbe un'alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto».*
*[35] Direttiva 2006/32/CE, art. 4, comma 1, «Gli Stati membri adottano e mirano a conseguire un obiettivo nazionale indicativo globale di risparmio energetico, pari al 9 % per il nono anno di applicazione della presente direttiva […]. Gli Stati membri adottano misure efficaci sotto il profilo costi-benefici, praticabili e ragionevoli, intese a contribuire al conseguimento di detto obiettivo».*

rinnovabili nel consumo di energia lordo della Comunità[36]; 10% di energia da fonti rinnovabili nei trasporti[37]. Gli Stati membri devono poi adottare un piano di azione nazionale (PAN) con obiettivi settoriali per elettricità, riscaldamento e raffrescamento e trasporti e indicare le misure per raggiungere questi obiettivi.

La Direttiva EPDB II o **Direttiva 2010/31/CE**, emanata dall'Unione Europea nel maggio del 2010, ha rinnovato e sostituito la precedente Direttiva 200 2/91/CE. La Direttiva mantiene e rinforza gli obiettivi previsti dalla EPDB I, lasciando inalterato il ruolo degli Stati membri, ma impone loro di fissare requisiti minimi di prestazione energetica per edifici nuovi ed esistenti da rivedere ogni 5 anni, garantire la certificazione energetica e disciplinare i controlli sugli impianti di climatizzazione e chiede che, entro il 2021, tutte le nuove costruzioni siano "edifici a energia quasi zero". In particolare, gli edifici di nuova costruzione pubblici devono rispettare i criteri di "energia quasi zero" entro il 2018, mentre per gli altri edifici, il termine è il 31 dicembre 2020[38].
La Direttiva 2010/31/CE chiarisce il concetto di "ristrutturazione importante" per gli edifici esistenti, definendola come una ristrutturazione in cui il costo supera il 25% del valore dell'edificio o interessa più del 25% della superficie dell'involucro dell'edificio e impone anche a questi di rispondere ai requisiti previsti. Infine, la direttiva introduce l'obbligo di rispettare i requisiti normativi anche per edifici di dimensioni medio-piccole, affinché possano rappresentare l'intero patrimonio edilizio esistente.
Tuttavia, come nella precedente direttiva EPBD, sono previste deroghe per gli edifici di valore storico e architettonico, qualora gli interventi di adeguamento possano compromettere il loro carattere o aspetto[39]. Inoltre, l'assenza di linee guida specifiche per gli interventi sugli edifici esistenti ha reso difficile uniformare le modalità di applicazione della normativa nei vari Paesi dell'UE.
La **Direttiva 2012/27/UE** sull'efficienza energetica si propone di migliorare l'efficienza energetica del 20% entro il 2020 rispetto ai livelli del 1990[40] e rafforza ulteriormente gli obiettivi di efficienza e di riduzione delle emissioni di gas serra previsti per il 2030. Tutti gli Stati membri sono tenuti a fissare obiettivi nazionali di efficienza energetica per raggiungere questo obiettivo. La direttiva promuove l'efficienza energetica in tutta l'UE attraverso misure che coprono ogni fase della catena dell'energia, dalla generazione alla distribuzione e al consumo finale. Con la revisione introdotta dalla **Direttiva UE 2018/2002**, l'obiettivo di efficienza energetica è stato elevato al 32,5% entro il 2030[41]. Ancora una volta, sono esclusi dagli interventi di ristrutturazione gli edifici ufficialmente tutelati per il loro riconosciuto valore storico o architettonico, o perché situati in aree soggette a vincoli di protezione[42].

La **Direttiva UE 2018/844** fissa obiettivi ambiziosi per il 2030. In particolare, la Direttiva mira a ridurre le emissioni di gas serra di almeno il 40% entro il 2030 rispetto al 1990, aumentare la quota di energia da fonti rinnovabili, realizzare un risparmio energetico in linea con le ambizioni dell'Unione Europea e migliorare la sicurezza energetica, la competitività e la sostenibilità dell'Europa.

---

*[36] Direttiva 2009/28/CE, art. 3, comma 1, «Ogni Stato membro assicura che la propria quota di energia da fonti rinnovabili sul consumo finale lordo di energia nel 2020 […] sia almeno pari al proprio obiettivo nazionale generale per la quota di energia da fonti rinnovabili per quell'anno […]. Tali obiettivi nazionali generali obbligatori sono coerenti con l'obiettivo di una quota pari almeno al 20 % di energia da fonti rinnovabili nel consumo finale lordo di energia della Comunità nel 2020».*
*[37] Direttiva 2009/28/CE, art. 3, comma 4, «Ogni Stato membro assicura che la propria quota di energia da fonti rinnovabili in tutte le forme di trasporto nel 2020 sia almeno pari al 10 % del consumo finale di energia nel settore dei trasporti nello Stato membro».*
*[38] Direttiva 2010/31/CE, art. 9, comma 1, «Gli Stati membri provvedono affinché: a) entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici a energia quasi zero; e b) a partire dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi siano edifici a energia quasi zero».*
*[39] Direttiva 2010/31/CE, art. 9, comma 1, «Gli Stati membri possono decidere di non fissare o di non applicare i requisiti di cui al paragrafo 1 per le seguenti categorie edilizie: a) edifici ufficialmente protetti come patrimonio designato o in virtù del loro particolare valore architettonico o storico, nella misura in cui il rispetto di determinati requisiti minimi di prestazione energetica implichi un'alterazione inaccettabile del loro carattere o aspetto».*
*[40] Direttiva 2012/27/UE, art. 1, comma 1, «La presente direttiva stabilisce un quadro comune di mi sure per la promozione dell'efficienza energetica nell'Unione al fine di garantire il conseguimento dell'obiettivo principale del l'Unione relativo all'efficienza energetica del 20 % entro il 2020 e di gettare le basi per ulteriori miglioramenti dell'efficienza energetica al di là di tale data».*
*[41] Direttiva UE 2018/2002, art. 1, comma 1, «La presente direttiva stabilisce un quadro comune di misure per promuovere l'efficienza energetica nell'Unione al fine di garantire il conseguimento degli obiettivi principali dell'Unione in materia di efficienza energetica del 20 % per il 2020 e il conseguimento dell'obiettivo principale in materia di efficienza energetica di almeno il 32,5 % per il 2030 e getta le basi per ulteriori miglioramenti dell'efficienza energetica al di là di tali scadenze».*
*[42] Direttiva 2012/27/UE, articolo 5, comma 2, «Gli Stati membri possono decidere di non fissare o di non applicare i requisiti […] per le seguenti categorie di edifici: edifici ufficialmente protetti in virtù dell'appartenenza a determinate aree ovvero del loro particolare valore architettonico o storico, nella misura in cui il rispetto di determinati requisiti minimi di prestazione energetica modificherebbe in maniera inaccettabile il loro carattere o aspetto».*

Per raggiungere questi obiettivi, è previsto un riesame delle direttive 2012/27/UE e 2010/31/UE, con modifiche e un ampliamento dei finanziamenti. La Direttiva UE 2018/844 e il DLgs n. 48 attuano la direttiva del 30/05/2018, n. 844, modificando il D.Lgs. 192/2005.

La **Direttiva UE 2023/1791**, entrata in vigore nell'ottobre 2023, fissa obiettivi ambiziosi per ridurre il consumo energetico e migliorare l'efficienza nell'UE entro il 2030, con l'obiettivo di ridurre il consumo di energia primaria e finale del 11,7% rispetto alle previsioni del 2020. Il settore pubblico è chiamato a ridurre il consumo di energia finale del 1,9% annuo e a ristrutturare almeno il 3% degli edifici pubblici ogni anno. La direttiva stabilisce anche che tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno essere a emissioni zero dal 2030, con un anticipo per gli edifici pubblici dal 2028. Gli edifici residenziali dovranno migliorare del 16% il loro consumo energetico entro il 2030, con un ulteriore miglioramento tra il 20% e il 22% entro il 2035. La strategia "*Renovation Wave*" mira poi a raddoppiare il tasso di ristrutturazione degli edifici nei prossimi dieci anni, contribuendo così a una maggiore efficienza energetica.

La nuova **Direttiva UE 2024/1275**, o EPBD IV, pubblicata nel maggio 2024, mira alla decarbonizzazione del patrimonio edilizio europeo entro il 2050. Gli Stati membri dovranno recepirla entro il 29 maggio 2026 e predisporre piani nazionali di ristrutturazione per rendere gli edifici a emissioni zero. Gli obiettivi principali includono la riduzione dell'uso dell'energia primaria media negli edifici residenziali del 16% entro il 2030, del 20-22% entro il 2035 rispetto ai livelli del 2020[43], la riduzione, per gli edifici non residenziali, del consumo energetico del 16% entro il 2030 e del 26% entro il 2033, con un progressivo abbassamento fino al 2050 mentre gli edifici di nuova costruzione dovranno essere a emissioni zero entro il 2030, con un'anticipazione al 2028 per gli edifici pubblici[44].
Il riesame della EPBD del 2024 introduce nuovi requisiti per accelerare gli interventi di efficienza, favorire l'eliminazione graduale dei combustibili fossili, promuovere l'uso delle rinnovabili e adottare standard più ambiziosi come gli edifici a emissioni zero. Si pone attenzione anche agli impatti ambientali lungo l'intero ciclo di vita degli edifici e ai benefici sociali come la salute e la riduzione dell'inquinamento.

Ad oggi, l'ultimo rapporto pubblicato dalla Commissione Europea pubblicato nel 2025, mostra come, tra il 2005 e il 2022, il consumo energetico del settore residenziale è diminuito del 9%, mentre quello del settore dei servizi è calato di circa 6,3 Mtoe. Le proiezioni al 2030 indicano una possibile riduzione del 14% dei consumi energetici e del 35% delle emissioni dirette rispetto al 2019, ma tali valori sono inferiori agli obiettivi previsti dal *Climate Target Plan*. I dati 2020-2021 mostrano progressi disomogenei tra gli Stati membri; alcuni richiederanno sforzi aggiuntivi. Inoltre, nel settore residenziale, esiste un divario del 58% tra i risparmi energetici previsti entro il 2030 e quelli necessari per rispettare la nuova Direttiva sull'Efficienza Energetica. I futuri Piani Nazionali di Ristrutturazione, attesi entro il 2025, dovranno quindi aggiornare gli obiettivi in linea con le ambizioni dell'UE (Commission 2025).
Complessivamente, quindi, il rapporto evidenzia progressi verso la decarbonizzazione del patrimonio edilizio, ma sottolinea la necessità di politiche più ambiziose per raggiungere gli obiettivi al 2030, 2040 e 2050.

La tabella seguente riassume i principali atti legislativi e momenti chiave a livello europeo, evidenziando le tappe fondamentali e il loro impatto sulla tutela ambientale e l'efficienza energetica degli edifici, con un focus specifico sulle normative che prevedono eccezioni per il patrimonio storico e architettonico (Tabella 6).

---

[43] *Direttiva UE 2024/1275, art. 9, comma 2, «Gli Stati membri provvedono affinché il consumo medio di energia primaria in kWh/(m2.a) dell'intero parco immobiliare residenziale: a) diminuisca di almeno il 16 % rispetto al 2020 entro il 2030; b) diminuisca di almeno il 20-22 % rispetto al 2020 entro il 2035; c) entro il 2040 e successivamente ogni cinque anni, sia equivalente o inferiore al valore determinato a livello nazionale derivato da un progressivo calo del consumo medio di energia primaria dal 2030 al 2050 in linea con la trasformazione del parco immobiliare residenziale in un parco immobiliare a emissioni zero».*

[44] *Direttiva UE 2024/1275, art. 9, comma 1, «Le norme minime di prestazione energetica garantiscono almeno che tutti gli edifici non residenziali siano al di sotto: a) della soglia del 16 % a decorrere dal 2030; e b) della soglia del 26 % a decorrere dal 2033. Il rispetto delle soglie da parte di singoli edifici non residenziali è verificato sulla base di attestati di prestazione energetica […].Gli Stati membri stabiliscono scadenze specifiche entro le quali gli edifici non residenziali dovranno rispettare soglie massime di prestazione energetica inferiori entro il 2040 e il 2050, in linea con il percorso di trasformazione del parco immobiliare nazionale in edifici a emissioni zero».*

| Periodo | Normativa/Evento Europeo | Note e significato principale |
|---|---|---|
| 1985 | Direttiva 85/337/CEE (Valutazione di Impatto Ambientale - VIA) | Prima normativa UE che impone la valutazione ambientale preventiva per progetti con possibile impatto significativo sull'ambiente. |
| 1993 | Direttiva 93/76/CEE | Introduce la certificazione energetica e programmi per migliorare l'efficienza energetica, compreso isolamento termico degli edifici nuovi. |
| 2002 | Direttiva 2002/91/CE (EPBD I) | Norme fondamentali per la prestazione energetica degli edifici; certificazione energetica obbligatoria; esenzioni per edifici storici. |
| 2003 | Direttiva 2003/87/CE (Emissions Trading System - ETS) | Sistema europeo di scambio delle quote di emissione di $CO_2$ per ridurre i gas serra in modo economicamente efficiente. |
| 2006 | Direttiva 2006/32/CE | Promozione del risparmio energetico con obiettivo indicativo del 9% entro il 2016, tramite Piani Nazionali per l'Efficienza Energetica (PNAEE). |
| 2009 | Direttiva 2009/28/CE | Obiettivi vincolanti per le energie rinnovabili: 20% nel consumo energetico totale e 10% nei trasporti entro il 2020. |
| 2010 | Direttiva 2010/31/CE (EPBD II) | Rafforza EPBD I: edifici a energia quasi zero entro il 2021; certificazione energetica e requisiti per ristrutturazioni importanti; deroghe per edifici storici. |
| 2012 | Direttiva 2012/27/UE | Efficienza energetica con obiettivo del 20% entro il 2020; promozione dell'efficienza in tutta la catena energetica; revisione nel 2018. |
| 2018 | Direttiva UE 2018/844 | Aggiorna le direttive EPBD e sull'efficienza energetica; obiettivi più ambiziosi al 2030 per riduzione emissioni e aumento energie rinnovabili. |
| 2023 | Direttiva UE 2023/1791 | Obiettivi per ridurre il consumo energetico del 11,7% entro il 2030; edifici a emissioni zero dal 2030; aumento del tasso di ristrutturazione. |
| 2024 | Direttiva UE 2024/1275 (EPBD IV) | Decarbonizzazione del patrimonio edilizio entro il 2050; piani nazionali di ristrutturazione; edifici a emissioni zero; focus su salute e ambiente. |
| 2005-2022 | Report Commissione Europea (2025) | Consumi energetici residenziali diminuiti del 9%, servizi del 6,3 Mtoe; progressi insufficienti per raggiungere gli obiettivi climatici UE. |

*Tabella 6. Principali direttive e politiche europee per l'efficienza energetica e la riduzione delle emissioni nel settore edilizio (1985-2025).*

### 2.2.3 Il quadro normativo italiano

In Italia l'attenzione verso una gestione più consapevole delle fonti energetiche ha iniziato a svilupparsi nella prima metà degli anni '70.
Il primo **Piano Energetico Nazionale (PEN)** in Italia risale al 1975. Questo piano è stato il punto di partenza per lo sviluppo della normativa in materia di efficienza energetica nel Paese e nasce, in risposta alla grave crisi petrolifera vissuta dal territorio, per ridurre la dipendenza dalle importazioni e promuovere la sicurezza energetica a lungo termine. In concomitanza con l'avvio del PEN, è stata avviata una programmazione della politica energetica che ha portato a una vasta produzione normativa nel settore.
Il 30 marzo 1976, al fine di contenere il consumo energetico, viene emanata la **Legge n. 373** "*Norme per il contenimento del consumo energetico per usi termici negli edifici", conosciuta anche come "Legge Quadro sull'Energia*". Questa Legge ha rappresentato un passo significativo nella regolamentazione del settore energetico in Italia. Tra gli obiettivi principali della Legge c'era quello di regolamentare l'installazione e l'esercizio dei diversi componenti impiantistici per riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria, promuovere una gestione razionale delle risorse energetiche tenendo conto delle condizioni climatiche locali, garantire la sicurezza dell'approvvigionamento energetico del Paese e sviluppare fonti di energia alternative. Negli anni '70, in Italia vengono introdotti per la prima volta concetti innovativi come il fattore di forma S/V, i gradi giorno e la classificazione degli edifici. Tuttavia, la normativa sull'isolamento termico degli edifici esistenti lasciava ampia discrezionalità ai Comuni, demandando al Sindaco la decisione sull'applicazione delle norme in caso di ristrutturazioni, previo parere tecnico della commissione edilizia[45].
La successiva **Legge n. 308 del 29 maggio 1982** "*Norme sul contenimento dei consumi energetici, lo sviluppo delle fonti rinnovabili di energia e l'esercizio di centrali elettriche alimentate con combustibili diversi dagli idrocarburi*", pubblicata il 7 luglio 1982 sulla Gazzetta Ufficiale n. 154, promuove il contenimento dei consumi energetici e l'utilizzo delle fonti rinnovabili di energia, in linea con la politica energetica dell'Unione Europea. Le fonti rinnovabili considerate includono sole, vento, energia idraulica, geotermica, maree, moto ondoso e trasformazione dei rifiuti organici e inorganici. Anche il calore recuperabile da vari processi industriali è considerato fonte rinnovabile.
La **Legge n. 10 del 9 gennaio 1991** "*Norme per l'attuazione del Piano Energetico Nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia*" rappresenta un passo significativo nell'ambito dell'efficienza energetica e dello sviluppo delle fonti rinnovabili di energia in Italia. Introduce il concetto di sistema edificio-impianto, evidenziando che la riduzione dei consumi energetici non può essere ottenuta solo migliorando le prestazioni dell'involucro degli edifici, ma anche utilizzando fonti di energia rinnovabile e adottando una visione integrata dell'edificio e dei suoi utilizzi. La Legge sottolinea l'importanza della certificazione energetica per valutare le prestazioni energetiche degli edifici e promuovere pratiche di risparmio energetico. Nei casi di recupero del patrimonio edilizio esistente "*l'applicazione della Legge è graduata in relazione al tipo di intervento, secondo la tipologia individuata dall'articolo 31 della Legge 5 agosto 1978, n. 457*".
La piena attuazione della Legge 10/1991, che richiedeva norme UNI per definire i metodi di calcolo a livello nazionale, è stata compromessa dalla mancanza di decreti attuativi che fossero in grado di definire le modalità di concretizzazione della stessa. Solo una piccola parte di questi decreti è stata effettivamente emessa, rendendo la Legge inefficace nonostante le sue innovazioni nel contesto europeo.
Il quadro normativo italiano è stato successivamente chiarito e regolamentato attraverso due decreti legislativi di recepimento nazionale della Direttiva Europea EPBD: il **D. Lgs. 192/2005** e il **D. Lgs. 311/2006**. Questi decreti hanno definito i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici, di nuova costruzione ed esistenti ove sottoposti a ristrutturazioni o riqualificazioni energetiche e le metodologie di calcolo necessarie per valutarne e certificarne le prestazioni.
In particolare il D. Lgs. 192/2005, che si applica sia all'edilizia pubblica che privata e definisce una strategia di lungo termine per ristrutturare il parco immobiliare nazionale e un Piano di azione per promuovere gli edifici esistenti in "edifici a energia quasi zero", fu il principale riferimento normativo per la certificazione energetica, dal momento che è stato il primo a definire il ruolo e le responsabilità del certificatore. Il decreto infine, per mezzo della specifica tecnica UNI/TS 11300, definisce una metodologia di calcolo univoca per la determinazione delle prestazioni energetiche degli edifici e fissa requisiti per il fabbisogno di energia primaria e la trasmittanza termica dei vari componenti degli edifici, da osservare sia per nuove costruzioni che per interventi su edifici esistenti.
I beni vincolati e tutelati dal D. Lgs. 42/2004 sono esclusi dall'applicazione del decreto nel caso in cui l'adeguamento alle prescrizioni previste comporterebbe un'alterazione inaccettabile del loro carattere storico o

[45] *Legge n. 373 del 30 marzo 1976, art. 15.*

artistico. Questo significa che, se un intervento richiesto per conformarsi alle normative dovesse compromettere l'integrità estetica o strutturale di un edificio di valore culturale, la tutela del bene prevale sull'obbligo di adeguamento.
Il e è stato emanato l'anno successivo per integrare e correggere il precedente D. Lgs. 192/2005, ampliandone l'ambito di applicazione. Le principali novità introdotte riguardano l'estensione delle norme agli impianti installati nelle nuove costruzioni e ai nuovi impianti realizzati in edifici esistenti. Inoltre, il decreto ha imposto limiti più stringenti alla trasmittanza termica degli edifici, riducendo i valori precedentemente stabiliti dal D. Lgs. 192/2005.
Il **D. Lgs. 115/2008** e il **successivo D. Lgs. 56/2010** hanno ampliato le misure per migliorare l'efficienza energetica e ridurre le emissioni di gas serra. Il D.P.R. 59/2009 ha uniformato la normativa per le regioni prive di regolamentazione specifica, mentre il D.M. 26/6/2009 ha reintrodotto l'obbligo di certificazione energetica degli edifici.
Il **D.P.R. 59/2009** ha definito requisiti di trasmittanza termica più severi e che si applicano indistintamente "*alla prestazione energetica per l'edilizia pubblica e privata anche riguardo alle ristrutturazioni di edifici esistenti*"[46]. Il Decreto ha reso obbligatoria la verifica dei requisiti di prestazione energetica anche per il raffrescamento estivo. Per le pareti opache è richiesta l'assenza di condensa superficiale, la limitazione di quella interstiziale e il rispetto di specifici valori di trasmittanza termica periodica. Per le superfici vetrate, è obbligatoria l'adozione di schermature solari esterne, salvo dimostrata non convenienza tecnico-economica o in presenza di vetri con fattore solare ≤ 0,5. L'obbligo di rispettare requisiti minimi per singoli elementi tecnici rappresenta una distorsione della normativa in chiave conservativa, poiché privilegia un approccio prescrittivo puntuale invece di una visione sistemica dell'edificio-impianto, in contrasto con l'impostazione integrata proposta dalla direttiva 2002/91/CE. Inoltre, le gradualità di applicazione delle norme, basata solo sul tipo e sull'entità dell'intervento, non considera il valore culturale dell'immobile, rischiando di compromettere la conservazione e la sostenibilità complessiva (Lucchi e Pracchi, Efficienza energetica e patrimonio costruito. La sfida del miglioramento delle prestazioni energetiche nell'edilizia storica. 2013).
Il **D.L. 63/2013** ha recepito la Direttiva 2010/31/UE, chiarendo i concetti di "*edificio a energia quasi zero*" e "*livello ottimale di prestazione energetica*". In aggiunta, ha previsto una deroga automatica per gli edifici sottoposti a vincolo ai sensi del D. Lgs. 42/2004, escludendoli dagli obblighi di riqualificazione energetica anche quando l'applicazione delle prescrizioni avrebbe comportato solo modifiche compatibili con il loro carattere storico-artistico o con l'aspetto del bene. Questa deroga ha accentuato il divario tra edifici vincolati e non, bloccando spesso i primi in un'immobilità non sempre necessaria. Anche l'obbligo di redigere l'APE e di gestire impianti tecnici negli edifici tutelati non basta a bilanciare la rigidità procedurale introdotta dal nuovo decreto (Lucchi e Pracchi, Efficienza energetica e patrimonio costruito. La sfida del miglioramento delle prestazioni energetiche nell'edilizia storica. 2013).
Con il **Decreto interministeriale del 26 giugno 2015**, emanato dal Ministro dello Sviluppo Economico in collaborazione con altri ministeri, si aggiornano le Linee Guida Nazionali per la certificazione energetica degli edifici, ai sensi del decreto legislativo 192/2005 e successive modifiche ed integrazioni. Il decreto mira a promuovere l'applicazione uniforme e coordinata della certificazione energetica degli edifici su tutto il territorio nazionale. In particolare, definisce le Linee Guida Nazionali per la certificazione energetica degli edifici, gli strumenti di coordinamento tra lo Stato e le regioni e istituisce un sistema informativo comune per gestire un catasto nazionale degli attestati di prestazione energetica e degli impianti termici. Questo adeguamento avviene in base al decreto legislativo 192/2005 e coinvolge l'Allegato 1 delle Linee Guida (insieme alle relative appendici A, B, C e D), che include la presenza di: metodologie di calcolo per ridurre i costi per i cittadini; il formato dell'Attestato di Prestazione Energetica (APE), che include tutti i dati sull'efficienza energetica e sull'uso di fonti rinnovabili, per consentire ai cittadini di valutare e confrontare diversi edifici; Uno schema standard per l'annuncio di vendita o locazione degli edifici, che uniforma le informazioni sulla qualità energetica fornite ai cittadini e la definizione di un sistema informativo comune per il territorio nazionale (SIAPE) per gestire i dati relativi agli attestati di prestazione energetica.

Negli ultimi anni, l'Italia ha rafforzato il proprio quadro normativo per affrontare la crisi climatica, definendo l'obiettivo della neutralità climatica entro il 2050 nella strategia a lungo termine del 2021 e nel Piano Nazionale per la Transizione Ecologica (PNTE) del 2022. Quest'ultimo integra misure su adattamento ai cambiamenti climatici, biodiversità, economia circolare, bioeconomia e riduzione dell'inquinamento.
Nel dicembre 2019, con il Decreto Clima, è stata avviata una politica strategica nazionale per affrontare il cambiamento climatico e migliorare la qualità dell'aria, introducendo misure su mobilità sostenibile, riforestazione

[46] *D.P.R. 59/2009, Art. 1, comma 3.*

e gestione dei dati ambientali, in linea con il Green Deal europeo. Tuttavia, l'Italia non dispone ancora di una legge climatica dedicata, né di un consiglio scientifico consultivo sul cambiamento climatico, strumenti presenti in altri Paesi dell'Unione Europea.
Nel febbraio 2022, la Costituzione italiana è stata modificata per includere esplicitamente il principio dello sviluppo sostenibile e il riferimento alla tutela delle generazioni future, rafforzando il ruolo della sostenibilità tra i principi fondamentali dello Stato. A livello legislativo, lo Stato può adottare normative ambientali e climatiche, salvo che tali competenze siano delegate o condivise con le Regioni.
Dal punto di vista istituzionale, nel 2021 è stato istituito il Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica e lo Sviluppo Sostenibile (CIPESS), con il compito di integrare la sostenibilità nelle politiche pubbliche. Nel 2023 è stato nominato Francesco Corvaro come Inviato Speciale per il Cambiamento Climatico, incaricato di rappresentare l'Italia nei principali consessi internazionali sul clima.
Dal punto di vista strategico, dopo la Strategia nazionale di adattamento del 2015, nel dicembre 2023 è stato adottato il **Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici (PNACC)**, il cui obiettivo principale è fornire un quadro nazionale per l'attuazione di azioni volte a minimizzare i rischi derivanti dai cambiamenti climatici, migliorare la capacità di adattamento dei sistemi socio-economici e naturali, nonché sfruttare eventuali opportunità che possano emergere in un nuovo contesto climatico. Il PNACC è stato inoltre sottoposto a procedura di Valutazione Ambientale Strategica (VAS).
Oltre al PNACC, è importante citare la «Strategia Forestale Nazionale per il settore forestale e le sue filiere» (SFN), la cui missione è quella di portare il Paese ad avere foreste estese, resilienti e biodiversificate, capaci di contribuire sia alla mitigazione che all'adattamento alla crisi climatica, offrendo benefici ecologici, sociali ed economici per le comunità rurali e montane. La SFN deriva da un impegno europeo, la Strategia Forestale dell'Unione Europea di luglio 2021, ed è stata pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale il 9 febbraio 2022, con validità ventennale.

Il Consiglio Europeo del 10-11 dicembre 2020 ha adottato l'obiettivo di riduzione netta delle emissioni dell'UE di almeno il 55% entro il 2030 rispetto al 1990. Il 29 luglio 2021 è entrata in vigore la Legge Europea sul Clima (Regolamento (UE) 2021/1119), che rende coerente l'obiettivo dell'UE per il 2030, «stabilisce l'obiettivo vincolante della neutralità climatica nell'Unione entro il 2050» e «istituisce un quadro per il progresso verso l'obiettivo complessivo di adattamento».

L'Unione Europea intende raggiungere l'obiettivo domestico di riduzione delle emissioni nette di gas serra per il 2030 di almeno il 55% rispetto al 1990, includendo anche le rimozioni e le emissioni di gas serra provenienti dal settore LULUCF (uso del suolo, cambiamento di uso del suolo e silvicoltura). Il pacchetto di proposte legislative, noto come Fit for 55, comprende, tra l'altro, proposte di riforma dell'insieme di direttive e regolamenti che definiscono il sistema ETS (Emission Trading Scheme), il Regolamento Effort Sharing (ESR), LULUCF, l'efficienza energetica e gli obiettivi sulle energie rinnovabili per gli Stati membri.

Le recenti revisioni della normativa rilevante incluse nel pacchetto Fit for 55 prevedono una riduzione maggiore delle emissioni ETS a livello collettivo europeo, dal -43% al -62% e per le emissioni soggette al Regolamento ESR dal -30% al -40% rispetto all'anno 2005.

Il pacchetto Fit for 55 include inoltre disposizioni che ridisegnano l'ambito di applicazione del sistema ETS (prodotte dalle industrie energetiche, dall'energia dell'aviazione, dal settore marittimo, trasporti e edifici – Allegati I e III della Direttiva 2003/87/CE), prevedendo una riduzione maggiore a livello europeo dal -43% al -62% e per le emissioni soggette al Regolamento ESR dal -30% al -40% rispetto al 2005.

Il pacchetto Fit for 55 prevede anche la revisione dell'ambito di applicazione del sistema ETS, che integrerà le emissioni provenienti dal trasporto marittimo e, a partire dal 2027, quelle derivanti dal riscaldamento degli edifici e dal traffico su strada, che pur essendo regolati dallo strumento ETS, resteranno inclusi nell'ambito dell'Effort Sharing. Analogamente, le emissioni da attività incluse nel sistema ETS ai soli fini degli articoli 14 e 15 della Direttiva 2003/87/CE rimangono nell'ambito del Regolamento ESR.

Inoltre, per quanto riguarda il settore LULUCF, il Regolamento (UE) 2023/839, che ha modificato il precedente Regolamento (UE) 2018/841, prevede un obiettivo collettivo di rimozione di 310 MtCO2eq a livello europeo entro il 2030. A livello nazionale, sono stati definiti gli obiettivi per l'area target della neutralità emissiva a partire dal 2025, con riferimento al periodo di rendicontazione 2021-2025 e un obiettivo per il 2030 di almeno -35,8 MtCO2eq, con la definizione della traiettoria 2026-2029 entro il 2025 e i conseguenti obiettivi annuali LULUCF.

Le emissioni di gas a effetto serra (GHG) derivanti dagli usi energetici rappresentano l'82% del totale nazionale di circa 413 milioni di tonnellate equivalenti di CO2 nel 2022 [MtCO2eq] (inventario nazionale delle emissioni di GHG, escludendo le emissioni e le rimozioni LULUCF). La quota residua di emissioni proviene da fonti non energetiche, principalmente correlate ai processi industriali, gas fluorurati, agricoltura e rifiuti.

L'Italia ha raggiunto con successo gli obiettivi europei al 2020 su emissioni di gas serra, fonti rinnovabili e consumi energetici, con una riduzione significativa delle emissioni nei settori industriale ed energetico tra il 2005 e il 2023. Tuttavia, permangono delle criticità: secondo il *Climate Change Performance Index 2025*, l'Italia riceve una valutazione complessivamente bassa, in particolare per lo sviluppo insufficiente delle energie rinnovabili e la costruzione di nuove infrastrutture a gas.
Nel 2022, i combustibili fossili rappresentavano ancora l'84,4% dell'approvvigionamento energetico italiano, con un'elevata dipendenza dalle importazioni: il 94,2% per il petrolio, il 95,9% per il gas e il 100% per il carbone. Sebbene l'Italia abbia ridotto le importazioni di gas dalla Russia e stia ampliando l'infrastruttura per il gas naturale liquefatto (LNG), la transizione verso un sistema energetico decarbonizzato procede con lentezza. Il carbone, che copriva il 4% dell'energia nel 2022, sarà eliminato entro il 2025.
Nonostante la precoce realizzazione degli obiettivi rinnovabili del 2020, la quota di rinnovabili nei consumi finali era solo del 19,5% nel 2023. L'obiettivo per il 2030 è del 39,4%, sostenuto da un'espansione di solare ed eolico, comprese tecnologie innovative come il fotovoltaico galleggiante e l'eolico offshore. L'Italia promuove inoltre le comunità energetiche e l'autoconsumo. Parallelamente, sta valutando il ritorno al nucleare dopo il 2035 e ha avviato una strategia nazionale per l'idrogeno con progetti infrastrutturali che collegano l'Italia all'Europa e al Nord Africa.
Infine, il Consiglio dell'Unione Europea, nelle raccomandazioni specifiche per l'Italia del 2024, sottolinea la necessità di potenziare il quadro istituzionale per l'adattamento climatico, rafforzare la fiscalità ambientale, ad esempio collegando le imposte alle emissioni di $CO_2$ di fonti energetiche e veicoli e migliorare la gestione sostenibile delle risorse idriche e del suolo, alla luce dell'elevata esposizione del Paese agli impatti economici del cambiamento climatico.

La tabella seguente sintetizza le principali leggi, decreti e strategie che hanno definito e aggiornato le politiche energetiche e climatiche italiane, evidenziando anche le disposizioni specifiche per il patrimonio storico e le misure adottate per la transizione ecologica (Tabella 7).

| Anno | Norma / Strategia | Contenuto principale e obiettivi | Note specifiche |
|---|---|---|---|
| 1975 | Piano Energetico Nazionale (PEN) | Primo piano nazionale per ridurre la dipendenza energetica e promuovere la sicurezza energetica | Avvio della programmazione della politica energetica in Italia |
| 1976 | Legge n. 373 "Legge Quadro sull'Energia" | Contenimento dei consumi energetici negli edifici, regolamentazione impianti di riscaldamento e acqua calda | Introduzione concetti come fattore forma S/V e gradi giorno |
| 1982 | Legge n. 308 | Contenimento consumi, sviluppo fonti rinnovabili (sole, vento, geotermia, ecc.) | Promozione fonti rinnovabili |
| 1991 | Legge n. 10 | Introduzione sistema edificio-impianto, certificazione energetica, uso razionale dell'energia | Applicazione graduata per patrimonio esistente |
| 2005 | D.Lgs. 192/2005 | Recepimento Direttiva EPBD I, requisiti prestazioni energetiche, certificazione energetica | Esclusioni per beni vincolati e tutelati |
| 2006 | D.Lgs. 311/2006 | Integrazione e ampliamento D.Lgs. 192/2005, limiti più stringenti per trasmittanza termica | Estensione agli impianti |
| 2008-2010 | D.Lgs. 115/2008 e D.Lgs. 56/2010 | Misure di efficienza energetica e riduzione emissioni, obbligo certificazione energetica (D.M. 26/6/2009) | Uniformità normativa regionale |

| Anno | Norma / Strategia | Contenuto principale e obiettivi | Note specifiche |
|---|---|---|---|
| 2013 | D.L. 63/2013 | Recepimento Direttiva EPBD II, definizione “edificio a energia quasi zero”, deroghe per edifici vincolati | Divario tra edifici vincolati e non |
| 2015 | Decreto interministeriale 26 giugno 2015 | Aggiornamento Linee Guida Nazionali per certificazione energetica, istituzione catasto APE nazionale | Coordinamento Stato-Regioni |
| 2019 | Decreto Clima | Politica strategica nazionale per cambiamento climatico, mobilità sostenibile, riforestazione | In linea con Green Deal UE |
| 2021-2023 | PNTE 2022, PNACC 2023 | Piano Nazionale per la Transizione Ecologica e di Adattamento ai Cambiamenti Climatici | Valutazione ambientale strategica (VAS) |
| 2021 | Legge Europea sul Clima (Regolamento UE 2021/1119) | Obiettivi vincolanti di riduzione emissioni al 2030 e neutralità climatica al 2050 | Obiettivi Fit for 55 |
| 2023-2024 | Fit for 55 e D.Lgs. 2024/1275 (EPBD IV) | Revisione normative per efficienza energetica, edifici a emissioni zero entro il 2030-2050, decarbonizzazione | Piano Nazionale di Ristrutturazione, standard più ambiziosi |

*Tabella 7. Principali norme e strategie italiane per l’efficienza energetica, la gestione delle risorse energetiche e la mitigazione dei cambiamenti climatici (1975-2024).*

### 2.2.4 Competenze regionali e recepimento della normativa a livello locale

Le Regioni sono responsabili della pianificazione e della gestione delle politiche energetiche all'interno del proprio territorio. Pur dovendo seguire le linee guida nazionali, godono di autonomia nella gestione dei progetti e delle risorse. In seguito alla Direttiva 2002/91/CE e al D.Lgs. 192/2005, infatti, le Regioni italiane sono chiamate a sviluppare propri Piani Energetici regionali per definire strategie in ambito energetico, promuovendo efficienza, formazione, informazione e incentivi.

In particolare, la **Legge 9 gennaio 1991, n. 10**, *"Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia",* stabilisce che le regioni entro 180 giorni dall'entrata in vigore della legge stessa, devono individuare le aree più idonee per l'uso razionale dell'energia e l'impiego delle fonti rinnovabili. Inoltre, devono predisporre "un piano regionale o provinciale relativo all'uso delle fonti rinnovabili di energia" che includa il bilancio energetico regionale o provinciale, l'individuazione dei bacini energetici territoriali, la localizzazione e realizzazione degli impianti di teleriscaldamento, la determinazione delle risorse per nuovi impianti energetici e le procedure per la localizzazione di impianti di produzione energetica fino a 10 MW, inclusi impianti idroelettrici [47]. Infine, i comuni con popolazione superiore a 50.000 abitanti devono inserire un piano specifico per l'uso delle fonti rinnovabili nei loro piani regolatori generali [48].

Il **D.Lgs. 31 marzo 1998, n. 112**, in attuazione della Legge 15 marzo 1997, n. 59, attribuisce alle regioni, la gestione delle funzioni amministrative in materia di energia, incluse fonti rinnovabili, elettricità, petrolio e gas, ad eccezione di quelle riservate alla competenza esclusiva dello Stato. In particolare stabilisce che «*ciascuna regione [...] entro sei mesi dall'emanazione del presente decreto legislativo, determina [...] le funzioni amministrative che richiedono l'unitario esercizio a livello regionale, provvedendo contestualmente a conferire tutte le altre agli enti locali*»[49].
Il D.Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42, conosciuto come il Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio, stabilisce un quadro normativo fondamentale per la tutela del patrimonio culturale in Italia, regolando non solo la gestione e la conservazione dei beni culturali, ma anche il rapporto tra lo Stato e gli enti locali, come le regioni e i comuni. In particolare, il comma 1 dell'articolo 5 del Codice definisce come «*le regioni, nonché i comuni, le città metropolitane e le province* [...] *cooperano con il Ministero nell'esercizio delle funzioni di tutela in conformità a quanto disposto dal Titolo I della Parte seconda del presente codice*». Questa cooperazione è finalizzata a garantire una protezione efficace e uniforme dei beni culturali sul territorio, in linea con le disposizioni stabilite nel Codice. Il Codice prevede anche che le regioni possano richiedere forme di coordinamento aggiuntive con altri enti locali, al fine di ottimizzare la gestione e la tutela del patrimonio culturale.
Infine, nel comma 7 del medesimo articolo, si esplicita che «*relativamente alle funzioni esercitate dalle regioni [...] il Ministero esercita le potestà di indirizzo e di vigilanza e il potere sostitutivo in caso di perdurante inerzia o inadempienza*». Questo sistema di monitoraggio assicura che le azioni locali siano sempre allineate con gli obiettivi nazionali di protezione e valorizzazione del patrimonio culturale.

Il **Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192** attribuisce alle Regioni e alle Province autonome la responsabilità dell'attuazione delle politiche energetiche e della gestione dell'efficienza energetica a livello locale. In particolare, il decreto richiede che vengano istituiti sistemi informativi e programmi specifici per il monitoraggio degli impianti e la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio. Le autorità locali devono promuovere la creazione di catasti degli impianti termici, raccogliere dati relativi agli edifici e agli impianti e definire norme volte a migliorare l'efficienza energetica.
È inoltre prevista la possibilità di adottare misure più flessibili rispetto alla normativa nazionale, con l'obiettivo di semplificare gli adempimenti amministrativi e rendere più efficaci i controlli, purché tali misure siano conformi alle direttive europee. Infine, le Regioni devono collaborare con il Ministero dello Sviluppo Economico per elaborare metodologie comuni di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici e definire piani d'azione per incrementare il numero di edifici a energia quasi zero.
Il **Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009, n. 59,** concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia, come esplicitato nell'articolo 1, "*definisce i criteri generali, le metodologie di*

[47] *Legge 9 gennaio 1991, n. 10, art. 5, comma 3*
[48] *Legge 9 gennaio 1991, n. 10, art. 5, comma 5*
[49] *Lgs. 31 marzo 1998, n. 112, Art. 3, comma 1*

*calcolo e i requisiti minimi perla prestazione energetica degli edifici e degli impianti termici per la climatizzazione invernale e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari*". In particolare, l'articolo 4 definisce i requisiti minimi di efficienza energetica per edifici nuovi o oggetto di ristrutturazioni importanti. Con l'obiettivo è garantire un consumo energetico contenuto e una progettazione più sostenibile, si stabilisce che, in fase di progettazione, è obbligatorio calcolare le prestazioni energetiche per il riscaldamento invernale (EPi) e per il raffrescamento estivo (Epe, invol), verificando che rientrino nei limiti stabiliti. Questi limiti variano in base alla tipologia dell'edificio e alla zona climatica, con valori più stringenti nelle aree più fredde e per edifici non residenziali.

Con il **Decreto Ministeriale 26/6/2009**, le Regioni e le Province autonome che avevano già recepito la Direttiva 2002/91/CE avrebbero dovuto adottare misure per allineare gradualmente i propri sistemi di certificazione energetica degli edifici alle Linee guida nazionali[50]. Tuttavia, l'attuazione dei regolamenti attuativi nazionali (Dpr 59/2009 e Dm 26/6/2009) è stata disomogenea: non tutte le Regioni hanno recepito le indicazioni statali e molte hanno adottato metodologie proprie, spesso più restrittive. Ciò ha portato a una forte diversificazione nei criteri di certificazione energetica degli edifici, rendendo difficile il confronto tra edifici simili in diverse aree geografiche. Inoltre, solo sei Regioni dispongono di un catasto energetico informatizzato, aggravando la frammentazione e la dispersione dei dati.

L'articolo 8 della **Legge 3 agosto 2013, n. 90**, apporta modifiche all'articolo 9 del Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192. Si sancisce che regioni e le province autonome possono adottare provvedimenti migliorativi rispetto alla normativa nazionale. Possono agire, in particolare, sui requisiti minimi, permettendo soluzioni alternative per situazioni specifiche, mantenendo comunque gli obiettivi di efficienza energetica e con semplificazioni amministrative riguardanti il controllo e la manutenzione degli impianti termici. Le regioni, poi, devono collaborare con il Ministero dello sviluppo economico per definire metodologie comuni di calcolo e classificazione energetica degli edifici.

Il **V Rapporto Annuale, redatto da ENEA e CTI** nel 2024, evidenzia come le politiche energetiche locali stiano producendo risultati concreti in termini di efficienza energetica e riqualificazione del patrimonio edilizio. Al 1° aprile 2024, il SIAPE conteneva circa 5,5 milioni di APE, provenienti da 17 Regioni e 2 Province Autonome. Sono in corso collaborazioni per integrare la Regione Campania nel sistema entro il 2024. Nel 2023, circa 1,1 milioni di APE sono stati trasmessi al SIAPE e verificati. Tra i risultati emersi, si segnala una significativa riduzione della percentuale di edifici nelle classi energetiche meno efficienti e un incremento delle classi più performanti, a conferma dell'efficacia delle iniziative regionali e dell'adattamento delle normative locali[51]. Il rapporto sottolinea anche il progresso nel perfezionamento dei Catasti Energetici Unici regionali e la crescente importanza della digitalizzazione degli Attestati di Prestazione Energetica (APE), strumenti chiave per monitorare e migliorare le performance energetiche degli edifici. Inoltre, il coordinamento regionale con il Ministero e le altre autorità locali contribuisce a un'efficace implementazione delle normative, promuovendo la sostenibilità e il miglioramento dell'efficienza energetica a livello nazionale.

La seguente tabella riassume le principali normative italiane e il ruolo attribuito alle Regioni nella pianificazione e gestione delle politiche energetiche e della tutela del patrimonio culturale, evidenziando le responsabilità e gli ambiti di intervento a livello locale (Tabella 8).

| Anno / Norma | Oggetto e contenuti principali | Competenze e responsabilità regionali | Note importanti |
|---|---|---|---|
| Legge 9 gennaio 1991, n. 10 | Piano Energetico Nazionale: uso razionale dell'energia, sviluppo fonti rinnovabili | Le Regioni devono individuare aree idonee e predisporre piani regionali/provinciali | Comuni >50.000 abitanti devono includere piani fonti rinnovabili nel PRG |

[50] *Decreto Ministeriale 26/6/2009, art. 3, comma 5*

[51] *V Rapporto Annuale, redatto da ENEA e CTI, capitolo 3, pp. 33, «Nonostante i risultati evidenzino che una cospicua parte degli APE ricade nelle classi energetiche meno efficienti, la percentuale di immobili certificati nelle classi F e G scende per la prima volta sotto il 50%. Il significativo miglioramento delle prestazioni energetiche già evidenziato nel 2022 continua nel 2023, con la riduzione della percentuale di immobili nelle classi energetiche F e G (-6,3%), in particolare in favore di quelle A4-B (+5,2%)».*

| Anno / Norma | Oggetto e contenuti principali | Competenze e responsabilità regionali | Note importanti |
|---|---|---|---|
| D.Lgs. 31 marzo 1998, n. 112 | Delega funzioni amministrative in materia di energia alle Regioni | Determinano funzioni esercitate a livello regionale e delegano agli enti locali | Coordinamento regionale per funzioni unitarie |
| D.Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42 | Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio | Cooperazione con Ministero per tutela e conservazione del patrimonio culturale | Ministero esercita indirizzo, vigilanza e potere sostitutivo in caso di inerzia regionale |
| D.Lgs. 19 agosto 2005, n. 192 | Attuazione Direttiva 2002/91/CE su rendimento energetico in edilizia | Responsabilità attuazione politiche energetiche locali, monitoraggio, catasti impianti | Possibilità di misure più flessibili ma conformi a direttive UE |
| D.P.R. 2 aprile 2009, n. 59 | Criteri, metodi e requisiti minimi per prestazione energetica di edifici e impianti | Applicazione a edifici nuovi e ristrutturati, definizione limiti prestazionali | Obbligo verifica prestazioni energetiche in progettazione |
| D.M. 26 giugno 2009 | Linee guida nazionali per la certificazione energetica | Regioni devono allineare sistemi di certificazione energetica | Implementazione disomogenea tra Regioni |
| Legge 3 agosto 2013, n. 90 (art. 8) | Modifica D.Lgs. 192/2005: misure migliorative rispetto a normativa nazionale | Regioni possono adottare provvedimenti migliorativi e semplificazioni amministrative | Collaborazione con Ministero su metodologie comuni |
| ENEA e CTI, V Rapporto Annuale 2024 | Monitoraggio politiche energetiche locali | Circa 5,5 milioni di APE registrati nel SIAPE, progressi nella digitalizzazione | Riduzione edifici in classi energetiche basse, coordinamento efficiente |

*Tabella 8. Tabella sintetica delle norme chiave che regolano la gestione energetica e la tutela del patrimonio culturale in Italia, con focus sulle competenze delle Regioni e sulle modalità di attuazione delle direttive nazionali ed europee.*

### 2.2.5 Il quadro normativo olandese

A partire dalla fine degli anni '80, il tema delle emissioni di gas serra ha assunto rilevanza concreta anche nella politica olandese, soprattutto dopo il Rapporto Brundtland (1987) e i vertici internazionali di Rio (1992) e Kyoto (1997). I Paesi Bassi hanno quindi avviato un programma nazionale di mitigazione climatica con obiettivi di riduzione progressiva delle emissioni. Il Protocollo di Kyoto, in particolare, è stato ratificato il 31 maggio 2002. In tale contesto, l'Unione Europea aveva concordato una riduzione complessiva delle emissioni di gas serra dell'8% rispetto ai livelli del 1990, da raggiungere nel periodo 2008–2012. Questo obiettivo fu poi suddiviso tra gli Stati membri secondo il cosiddetto *Burden Sharing Agreement*, che assegnò ai Paesi Bassi un target di riduzione del 6% rispetto ai livelli di emissione dell'anno base (1990 per $CO_2$, $CH_4$ e $N_2O$) (Environment 2014)
La politica climatica nazionale, tuttavia, ha fissato obiettivi ancora più ambiziosi, con una riduzione del 6% delle emissioni di $CO_2$ entro il 2010 rispetto ai livelli del 1990 (Hoppe, Bellekom e Lulofs 2013), del 25% entro il 2020 – obiettivo riaffermato anche dalla storica sentenza *Urgenda v. Netherlands* (2015) – e del 49% entro il 2030, come stabilito dal *Climate Agreement* (Klimaatakkoord) del 2019, in linea con il *Regolamento UE 2018/842* sulla condivisione degli sforzi tra Stati membri per il raggiungimento degli obiettivi climatici dell'Unione.
Parallelamente, i Paesi Bassi contribuiscono attivamente allo sviluppo del *Green Climate Fund* (GCF), un fondo internazionale istituito nel 2010 durante la 16° sessione della Conferenza delle Parti (COP) della Convenzione Quadro sul Cambiamento Climatico delle Nazioni Unite (UNFCCC) per aiutare i Paesi in via di sviluppo a finanziare misure di mitigazione (riduzione delle emissioni) e adattamento (riduzione della vulnerabilità ai cambiamenti climatici). Il governo olandese fornisce finanziamenti diretti al GCF e ad altri strumenti multilaterali di finanza climatica, nel quadro degli impegni assunti a livello europeo e globale per mobilitare, entro il 2020, 100 miliardi di dollari all'anno a favore delle nazioni meno sviluppate, come stabilito negli accordi internazionali sul clima. Questa strategia di cooperazione internazionale riflette la volontà dei Paesi Bassi di promuovere una transizione globale giusta e inclusiva.

In linea con questa visione, il settore edilizio è stato al centro delle politiche nazionali per la riduzione delle emissioni e il miglioramento dell'efficienza energetica del sistema olandese, il quale combina strumenti regolatori (come l'EPN, l'EPC e il BENG), incentivi economici (sussidi pubblici, progetti come *Energiesprong*) e sistemi di monitoraggio e certificazione (come l'Attestato di Prestazione Energetica) per migliorare l'efficienza energetica del patrimonio edilizio.

*Energy Performance Standard (EPN) & Energy performance certificate (EPC)*

La prima normativa sull'efficienza energetica nei Paesi Bassi risale al 1995 con l'introduzione dell'**Energy Performance Standard** (in olandese Energie Prestatie Norm, **EPN**), integrato all'interno del Dutch Building Decree (Bouwbesluit), ovvero il regolamento edilizio nazionale che stabilisce i requisiti minimi di prestazione per gli edifici nei Paesi Bassi (Visscher, Van der Werf e Van der Voordt 2013). L'EPN, applicabile solo agli edifici di nuova costruzione, rappresenta il codice energetico edilizio olandese e prevede standard specifici per edifici residenziali (NEN-5128) e non residenziali (NEN-2916).
L'EPN ha introdotto per la prima volta il **Coefficiente di Prestazione Energetica** (Energy Performance Coefficient, **EPC**), un indice adimensionale[52] che esprime l'efficienza energetica di un edificio sulla base dell'energia consumata per il riscaldamento, l'acqua calda sanitaria, l'illuminazione, la ventilazione, l'umidificazione e il raffrescamento. Nel 1996, il valore dell'EPC era pari a 1,4, un livello facilmente raggiungibile con le tecniche costruttive comuni dell'epoca. Il valore fu progressivamente reso più restrittivo: abbassato a 1,2 nel 1998, a 1,0 nel 2000 e a 0,8 nel 2006, 0,6 nel 2011 e 0,4 nel 2015, con l'obiettivo di raggiungere edifici a energia quasi zero (nZEB) entro il 2020 (Filippidou, Energy performance progress of the Dutch non-profit housing stock:a longitudinal assessment 2018)
L'EPC, pur non essendo pensato esclusivamente per ridurre i consumi di riscaldamento, ha sicuramente contribuito a migliorare l'efficienza energetica degli edifici nei Paesi Bassi, promuovendo un miglioramento sia della qualità termica dell'involucro edilizio sia dell'efficienza degli impianti (Guerra-Santin e Itard 2012). Diversi studi confermano che la regolamentazione sui consumi energetici e l'applicazione dell'EPC nazionale hanno incentivato le famiglie a ridurre i propri consumi (Beerepoot e Beerepoot 2007). Tuttavia, un valore EPC più basso non si traduce necessariamente in consumi effettivamente ridotti, poiché il comportamento degli occupanti gioca un ruolo significativo sull'efficacia delle misure adottate. Studi più recenti evidenziano inoltre che i consumi energetici stimati

[52] *L'EPC è determinato dividendo il fabbisogno energetico calcolato di un edificio per una prestazione energetica standardizzata, basata sulla superficie disperdente e sulla superficie riscaldata totale dell'abitazione.*

spesso differiscono da quelli reali, suggerendo che l'impatto dell'EPC sulle prestazioni energetiche effettive potrebbe essere inferiore rispetto alle attese (Majcen, Itard e Visscher 2013).

In concomitanza con il fatto che la Direttiva, nota anche come EPBD (Energy Performance of Buildings Directive), è stata approvata il 16 dicembre 2002 ed è entrata ufficialmente in vigore il 4 gennaio 2003, gli Stati membri dell'Unione Europea avevano tempo fino al 2006 per recepirla e attuarla nei rispettivi ordinamenti nazionali. In linea con questi obblighi, nel 2006 il governo olandese ha recepito la EPBD e nel 2008 ha integrato due provvedimenti relativi alla certificazione energetica degli edifici esistenti nella normativa nazionale attraverso il **Decree on Energy Performance of Buildings** (Besluit energieprestatie gebouwen – BEG) e il **Regulation on Energy Performance of Buildings** (Regeling energieprestatie gebouwen – **REG**) (Filippidou, Nieboer e Visscher 2016).
A seguito di queste disposizioni, nel 2008 sono stati introdotti nei Paesi Bassi gli EPC per gli edifici esistenti (Spyridaki, et al. 2015). In questa occasione, il governo olandese ha deciso di scindere gli EPC in due strumenti: un'etichetta energetica obbligatoria, che descrive la prestazione energetica dell'edificio (EI) e un **consiglio personalizzato volontario** (EPA, in olandese *maatwerkadvies*), che fornisce informazioni su possibili interventi per il risparmio energetico. Come risultato dell'EPA è stato creato l'Energy RiIndex (EI), un coefficiente di prestazione che rappresenta l'efficienza energetica del patrimonio edilizio esistente (Filippidou 2018).
L'**EI** corrisponde ad un valore numerico che varia da **≤0,5** (prestazione estremamente buona) a **>2,9** (prestazione estremamente scarsa) e misura l'efficienza energetica di un'abitazione in relazione al suo consumo energetico annuo di energia primaria[53]. Sulla base dell'EI viene assegnata un'**etichetta energetica** (*energy label*) agli edifici residenziali (Filippidou, Nieboer e Visscher 2016). L'etichetta energetica classifica l'efficienza dell'edificio su una scala di classi, solitamente dalla A alla G, dove la classe A indica gli edifici più efficienti e la G quelli meno performanti. Entrambi sono obbligatori per la vendita o l'affitto degli immobili: l'EI è richiesto per associazioni abitative e operatori del mercato immobiliare commerciale, mentre l'etichetta energetica è obbligatoria per i proprietari privati. Inoltre, entro il 2023, gli uffici devono obbligatoriamente possedere almeno un'etichetta energetica di classe C, corrispondente a un Indice Energetico massimo di 1,3.
L'etichetta energetica era inizialmente destinata alle abitazioni con più di 10 anni (Koppert 2012). L'idea alla base era che le prestazioni energetiche degli edifici costruiti negli ultimi dieci anni fossero già sufficienti e che eventuali interventi di isolamento non risultassero economicamente vantaggiosi per queste costruzioni più recenti (Filippidou 2018).
L'obbligo di presentare l'etichetta energetica è stato effettivamente applicato a partire dal 2013, quando i proprietari sono stati tenuti a consegnarla al notaio al momento del trasferimento di un'abitazione nei Paesi Bassi (Koppert 2012).
Tra il 2009 e il 2012 l'etichetta energetica olandese è stata resa più rigorosa. Nel 2012 la Commissione Europea ha rilevato problemi nella sua applicazione, spingendo il governo a proporre entro il 2014 un adeguamento alle normative europee. Dal 2015, l'etichetta è diventata obbligatoria per la vendita o l'affitto di edifici esistenti, mentre i certificati restano volontari e legati a incentivi finanziari. Tuttavia, alcune parti del mercato locale ritengono che l'UE non debba intervenire nel mercato immobiliare olandese, soprattutto in un momento di crisi e calo delle compravendite (Spyridaki, et al. 2015).

*Bijna Energie-Neutrale Gebouwen (BENG)*

A seguito dell'emanazione della Direttiva EPBD 2018/844/UE, l'Unione Europea chiede che tutti i nuovi edifici siano a energia quasi zero (Bijna Energie-Neutrale Gebouwen o BENG, in olandese) entro il 31 dicembre 2021 e che gli Stati membri sviluppino strategie a lungo termine per decarbonizzare il patrimonio edilizio entro il 2050. L'attuazione della direttiva, da recepire entro il 10 marzo 2020, è demandata ai singoli Stati membri, in base alle rispettive condizioni climatiche ed economiche.
I Paesi Bassi hanno recepito la direttiva introducendo, a partire dal 1° gennaio 2021, il regolamento BENG e il nuovo metodo di calcolo NTA8800, che sostituiscono la precedente normativa EPC e il metodo NEN 7120, allineandosi in modo più efficace agli obiettivi europei di riduzione delle emissioni nel settore edilizio (Van Veen 2020).
Il metodo olandese nZEB prevede il calcolo di tre indicatori di prestazione energetica (EP1, EP2 e EP3) che devono soddisfare specifici requisiti (BENG 1, BENG 2 e BENG 3). EP1 riguarda la domanda di energia termica per

[53] *Il metodo di calcolo dell'EI è descritto nella norma **NEN 7120**, pubblicata dall'Istituto Olandese di Normazione (Nederlands Normalisatie-instituut) e nella **pubblicazione ISSO 82.3**, a cura del Dutch Building Services Knowledge Centre (ISSO).*

riscaldamento e raffrescamento, influenzata da fattori quali geometria, isolamento, infiltrazioni, orientamento e irraggiamento solare; EP2 misura il consumo totale di energia primaria, considerando le diverse fonti energetiche e includendo riscaldamento, raffrescamento, illuminazione e acqua calda sanitaria, meno l'energia rinnovabile prodotta localmente; EP3 valuta la quota di energia rinnovabile generata in loco, ad esempio da pannelli fotovoltaici, eolico o sistemi di accumulo termico (ATES) (Van Osta e Maassen 2022).
Questi requisiti sono calcolati come valori ponderati in base alle superfici delle diverse funzioni presenti nell'edificio. Per l'intero edificio, ogni requisito BENG è un valore ponderato in base alla superficie utile di ciascuna funzione edilizia presente (es. un edificio scolastico può comprendere funzioni educative ma anche spazi a uso ufficio). È importante sottolineare che si tratta di requisiti di tipo progettuale e stimano un consumo teorico basato su condizioni ottimali, quindi i consumi reali possono variare in base all'uso e al funzionamento effettivo.
I requisiti nZEB sono stati modificati più volte. L'11 giugno 2019, il ministro degli esteri olandese ha proposto una revisione dei requisiti BENG in una lettera al Parlamento, pubblicando i requisiti definitivi. Con queste norme, tutti gli edifici per uffici di nuova costruzione o soggetti a ristrutturazioni importanti devono avere un fabbisogno energetico inferiore a 90 kWh/m² all'anno con qualche aggiustamento in base al rapporto tra la superficie dell'involucro e quella utile riscaldata. Inoltre, il consumo di energia primaria, una volta compensato dall'energia rinnovabile, deve essere inferiore a 40 kWh/m² all'anno, mentre almeno il 30% dell'energia totale consumata deve provenire da fonti rinnovabili prodotte localmente (Van Veen 2020).

Un importante miglioramento rispetto a regolamenti precedenti, come gli EPC (Energy Performance Certificates), è dato dal fatto che con BENG e il metodo di calcolo NTA 8800 non è più possibile compensare una scarsa progettazione bioclimatica semplicemente installando impianti efficienti o generando energia rinnovabile. Infatti, il requisito BENG 1 impone un involucro edilizio di alta qualità, con buoni livelli di isolamento e vetri con alta resistenza termica, assicurando così una base solida di efficienza energetica passiva.

Tuttavia, Sebbene la normativa BENG (Bijna Energie Neutrale Gebouwen), che significa "edifici quasi a energia zero", persegua l'obiettivo di edifici a basso consumo energetico, essa non corrisponde esattamente alla definizione nZEB (nearly Zero Energy Building) stabilita dall'Unione Europea. Rimane quindi il dubbio se BENG sia effettivamente allineata con gli obiettivi dell'Accordo di Parigi e della Direttiva europea EPBD, dato che i limiti energetici previsti da BENG sono meno stringenti rispetto agli standard Paris Proof. Per esempio, nel caso degli edifici per uffici, i limiti di consumo energetico netto operativo annuo sono: Standard Paris Proof: 30–35 kWh/m², BENG: 40 kWh/m².
Questo indica un divario tra le prestazioni energetiche richieste entro il 2050 e quelle attualmente applicate con la normativa BENG, con il rischio che gli edifici conformi a BENG diventino presto obsoleti in vista delle future esigenze di decarbonizzazione (Van Veen, 2020).

Proprio per rispondere a queste sfide e in linea con gli impegni internazionali, nel 2015 con l'Accordo di Parigi sul Clima è stato stabilito di limitare il riscaldamento globale a meno di due gradi Celsius rispetto ai livelli preindustriali, con l'obiettivo ambizioso di contenerlo entro 1,5 gradi. Seguendo questa direzione, i Paesi Bassi hanno adottato nel 2019 un nuovo Patto Nazionale per il Clima, impegnandosi a ridurre le emissioni di gas serra del 49% rispetto al 1990 entro il 2030 e a raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 (Netherlands 2019).
Lo stesso anno è stato siglato un accordo climatico nazionale che ha segnato l'avvio di una nuova fase per la politica olandese dedicata allo sviluppo sostenibile dell'ambiente costruito. A partire dal 2021, la normativa nazionale è stata ulteriormente aggiornata con l'introduzione del metodo NTA 8800, che ha sostituito il precedente NEN 7120, allineando la regolamentazione olandese alla revisione della Direttiva europea sulla prestazione energetica degli edifici (EPBD). Questo nuovo metodo utilizza come indicatore la quantità di energia finale consumata annualmente per metro quadrato (kWh/m²/anno), consentendo un confronto più preciso tra edifici basato sul consumo energetico relativo (Bernsen 2022).
Il 2021 segna quindi l'inizio di un percorso importante che si estenderà fino al 2050. Il primo obiettivo, obbligatorio, riguarda il 2023: tutti gli edifici per uffici devono raggiungere almeno la classe energetica C, che corrisponde a un consumo di energia fossile inferiore a circa 250 kWh/m²/anno. Successivamente, entro il 2030, si punta a che gli edifici per uffici e a uso terziario arrivino almeno alla classe A, con un consumo di circa 200 kWh/m²/anno; questo traguardo, però, non è vincolante.
Per il 2040, benché non esistano obiettivi nazionali ufficiali, molte organizzazioni anticipano internamente il target "Paris Proof" di 70 kWh/m²/anno, in linea con la raccomandazione della Commissione Europea di eliminare l'uso di combustibili fossili negli edifici entro quella data. Infine, per il 2050, l'obiettivo ufficiale prevede edifici a basse

emissioni di carbonio e un bilancio netto di $CO_2$ pari almeno a zero, mantenendo il consumo energetico intorno ai 70 kWh/m²/anno secondo il metodo NTA 8800 (Bernsen 2022).

La seguente tabella riassume le principali normative, strumenti e obiettivi adottati nei Paesi Bassi nel corso degli ultimi decenni per promuovere l'efficienza energetica degli edifici e raggiungere gli ambiziosi target di riduzione delle emissioni di gas serra, in linea con gli impegni europei e internazionali (Tabella 9).

| Anno | Normativa / Strumento | Contenuto principale | Obiettivi / Note |
|---|---|---|---|
| 1995 | Energy Performance Standard (EPN) | Introduzione del coefficiente EPC per nuovi edifici; limiti progressivamente più stringenti fino al 2020 | Incentivare efficienza energetica e riduzione consumi nel nuovo costruito |
| 2006 | Recepimento Direttiva EPBD 2002/91/CE | Integrazione nella normativa nazionale; introduzione certificazione energetica per edifici esistenti (EPC) | Classificazione energetica obbligatoria per vendita/affitto; promozione di interventi di risparmio |
| 2015 | Introduzione obbligo etichetta energetica | Obbligo di presentare l'etichetta al momento del trasferimento immobiliare | Migliorare trasparenza e consapevolezza sul consumo energetico degli edifici |
| 2019 | Climate Agreement (Klimaatakkoord) | Riduzione emissioni del 49% entro il 2030; neutralità climatica al 2050 | Allineamento con obiettivi UE e accordi internazionali |
| 2021 | Bijna Energie-Neutrale Gebouwen (BENG) | Nuova normativa nZEB con metodo di calcolo NTA 8800; tre indicatori EP1, EP2, EP3 | Requisiti progettuali più stringenti; obbligo edifici nuovi a energia quasi zero |
| 2023 | Obbligo classe energetica C per uffici | Tutti gli edifici per uffici devono raggiungere almeno classe C (consumo ≤ 250 kWh/m²/anno) | Passo intermedio verso la decarbonizzazione del patrimonio edilizio terziario |
| 2050 (target) | Obiettivo edifici a bilancio netto zero | Emissioni di $CO_2$ prossime a zero; consumo energetico molto basso (circa 70 kWh/m²/anno) | Realizzazione di edifici a basse emissioni in linea con accordi climatici globali |

*Tabella 9. Sintesi delle principali tappe normative e degli strumenti di policy adottati nei Paesi Bassi per la riduzione delle emissioni di gas serra e il miglioramento dell'efficienza energetica del patrimonio edilizio, con particolare riferimento ai requisiti progressivi per la prestazione energetica degli edifici.*

## 3. PRASSI OPERATIVE PER IL MIGLIORAMENTO DELL'EFFICIENZA ENERGETICA NELL'EDILIZIA STORICA

Intervenire per migliorare l'efficienza energetica nel patrimonio edilizio esistente è una sfida che spesso non consente di eguagliare le prestazioni delle nuove costruzioni; per questo motivo, è più corretto parlare di "miglioramento" anziché di "adeguamento". Tuttavia, anche un incremento limitato rappresenta un vantaggio significativo sia dal punto di vista ambientale che conservativo (Lucchi e Pracchi 2013).
Tale considerazione è particolarmente rilevante nel caso dell'edilizia storica, dove risulta difficile determinare con precisione a quanto ammonti l'incidenza delle dispersioni termiche legate ai singoli componenti edilizi e impiantistici, poiché dipende da vari fattori (clima, geometria dell'edificio, esposizione, modalità d'uso, ecc.). Pertanto, la scelta degli interventi da attuare non può essere effettuata in maniera standardizzata, ma deve essere sempre preceduta da un'analisi approfondita dell'involucro edilizio e delle sue specificità.
In questo contesto, gli interventi di efficientamento energetico assumono un ruolo centrale, poiché mirano a ridurre al minimo le perdite di calore per trasmissione. Essi si concentrano principalmente sulle superfici opache e trasparenti dell'edificio, oppure intervengono sugli impianti termici ed elettrici con l'obiettivo di migliorarne l'efficienza complessiva (Lucchi e Pracchi 2013). Tuttavia, l'efficacia e la compatibilità di tali interventi devono sempre essere valutate alla luce delle peculiarità di ciascun edificio storico.
Di conseguenza, ogni operazione di miglioramento richiede un approccio flessibile e consapevole, fondato sulla conoscenza approfondita del patrimonio su cui si interviene. Tale approccio deve considerare il fabbisogno energetico dell'edificio nelle sue diverse parti e nel contesto in cui si inserisce. In quest'ottica, il presente capitolo si propone di analizzare i principali sistemi di intervento, mettendone in luce le caratteristiche, i principi, l'applicabilità all'edilizia storica e le possibili criticità. L'obiettivo è fornire una base di valutazione utile per determinare, in un secondo momento e caso per caso, la loro effettiva idoneità rispetto ai casi di studio selezionati.

## 3.1 Isolamento delle chiusure verticali opache

Secondo la norma UNI 8290-1, si definiscono chiusure verticali l'insieme degli elementi tecnici verticali del sistema edilizio aventi funzione di separare gli spazi interni del sistema edilizio stesso rispetto all'esterno. All'interno di questa categoria si distinguono le chiusure verticali opache, caratterizzate dall'assenza di trasparenza: esse non permettono il passaggio della luce né la visione verso l'esterno. Tali elementi corrispondono, in genere, alle pareti perimetrali verticali dell'edificio.
Nel caso degli edifici storici, le chiusure verticali opache sono costituite prevalentemente da pareti massicce realizzate in pietra, laterizio pieno o terra cruda. Il carattere massivo di tali strutture rispondeva non solo a esigenze di natura strutturale, ma anche alla necessità di garantire un livello accettabile di comfort abitativo. In assenza delle moderne tecnologie impiantistiche, l'elevata inerzia termica delle pareti massicce rappresentava una strategia costruttiva fondamentale per mitigare le escursioni termiche giornaliere. Sebbene i materiali impiegati presentino una bassa resistenza termica — dovuta ai loro elevati valori di conduttività termica — lo spessore considerevole delle murature contribuiva a ritardare e smorzare il flusso di calore tra interno ed esterno, migliorando il comportamento termoigrometrico complessivo (Davoli 1993).
Tuttavia, questa caratteristica non è uniforme in tutto il fabbricato: ai piani superiori, infatti, le murature tendono ad essere più sottili per ragioni statiche, avvicinandosi alle caratteristiche dei tamponamenti moderni. Inoltre, scambi igrometrici con l'esterno possono compromettere il comfort interno, soprattutto in presenza di murature di bassa qualità o degradate (Boarin e Davoli 2013).

Alla luce di queste considerazioni, l'isolamento termico rappresenta una delle principali strategie di miglioramento energetico applicabili all'edilizia esistente. Tale intervento può essere realizzato attraverso l'applicazione di materiali isolanti sulle superfici esterne o interne delle pareti. In generale, si preferisce l'isolamento esterno negli edifici residenziali, dove è fondamentale garantire un comfort termico duraturo, mentre l'isolamento interno è più indicato per ambienti a uso saltuario o temporaneo, come sale pubbliche, spazi monumentali o edifici utilizzati solo in determinate occasioni.
I materiali disponibili per l'isolamento delle chiusure verticali sono numerosi (Jelle 2011). Tuttavia, la scelta del materiale più idoneo e il corretto posizionamento dello strato isolante dipendono da molteplici fattori: non solo dalle prestazioni energetiche richieste, ma anche dal valore storico-architettonico dell'edificio, dalle esigenze di conservazione e dal comportamento termoigrometrico complessivo.
In questo contesto, il presente capitolo si propone di esplorare gli approcci più efficaci per rispondere alle esigenze termiche stagionali, con l'obiettivo di migliorare le prestazioni dell'involucro edilizio nel rispetto delle caratteristiche storiche e bioclimatiche degli edifici. Si ricapitolano dunque le strategie di adeguamento compatibili con il costruito storico, sottolineando che, pur nel rispetto delle peculiarità del patrimonio, nessun intervento dovrebbe essere escluso a priori (Lucchi e Pracchi 2013).

### 3.1.1 Isolamento esterno

Il sistema di isolamento termico esterno consiste nell'applicazione di un rivestimento isolante continuo sulla superficie esterna delle pareti, con l'obiettivo di ridurre le dispersioni termiche dell'involucro edilizio. Questa soluzione può limitare in parte gli apporti solari diretti alle pareti esterne, soprattutto nelle stagioni fredde, riducendo così il contributo passivo del sole al riscaldamento degli ambienti interni. Tuttavia, contribuisce a stabilizzare le oscillazioni della temperatura superficiale e a migliorare l'inerzia termica delle pareti, garantendo un maggiore comfort abitativo. Di conseguenza, l'ambiente impiega più tempo sia a riscaldarsi che a raffreddarsi, mantenendo però una temperatura più stabile nel tempo. Durante l'inverno le pareti rilasciano lentamente il calore accumulato, anche dopo lo spegnimento del riscaldamento; in estate, invece, lo strato isolante riduce l'incidenza dei ponti termici, in particolare negli edifici privi di elementi sporgenti come balconi o logge.
Il principale svantaggio di questo sistema consiste nella modifica dell'aspetto visivo della facciata, che può risultare incompatibile con edifici di valore storico o sottoposti a vincoli di tutela. In tali casi, è essenziale preservare le caratteristiche estetiche del manufatto, rendendo questa soluzione non sempre applicabile (Leonardi 2021).
Tra le tecnologie di isolamento esterno più diffuse si annoverano il sistema a cappotto che prevede l'uso di pannelli, oppure l'intonaco termoisolante. Il primo sistema, caratterizzato da spessori più consistenti, dà una maggiore resistenza termica alla chiusura, ma è in genere meno praticabile rispetto all'applicazione dell'intonaco, soprattutto per l'interferenza con elementi decorativi interni ed esterni, le cornici dei serramenti, gli arredi fissi, i lambris e altri ornamenti parietali.

*a. Cappotto esterno*

Noto a livello europeo con l'acronimo ETICS (External Thermal Insulation Composite System), il sistema di isolamento termico esterno consiste nell'applicazione di pannelli isolanti sulla superficie esterna delle pareti perimetrali. Tali pannelli vengono successivamente rivestiti con uno strato di intonaco, solitamente di almeno 5 mm, che funge da finitura esterna protettiva contro le intemperie e gli sbalzi termici. Il fissaggio dei pannelli può avvenire tramite adesivi specifici o attraverso sistemi meccanici, in base alle esigenze progettuali.
Nei limitati casi in cui è consentita l'applicazione su edifici storici, questa tecnologia offre numerosi vantaggi: migliora le performance termoacustiche dell'involucro, riduce la trasmittanza termica e contribuisce in modo efficace alla riduzione dei ponti termici. Questi ultimi, negli edifici storici, si manifestano soprattutto in forma geometrica (es. angoli delle murature), diffusa (per materiali o spessori disomogenei), mentre i ponti termici di materia sono meno frequenti, essendo le strutture portanti spesso realizzate con materiali omogenei.

La scelta del materiale isolante è fondamentale e va calibrata in funzione delle prestazioni richieste, ma anche delle caratteristiche igrometriche dell'involucro storico. I principali materiali impiegati nel sistema a cappotto includono (Boriani, Giambruno e Garzulino 2011):

- *Polistirene espanso (EPS):*
  Spessore 5 cm – riduzione della trasmittanza: ~61%. È leggero, impermeabile e con buone prestazioni termiche, ma presenta scarsa traspirabilità, che può ostacolare l'evaporazione dell'umidità interna.
- *Polistirene estruso (XPS)*
  Spessore 5 cm – riduzione: ~62%. Offre prestazioni simili all'EPS, con maggiore resistenza meccanica, ma analoghi limiti in termini di traspirabilità.
- *Lana di roccia*
  Spessore 5 cm – riduzione: ~60%. Minerale, traspirante, con ottima inerzia termica e resistenza al fuoco. Necessita di barriera al vapore in ambienti umidi per evitare condense.
- *Sughero nero autoespanso*
  Spessore 5 cm – riduzione: ~59%. Materiale naturale, traspirante e resistente a insetti e fuoco. Tuttavia, può sviluppare muffe in presenza di umidità persistente.
- *Fibra di cellulosa*
  Spessore 5 cm – riduzione: ~59%. Ecologica, traspirante, regola l'umidità interna. Va trattata per evitare formazioni di muffa.
- *Fibra di canapa e kenaf*
  Spessore 5 cm – riduzione: ~60%. Ottime proprietà termoacustiche, traspirabilità e stabilità meccanica. Sensibile all'umidità e con bassa resistenza al fuoco.

- *Feltro trattato con aerogel*
  Spessore 0,9 cm – riduzione: ~42%. Prestazioni elevate con spessore minimo, ideale per interventi minimamente invasivi. Elevato costo e delicatezza in fase di posa.
- Polyiso espanso rigido (PIR)
  Spessore 5 cm – riduzione: ~70%. Buona traspirabilità, resistente a insetti e roditori. Indicato per climi variabili.
- *Pannelli sottovuoto (VIP) a base di silice aerogel*
  Spessore 1,5 cm – riduzione: ~75%. Eccellenti prestazioni termiche con spessori ridotti. Richiede alta precisione nella posa per evitare danni alla pellicola protettiva.

La selezione del materiale deve considerare la traspirabilità e la gestione dell'umidità dell'involucro esistente. Secondo Boriani et al. (2021), materiali impermeabili al vapore come XPS o PUR, pur garantendo ottime prestazioni, risultano incompatibili con murature storiche soggette a fenomeni di umidità. È preferibile optare per materiali con porosità aperta e bassa resistenza al vapore, rispettando il principio di permeabilità crescente verso l'esterno (Boriani, Giambruno e Garzulino 2021).
Lucchi e Pracchi (2013), tuttavia, propongono una soluzione differenziata: per le parti inferiori dell'edificio, più soggette a risalita capillare, consigliano l'uso di materiali impermeabili (XPS o poliuretano); per le zone superiori, raccomandano isolanti traspiranti come lana di roccia, fibra di legno o sughero. Anche le finiture esterne dovrebbero essere traspiranti, prediligendo intonaci a base di calce (Lucchi e Pracchi 2013).
Una variante del tradizionale cappotto esterno prevede l'inserimento di un'intercapedine aerata tra la parete e lo strato isolante. In questo sistema, l'isolante non viene applicato direttamente sulla superficie muraria né rivestito con intonaco, ma è separato dalla facciata da uno spazio ventilato che favorisce il movimento dell'aria ("effetto camino"). Questo flusso d'aria contribuisce a migliorare il comportamento igrometrico dell'involucro, facilitando l'espulsione del vapore acqueo e riducendo il rischio di condense interstiziali, anche quando si impiegano materiali isolanti poco traspiranti come l'EPS o l'XPS.

Dal punto di vista della conservazione e del restauro, l'intervento a cappotto risulta praticabile solo in assenza di vincoli storico-artistici, elementi decorativi in facciata o murature a vista. Inoltre, lo sporto del tetto deve essere sufficiente a compensare l'incremento di spessore, evitando alterazioni dell'equilibrio compositivo e funzionale dell'edificio.

*b. Intonaci termoisolanti*

Una valida alternativa al sistema a cappotto per l'isolamento esterno delle pareti verticali opache è l'impiego di intonaci termoisolanti. Questi materiali, caratterizzati da valori di conducibilità termica notevolmente inferiori rispetto agli intonaci tradizionali, consentono di migliorare le prestazioni energetiche dell'involucro senza comprometterne in modo significativo l'aspetto o la traspirabilità.
L'intervento prevede la rimozione dell'intonaco esistente e la sua sostituzione con uno strato di finitura contenente materiali isolanti. Sebbene gli intonaci termoisolanti non siano in grado di eliminare completamente i ponti termici né di azzerare il rischio di condensa (Reichel, Hochberg e Köpke 2007), risultano particolarmente adatti all'architettura storica, grazie alla loro compatibilità materica, traspirabilità e lavorabilità (MiBACT, 2015), nonostante il costo relativamente elevato in rapporto all'efficienza ottenuta.
Gli intonaci termoisolanti hanno una composizione prevalentemente minerale, costituita da leganti idraulici, materiali isolanti di varia natura (sintetici, inorganici o naturali) e additivi specifici che ne migliorano la lavorabilità e l'adesione al supporto (E. Lucchi 2014).
Un intonaco termoisolante tradizionale — a base di sughero, argilla, polveri diatomeiche e leganti idraulici — con uno spessore di circa 4 cm, garantisce una buona traspirabilità della muratura e un discreto isolamento termico, riducendo la trasmittanza iniziale fino al 45%. A parità di spessore, l'impiego di intonaci arricchiti con materiali a cambiamento di fase (Phase Change Materials – PCM), come il Micronal PCM, permette di raggiungere una riduzione della trasmittanza fino al 51%, grazie alla capacità di tali materiali di accumulare e rilasciare calore durante il passaggio di stato (Boriani, Giambruno e Garzulino 2011).
Per mantenere la traspirabilità della parete ed evitare problemi di condensa, è fondamentale che l'intonaco sia formulato con leganti naturali, come la calce idraulica o il caolino. Per quanto riguarda i materiali isolanti, esistono diverse opzioni:

- Quelli di origine sintetica, come le perle di polistirene, offrono un'elevata resistenza termica e una discreta traspirabilità, ma non garantiscono un'inerzia termica elevata;
- Al contrario, materiali inorganici come il vetro espanso e la fibra di vetro, o naturali come il sughero, la pomice e la vermiculite, presentano una maggiore capacità di accumulo termico, migliorando così lo sfasamento termico e l'attenuazione del flusso di calore verso l'interno dell'edificio.

Dal punto di vista della conservazione e del restauro, l'intonaco termoisolante, promettendo il miglioramento delle prestazioni energetiche della parete con l'utilizzo di spessori ridotti di materiale, non altera notevolmente l'aspetto originario della facciata. Tuttavia, la sua applicazione è compatibile solo in assenza di murature a vista o elementi decorativi, che altrimenti verrebbero occultati o compromessi, o quando l'intonaco esistente sia irreversibilmente danneggiato o realizzato con materiali nocivi irrecuperabili (Lucchi e Pracchi 2013).

La tabella seguente presenta un confronto tra i principali sistemi di isolamento termico esterno, evidenziandone vantaggi e svantaggi in termini di prestazioni energetiche, compatibilità con il patrimonio storico e impatto visivo sull'edificio. Le soluzioni analizzate includono il cappotto esterno tradizionale, il cappotto con intercapedine aerata e gli intonaci termoisolanti (Tabella 10).

| Sistema | Pro | Contro |
|---|---|---|
| Cappotto esterno | - Miglioramento delle performance termiche dell'involucro;<br>- Forte contenimento dei ponti termici;<br>- Materiali ad alte prestazioni disponibili (VIP, aerogel) per ridurre lo spessore;<br>- Buona durabilità del sistema se correttamente installato. | - Generalmente non compatibile con edifici storici (alterazione facciata);<br>- Copre o interferisce con superfici storiche, cornici, modanature, paramenti murari a vista;<br>- Aumenta lo spessore della facciata, modificando proporzioni e allineamenti;<br>- Richiede adeguato sporto di gronda, spesso non presente negli edifici storici<br>- Rischio condense con uso di materiali poco traspiranti;<br>- Materiali avanzati molto costosi (VIP, aerogel) e difficili da impiegare in contesti storici. |
| Cappotto con intercapedine aerata | - Migliore comportamento igrometrico rispetto al cappotto tradizionale;<br>- Riduce il rischio di condensa interstiziale;<br>- Sistema più reversibile rispetto al cappotto tradizionale. | - Generalmente non compatibile con edifici storici (alterazione facciata);<br>- Copre o interferisce con superfici storiche, cornici, modanature, paramenti murari a vista;<br>- Aumenta notevolmente lo spessore del pacchetto, alterando le proporzioni originarie;<br>- Richiede adeguato sporto di gronda, spesso non presente negli edifici storici<br>- Costi e complessità di installazione superiori al cappotto tradizionale. |
| Intonaci termoisolanti | - Generalmente compatibili con il patrimonio storico, grazie alla traspirabilità del materiale;<br>- Spessori contenuti che non modificano l'aspetto architettonico;<br>- Migliorano le prestazioni energetiche senza interventi invasivi;<br>- Possibilità di formulazioni con PCM per migliori prestazioni in regime dinamico; | - Prestazioni termiche inferiori ai sistemi a cappotto;<br>- Non risolvono integralmente i ponti termici;<br>- Richiedono particolare attenzione alla composizione dei leganti (calce, leganti naturali) per evitare condense;<br>- Costo superiore rispetto all'intonaco tradizionale; |

| Sistema | Pro | Contro |
|---|---|---|
| | - Adatti quando l'apparato murario non presenta muratura a vista o l'intonaco originale è degradato e va sostituito. | - Non applicabili su paramenti in muratura a vista o superfici con decori da preservare. |

*Tabella 10. Tabella comparativa dei sistemi di isolamento termico esterno: cappotto esterno classico, cappotto esterno con intercapedine e intonaci termoisolanti, con relativi pro e contro in termini di prestazioni, compatibilità conservativa e impatto sugli ambienti interni.*

### 3.1.2 Isolamento interno

Dal momento che l'isolamento esterno delle pareti risulta spesso impraticabile a causa della presenza di vincoli storici o sconsigliabile per via dell'impatto significativo sulla struttura e sull'aspetto dell'edificio, negli edifici storici si ricorre più frequentemente a soluzioni che prevedono l'applicazione di uno strato isolante sul lato interno delle murature (Webb, Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods 2017).
Quando l'isolamento termico viene applicato internamente, la massa dell'involucro viene separata dall'ambiente climatizzato. Questo comporta la perdita dell'inerzia termica della muratura, che non è più in grado di accumulare e rilasciare calore in modo efficace. Tuttavia, proprio per questo motivo, gli ambienti rispondono più rapidamente ai cambiamenti di temperatura, rendendo la climatizzazione – in particolare il raffrescamento estivo – più efficiente. Tale soluzione può risultare vantaggiosa in edifici storici di grandi dimensioni o a utilizzo discontinuo (come sale conferenze, case di villeggiatura, edifici visitabili su prenotazione), nonché in molte strutture monumentali (chiese, sale pubbliche, musei), in cui non è necessario mantenere una temperatura costante per lunghi periodi, ma si richiede piuttosto un riscaldamento o raffrescamento rapido e localizzato in corrispondenza dell'effettivo utilizzo degli spazi.
Gli svantaggi dell'isolamento interno comprendono un aumento del rischio di fenomeni legati all'umidità, poiché quella derivante da pioggia battente o da risalita capillare impiega più tempo ad evaporare, riducendo la capacità di asciugatura della parete. Inoltre, possono insorgere problemi di condensa e formazione di muffe, dovuti al passaggio del vapore acqueo dall'ambiente interno verso l'esterno: se l'aria calda e umida entra in contatto con la superficie fredda della parete, possono verificarsi fenomeni di condensazione o elevata umidità relativa, favorendo la proliferazione di microrganismi.
In questi casi, la soluzione più efficace prevede l'impiego di materiali isolanti permeabili al vapore e dotati di funzionalità capillare, capaci di favorire l'asciugatura della muratura e migliorare l'efficacia complessiva dell'isolamento. Per ridurre il rischio di condensa interstiziale, è inoltre fondamentale garantire un'adesione ottimale dell'isolante al supporto murario, utilizzando una malta di livellamento a base di calce idraulica naturale.
Un'ulteriore strategia può consistere nella realizzazione di un'intercapedine ventilata tra la controparete isolante e la muratura (Lucchi e Pracchi 2013).
Un ulteriore svantaggio dell'isolamento interno è rappresentato dall'occupazione di spazio utile, poiché lo spessore del sistema isolante può ridurre la superficie calpestabile o l'area effettivamente fruibile degli ambienti.

*a. Cappotto interno classico*

La realizzazione di un cappotto interno consiste nell'applicazione di un materiale isolante sulla parete interna dell'edificio, con l'obiettivo di ridurre le dispersioni termiche per conduzione e irraggiamento. I limiti derivanti dall'applicazione di questo intervento riguardano principalmente il fatto che il cappotto interno non elimina i ponti termici (in particolare quelli tra parete, pavimento e soffitto, che restano punti critici per il rischio di condensa) e, soprattutto nel caso degli edifici storici, comporta la perdita delle finiture originali.
Il processo di realizzazione di un cappotto interno si articola in quattro fasi principali: rimozione dell'intonaco esistente e pulizia della muratura; posa del materiale isolante; installazione di lastre in cartongesso, dello spessore di 15 mm, dotate di un foglio di alluminio con funzione di barriera al vapore; infine, applicazione della finitura finale (Boriani, Giambruno e Garzulino 2011).

Esistono diverse tipologie di pannelli isolanti utilizzabili per la realizzazione di un cappotto interno, ognuna con caratteristiche specifiche in termini di prestazioni termiche, traspirabilità, resistenza all'umidità e sostenibilità.
Tra i materiali sintetici, i più comuni sono il polistirene espanso (EPS) e il polistirene estruso (XPS). Entrambi sono leggeri, impermeabili, incombustibili e offrono ottime prestazioni termiche (con una riduzione della trasmittanza intorno al 62–63% rispetto al valore iniziale tramite l'uso di pannelli dallo spessore di 5 cm e del 42–40% con uno spessore di 2 cm). Tuttavia, presentano una bassa traspirabilità, che può causare problemi in presenza di umidità, compromettendo il comfort interno.
Un'alternativa con ottime prestazioni termiche, ma spessore ridottissimo (riduce la trasmittanza di circa il 43% con meno di 1 cm), è il feltro trattato con aerogel, un materiale ultraleggero e nanoporoso con eccellenti capacità di isolamento termico e acustico, molto adatto dove si vogliono preservare le geometrie originarie dell'edificio. È flessibile, traspirante, idrofobo e altamente resistente.

Tra i materiali minerali, si distingue la lana di roccia, che unisce buone capacità termiche e acustiche a una elevata traspirabilità e resistenza al fuoco. Con un pannello in lana di roccia trattato con resine termoindurenti, dello spessore di 5 cm, si garantisce una riduzione della trasmittanza termica del 61% rispetto al valore iniziale. Tuttavia, necessita di una barriera al vapore per evitare la formazione di condensa.
I materiali naturali offrono soluzioni ecocompatibili, traspiranti e con buone proprietà isolanti. Il sughero nero autoespanso, con una riduzione della trasmittanza del 58% a fronte dell'uso di un pannello dallo spessore di 5 cm e del 37% con uno spessore di 2 cm, è leggero, elastico, resistente all'usura e agli agenti biologici, ed è anche traspirante. Il suo unico limite è l'eventuale formazione di muffe in presenza di umidità persistente.
Le fibre di cellulosa, derivate dal riciclo della carta o da piante come legno di conifera, canapa e lino, garantiscono una riduzione della trasmittanza del 59%, a fronte dell'uso di un pannello dallo spessore di 5 cm e del 38% con un pannello dallo spessore di 2 cm. Oltre all'efficienza termica e acustica, sono traspiranti e regolatrici di umidità. Per proteggerle da muffe, vengono trattate con sali di boro.
Anche le fibre di canapa e kenaf, completamente vegetali, risultano molto efficaci, con una riduzione della trasmittanza del 60% tramite l'uso di pannelli dallo spessore di 5 cm. Offrono un buon isolamento termico e acustico, sono traspiranti e resistenti, ma richiedono protezioni specifiche contro l'umidità e il fuoco.
Infine, i pannelli in schiuma polyiso espansa rigida rappresentano una delle soluzioni più performanti, con una riduzione della trasmittanza del 70% tramite l'uso di pannelli dallo spessore di 5 cm e del 49% con uno spessore di 2 cm. Questo materiale, pur essendo di origine vegetale, è adatto a condizioni ambientali molto diverse, è resistente a insetti e roditori, traspirante e ha un buon rapporto prestazioni/costo.
Un'ulteriore categoria è quella dei materiali a cambiamento di fase (PCM), che garantiscono una riduzione della trasmittanza del 68%. Essi accumulano calore durante il giorno e lo rilasciano con il cambio di fase, contribuendo così anche al comfort estivo, evitando il surriscaldamento interno.
Dal punto di vista conservativo, l'applicazione del cappotto interno comporta una riduzione dello spazio nelle stanze, un aspetto che può risultare problematico in ambienti di piccole dimensioni, modificando anche le proporzioni e le simmetrie degli interni. Inoltre, durante l'applicazione, è fondamentale prestare attenzione ai nodi con travi o solai lignei per evitare danni come la marcescenza del legno o la formazione di condensa interstiziale nelle pareti. Un vantaggio significativo di questa soluzione è che non è necessario montare ponteggi sulla facciata. In generale, è importante scegliere materiali isolanti traspiranti al vapore, per preservare il profilo igrometrico dei materiali tradizionali e prevenire danni a lungo termine.

*b. Cappotto interno con intercapedine*

L'intervento di cappotto interno con intercapedine si distingue dal classico cappotto interno a diretto contatto con la muratura per la presenza di uno spazio vuoto (intercapedine) tra la parete esistente e il materiale isolante. Questo dettaglio costruttivo consente un miglior smaltimento del vapore acqueo, riducendo la possibilità di condensa interstiziale e facilitando la traspirazione, a patto che vi sia una corretta ventilazione dell'intercapedine.
Rispetto al cappotto classico, l'intervento con intercapedine ha un maggiore impatto sulla geometria interna degli ambienti, in quanto la perdita di spazio è maggiore, anche di 6–10 cm a seconda del materiale utilizzato. Questo può rappresentare un ulteriore problema in ambienti piccoli o vincolati. Tuttavia, a parità di spessore del materiale isolante impiegato, la realizzazione di un cappotto interno con intercapedine consente una riduzione significativa della trasmittanza termica.
Per esempio, l'utilizzo di pannelli in polistirene espanso sinterizzato (EPS) o estruso (XPS), con uno spessore di 5 cm, consente una riduzione della trasmittanza termica pari al 64–65% rispetto al valore iniziale. Analogamente, l'impiego di pannelli in lana di roccia trattata con resine termoindurenti raggiunge una riduzione del 63%, mentre le fibre naturali di canapa e kenaf si attestano su risultati simili. La cellulosa, anch'essa con uno spessore di 5 cm, riduce la trasmittanza del 62%, mentre il sughero nero autoespanso si colloca attorno al 61%.
Per ottenere prestazioni superiori, materiali ad alta efficienza come la schiuma rigida in polyiso offrono una riduzione della trasmittanza del 72%, mentre i materiali a cambiamento di fase (PCM) riescono a ridurla fino al 75%. Un altro prodotto particolarmente performante sono i pannelli multistrato termoriflettenti, che, pur avendo uno spessore di soli 3 cm, consentono una riduzione della trasmittanza pari all'81% (Boriani, Giambruno, & Garzulino, 2011). Grazie a queste soluzioni, è possibile ottenere un'efficace protezione termica pur con spessori contenuti, ottimizzando sia lo spazio che le prestazioni energetiche dell'edificio.

Dal punto di vista conservativo, l'applicazione del cappotto interno con intercapedine comporta comunque una riduzione dello spazio nelle stanze, che può risultare problematica in ambienti di piccole dimensioni e influire sulle proporzioni e simmetrie degli interni. Tuttavia, a differenza del cappotto tradizionale, l'intercapedine crea uno spazio vuoto tra la muratura e il materiale isolante, permettendo un migliore smaltimento del vapore acqueo e riducendo il rischio di condensa interstiziale, il che è vantaggioso per la durabilità dei materiali.

*c. Intonaci termoisolanti*

Una soluzione tecnica non invasiva che rappresenta un'alternativa valida allo strato isolante convenzionale è l'applicazione di intonaci termoisolanti interni, soprattutto nei casi in cui lo spessore dell'intervento costituisce un vincolo progettuale o quando interventi più impattanti sulle pareti interne non sono praticabili. L'applicazione di intonaco termoisolante avviene con modalità simili a quelle degli interventi esterni e, grazie alla sua totale reversibilità, risulta particolarmente adatta al risanamento dell'involucro edilizio negli edifici storici (Bianco, et al. 2014). Tuttavia, va notato che questo tipo di intervento non elimina i ponti termici (MiBACT, 2015).
Recenti ricerche sugli intonaci termoisolanti esplorano anche l'uso di materiali innovativi, come quelli a cambiamento di fase (PCM), che migliorano la resistenza termica e consentono all'intonaco di accumulare e cedere calore, favorendo così la regolazione termica degli ambienti interni. Grazie a questi materiali, è possibile ridurre lo spessore del rivestimento mantenendo invariato il livello di isolamento termico. Inoltre, sono in fase di studio intonaci a base di aerogel, che, sebbene presentino costi elevati e una produzione limitata in Europa, offrono un'ottima bassa conducibilità termica e un'elevata porosità. Questi ultimi risultano compatibili con le costruzioni storiche anche grazie alla loro permeabilità al vapore (Barbero, et al. 2014).
Dal punto di vista della conservazione e del restauro, l'intervento è particolarmente compatibile quando l'intonaco originale è irreparabilmente danneggiato o realizzato con materiali nocivi e irrecuperabili. L'impatto dipende dalla presenza di eventuali elementi decorativi o caratteristiche che potrebbero essere danneggiate o compromesse.

Di seguito viene presentata una tabella comparativa dei principali sistemi di isolamento termico interno, con un confronto tra cappotto interno classico, cappotto interno con intercapedine e intonaci termoisolanti. La tabella illustra i vantaggi e gli svantaggi di ciascuna soluzione in termini di prestazioni energetiche, compatibilità con il patrimonio storico e impatto sugli ambienti interni (Tabella 11).

| Sistema | Pro | Contro |
|---|---|---|
| Cappotto interno classico | - Buon miglioramento della trasmittanza;<br>- Ampia disponibilità di materiali (sintetici, minerali, naturali, aerogel, polyiso) con diversi livelli di prestazioni e costi;<br>- Installazione semplice;<br>- Possibile incremento prestazioni estive con uso di materiali a cambiamento di fase (PCM). | - Non elimina i ponti termici;<br>- Perdita dell'inerzia termica della muratura;<br>- Rischio di condensa interstiziale;<br>- Perdita delle finiture originali interne;<br>- Riduzione dello spazio utile interno. |
| Cappotto interno con intercapedine | - Migliore gestione del vapore e riduzione della condensa;<br>- Prestazioni termiche superiori rispetto al cappotto tradizionale;<br>- Il flusso d'aria impedisce l'accumulo di umidità all'interno della muratura;<br>- Maggiore flessibilità nella scelta dei materiali impiegabili perché l'intercapedine riduce i rischi igrometrici. | - Maggiore ingombro interno rispetto al cappotto tradizionale (+6–10 cm);<br>- È necessario garantire la ventilazione dell'intercapedine e una corretta posa, aumentando tempi e costi;<br>- Possibile impatto sulle proporzioni interne, può alterare volumi e simmetrie;<br>- Non adatto ad ambienti molto piccoli per la perdita di spazio e difficoltà di posa. |
| Intonaci termoisolanti | - Alta compatibilità con edifici storici: materiali minerali e traspiranti;<br>- Spessori ridotti; | - Prestazioni termiche inferiori rispetto alla soluzione a cappotto;<br>- Ponti termici non risolti; |

| Sistema | Pro | Contro |
|---|---|---|
| | - Possibili formulazioni avanzate (PCM, aerogel);<br>- La traspirabilità favorisce l'equilibrio, prevenendo danni da condensa. | - Non applicabile su superfici decorate o murature a vista. |

*Tabella 11. Tabella comparativa dei sistemi di isolamento termico interno: cappotto interno classico, cappotto interno con intercapedine e intonaci termoisolanti, con relativi pro e contro in termini di prestazioni, compatibilità conservativa e impatto sugli ambienti interni.*

## 3.2 Isolamento delle chiusure verticali trasparenti

Si definiscono chiusure verticali trasparenti l'insieme degli elementi tecnici verticali del sistema edilizio che permettono il passaggio della luce e la visibilità verso l'esterno (UNI 8290-1). Tra queste, rientrano finestre, porte finestrate e vetrate.
Le chiusure verticali trasparenti svolgono un ruolo cruciale nel bilancio energetico dell'involucro edilizio, poiché contribuiscono significativamente alla movimentazione dei flussi termici in entrata ed in uscita, influenzano il comfort degli ambienti interni. Tuttavia, proprio per la loro natura, le chiusure verticali trasparenti costituiscono anche il punto più vulnerabile dell'edificio: in inverno, infatti, sono responsabili di dispersioni termiche significative, mentre in estate possono contribuire all'eccessivo accumulo di calore.
Le prestazioni degli infissi esistenti possono essere migliorate intervenendo sui vetri, sui telai e sulle connessioni con le pareti. Il vetro, in particolare quello singolo tradizionale, è l'elemento che disperde più calore, poiché non offre buone proprietà di resistenza termica. Anche il telaio incide, ma in misura minore, avendo una trasmittanza termica decisamente inferiore rispetto a quella del vetro.
Gli interventi di riqualificazione devono quindi concentrarsi sulla riduzione delle perdite per trasmissione e del sovraccarico termico, migliorando sia le prestazioni termiche dei vetri che dei telai, ottimizzando la permeabilità all'aria e schermando efficacemente la radiazione solare. A tal fine, esistono diverse soluzioni, ma, negli edifici storici, qualsiasi intervento deve essere valutato con attenzione per non compromettere il valore storico-artistico dell'immobile.
La sostituzione dei serramenti esistenti è una pratica ampiamente diffusa nel recupero degli edifici, incentivata dalle consistenti detrazioni fiscali e dalle superiori prestazioni termiche e acustiche degli infissi di nuova produzione. Tuttavia, tale pratica è oggetto di crescente discussione, soprattutto per quanto riguarda gli edifici storici, dove spesso la sostituzione viene considerata ingiustificata (Torsello e Musso, 2003). In molti casi, la sostituzione dei serramenti è resa necessaria dal loro degrado. Tuttavia, in numerosi altri casi, la riparazione non solo rispetterebbe gli obiettivi di conservazione, ma garantirebbe anche prestazioni termoacustiche adeguate. Inoltre, la riparazione risulta sicuramente più sostenibile rispetto alla produzione di nuovi componenti e allo smaltimento di quelli rimossi.

Le soluzioni descritte di seguito offrono una panoramica degli interventi disponibili per l'efficientamento energetico delle chiusure verticali trasparenti. Si inizia con le soluzioni a basso impatto, che influenzano principalmente l'aspetto interno dell'infisso, per proseguire con quelle a maggiore impatto, che modificano anche l'aspetto esterno e infine con le soluzioni che riguardano l'intero serramento (Exner, et al. 2021).

a. *Utilizzo di sistemi di schermatura interni o esterni*

Le soluzioni meno invasive per migliorare l'efficienza termica degli infissi riguardano l'inserimento di schermature solari, sia interne (tende pesanti) che esterne (persiane e tapparelle). Le tende pesanti sono in grado di ridurre la trasmissione del calore dal 40% al 50%, mentre le schermature più moderne, come le veneziane riflettenti o e schermature interne isolanti possono migliorare l'efficienza termica fino al 50-60%. Inoltre, l'isolamento dei pannelli degli scuri ha mostrato un miglioramento dell'efficienza energetica pari al 60%, con un valore U simile a quello di un doppio vetro a bassa emissività (Exner, et al. 2021); (Lucchi & Pracchi, 2013).
Mentre tende e persiane sono elementi tradizionali spesso presenti nella configurazione originale degli edifici storici, le tapparelle, pur essendo un elemento reversibile, sono state introdotte più recentemente e talvolta sono considerate incongrue nel contesto storico, in quanto potrebbero compromettere l'aspetto della facciata. Pertanto, il loro inserimento richiede una progettazione particolarmente attenta.

b. *Recupero del serramento esistente e applicazione di pellicole termoisolanti sulla superficie vetrata*

L'intervento prevede il recupero del serramento originale (telaio e vetro) e l'applicazione di una pellicola adesiva termoisolante sulla superficie vetrata. Questa pellicola, composta da un sottile film realizzato principalmente con poliestere, polveri di metalli nobili e adesivi speciali, viene applicata in modo da preservare la trasparenza del vetro. Il sistema consente di ridurre l'ingresso di calore solare dal 20% al 50%, a seconda dell'orientamento (Bartolomucci 2020) e di limitare le dispersioni termiche, migliorando anche la capacità schermante del vetro. Inoltre, protegge efficacemente dai raggi UV e dal calore (De Carli, et al. 2014).

Dal punto di vista conservativo e del restauro, questo intervento si distingue per il suo basso impatto, in quanto è completamente reversibile e non invasivo. Consente di mantenere intatti il vetro e il telaio originali senza alterarne l'aspetto estetico. La facilità di rimozione della pellicola ne garantisce la compatibilità con i principi di reversibilità del restauro conservativo (Lucchi & Pracchi, 2013; MiBACT, 2015).

c. *Recupero del serramento esistente e trattamento pirolitico basso emissivo sul vetro originario*

L'intervento consiste nell'applicazione di un rivestimento di ossidi metallici sulla superficie del vetro, che garantisce ottime prestazioni energetiche, tra cui bassa emissività, controllo solare, elevata trasmissione luminosa e ridotta riflessione. Questo trattamento consente di ridurre la trasmittanza termica del 22% (Boriani, Giambruno e Garzulino 2021).
Dal punto di vista conservativo e del restauro, l'intervento si distingue per la sua alta compatibilità con la tutela del patrimonio storico-architettonico (MiBACT, 2015). Infatti, il trattamento è completamente reversibile, non invasivo e non altera l'estetica del serramento, poiché viene applicato direttamente sul vetro esistente in modo praticamente invisibile.

d. *Recupero del serramento esistente e inserimento vetrocamera con intercapedine*

Un intervento frequentemente suggerito dalla letteratura per migliorare l'efficienza energetica è l'installazione di un secondo pannello vetrato, di tipo basso emissivo, che funziona come un doppio vetro, ma viene montato direttamente all'interno del telaio esistente (Troi e Bastian 2014). Questa soluzione contribuisce in modo significativo al miglioramento dell'isolamento termico e acustico, riducendo anche le infiltrazioni d'aria tra il vetro e il telaio.
L'installazione di una vetrocamera semplice (3-6-3), con intercapedine d'aria, consente di ridurre la trasmittanza termica del vetro, passando da 5,70 a 3,20 W/m²K, con una riduzione del 43%. Altri tipi di vetro, compatibili con lo spessore del telaio esistente, possono essere utilizzati per ottenere ulteriori miglioramenti. L'introduzione di vetrocamera con gas isolanti, come l'argon, o l'aggiunta di vetri basso emissivi, consente di ottimizzare ulteriormente le prestazioni termiche. Ad esempio, una vetrocamera con intercapedine in argon riduce la trasmittanza a 2,50 W/m²K (-56%), mentre l'uso di vetri basso emissivi con aria disidratata porta il valore a 2,44 W/m²K (-57%). La soluzione più performante si ottiene con una vetrocamera basso emissiva e intercapedine in argon, che consente di raggiungere una trasmittanza di 2,00 W/m²K, con una riduzione del 65% (Boriani, Giambruno, & Garzulino, 2011).
Per il successo dell'intervento, è fondamentale verificare la resistenza meccanica e lo stato di conservazione del telaio, per garantire che possa sostenere adeguatamente il nuovo vetro.
Dal punto di vista conservativo e del restauro, l'intervento modifica in modo limitato l'estetica del serramento, poiché consente di mantenere il vetro originale e non altera visivamente il telaio, se non per l'eventuale allargamento del profilo necessario all'inserimento del nuovo vetro. Se progettato correttamente, rappresenta una soluzione tecnicamente efficace e compatibile con i principi di conservazione (MiBACT 2015).

e. *Sostituzione del vetro*

Qualora il vetro dell'infisso storico risulti danneggiato e non sia possibile installare un secondo strato vetrato, o qualora la normativa imponga l'uso di vetro di sicurezza, la sostituzione del vetro diventa inevitabile. Si tratta di un intervento di impatto medio, sia dal punto di vista della conservazione che dell'efficienza energetica. È possibile utilizzare vetri doppi o tripli, a condizione che il telaio originario sia strutturalmente idoneo a sostenere il peso aggiuntivo. Inoltre, tra gli strati di vetro, è possibile inserire riempimenti o rivestimenti specifici per migliorarne le prestazioni termiche e acustiche.
Dal punto di vista conservativo, la sostituzione del vetro può essere considerata una soluzione accettabile, compatibile con i principi del restauro, a condizione che non venga alterate le caratteristiche estetiche del vetro originario e che venga valutata la fattibilità fisica, dimensionale e strutturale (Lucchi e Pracchi 2013). Prima di procedere, infatti, è necessario valutare con attenzione la resistenza meccanica e lo stato di conservazione del telaio esistente, per verificarne la capacità di sostenere il nuovo vetro (MiBACT, 2015).

f. *Sostituzione delle sole ante battenti*

Questa soluzione prevede la sostituzione esclusiva delle due ante battenti di un infisso, mantenendo invariato il telaio originale. Si tratta di un intervento a impatto medio, sia dal punto di vista conservativo che energetico, particolarmente efficace se la finestra originaria è stata adeguatamente riparata prima dell'intervento o se il telaio fisso è in buone condizioni.
Dal punto di vista conservativo, è fondamentale, prima di procedere, effettuare una valutazione accurata delle proporzioni, dei materiali e delle dimensioni degli elementi che suddividono il vetro in scomparti, al fine di preservare le caratteristiche identitarie dell'infisso.

g. *Inserimento di un secondo serramento interno*

L'intervento prevede l'installazione di un secondo serramento interno, con telaio in alluminio-legno a taglio termico e vetrocamera 3-6-3 con intercapedine in argon. Questa soluzione offre ottime prestazioni energetiche (trasmittanza ridotta del 75% rispetto alla configurazione iniziale). Pur modificando l'aspetto interno degli ambienti, consente di conservare l'estetica esterna dell'edificio dal momento che il serramento esistente originale viene mantenuto (Boriani, Giambruno e Garzulino 2011).
Dal punto di vista della conservazione e del restauro, l'intervento modifica l'estetica del serramento, ma consente di mantenere il serramento originale. È importante poi valutare che attentamente le dimensioni e la resistenza meccanica del vano murario, quindi assicurarsi che non influenzi in maniera troppo impattante il carattere dell'ambiente interno in cui viene installato, si configura come una soluzione tecnicamente efficace e compatibile con criteri della conservazione (MiBACT 2015).

h. *Sostituzione dell'intero infisso con una replica*

L'intervento prevede l'installazione di un secondo serramento interno, con telaio in alluminio-legno a taglio termico e vetrocamera 3-6-3 con intercapedine in argon. Questa soluzione offre eccellenti prestazioni energetiche, con una riduzione della trasmittanza del 75% rispetto alla configurazione iniziale. Pur modificando l'aspetto interno degli ambienti, consente di conservare l'estetica esterna dell'edificio, poiché il serramento originale viene mantenuto (Boriani, Giambruno, & Garzulino, 2011).
Dal punto di vista conservativo e del restauro, l'intervento comporta una modifica estetica del serramento, ma consente di preservare quello originale. Se non incide eccessivamente sull'aspetto dell'ambiente interno, rappresenta una soluzione tecnicamente efficace e compatibile con i principi della conservazione (MiBACT, 2015).

i. *Sostituzione dell'intero infisso con un serramento moderno*

L'ultima ipotesi di intervento prevede la sostituzione degli infissi esistenti con nuovi serramenti più moderni e performanti. Questa soluzione dovrebbe essere presa in considerazione solo quando l'infisso originale non abbia valore storico, artistico o testimoniale, o quando un intervento di recupero non sia possibile a causa di danni irreparabili o di costi eccessivamente elevati.
Nel caso in cui si verifichi una di queste condizioni, la sostituzione risulta efficace, poiché consente un miglioramento significativo dell'efficienza energetica dell'infisso. Sebbene le nuove finestre possano differire nel design rispetto ai modelli originali, devono comunque rispettare elevati standard qualitativi per giustificare la sostituzione anche dal punto di vista della sostenibilità delle risorse. In termini di prestazioni energetiche, l'installazione di serramenti moderni può comportare un miglioramento dell'efficienza, con un valore U ridotto del 70-80% (Exner, Rose, Héberlé, & Mauri, 2021).
Dal punto di vista della conservazione e del restauro, la sostituzione dell'infisso deve essere considerata come una soluzione estrema, anche considerati i benefici energetici ridotti rispetto ad altri possibili interventi, a fronte di un'operazione estremamente impattante. Inoltre, se il serramento è un elemento di pregio che contribuisce al valore dell'edificio, sarà necessario optare per interventi meno invasivi (MiBACT, 2015).

Nella tabella seguente sono riepilogati i principali interventi di efficientamento energetico delle chiusure verticali trasparenti, con i relativi vantaggi e svantaggi sia dal punto di vista tecnico che conservativo (Tabella 12).

| Sistema | Pro | Contro |
|---|---|---|
| Schermature solari (interne/esterne) | - Intervento non invasivo e reversibile;<br>- Elementi tradizionalmente presenti nei contesti storici. | - Impatto estetico variabile: ad esempio, tapparelle possono risultare poco compatibili in contesti storici;<br>- Miglioramento delle performance termiche limitato. |
| Pellicole termoisolanti su vetro esistente | - Intervento reversibile e non invasivo;<br>- Mantiene vetro e telaio originali, preservando valore storico dell'infisso;<br>- Riduce l'ingresso del calore solare e le dispersioni termiche, migliorando il comfort. | - Il miglioramento termico è limitato rispetto a soluzioni più performanti come i doppi vetri;<br>- La durata delle pellicole è limitata nel tempo. |
| Trattamento basso emissivo sul vetro originale | - Altamente compatibile con il restauro conservativo;<br>- Riduce significativamente la trasmittanza termica senza modificare l'estetica dell'infisso. | - Soluzione applicabile solo su vetri integri e non danneggiati;<br>- Offre un miglioramento termico parziale. |
| Inserimento vetrocamera interna | - Migliora notevolmente isolamento termico e acustico;<br>- Conserva il vetro originale, quindi rispetta il valore storico dell'infisso. | - Può modificare il profilo del telaio, cambiandone leggermente l'aspetto;<br>- È necessario valutare la resistenza meccanica del telaio per evitare danni. |
| Sostituzione del vetro | - Consente l'installazione di vetri doppi o tripli ad alte prestazioni, migliorando sensibilmente l'efficienza energetica;<br>- Può essere una soluzione accettabile quando il vetro originale è danneggiato irreparabilmente o non è di valore. | - Ha un impatto medio dal punto di vista della conservazione, perché si perde il vetro originale;<br>- Occorre verificare la capacità portante del telaio per supportare vetri più pesanti. |
| Sostituzione delle ante battenti | - Mantiene il telaio storico, conservando gran parte del valore architettonico dell'infisso;<br>- Offre un miglioramento energetico moderato con un intervento meno invasivo rispetto alla sostituzione totale. | - Impatto estetico medio, soprattutto se non si riproducono fedelmente forme, materiali e proporzioni delle ante originali;<br>- Richiede un'accurata valutazione e progettazione per preservare le caratteristiche storiche. |
| Secondo serramento interno | - Riduzione trasmittanza molto significativa;<br>- Conserva completamente l'aspetto esterno originale, fondamentale per la tutela delle facciate storiche. | - Modifica l'estetica interna, cambiando l'aspetto e la percezione degli ambienti;<br>- Riduzione dello spazio interno. |
| Sostituzione intero infisso con replica | - Garantisce buone prestazioni energetiche;<br>- Riproduce fedelmente gli elementi originali, mantenendo il carattere e l'identità dell'infisso. | - Intervento mediamente impattante che richiede cura estrema nella riproduzione per evitare perdite di autenticità. |
| Sostituzione intero infisso con serramento moderno | - Ottimizzazione massima dell'efficienza energetica dell'infisso. | - Intervento molto impattante in quanto comporta perdita totale dell'infisso storico;<br>- Deve essere considerato solo se l'infisso originale non ha valore storico, artistico o |

| Sistema | Pro | Contro |
|---|---|---|
| | | testimonial;.<br>- Rischio di alterazione estetica e incoerenza con il contesto originale. |

*Tabella 12. Analisi dei principali interventi per l'efficientamento energetico delle chiusure verticali trasparenti in edifici storici, con indicazione dei vantaggi e dei limiti dal punto di vista tecnico ed conservativo.*

## 3.3 Isolamento delle strutture orizzontali opache

Si definiscono chiusure orizzontali tutti quegli elementi tecnici orizzontali del sistema edilizio che hanno la funzione di separare gli ambienti interni dal terreno o dalle fondazioni sottostanti dall'ambiente esterno superiore. In altre parole, comprendono le strutture che isolano l'edificio verso il basso (come i solai inferiori che, nel caso dell'architettura storica, con ogni probabilità sono posati direttamente sullo strato di terra sottostante) e verso l'alto (come le coperture) (UNI 8290-1).
Nel recupero degli edifici storici, gli interventi sulle chiusure orizzontali sono comuni e le soluzioni variano in base al valore storico dell'elemento, al suo stato di conservazione e alla possibilità di operare dall'intradosso o dall'estradosso.

### 3.3.1 Chiusure orizzontali superiori

Negli edifici storici, le chiusure opache orizzontali superiori sono spesso realizzate tramite coperture a falda, solitamente su struttura di legno costituita da un assito e da un'orditura principale e secondaria di travi, o tramite coperture piane.
L'isolamento della copertura, o dell'ultima soletta nel caso di un sottotetto non riscaldato, riveste un ruolo fondamentale per il corretto efficientamento energetico dell'edificio. La copertura, infatti, rappresenta una porzione significativa dell'involucro edilizio ed è quella maggiormente esposta agli agenti atmosferici, alla radiazione solare diretta e agli scambi radiativi notturni con l'atmosfera. I locali sotto tetto, d'altro canto, per via delle loro dimensioni, possono spesso essere trasformati in unità immobiliari. Questa pratica, ancora oggi piuttosto comune, non sempre è accompagnata da una progettazione attenta al benessere termoigrometrico — in particolare dal punto di vista dinamico — comportando così alti consumi energetici sia nella stagione invernale sia in quella estiva.
In altri casi, invece, soprattutto negli edifici storici o monumentali, gli spazi sottotetto restano inutilizzati o destinati a funzioni che non richiedono climatizzazione. In questi contesti, le strategie di miglioramento energetico variano sensibilmente: se l'uso abitativo del sottotetto rende l'isolamento della copertura quasi obbligato, nel caso di sottotetti non riscaldati si può invece sfruttare lo spazio come "buffer termico". Quando adeguatamente ventilato, infatti, il sottotetto contribuisce a stabilizzare le condizioni climatiche degli ambienti sottostanti, riducendo gli sbalzi termici e migliorando complessivamente il comportamento energetico dell'edificio.
In entrambi i casi, l'intervento va progettato con particolare attenzione poiché le problematiche da affrontare variano sensibilmente tra la stagione invernale e quella estiva. In inverno, è importante ridurre le dispersioni di calore per trasmissione e ventilazione tra gli spazi riscaldati e l'esterno; le dispersioni dipendono dalla superficie della copertura e dalla differenza di temperatura tra l'ambiente riscaldato e quello esterno. In estate si assiste invece al surriscaldamento dell'ultimo piano, riducendo il comfort degli ambienti e mettendo a rischio la conservazione delle strutture.
In generale, gli interventi sulla copertura e sulla soletta superiore possono essere eseguiti utilizzando una delle seguenti modalità, ordinate dalla meno impattante alla più impattante:

a. *Recupero del manto di copertura e inserimento di una membrana traspirante e di un feltro termoisolante a ridotto spessore*

L'intervento prevede la rimozione e il recupero dei coppi originali e la posa di una membrana traspirante con feltro isolante termico a ridotto spessore (es. lana di vetro, lana di roccia o polistirene). L'obiettivo è migliorare le prestazioni termiche della copertura senza alterarne geometrie e quote, garantendo al contempo la conservazione degli elementi originali e la reversibilità dell'intervento. La trasmittanza termica si riduce fino al 40% con uno spessore minimo di 1,5 cm di strato isolante.
A parità di spessore dello strato isolante, un risultato ancora migliore si ottiene con l'uso di un feltro termoisolante di origine vegetale (es. fibra di lino, fibra di mais, sughero, fibra di legno, fibra di kenaf, fibra di juta) che garantisce una riduzione della trasmittanza di circa il 50% rispetto al valore iniziale.
Infine, una terza opzione prevede l'adozione di un pannello termoisolante multistrato riflettente a ridotto spessore (es. isolanti a transizione di fase MTF o isolanti sottovuoto), in grado di garantire una riduzione della trasmittanza termica fino al 90% rispetto al valore iniziale, con l'impiego di uno strato di soli 2 cm (Boriani, Giambruno e Garzulino 2011).

Dal punto di vista conservativo e del restauro, l'intervento è quello di più semplice realizzazione in quanto preserva la funzionalità e la conservazione della copertura storica senza introdurre modifiche invasive.

*b. Recupero del manto di copertura e inserimento di uno strato isolante all'intradosso*

Quando il sottotetto è riscaldato, è possibile inserire uno strato di materiale isolante all'intradosso della copertura, cioè sotto il manto esistente. Nel caso di solai in legno, lo spessore dello strato di isolante dipende dall'altezza delle travi.
Dal momento che questa soluzione migliora il comfort termoigrometrico e acustico e consente di preservare la copertura originale lasciandone inalterata la quota esterna, risulta particolarmente adatta in contesti storici. Tuttavia, non elimina i ponti termici strutturali e comporta una riduzione dell'altezza interna utile, spesso già limitata negli edifici d'epoca, rendendo necessario il rispetto dei vincoli normativi in materia di altezze minime.
In questi casi è preferibile usare isolanti ad alte prestazioni che garantiscono spessori ridotti, come quelli termoriflettenti o sottovuoto (MiBACT 2015) che riducono la trasmittanza di circa il 92% rispetto al valore iniziale, con l'inserimento di uno strato isolante di 10cm.
Nel caso in cui invece si prediligesse l'uso di isolanti termici convenzionali (es. lana di vetro, lana di roccia, pannelli in poliestere espanso o estruso) o isolanti termici di origine vegetale (es. fibra di canapa di kenaf) si otterrebbero risultati meno soddisfacenti in quanto la trasmittanza verrebbe ridotta di circa l'88% del valore iniziale con l'inserimento di uno strato di 10,00 cm (Boriani, Giambruno e Garzulino 2021).
In generale, comunque, quando l'isolamento è inserito tra i travetti di un controsoffitto o tra le travi di un solaio, è preferibile utilizzare materiali isolanti morbidi, come i feltri, che si adattano meglio agli spazi irregolari e garantiscono una posa uniforme.
Dal punto di vista conservativo e del restauro, l'intervento non altera l'aspetto esterno dell'edificio in quanto la preservazione del manto di copertura originale è garantita. Tuttavia, questo tipo di intervento richiede una valutazione attenta della struttura esistente e rispettare i vincoli relativi all'altezza minima e media del locale sottotetto.

*c. Recupero del manto di copertura, inserimento di un pannello termoisolante e creazione di intercapedine areata*

Anche in questo caso, l'intervento prevede la previa rimozione dei coppi dalla copertura. Successivamente, viene realizzata una struttura areata con un pannello termoisolante convenzionale (es. lana di vetro, lana di roccia o polistirene) e uno strato d'aria, racchiusi tra due pannelli in legno. L'assito superiore viene protetto con una membrana traspirante. Sebbene l'intervento comporti un aumento della quota della copertura di circa 15 cm, esso consente di ridurre significativamente le dispersioni termiche e migliorare l'isolamento. Ad esempio, l'inserimento di un pannello termoisolante in lana di vetro da 5 cm riduce la trasmittanza termica del 84%. Aumentando lo spessore del pannello isolante fino a 8 cm, la trasmittanza scende ulteriormente, raggiungendo una riduzione del 90%.
L'uso di un pannello termoisolante di tipo ecoefficiente, come la fibra di canapa e kenaf, al posto di un materiale convenzionale come la lana di vetro, implica la riduzione della trasmittanza in modo leggermente inferiore (83% con 5 cm di isolamento e 88% con 8cm di isolamento) rispetto al pannello convenzionale sopradescritto. Infine, una terza variante prevede l'adozione di un pannello termoisolante multistrato riflettente a ridotto spessore (es. isolanti a transizione di fase MTF o isolanti sottovuoto) che offre prestazioni superiori rispetto ai materiali più convenzionali. Questo, infatti, è in grado di garantire una riduzione della trasmittanza termica fino al 93% rispetto al valore iniziale, con l'impiego di uno strato di soli 3 cm (Boriani, Giambruno e Garzulino 2011).
Dal punto di vista conservativo e del restauro, l'intervento non altera l'aspetto esterno dell'edificio in quanto la preservazione del manto di copertura originale è garantita. Tuttavia, questo tipo di intervento richiede una valutazione attenta della struttura esistente e rispettare i vincoli relativi all'altezza minima e media del locale sottotetto.

*d. Recupero del manto di copertura e inserimento di uno strato isolante all'estradosso*

L'intervento consiste nella rimozione e nel recupero dei coppi originali, seguita dalla manutenzione approfondita della struttura lignea sottostante (sverniciatura, carteggiatura, stuccatura e sostituzione delle parti degradate). Successivamente, viene posata una guaina protettiva e un pannello isolante termico di tipo convenzionale (es. lana di vetro, lana di roccia, polistirene o poliuretano espanso), con uno spessore di circa 5 cm, che comporta un innalzamento della quota di copertura di circa 5-6 cm. Questo intervento garantisce un buon miglioramento delle prestazioni termiche, con una riduzione della trasmittanza fino all'81% rispetto al valore iniziale.
A parità di spessore dello strato isolante, un risultato ancora migliore si ottiene con l'uso di un isolante di tipo ecoefficiente di origine vegetale (es. fibra di canapa, kenaf, mais, sughero, legno, lino, cellulosa, juta) che garantisce una riduzione della trasmittanza di circa il 79% rispetto al valore iniziale.
Infine, una terza variante prevede l'adozione di un pannello termoisolante multistrato riflettente a ridotto spessore (es. isolanti a transizione di fase MTF o isolanti sottovuoto), in grado di garantire una riduzione della trasmittanza termica fino al 93% rispetto al valore iniziale, con l'impiego di uno strato di soli 3 cm (Boriani, Giambruno e Garzulino 2011).
Dal punto di vista conservativo e del restauro, la soluzione è praticabile, purché l'innalzamento della quota di copertura non alteri l'aspetto architettonico dell'edificio. In particolare, è opportuno valutare con attenzione la presenza di un muro d'attico, che può contribuire a mascherare visivamente l'intervento, riducendone l'impatto estetico.

*e. Sostituzione del manto di copertura e inserimento di uno strato isolante all'estradosso*

L'intervento consiste nella rimozione del manto esistente e nell'applicazione di pannelli isolanti, protetti da uno strato di finitura (tegole per tetti spioventi, ghiaia o pavimentazione per quelli piani). A seconda delle caratteristiche del tetto, si può optare per un "tetto caldo" (isolante sotto la membrana impermeabile) o un "tetto rovescio" (isolante sopra la membrana impermeabile) (MiBACT 2015).
In linea generale, la soluzione del tetto caldo è ritenuta meno durevole rispetto al tetto rovescio, poiché lo strato impermeabile, posto sopra l'isolante, è più soggetto a degrado per le sollecitazioni termiche (De Santoli, Efficienza energetica negli edifici storici 2014)
L'inserimento di un'eventuale intercapedine ventilata a contatto con lo strato isolante e in rapporto diretto con l'ambiente esterno consente di prevenire il ristagno di umidità e la formazione di condensa. In estate, inoltre, i moti convettivi che si attivano all'interno dell'intercapedine favoriscono la dispersione del calore accumulato dalle strutture, contribuendo così al raffrescamento degli ambienti interni (MiBACT 2015).
Anche per le coperture degli edifici storici, come per le pareti, è raccomandato l'uso di isolanti naturali come la lana di pecora e le fibre di canapa, che sono igroscopiche, mantengono buone proprietà termiche anche in ambienti umidi e non presentano rischi per la salute, a differenza di altri materiali in fibra, come le fibre minerali (Pickles, Brocklebank e Wood 2010). Questi materiali, che comprendono anche fibre di lino, mais, kenaf, juta e sughero, sono considerati più durevoli rispetto a isolanti sintetici come EPS, XPS, PUR e le lane minerali, nonché a materiali ad alte prestazioni come i pannelli multistrato termoriflettenti e gli isolanti sottovuoto. Tuttavia, è sconsigliato l'uso di fibra di cellulosa, poiché perde efficacia in presenza di umidità.
Per i pannelli rigidi, quelli in fibra di legno sono ritenuti ideali per la loro permeabilità al vapore, le buone capacità di isolamento e la massa superficiale che aiuta a prevenire il surriscaldamento estivo, oltre a garantire un buon controllo della tenuta all'aria, se i giunti fra i pannelli sono ben realizzati.
Dal punto di vista della conservazione e del restauro, tali interventi sono giustificabili in presenza di degrado, malfunzionamento del sistema esistente o quando il manto è già stato sostituito o risulta mancante. In questi casi, l'aggiornamento tecnologico può essere compatibile con il rispetto del valore storico dell'edificio (Lucchi e Pracchi 2013).

La tabella seguente riassume i principali sistemi di intervento per l'isolamento delle chiusure orizzontali superiori negli edifici storici, mettendo in evidenza vantaggi e svantaggi in termini di prestazioni energetiche, impatto conservativo e problematiche tecniche associate (Tabella 13).

| Sistema | Pro | Contro |
|---|---|---|
| Recupero manto di copertura + membrana traspirante + feltro termoisolante a ridotto spessore | - Conserva il manto originale preservandone l'aspetto storico;<br>- Riduzione della trasmittanza fino al 90% con l'uso di materiali adeguati;<br>- Materiali vegetali garantiscono prestazioni energetiche elevate e sostenibilità. | - Spessori limitati possono ridurre l'efficacia isolante complessiva;<br>- Prestazioni dipendono dalla qualità e tipo di materiale scelto. |
| Recupero manto + isolamento all'intradosso | - Mantiene inalterato l'aspetto esterno dell'edificio;<br>- Migliora comfort termoigrometrico e acustico degli ambienti sottotetto;<br>- Riduzione della trasmittanza fino al 92% con isolanti ad alte prestazioni; | - Non risolve i ponti termici strutturali;<br>- Riduce l'altezza utile interna, spesso già limitata;<br>- Necessità di rispettare i vincoli normativi sulle altezze. |
| Recupero manto + pannello isolante + intercapedine areata | - Elevata riduzione della trasmittanza termica, fino al 93%;<br>- La ventilazione nell'intercapedine previene l'umidità e la condensa;<br>- Conserva l'aspetto esterno originale della copertura. | - Aumento significativo della quota della copertura (circa 15 cm);<br>- Maggiore complessità e tempi di posa; |
| Recupero manto + isolamento all'estradosso | - Buon miglioramento delle prestazioni termiche (fino all'81%);<br>- Possibilità di impiego di isolanti naturali e traspiranti;<br>- Mantiene inalterato l'aspetto esterno della copertura. | - Incremento della quota di copertura (circa 5-6 cm) con possibile impatto visivo;<br>- Necessaria valutazione per minimizzare l'impatto estetico; |
| Sostituzione manto + isolamento all'estradosso | - Consente un'elevata efficienza energetica;<br>- Possibilità di scegliere tra tetto caldo o tetto rovescio a seconda delle esigenze;<br>- Preferibile utilizzo di isolanti naturali e traspiranti | - Intervento più invasivo e complesso rispetto al recupero;<br>- Rischio di alterazione estetica della copertura;<br>- Costi e tempi di realizzazione superiori. |

*Tabella 13. Confronto sintetico dei principali sistemi di isolamento delle chiusure orizzontali superiori negli edifici storici, con indicazione dei vantaggi e degli svantaggi in termini di prestazioni termiche, impatto conservativo e vincoli architettonici.*

### 3.3.2 Solai interpiano

L'isolamento dei solai intermedi risulta efficace solo in presenza di ambienti con differenti condizioni termiche (ad esempio in caso di impianti autonomi o unità immobiliari frazionate) oppure quando non è possibile intervenire direttamente sulla copertura, né all'estradosso né all'intradosso. In tali situazioni, una valida alternativa è quella di ripensare la destinazione d'uso del sottotetto, impiegandolo come spazio tampone e posizionando lo strato isolante sull'estradosso dell'ultimo solaio interpiano.
Quando il sottotetto non è riscaldato, si interviene sulla soletta superiore inserendo uno strato isolante all'intradosso o all'estradosso. Nel primo caso, il materiale isolante (in rotoli o pannelli) viene applicato sulla parte superiore del solaio. Nel secondo caso, si applica un intonaco termoisolante o un controsoffitto con lastre isolanti. Le lastre possono essere a contatto diretto con la soletta (controsoffitto isolato) o distanziate per creare una camera d'aria (controsoffitto ventilato) (Lucchi e Pracchi 2013).

### 3.3.3 Soletta inferiore

Le chiusure opache inferiori degli edifici storici sono fondamentali per la gestione degli scambi termici con il suolo. Sebbene la soletta inferiore, in quanto a contatto con il terreno, subisce minori fluttuazioni termiche rispetto agli strati esposti all'ambiente esterno, l'isolamento di queste superfici è altamente efficace nel migliorare il bilancio energetico globale dell'edificio, poiché le perdite termiche attraverso le superfici di contatto con il suolo sono spesso considerevoli.
In base alla presenza o meno di locali interrati non riscaldati, l'isolamento delle chiusure inferiori può essere realizzato con una delle seguenti modalità: applicazione di uno strato isolante all'estradosso del solaio, nel caso di locali non riscaldati interrati, oppure posizionamento di uno strato isolante all'intradosso del solaio, direttamente sul terreno (MiBACT, 2015).

*a. Isolamento all'estradosso del solaio controterra*

L'isolamento all'estradosso del solaio controterra si ottiene attraverso la posa di pannelli isolanti che limitano le dispersioni di calore verso il terreno. Nei contesti storici, dove gli interventi sono spesso limitati dalla necessità di preservare il manufatto esistente, i pannelli isolanti difficilmente eliminano completamente le dispersioni causate dai ponti termici. Tuttavia, l'adozione di questi pannelli contribuisce significativamente alla riduzione delle perdite di calore.
In generale, l'installazione di questo sistema di isolamento prevede diverse fasi operative. Si inizia con la rimozione della pavimentazione esistente, se necessario, con un attento accatastamento per un eventuale riutilizzo. Successivamente, si rimuove il materiale sottostante per una profondità di circa 18 cm, creando uno strato di livellamento di circa 5 cm. A questo punto viene posato un primo strato di geotessuto, utile per favorire la traspirabilità del sistema, seguito dall'applicazione dei pannelli isolanti, che possono essere incollati o fissati meccanicamente. Un secondo strato di geotessuto viene aggiunto per garantire ulteriormente la traspirabilità del pacchetto. Infine, si realizza una platea armata di circa 5 cm di spessore, su cui viene steso un massetto di preparazione di circa 3 cm, pronto per accogliere la nuova pavimentazione (Boriani, Giambruno, & Garzulino, 2011).
In commercio esistono diverse tipologie di pannelli isolanti, che vengono selezionati in base alle specifiche caratteristiche tecniche dell'edificio e al contesto in cui si interviene.
L'isolamento con pannelli in polistirene espanso (XPS), materiale impermeabile e incombustibile, rappresenta una soluzione convenzionale molto diffusa. Questo materiale, con uno spessore di 5 cm, è in grado di ridurre la trasmittanza del 69% rispetto al valore iniziale. Tuttavia, presenta una bassa traspirabilità, che può limitare la capacità del solaio di asciugarsi in presenza di umidità, compromettendo parzialmente il comfort interno, soprattutto in contesti soggetti a risalita capillare o umidità costante.
L'alternativa ecoefficiente con pannelli in fibra di canapa e kenaf si distingue per la sua origine naturale e per le buone prestazioni sia termiche che acustiche. Anche in questo caso lo spessore è di 5 cm e la riduzione della trasmittanza è pari al 66%. Questo tipo di isolante è altamente traspirante, regola naturalmente l'umidità, offre una buona elasticità e resistenza meccanica, ed è resistente agli attacchi di insetti e roditori. Tuttavia, è più sensibile all'umidità e ha una bassa resistenza al fuoco, richiedendo quindi l'utilizzo di guaine protettive per preservare le sue prestazioni.

Infine, l'isolamento con pannelli innovativi in schiuma vegetale espansa (polyiso) unisce l'origine naturale a prestazioni elevate. Con lo stesso spessore di 5 cm, garantisce una riduzione della trasmittanza del 77%, superiore rispetto agli altri materiali. Si adatta bene a diverse condizioni climatiche — calde, fredde o umide — mantenendo un buon livello di isolamento a fronte di un costo contenuto. È inoltre un ottimo isolante acustico, traspirante e resistente agli attacchi biologici, pur essendo a base vegetale.

*b. Isolamento all'intradosso del solaio controterra*

Se la soletta è a diretto contatto con il terreno o su un vespaio aerato, l'isolamento richiede il sollevamento del pavimento esistente, poiché l'isolante deve essere posizionato sulla superficie interna del solaio. Se l'ambiente sottostante è abitato, il materiale isolante deve essere calpestabile e possedere una buona resistenza meccanica. Inoltre, è fondamentale prevedere una finitura superficiale o una pavimentazione, supportata da uno strato di massetto. È anche necessario proteggere l'isolamento dall'umidità ascendente, inserendo uno strato impermeabile sotto il materiale isolante e installare una barriera al vapore verso l'interno per evitare la formazione di condensa superficiale.
Le principali criticità durante la posa riguardano la continuità dei pannelli isolanti, la corretta sigillatura dell'impermeabilizzante e l'integrazione con le discontinuità edilizie, come porte, finestre e pareti.
Prima di procedere con l'intervento, è importante effettuare una valutazione dell'effettiva necessità di isolamento, poiché, in alcuni contesti climatici, il contatto diretto con il terreno o con locali interrati può essere vantaggioso, specialmente durante la stagione estiva. In questi casi, evitare l'isolamento consente di sfruttare il terreno come volano termico, aumentando lo sfasamento termico estivo e migliorando il raffreddamento naturale degli ambienti superiori. La dispersione termica invernale avviene verso il terreno, che mantiene una temperatura media di circa 10-14 °C, invece che verso l'aria esterna, favorendo così il comfort senza compromettere l'efficienza energetica.

c. Isolamento all'estradosso del solaio in corrispondenza di locali non riscaldati

Quando il solaio inferiore dell'edificio confina con uno spazio non riscaldato, è possibile applicare uno strato di materiale isolante sulla superficie di estradosso. Lo spessore dell'isolante deve essere dimensionato per mantenere una temperatura superficiale adeguata alle esigenze interne dell'edificio. Inoltre, se il volume d'aria interrato presenta aperture verso l'esterno, può fungere da intercapedine ventilata, prevenendo la formazione di condensa e, durante l'estate, facilitando i moti convettivi che contribuiscono al raffrescamento passivo degli ambienti. Qualora non fosse possibile utilizzare pannelli isolanti, è comunque possibile ottenere buoni risultati di coibentazione applicando un intonaco termoisolante sulla superficie superiore del solaio (MiBACT, 2015).
Dal punto di vista della conservazione e del restauro, l'isolamento dei solai controterra, sia all'estradosso che all'intradosso, richiede un'attenta valutazione tecnica e conservativa.
L'isolamento all'estradosso del solaio controterra non è, di per sé, un intervento altamente impattante, purché venga progettato con cura e nel rispetto delle tecniche costruttive e delle caratteristiche storiche dell'edificio.
L'isolamento all'intradosso, invece, può essere considerato compatibile con i principi della conservazione, ma solo se attentamente verificato dal punto di vista tecnico. In particolare, nei casi in cui siano presenti pavimenti storici di pregio, è fondamentale che questi vengano rimossi con cautela, catalogati e reimpiegati, evitando qualsiasi danno al patrimonio esistente.
L'intervento deve inoltre garantire il rispetto dei requisiti di igiene e salubrità degli ambienti, considerando che comporta una modifica della quota d'interpiano. Un'ulteriore criticità riguarda le possibili interferenze tra il nuovo pacchetto di pavimentazione e gli elementi architettonici esistenti, come soglie, infissi e porte: è essenziale verificare che l'innalzamento del piano di calpestio non comprometta la funzionalità degli spazi né la loro leggibilità storico-architettonica.

Di seguito si presenta una sintesi comparativa dei principali sistemi di isolamento termico delle chiusure orizzontali inferiori, con i relativi vantaggi e svantaggi in termini di efficienza energetica, compatibilità conservativa e aspetti tecnici (Tabella 14).

| Sistema | Pro | Contro |
|---|---|---|
| Isolamento all'estradosso del solaio controterra | - Riduce significativamente le dispersioni termiche verso il terreno;<br>- Possibilità di utilizzo di materiali naturali e innovativi;<br>- Intervento poco invasivo. | - Necessita rimozione e ricollocazione pavimentazione;<br>- Bassa traspirabilità di alcuni materiali (es. XPS);<br>- Possibili problemi di umidità se non correttamente progettato; |
| Isolamento all'intradosso del solaio controterra | - Mantiene la quota esterna del solaio invariata;<br>- Possibilità di utilizzare materiali calpestabili e resistenti;<br>- Compatibile con il recupero di pavimenti storici se eseguito con attenzione. | - Intervento più invasivo (sollevamento pavimento);<br>- Modifica quota interpiano;<br>- Necessaria barriera al vapore e impermeabilizzazione;<br>- Possibili interferenze con elementi architettonici esistenti; |
| Isolamento all'estradosso del solaio verso locali non riscaldati | - Favorisce il mantenimento di temperature superficiali adeguate;<br>- Può sfruttare intercapedini ventilate per ridurre condense e migliorare comfort estivo;<br>- Possibile utilizzo di intonaci termoisolanti come alternativa. | - Limitata applicabilità in assenza di locali non riscaldati;<br>- Necessità di valutare condizioni di ventilazione e umidità;<br>- Spessori e materiali devono essere attentamente scelti per evitare problemi igrometrici. |

*Tabella 14. Tabella comparativa dei sistemi di isolamento dei solai controterra e verso locali non riscaldati, evidenziando i principali pro e contro delle soluzioni all'estradosso e all'intradosso, con particolare attenzione alle implicazioni per la tutela e la conservazione degli edifici storici.*

## 3.4 Adeguamento impiantistici

Nel nostro paese il 19,15% degli edifici è stato costruito prima del 1919, che significa che hanno un valore storico o contengono beni artistici (Stefanutti e Bedendo 2014). Affrontare il miglioramento tecnologico di edifici di questa tipologia è, pertanto, una sfida complessa che richiede scelte attente e consapevoli. Il progettista deve bilanciare le esigenze conservative, volte a preservare i valori storici e figurativi, con quelle tecnologiche, sfruttando soluzioni moderne poco invasive e ben integrate (Concas 2014).
Sul tema del rapporto tra restauro e impianti, la letteratura ha compiuto notevoli progressi; tuttavia, l'argomento risulta ancora oggi meno approfondito rispetto, ad esempio, al rapporto tra restauro e piena accessibilità (superamento delle barriere architettoniche) o tra restauro e opere di consolidamento strutturale (MiBACT, 2015). Non esistono regole fisse, ma si riconoscono pratiche di qualità fondate su un approccio interdisciplinare e su una sensibilità verso la storia dell'architettura. Ogni intervento va valutato caso per caso, nel rispetto dell'autenticità dell'edificio, con l'obiettivo di realizzare una buona architettura, capace di coniugare conservazione e innovazione.
In generale, è evidente che il miglioramento delle prestazioni energetiche di un edificio non può non prevedere interventi sugli impianti, salvo che specifici vincoli storici o architettonici ne impediscano la realizzazione. In tal caso, l'inserimento di nuovi dispositivi o impianti è possibile, ma deve rispettare il contesto esistente e garantire la compatibilità tra i sistemi impiantistici e la struttura dell'edificio.
È fondamentale evitare interventi invasivi, come l'apertura di varchi eccessivi, il sovraccarico dei solai o l'adozione di sistemi visivamente o strutturalmente ingombranti. Il principio del "minimo intervento" invita a limitarsi allo stretto necessario, evitando trasformazioni che snaturino la sua autenticità.
Il principio di "reversibilità" richiede di evitare interventi distruttivi come tracce murarie o aperture in breccia, preferendo impianti a vista o l'uso di spazi già esistenti. Gli impianti a vista, favoriti anche dal principio della "distinguibilità", se progettati con attenzione alla dignità formale, possono unire il rispetto della reversibilità con una buona qualità estetica.
Occorre inoltre considerare che l'installazione di impianti di climatizzazione può alterare la temperatura interna, influenzando così i parametri di umidità relativa e incidendo sensibilmente sulle condizioni di conservazione dei materiali di finitura (Lucchi & Pracchi, 2013).
È possibile migliorare l'efficienza energetica di un edificio storico attraverso interventi mirati e rispettosi, ma senza mirare a un adeguamento totale agli standard moderni, che rischierebbe di compromettere l'identità e il valore storico del bene. Un approccio eccessivamente rigido finirebbe per snaturare l'edificio, rendendolo irriconoscibile e privandolo delle sue qualità originarie. Nella realtà, un progetto di integrazione impiantistica nell'edilizia storica difficilmente riesce a raggiungere tutti gli obiettivi contemporaneamente al massimo grado. La soluzione migliore è invece un compromesso ragionato tra le diverse esigenze, ottenuto attraverso una riformulazione accurata e consapevole dei requisiti progettuali, adattandoli al caso specifico.

Anche in questo caso, il presente capitolo non ha l'obiettivo di suggerire regole preconfezionate che possono portare all'applicazione di processi meccanici, ma si propone di analizzare i principali sistemi di intervento, mettendone in luce le caratteristiche, i principi, l'applicabilità all'edilizia storica e le possibili criticità. L'obiettivo è fornire una base di valutazione utile per determinare, in un secondo momento e caso per caso, la loro effettiva idoneità rispetto ai casi di studio selezionati.

### 3.4.1 Impianti di climatizzazione

L'impianto di climatizzazione è composto da un insieme di apparecchiature destinate alla climatizzazione degli ambienti e alla produzione di acqua calda per usi igienici e sanitari. Esso si suddivide in quattro principali sottosistemi: produzione (che riguarda la generazione del calore o del freddo necessario), distribuzione del fluido termovettore (che si occupa di trasportare il fluido riscaldato o raffreddato agli ambienti da climatizzare), emissione del calore (riguarda i dispositivi che rilasciano il calore negli ambienti come radiatori, ventilconvettori, ecc.) e regolazione termica (comprende i sistemi di controllo che gestiscono la temperatura, garantendo il comfort ambientale e l'efficienza energetica).
Per aumentare il rendimento degli impianti di riscaldamento esistenti si può intervenire sul sistema di produzione del calore, sul sistema di emissione e su quello di regolazione.

*Il sistema di produzione*

Il sistema di produzione del calore è solitamente composto da un generatore che utilizza diversi tipi di combustibili (solidi, liquidi o gassosi) per produrre energia termica. Le caldaie attualmente disponibili si suddividono in tre principali categorie: standard, a temperatura scorrevole e a condensazione.
Le caldaie standard risultano generalmente meno efficienti, mentre quelle a condensazione rappresentano la soluzione tecnologicamente più evoluta, grazie alla capacità di recuperare il calore latente contenuto nei fumi di scarico, che normalmente verrebbe disperso.
Questa tecnologia consente di raggiungere rendimenti energetici estremamente elevati, tra il 105% e il 109%, rispetto all'85-90% delle caldaie tradizionali a camera stagna e al 70% delle caldaie a camera aperta. L'efficienza delle caldaie a condensazione si esprime al meglio negli impianti che operano con basse temperature di ritorno dell'acqua, rendendole particolarmente adatte all'abbinamento con terminali a bassa temperatura, come pannelli radianti o radiatori dotati di valvole termostatiche.
Negli edifici storici, dove gli impianti esistenti funzionano spesso a temperature elevate (superiori a 70°C) e presentano dispersioni significative a causa del cattivo isolamento e delle perdite nei fumi di scarico (De Santoli et al., 2014), l'adozione di caldaie a condensazione permette di ridurre sensibilmente i consumi. In questo modo, si migliora l'efficienza energetica nella produzione di acqua calda sanitaria e riscaldamento, senza compromettere le caratteristiche architettoniche e materiche originali degli edifici.

Tra i sistemi di produzione di energia termica, spesso assenti negli edifici storici, vi sono le pompe di calore, che permettono sia il riscaldamento che il raffreddamento degli ambienti. Questi sistemi funzionano trasferendo il calore da una sorgente a temperatura più bassa (sorgente fredda) a un corpo a temperatura più alta (pozzo caldo).
Le pompe di calore sono suddivise in diverse categorie in base alla sorgente di calore e al tipo di "pozzo" che riscaldano, come acqua-acqua, acqua-aria, aria-aria e aria-acqua. Le più efficienti sono quelle che utilizzano l'acqua come sorgente fredda, come le pompe geotermiche, che non dipendono dalle condizioni climatiche esterne. Tuttavia, l'installazione di sistemi come acqua-acqua e geotermici negli edifici esistenti può presentare difficoltà legate ai vincoli costruttivi, come la necessità di prelevare acqua dà profondità adeguate, con alti costi di escavazione e potenziali problemi di stabilità (Lucchi e Pracchi 2013).

La tabella seguente riassume i principali tipi di sistemi di produzione, evidenziandone vantaggi e svantaggi in questo contesto (Tabella 15).

| Sistema di Produzione | Pro | Contro |
|---|---|---|
| Caldaie standard | - Tecnologia consolidata;<br>- Costi iniziali contenuti;<br>- Interventi generalmente poco invasivi. | - Efficienza bassa (70-90%);<br>- Alte temperature di esercizio;<br>- Elevate perdite termiche;<br>- Maggiori consumi e impatti ambientali. |

| Sistema di Produzione | Pro | Contro |
|---|---|---|
| Caldaie a temperatura scorrevole | - Miglior controllo della temperatura;<br>- Maggiore efficienza rispetto alle caldaie standard;<br>- Interventi generalmente poco invasivi. | - Richiede impianti e terminali adeguati;<br>- Efficienza inferiore rispetto a caldaie a condensazione; |
| Caldaie a condensazione | - Efficienza elevata (105-109%);<br>- Riduzione consumi energetici;<br>- Interventi generalmente poco invasivi. | - Funzionano al meglio con basse temperature di ritorno;<br>- Richiedono adeguamento terminali a bassa temperatura;<br>- Adeguamenti possono comportare modifiche tecniche e impiantistiche. |
| Pompe di calore aria-aria / aria-acqua | - Riscaldamento e raffrescamento integrati;<br>- Maggiore efficienza rispetto a caldaie tradizionali;<br>- Non richiedono combustibili fossili. | - Efficienza dipendente dalla temperatura esterna;<br>- Rumore e ingombro esterno;<br>- Limitazioni in climi rigidi. |
| Pompe di calore acqua-acqua / geotermiche | - Alta efficienza indipendente dal clima;<br>- Ridotte emissioni. | - Costi elevati di installazione;<br>- Complessità tecnica e vincoli strutturali;<br>- Interventi invasivi per necessità di perforazioni e scavi. |

*Tabella 15. Tabella riassuntiva delle caratteristiche principali, vantaggi e criticità dei sistemi di produzione del calore più diffusi negli edifici, con particolare attenzione all'applicazione nel patrimonio storico.*

*Il sistema di emissione*

L'incremento del rendimento[54] di emissione riguarda la scelta dei terminali di emissione. Questi elementi hanno la funzione di immettere nell'ambiente l'energia termica prodotta dal generatore e trasmessa attraverso la rete di distribuzione. I terminali si dividono in due categorie principali: radianti (come i pannelli a pavimento e le piastre a parete, che trasmettono calore per radiazione) e convettivi (come i radiatori e i ventilconvettori, che riscaldano l'aria e la rimescolano tramite moti convettivi). Possono essere anche classificati in base al fluido che circola (aria, acqua o misto), con i sistemi ad aria che richiedono canali più grandi rispetto a quelli ad acqua.
Molte tipologie di terminali non sono utilizzabili negli edifici storici a causa delle temperature relativamente alta dei fluidi. I sistemi tradizionali installati negli edifici storici nel corso del tempo, dal dopoguerra in avanti, generalmente consistono in radiatori e ventilconvettori.
I radiatori sono costituiti da una serie di elementi verticali in cui passa il fluido termovettore ad alta temperatura (60-70°C), che viene scambiato con l'ambiente attraverso il fenomeno della convezione naturale. Il sistema non è molto efficiente dal punto di vista energetico perché il generatore di calore deve consumare molta energia per poter riscaldare l'acqua a una temperatura così elevata. L'efficienza può essere aumentata utilizzando valvole termostatiche che limitano il flusso d'acqua che passa nei radiatori.
I ventilconvettori, utilizzati per riscaldamento e raffrescamento, spingono l'aria attraverso una batteria di tubi alettati con un ventilatore. Sono adatti per edifici a uso discontinuo, come chiese o sale conferenze, grazie alla loro rapida messa a regime e maggiore potenza termica rispetto ai radiatori. Tuttavia, sono rumorosi e possono danneggiare i manufatti artistici a causa delle correnti d'aria calda. Alimentati elettricamente, riducono l'invasività rispetto ad altri sistemi, ma aumentano i consumi elettrici, che possono essere ridotti con un termostato che permette di attivare o disattivare il sistema, garantendo anche un migliore controllo termico locale in base alle effettive necessità d'uso.

I sistemi radianti, come pannelli e strisce a battiscopa, sono sempre più utilizzati nella riqualificazione dell'architettura storica. Questi sistemi riscaldano tramite serpentine di tubi che circolano fluido riscaldato,

[54] *Il rendimento è una grandezza utilizzata per valutare l'efficienza energetica del sistema di riscaldamento e si definisce come il rapporto tra l'energia utile prodotta e l'energia consumata per produrla. Un rendimento più elevato comporta un maggiore risparmio energetico ed economico.*

emettendo onde elettromagnetiche infrarosse. Grazie alle temperature basse del fluido, che li rendono ideali per caldaie a condensazione e pompe di calore, offrono un risparmio energetico e riducono il rischio di danneggiare i manufatti storici per dilatazioni termiche.
I pannelli radianti possono essere installati a soffitto, pavimento o parete:

- Quelli a soffitto sono poco efficienti e difficilmente applicabili agli edifici storici, specialmente nei casi in cui vi siano decorazioni, modanature o elementi di particolare pregio.
- Le strisce a parete, invece, riscaldano per irraggiamento, riducendo i moti convettivi e garantendo una rapida messa a regime, ma richiedono un avviamento graduale per evitare danni conservativi. Sono solitamente installate a un'altezza adeguata o nascoste sopra i cornicioni (spesso presente negli edifici di molte architetture) per mitigare l'impatto visivo; a tal fine sono in commercio anche modelli a scomparsa, che divengono visibili soltanto in caso d'uso. Alimentate a gas, risultano invasive per la necessità di condotti e pongono problemi di sicurezza. Sono inoltre poco adatte a musei o spazi espositivi, poiché impediscono l'uso delle pareti.
- I sistemi radianti a pavimento sono tra i più efficienti, poiché sfruttano il naturale moto ascendente del calore, garantendo un riscaldamento efficace fino a circa 3 metri di altezza. Operando con temperature dell'acqua relativamente basse, consentono inoltre una significativa riduzione degli sprechi energetici. L'impianto, particolarmente adatto agli spazi storici caratterizzati da altezze superiori rispetto alle costruzioni recenti, risulta invisibile poiché integrato sotto il pavimento. Tuttavia, richiede interventi invasivi di rifacimento, motivo per cui è consigliabile valutarne l'installazione solo in occasione di lavori già programmati sulla pavimentazione.
- I radiatori a battiscopa, costituiti da tubazioni in rame inserite nello zoccolo con un carter di protezione, sono adatti all'adeguamento degli edifici esistenti. Nei locali espositivi o con finiture pregiate, è consigliato installarli lungo i muri perimetrali o nei corridoi per evitare che il flusso convettivo del calore danneggi le opere esposte.

Il sistema temperierung utilizza tubi localizzati che riscaldano per irraggiamento le pareti dell'edificio. È particolarmente adatto alla conservazione del patrimonio culturale, poiché contrasta l'umidità di risalita, la migrazione salina e la condensa, stabilizza le condizioni termiche interne e riduce la dispersione di calore, migliorando l'inerzia termica e le proprietà isolanti dell'edificio.
In fase di progettazione, comunque, è talvolta preferibile combinare più sistemi. Questo permette di ottenere risultati migliori, bilanciando esigenze conservative e comfort ambientale.

La tabella seguente riassume i principali vantaggi e svantaggi delle diverse tipologie di sistemi di emissione, con particolare attenzione agli aspetti legati alla tutela e alla conservazione del patrimonio culturale (Tabella 16).

| Sistema di emissione | Pro | Contro |
|---|---|---|
| Radiatori tradizionali | - Tecnologia consolidata;<br>- Buona diffusione del calore per convezione naturale; | - Funzionano ad alte temperature (60-70°C), che possono danneggiare materiali sensibili;<br>- Elevati consumi energetici. |
| Ventilconvettori | - Rapida messa a regime;<br>- Adatti a edifici ad uso discontinuo; | - Rumorosi;<br>- Correnti d'aria calda possono danneggiare manufatti;<br>- Consumi elettrici elevati;<br>- Sconsigliati per ambienti con opere d'arte o manufatti delicati. |
| Pannelli radianti a pavimento | - Riscaldamento uniforme e confortevole;<br>- Basse temperature di esercizio;<br>- Invisibili, quindi minimo impatto visivo. | - Intervento invasivo per installazione;<br>- Richiede sollevamento pavimentazione. |

| Sistema di emissione | Pro | Contro |
|---|---|---|
| Strisce radianti a parete | - Riscaldamento per irraggiamento;<br>- Riduzione moti convettivi;<br>- Rapida risposta;<br>- Posizionabili in modo da minimizzare impatto visivo. | - Necessità di avviamento graduale per evitare danni conservativi;<br>- Impatto visivo se non ben integrate;<br>- Poco adatte a musei o spazi espositivi. |
| Pannelli radianti a soffitto | - Posizionabili in modo da minimizzare impatto visivo;<br>- Riscaldamento per irraggiamento. | - Poco efficienti;<br>- Difficili da applicare in ambienti decorati o con modanature;<br>- Generalmente non consigliati in edifici storici per alto impatto conservativo. |
| Radiatori a battiscopa | - Posizionabili in modo da minimizzare impatto visivo;<br>- Riscaldamento localizzato. | - Potenziale interferenza con elementi architettonici e opere pregiate. |
| Sistema Temperierung (pareti) | - Contrasta umidità di risalita e la comparsa di condensa;<br>- Stabilizza condizioni termiche; | - Richiede installazione specifica e valutazione tecnica. |

*Tabella 16. Tabella comparativa dei sistemi di emissione termica per edifici storici: vantaggi e criticità in termini di efficienza, comfort e compatibilità con la conservazione architettonica e dei manufatti.*

## 3.5 Fonti rinnovabili

La produzione di energia da fonti rinnovabili negli edifici esistenti è promossa e, in parte, imposta dalle Direttive europee - in particolare la Direttiva 2010/31/UE (rifusa dalla Direttiva 2002/91/CE), la Direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica e, soprattutto, la Direttiva (UE) 2018/2001 (RED II), recentemente aggiornata dalla Direttiva (UE) 2023/2413 (RED III). Queste direttive chiedono agli Stati membri di garantire un mix energetico sempre più basato su fonti rinnovabili, con l'obiettivo di raggiungere almeno il 42,5% di energia rinnovabile entro il 2030 (con un obiettivo indicativo del 45%) e fissano l'obbligo che gli edifici — specialmente quelli sottoposti a ristrutturazione significativa — integrino tecnologie a fonti rinnovabili. In particolare, la RED III impone un aumento annuo minimo dello 0,8% della quota di energia rinnovabile nel settore edilizio.
Anche la legislazione nazionale (D.Lgs. 28/2011) prevede che, negli edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, una consistente parte dei consumi di acqua calda sanitaria sia coperta da energia rinnovabile. Inoltre, impone l'installazione di impianti a fonti rinnovabili, in particolare di pannelli fotovoltaici, con una potenza elettrica minima obbligatoria che varia in base alla superficie utile dell'edificio e alla data di richiesta del titolo edilizio (Lucchi e Pracchi 2013). Tali obblighi sono stati rafforzati nel tempo, anche attraverso il D.M. 26 giugno 2015 (cosiddetto "Decreto Requisiti Minimi") e il D.Lgs. 48/2020, che recepisce la Direttiva europea 2018/844. L'obiettivo è garantire che gli edifici nuovi o ristrutturati contribuiscano in modo significativo al raggiungimento dei target nazionali ed europei in materia di efficienza energetica e decarbonizzazione. Inoltre, attraverso il PNIEC, l'Italia si impegna a rafforzare la penetrazione delle FER nel parco edilizio esistente, in linea con gli obiettivi climatici al 2030.

Le Nazioni Unite classificano le fonti di energia rinnovabile (FER) in sei categorie. Questo capitolo si concentra sull'integrazione dell'energia solare, in quanto rappresenta la fonte più direttamente applicabile agli edifici del patrimonio architettonico storico. Sono escluse l'energia geotermica, generalmente ben accettata negli edifici storici ma ancora poco trattata nella letteratura scientifica e la bioenergia, per la quale non risultano pubblicazioni rilevanti in ambito storico-architettonico. Allo stesso modo, vengono escluse l'energia eolica, idroelettrica e oceanica, in quanto tecnologie di scala territoriale e non compatibili con l'integrazione puntuale nel costruito storico (E. Lucchi 2023).

### 3.5.1 Energia solare

Secondo lo studio di (E. Lucchi 2023), non ci sono differenze sostanziali tra l'integrazione di sistemi fotovoltaici e solari termici, anche se la letteratura è più ampia per i primi. Tuttavia, è importante distinguere tra le due tecnologie, poiché utilizzano il calore e l'energia in modi diversi in quanto il solare termico trasforma l'energia proveniente dalla radiazione solare in energia termica, mentre il pannello fotovoltaico converte la radiazione solare incidente in energia elettrica (Lucchi e Pracchi 2013).
Nonostante, come evidenziato da Durante, Lucchi e Maturi (2018), a livello internazionale manca ancora un consenso unanime sulla definizione di integrazione dei sistemi fotovoltaici negli edifici (Durante, Lucchi e Maturi 2018), la letteratura più recente individua alcuni principi chiave che possono garantire la compatibilità delle nuove tecnologie solari con i vincoli architettonici e paesaggistici dei centri storici urbani.

Il primo e più frequentemente considerato criterio per l'integrazione dei sistemi fotovoltaici nel patrimonio culturale è l'integrazione estetica, intesa come la capacità dell'intervento di armonizzarsi con l'aspetto originario dell'edificio, minimizzando l'impatto visivo. Questo criterio rappresenta un punto centrale per le linee guida e le autorità preposte alla tutela, in quanto mira a preservare l'identità storica e architettonica del bene, bilanciando le esigenze tecniche con i valori culturali e paesaggistici (E. Lucchi 2022). L'integrazione estetica si articola a sua volta in sub componenti fondamentali, come la compatibilità spaziale e visiva (Polo Lopez, Lucchi e Leonardi, et al. 2021). Meno frequentemente affrontata, ma comunque rilevante, è la compatibilità tecnica del sistema fotovoltaico (E. Lucchi 2022).

*Compatibilità spaziale*

La compatibilità spaziale delle installazioni fotovoltaiche riguarda il rispetto delle geometrie, proporzioni, inclinazioni e dimensioni originarie delle superfici architettoniche. Le Linee di indirizzo del MIBACT suggeriscono, laddove possibile, la delocalizzazione della produzione di energia fotovoltaica all'esterno dei centri storici, su coperture o prospetti di fabbricati industriali, centri commerciali ecc. (MiBACT 2015). Per l'inserimento dei pannelli sulle

coperture dell'edilizia storica, come sottolinea Lucchi (2022), i pannelli dovrebbero integrarsi armoniosamente con le linee dell'edificio – in particolare con colmi, gronde e curve – privilegiando forme regolari, raggruppamenti ordinati e una disposizione che non alteri la leggibilità dell'architettura (E. Lucchi 2022).
Secondo Lucchi, Baiani e Altamura (2023), la collocazione ottimale dei sistemi solari è in zone poco visibili, come facciate posteriori, tetti secondari, parti superiori delle coperture, oppure dietro parapetti e abbaini. Sono considerate soluzioni accettabili anche l'integrazione su strutture accessorie (come pergole sul parcheggio, terrapieni, ecc.). Al contrario, è sconsigliata l'installazione su facciate principali, tetti in paglia, coperture a mansarda, abbaini prominenti, verande laterali e pareti finestrate, in quanto elementi significativi per l'identità e la percezione del bene storico (Lucchi, Baiani e Altamura 2023).
La dimensione dell'impianto deve restare proporzionata all'edificio e calibrata sul reale fabbisogno energetico, evitando sovradimensionamenti che ne altererebbero l'immagine.
La disposizione dei pannelli solari sui tetti a falda triangolare risulta particolarmente critica, poiché questi tetti si adattano poco al fissaggio di dispositivi, o gruppi di dispositivi, generalmente di forma rettangolare. Di conseguenza, la posa dei pannelli è del tutto incompatibile, a meno che non si utilizzino pannelli con forme geometriche adattabili (come quelli "laser cut"); nel caso di copertura completa del tetto, sia esso triangolare o rettangolare, viene opportunamente lasciata intatta una fascia di copertura tradizionale lungo il bordo (Franco 2018).
La dimensione dell'impianto deve restare proporzionata all'edificio e calibrata sul reale fabbisogno energetico, evitando sovradimensionamenti che ne altererebbero l'immagine.

*Compatibilità visiva*

Sotto il profilo della compatibilità visiva, i pannelli dovrebbero essere complanari alla superficie d'appoggio, dotati di profili sottili e caratterizzati da una morfologia compatta, regolare e continua. Sono da evitare le soluzioni frammentate, distribuite su più falde o con configurazioni asimmetriche, che compromettono l'equilibrio compositivo dell'insieme. È preferibile disporre i pannelli in una striscia continua al di sopra della linea di gronda, lungo tutta la lunghezza del tetto, oppure optare per la copertura dell'intera falda con la migliore esposizione, così da evitare effetti di discontinuità e ridurre l'impatto visivo complessivo (MiBACT 2015).
È importante evitare applicazioni casuali e irregolari a favore di soluzioni che mantengano o migliorino le proporzioni dell'edificio, liberando per esempio la parte del tetto più vicina alla gronda e raggruppando i pannelli vicino al colmo, anche se questo potrebbe contraddire alcuni canoni tecnici esaminati (Franco 2018).
Infine, la compatibilità visiva punta alla conservazione dell'aspetto esteriore del bene culturale. In questo senso, si promuove il mascheramento degli elementi fotovoltaici, inclusi canaline, tubazioni e sistemi di ancoraggio. È fondamentale il rispetto dei colori e delle texture superficiali. Tuttavia, in alcuni approcci conservativi si considera anche il principio della riconoscibilità degli interventi, che implica una distinzione netta tra elementi storici e aggiunte contemporanee — un concetto dibattuto e non sempre condiviso (E. Lucchi 2022).
La percentuale di copertura dei tetti varia in base alla tipologia della copertura e al contesto di applicazione. Per i tetti inclinati, la superficie coperta da pannelli fotovoltaici è generalmente limitata al 40%, con casi in cui questa percentuale scende al 15%, privilegiando l'installazione su una sola falda. Tuttavia, in situazioni particolari, come tetti di dimensioni ridotte, può essere accettabile una copertura totale, purché materiali, colore e forma siano attentamente studiati per minimizzare l'impatto visivo. In linea con queste indicazioni, qualora il contesto lo permetta, può essere ragionevole progettare una copertura completa, curando con attenzione l'integrazione cromatica e formale. Per le coperture piane, invece, si raccomanda una copertura parziale compresa tra il 30% e il 50% per contenere l'impatto visivo e preservare l'estetica complessiva dell'edificio (Franco 2018; Polo López e Lucchi 2020; Lucchi, Baiani e Altamura 2023).
Infine, è da sottolineare come il mercato offra oggi materiali (pannelli rigidi o flessibili) e schemi cromatici diversi che rappresentano un'alternativa valida per una migliore compatibilità paesaggistica rispetto ai tradizionali pannelli fotovoltaici, anche se i costi sono più alti e le prestazioni inferiori; non va inoltre sottovalutato l'effetto di riflessione dei raggi solari sulla superficie dei pannelli, visibile anche a considerevole distanza. È quindi importante scegliere celle e materiali che riducano l'impatto visivo, evitando riflessi e discontinuità cromatiche, privilegiando la mimesi con l'ambiente (Franco 2018).

*Compatibilità tecnica*

La compatibilità tecnica riguarda la valutazione dei rischi legati all'impatto materiale e fisico di una nuova soluzione sulla rilevanza storica o sulla stabilità dell'edificio. In questo ambito, gli aspetti principali da considerare sono il rischio igrotermico, il rischio strutturale e la reversibilità dell'intervento.
Il rischio igrotermico fa riferimento alla possibilità che si verifichi un accumulo di umidità sul lato posteriore dei pannelli solari, a causa di fonti sia interne sia esterne, come pioggia, neve o vapore acqueo. Questo fenomeno può compromettere la stabilità di elementi costruttivi particolarmente sensibili all'umidità, come strutture in legno o componenti metallici.
Il rischio strutturale riguarda la capacità portante della struttura di supporto dei pannelli e la resistenza meccanica della copertura. È necessario considerare anche la tenuta dei pannelli e dei sistemi di fissaggio rispetto ai carichi climatici, come vento e neve, nonché la distanza massima tra i punti di appoggio. Nel caso di moduli solari personalizzati, si raccomanda di eseguire prove specifiche prima dell'installazione, per verificare il comportamento strutturale e meccanico del sistema e prevenire deformazioni eccessive.
Infine, la reversibilità dell'intervento indica la possibilità di rimuovere l'impianto senza arrecare danni alla struttura originaria (E. Lucchi 2022). L'integrazione delle tecnologie solari dovrebbe quindi essere progettata per garantire interventi non invasivi, che consentano lo smontaggio, l'aggiornamento o la sostituzione dei dispositivi nel tempo, migliorando anche le possibilità di riuso e riciclo degli elementi a fine vita. Un approccio basato sul ciclo di vita, combinato con la reversibilità, può contribuire sia alla protezione dell'ambiente sia alla salvaguardia del patrimonio (Lucchi, Baiani e Altamura 2023).

## 3.6 Limiti di applicabilità

Nel contesto della riqualificazione energetica del patrimonio edilizio storico, gli interventi principali coinvolgono le seguenti componenti edilizie: coperture (dove si possono installare pannelli solari o fotovoltaici, quindi interporre materiali isolanti all'interno della stratigrafia del tetto), murature perimetrali (oggetto di interventi di coibentazione, che devono però rispettare le finiture originali, come intonaci, pietra o mattoni a vista) e i serramenti, che devono migliorare l'isolamento termico tra interno ed esterno dell'edificio. Infine, l'interno dell'immobile, viene spesso interessato dall'installazione di impianti di riscaldamento e condizionamento, che incidono in modo significativo sul miglioramento delle prestazioni energetiche complessive.

L'obiettivo principale degli uffici del Ministero preposti alla regolamentazione degli interventi su edifici vincolati è trovare un equilibrio tra la conservazione del patrimonio e le esigenze di riqualificazione energetica. Si punta a migliorare le prestazioni energetiche degli edifici storici, senza obbligo di raggiungere livelli minimi prestabiliti, ma basandosi su una conoscenza approfondita della struttura e del contesto. L'approccio deve rispettare le caratteristiche culturali degli edifici e ridurre l'impatto estetico e funzionale degli interventi, privilegiando soluzioni tecniche ed estetiche che siano integrate, reversibili e sostenibili.
Pur nella singolarità della valutazione che ciascun edificio o progetto richiede, l'operato delle Soprintendenze mira a definire una metodologia coerente per individuare i rischi legati agli interventi di riqualificazione energetica sugli edifici storici, precisando le caratteristiche che tali interventi devono avere per essere compatibili con le architetture esistenti (Lucchi e Pracchi 2013).
L'installazione di isolamento termico sugli edifici storici comporta una serie di criticità e rischi che richiedono una valutazione attenta. In particolare, la posa di isolamento è soggetta a restrizioni su beni tutelati, soprattutto quando sono vincolati monumentali o sottoposti a vincolo paesaggistico, specialmente se l'intervento interessa le facciate esterne. In questi casi, è fondamentale preferire il posizionamento dell'isolamento su lati non visibili, come l'interno delle murature, la copertura o l'estradosso dell'ultimo solaio, per ridurre al minimo l'impatto visivo e funzionale.
Inoltre, è essenziale che non vengano alterate le caratteristiche costruttive e tipologiche dell'edificio. In particolare, non è consentito rivestire o coprire i paramenti faccia a vista delle murature, gli intonaci antichi, né le superfici decorate. È altresì vietato modificare gli spessori visibili del pacchetto di copertura, per evitare di compromettere l'aspetto originario e l'integrità strutturale dell'edificio. È altrettanto importante che le proporzioni delle aperture e degli elementi decorativi non vengano alterate. Gli interventi sui prospetti esterni devono riguardare l'intero edificio e nel caso di cortine edilizie continue, le valutazioni devono essere condotte su scala urbana, per garantire coerenza e armonia con l'ambiente circostante.

Anche per quanto riguarda l'adeguamento dei serramenti, gli interventi su edifici con vincolo monumentale sono particolarmente problematici. Un altro fattore di criticità è l'estensione dell'intervento, che dipende dal numero, dalle caratteristiche materiali e formali dei serramenti e dalle componenti coinvolte, come vetri o l'intero serramento. Le sostituzioni previste devono essere ben ponderate, considerando che la sostituzione totale dei serramenti è generalmente vietata o fortemente limitata, mentre è preferibile adeguare gli elementi esistenti piuttosto che sostituirli completamente. In caso di interventi come la realizzazione di doppi serramenti, è necessario valutare attentamente non solo le esigenze di conservazione, ma anche le modifiche che tali interventi comportano sugli assetti spaziali interni dell'edificio.

Per quanto invece riguarda la realizzazione di impianti di riscaldamento e condizionamento negli edifici storici, soprattutto quelli sottoposti a vincolo monumentale, presenta alcune problematiche legate all'invasività degli interventi. Questi impianti sono quasi sempre necessari, in particolare per il riscaldamento. Le principali considerazioni riguardano l'estensione e il percorso dell'impianto, che deve rispettare le strutture architettoniche esistenti e la compatibilità tra il comfort ambientale richiesto e le condizioni necessarie per la salvaguardia dell'edificio e dei beni mobili al suo interno, come superfici decorate e arredi.

Infine, per quanto riguarda l'installazione di pannelli solari e fotovoltaici sugli edifici storici, questa comporta diverse criticità soprattutto per quanto concerne i manufatti vincolati come monumenti. Gli interventi sono influenzati dalla tipologia di pannelli, dalla loro posizione (a terra, su copertura inclinata o piana) e dall'integrazione con la copertura esistente, per minimizzare l'impatto visivo. Si privilegia l'integrazione dei pannelli, evitando il consumo di suolo e il posizionamento su murature perimetrali. I pannelli devono avere un colore e una finitura simili al manto di copertura e un orientamento coerente con l'edificio. L'impianto dovrebbe occupare una sola falda e seguire una disposizione

regolare. L'obiettivo principale è ridurre la percepibilità dell'impianto, in particolare da punti di vista sopraelevati e dalla strada.

## 3.7 Conservazione sostenibile e risparmio energetico: buone pratiche

Il presente capitolo mostra alcuni esempi di come sia possibile coniugare la tutela del patrimonio storico con interventi mirati all'efficienza energetica, valorizzando tecniche e materiali che rispettano l'identità architettonica e riducono l'impatto ambientale. Attraverso esempi concreti e la messa in luce di buone pratiche, si evidenziano strategie innovative e compatibili con la conservazione integrata.

### 3.7.1 Rainhof, Valle di Casies (BZ), Italia

Situato a 1.500 metri sul livello del mare, alla fine della Val Casies, il Rainhof è un edificio rurale del XVI secolo. Vincolato come bene culturale, l'edificio si colloca in posizione prominente, appena discosto dalla strada principale e testimonia un esempio compiuto di architettura vernacolare alpina.
Costruito secondo la tipologia tradizionale del "Paarhof", in cui l'abitazione e gli spazi agricoli sono separati ma complementari, il Rainhof, al piano terra, presenta un involucro in muratura di pietra, mentre i piani superiori si caratterizzano per l'uso della tecnica costruttiva del Blockbau, che prevede il ricorso a tronchi di legno massiccio incastrati tra loro.

#### *Stato di conservazione e criticità*

Al momento dell'intervento, l'edificio si presentava in buone condizioni generali. La muratura e la struttura lignea erano ben conservate, ad eccezione della parete nord-est, danneggiata dalla contaminazione salina proveniente da una fossa settica adiacente. Gli intonaci a calce e alcuni elementi lignei dei balconi mostravano segni di degrado. L'impianto di riscaldamento originario era limitato a due ambienti: la cucina e il soggiorno, entrambi dotate di stufe a legna.

#### *Elementi di valore e criteri di conservazione*

L'intervento ha posto particolare attenzione alla conservazione degli elementi identitari dell'edificio. In particolare, sono stati ritenuti di alto valore storico e culturale: le tre facciate principali, con intonaci a calce originali; la muratura in pietra naturale al piano terra; la struttura lignea in Blockbau dei piani superiori; i dettagli lignei dei balconi, l'ingresso a volta (Labe), le finestre con le profonde strombature e il soggiorno (Stube) con rivestimenti in legno e soffitto storico; il tetto in scandole di legno.

#### *Gli interventi*

Il progetto di restauro si è configurato come una buona pratica di collaborazione tra enti pubblici e soggetti privati, sviluppandosi attraverso un dialogo costante tra il proprietario, l'architetto (Dr. Arch. Stefan Taschler – Archilab) e l'ufficio beni culturali della Provincia Autonoma di Bolzano. Dopo un primo sopralluogo congiunto, sono seguiti incontri progettuali a distanza di alcuni mesi per affinare le scelte architettoniche e conservative, garantendo coerenza con i regolamenti locali e gli standard qualitativi attesi.

#### *Le murature*

Per quanto riguarda gli interventi sull'involucro edilizio, le murature in pietra del piano terra, ad eccezione dei locali *Stube* e *Labe*, sono state oggetto di un intervento di isolamento termico dall'interno mediante applicazione di intonaco isolante a base calce, con spessore variabile tra 4 e 6 cm e conducibilità termica $\lambda = 0{,}068$ W/mK. Tale soluzione ha consentito una riduzione della trasmittanza termica (U) da 2,39 W/m²K a 0,87 W/m²K, mantenendo la continuità materica e visiva dell'intonaco originale grazie alla conformabilità dell'intonaco alla superficie irregolare delle murature storiche.
Le pareti in Blockbau (struttura in legno massiccio con travi orizzontali squadrate) sono state isolate anch'esse dall'interno mediante la posa di pannelli in fibra di legno dello spessore di 12 cm. È stato inserito uno strato frangivento tra la struttura esistente e il pannello isolante, migliorando in modo significativo la tenuta all'aria dell'involucro. L'intero pacchetto è stato completato con una barriera al vapore e un vano tecnico (service gap),

funzionale all'alloggiamento delle reti impiantistiche (canalizzazioni e cablaggi) senza compromettere la struttura esistente. L'intervento ha comportato un miglioramento della trasmittanza termica da 0,76 W/m²K a 0,24 W/m²K. Essendo l'intervento effettuato interamente dall'interno, l'aspetto esteriore della struttura lignea è stato preservato. Internamente, le finiture sono state completate con pannellature lignee analoghe a quelle originali, garantendo la conservazione del carattere storico dell'edificio e un impatto minimo sull'estetica interna degli ambienti.

### *Gli infissi*

Tutti i serramenti originali sono stati sostituiti con nuovi infissi realizzati artigianalmente su misura da un falegname locale. Per garantire la coerenza formale con le aperture originarie, un infisso esistente è stato utilizzato come riferimento per la definizione delle nuove geometrie, mantenendo inalterati rapporti dimensionali, sezioni dei profili e dettagli costruttivi. Al fine di migliorare le prestazioni energetiche dell'involucro trasparente, i nuovi serramenti sono stati dotati di vetrocamera ad alta efficienza termica.
Le vecchie finestre presentavano vetri con una trasmittanza termica molto elevata (U = 5,5 W/m²K), indice di una scarsa capacità isolante, mentre i telai avevano prestazioni migliori (U = 2,0 W/m²K). Con l'intervento di sostituzione, la situazione si è invertita: i nuovi vetri, grazie all'impiego della vetrocamera, hanno una trasmittanza nettamente migliorata (U = 2,0 W/m²K), mentre i telai, realizzati in legno per rispettare l'aspetto storico, risultano meno performanti dal punto di vista energetico (U = 5,5 W/m²K). Nel complesso, l'intervento ha comunque comportato un significativo miglioramento dell'efficienza energetica dei serramenti.

### *La copertura*

L'intervento di isolamento del tetto a falde, precedentemente non coibentato, è stato realizzato dall'interno, consentendo di preservare integralmente l'aspetto esteriore in scandole di legno, elemento storico-architettonico di pregio. Lo spazio vuoto tra le travi principali è stato riempito con materiale isolante (fibra di legno), migliorando significativamente la prestazione termica della copertura senza modificarne l'estetica né le quote esterne. Sotto lo strato isolante è stata inoltre applicata una contro placcatura interna (solitamente in cartongesso o fibra di gesso) che protegge l'isolamento, permette il passaggio degli impianti e migliora la finitura interna.
L'isolamento interno ha migliorato significativamente le prestazioni termiche del sottotetto, rendendolo idoneo ad accogliere due unità abitative per uso turistico. Per garantire un adeguato apporto di luce naturale negli ambienti mansardati, sono stati inserite inoltre due fasce vetrate in copertura. Tali aperture, progettate in accordo con l'ufficio per la tutela dei beni culturali, sono state integrate con attenzione per minimizzare l'impatto visivo sull'estetica della copertura.

### *Il solaio di base*

Per quanto riguarda il solaio contro terra, originariamente privo di isolamento e realizzato direttamente sul terreno, è stato completamente ristrutturato per rispondere agli standard contemporanei di comfort termoigrometrico. La nuova stratigrafia prevede: uno strato drenante in ghiaia dello spessore di 50 cm, un sottofondo in magrone di 12 cm, un massetto impiantistico in calcestruzzo isolante di 7 cm, seguito da un pacchetto isolante composto da due strati (7 + 2 cm). Al di sopra è stato posato un sistema di pavimento flottante con impianto radiante integrato e finitura in lastre di pietra naturale dello spessore di 2,5 cm. Questo pacchetto ha garantito l'incremento dell'efficienza energetica dell'involucro inferiore, contribuendo al miglioramento del comfort abitativo complessivo, senza alterare l'identità architettonica del piano terra. Il valore di trasmittanza del solaio contro terra è passato da 3.21 a 0.28 W/m²K.

### *Gli impianti*

Dal punto di vista impiantistico, il sistema di riscaldamento è alimentato da una caldaia a biogas e una a cippato di legno. La maggior parte degli ambienti è riscaldata tramite un impianto a pavimento radiante. La stufa tradizionale presente nella "Stube" è stata mantenuta ma disaccoppiata dalla combustione diretta di legna, essendo collegata al sistema centralizzato. Nelle stanze con pavimentazione in legno originale restaurata, il riscaldamento a pavimento è stato sostituito da radiatori singoli.
L'impianto di acqua calda sanitaria è integrato nel sistema di riscaldamento e utilizza entrambe le fonti rinnovabili: la caldaia a biomassa funziona con cippato di legno proveniente dal bosco aziendale, stoccato in un silo adiacente, mentre la caldaia a biogas impiega gas generato da un impianto di digestione anaerobica alimentato con letame

dell’allevamento situato tra la stalla e l’edificio residenziale. L’energia termica prodotta soddisfa il fabbisogno energetico del complesso Rainhof, inclusi gli appartamenti per le vacanze e la stalla adiacente.

### 3.7.2 Villa Castelli, Bellano (LC), Italia

Villa Castelli, edificio vincolato del XIX secolo sul Lago di Como, è stato ristrutturato per ridurre del 90% il fabbisogno energetico, mantenendo uso originale e aspetto esterno. Il progetto dimostra che anche un edificio storico può diventare un nZEB (edificio a energia quasi zero).
La villa è stata ampliata più volte: nel 1925 il primo piano fu esteso e il cortile interno chiuso e integrato nell'edificio; la facciata fu ricostruita, modificando le vecchie grandi finestre al piano terra con nuove finestre più strette e sottili, utilizzando elementi architettonici ricorrenti, cornici colorate, balaustre a colonne, decorazioni in facciata realizzate con la tecnica dello "sgraffito", che conferisce alle facciate il loro caratteristico aspetto. Nel 1939 fu aggiunta la veranda e installato il sistema di riscaldamento con radiatori probabilmente alimentati da alcune stufe.
L'edificio presenta murature portanti in pietra locale, laterizio pieno, laterizio forato e calcestruzzo, a seconda del periodo di costruzione. I solai variano da strutture in legno con pavimentazione flottante a strutture in acciaio con riempimenti in laterizio o calcestruzzo. Il tetto è in legno con copertura in coppi "monaco e monaca".

#### *Stato di conservazione e criticità*

Nel complesso, l'edificio si presentava in buone condizioni, anche se, dal punto di vista statico, era stata evidenziata la necessità di interventi di consolidamento, da integrare con le misure di risparmio energetico. Gli intonaci delle facciate erano generalmente in buone condizioni, ma in alcune zone – soprattutto sulle facciate nord-est e nord-ovest – presentavano polverizzazione, distacchi e alterazioni cromatiche. Grondaie inefficaci e fenomeni di risalita capillare hanno causato danni da umidità diffusi in diverse zone dell'edificio.
Dal punto di vista impiantistico, il sistema di riscaldamento a gasolio installato nell'ultimo ampliamento non riusciva a garantire un comfort termico adeguato a causa delle grandi stanze e dell'involucro poco performante. Prima della ristrutturazione, l'edificio era usato raramente in inverno perché la temperatura interna non superava i 17 °C.

#### *Elementi di valore e criteri di conservazione*

Le facciate, risalenti alla ristrutturazione del 1925, erano in buone condizioni prima del retrofit e sono state preservate sia nell'aspetto esterno sia nei materiali originali, come richiesto dalle autorità per il patrimonio. La disposizione interna delle stanze non è stata modificata per rispetto della storia della famiglia proprietaria; sono stati corretti solo alcuni difetti nella distribuzione degli spazi, dovuti ai successivi ampliamenti. Gli elementi decorativi interni, come porte, cornici e camini, sono stati riposizionati per riportare l'edificio all'aspetto originale del dopoguerra, su volontà dei proprietari.
La villa è tutelata da vincoli architettonici e paesaggistici, ma non è stata condotta una valutazione dettagliata del patrimonio prima del progetto di retrofit. La comunicazione con l'ufficio per i beni culturali è avvenuta durante la fase di progettazione, con un processo iterativo di proposte e approvazioni per garantire soluzioni compatibili con il patrimonio.

#### *Gli interventi*

L'intervento è stato concepito per ridurre al minimo i costi operativi, ottimizzare l'usabilità degli spazi preservando, al tempo stesso, il valore storico e architettonico della villa.
Il progetto ha mantenuto le funzioni spaziali originarie e ha armonizzato le diverse fasi cronologiche, risolvendo contestualmente problemi strutturali, come le crepe sulla facciata. Dal punto di vista energetico, gli obiettivi fissati erano ambiziosi: ridurre drasticamente la domanda energetica complessiva, coprire il fabbisogno residuo con fonti rinnovabili prodotte in sito e garantire l'autonomia energetica su base annuale.
L'intervento ha previsto l'uso di materiali naturali, con un investimento focalizzato non solo sull'efficienza energetica ma anche sul restauro degli elementi decorativi interni ed esterni.

#### *Le murature*

L'edificio presenta diversi tipi di murature esterne realizzate con materiali differenti, ciascuna delle quali è stata isolata internamente per garantire la conservazione dell'aspetto originale delle facciate. Le pareti in pietra naturale locale, unite con malta di calce, sono state isolate con uno strato interno di 20 cm di perlite, applicato sopra l'intonaco esistente tramite un sistema a più strati che include un intonaco di livellamento e finiture interne. Questo intervento ha ridotto significativamente la trasmittanza termica, portandola da 1,33 a 0,19 $W/m^2K$.

Nei casi in cui lo spessore di 20 cm non era praticabile, come sulle pareti in calcestruzzo della scala, è stato adottato un isolamento interno con 8 cm di aerogel, un materiale ad alte prestazioni con spessore ridotto, che ha permesso di mantenere inalterate le caratteristiche architettoniche particolarmente sottili, come nel caso della veranda. Anche in questo caso si è ottenuto un drastico miglioramento della prestazione termica, con valori di trasmittanza ridotti da 2,47 a 0,18 W/m²K.
Infine, le murature in laterizio pieno sono state trattate con lo stesso sistema a base di perlite da 20 cm di spessore, ottenendo un abbattimento della trasmittanza da 1,4 a 0,19 W/m²K. In tutti gli interventi l'isolamento è stato posto internamente, rispettando le richieste conservazionistiche di non alterare l'estetica esterna dell'edificio.

### *Gli infissi*

Gli infissi dell'edificio sono stati sostituiti con sistemi ad alta prestazione energetica, caratterizzati da triplo vetro riempito con Argon e telai in legno-alluminio. Dal punto di vista conservativo, le finestre originali non avevano valore storico rilevante, pertanto sono state sostituite con nuove finestre che mantengono intatta la disposizione e il numero di ante, ma non le proporzioni vetro/telaio.
Parallelamente, le porte interne e le cornici decorative originali sono state restaurate e riposizionate per preservare l'aspetto e la qualità artigianale originale degli interni, inclusi elementi come la "window furniture", una raffinata struttura lignea decorativa con elementi oscuranti richiudibili incassati nel controtelaio.
Dal punto di vista della trasmittanza, il valore U del vetro è stato ridotto da 4,6 W/m²K a 0,62 W/m²K, mentre il valore U del telaio è pari a 1,105 W/m²K, garantendo così un significativo miglioramento dell'efficienza energetica delle chiusure trasparenti.

### *La copertura*

La copertura è stata integralmente sostituita con una nuova struttura portante in legno lamellare, integrata con un sistema isolante stratificato di 32 cm composto da 18 cm di fibra di cellulosa insufflata tra le travi, 8 cm di pannelli rigidi in fibra di legno e 6 cm di lana di roccia, quest'ultima inserita come barriera antincendio sotto l'impianto fotovoltaico. La copertura originale in coppi "monaco e monaca" è stata rimossa e sostituita con un manto metallico in alluminio doppio aggraffato, che funge da supporto per un impianto fotovoltaico monocristallino integrato.

### *Il solaio di base*

L'isolamento della soletta contro terra è stato realizzato con 20 cm di XPS posato su uno strato di 15 cm di cls magro. Sopra l'isolante si trova il massetto leggero a rapida asciugatura (Lecacem) spesso 12 cm, sul quale sono installati il sistema di riscaldamento a pavimento con polistirene espanso (ISODOMUS) e la pavimentazione in parquet.

### *La facciata*

Il restauro della facciata ha previsto pulizia, consolidamento con resina acrilica e integrazione con tecniche tradizionali. L'impermeabilizzazione delle murature esterne è stata eseguita tramite iniezione ad alta pressione di microemulsione siliconica, estendendo la barriera all'interno fino al livello del taglio orizzontale. Per il consolidamento strutturale, alcuni solai sono stati sostituiti con solai compositi legno-calcestruzzo per migliorare la distribuzione dei carichi. La progettazione ha incluso analisi igrotermiche (WUFI) per ottimizzare l'efficienza energetica e il comportamento dell'umidità, limitando l'isolamento interno a 20 cm di perlite o 8 cm di aerogel, con particolare attenzione a tenuta all'aria, diffusione del vapore e convezione.

### *Gli impianti*

La pompa di calore geotermica alimenta riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria. Il riscaldamento viene distribuito tramite un sistema a pavimento radiante. È stato installato un sistema di ventilazione meccanica centralizzato per piano, con recupero di calore (87% di efficienza) e controllo automatico degli scambi d'aria tramite sensori CO2, garantendo un ambiente interno salubre, privo di pollini, con controllo dell'umidità, particolarmente importante vista la vicinanza al lago. La pompa di calore fornisce anche un raffrescamento dolce (bassa potenza per evitare condensazione) e alimenta un serbatoio di accumulo acqua calda da 900 litri.

L’energia residua necessaria è stata coperta localmente tramite fonti rinnovabili. È stato installato un impianto fotovoltaico integrato nel tetto in doppia lamiera di alluminio, con moduli mono-cristallini da circa 11 kWp, progettati per essere estetici e poco visibili, rispettando i vincoli paesaggistici e architettonici imposti dalla Soprintendenza. I criteri fondamentali includevano colore, finitura, disposizione geometrica, aderenza al tetto, assenza di riflessi e bassa percezione visiva dal paesaggio circostante. In aggiunta, sono state installate micro-turbine eoliche sul tetto. L’impianto geotermico utilizza una pompa di calore brina-acqua alimentata da tre sonde profonde 80 m ciascuna.

### 3.7.3 Orangerie, Bolzano (BZ), Italia

L'intervento sull'Orangerie dell'Ansitz Kofler, edificio storico del 1749 (che ospitò anche Mozart nel 1769), ha perseguito due obiettivi principali: il recupero del carattere originario dell'Orangerie e la riqualificazione energetica. L'Orangerie, aggiunta poco dopo alla struttura principale, è un corpo di 30 m x 5 m progettato per la coltivazione di frutti tropicali, poi trasformato in abitazione nel 1925 con riduzione delle finestre e inserimento di pareti interne. La struttura portante è in muratura di pietra di fiume, tipica dell'area di Bolzano. L'intervento ha dimostrato che una riduzione del fabbisogno energetico del 90% rispetto alla situazione originaria è possibile anche in edifici vincolati.

#### *Stato di conservazione e criticità*

L'edificio principale dell'Ansitz Kofler, risalente al 1749, presenta una rilevanza storica non solo per la sua architettura, ma anche per il fatto che nel 1769 vi soggiornò Wolfgang Amadeus Mozart. Successivamente, fu edificata l'Orangerie, un volume lungo 30 metri e largo 5 metri, caratterizzato da ambienti ampi e luminosi, progettati originariamente per la coltivazione di frutti tropicali, esigenza resa necessaria dalle condizioni climatiche non favorevoli di Bolzano, nonostante la sua posizione a sud delle Alpi.
Nel 1925, la destinazione d'uso dell'Orangerie venne modificata in residenza. In tale occasione le finestre furono ridotte in dimensione e vennero, inoltre, realizzate partizioni interne, determinando una configurazione in enfilade (successione lineare di stanze comunicanti).
Dal punto di vista costruttivo, l'edificio presenta una struttura portante in muratura di pietra, realizzata con elementi lapidei di pezzatura irregolare, reperiti localmente nei letti dei fiumi, tipica tecnica costruttiva storica diffusa nell'area di Bolzano.

#### *Elementi di valore, criteri di conservazione, obiettivo dell'intervento*

Il concetto di ristrutturazione è stato sviluppato in stretta collaborazione con l'ufficio per la tutela dei beni culturali dell'Alto Adige, che ha sostenuto la volontà del proprietario di ripristinare l'aspetto originario dell'Orangerie, rafforzando anche il legame con il parco interno, elemento tutelato.

#### *Gli interventi*

Hans Glauber, figura di riferimento in Alto Adige per le tematiche legate all'energia solare e alla tutela del clima, ha voluto trasformare il recupero del suo edificio vincolato in un esempio virtuoso. L'obiettivo era duplice: da un lato, recuperare l'identità architettonica originale dell'Orangerie e conservare gli elementi storici più significativi; dall'altro, ridurre in modo drastico i consumi energetici, portando l'edificio a raggiungere lo standard Klimahaus A, con un fabbisogno di riscaldamento massimo di 30 kWh/m² all'anno.
Data la geometria complessa dell'edificio, con una superficie disperdente molto estesa e un'esposizione sfavorevole verso ovest, si è reso necessario un intervento integrato su più fronti. Le pareti in pietra, spesse 60 cm, sono state isolate internamente sul lato est e esternamente sul lato ovest, sfruttando la presenza di un portico che ha permesso di mantenere un equilibrio estetico con il resto del complesso. Le nuove finestre, con telaio in legno, sono ad alte prestazioni, secondo lo standard Passivhaus e hanno contribuito a ridurre le dispersioni termiche, ottimizzando al contempo gli apporti solari.
Anche i solai sono stati oggetto di intervento: quello contro terra è stato isolato e ha permesso di integrare al suo interno gli impianti, mentre il solaio verso la terrazza è stato isolato dall'alto, preservando il tavolato ligneo originale.
Per migliorare ulteriormente l'efficienza e il comfort indoor, è stato installato un impianto di ventilazione meccanica con recupero di calore, abbinato a uno scambiatore geotermico aria-suolo, utile sia in inverno per preriscaldare l'aria, sia in estate per raffrescarla. L'intero fabbisogno energetico è infine coperto da una caldaia a pellet, garantendo un apporto climaticamente neutro.

#### *Le murature*

In accordo con la soprintendenza dei beni culturali dell'Alto Adige, si è potuto intervenire con un isolamento esterno sulla facciata ovest, poiché questa era già visivamente distinta dal resto dell'edificio a causa della presenza di terrazze e balconi. Inoltre, il ripristino delle aperture storiche comportava già un'alterazione significativa della facciata, rendendo accettabile un intervento più incisivo.

L'intervento ha previsto l'applicazione dell'isolamento esterno sulla facciata ovest, dopo aver scavato fino alle fondazioni, utilizzando pannelli di XPS doppi da 12 cm più uno strato di 20 cm di lana minerale, protetti da una membrana impermeabilizzante e con il riempimento del vano di scavo in ghiaia. Sulle altre facciate invece si è optato per un isolamento interno: nella parte bassa è stato usato XPS, mentre da circa mezzo metro in su è stata applicata lana minerale spessa 14 cm, seguita da un pannello OSB e da una barriera al vapore continua con alta resistenza alla diffusione (sd > 100). Un ulteriore strato di 4 cm è stato destinato all'alloggiamento degli impianti, evitando qualsiasi perforazione della barriera al vapore. In camera da letto si è preferito usare pannelli in fibra di legno per l'isolamento.
Per ridurre i ponti termici, dove possibile, si è tagliata la parete interna per inserire l'isolamento in verticale, oppure si è applicato isolamento ai bordi nelle zone in cui non era possibile intervenire strutturalmente, con un attento monitoraggio di temperatura e umidità nei punti più critici.
Grande attenzione è stata riservata alla tenuta all'aria, sigillando con nastri specifici tutte le giunzioni e sottoponendo l'edificio a un test di tenuta all'aria (blower door) nella fase preliminare, per garantire che non vi fossero perdite. I dati raccolti durante il monitoraggio confermano condizioni igrotermiche stabili e sicure.

### *Gli infissi*

Nella facciata ovest, dove è stato applicato l'isolamento esterno, sono state ricostruite le antiche aperture delle finestre. Per posizionare i nuovi infissi in modo ottimale, in linea con lo spessore dell'isolamento, il telaio secondario e principale è stato fissato appena "all'esterno" del muro in pietra originale, appoggiato su una trave orizzontale e ancorato con staffe metalliche. Per evitare ponti termici, le cassonature delle tapparelle sono state installate all'interno dello strato isolante, completamente coperto dai pannelli in lana minerale. Solo dopo la finitura dell'intonaco sono state montate le finestre, seguendo una prassi comune in Italia che considera gli infissi quasi come elementi di arredamento. Per garantire l'ermeticità tra telaio secondario e principale è stato applicato un nastro sigillante lungo tutto il perimetro.
Il progetto, sostenuto dall'ufficio per la conservazione del patrimonio dell'Alto Adige, ha previsto il ritorno all'aspetto architettonico originale dell'Orangerie, con l'ampliamento delle aperture delle finestre ridotte durante la ristrutturazione del 1925, per collegare visivamente meglio l'edificio al parco interno, parte del vincolo di tutela. Il dettaglio delle finestre è stato ispirato agli originali, migliorandone anche le prestazioni termiche: il valore U del vetro è passato da 3,2 a 0,6 W/m²K e quello del telaio da 2,0 a 1,45 W/m²K.
Anche nelle facciate con isolamento interno, le finestre sono state inserite nello spessore dell'isolamento, con i telai secondari posizionati poco all'interno del muro in pietra e le fessure riempite con schiuma poliuretanica e sigillate con nastro. Anche in questo caso, l'ampliamento delle aperture è stato concordato con la soprintendenza per riportare il carattere originario dell'Orangerie, rispettando dettagli simili a quelli originali.

### *La copertura*

Il tetto è stato ristrutturato dall'esterno per preservare la struttura portante in legno, il tavolato interno e l'intonaco. È stata rimossa la vecchia impermeabilizzazione e sono stati inseriti due strati di lana minerale FLUMROC (12+14 cm) tra le travi da 26 cm. Sopra, sono stati posati un pannello OSB e una membrana traspirante e impermeabile (Riwega USB CLASSIC). Una struttura di listelli trasversali crea un'intercapedine ventilata di 80-125 mm per eliminare l'umidità prima del tetto verde, con pendenza 1,5% e strato drenante.
All'interno, è stata aggiunta una barriera al vapore, uno strato di installazione di 4 cm con lana minerale e finitura con pannelli di argilla verniciati. Particolare attenzione è stata dedicata alla tenuta del tetto verde, soprattutto per la conservazione della pergola e del parapetto, con colonne rinforzate da piastre d'acciaio su strisce di gomma protettiva.
Il valore U è passato da 1,27 W/m²K a 0,17 W/m²K.

### *Il solaio di base*

Il pavimento è stato completamente rimosso fino alle fondamenta e ricostruito con un sistema di isolamento termico che impedisce l'umidità ascendente da terreno e muri. La stratigrafia comprende uno strato di ghiaia, una base di calcestruzzo magro con guaina bituminosa saldata ai muri per evitare infiltrazioni, pannelli isolanti rigidi XPS doppi da 200 mm complessivi, una protezione in calcestruzzo, i condotti per impianti, un ulteriore getto di calcestruzzo magro di 16 cm e infine la pavimentazione originale in piastrelle. Il valore di trasmittanza termica (U) è migliorato da 2,42 a 0,17 W/m²K.

*Gli impianti*

L'antico impianto a gas è stato sostituito con una caldaia a pellet che riscalda cinque appartamenti, incluso quello con riscaldamento a pavimento. I pellet sono immagazzinati in un serbatoio interrato in giardino e trasferiti tramite turbina di aspirazione. La stufa maiolicata originale è stata mantenuta, dotata di un camino isolato con aria fresca ermetica.

Un sistema di ventilazione meccanica controllata con recupero di calore (fino all'85%) garantisce il ricambio d'aria, con portata massima di 300 $m^3/h$ e bypass estivo automatico per evitare surriscaldamenti. L'unità di ventilazione è posizionata in un locale tecnico sopra la cucina; le canalizzazioni sono integrate nel solaio ristrutturato, evitando umidità e condensazioni.

L'acqua calda sanitaria è fornita dalla caldaia a pellet con un serbatoio di accumulo da 800 litri e pompa di circolazione per disponibilità immediata. Il serbatoio è predisposto per l'integrazione futura di un impianto solare, anche se per vincoli conservativi non sono stati installati pannelli solari.

Il progetto recupera circa un terzo delle perdite termiche grazie ai guadagni solari passivi dalla ristrutturazione della facciata ovest. L'aria di ventilazione viene pre-riscaldata o pre-raffreddata tramite uno scambiatore terreno-aria con tubi in polipropilene posati a 1,5-2 m di profondità con sistema anti-microbico e filtro antipolvere, utile anche per gli allergici.

L'intervento non ha impatti visivi o materiali significativi grazie al serbatoio interrato e all'installazione nel locale caldaia originale.

# 4. LA GESTIONE DEL PATRIMONIO IMMOBILIARE PUBBLICO. I BENI DEL DEMANIO MILITARE

## 4.1 L'evoluzione dell'architettura militare: dalle fortificazioni alle caserme

Nel corso dei secoli, l'architettura militare ha rappresentato una delle forme più significative di risposta tecnica e simbolica alle esigenze di difesa, controllo del territorio e affermazione del potere.
A partire dal XIII secolo e con particolare intensità tra il XV e il XVI, si assiste a un profondo processo di trasformazione delle strutture fortificate, dovuto principalmente all'introduzione delle armi da fuoco e all'affermarsi di nuovi modelli teorici e costruttivi. L'evoluzione delle tecniche belliche, unita a una maggiore consapevolezza progettuale, conduce progressivamente all'abbandono dei sistemi difensivi di matrice medievale a favore di assetti più articolati e funzionali, che prefigurano l'idea di una fortificazione moderna (Martorano 2006).
Il passaggio dai castelli medievali a strutture più complesse fu caratterizzato da un ripensamento profondo della geometria difensiva e dell'organizzazione interna delle fortezze. La diffusione dell'artiglieria obbligò a rafforzare i muri con spessori maggiori e a ridurre le superfici esposte, introducendo bastioni poligonali e profili angolati per deviare i colpi. Le cortine si abbassarono e si ampliarono, mentre le torri cilindriche, più resistenti agli impatti, sostituirono progressivamente le torri quadrate tradizionali. Contestualmente, la pianificazione delle fortificazioni seguì una logica integrata, in cui le opere esterne come rivellini, fossati e controscarpe si combinavano con i baluardi per garantire una difesa a strati, sfruttando al massimo la capacità di fuoco e la mobilità degli occupanti.
A partire dagli anni Settanta del Quattrocento, gli studi teorici sulla difesa militare si intensificarono, trovando una delle espressioni più mature nell'opera di Francesco di Giorgio Martini. Nei suoi trattati, egli elaborò una concezione organica e coerente della fortificazione, fondata su impianti poligonali complessi e sull'uso innovativo di profili sfuggenti, perlopiù generati dall'intersezione di forme triangolari e circolari, finalizzati a ottimizzare il tiro di fiancheggiamento dell'artiglieria (Villa 2004). L'ideazione di queste nuove strutture difensive e delle macchine collegate al primo impiego sistematico delle armi da fuoco trova espressione anche in un nucleo di disegni inediti, in cui si manifesta il tentativo di integrare le nuove esigenze belliche all'interno di una visione unitaria dell'architettura e della città. Questo settore della produzione martiniana, a lungo trascurato dalla storiografia architettonica e relegato a studi specialistici sul conflitto e sull'evoluzione dell'offesa e della difesa, assume oggi un ruolo cruciale nella comprensione della transizione verso la fortificazione moderna (Fiore 1978).
I principi teorici elaborati da Francesco di Giorgio trovarono concreta applicazione in numerose opere, come le fortezze di Cagli, Mondavio, San Leo e Fossombrone (Clini, Quattrini e Nespeca 2015) e si diffusero anche attraverso il lavoro di altri ingegneri militari, tra cui Antonio Marchisano, attivo nel Sud Italia e coinvolto in interventi rilevanti come il Castel Nuovo di Napoli. A facilitare la diffusione di tali innovazioni fu un intenso scambio culturale e professionale tra esponenti di primo piano della scuola fiorentina, quali Francesco di Giovanni (detto Francione), Giuliano da Sangallo e Baccio Pontelli, che contribuirono alla realizzazione di importanti strutture fortificate, tra cui le fortezze di Sarzana, Sarzanello, Senigallia e Ostia (Viglino Davico e Lusso 2013).
Con il passaggio all'età moderna, fino al XVIII e XIX secolo, si assistette a una graduale evoluzione delle fortificazioni che, pur conservando i principi rinascimentali, si adattarono a nuove esigenze strategiche e tecniche. L'introduzione di artiglierie più potenti e di nuove tattiche belliche impose una distribuzione più articolata dei presidi difensivi, spesso organizzati in campi trincerati o complessi di forti distaccati. Questi apparati, caratterizzati da opere autonome ma collegate tra loro, erano progettati per proteggere città, vie di comunicazione e confini con un sistema difensivo poligonale aperto, capace di una copertura reciproca dei fuochi (Viglino Davico e Lusso 2013).
Parallelamente all'evoluzione delle strutture murarie e delle opere esterne, si sviluppò un interesse crescente verso gli spazi interni alle fortezze, destinati alla vita e all'organizzazione degli uomini che vi prestavano servizio. Le esigenze logistiche e abitative spinsero alla realizzazione di edifici dedicati a funzioni specifiche: magazzini, caserme, ospedali militari, depositi di munizioni e uffici di comando. Le caserme, in particolare, divennero un elemento centrale nelle architetture militari, poiché dovevano garantire ordine, igiene, disciplina e una sistemazione adeguata a contingenti sempre più numerosi, dovuti anche all'introduzione della leva obbligatoria in molti stati europei.
Nel corso del XIX secolo, con l'emergere di stati nazionali e il consolidamento degli eserciti permanenti, la costruzione di infrastrutture militari divenne una priorità strategica e logistica. Le caserme assunsero un ruolo centrale in questa trasformazione, diventando veri e propri poli urbani e architettonici, spesso inseriti nei nuovi piani regolatori delle città. In molti casi si ricorse all'occupazione temporanea di edifici esistenti, come conventi e monasteri, riadattati all'uso militare, ma ciò si rivelò presto insufficiente. Di conseguenza, si avviò un'intensa stagione di costruzione di caserme ex novo, basate su criteri funzionali derivati da studi e modelli internazionali, in

particolare francesi, tedeschi e britannici. Questi modelli imponevano soluzioni che garantissero stabilità strutturale, efficienza economica e tempi rapidi di realizzazione, ma anche risposte adeguate a esigenze igienico-sanitarie e organizzative. Le caserme venivano così concepite con impianti planimetrici razionali, cortili interni, spazi comuni ben distribuiti e ambienti destinati a ogni funzione, contribuendo alla definizione di una nuova architettura militare moderna, integrata e funzionale, espressione della crescente professionalizzazione e burocratizzazione degli eserciti europei dell'età contemporanea (Paolini, Le caserme unitarie: progetto e costruzione 2007).

## 4.2 L'evoluzione delle tecniche costruttive

Durante il periodo post-unitario, accanto alla standardizzazione delle tipologie edilizie dei singoli edifici e degli insediamenti, si sviluppò un analogo processo di uniformazione anche sul piano delle tecniche costruttive, adottando criteri comuni nella scelta delle soluzioni strutturali più adatte in relazione a luci, carichi e condizioni locali. Tuttavia, questo processo fu complicato dal contesto tecnico-scientifico in evoluzione tra fine Ottocento e inizio Novecento, segnato dalla sostituzione di materiali e tecniche tradizionali con ghisa, acciaio e calcestruzzo armato e dal passaggio da un approccio empirico a uno scientifico nel dimensionamento delle strutture (Zamperini, 2014).
Inoltre, alla frammentazione politica preunitaria corrispondeva una frammentazione altrettanto marcata nei percorsi formativi in ingegneria, con sistemi diversi tra i vari Stati[55]. Per colmare il divario tra la formazione accademica tradizionale e le nuove esigenze dell'industria, si attuò una riforma degli studi di ingegneria con l'istituzione delle Scuole di applicazione per ingegneri, enti autonomi rispetto alle università, dotati di laboratori sperimentali e strettamente connessi al settore produttivo (F. Zamperini 2014). Parallelamente, partire dal 1816 furono istituite a Torino una serie di scuole militari specializzate, tra cui la Reale Accademia Militare e la Scuola di Applicazione per gli Ufficiali del Genio, per approfondire le competenze tecniche degli ufficiali. Nel tempo, queste istituzioni subirono diverse riorganizzazioni e cambi di nome, fino a essere unificate nel 1838 nella Scuola Complementare di Sperimento, poi rinominata Scuola di Applicazione per le Armi Dotte (1840) e infine Scuola Complementare di Artiglieria e Genio (1851). All'interno di questi istituti, insegnanti d'eccellenza hanno dato il loro contributo alla crescita e al prestigio di queste scuole, i cui impatti scientifici e tecnici furono estremamente rilevanti (Turri, Zamperini e Cappelletti 2009).
Proprio grazie a questa formazione di alto livello, mentre l'empirismo continuava a dominare gran parte del settore edilizio civile, gli ingegneri militari italiani si distinsero come un settore d'eccellenza, aggiornandosi costantemente sulle innovazioni estere e diffondendo nuove conoscenze tecniche attraverso la traduzione di studi teorici e sperimentali. Fin dagli anni '60 dell'Ottocento, furono tra i pionieri nell'applicazione di metodi scientifici per il calcolo strutturale e nella sperimentazione dei materiali da costruzione (F. Zamperini, At the origins of modern construction: early applications of reinforced concrete in floors designed by Italian corps of engineers 2013). Decisivi per la diffusione di queste nuove tecniche furono i numerosi articoli, che negli ultimi decenni dell'Ottocento, gli ufficiali del Genio Militare pubblicarono sulle principali riviste tecniche italiane. Tra questi, si ricordano l'articolo del 1887 sulla Rivista di Artiglieria e Genio sul brevetto Monier, quello del 1899 di Felice Pasetti sulle prime applicazioni europee del cemento armato e nel 1893 il volume *Cementi italiani* di Agostino Arlorio, prima opera italiana importante sul cemento armato, che descriveva opere realizzate e risultati di prove sperimentali sui materiali (F. Zamperini 2014). In quegli anni, la tradizione costruttiva italiana restava saldamente ancorata alla tecnica muraria, che nel corso dell'Ottocento era stata oggetto di una progressiva sistematizzazione attraverso l'elaborazione di regole e principi codificati. L'impiego del cemento, invece, risultava ancora marginale, a causa dell'elevato costo, della scarsa durabilità dei materiali importati e della limitata conoscenza del prodotto da parte di tecnici e maestranze. Fu solo verso la fine del secolo che si assistette a una rapida diffusione dei sistemi costruttivi in cemento armato, destinati a rivoluzionare il panorama edilizio italiano affiancandosi progressivamente alla tradizione muraria (Paolini 2017).

Gli studi e le sperimentazioni condotte dal Genio Militare in quest'ambito portarono al progressivo abbandono dei tradizionali modi di costruire e all'individuazione di soluzioni tecniche sempre più innovative, capaci di rispondere alle nuove esigenze funzionali, strutturali ed economiche dell'architettura militare. Durante il periodo analizzato, le costruzioni militari furono protagoniste di un processo di trasformazione graduale ma profondo, che condusse alla progressiva sostituzione delle tecniche e dei materiali tradizionali – come pareti portanti in muratura, solai a volta o in legno, coperture lignee – con soluzioni costruttive più moderne, tra cui colonne in ghisa, travi in acciaio e, successivamente, il cemento armato. Quest'ultimo, inizialmente impiegato solo per solai e coperture, venne progressivamente adottato anche per le strutture portanti in elevazione. Gli ufficiali del Genio Militare ne colsero fin da subito il potenziale, evidenziandone i numerosi vantaggi: incombustibilità, convenienza economica, maggiore rigidità sismica, protezione del ferro dall'ossidazione e superiore resistenza all'azione del tempo e degli agenti atmosferici (Zamperini, Turri e Cappelletti 2009).

[55] *Ad esempio, nel Regno di Sardegna l'Università di Torino offriva una laurea in matematica con specializzazione in ingegneria idraulica e architettura civile, mentre nel Regno Lombardo-Veneto l'Università di Pavia prevedeva un biennio comune in matematica seguito da un triennio di specializzazione (Zamperini, 2014).*

Il passaggio fu comunque graduale: tra il 1860 e il 1890, l'uso dei nuovi materiali era limitato a singoli elementi, integrati con tecniche tradizionali. Si trovano quindi architetture ibride, in cui colonne in ghisa sorreggono archi in muratura, oppure travi metalliche affiancano volte in mattoni e strutture lignee si combinano con elementi in acciaio. Nel periodo tra fine Ottocento e primi decenni del Novecento, le tecniche costruttive militari subirono un'evoluzione più significativa. Negli orizzontamenti, il legno fu progressivamente sostituito prima dall'acciaio e poi dal cemento armato, grazie alla maggiore resistenza e durabilità dei nuovi materiali, oltre alla migliore capacità di sopportare carichi e luci più ampie. Le volte in muratura, pur più economiche, vennero gradualmente abbandonate a causa delle spinte orizzontali che richiedevano murature più spesse, tempi di costruzione più lunghi e problemi legati all'asciugatura delle malte. Negli anni Venti del Novecento, la struttura intelaiata in cemento armato iniziò a diffondersi anche negli edifici militari più comuni, offrendo maggiore flessibilità distributiva e riducendo l'ingombro planimetrico (F. Zamperini 2014).

### 4.2.1 Fondazioni

Nel periodo compreso tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento, per quanto il progetto delle fondazioni fosse considerato cruciale per la stabilità degli edifici, il loro dimensionamento si basava su consuetudini locali e sulla cosiddetta "regola d'arte"; si procedeva, cioè, senza l'ausilio di calcoli scientifici e si raccomandava di raccogliere informazioni tramite maestranze, osservazioni dirette e confronti con edifici simili già costruiti, per adattare le tecniche al contesto specifico (F. Zamperini 2014).
Nel periodo sopra menzionato, le fondazioni superficiali erano le più diffuse e consistevano nell'ampliare l'area d'appoggio dei muri, al di sotto del piano di campagna, per ridurre la pressione sul suolo (Turri, Zamperini e Cappelletti 2009). Questo tipo di fondazioni erano solitamente realizzate in muratura di pietrame o in getto di calcestruzzo (F. Zamperini 2014).
Solo in un secondo momento si registrò un graduale passaggio dai criteri empirici alle verifiche di resistenza e all'applicazione di metodi di calcolo più rigorosi, basati sul rapporto tra il carico agente e la capacità portante del terreno (F. Zamperini 2014). È a partire dagli anni 1900, poi, che il calcestruzzo armato ha iniziato ad essere utilizzato per la realizzazione di elementi di fondazione-(Turri, Zamperini e Cappelletti 2009).

La scelta tra i diversi sistemi di fondazione allora in uso dipendeva principalmente dalla natura del terreno di sedime. Prima di avviare qualsiasi studio progettuale – e ancor più prima di procedere con l'esecuzione dell'opera – era considerata una buona prassi la realizzazione di pozzi esplorativi profondi, allo scopo di ottenere informazioni dettagliate sulla stratigrafia e sulle caratteristiche meccaniche del suolo. Tali indagini permettevano di classificare il terreno secondo categorie di riferimento ben note all'epoca, ciascuna delle quali richiedeva accorgimenti specifici: il terreno solido, in quanto caratterizzato dalla presenza, anche a modesta profondità, di strati compatti e resistenti come roccia e ghiaia, era considerato il più adatto in quanto offriva le migliori condizioni di stabilità; il terreno ordinario era ritenuto idoneo quando in grado di sopportare pressioni moderate (2–3 kg/cm²); il terreno di riporto, invece, era generalmente sconsigliato come base diretta per le fondazioni, poiché composto da materiali eterogenei che gli conferivano una scarsa coesione (salvo nei casi in cui risultasse ben consolidato nel tempo); i terreni poco resistenti comprendevano tutte quelle tipologie che, per effetto della saturazione d'acqua o per la composizione incoerente (sabbia mescolata ad argilla, materiali friabili), presentavano una bassa capacità portante. In questi ultimi casi, si richiedevano soluzioni più attente, poiché la loro portanza poteva variare con la profondità o mantenersi scarsa (Marrullier 1918).

#### *Fondazioni ordinarie*

Le fondazioni ordinarie si applicano agli edifici realizzati con muri pieni in mattoni o pietrame, costruiti su terreni solidi. In questi casi, si procede con lo scavo di trincee atte a raggiungere uno strato portante – generalmente roccioso, ghiaioso o argilloso – su cui poggiare direttamente la fondazione.
Lo spessore della fondazione viene mantenuto leggermente superiore a quello dei muri in elevazione. Su terreni ordinari, si adottano fondazioni continue, con trincee profonde tra 0,70 e 1 metro e larghe poco più dello spessore della muratura. Quest'ultima viene dimensionata in modo che la pressione esercitata sul suolo non superi i 2–3 kg/cm², valore ritenuto adeguato a garantire la stabilità dell'opera (Marrullier 1918).

#### *Fondazioni su pilastri e archi o architravi*

Quando si trovava un terreno solido a una profondità non superiore a 8-9 metri, mentre in superficie c'era un terreno di qualità inferiore, si usavano fondazioni su pilastri ed archi o a pilastri e architravi. Questa tecnica prevedeva lo scavo di pozzi fino a raggiungere il terreno resistente. All'interno dei pozzi venivano realizzati i pilastri di fondazione, solitamente a sezione circolare. Questi erano costituiti da un rivestimento in mattoni, detto camicia, che definiva la forma del pilastro e da un riempimento in calcestruzzo e grosse pietre affogate nella miscela. L'insieme del rivestimento e del riempimento costituiva un elemento monolitico, capace di garantire solidità e continuità strutturale fino al terreno resistente. Su di essi si impostavano archi estradossati in piano o, in seguito, travi in calcestruzzo armato, che costituivano la base per i muri dell'edificio (Marrullier 1918).
L'uso di sostegni puntiformi consentiva di raggiungere uno strato di terreno di fondazione adeguato, riducendo il volume di muratura necessario e rendendo economicamente vantaggioso questo tipo di fondazione. In presenza di

terreni resistenti a profondità superiori a 8-10 metri, si utilizzavano anche pali infissi sul fondo del pozzo destinato ad accogliere il pilastro, al fine di limitare la profondità dello scavo (F. Zamperini 2014).

### *Fondazioni a platea*

Le fondazioni a platea erano impiegate nei casi in cui il terreno presentava una resistenza modesta, generalmente compresa tra 1 e 1,5 kg/cm² (Turri, Zamperini e Cappelletti 2009). Il principio alla base di questa tecnica consisteva nell'aumentare la superficie di appoggio dell'edificio, così da ridurre la pressione esercitata sul suolo e adattarla alla capacità portante del terreno. In questo modo si garantiva una distribuzione più uniforme dei carichi (Marrullier 1918). Come riportato all'interno delle Riviste di Artiglieria e Genio del 1899, vol. 4, queste opere consistevano in uno strato di cemento di spessore variabile, ma sempre piuttosto piccolo, che inglobava in sé un'ossatura metallica collocata generalmente verso la parte inferiore (Ignoto 1899). La specie di quest'ossatura caratterizzava i diversi sistemi. I più comunemente utilizzati erano i seguenti:

- **Sistema Monier**: Nel sistema Monier, l'ossatura è formata da due serie di spranghe parallele, a sezione cilindrica o prismatica, che si sovrappongono in maniera ortogonale. Le spranghe inferiori, dette "di resistenza" sono destinate a sopportare i carichi principali gravanti sulla platea. Sono distanziate tra loro di circa 5-10cm. Le spranghe superiori, dette "di ripartizione", hanno diametro inferiore (circa 3-6mm) e sono disposte con la stessa distanza delle inferiori. Nei punti di incrocio, le spranghe superiori e inferiori sono collegate tra loro mediante legature di filo di ferro del diametro di circa 1 mm. Quando il sistema deve sopportare carichi particolarmente elevati, l'ossatura viene rinforzata con più strati di spranghe disposte secondo lo stesso schema, che possono essere tra loro collegati per aumentare la resistenza complessiva.
- **Sistema Bordenave**: Il sistema Bordenave si distingueva dal sistema Monier principalmente per la forma delle spranghe utilizzate. Queste non erano più a sezione rotonda o prismatica, ma presentavano profili sagomati, generalmente a *L*, *U* o, più comunemente, a *I*. In questo caso, i ferri avevano spessori molto ridotti, compresi tra 1 mm e 0,5 mm. Poiché risultava complessa la produzione di elementi in ferro con spessori così sottili, si preferiva l'impiego dell'acciaio, materiale più resistente e adatto a tali lavorazioni.
- **Sistema Cottancin**: Nel sistema Cottancin, l'ossatura è costituita da una sorta di tessuto metallico, realizzato intrecciando un filo di ferro secondo uno schema che poteva assumere varie conformazioni. In ogni caso però la rete creata presentava, lungo tutto il perimetro, una serie di occhielli che servivano sia per il fissaggio laterale (inserendovi aste metalliche), sia per collegare tra loro porzioni contigue del tessuto. Il filo di ferro utilizzato per creare le maglie aveva uno spessore costante di 4,5 mm, mentre l'ampiezza delle maglie poteva variare in funzione della resistenza richiesta: maglie più fitte garantivano maggiore robustezza. Qualora, per ottenere la necessaria resistenza, fosse necessario un intreccio troppo serrato da ostacolare il passaggio della malta cementizia, si adottava una maglia più larga, che veniva rinforzata mediante l'inserimento di spranghe di adeguata sezione.

L'ossatura metallica veniva successivamente rivestita con un conglomerato cementizio, la cui composizione non era fissa, ma variava a seconda del carico che la platea di fondazione era chiamata a sopportare. Quando il carico previsto era modesto e non si rendeva necessario realizzare fondazioni particolarmente spesse, si utilizzavano impasti più semplici e leggeri. In questi casi, si poteva optare per una miscela composta da una parte di cemento e una parte di sabbia, oppure, da una parte di cemento, una di sabbia e quattro di ghiaia o pietrisco. Diversamente, quando le sollecitazioni erano maggiori e le fondazioni dovevano garantire una resistenza superiore, la miscela veniva adeguata di conseguenza. Si preferiva allora un impasto più ricco di inerti fini, ad esempio con una parte di cemento e tre di sabbia, capace di offrire maggiore compattezza e resistenza alla compressione (Ignoto 1899).

### *Fondazioni su pali*

Le fondazioni su pali venivano adottate quando era necessario raggiungere strati di terreno resistente situati a profondità elevate, generalmente superiori ai 10 metri.
La tecnica consisteva nell'infissione nel terreno, mediante battipalo, di pali in legno o in calcestruzzo armato prefabbricato, fino al raggiungimento di un punto di rifiuto, ovvero uno strato in grado di offrire un adeguato supporto. Una volta infissi, i pali venivano tagliati in modo da portare le teste a un medesimo livello, sopra il quale

si realizzava un collegamento strutturale tramite un getto di calcestruzzo semplice o di cemento, così da ripartire i carichi in modo uniforme (Marrullier 1918).
Nel caso di pali in legno, era inoltre necessario interporre un telaio di legno tra le teste dei pali e la struttura soprastante, per ridistribuire i carichi in modo da evitare concentrazioni eccessive, incompatibili con la resistenza del calcestruzzo o della muratura sovrastante.
I pali in legno erano generalmente dotati di una legatura o ghiera metallica all'estremità superiore per proteggerli durante la battitura, mentre quelli in calcestruzzo armato presentavano una puntazza metallica all'estremità inferiore e un cappuccio di protezione alla testa. Quest'ultimo era separato dal palo mediante uno strato di sabbia o segatura, per attutire i colpi e prevenire danneggiamenti durante l'infissione (F. Zamperini 2014).

### 4.2.2 Strutture di elevazione orizzontali

Fino agli inizi degli anni Ottanta dell'Ottocento, le caserme utilizzavano principalmente volte murarie per gli orizzontamenti intermedi e solai in legno per i sottotetti, preferendo le volte ai solai lignei al fine di ridurre il rischio di incendi, vibrazioni e trasmissione del rumore (Zamperini, 2014). A partire dagli anni Ottanta dell'Ottocento, si diffuse l'uso dei solai in acciaio mentre, dal 1890 primi anni del 1900, prese piede l'uso del calcestruzzo armato. Questo portò alla quasi completa scomparsa dei solai in legno e delle volte, anche se sia le travature in acciaio che quelle in calcestruzzo armato erano di solito associate a travetti in legno (F. Zamperini 2014).

#### *Volte murarie*

Nei progetti e nelle realizzazioni delle caserme, la scelta del tipo di volta dipendeva da vari fattori, come la forma dell'area da coprire, la sua posizione all'interno della fabbrica, la forma dei sostegni e l'aspetto finale desiderato. Durante l'Ottocento e i primi anni del Novecento, le volte erano ampiamente utilizzate nei piani terra e interrati, mentre nei piani intermedi potevano essere sostituite da solai con putrelle di acciaio e voltine laterizie. Nei piani sottotetto, gli orizzontamenti non spingenti erano la soluzione più comune, con alcune eccezioni che includevano caserme con volte murarie leggere (F. Zamperini 2014).

#### *Solai di legno*

I solai di legno erano considerati poco adatti; erano sconsigliati per via della loro scarsa sicurezza in caso di incendio, per gli elevati carichi previsti che avrebbero richiesto l'uso di travi eccessivamente grandi e per la possibilità che, attraverso di essi, potesse passare l'aria viziata proveniente dal piano inferiore, soprattutto nelle caserme con scuderie al piano terreno (F. Zamperini 2014).
Marrullier (1918) distingueva i solai in legno in tre categorie principali: leggeri, a panconi e pesanti.

- I solai leggeri erano destinati a coprire luci contenute (da 3 a 4,5 metri) e a sopportare carichi modesti, come quelli delle stanze ad uso abitativo comune. La struttura era composta da travicelli, disposti a distanza regolare e appoggiati direttamente sui muri portanti. Sopra di essi veniva posato un assito di tavole di spessore adeguato, seguito da uno strato di pianelle (piccole lastre in cotto) posate su letto di malta, a formare il pavimento. Inferiormente, il soffitto era realizzato mediante stuoie intonacate, per garantire una finitura semplice ma decorosa.
- I solai a panconi erano strutturalmente simili a quelli leggeri, ma al posto dei travicelli venivano utilizzati panconi, ovvero tavoloni disposti di costa (cioè con il lato lungo verticale). Questa soluzione permetteva un modesto risparmio di legname, poiché con sezioni più ampie si ottenevano prestazioni simili, riducendo il numero complessivo degli elementi portanti. Anche in questo caso, sopra i panconi veniva posato l'assito e completata la stratigrafia del solaio come nei solai leggeri.
- I solai pesanti presentavano una struttura simile a quella dei solai leggeri, ma si distinguevano per la presenza di travi maestre, disposte a interasse regolare di circa 3-4 metri, sulle quali si appoggiavano i travicelli secondari. Questa configurazione garantiva una maggiore capacità portante, rendendo il solaio adatto a sostenere carichi più elevati o a coprire luci maggiori.

#### *Solai a struttura metallica*

A partire dagli ultimi trent'anni dell'Ottocento, si assistette a un graduale abbandono dei tradizionali solai lignei e delle volte, a favore di soluzioni più moderne con struttura in acciaio. Questo cambiamento fu accompagnato da un intenso dibattito tecnico, alimentato anche da numerosi articoli pubblicati sulle riviste militari tra il 1885 e il 1905. In questi scritti si presentavano esperimenti e confronti tra diverse tecniche costruttive, con l'obiettivo di individuare i sistemi più efficaci dal punto di vista della sicurezza statica, della resistenza al fuoco, dell'economia e della leggerezza. Si confrontavano in particolare solai con putrelle e voltine con quelli in cemento armato, valutandone pregi e prestazioni (F. Zamperini 2014).
Marrullier (1918) distingueva i solai in ferro in tre categorie principali: leggeri, con mattoni vuoti, con mattoni pieni, pesanti o con travi maestre.

- I solai leggeri potevano essere realizzati impiegando strutture miste, combinando il legno con il ferro, oppure il ferro con i mattoni. Nei solai misti legno-ferro, si disponevano profilati in ferro a "T" a un interasse di circa 1,20 metri, sopra i quali veniva posato un impalcato ligneo. Nei solai leggeri in ferro e mattoni, invece, la struttura portante era costituita da voltine in mattoni con luce variabile tra 70 e 90 cm, disposte “di piatto” o “di costa” tra i profilati metallici. Lo spazio tra le voltine e il piano di calpestio veniva colmato con malta o calce idraulica per livellare la superficie e garantire la presenza di un intradosso piano. L’eventuale soffitto era sospeso tramite listelli fissati all’ala inferiore dei profilati metallici, sui quali si inchiodava l’incannucciato o si fissavano delle stuoie, poi intonacate.
- I solai realizzati con mattoni vuoti erano progettati in modo tale che l’orditura dei mattoni permettesse il riempimento degli spazi soprastanti con calcinacci e materiali leggeri, contribuendo alla formazione del pacchetto di solaio senza appesantirlo eccessivamente. La finitura inferiore, ovvero il soffitto, veniva ottenuta mediante una semplice rasatura: si stendeva un sottile strato di malta direttamente sulla faccia inferiore dei mattoni, precedentemente rinzaffata, per ottenere una superficie regolare pronta per l’intonaco o la tinteggiatura.
- I solai realizzati con mattoni pieni erano progettati utilizzando ferri a T collegati da voltine costruite con gli stessi mattoni pieni. Questa combinazione conferiva ai solai una struttura molto solida e duratura, particolarmente adatta alle esigenze degli edifici militari. Per questo motivo, venivano impiegati con frequenza soprattutto nei dormitori delle caserme, dove erano richiesti elevati livelli di resistenza e durabilità.
- I solai pesanti, o solai con travi maestre, venivano impiegati per coprire grandi luci. Le travi maestre erano costituite da profilati in ferro a doppio T di notevole altezza (tra 40 e 50 cm) oppure da travi composte da lamiere e ferri d’angolo, disposte con un interasse variabile tra 3,5 e 4,5 metri. I ferri secondari venivano posizionati sopra le travi principali, oppure con l’ala superiore allineata a quella delle travi maestre e collegati a queste ultime mediante piastre d’angolo. Per il livellamento del piano di calpestio, lo spazio tra i profilati veniva riempito con calcinacci e materiali leggeri. Il soffitto veniva realizzato tramite una struttura di listelli sospesi, fissati a travi a T principali e secondari mediante apposite sospensioni in ferro.

### *Solai in calcestruzzo armato*

Nel periodo compreso tra il 1890 e il 1910, il calcestruzzo armato iniziò a diffondersi nell’edilizia, suscitando crescente interesse anche in ambito militare. Le riviste tecniche dell’epoca pubblicarono numerosi articoli che illustravano le potenzialità di questa nuova tecnica costruttiva, in particolare per la realizzazione delle strutture orizzontali. Tuttavia, fu solo all’inizio del Novecento che il calcestruzzo armato venne effettivamente utilizzato nella costruzione di edifici militari (F. Zamperini 2014).

In quegli anni, i solai in calcestruzzo armato si diffusero in diverse varianti, a seconda delle esigenze strutturali e costruttive. Tra le tipologie principali si distinguono (Marrullier 1918):

- **Solai a solette piene:** Si tratta di solai in conglomerato cementizio, con armatura costituita da ferri tondi inferiori e superiori distanziati di 10-15 cm. I ferri superiori sono presenti solo alle estremità e si estendono per 1/5 dello spessore del solaio. Sono adatti per luci ridotte (3-4 m), come corridoi o piccoli ambienti e si incastrano nei muri per una lunghezza pari a 2-3 volte il proprio spessore.
- **Solai con solette e nervature:** Sono costituiti da una soletta simile a quella dei solai pieni, rinforzata da nervature in conglomerato magro armato con ferri d’acciaio. Le nervature sono disposte nel senso della distanza minima tra i muri portanti, sui quali si appoggiano. Questo tipo di solaio è adatto per coprire luci medie o grandi, con campate che variano generalmente da 4 a 10 metri.
  Quando il solaio deve essere sostenuto da pilastri o quando è necessario coprire superfici più ampie, si utilizza una soluzione a nervature principali e secondarie, disposte ortogonalmente tra loro, per garantire una distribuzione più efficace dei carichi.
- Solai con travetti prefabbricati, molto apprezzati per la rapidità di posa e la facilità di esecuzione, anche da parte di manodopera non specializzata. Inoltre, questi sistemi riducevano i costi grazie all’eliminazione delle complesse casseforme necessarie per i solai gettati in opera.

- Solai con nervature e blocchi laterizi, introdotti in Italia dopo la Prima guerra mondiale. Questo sistema costruttivo consente una realizzazione rapida e riduce l'uso di casseforme in legno, necessarie nei solai completamente gettati in opera. La loro diffusione fu legata a diversi brevetti che ne regolavano la forma e la disposizione.

A partire dagli anni Ottanta dell'Ottocento, la *Rivista di Artiglieria e Genio* fu una delle riviste tecniche italiane che diede maggiore spazio agli articoli sulle tecniche costruttive brevettate in calcestruzzo armato: pubblicò articoli sul sistema Monier (1887 e 1890), sui solai Hennebique (1893) e, nel 1899, uno studio comparativo a cura dell'ufficiale Felice Pasetti sui principali sistemi brevettati (F. Zamperini 2013). Nelle costruzioni militari realizzate in tutta Italia furono utilizzati, in un primo momento, prevalentemente i sistemi Hennebique e Walser-Gèrard (Paolini 2017). Tuttavia, tra i sistemi che iniziarono a diffondersi in quegli anni, anche il sistema Monier, il sistema Néville, il sistema Matrai e quello Cottancin si distinsero per le loro specifiche caratteristiche costruttive, che rispondevano alle esigenze di resistenza e semplicità esecutiva richieste dall'edilizia militare.

- **Sistema Hennebique:** Le travi o nervature del solaio sono formate da prismi a base rettangolare di malta di cemento la cui armatura è composta di una o più coppie di sbarre di ferro tonde. In ogni coppia la sbarra inferiore è rettilinea per tutta la sua lunghezza e si mantiene parallela ed a pochi centimetri dalla superficie inferiore della trave. La sbarra superiore nella parte centrale della trave si mantiene parallela e a pochi centimetri dalla sbarra inferiore, ma presso le estremità si rialza in modo da disporsi verso la parte superiore della trave.
  Generalmente, le lastre del soffitto hanno le dimensioni di 1.5x1x0.015m; quelle del solaio hanno invece le seguenti dimensioni: 1.35x0.5x0.05m. Queste i giunti perpendicolari alla direzione delle travi sono riempiti con cemento colato (Ignoto 1899).

- **Sistema Walser Gerard:** I solai realizzati secondo il sistema Walser-Gérard erano rinforzati da nervature, la cui ossatura era composta da due serie sovrapposte di spranghe longitudinali, disposte in modo alternato e collegate tra loro mediante spranghe trasversali.
  Le spranghe *a*, che venivano avvolte dal cemento e risultavano soggette a sforzi di compressione, erano di sezione minore rispetto alle spranghe *b*, destinate invece a sopportare sforzi di trazione, per i quali il solo rivestimento in cemento non avrebbe garantito una resistenza sufficiente.
  Le verghe trasversali *c* seguivano un percorso alternato: passavano sopra una spranga *a*, poi sotto una *b*, quindi nuovamente sopra una *a* e così via. Esse si prolungavano all'interno della soletta laterale, dove potevano essere unite alle verghe trasversali *d* della stessa soletta, che invece passavano sotto le spranghe *a* (Ignoto 1899).

- **Sistema Monier:** Un solaio realizzato secondo il sistema Monier era costituito da uno scheletro in ferro rivestito da uno strato di calcestruzzo cementizio. L'ossatura metallica comprendeva spranghe (*a*) con le estremità appoggiate sui rispettivi sostegni; la loro sezione veniva dimensionata in base al carico previsto per la struttura. Le spranghe erano disposte parallelamente, con un'interasse variabile tra 5 e 10 cm. Per mantenere costante questa distanza, si collocavano sopra di esse, in direzione ortogonale, delle verghe di ferro (*b*) del diametro compreso tra 3 e 6 mm, anch'esse intervallate ogni 5 o 10 cm. Questi fili venivano legati alle spranghe nei punti di incrocio mediante un filo di ferro da 1 mm di diametro. Tali collegamenti prendevano il nome di *fili di ripartizione*, poiché avevano la funzione di distribuire gli sforzi di compressione e trazione, generati dalle sollecitazioni esterne, su porzioni limitate della superficie del solaio — cioè su gruppi di spranghe (Ignoto 1899).

- **Sistema Néville**: Il sistema Néville prevedeva un'ossatura del solaio composta da due serie di travi parallele: una posta nella parte superiore e l'altra nella parte inferiore del solaio. Ciascuna trave inferiore era collegata a quella superiore mediante verghe trasversali, che insieme formavano una serie di triangoli equilateri o rettangolari. Ne risultava una struttura composta da molteplici elementi resistenti, simili a travi reticolari. Questi reticolati venivano ulteriormente rinforzati da verghe di collegamento, poste a una distanza di 6 cm l'una dall'altra e fissate sia alle travi principali sia a quelle trasversali. Attorno a questa struttura veniva colata della malta cementizia, evitando però di riempire completamente gli spazi vuoti tra i reticoli: in questo modo si otteneva una sorta di lastra tubolare, leggera ma resistente (Ignoto 1899).

- **Sistema Matrai**: Nei solai realizzati con il sistema Matrai venivano immerse nella massa del conglomerato delle travi principali in ferro a doppio T (semplici, composte o reticolari, a seconda dell'importanza della costruzione). Queste travi erano rinforzate lateralmente da catenarie in fili di ferro del diametro di 5 mm, la cui freccia corrispondeva all'altezza delle travi stesse.
  Tra una trave e l'altra veniva collocata un'ossatura metallica secondaria, costituita da due serie di catenarie, indicate con le lettere *a* e *b*, formate anch'esse da fili di ferro, secondo la disposizione illustrata nella figura 15. Le catenarie *a* e *b* formavano un'intelaiatura in grado di sopportare autonomamente sia il peso del getto sia i carichi di esercizio, trasferendo tali sollecitazioni alle travi principali (Ignoto 1899).

- **Sistema Cottancin**: I solai realizzati secondo il sistema Cottancin erano rinforzati da nervature immerse nel cemento, disposte lateralmente per resistere agli sforzi di flessione. Queste nervature formavano una serie di travi reticolari, in cui gli elementi normalmente soggetti a compressione erano sostituiti dal cemento colato tra le maglie della struttura, mentre quelli destinati a lavorare a trazione erano rappresentati dai ferri metallici della trama. Le nervature conferivano al solaio la resistenza strutturale desiderata. Quando si utilizzavano ferri d'armatura del diametro di 4 mm e lastre dello spessore di 4 cm, era fondamentale non lasciare spazi privi di nervature superiori a 1,30 m di larghezza. Rispettando questa condizione, le nervature potevano essere disposte e incrociate liberamente, sia per motivi estetici — creando particolari combinazioni decorative — sia per esigenze statiche, come la trasmissione dei carichi su un numero ristretto di punti d'appoggio. In questo modo si otteneva un solaio con l'aspetto di un soffitto a cassettoni, derivante dalla disposizione geometrica delle nervature (Ignoto 1899).

### 4.2.3 Strutture di copertura

Le strutture di copertura degli edifici militari presentavano una grande varietà tecnica, legata alla diversità delle luci da coprire: nei dormitori e nelle scuderie si utilizzavano coperture in legno, spesso "alla lombarda", con travi parallele al colmo (terzere) e travetti perpendicolari, o "alla piemontese", con una o tre terzere principali rinforzate che sorreggevano una o tre travi inclinate per ogni falda (puntoni) e travetti disposti parallelamente alle terzere; negli edifici destinati a comando, la struttura del tetto era spesso simile a quella delle caserme, ma la presenza di muri portanti interni longitudinali permetteva di adottare sistemi più complessi; nei magazzini e maneggi, privi di muri intermedi, si ricorreva a capriate: inizialmente in legno per luci fino a 20 m, poi in strutture miste legno-metallo (come le Polonceau), fino ad arrivare all'uso esclusivo di strutture metalliche per grandi luci.
Inoltre, fino alla metà dell'Ottocento non esistevano veri sistemi di verifica strutturale per le capriate lignee, ma solo solide regole empiriche. Tuttavia, verso la fine del secolo, iniziarono a comparire terzere in acciaio, sempre abbinate a travetti in legno. Se prima, a causa del costo elevato, i materiali metallici erano utilizzati solo per elementi di connessione, come staffe, chiodi e chiavarde (F. Zamperini 2014), dal 1916 in poi le nuove dimensioni standard (luce di 26 m) richiesero capriate metalliche nei maneggi. Con il tempo, si ridusse l'uso delle capriate miste, sostituendo le catene lignee con tiranti metallici, anche nelle capriate tradizionali. Si cominciò ad utilizzare sempre più frequentemente capriate interamente metalliche e arcarecci metallici a doppia T (F. Zamperini 2014).
Dagli anni Trenta si diffusero le coperture reticolari in cemento armato (Turri, Zamperini e Cappelletti 2009). che "*a motivo della loro impermeabilità, della loro incombustibilità e della loro resistenza, si applicano con vantaggio alla costruzione dei tetti e delle coperture*" (Ignoto 1899). Inizialmente, le sperimentazioni si incentrarono solo sugli arcarecci di grande luce, poi anche per le strutture reticolari di copertura (Zamperini, 2014).
Anche nella manualistica tecnica del primo Novecento si osserva una crescente attenzione verso le coperture come sistemi complessi, composti da più livelli costruttivi. Marrullier (1918), ad esempio, distingue chiaramente tre parti fondamentali di ogni tetto: i materiali di copertura, l'orditura (o piccola armatura) e la grossa armatura. I materiali di copertura comprendevano tegole (a canale o piane, semplici o scanalate), lastre di pietra naturale come l'ardesia o artificiali come il cemento-amianto (eternit), nonché elementi metallici (zinco, piombo) o in vetro. L'orditura era costituita da correnti, listelli, travicelli e assito, elementi secondari che sostenevano direttamente la copertura. La grossa armatura, invece, era formata dalle strutture principali portanti – come capriate, puntoni e terzere – su cui poggiava l'intera struttura del tetto (Marrullier 1918).
In generale si preferiva il tipo di struttura '*alla lombarda*', che trasmetteva carichi esclusivamente verticali alle strutture di sostegno, permettendo di ridurre gli spessori murari e i tempi di prosciugamento delle malte (Zamperini, 2014). Per realizzare coperture piane a terrazzo si utilizzavano i sistemi dei solai, affrontando però il problema dell'impermeabilizzazione con pendenze minime. Materiali come asfalto, zinco e cemento furono inizialmente impiegati, ma successivamente sostituiti da strati alternati di carbone bituminoso e catrame vegetale (detto cemento di legno). La copertura prevedeva: uno strato di terra, un rivestimento in gesso con pendenza del 2%, sabbia asciutta, tre strati alternati di carbone e catrame, uno strato protettivo di sabbia e uno di ghiaietta, il tutto contenuto da una lamiera di zinco fissata alla struttura (Ignoto 1899).
Le strutture di copertura degli edifici militari si differenziavano, inoltre, in funzione delle tipologie di edifici. Si individuano, principalmente, tre tipologie costruttive principali (Zamperini, 2014).

#### *Edifici multipiano con muri interni*

Il sistema costruttivo descritto era impiegato per edifici militari come comandi, infermerie, casermette e laboratori. I fabbricati per il comando e le infermerie avevano muri portanti trasversali (interasse 4–5 m) e un muro di spina centrale a delimitare un corridoio; le coperture erano in genere "alla lombarda", con arcarecci appoggiati sui muri a timpano. Nei padiglioni del comando, la presenza di grandi sale al piano superiore richiedeva spesso la rimozione di un muro portante e l'uso di capriate o arcarecci di grande luce.
Le casermette avevano muri trasversali con interasse di circa 6 m. Fino al 1880 si utilizzavano arcarecci distanziati (2–3 m), rinforzati con mensole e soggetti a flessione retta; dopo il 1900, l'interasse fu ridotto (1,30–1,50 m) e si adottarono arcarecci a flessione deviata, più adatti all'inclinazione della falda.
I tetti "alla piemontese" erano meno comuni e prevedevano tre travi principali e falsi puntoni rinforzati con saette, utili a sostenere i travetti e a ridurre la luce libera. Nelle camerate longitudinali, più rare, la copertura era ancora "alla piemontese", con falsi puntoni, talvolta dotati di catene metalliche per contenere le spinte orizzontali. Fino agli anni Trenta, per questi edifici si usarono esclusivamente strutture lignee per le coperture (Zamperini, 2014).

### *Edifici con un solo piano e con muri interni*

Questo tipo costruttivo fu utilizzato principalmente per le scuderie, a partire dal 1880, poiché prima erano realizzate al piano terra delle casermette. Le scuderie avevano muri trasversali distanziati di oltre 9 m, che richiedevano arcarecci rinforzati. La soluzione più comune prevedeva saette e sottobanchine che formavano un arco a tre conci per sostenere la parte centrale dell'arcareccio; in alternativa si usavano mensole sovrapposte, meno efficienti perché richiedevano più legname ma evitavano di scaricare spinte sui muri.
Verso la fine dell'Ottocento iniziarono a impiegare arcarecci metallici a doppia T o reticolari, che grazie alla maggiore resistenza non necessitavano di rinforzi, ma mantenevano travetti di legno. Con gli arcarecci in acciaio si affrontava il problema della lessione deviata, risolto con tiranti che limitavano il movimento laterale.
Nei primi anni del Novecento furono sperimentate strutture in calcestruzzo armato: travi principali in calcestruzzo sostenevano travetti e listelli in legno, oppure si adottarono arcarecci ad arco in calcestruzzo con pilastrini prefabbricati, uniti monoliticamente con getti in opera (Zamperini, 2014).

### *Edifici senza muri di partizione*

Il tipo strutturale senza muri interni era usato soprattutto per cavallerizze, palestre e magazzini, spesso con schema basilicale a una o tre navate. Le coperture erano quasi sempre alla lombarda, con capriate in legno poste ogni 3-5 m a sostenere gli arcarecci. Più raramente si usavano tetti alla piemontese con falsi puntoni.
Nelle navate singole, le capriate poggiavano sui muri longitudinali; in quelle a tre navate, capriate simmetriche coprivano la navata centrale e capriate zoppe o falsi puntoni le laterali.
Fino agli anni '70 dell'Ottocento, per luci sotto i 20 m si utilizzavano capriate lignee di diversi tipi (semplici, all'italiana, palladiane) a seconda della luce da coprire. Per luci maggiori si adottavano capriate miste Polonceau con elementi in legno, ghisa e ferro.
Negli ultimi decenni dell'Ottocento le capriate Polonceau sostituirono quelle palladiane anche per luci di 15-16 m, mentre per luci minori si continuavano a usare capriate tradizionali con tiranti metallici. Dagli anni 10 del Novecento si diffusero capriate interamente metalliche e negli anni 30 si sperimentarono capriate in calcestruzzo armato (Zamperini, 2014).

### 4.2.4 Strutture di elevazione verticali

*Strutture a setti portanti*

Prima della diffusione del telaio in calcestruzzo armato, gli edifici militari si basavano principalmente su strutture verticali a muri portanti (Zamperini, 2014). Questi muri erano costruiti in mattoni o pietrame irregolare, con l'inserimento di elementi in pietra squadrata o zanche metalliche nei nodi strutturali e con incatenamenti in legno o metallo integrati nello spessore murario nei punti più sollecitati (basamenti e capitelli dei pilastri, colonne, architravi delle finestre). Le dimensioni, inizialmente stabilite secondo regole empiriche, vennero progressivamente integrate da verifiche strutturali sempre più precise (Turri, Zamperini e Cappelletti 2009).
Marrullier (1918) classificava le tipologie murarie più comuni in tre categorie:

1. Muri realizzati con materiali regolari, come i laterizi pieni o forati, i blocchi di tufo e le pietre tenere, che garantivano una posa ordinata e una buona regolarità strutturale;
2. Muri costruiti con materiali irregolari, principalmente in pietrame, caratterizzati da una tessitura disomogenea e spesso impiegati nelle murature di spessore elevato o nelle fondazioni;
3. Muri composti da un'ossatura portante e pareti di tamponamento leggere, tipici delle strutture in cemento armato, dove la funzione resistente è affidata all'intelaiatura e le chiusure perimetrali hanno principalmente un ruolo di compartimentazione.

Fino agli anni Dieci del Novecento, le strutture in cemento armato venivano usate solo per edifici con grandi luci o carichi elevati (scuderie, scuole di equitazione, magazzini); in seguito furono adottate anche all'interno delle caserme, mantenendo però muri perimetrali in muratura (Turri, Zamperini e Cappelletti 2009). In questo contesto, gli ingegneri del Genio Militare facevano ricorso a specifici sistemi costruttivi (Ignoto 1899):

- **Sistema Cottancin**: Cottancin, avendo scoperto che la malta di cemento con difficoltà si presta alla costruzione di sottili pareti verticali, specie a causa del difetto cui dà luogo la diversa densità della sabbia e del cemento, introdusse tra le maglie dell'ossatura metallica mattonelle piene o cave. Nel caso di mattoni pieni, il filo di ferro che costituisce l'armatura veniva fatto passare all'interno dei giunti orizzontali e verticali; con mattoni cavi, invece, il filo veniva inserito direttamente nei fori.
  Se la parete non doveva sopportare carichi elevati, solo una parte dei mattoni veniva armata, mentre gli spazi rimanenti erano riempiti con altri mattoni o con lastre di gesso o cemento, disposte come in una tramezza tradizionale. Quando invece era richiesta una maggiore resistenza strutturale, l'intera parete veniva realizzata con mattoni armati e rinforzata ulteriormente mediante nervature (Ignoto 1899).

- **Sistema Hennebique**: Con il sistema Hennebique, l'ossatura dell'armatura veniva configurata in funzione della natura degli sforzi a cui il muro o il tramezzo era sottoposto.
  Nel caso di un semplice tramezzo divisorio tra ambienti — che doveva principalmente resistere a eventuali rigonfiamenti da un lato o dall'altro — si adottava una disposizione di piccoli tondini di ferro verticali, alternati tra una faccia e l'altra della parete. Questi erano collegati tra loro mediante piccole staffe distribuite a intervalli regolari, così da assicurare la coesione con la massa del cemento. Lungo l'asse del muro venivano inoltre inserite una serie di barre orizzontali.
  Nel caso invece di un muro destinato a contenere spinte laterali, come quelli di sostegno delle terre, l'armatura verticale veniva concentrata sulla faccia opposta rispetto alla direzione della spinta, in modo da resistere efficacemente agli sforzi esercitati in ogni punto.
  Accoppiando due tramezzi del tipo descritto in precedenza e collegandoli mediante apposite barre, si ottenevano pareti leggere e ben isolate, utilizzate sia come muri perimetrali che interni. Quando non era richiesta un'elevata resistenza strutturale, uno dei due tramezzi veniva realizzato senza armatura, impiegando semplici mattoni pieni o forati, oppure lastre prefabbricate in cemento o gesso.
  Nei locali sotterranei, per impedire la risalita dell'umidità dal terreno attraverso pavimenti e pareti, si rivestivano queste superfici con un sottile strato di cemento armato. Tale rivestimento poteva aderire direttamente ai muri o essere mantenuto leggermente distaccato, a seconda delle esigenze.

*Strutture a telaio*

Fino al 1915 circa, nei progetti militari italiani non si riscontra l'uso di strutture a telaio in acciaio, mentre il calcestruzzo armato iniziò a diffondersi gradualmente. Già nel 1904 il generale Caveglia elaborò una teoria analitica per il calcolo di elementi presso-inflessi in cemento armato, ma senza considerare i telai strutturali. Nel 1908 Marrullier introdusse l'uso delle strutture intelaiate con chiusure leggere tra le applicazioni del calcestruzzo armato, fornendo anche indicazioni sul dimensionamento dei pilastri e delle travi.
Il primo esempio documentato di struttura intelaiata fu il progetto di una cavallerizza coperta, che prevedeva una struttura leggera in cemento armato con muri di chiusura sottili e copertura in lamiera ondulata. Questa scelta consentiva di evitare le grandi masse murarie che sarebbero state necessarie per resistere alle azioni orizzontali (come il vento). La struttura includeva telai ben collegati, con pilastri dimensionati per resistere a pressolessione e calcolati assumendo che tutta la trazione fosse assorbita dall'armatura metallica.
Addossata alla cavallerizza si trovava una tribuna a due piani con struttura in cemento armato, composta da telai principali e secondari e solai sottili.
La caserma Sistema Marino rappresentò il primo prototipo di casermetta in cui il sistema a telaio in cemento armato venne sfruttato pienamente anche dal punto di vista architettonico e tipologico (Zamperini, 2014). Solo dopo il 1930, infatti, alcuni modelli di casermetta iniziarono a valorizzare le potenzialità funzionali ed espressive della nuova tecnica costruttiva. Il progetto tipo elaborato da Roberto Marino impiegava la versatilità della struttura intelaiata per definire un edificio a profilo gradonato, in cui la riduzione progressiva della profondità del corpo di fabbrica consentiva da un lato di adottare sistemi distributivi a corridoi indipendenti, dall'altro di garantire una ventilazione trasversale diretta delle camerate. Tale configurazione, con finestre disposte sulla fascia di muro lasciata libera dalla minore altezza del corridoio, rappresentava una soluzione innovativa sia in termini di comfort ambientale che di funzionalità interna, espressione di un linguaggio architettonico moderno, razionale e attento alle esigenze igienico-sanitarie del periodo (Zamperini, 2014).

*Pavimenti*

Fino al 1875 circa, i pavimenti erano realizzati principalmente utilizzando volte nei piani inferiori e pavimenti in legno nel sottotetto, per evitare spinte sulla muratura. Successivamente, inizialmente solo nel sottotetto (1875-90), poi anche nei piani intermedi (1890-1900), furono introdotte travi in acciaio a forma di I, accoppiate a piccole volte in mattoni. A partire dal 1900, grazie alla loro economicità, resistenza e durabilità, i pavimenti in calcestruzzo armato furono progressivamente utilizzati in molte varianti: lastre di spessore uniforme, lastre nervate, lastre prefabbricate supportate da travi prefabbricate, travi cave prefabbricate collocate una accanto all'altra. (Turri, Zamperini, & Cappelletti, 2009)

### 4.2.5 Elementi di collegamento verticale

Fino agli anni Novanta dell'Ottocento, le scale venivano realizzate esclusivamente con volte rampanti, escludendo l'uso di scale in legno o di gradini a sbalzo, poiché era necessaria un'elevata resistenza per sostenere il passaggio dei soldati. Successivamente si iniziò talvolta a utilizzare profilati in acciaio a doppio T, mentre dai primi del Novecento le scale vennero realizzate prevalentemente in cemento armato (Turri, Zamperini e Cappelletti 2009).

## 4.3 La ricognizione delle tipologie infrastrutturali storiche e attuali

Mentre esiste una ricca tradizione di studi dedicati all'architettura militare antica e medievale, la ricerca sull'architettura militare italiana tra XIX e XX secolo risulta invece limitata e frammentaria (Poli 2016). Durante i periodi bellici, infatti, l'architettura assume un ruolo marginale e viene scarsamente trattata nelle riviste di attualità, con una conseguente drastica riduzione dell'attività edilizia urbana, che diventa pressoché inesistente. In questi momenti, l'architettura sembra un "fantasma" che svanisce dal panorama urbano, ma non scompare del tutto: le parti coinvolte nel conflitto necessitano infatti di architetture pensate sia come attrezzature logistiche sia come infrastrutture tattiche, fondamentali per sostenere le operazioni militari (Martínez-Medina e Pirinu 2017). Nonostante l'elevato numero di manufatti e la loro estensione sul territorio, le caserme rappresentano un patrimonio edilizio ancora poco conosciuto al di fuori dell'ambito militare. La ricerca su questa specifica tipologia di edilizia residenziale collettiva è stata finora sporadica e parziale, anche a causa degli evidenti problemi di riservatezza legati alla natura strategica di questi complessi (Turri, La casa del soldato. Per una tipologia delle caserme. 2014).
Preso atto di questa condizione, si ritiene fondamentale approfondire la conoscenza delle tipologie architettoniche e delle tecniche costruttive degli insediamenti militari storici, non solo per l'importanza strategica delle aree occupate dalle caserme, ma anche per la loro rilevanza quantitativa, il ruolo nella storia urbana e il pregio architettonico di molti manufatti.
Questo capitolo si concentra quindi sulle trasformazioni delle tipologie insediative e infrastrutturali militari avvenute tra la seconda metà del XIX e la prima metà del XX secolo, un periodo cruciale segnato dal consolidamento degli eserciti permanenti e dall'emergere di nuove esigenze strategiche, logistiche e abitative.

In questa fase, la costruzione di caserme assunse un ruolo strategico nei processi di pianificazione urbana e architettonica, resa necessaria dall'inadeguatezza degli edifici esistenti e dalla crescente domanda di strutture appositamente progettate per l'alloggiamento e il coordinamento delle truppe. In mancanza di nuove costruzioni, i prefetti segnalavano ripetutamente l'impossibilità di reperire spazi idonei, spingendo le autorità a considerare il riutilizzo di conventi e monasteri.
Questi edifici religiosi, già al centro delle riforme settecentesche promosse da Giuseppe II — che ne incentivò la soppressione per riorganizzare i servizi pubblici e acquisire patrimoni immobiliari — si rivelarono particolarmente adatti alla nuova funzione militare. I loro ampi spazi aperti, come orti e chiostri, la possibilità di riconvertire le chiese in stalle o maneggi e la trasformabilità dei dormitori in camerate, li rendevano facilmente adattabili a ospitare le nuove comunità militari (Brignani & Landi).
Tuttavia, nei primi decenni dopo l'Unità d'Italia, la progressiva specializzazione dei reggimenti e il servizio di leva obbligatoria introdotti all'epoca determinavano la necessità di un incremento di edifici funzionali e di spazi per le reclute. Dopo l'unificazione nazionale (1861) e fino all'epoca fascista (1922–1943), la trasformazione del volto delle città italiane non si limitò alla dismissione di infrastrutture ormai obsolete, come le cinte murarie (Cotana 2024), ma comportò l'elaborazione di un nuovo sistema di opere difensive e logistiche: caserme, magazzini, arsenali, depositi e infrastrutture per la cavalleria.
Come già evidenziato, il problema dell'alloggiamento militare emerse con particolare urgenza sin dagli albori dello Stato unitario. Con la creazione dell'Esercito Italiano nel 1861 e l'introduzione della leva obbligatoria, divenne infatti evidente la necessità impellente di dotarsi di strutture adeguate a ospitare in modo stabile e organizzato un numero crescente di militari (Paolini, Le caserme unitarie: progetto e costruzione 2007). Il Genio Militare rispose elaborando una serie di progetti fondati su criteri funzionali, igienici e sanitari, avvalendosi dei nuovi materiali e delle tecniche costruttive emergenti. Questi modelli architettonici, frutto del lavoro sistematico del corpo tecnico militare, rappresentano l'esito formale di un disegno sempre più standardizzato (Martínez-Medina e Pirinu 2017).
Le caserme risultanti da tale approccio progettuale si distinguevano per una marcata serialità morfologica, tipologica e tecnologica, evidente nella ripetizione di schemi distributivi e nella razionalizzazione dei processi costruttivi. Al loro interno coesistevano ambienti e funzioni eterogenee – uffici, camerate, mense, aule, laboratori, magazzini, cavallerizze – organizzati secondo una logica di efficienza e controllo (Turri e Zamperini 2017). Le caserme militari, in origine isolate dal contesto urbano, venivano localizzate in aree periferiche o di campagna per garantire condizioni igienico-sanitarie adeguate. Dopo il 1874, con le '*Norme d'igiene per la truppa*', si stabilì che la salubrità degli alloggiamenti dipendeva da fattori ambientali come aria, acqua, esposizione e vegetazione. L'esperienza con le caserme urbane, spesso affollate e poco funzionali, portò a privilegiare siti ampi, liberi e distanti da fonti di infezione come quartieri popolosi, ospedali, macelli e industrie. Sulla base di queste indicazioni, le nuove caserme furono inizialmente costruite lungo le prime circonvallazioni urbane, nei pressi del perimetro delle mura

appena abbattute. Successivamente, la tendenza fu quella di collocarle sempre più lontano dal centro abitato, spostandole verso le periferie e, in molti casi, in aperta campagna, in modo da garantire condizioni ambientali più salubri e ampi spazi liberi per le attività militari. Sebbene gli orientamenti igienico-sanitari fossero ampiamente condivisi, nella pratica si dovettero spesso accettare compromessi. Le scelte reali variarono da luogo a luogo, influenzate da fattori militari e strategici — come il presidio delle piazzeforti, l'aggregazione delle truppe e la difesa dei confini — ma anche da condizioni territoriali, urbanistiche ed economiche locali, come la disponibilità di aree comunali o la vicinanza alle linee ferroviarie (Turri 2014).

Grazie alla ricerca negli archivi militari e alla letteratura di settore, è stato possibile ricostruire un campionario rappresentativo delle principali tipologie edilizie adottate negli acquartieramenti dell'epoca. Tali configurazioni, riconducibili a modelli di matrice internazionale, coniugavano efficienza economica, rapidità costruttiva e stabilità strutturale. Le principali soluzioni tipologiche e distributive adottate tra l'Unità d'Italia e il secondo dopoguerra risultano infatti ricorrenti e codificate (Turri, La casa del soldato. Per una tipologia delle caserme. 2014):

1. Caserme lineari:
   Costituite da un unico lungo fabbricato centrale chiuso, terminato alle sue estremità da due ali, non più lunghe di un terzo del corpo centrale, al fine di favorire la ventilazione e limitare le ombre portate sul prospetto interno. Nello stabilire le piante dei fabbricati si credeva preferibile il sistema lineare per utilizzare convenientemente lo spazio (ogni fabbricato si componeva generalmente da un piano sotterraneo, un piano terreno e tre piani superiori. Il piano terreno era destinato ai servizi, gli altri ai dormitori delle truppe) e per ragioni di igiene, essendo generalmente ammesso che gli alloggi erano elevati dal suolo ed erano, dunque, più salubri (Durelli, 1886). Nei sotterranei delle caserme, talvolta, venivano stabiliti i bagni, le cucine e alcuni magazzini.

2. Caserme a corte:
   Costituite da un unico fabbricato chiuso, con uno o più cortili intermedi, contenente tutte le funzioni di alloggiamento. Questi fabbricati erano dedicati ai corpi di fanteria.

3. Caserme a padiglioni:
   Ben presto sostituirono le soluzioni precedenti, considerate meno funzionali nonostante il minor costo. Questo tipo di accasermamento divenne il più diffuso, grazie alla sua flessibilità e alle numerose varianti adottate. L'impianto si caratterizza per la presenza di edifici isolati e monofunzionali, disposti attorno a una grande piazza quadrangolare destinata ad adunate ed esercitazioni. La palazzina del comando occupa una posizione dominante, solitamente rivolta verso l'esterno dell'insediamento. Le casermette, dedicate all'alloggio della truppa e ad altri usi specifici, seguono diverse configurazioni planimetriche a seconda delle esigenze funzionali e del contesto. Tra le più diffuse vi sono le tipologie:
   - A pettine: il modello prevede la presenza di casermette disposte su linee parallele attorno a un cortile centrale. Queste casermette, collegate o meno da un portico, si dispongono perpendicolarmente ai lati del cortile. Sono allineate in serie su lati opposti della piazza, distanziate tra loro (consigliata una distanza almeno doppia rispetto all'altezza dei fabbricati) e ospitano uomini e animali insieme. Di solito, le scuderie si trovano al piano terra e le camerate al piano superiore. L'edificio del comando e quelli destinati ad altri servizi si trovano sugli altri due lati della piazza.
   - Lungo il perimetro della corte: Ai lati del comando, quando si consolidò la separazione tra uomini e animali, gli edifici di due o tre piani, oltre al piano terra, sono disposti a squadra con lati aperti, evitando gli angoli rientranti e i cortili chiusi. Questo layout favorisce la libera ventilazione attorno ai fabbricati e impedisce il ristagno dell'aria.

   In entrambe le configurazioni, le casermette erano orientate in modo da garantire un'adeguata esposizione solare durante tutto l'anno, assicurando l'irraggiamento diretto anche nei mesi invernali su entrambi i lati delle camerate. Spesso, tali edifici erano collegati tra loro mediante portici, che facilitavano la circolazione coperta all'interno del complesso.

Queste soluzioni, sebbene flessibili e adattabili a diversi contesti e conformazioni del terreno, permettevano solo una limitata varietà nella definizione della morfologia complessiva. Ne risultavano strutture caratterizzate da configurazioni regolari, ordinate e facilmente riconoscibili (Turri, Cappelletti e Zamperini 2008).

Dopo l'Unità d'Italia, la costruzione di nuove caserme fu inizialmente limitata e si ricorse spesso alla requisizione di edifici religiosi. Solo dagli anni Ottanta dell'Ottocento si avviò un piano più strutturato. Nonostante la preferenza per le caserme a padiglioni, il dibattito tra edifici compatti e frazionati rimase aperto fino ai primi del Novecento. Nel 1936, sotto il regime fascista, partì però un ampio programma di edificazione di *caserme funzionali*, progettate dal Genio Militare per sostenere le ambizioni espansionistiche del regime (Turri 2014).

4. Caserme funzionali:
   Queste strutture, introdotte a partire dal 1936, si caratterizzano per un impianto a padiglioni disposti a forma di U, generalmente a un solo piano rialzato ma predisposti per eventuali sopraelevazioni. I padiglioni erano organizzati in gruppi di tre, con la parte centrale rivolta verso i lati lunghi di un cortile allungato, mentre i lati corti ospitavano gli edifici del comando, le cucine e i refettori. Con l'affermarsi poi della caserma funzionale, si passò progressivamente da impianti intensivi, sviluppati in altezza e con minori costi, a soluzioni estensive con padiglioni bassi e sparsi su ampie aree extraurbane.

Entro la fine del Novecento, l'Italia disponeva di circa 500 caserme, ma solo 150 erano ancora adatte all'uso militare. Il patrimonio era composto da strutture storiche (20%), caserme a padiglione (30%), caserme funzionali pre-belliche (40%) e solo in minima parte (10%) da edifici del secondo dopoguerra. Si trattava per lo più di complessi ampi, recintati e ordinati, con edifici monofunzionali e spazi verdi, la cui uniformità architettonica rende oggi possibile un recupero coordinato e sistematico (Turri 2014).

Questi complessi militari, giunti fino a noi in uno stato talvolta sostanzialmente invariato rispetto al progetto originale, rappresentano un patrimonio storico, tecnologico e culturale di grande rilievo. Le morfologie di queste strutture, ereditate dal passato, sono frutto di complesse opere di ingegneria militare basate su dibattiti internazionali in continua evoluzione. L'importanza di questi siti è paragonabile a quello di ville, giardini e monasteri, che sono già ampiamente tutelati e che hanno goduto di adeguati sostegni finanziari pubblici per la conservazione e la valorizzazione dei valori tangibili e intangibili (Camerin, Camatti e Gastaldi 2021). Tuttavia, il loro recupero comporta sfide specifiche che riguardano non solo la tutela del patrimonio, ma anche l'adeguamento alle normative moderne in materia di sicurezza e accessibilità, la verifica della compatibilità tecnologica degli elementi strutturali e impiantistici, nonché il miglioramento delle condizioni di benessere ambientale. Grazie alla loro struttura standardizzata e modulare, è però possibile elaborare strategie di riuso sistematiche e definire linee guida per il recupero di questi complessi. Questo approccio si rivela particolarmente efficace perché gli interventi non si limitano alla singola costruzione, ma possono essere applicati all'interno di un ampio e articolato sistema territoriale (Turri, Cappelletti e Zamperini 2008).

## 4.4 Le tipologie edilizie analizzate e la scelta dei casi di studio

Alla luce delle tipologie insediative e infrastrutturali militari descritte, con particolare attenzione alle trasformazioni e agli adattamenti che hanno caratterizzato l'architettura militare italiana tra XIX e XX secolo, il passo successivo consiste nell'analisi approfondita di specifici esempi rappresentativi.
Nel capitolo successivo l'attenzione sarà rivolta a un caso di studio emblematico, selezionato per la sua rilevanza tipologica e storica. Le caserme a padiglione, come la Caserma Villasanta, rappresentano infatti il modello più diffuso e funzionale di accasermamento dell'età moderna, concepito secondo criteri di efficienza, igiene e controllo. Questo esempio consente di approfondire sia la morfologia sia le tecniche costruttive specifiche, oltre alle trasformazioni funzionali e spaziali che hanno interessato gli insediamenti militari nel contesto urbano e territoriale italiano, in continuità con le considerazioni emerse dalla ricognizione delle tipologie infrastrutturali storiche e attuali.

### 4.4.1 Le caserme a padiglione: la Caserma Villasanta

Nel più ampio quadro del patrimonio militare cagliaritano, la Caserma Riva Villasanta, anche chiamata Caserma Funzionale B rappresenta un esempio significativo di architettura militare del Novecento, inserendosi in un sistema di insediamenti strategicamente localizzati tra il colle di San Bartolomeo e il Viale Poetto. La sua costruzione, avvenuta tra il 1930 e il 1940 insieme alla "gemella" Caserma Monfenera, anche chiamata Caserma Funzionale A, si colloca all'interno di un piano di potenziamento dei presidi militari successivo alla Prima Guerra Mondiale, in risposta alla crescente minaccia aeronavale (Fiorino, Sinergie. Percorsi interistituzionali per la riqualificazione delle aree militari 2021).
Queste strutture si affiancano ad altri complessi militari realizzati tra Ottocento e primo Novecento, come la Caserma Livio Duce (ex Cascino) e la Caserma Carlo Ederle, evidenziando l'evoluzione del modello insediativo e la sua progressiva razionalizzazione.
La Riva Villasanta costituisce dunque un caso emblematico di caserma funzionale, rappresentativo di una tipologia edilizia compatibile, per caratteristiche tipologiche, costruttive e dimensionali, con molti altri complessi militari edificati a partire dal 1936.
Il padiglione principale, sede del Palazzo del Comando, appartiene alla tipologia degli edifici multipiano con struttura a muri portanti, sviluppandosi in un corpo rettangolare longitudinale a tre livelli fuori terra, con fronte a filo strada. Internamente, i setti murari longitudinali strutturano lo spazio in modo simmetrico attorno a un nucleo centrale, mentre pareti trasversali sono disposte ad interasse regolare.
Il resto del complesso è composto da sei corpi modulari a C detti casermette – destinati all'alloggio delle truppe e ai servizi – disposti simmetricamente su un lotto trapezoidale, insieme a padiglioni rettangolari di dimensioni minori. Le casermette sono caratterizzate da grandi camerate trasversali, organizzate per moduli, con struttura muraria portante composta da muri longitudinali e trasversali a interasse regolare.
Tutte le strutture verticali sono realizzate in muratura di pietra calcarea, mentre gli orizzontamenti, come testimoniato dalle ricognizioni e dalla documentazione storica, risultano in calcestruzzo armato con solai nervati e solette interposte. Le fondazioni sono del tipo "ordinario", costituite da prosecuzione dei muri in pietrame al di sotto del piano di campagna. Le coperture presentano tetti a doppia falda. I prospetti, semplici e intonacati, sono definiti da bucature regolari e fitte finestrature, coerenti con le esigenze di igiene e aerazione proprie dell'architettura militare moderna.
Le trasformazioni rilevate nel complesso sembrano in gran parte riconducibili al periodo immediatamente successivo alla Seconda Guerra Mondiale, quando – tra il 1946 e il 1960 – l'intero immobile fu concesso temporaneamente all'amministrazione comunale per l'accoglienza degli sfollati. I bombardamenti subiti da Cagliari nel 1943 causarono gravi danni al tessuto edilizio cittadino: circa il 36% degli edifici risultò inagibile o fortemente danneggiato. In questo contesto, la Caserma Riva Villasanta (allora indicata come Caserma Funzionale B) venne utilizzata per fronteggiare l'emergenza abitativa, subendo presumibilmente modifiche interne minori per adattarsi alla nuova funzione.
Sebbene non sia ad oggi nota con esattezza la data di costruzione della Caserma Riva Villasanta, le ricognizioni archivistiche permettono di circoscriverne l'edificazione tra il 1930 e il 1940, in linea con il programma di potenziamento militare attuato nel periodo tra le due guerre.
Attualmente, la Caserma Riva Villasanta ospita la sede del 14° Reparto Infrastrutture e conserva al suo interno un patrimonio archivistico di notevole estensione e valore, testimonianza diretta delle trasformazioni gestionali e funzionali che hanno interessato l'edificio nel tempo.

## 5. IL CONTESTO INTERNAZIONALE E LA SCELTA OLANDESE

### 5.1 I sistemi di difesa olandesi: Naarden e la New Dutch Waterline

La posizione geografica dei Paesi Bassi, situati in gran parte sotto il livello del mare, ha da sempre reso fondamentale l'uso dell'acqua come elemento difensivo. Questo approccio, sebbene non esclusivo del paese, ha trovato una particolare applicazione nei Paesi Bassi grazie alle caratteristiche geografiche del territorio. Infatti, anche se in molti altri paesi venivano utilizzati sistemi di allagamento per proteggere le città fortificate[56], le differenze di altitudine limitavano l'efficacia di tali inondazioni. Nei Paesi Bassi, invece, la geografia pianeggiante e il terreno situato sotto il livello dell'acqua di fiumi e mare rendevano possibili inondazioni su larga scala. Questo ha portato alla creazione di sistemi difensivi chiamati *waterlines* (linee d'acqua).

Le waterlines funzionano creando una barriera d'acqua invalicabile attraverso l'inondazione controllata del territorio[57]. Questo permette a un esercito relativamente piccolo di controllare un vasto territorio, affidando alla barriera d'acqua gran parte della difesa (Fig. 7) (Verschuure-Stuip 2020).

Il successo delle waterlines olandesi non dipese solo dalla geografia, ma anche dalla situazione politica ed economica del Paese. La provincia dell'Olanda, fulcro del potere politico ed economico della regione e sede di città strategiche come Amsterdam e Den Haag, era infatti la più facilmente difendibile attraverso inondazioni. Senza conquistarne questi territori, era quasi impossibile ottenere il controllo dell'intero paese. Questa combinazione di strategia difensiva e concentrazione del potere ha costituito per secoli la spina dorsale della difesa olandese (J. Van der Werf, The New Dutch Waterline 2021).



*Fig. 7 Foto degli anni '30 che mostra l'effetto delle inondazioni.*

[56] *In Francia, tra le più importanti città fortificate si annoverano Calais, Le Quesnoy, Verdun e Strasburgo. Il Lussemburgo invece, data la sua localizzazione in una regione montuosa, disponeva di un sofisticato sistema di chiuse, progettato per regolare il flusso dei fiumi e inondare strategicamente alcune aree a scopo difensivo.*

[57] *L'inondazione controllata mirava ad ottenere la giusta profondità e distribuzione dell'acqua. Ciò era possibile mediante un sistema di canali e chiuse che regolava il flusso, mentre il terreno veniva suddiviso in bacini d'inondazione separati da dighe. Questo garantiva un livello di allagamento uniforme di circa 50 cm: troppo profondo permetterebbe la navigazione, troppo basso consentirebbe il passaggio a piedi. Alcune aree rimangono asciutte, come alture naturali, dighe e strade, creando accessi vulnerabili, difesi da fortificazioni e fuoco incrociato lungo fiumi e canali.*

Durante il XVII e XIX secolo, i Paesi Bassi svilupparono alcune delle linee difensive più avanzate al mondo, come la celebre "Nieuwe Hollandse Waterlinie". Le Linea costituisce un sistema difensivo complesso che si estende per oltre 200 km lungo il cuore amministrativo ed economico dell'Olanda. Costruita tra il 1815 e il 1940, il sistema comprende una rete di 96 forti, insieme a dighe, chiuse e canali.
Oltre alla funzione militare, questi forti hanno avuto anche un ruolo simbolico, rafforzando l'identità nazionale e l'indipendenza dei Paesi Bassi. La loro evoluzione riflette i cambiamenti nelle tecnologie militari e l'adattamento alle sfide politiche ed ambientali del territorio. Oggi, molte di queste strutture sono parte del patrimonio storico e culturale del paese e alcune, come Naarden, sono state riconosciute come patrimonio dell'umanità dall'UNESCO insieme alla Nieuwe Hollandse Waterlinie (Amsterdam 2018).

Naarden è una delle città fortificate meglio conservate d'Europa, situata a circa 25 km a est di Amsterdam. La città, con il suo sistema a doppio canale, sei bastioni e mura in mattoni, è famosa per la sua unicità e vanta una storia ricca e complessa, caratterizzata da periodi di ascesa, fioritura e declino. Diverse fonti storiche, tra cui antichi scritti, ci permettono di ricostruire la nascita di questa città fortificata lungo questo importante asse commerciale (Van Engen, Kos e Rutte 2000).

## 5.2 Evoluzione storica, architettonica e urbana della città-fortezza

### 5.2.1 La Fondazione di Naarden (XIV secolo)

La storia di Naarden appare profondamente segnata da un evento tragico: la sua distruzione avvenuta nel 1350. Questo episodio, tuttavia, diede l'opportunità di ricostruire la città su nuove basi, trasformandola in una roccaforte strategica, oltre che un importante centro urbano. La nuova Naarden, fondata nel 1351[58], non venne ricostruita nel medesimo luogo in quanto non auspicabile a causa della minaccia proveniente dal mare. Al contrario, il Conte d'Olanda Guglielmo V ordinò che venisse fatta sorgere in un'area più adatta (De Vrankrijker 1965). Venne così individuato un punto strategico che dominava l'unica via d'accesso da est alla provincia dell'Olanda. Naarden, a differenza di altre città che si sono sviluppate spontaneamente, fu progettata e costruita con intenti precisi, come evidenziato dalla sua pianta regolare [59]. La mappa di Naarden realizzata da Jacob Van Deventer nel XVI secolo rappresenta la più antica testimonianza storica della città ( Fig. 8).




*Fig. 8. Mappa di Naarden create da Jacob van Deventer nel 1565.*

Questo disegno, parte di una sua più ampia raccolta di disegni di città, offre una visione unica di Naarden circa duecento anni dopo la sua fondazione. Sebbene la rappresentazione non sia completamente chiara, la mappa indica la presenza di cinque porte lungo le mura cittadine, collegate da strade che facilitavano gli spostamenti. Nonostante manchino prove certe di modifiche significative nei due secoli successivi alla fondazione, la pianta della città sembra essere rimasta simile a quella originale, con una rete stradale che corrisponde fedelmente a quella del XIV secolo.

La costruzione delle prime fortificazioni di Naarden risale al 1355, quando venne eretto un muro di terra battuta accompagnato da un fossato. Tuttavia, è probabile che solo dopo questa data la città cominciò a essere dotata di

---

*[58] La data di fondazione di Naarden è dibattuta. Durante le celebrazioni del 650° anniversario nel 2000, il professor Piet Leupen, supportato da altri storici, suggerì che la città festeggiasse con un anno di anticipo. Secondo questa teoria, Naarden fu fondata nel 1351, quando il Conte Guglielmo V ottenne il permesso di costruire la nuova città, dopo che la precedente, Oud-Naarden, era stata distrutta dagli inglesi durante la battaglia del 1350. La nuova città sorse nella zona del Ban van Muiderberg.*

*[59] I cittadini di Naarden progettarono la città con grande ingegno, seguendo un piano ordinato che prevedeva strade disposte a griglia, con incroci ortogonali. Le strade principali, disposte in direzione sud-ovest e nord-est, erano attraversate da vie più corte. Questo schema pratico permetteva di raddoppiare la lunghezza rispetto alla larghezza, creando un'area ben definita per la costruzione, con l'ambizioso obiettivo di edificare rapidamente la città, dotandola di mura e un porto per garantire la sicurezza e la prosperità.*

vere e proprie mura difensive (De Vrankrijker 1965). Un documento significativo in questo contesto è lo Schaarbrief del 1442, che stabiliva che nessun cittadino potesse essere ammesso a Naarden senza prima garantire il contributo di quattrocento cavalieri e il versamento di ventimila pietre entro due anni. Questo documento suggerisce che la costruzione e la manutenzione delle mura fosse già un processo in corso a quel tempo. Accanto alle mura e ai fossati, la città si dotò anche di altre strutture difensive, come torri, porte e bastioni, creando un sistema complesso che contribuì a rendere Naarden una delle città più sicure e ben protette dei Paesi Bassi durante il Medioevo.
Nonostante le sue solide fortificazioni, Naarden dovette affrontare numerose difficoltà nei secoli successivi alla sua ricostruzione. La sua posizione, situata al confine tra l'Olanda e lo Sticht, la rendeva un obiettivo frequente durante i conflitti. Già nel XIV secolo, la città fu teatro di numerosi assedi, saccheggi e distruzioni, che ne segnarono profondamente la storia60 (De Bruijn e Schukking 1950).

### 5.2.2 Il Massacro di Naarden e la sua ricostruzione (XVI secolo)

Il 1° dicembre 1572, durante la Guerra degli Ottant'anni, Naarden fu attaccata dalle truppe spagnole. Queste depredarono e distrussero la città, massacrarono la popolazione e rase al suolo le fortificazioni medievali[61] (J. Van der Werf, The restoration work in Naarden 2019). L'evento divenne noto come "Massacro di Naarden".
La ricostruzione iniziò solo nel 1574, dopo il consolidamento della situazione politica, ma fu ostacolata dalla mancanza di manodopera a causa dei tragici eventi precedenti. I lavori furono affidati ad Adriaen Anthonisz, ingegnere e consigliere del Principe Guglielmo d'Orange, che progettò nuove fortificazioni, superando il tradizionale sistema di mura rettilinee (De Bruijn e Schukking 1950). Il progetto di Anthonisz previde una serie di lunghi tratti rettilinei intervallati da torri e bastioni triangolari, disposti per consentire un efficace fuoco incrociato con moschetti e cannoni. Il risultato fu una cittadella con una pianta pentagonale irregolare, con cinque bastioni e un mezzo bastione (Fig. 9). Il progetto di ricostruzione di Naarden includeva l'integrazione del vecchio fossato cittadino, trasformato nell'attuale porto interno. Questo porto, collegato al canale che portava al mare tramite una postierla, aveva un ruolo cruciale nel sistema difensivo della città. Inoltre, le cinque porte strategiche della città, situate a nord, est, sud e ovest, garantivano un accesso controllato (De Vrankrijker 1965).

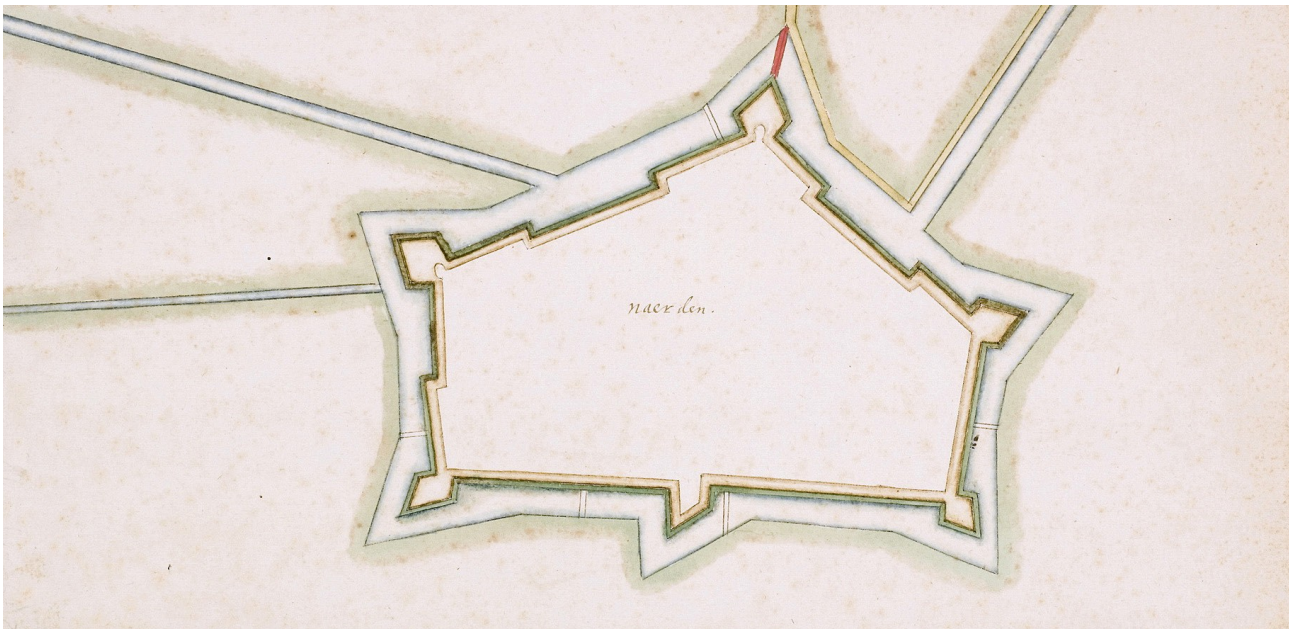



*Fig. 9. Mappa della fortezza di Naarden. Data stimata 30 dicembre 1630.*

[60] *Uno degli eventi più significativi fu la guerra di Utrecht, combattuta tra il 1481 e il 1483. Nel 1481, Naarden fu assediata e saccheggiata dalle truppe di Utrecht, subendo gravi danni. La città fu poi ricostruita, ma le sue fortificazioni furono ulteriormente rafforzate per resistere a futuri attacchi.*
[61] *I soldati spagnoli entrarono nella città dopo un accordo con la popolazione locale, promettendo di non danneggiare nessuno. Tuttavia, una volta dentro le mura, gli spagnoli saccheggiarono la città, appiccarono incendi e uccisero la popolazione. Solo 60 dei circa 3.000 abitanti di Naarden sopravvissero al massacro.*

### 5.2.3 La costruzione della Vecchia Linea di Difesa Olandese (XVII secolo)

Nel 1629, durante la Guerra dei Trent'anni, le truppe spagnole occuparono Naarden, ma la città fu successivamente liberata dagli olandesi, che continuarono a fortificarla (De Bruijn e Schukking 1950). Nel 1649, la mappa delle fortificazioni di Naarden fu pubblicata nell'opera di Boxhorn[62] (Fig. 10Tabella 10) che, a differenza di numerose cartografie dell'epoca, mostra anche strade ed edifici e non solo le fortificazioni come nelle carte che servivano a scopi militari.
Nel giugno del 1672, i piani difensivi dei Paesi Bassi per proteggere Naarden subirono un duro colpo quando la città si arrese senza combattere alle truppe francesi[63]. Sebbene la resa non fosse eroica, fu comprensibile dato che la forza francese era superiore. Le fortificazioni di Naarden, già vulnerabili su alcuni lati, erano circondate da muretti deboli e da un fossato parzialmente ostruito e coperto di vegetazione, il che rese difficile una difesa efficace (De Vrankrijker 1965). Tuttavia, in un atto di ingegno disperato, gli olandesi aprirono una breccia nelle dighe a ovest della città, provocando l'allagamento della campagna circostante. Questo stratagemma si rivelò decisivo: la barriera naturale di acqua e fango bloccò il progresso delle truppe francesi, dando agli olandesi il tempo necessario per organizzare un contrattacco e fermare le ambizioni francesi (J. Van der Werf s.d.).
Nel settembre 1672, un primo tentativo di riconquistare Naarden da parte degli olandesi fallì a causa di una pianificazione insufficiente e la mancanza di truppe. Un secondo assalto, lanciato poco dopo, ebbe lo stesso esito negativo. Nel settembre 1673, il principe Guglielmo III organizzò un terzo attacco, trovandosi però di fronte a una Naarden più fortificata rispetto al 1672 (Fig. 11). Dopo settimane di combattimenti e pesanti perdite, gli olandesi si ritirarono il 12 ottobre 1673, lasciando Naarden sotto il controllo francese fino alla fine della guerra.
Determinato a evitare un lungo assedio, Guglielmo III lanciò una nuova offensiva il 4 settembre 1673 con un esercito di 25.000 uomini. L'attacco prevedeva il bombardamento da terra e da una collina non fortificata, mentre trincee furono scavate sul lato est per avvicinarsi alle mura nemiche. Il 11 settembre, approfittando di un temporale, gli olandesi sferrarono un assalto decisivo, conquistando punti strategici. Esausti, i francesi si arresero il 12 settembre, ponendo fine alla loro occupazione di Naarden.

La riconquista di Naarden segnò l'inizio di una nuova fase nella fortificazione della città, rivelando l'inadeguatezza delle vecchie mura medievali rispetto alle moderne esigenze belliche. I reggenti olandesi, per consolidare i successi ottenuti durante la controffensiva e garantire una difesa più solida, decisero di trasformare il temporaneo ostacolo idrico che aveva respinto i francesi in una struttura permanente. Nacque così l'idea per la "Oude Hollandse Waterlinie", la prima linea di galleggiamento olandese, che prevedeva l'allagamento di vasti territori per creare una barriera naturale e invalicabile, capace di fermare qualsiasi invasione nemica (J. Van der Werf s.d.).
In questo contesto, Menno Baron van Coehoorn, uno dei principali ingegneri militari dell'epoca, giocò un ruolo fondamentale nello sviluppo di un nuovo sistema di fortificazione per Naarden[64]. Questo sistema prevedeva bastioni più grandi e rivellini progettati con maggiore precisione. L'artiglieria venne disposta su più livelli all'interno dei bastioni, aumentando la potenza di fuoco e la flessibilità operativa. Le sporgenze arrotondate, chiamate *Oreillon*, alle estremità dei bastioni, permettevano una copertura più ampia e un tiro incrociato più efficace (De Bruijn & Schukking, 1950).

---

[62] *Esistono diversi disegni delle fortificazioni di Naarden, risalenti al XVII secolo. Questi disegni sono conservati in diverse collezioni, tra cui la Collezione Bodle Nijenhuis, l'Archivio Generale dello Stato e l'Archivio della Casa Reale.*
[63] *I sindaci, dopo un'ora di trattative in una locanda per salvaguardare privilegi e cariche, consentirono l'ingresso del nemico dal sud, mentre la guarnigione olandese si ritirava attraverso il Koepoort.*
[64] *Un errore comune, anche tra esperti del settore, è credere che la nuova fortezza di Naarden sia stata progettata interamente da Menno Baron van Coehoorn, considerato il "capolavoro" di quest'ultimo. In realtà, l'evoluzione delle fortificazioni olandesi è stata un processo lungo, influenzato da molte guerre e con il contributo di diverse figure. Coehoorn non fu l'unico ideatore del nuovo sistema, ma un attento studioso che riuscì a integrare le teorie militari avanzate con le necessità specifiche del territorio olandese.*

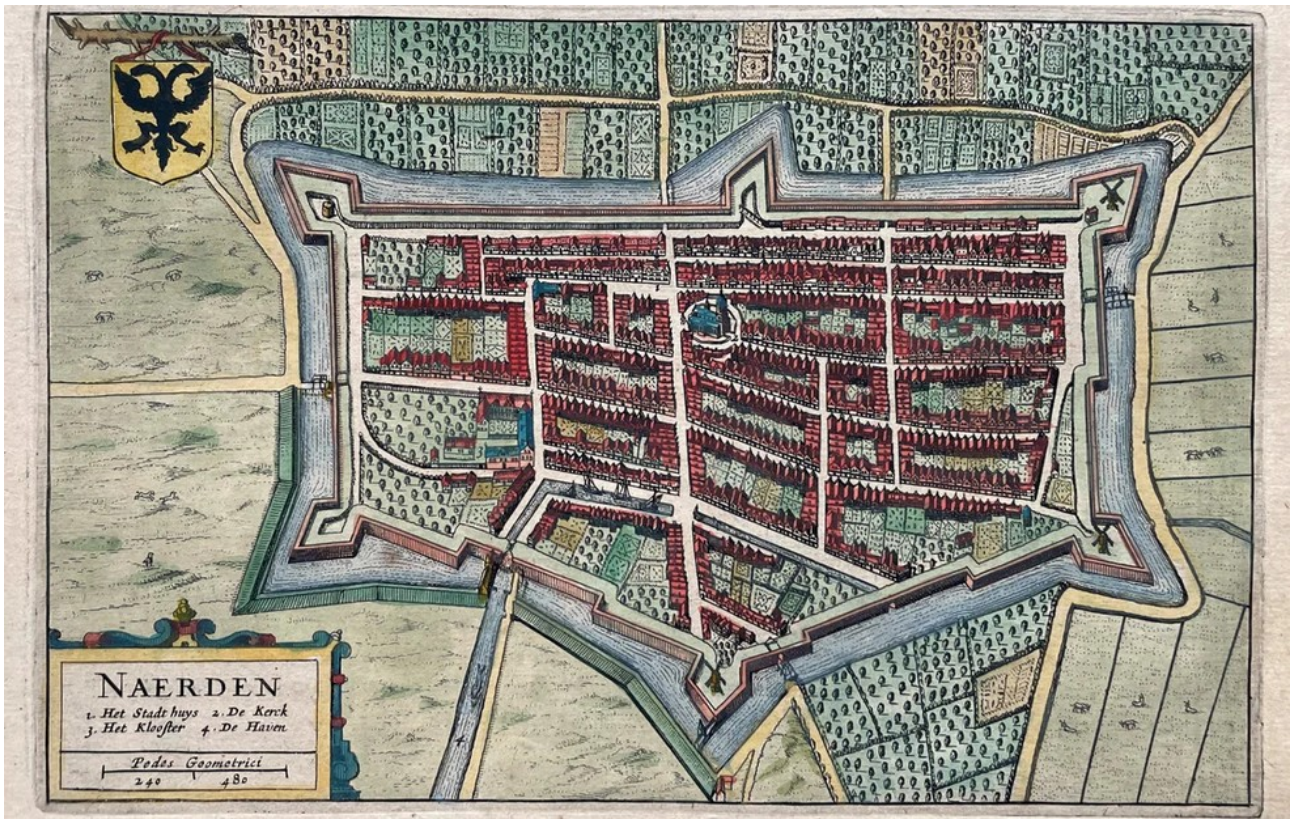


*Fig. 10. Naarden, 1632. Autore Boxhorn.*

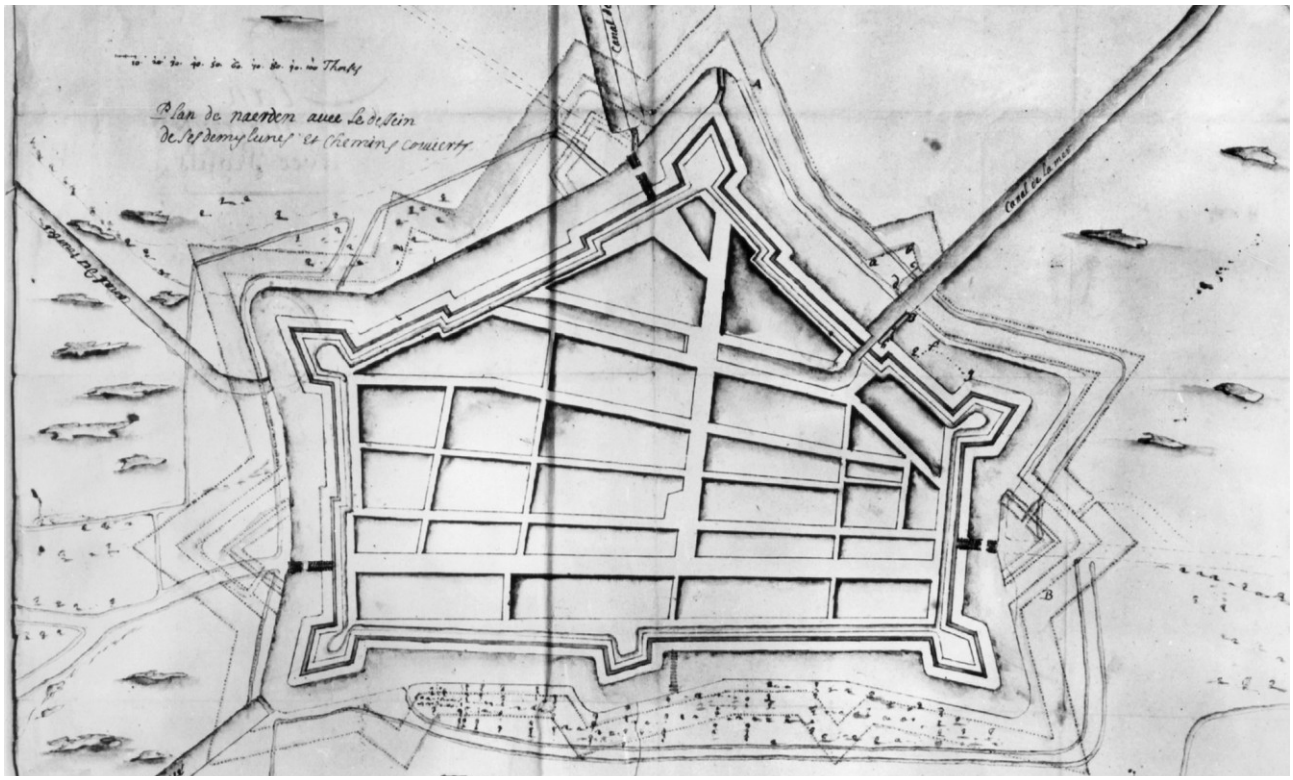


*Fig. 11. Progetto per il miglioramento della fortezza elaborato dai francesi nel 1672, dopo la conquista della città.*

Nel processo di modernizzazione, il *fausse-braye*, un bastione inferiore posto davanti ai bastioni principali, fu eliminato, poiché ritenuto vulnerabile e poco utile. Fu sostituito da una seconda controscarpa, o *involucro loppe*, che circondava la fortezza, migliorando la difesa con postazioni d'armi e piccole fortificazioni. Inoltre, i muri di rivestimento della cintura interna furono abbassati per ridurre la visibilità della fortezza agli occhi del nemico.

La nuova configurazione di Naarden assunse la forma di un esagono quasi regolare, con sei bastioni principali: Oud-Molen (ex Koepoort), Katten, Oranje, Promers, Turfpoort e Nieuw-Molen. Oltre a questi, la fortezza comprendeva cinque rivellini rialzati e un sesto rivellino in terra. I bastioni erano progettati con fronti che presentavano fianchi alti e bassi, cavi e curvati verso l'interno, un design moderno che permetteva di posizionare l'artiglieria in modo ottimale per coprire il fossato e il fronte del bastione nemico.
Dopo tre anni di lavori e una spesa di due milioni di fiorini, la fortezza di Naarden fu completata nel 1685 (De Vrankrijker, 1965).

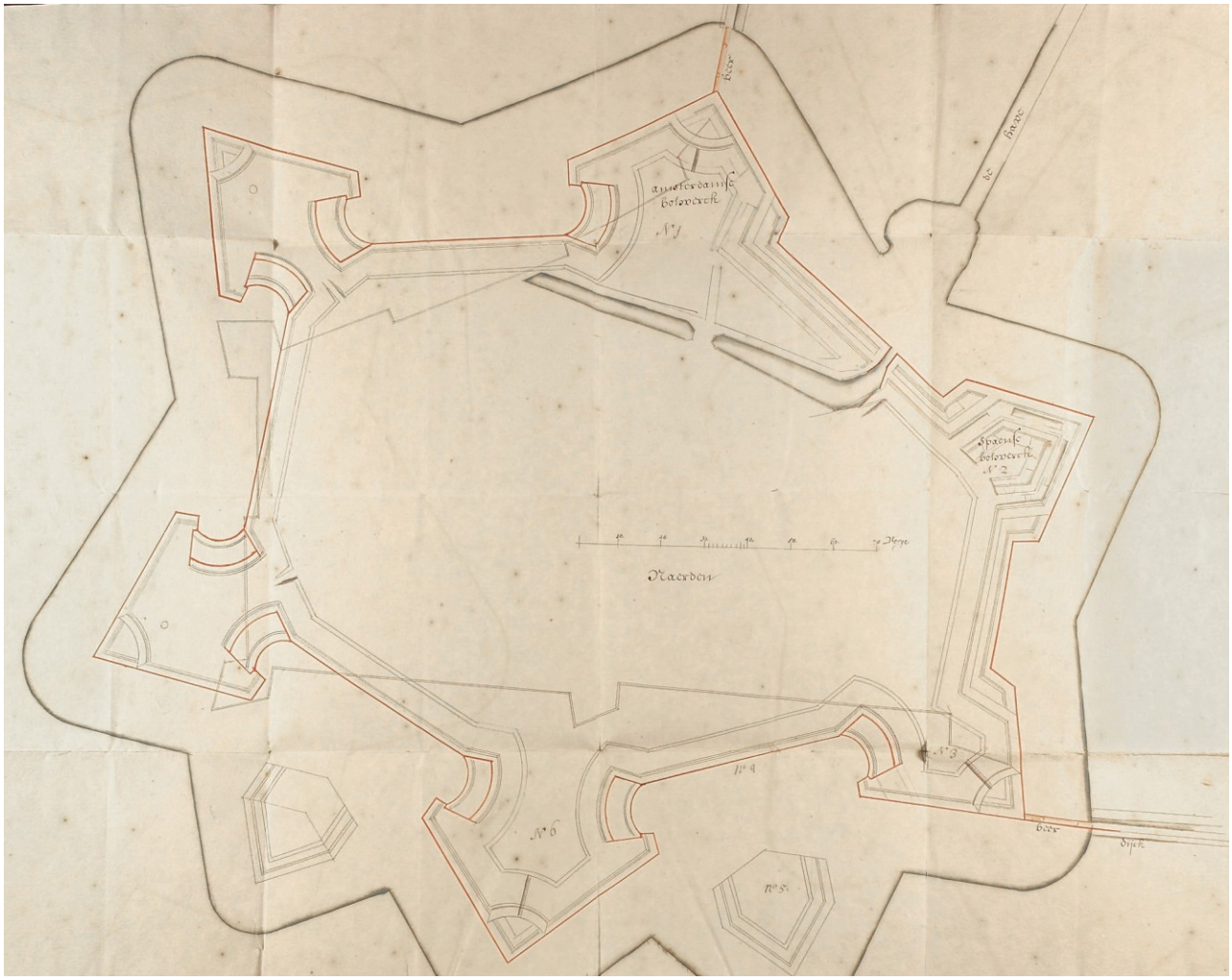



*Fig. 12. Naarden, 1679. Mappa di Naarden come Allegato a una lettera che Coenraad van Heemskerck, in qualità di rappresentante nei Consigli Impegnati, inviò alla città di Amsterdam. Fonte: Archivio Comunale di Amsterdam.*

### 5.2.4 La costruzione della nuova linea di galleggiamento Olandese, NDW (XIX secolo)

Nel 1813, con la fine dell'occupazione francese, i Paesi Bassi iniziarono a reclamare la loro indipendenza. Il generale olandese Krayenhoff, con l'aiuto di prussiani, cosacchi e milizie locali, radunò un esercito per liberare Naarden dall'assedio francese. Nonostante la determinazione del comandante francese, il barone Guétard de la Porte, a difendere la città, l'assedio si protrasse per mesi, con bombardamenti intensi che devastarono la città. Nel marzo 1814, Krayenhoff assunse il comando e, con l'arrivo di rinforzi, la pressione sulla fortezza divenne insostenibile. Il 12 maggio 1814, dopo sei mesi di resistenza, i francesi si arresero, ma la città subì ingenti danni, con 227 delle 391 case distrutte (De Vrankrijker, 1965).

Dopo l'assedio, il governo olandese, con le casse vuote, non intraprese immediati lavori di ricostruzione. Tuttavia, a partire dal 1849, iniziò la ristrutturazione della fortezza, un processo che durò oltre vent'anni e comprese la costruzione di nuove fortificazioni e il miglioramento di quelle esistenti (De Bruijn & Schukking, 1950). Con il cambiamento della strategia difensiva nei Paesi Bassi, emerse la necessità di proteggere Naarden da minacce esterne e nel 1858 furono proposte fortificazioni sulle alture del Gooi. La realizzazione del progetto fu ritardata, ma nel 1866 venne istituita una commissione che confermò l'utilità di forti lungo le strade per Laren e Bussum (De Vrankrijker, 1965). Questo progetto culminò nella creazione della nuova Linea di Galleggiamento Olandese (Nieuwe Hollandse Waterlinie, NDW), un sistema difensivo che si estendeva su 85 km e comprendeva 46 forti. La NDW utilizzava l'inondazione delle terre per creare una barriera invalicabile, ostacolando seriamente l'avanzata nemica. La costruzione della NDW si sviluppò in sei fasi, ciascuna influenzata dai cambiamenti politici e tecnologici dell'epoca.

#### *La prima fase (1815-1828)*

La prima fase della costruzione della Nuova Linea di Galleggiamento Olandese (NDW) ebbe inizio nel 1815, quando il re Guglielmo I, salito al trono dopo la fine dell'occupazione napoleonica, riprese i piani per modernizzare le fortificazioni olandesi. Durante il dominio di Napoleone, erano stati elaborati progetti per estendere la vecchia linea di galleggiamento verso est, includendo Utrecht, ma la sconfitta di Napoleone aveva interrotto questi piani.
Nel 1815, Guglielmo I commissionò al generale Cornelis Kraijenhoff la costruzione di un nuovo sistema di difesa, più moderno e avanzato rispetto al precedente. La prima fase si concentrò su due obiettivi principali: migliorare le capacità di inondazione e costruire un anello di fortificazioni a est di Utrecht. Furono costruite nuove chiuse per favorire l'allagamento delle terre circostanti e vennero erette piccole fortificazioni, le batterie, per difendere queste aree. Inoltre, furono costruiti bastioni in terra e semilune in mattoni a protezione di Utrecht, creando una difesa solida attorno alla città.
Entro il 1828, questa prima fase fu completata, stabilendo una base difensiva importante. La Linea di Galleggiamento Olandese continuò a evolversi nel corso del XIX secolo, adattandosi alle nuove esigenze strategiche e alle innovazioni tecnologiche.

#### *La seconda fase (1840-1865)*

Nel 1830, la secessione del Belgio ridusse significativamente il territorio dei Paesi Bassi, riducendo anche le capacità di difesa. Nonostante la decisione di mantenere una posizione di neutralità, il paese aveva comunque bisogno di forti difese per scoraggiare eventuali aggressori. In questo contesto, la Nuova Linea di Galleggiamento Olandese (NDW) divenne ancora più cruciale.
La seconda fase di costruzione della NDW (1840-1865) si concentrò principalmente su due aspetti: la modernizzazione dei forti esistenti e la costruzione di nuovi forti. I forti costruiti nella prima fase furono ammodernati, con l'aggiunta di edifici in mattoni a prova di bomba, piattaforme di artiglieria sui tetti e una ristrutturazione delle opere di sterro. Questi edifici, che fungevano da caserme e magazzini, erano circondati da fossati e spesso erano costruiti in modo indipendente.
Inoltre, furono costruiti numerosi nuovi forti, seguendo un modello simile a quello dei forti modernizzati, con bastioni di terra e fossati umidi. Gli edifici centrali erano in mattoni, con torri quadrate per le versioni più piccole e casematte circolari per quelle più grandi. Le casematte circolari, alcune a più piani e ispirate all'architettura medievale, erano un'innovazione dell'epoca. Un esempio di torre quadrata è il Fort Honswijk, lungo il fiume Lek, mentre un esempio di casamatta circolare è il Fort Empel, vicino a 's-Hertogenbosch.

#### *La terza fase (1865-1872)*

La terza fase della costruzione della Nuova Linea di Galleggiamento Olandese (NDW) rispose all'introduzione dell'artiglieria rigata, che richiedeva fortificazioni più resistenti. Tra il 1868 e il 1870, furono costruiti tre forti di terra intorno a Naarden, insieme a un quarto forte più grande, dotato di edifici in mattoni a prova di bomba. Questi forti presentavano fossati asciutti e un muro indipendente con feritoie e caponiere. Tra il 1877 e il 1879, due ulteriori forti in terra completarono l'anello difensivo, migliorando la preparazione della NDW alle sfide militari della fine del XIX secolo.

### *La quarta fase (1872-1880)*

La quarta fase della costruzione della Nuova Linea d'Acqua Olandese (NDW), che si sviluppò tra il 1872 e il 1880, fu principalmente una risposta alle nuove minacce rappresentate dall'artiglieria rigata e dalle esperienze vissute durante la Guerra Franco-Prussiana. Con l'introduzione di questa potente artiglieria, emerse la necessità di adattare le fortificazioni esistenti per migliorarne la resistenza agli attacchi.
Durante questa fase, furono apportate importanti modifiche strutturali. Gli edifici in mattoni già presenti nelle fortificazioni furono protetti con spessi strati di terra, una misura volta a salvaguardarli dagli effetti devastanti delle nuove armi da fuoco. Inoltre, vennero aggiunte nuove strutture a prova di bomba, come baracche, rifugi e depositi, che migliorarono la protezione per i soldati e le risorse.
Le mura di terra dei forti, che già costituivano una parte fondamentale della difesa, furono rinforzate e rialzate. Inoltre, alcuni forti ricevettero nuove e ampie caserme.

### *La quinta fase (1885-1914)*

Il periodo tra la fine della Guerra Franco-Prussiana e la fine del XIX secolo fu caratterizzato da un acceso dibattito in Olanda riguardo al ruolo della Nuova Linea d'Acqua Olandese (NDW) nella difesa nazionale. La crescente velocità di mobilitazione delle forze armate sollevava la questione se fosse più efficace potenziare le singole fortificazioni esistenti o sviluppare una linea di difesa che fosse in grado di resistere a un attacco anche senza l'ausilio delle inondazioni. Nonostante le divergenze, la NDW mantenne comunque il suo ruolo cruciale come parte della strategia difensiva del paese.
La quinta fase di sviluppo della NDW, che si colloca in questo periodo di riflessione e cambiamento, vide l'introduzione di modifiche significative nelle fortificazioni. Le armi a lunga gittata, che avevano guadagnato importanza con l'evoluzione tecnologica, vennero posizionate all'aperto, tra e dietro le fortificazioni, le quali iniziarono ad assolvere a funzioni diverse. Oltre a servire come strutture difensive, le fortificazioni divennero magazzini, centri di supporto logistico e luoghi di ritirata per i soldati impegnati in battaglie a corta distanza.
Le modifiche strutturali si concentrarono principalmente sulla protezione degli edifici in mattoni esistenti, che vennero coperti con strati di cemento per aumentarne la resistenza. In alcuni casi, furono aggiunti rifugi in cemento armato, costruzioni discreti ma strategicamente posizionati lungo la linea. Un esempio di questa fase di interventi fu la costruzione di dodici rifugi a prova di bomba lungo la strada coperta di Naarden tra il 1895 e il 1905. Questi cambiamenti erano finalizzati a migliorare la funzionalità e la resilienza della difesa nazionale, adattandosi alle nuove esigenze e tecnologie dell'epoca.

### *La sesta e ultima fase (1914-1940)*

La Prima Guerra Mondiale mise in evidenza le limitazioni delle tradizionali fortificazioni, che non erano più in grado di rispondere efficacemente alle nuove tecnologie e alle tattiche militari in evoluzione. Questo portò alla sesta fase della costruzione della Nuova Linea d'Acqua Olandese (NDW), un periodo relativamente breve ma significativo, caratterizzato da un adattamento alle esigenze belliche del XX secolo.
Durante questa fase, le fortificazioni vennero integrate con nuove strutture, come piccoli edifici in cemento armato, più adeguati a resistere agli attacchi moderni. Inoltre, furono realizzate opere singolari, frutto di ingegno e innovazione, come il viadotto-chiusa, che rappresentava una soluzione per migliorare la protezione delle vie di accesso e la Chiusa Esplosiva, un'opera unica e straordinaria.
La Chiusa Esplosiva, lunga 120 metri, fu progettata per impedire l'accesso nemico attraverso il canale, sfruttando una serie di serbatoi di cemento pieni di sabbia e macerie. In caso di attacco, il fondo dei serbatoi sarebbe stato fatto esplodere, facendo crollare le macerie nel canale e bloccandolo completamente dopo la chiusura delle chiuse. Nonostante la sua grandezza e originalità, la Chiusa Esplosiva non fu mai completata né utilizzata. Oggi, essa rappresenta una delle testimonianze più singolari dell'evoluzione della NDW, essendo ancora esistente principalmente perché la sua demolizione si rivelò troppo costosa.

### 5.2.5 La dismissione della fortezza militare (XX secolo)

All'inizio del XX secolo, la fortezza di Naarden, un tempo baluardo militare di primaria importanza, si trovò ad affrontare un destino incerto. La Prima Guerra Mondiale aveva rivoluzionato il panorama bellico, rendendo obsolete le fortificazioni tradizionali come quelle di Naarden. I progressi tecnologici, in particolare nel campo dell'artiglieria e degli attacchi aerei, avevano reso le fortezze fisse vulnerabili e inadatte a contrastare le nuove tattiche di combattimento (Heyne, 1983). Di conseguenza, il 28 maggio 1926, un regio decreto pose fine allo status di Naarden come fortezza militare.

Come descritto nel libro "Naarden 1350-1950" dal geniere C.A. de Bruijn, la fine di un'epoca militare si concretizzava nella rimozione delle minacciose bocche di fuoco che per secoli avevano difeso la città (Oosterom). Naarden poteva finalmente guardare al futuro con rinnovata speranza, libera dai vincoli imposti dal suo ruolo di baluardo difensivo. Questa decisione aprì la porta a un rinnovamento urbano e ad un'espansione che, fino ad allora, era stata soffocata dal ruolo di fortezza. Naarden era rimasta confinata entro le sue mura con solo due accessi, mentre la Kringenwet, la legge sui circondari, imponeva le zone di rispetto militare intorno alle fortificazioni (Schektema, 1991). La rivoluzione industriale e l'arrivo delle ferrovie avevano portato ad un aumento della popolazione nella regione, ma Naarden non aveva potuto beneficiare di ampliamenti. Questo aveva influito anche sulle condizioni di vita all'interno della comunità che, in un resoconto del consiglio comunale di Naarden dell'ottobre del 1921 vengono definite inaccettabili; la fortezza era sovraffollata, con 3160 persone stipate in 624 abitazioni, molte delle quali occupate da più famiglie (Stam, 2022).

Dopo il 1926, i piani per la demolizione di alcune parti della fortezza e l'ampliamento della città presero forma. Tuttavia, l'ambizione del comune di Naarden si scontrò con un ostacolo: nel 1921, le fortificazioni erano state incluse nel Monumenten van Nederland , una serie di pubblicazioni curate dal governo olandese che rappresenta l'evoluzione di un progetto ambizioso nato agli inizi del XX secolo per catalogare e tutelare il ricco patrimonio storico e artistico del Paese. La demolizione delle fortificazioni storiche generò quindi un dibattito e controversie, mentre la necessità di preservare il patrimonio storico si scontrava con il desiderio di modernizzazione e crescita. Mentre le fortificazioni di Naarden erano ancora di proprietà del Ministero della Guerra, si discuteva la possibilità di trasferirne la manutenzione al comune. L'amministrazione locale accoglieva con favore la proposta, ma a patto di ottenere anche la proprietà e la libertà di intervenire. In altre parole, la presenza delle fortificazioni nell'Elenco Provvisorio dei monumenti, il Monumenten van Nederland, non doveva ostacolare lo sviluppo della città. Naarden si trovava di fronte a un bivio: preservare il suo ricco patrimonio storico, con tutte le limitazioni che ne derivavano, o abbracciare il cambiamento e il progresso, rischiando di compromettere la sua identità? La decisione non era facile, ma il futuro della città ne dipendeva (Van der Werf).

Nel febbraio del 1927, l'idea di preservare le fortificazioni di Naarden come monumento storico guadagnò slancio all'interno della Bond Heemschut , un'organizzazione per la tutela del patrimonio culturale nei Paesi Bassi (De Heer Kloots de Korte & De Vries, 2012). La minaccia di demolizione di queste strutture storiche spinse ad azioni concrete per garantirne la conservazione (De Kruijf). In una lettera del 1° agosto 1927 l'associazione esprime la sua ferma opposizione allo smantellamento delle fortificazioni di Naarden, definendolo un "infame attentato" alla storia del paese. I membri del Bond Heemschut sostengono che la guerra moderna, con i suoi aerei e cannoni a lunga gittata, ha reso obsolete le difese di Naarden, ma sottolineano il valore storico e culturale inestimabile della fortezza, definendola un documento prezioso per le generazioni future. L'associazione non nega le difficoltà economiche che la città sta affrontando, ma ritiene che i benefici monetari derivanti dalla demolizione siano irrisori in confronto al danno irreparabile che verrebbe inferto al patrimonio culturale.

Nel 1927, un articolo pubblicato sul Naarder Courant esprime il timore di molti cittadini di Naarden: la demolizione dei bastioni priverebbe la città della sua identità e del suo fascino storico, trasformandola in un "vecchio villaggio striminzito e fatiscente". L'articolo paragona Naarden a un "venerabile barbone grigio", vestito con splendidi paramenti (i bastioni), che verrebbe spogliato, rivelando i difetti della sua età e perdendo la sua bellezza e imponenza. La grande chiesa e il municipio, senza i bastioni a circondare la città, apparirebbero "strani e dolorosi" . L'articolo presenta la posizione della commissione incaricata di valutare il futuro di Naarden. In contrasto con il piano di demolizione proposto da G.J. Vos, la commissione sostiene che la conservazione delle fortificazioni sia la chiave per il rilancio economico della città.

Nel 1928, il Bond Heemschut istituisce un comitato dedicato alla protezione del patrimonio fortificato in Olanda, con particolare attenzione a Naarden. Nel 1932, nasce la fondazione Stichting Menno van Coehoorn, un'organizzazione dedicata alla conservazione e alla valorizzazione delle fortificazioni e delle strutture militari nei Paesi Bassi (Schukking, 1966) intitolata al celebre ingegnere militare olandese del XVII secolo, con l'obiettivo di preservare le fortificazioni di Naarden. La commissione, composta da quattro esperti , aveva lo scopo di valutare la fattibilità del salvataggio di Naarden. Tuttavia, le divergenze di opinione tra il Comune di Naarden e la Fondazione Menno van Coehoorn non tardarono ad arrivare. Il consiglio comunale pensava di avere finalmente più spazio per espandere la città mentre la fondazione sosteneva l'idea di trasformare Naarden in una "città museo", preservando le sue mura e sviluppando al suo interno musei, eventi culturali e attività educative. Tuttavia, in seguito a discussioni, gli obiettivi vennero ridefiniti, focalizzandosi più genericamente sulla conservazione delle fortificazioni. Lo statuto definitivo venne approvato nel 1932 (De Kruijf).

Tra le figure chiave nella valorizzazione della Fortezza di Naarden, un ruolo di primo piano spetta agli "Amici della Fortezza Naarden". Questa fondazione, nata nel 1954, riunisce un ampio gruppo di esperti e appassionati che si dedicano con instancabile impegno alla tutela e alla promozione di questo prezioso patrimonio storico. L'opera degli "Amici della Fortezza Naarden" si esplica in molteplici direzioni, tra cui la creazione di un museo negli spazi sotterranei del bastione Turfpoort, la raccolta di una vasta collezione di oggetti di valore storico e culturale (armi, uniformi, documenti d'epoca e fotografie) che offrono una testimonianza tangibile del passato della fortezza e del suo ruolo nella storia olandese, l'organizzazione di visite guidate e conferenze che coinvolgono persone di tutte le età, trasmettendo loro la conoscenza e l'amore per il luogo (De Vrankrijker, 1965).

Nel 1961, la fortezza passò sotto la gestione del Ministero dell'O.K. & W. (Opere non a uso militare), che si occupa di siti come Oud-Molen, Katten, Oranje e Promers all'interno di una linea a pochi metri dai bastioni e da Fort Ronduit. Il sindaco di Naarden è responsabile della gestione ordinaria e, in collaborazione con le autorità militari ancora presenti in città, si adopera per il miglioramento della fortezza. I fondi per questi interventi sono stati stanziati gradualmente, permettendo solo misure urgenti come la ripiantumazione di alberi e l'avvio del restauro delle mura che durò venticinque anni (De Vrankrijker, 1965).

## 5.3 La configurazione attuale

Naarden si presenta oggi come una città dal doppio volto, suddivisa tra il suo centro storico e la zona esterna che comprende la cintura di fortificazione, i bastioni, i rivellini, le cortine e i fossati con i canali d'acqua dolce. Mentre il cuore della città conserva un ricco patrimonio storico e architettonico, l'area esterna di più recente costruzione testimonia il suo passato militare, con spazi che attendono di essere rifunzionalizzati.

### 5.3.1 Il centro storico

Il centro storico di Naarden si presenta come un tessuto urbano compatto e coerente, dove l'edilizia gioca un ruolo fondamentale nella definizione del carattere della città. Gli edifici si distribuiscono lungo fronti continui, contribuendo a formare uno spazio urbano ordinato ma allo stesso tempo ricco di sfumature. La densità abitativa è piuttosto elevata, ma la scala degli edifici rimane contenuta, con costruzioni che variano generalmente tra uno e due piani, coperte da tetti inclinati oltre i 45 gradi. La grande chiesa cittadina, la Grote Kerk e l'antico municipio emergono come elementi architettonici di rilievo, offrendo punti di riferimento all'interno del panorama urbano.
Le abitazioni lungo le strade principali – come la Peperstraat – presentano altezze maggiori e una maggiore continuità, mentre quelle collocate nelle vie secondarie si distinguono per volumi più modesti e articolati. Anche lungo i margini della città si riscontra una certa coerenza tipologica, seppur con una gerarchia meno definita.
Dal punto di vista stilistico, l'architettura della città storica si caratterizza per un linguaggio sobrio, segnato dalla ripetizione dei moduli edilizi e dalla linearità delle facciate. Tuttavia, all'interno di questa struttura ordinata, si nota una gradevole varietà architettonica, che contribuisce ad arricchire l'ambiente urbano senza romperne l'armonia. I materiali utilizzati rafforzano questa coesione: mattoni in tonalità calde costituiscono la base muraria prevalente, con alcune facciate intonacate in colori chiari. Le finestre e le porte, realizzate principalmente in legno, insieme alle tegole rosse dei tetti – a volte leggermente smorzate – contribuiscono all'identità visiva del centro.

All'interno di questa struttura edilizia si inserisce la rete viaria, che risale per gran parte alla fondazione della città nel 1350. Il tracciato stradale non ha subito modifiche significative nel tempo e rispecchia un'impostazione razionale, con una chiara distinzione tra le strade principali e quelle secondarie. Le prime, più larghe e regolari, erano storicamente destinate al commercio e alla vita pubblica. Le seconde, più strette e articolate, accoglievano invece attività artigianali, magazzini e residenze.
Oggi le funzioni commerciali si concentrano prevalentemente lungo la Marktstraat, tra Cattenhagestraat e Adriaan Dortsmanplein e nella Sluisstraat, nei pressi dell'Arsenaal. Il resto della città mantiene una vocazione residenziale, integrata da edifici pubblici, chiese, scuole e musei.
La Marktstraat rappresenta inoltre l'unica via trasversale di rilievo che attraversa tutta la città, mentre le altre strade secondarie, meno regolari, generano spazi urbani più intimi e frammentati.

Le pavimentazioni contribuiscono al carattere storico del centro, grazie all'uso diffuso di mattoni di vari formati, colori e tecniche di posa. Alcune vie, come Turfpoortstraat e Kloosterstraat, conservano tratti con ciottoli di grès per il passaggio veicolare e bordi rifiniti con mattoni gialli disposti in modo tradizionale. Infine, alcuni spazi aperti, un tempo appartenenti a fattorie urbane, rappresentano oggi un importante patrimonio culturale e storico, offrendo interessanti potenzialità per futuri interventi di valorizzazione.

### 5.3.2 Le fortificazioni

Il sistema difensivo di Naarden è composto da un insieme articolato di elementi architettonici e paesaggistici – bastioni, rivellini, cortine e fossati – che conferiscono alla città un rilevante valore storico, militare e paesaggistico.
A partire dal 1880, fu introdotto un sistema alfanumerico di identificazione per gli edifici militari, principalmente quelli "a prova di bomba" (bombvrij), collocati lungo bastioni, cortine e rivellini. Questo sistema, concepito per agevolare l'orientamento dei militari, assegnava a ciascun edificio una lettera progressiva in base alla posizione, iniziando dalla caserma sul bastione Katten (lettera A) e proseguendo alfabeticamente lungo l'intero perimetro difensivo. Dopo il bastione Turfpoort, la sequenza riprendeva con lettere prime (A', B', ...), fino a concludersi al Fort Ronduit con le lettere S', T' e U'. Alcune eccezioni – come la Promerskazerne (M) o la Utrechtse Poort – conservano un nome proprio e non seguono la sequenza lineare. In zone complesse, come la Bedekte Weg, le lettere assegnate si comprendono solo in chiave planimetrica, poiché corrispondono specularmente a edifici sul fronte opposto. In

alcuni casi si usano sigle alfanumeriche (es. W1, Y1, Z1) per identificare rifugi in rapporto ad altri edifici (J. Van der Werf 2021).
Accanto al sistema per edifici bombvrij, esisteva una seconda sequenza alfabetica per edifici non protetti, da A a Z. Oggi questo sistema è in disuso, in quanto molti edifici sono stati demoliti o hanno assunto denominazioni proprie. La Gele Loods, ad esempio, corrispondeva all'edificio H, mentre lo Spaanse Huis era identificato come edificio D. Tutti questi dati furono raccolti nel *Registro della Fortezza di Naarden* (1879–1913), documento che conserva una precisa testimonianza dell'evoluzione costruttiva e funzionale della fortificazione.

### *5.3.3* I bastioni

Naarden conserva sei bastioni principali, realizzati e modificati tra il XVI e il XIX secolo. Ognuno di essi presenta specifiche caratteristiche morfologiche e funzionali, riflettendo le diverse fasi storiche e tecniche della difesa urbana. Questi bastioni costituiscono il fulcro della geometria difensiva a stella e sono espressione di una stratificazione storica che documenta l'evoluzione della città come presidio militare.
La regolarità geometrica del sistema bastionato risponde a una logica poliorcetica mirata alla massima efficienza del fuoco incrociato, alla riduzione delle zone morte e alla capacità di resistere prolungatamente agli assedi. Ciascun bastione è concepito per coprire con il tiro radente le cortine adiacenti e per sovrapporsi parzialmente all'area d'azione dei bastioni contigui, assicurando la continuità del fronte difensivo e il supporto reciproco delle artiglierie. Le gallerie di contromina e le casematte poste all'interno delle strutture murarie testimoniano un livello avanzato di specializzazione costruttiva, con l'adozione di dispositivi di protezione passiva contro le artiglierie nemiche e le tecniche di mina.
Dal punto di vista costruttivo, si rilevano differenti fasi edilizie: le strutture più antiche, risalenti alla fortificazione cinquecentesca, presentano apparecchi murari in laterizio disposti su zoccolature in pietra, con murature a scarpa e quote irregolari; interventi successivi del XVII secolo evidenziano un aggiornamento coerente con le evoluzioni dell'artiglieria e con i dettami della scuola olandese di ingegneria militare, ispirata ai principi di Simon Stevin e più tardi di Menno van Coehoorn. L'articolazione degli spazi interni è funzionale sia alla logistica militare che alla vita civile, secondo una concezione olandese della "cittadella urbana" in cui il sistema difensivo si integra con il tessuto insediativo. In tal senso, l'organizzazione della viabilità interna, la presenza di magazzini, mulini, edifici per l'amministrazione e l'alloggio della guarnigione riflettono un modello autosufficiente, pensato per la resistenza prolungata sotto assedio e per il controllo territoriale permanente.
L'infrastruttura idraulica svolge un ruolo cruciale nell'intero impianto difensivo: i fossati possono essere riempiti o svuotati grazie a un complesso sistema di chiuse, derivazioni e canali connessi al più ampio sistema di gestione delle acque del polder, trasformando la fortezza in un'isola artificiale controllabile, difficilmente accessibile per le truppe assedianti. L'interazione tra architettura fortificata e paesaggio controllato è un tratto distintivo della scuola olandese e a Naarden si manifesta in forma pienamente matura e coerente con le strategie della difesa in profondità.
Con la progressiva dismissione della funzione bellica, parte di queste strutture ha subito trasformazioni significative. Alcuni bastioni conservano ancora l'impostazione originaria, altri sono stati oggetto di interventi di riconversione: edifici bombvrij sono stati adattati a usi culturali o espositivi, mentre le superfici verdi dei bastioni sono oggi parte integrante del sistema paesaggistico urbano.

#### *Bastione Promers*

Il Bastione Promers, situato a sud-est della fortezza di Naarden tra i bastioni Oranje e Turfpoort, rappresenta uno dei bastioni più estesi e strategici dell'intero sistema difensivo. Intitolato a Hendrik Promers, impresario responsabile della costruzione nel 1679, il bastione si colloca lungo l'asse viario storico verso Amersfoort, conferendogli un ruolo chiave nel controllo del territorio.
Dal punto di vista strutturale, presenta caratteristiche morfologiche e funzionali rilevanti: è dotato di 20 cantine per artiglieria – un numero superiore rispetto agli altri bastioni – e di nove piazzole per cannoni protette da traversi, collegate da una passerella interna accessibile mediante due rampe che conducono al cortile centrale. Quest'ultimo, ubicato a circa 1 metro s.l.m., funge da nodo distributivo interno. I fianchi del bastione, curvi sul lato di terra, sono raccordati da murature a livelli differenziati: 10 metri s.l.m. sulla fronte e circa 7,5 metri s.l.m. sui lati. Nel cuore del bastione si trova la Caserma Promers, edificio del XIX secolo destinato all'alloggio e alle esercitazioni, affiancata da altre tre strutture coeve: un edificio terminale contenente tre mortai-cantine (kanonkelders) e due magazzini per artiglieria integrati nella protezione anteriore (edifici Q e S). Due gallerie sotterranee in muratura del XVII secolo collegano il cortile centrale ai fianchi bassi, garantendo la mobilità interna. Le cantine anteriori e quelle presso le cortine laterali risalgono anch'esse al XVII secolo.

#### *Bastione Turfpoort*

Il Bastione Turfpoort si trova nel settore sud-occidentale della fortezza di Naarden, in posizione strategica rispetto alla vecchia strada per Bussum e al rilievo collinare esterno. È un bastione riempito con punta acuta, caratterizzato da una muratura di protezione sul lato del fossato e da fianchi curvi su due livelli (fianchi alti e bassi), secondo il modello difensivo terrestre della fortezza.
Le quote altimetriche della muratura frontale variano da 9,4 a 10,4 m s.l.m. (NAP), mentre i fianchi alti raggiungono circa 7,5 m s.l.m. Dietro le murature si trovano piazzole per cannoni protette da traversi in terra perpendicolari, con sporgenza di 1-2 m. Nel XIX secolo, la parte posteriore destra è stata rinforzata con una muratura in terra a 10,2 m s.l.m.
Le infrastrutture sotterranee comprendono cantine per artiglieria e corridoi d'ascolto risalenti al XVII secolo (edifici W, Z, V e A'), oltre a edifici militari del XIX secolo: una casamatta per mortai e deposito munizioni nella punta (edificio Y) e un magazzino per materiale da guerra dietro il fianco sinistro (edificio X).
Tra il 1967 e il 1969, sono stati effettuati interventi di restauro strutturale: consolidamento della parete di rivestimento, recupero delle poterne, restauro delle facciate e sistemazione del terreno circostante. Una modifica rilevante riguarda il fianco basso sinistro, dove fu rimossa una traversa e aggiunti fori di tiro.

Dal 1955 il bastione ospita il Museo della Fortezza Olandese. Storicamente, vi era un ponte pedonale in legno ("Kippenbrug", 1879), smantellato durante l'inverno del 1944-45 per legna da ardere e infine rimosso nel 1969 per ampliare il museo.

### *Bastione Nieuw Molen*

Il Bastione Nieuw Molen è situato sul lato ovest della fortezza di Naarden, tra i bastioni Turfpoort e Oud Molen. Presenta fianchi curvi su due livelli (alti e bassi), conformi allo schema difensivo terrestre della fortificazione. La muratura frontale, lunga 145 m, varia in altezza da 8,5 a 10 m s.l.m.
Sotto la muratura di protezione anteriore si trovano cantine per artiglieria e corridoi di ascolto del XVII secolo (edifici C' e F'), cui si aggiungono ulteriori cantine nelle cortine angolari presso i fianchi bassi (B' e G').
Un elemento distintivo è la bombelle: muratura curva alta 10 m che collega le protezioni laterali circa 50 m prima della punta del bastione. Dietro di essa si trova una passerella carrabile servita da due rampe laterali, utilizzata per posizionare e movimentare i cannoni. Davanti alla bombelle, una piccola saillant abbassata permetteva il tiro radente sul fossato e sulla strada esterna, raggiungibile solo tramite poterna coperta (b).
Il terreno centrale, rialzato in due fasi, va da 5,8 m nella gola a 8,4 m dietro la bombelle. Durante il rinnovamento del 1877–1879 vi furono costruiti un laboratorio e un deposito munizioni, demoliti negli anni '50 per un tentativo di ripristino della configurazione seicentesca.
Nel 1975 furono restaurate le murature e gli accessi alle cantine. Le coperture in ghisa dei camini di ventilazione furono sostituite da condotti in mattoni. Tuttavia, il successivo intervento del 1995 — trasformazione del bastione in parcheggio — ha compromesso il ripristino storico: il terreno è stato pavimentato, sono stati installati sistemi di illuminazione, recinzioni in cemento, scale e nuovi accessi.
Ad oggi, solo l'area di punta conserva un aspetto coerente con l'originale struttura del XVII secolo.

### *Bastione Oud Molen*

Il Bastione Oud Molen si trova sul lato nord-occidentale della fortezza di Naarden, in posizione intermedia tra i bastioni Nieuw Molen e Katten. La sua configurazione è fortemente influenzata dalla differenza tra i sistemi costruttivi impiegati nella parte interna e in quella esterna della fortezza, rendendo le due metà del bastione molto diverse tra loro. Il lato nord-est, rivolto verso il mare, ha un fianco breve, rettilineo e protetto da una muratura bassa, senza cantine per i cannoni. Al contrario, il lato sud-ovest, rivolto verso terra, presenta un fianco curvo più lungo, su due livelli (alto e basso), privo di muratura di protezione, ma dotato di sette cantine per cannoni (cinque nell'edificio K' e due nell'edificio I').
La morfologia attuale del bastione risale in gran parte al XIX secolo, ad eccezione della punta, che ha mantenuto la configurazione originaria del XVII secolo. Le murature anteriori e il fianco destro sono alti circa 9 metri e proteggono numerosi piazzali per cannoni, coperti da traversi in terra alti fino a 10 metri. Il fianco sinistro è invece più basso di circa due metri, ma presenta anch'esso postazioni armate con coperture simili.
A una quarantina di metri dalla punta, le due facce del bastione sono unite da una struttura arcuata in muratura chiamata bombelle, risalente al XVII secolo e alta oltre 9 metri. In origine, tutta la bombelle era percorsa da una

passerella per il posizionamento dell'artiglieria. Oggi, questa sopravvive nella metà occidentale, mentre nella parte orientale, nel XIX secolo, sono stati costruiti tre nuovi piazzali per cannoni, coperti da terra e traversi. Davanti alla bombelle si estende la punta bassa del bastione, con una muratura di soli 5,5 metri, che ospita un piazzale aperto ancora nella sua configurazione seicentesca. Questa zona è raggiungibile solo attraverso un passaggio sotterraneo (poterna c).
Il terreno del bastione è in condizioni molto degradate: diverse rampe sono scomparse e molti piazzali sono difficilmente riconoscibili.
Oltre alla struttura difensiva, il bastione ospita numerosi edifici storici, tra cui spicca l'Arsenale del XVII secolo, situato nella gola del bastione. Nel XIX secolo furono realizzati anche edifici "antibomba" con diverse funzioni: una caserma-ospedale (edificio L'), un deposito di munizioni con ghiacciaia e ricovero per cannoni (M') e una panetteria-macelleria (N'). Nella stessa epoca, anche alcuni edifici della vicina area di Kooltjesbuurt furono assorbiti in ambito militare. L'intera area tra il porto e le mura della fortezza venne così militarizzata. Durante il XX secolo furono costruiti ulteriori edifici, tra cui una postazione di guardia presso il ponte di accesso al bastione.

### *Bastione Katten*

Il Bastione Katten si trova sul lato nord-est della fortezza di Naarden, tra i bastioni Oud Molen e Oranje. Sebbene sia uno dei più piccoli, ha sempre avuto un ruolo cruciale nella difesa, in quanto situato in una posizione particolarmente esposta agli attacchi provenienti da est, lato dell'ex Zuiderzee. La sua configurazione riflette il sistema costruttivo adottato lungo il fronte costiero della fortezza, con una struttura più lineare rispetto ai bastioni della zona terrestre.
Il bastione presenta una punta e fianchi appuntiti, con due facce anteriori lunghe circa 111 metri ciascuna. I fianchi sono rettilinei e si innestano direttamente nelle cortine adiacenti, formando fianchi bassi raggiungibili solo attraverso queste ultime. Le murature di protezione misurano circa 7,2 metri di altezza sul lato est e nord-ovest, mentre il lato che si affaccia sul fossato presenta un rivestimento in muratura alto tra i 3,2 e i 3,5 metri.
Dietro la muratura del lato est si estende una passerella, accessibile da rampe poste sul retro del bastione, su cui si trovano quattro piattaforme per cannoni, separate da traversi in terra per garantire protezione laterale. Sul lato sinistro è presente una caserma, dalla quale parte una strada che conduce a una casamatta situata nella punta del bastione.
Elemento centrale e caratteristico del Bastione Katten è la "kat", una grande elevazione di terra realizzata nel XVII secolo, che occupa interamente l'interno del bastione e da cui quest'ultimo prende il nome. La kat ricalca la forma del bastione, sporgendo leggermente oltre i suoi bordi e presenta una muratura di protezione la cui sommità raggiunge gli 11 metri sul livello del mare. Una rampa consente di accedervi dalla gola del bastione. Sulla kat si trovano quattro piazzali aperti per i cannoni, protetti da traversi in terra rialzati di circa un metro sopra la muratura. Al suo interno sono presenti anche un rifugio per la truppa e un deposito per cannoni (remise), collocati sotto una copertura in terra che raggiunge i 15,5 metri di altezza: è il punto più elevato dell'intera fortezza.
Durante la riorganizzazione difensiva tra il 1873 e il 1875, il bastione fu armato con una batteria di quindici cannoni. I pezzi da 9 cm, destinati alla difesa ravvicinata, erano collocati sui fianchi bassi. Sulle facce e sul fianco destro vennero posizionati cannoni da 12 cm, mentre i più pesanti, da 16 cm, trovavano posto sulla kat, da dove potevano coprire distanze maggiori con il tiro.

### *Bastion Oranje*

Il Bastione Oranje si trova sul lato est della fortezza di Naarden, tra i bastioni Katten e Oranje. Si trova al confine tra la zona interna e quella esterna del sistema di dighe. Dalla punta del bastione parte una muratura di pietra che attraversa il fossato della fortezza, la "Oostbeer", che si collega alla "Oostdijk" e che un tempo faceva parte della diga di protezione contro l'acqua salata. La posizione del bastione, di fronte alla Oostdijk, lo rendeva un punto strategico, poiché la diga offriva un accesso facile per gli attaccanti, che rimaneva fuori dall'acqua anche durante l'inondazione della Waterlinie.
A causa del diverso sistema di fortificazione utilizzato per la zona interna e quella esterna, le due metà del bastione presentano configurazioni molto diverse. La metà settentrionale, che originariamente si affacciava sul mare, ha una fronte relativamente breve e un fianco molto corto e diritto. Questo fianco aveva una difesa in terra (vorwal) e un fianco alto dietro, che teoricamente permetteva di disporre i cannoni su tre livelli. Tuttavia, questa disposizione fu

modificata durante il rinnovamento della fortezza alla fine del XIX secolo, quando vennero costruiti due rifugi per cannoni su questo fianco (parte del complesso di caserma Oranje). La metà settentrionale non conserva più edifici del XVII secolo, poiché durante il rinnovamento furono demoliti il passaggio sotterraneo del XVII secolo e la struttura della punta del bastione.
La metà meridionale, rivolta verso terra, segue una configurazione simile a quella degli altri bastioni interni alla diga. La fronte e il fianco di questa sezione sono significativamente più lunghi, con il fianco che è curvato e diviso in due livelli (fianco alto e basso), per migliorare la protezione. Il fianco è stato ritirato dietro l'angolo tra la faccia e il fianco del bastione (spalla). Questa metà del bastione conserva gli edifici tipici dei bastioni interni, tra cui un edificio con cinque rifugi per cannoni dietro la faccia del bastione e un edificio con due rifugi per cannoni alla fine della cortina Oranje-Promers, vicino al fianco basso.
Le strutture del bastione sono rimaste in gran parte invariate rispetto al rinnovamento del XIX secolo. La muratura di protezione sulla parte anteriore del bastione è alta 10 metri. Dietro la muratura corre una passerella, con diverse postazioni aperte per cannoni, separate da traversi. Due rampe conducono dal terreno centrale alla passerella. La cima della muratura del fianco destro è a 7,6 metri sopra il livello del mare.
L'Oranje è un bastione vuoto, il che significa che il terreno centrale non è stato rialzato, ma si trova a soli 0,5–1 metro sopra il livello stradale. Tra il 1875 e il 1878 furono costruiti tre edifici nel bastione: una caserma con due rifugi per cannoni, un edificio con tre mortai e un deposito di polvere da sparo. Il bastione è stato restaurato tra il 1984 e il 1986, con il restauro non solo dei muri di rivestimento e delle facciate degli edifici, ma anche delle strutture in terra. Anche la Oostbeer, situata di fronte al bastione, è stata restaurata.

### 5.3.4 I rivellini

Situati nei fossati tra i bastioni principali, questi bastioni intermedi avevano il compito di rafforzare la difesa della fortezza, creando ostacoli aggiuntivi per gli attaccanti e offrendo postazioni strategiche per il posizionamento di artiglieria e fanteria. Ogni rivellino era unico nella configurazione: alcuni erano provvisti di rifugi per soldati, altri di piattaforme aperte per cannoni e spesso includevano passerelle, rampe e postazioni di tiro protette da traversi in terra.

Tra questi, il Rivellino Oranje-Promers si distingue per la sua complessa trasformazione tra il 1877 e il 1879, quando vennero costruiti rifugi e piattaforme di tiro sopraelevate. Durante la Prima Guerra Mondiale fu armato con batterie di artiglieria e nel tempo è stato adattato a usi civili, con la creazione del parco Comenius e un percorso ciclopedonale. Analogamente, il Rivellino Promers-Turfpoort, inizialmente privo di edifici, fu parzialmente demolito all'inizio del XX secolo e soprannominato "Isola dei Conigli". Fu però restaurato negli anni '70, recuperando la muratura secondo lo stile originale del XVII secolo.
Il Rivellino Turfpoort-Nieuw Molen, danneggiato e in parte demolito all'inizio del secolo scorso, fu collegato alla fortezza tramite una strada nel 1939 e trasformato in giardino pubblico. Restaurato nel 1981-1982, conserva tracce architettoniche importanti come supporti interni alla muratura e un monumento commemorativo. Al contrario, il Rivellino Nieuw Molen-Oud Molen ha mantenuto una funzione militare fino al XX secolo, con la presenza di una caserma e di un deposito munizioni. Restaurato tra il 1980 e il 1982, è uno dei pochi con edifici ancora visibili e una scala storica che misura il livello dell'acqua.
Altri ravelijn, come Oud Molen-Katten e Katten-Oranje, non furono mai dotati di strutture murarie complete e oggi si trovano in condizioni di avanzato deterioramento. Sono ricoperti di vegetazione e presentano resti visibili solo in parte, come murature in terra, tracce di vecchi porticcioli o piattaforme di tiro ormai scomparse. Tuttavia, anche questi elementi meno conservati contribuiscono alla comprensione della morfologia difensiva della fortezza.

Nel tempo, i rivellini subirono modifiche significative in risposta ai cambiamenti tecnologici e alle esigenze difensive. Durante la Prima Guerra Mondiale, molti furono riadattati per ospitare batterie di artiglieria, assumendo un ruolo attivo nella strategia militare olandese. Successivamente, nel corso del XX secolo, diversi rivellini vennero danneggiati o demoliti per lavori stradali, salvo poi essere restaurati a partire dagli anni '70, con interventi che cercarono di recuperarne le forme originali, in alcuni casi trasformandoli in spazi pubblici o parchi commemorativi. In certi casi, si conservarono caserme, rifugi o resti di postazioni difensive, mentre in altri furono ricostruite le murature in terra e le rivestiture, spesso riutilizzando i materiali originari ritrovati nel fossato.
Attualmente, i rivellini sono integrati nel paesaggio urbano e naturale di Naarden, visibili come spazi verdi, percorsi ciclopedonali e aree di memoria. Pur variando per grado di conservazione e dimensioni, conservano tracce evidenti della funzione originaria e dell'evoluzione storica della fortezza. Alcuni sono in stato di deterioramento e coperti da vegetazione, altri accuratamente restaurati e dotati di elementi architettonici significativi, come murature curve, rampe o contrafforti visibili. Insieme, testimoniano la capacità della città di adattare, preservare e valorizzare il proprio patrimonio difensivo, mantenendo vivo il legame tra la struttura militare storica e l'identità urbana contemporanea.

### *5.3.5* Le cortine

Le cortine della fortezza di Naarden rappresentano elementi fondamentali del sistema difensivo, collegando i bastioni lungo l'intero perimetro e adattandosi nel tempo alle esigenze militari e civili. In origine concepite per proteggere la città e sostenere l'artiglieria, le cortine sono state in parte modificate o danneggiate nel corso dei secoli, ma mantengono ancora oggi importanti testimonianze storiche e architettoniche.

Sul lato sud-est della fortezza si trova la cortina tra i bastioni Oranje e Promers, caratterizzata da un parapetto rettilineo con cammino di ronda e numerose postazioni per cannoni, separate da traversi. Qui si trova anche la Utrechtse Poort, realizzata nel 1877 e il percorso è interrotto dalla strada Kapitein Meijerweg, costruita nel 1915. Nelle vicinanze si conservano due edifici del XVII secolo con cantine per cannoni, oltre a strutture militari come la Gele Loods e l'ex mensa, oggi adibita a ufficio turistico. Proseguendo verso sud-ovest, la cortina tra i bastioni Promers e Turfpoort conserva anch'essa un cammino di ronda con parapetto di terra e protezione muraria sul lato del fossato, anche se le sue estremità sono ormai in gran parte scomparse. Vi si trovano solo poche bocche d'aria delle cantine per cannoni.
La successiva cortina, tra Turfpoort e Nieuw Molen, è una delle più compromesse: ha perso gran parte delle strutture originarie, come rampe, traversi e postazioni di artiglieria, a causa di interventi novecenteschi. La costruzione della strada Burgemeester Van Wettumweg nel 1939 e la creazione di un accesso al parcheggio sul bastione Nieuw Molen nel 1997 hanno ulteriormente trasformato l'area. Anche la cortina tra Nieuw Molen e Oud Molen ha subito significative alterazioni. Sebbene in origine presentasse una lunga mura di ronda con passaggi sotterranei e cantine per cannoni alle estremità, le strutture di terra del XIX secolo, tra cui rampe e paratie protettive, sono ormai scomparse. L'apertura della Amsterdamsestraatweg nel 1915 ha interrotto il tracciato originario e alterato il paesaggio difensivo. Lungo il porto si trovava una paratia che proteggeva la fortezza dagli incendi, oggi non più esistente, così come il passaggio coperto chiamato Kleine Pijp, demolito insieme alla vecchia Amsterdamse Poort.
Sul lato settentrionale, la cortina tra Oud Molen e Katten faceva parte del sistema difensivo contro l'acqua marina. Era dotata di un voorwal, una muraglia protettiva anteriore accessibile tramite poterne seicentesche e presentava alcune strutture di artiglieria, oggi in stato di degrado. Il percorso è interrotto dalla Zeebrug, antico ponte sul porto, presso cui si trovano resti di postazioni militari. La cortina tra Katten e Oranje, infine, è uno dei tratti meglio conservati, almeno nella sua metà settentrionale, dove si mantiene la configurazione originaria con parapetto, voorwal e cammino di ronda. Qui sono ancora visibili passaggi sotterranei del XVII secolo e un edificio per l'artiglieria realizzato nel 1877. La metà meridionale della cortina è stata invece pesantemente modificata nel XIX secolo per adattarsi a nuove esigenze difensive: vennero costruite piazzole per cannoni, depositi di munizioni e una nuova elevazione di terra sul lato interno. Interventi di restauro del 1987 hanno permesso di recuperare in parte il terrapieno e le murature.

## 5.4 Il caso di studio

Per comprendere più da vicino l'evoluzione architettonica e funzionale della fortezza di Naarden, è utile soffermarsi su un caso emblematico: la Caserma Promers, situata sull'omonimo bastione. Questo complesso rappresenta un esempio significativo di come le esigenze difensive, le strategie militari e le trasformazioni urbanistiche abbiano plasmato nel tempo le strutture fortificate.

*La Caserma Promers*

La Caserma Promers venne costruita tra il 1875 e il 1877 nella parte posteriore del bastione omonimo, così chiamato in onore di Hendrik Promer, l'appaltatore che nel XVII secolo realizzò le prime fortificazioni e casematte della fortezza (J. Van der Werf 2021).
L'edificio si affaccia direttamente sull'Adriaan Dortsmanplein, la piazza d'armi principale della fortezza. La facciata lunga e bassa della caserma occupa l'intera larghezza della piazza, fungendo da elemento centrale della composizione urbanistica e militare. Dietro la facciata si sviluppano due corpi di fabbrica paralleli, separati da un ampio corridoio longitudinale di 5 metri di larghezza (Kips 2007). Questo corridoio era inizialmente pensato come un fossato difensivo, attraversato da passerelle mobili, per isolare il bastione in caso di attacco (J. Van der Werf 2021). Tuttavia, fu poi realizzato come corridoio aperto, con protezioni in muratura: a intervalli di 10 metri furono costruite volte in mattoni spesse tre teste (dritte steen), alte 3 metri e ricoperte di terra, per proteggere dal fuoco enfilade (Kips 2007). Il corridoio fu completamente chiuso solo nel 1952 e le coperture rinnovate nel 2000.
L'ingresso principale si apre al centro della facciata, sotto un portale monumentale riccamente decorato in pietra naturale. Sopra l'architrave si trovano una pietra con la scritta "Promers", lo stemma dello Stato olandese e, più in alto, un arco in pietra con chiave di volta scolpita con una "W" stilizzata in onore di re Guglielmo III. A coronare il tutto, una testa elmata con baffi marziali e la scritta "Deus Patriam Servet" (Dio protegga la Patria) (Kips 2007). Altri due ingressi minori, posti alle estremità est e ovest della facciata, portano le iscrizioni "Si Vis Pacem, Para Bellum" (Se vuoi la pace, prepara la guerra) e "Turpitudo Peius Est Quam Dolor" (Il disonore è peggiore del dolore) (J. Van der Werf 2021).
L'architettura dell'edificio fu oggetto di discussione sin dai primi progetti. Il disegno iniziale, ritenuto troppo austero, fu modificato per dotare la facciata di un linguaggio più monumentale e decorato. La nuova caserma, per la sua posizione e il suo aspetto, divenne così la facciata più riccamente decorata dell'intera fortezza (J. Van der Werf 2021).
L'interno della caserma fu concepito per ospitare molteplici funzioni. Era in primo luogo un edificio di alloggio: ospitava fino poteva ospitare 400 persone: comandante del bastione, 12 ufficiali, 30 sottufficiali, 276 soldati, 9 infermieri e 82 malati (Kamphuis 1994).
Alcune mappe del 1879, evidenziano modifiche significative rispetto al progetto del 1875, tra cui cambiamenti nella distribuzione e destinazione d'uso degli ambienti, dovuti all'evoluzione delle esigenze logistiche, sanitarie e gerarchiche. Numerose stanze furono convertite in reparti per malati, infermerie e spazi di servizio e fu introdotta una nuova numerazione dei locali (Kamphuis 1994). In particolare:

- Nell'edificio anteriore (G) nel 1875, i locali erano numerati da ovest a est; nel 1879, invece, la numerazione partiva dall'ingresso centrale, proseguendo prima verso ovest, poi verso est. Molti ambienti, in origine alloggi per soldati, vennero adibiti a reparti per malati. Furono inoltre introdotte nuove funzioni, come una stanza per gli inservienti e una stanza di riposo. La facciata fu modificata da una superficie piana a una con pilastri, mentre i muri di chiusura dell'ingresso furono arretrati di circa 5 metri. Nella planimetria si nota anche una suddivisione più dettagliata degli alloggi, probabilmente legata alla pavimentazione (Kamphuis 1994).
- Nell'edificio posteriore (H) furono riordinati gli spazi interni. Il gabinetto per ufficiali fu spostato nell'edificio G e fu creata una seconda postierla con accesso alle casematte. Gli alloggi degli ufficiali persero il portico e vennero collegati a un corridoio. La cucina fu spostata e l'ambiente originariamente previsto per essa divenne un alloggio per soldati. Sul lato est dell'ingresso principale, la sequenza degli ambienti rifletteva una gerarchia militare: comandante, ufficiali, sottufficiali, cucina, truppa. Il lato ovest subì meno variazioni. Parte del deposito ospedaliero fu adibita a tisaneria e le pareti tra farmacia, deposito e tisaneria furono riposizionate. Furono inoltre indicate linee sottili per marcare spazi privati o partizioni interne e installate cantine d'acqua sotto le cucine (Kamphuis 1994).

Sul fianco sinistro del bastione, collegate alla caserma da un corridoio, si trovano le tre casematte tipo Reiche (o Reichese), orientate verso l'Oostbeer, a indicare il cambiamento delle strategie difensive. Originariamente erano

previste dieci casematte, ma ne furono realizzate solo tre, orientate a est (J. Van der Werf 2021). Le casematte Reiche erano dotate di feritoie arretrate, protette da pilastri per ridurre la vulnerabilità al fuoco laterale e presentavano caratteristiche innovative: tunnel anteriori ristretti, sportelli metallici interni e condotti di aerazione per evacuare i fumi (Kips 2007).

Dal punto di vista tattico, la caserma serviva da passaggio coperto per il trasporto dell'artiglieria fino alle postazioni difensive. Il corridoio principale attraversava entrambi i corpi dell'edificio fino al cortile posteriore, da cui due rampe conducevano direttamente alle piazzole di artiglieria del bastione (J. Van der Werf 2021). Sul lato est, il passaggio era chiuso da un muro di terra, mentre quello ovest era originariamente aperto e poi temporaneamente chiuso nel 1952 con una struttura rimossa nel 2000 e sostituita da una moderna facciata in vetro (Kips 2007).

Nel corso della sua storia, la caserma fu abitata continuativamente dal 1877, in particolare da artiglieri della Vestingartillerie (Artiglieria da Fortezza). Nel 1880 fu costruita una mensa sul piazzale antistante (Adriaan Dortsmanplein 1). Nel 1922 gli artiglieri si trasferirono alla Weeshuiskazerne in Kloosterstraat e solo una parte dell'edificio fu usata dalla Polizia Militare. La caserma fu riattivata durante la mobilitazione pre-bellica e occasionalmente occupata da truppe tedesche durante la Seconda Guerra Mondiale. Dopo la liberazione del 1945, ospitò temporaneamente truppe canadesi (Kips 2007).

# PARTE II | LA PRASSI METODOLOGICA

## 1. METODI E STRUMENTI DI ANALISI E DOCUMENTAZIONE

La presente sezione espone i metodi e gli strumenti adottati per l'acquisizione, la sistematizzazione e l'interpretazione dei dati utili alla conoscenza tecnico-funzionale del patrimonio edilizio oggetto di studio, con l'obiettivo di costruire una base conoscitiva solida e integrata, utile alla comprensione del comportamento tecnico e funzionale di questi beni nel tempo.
In coerenza con tali finalità, il percorso metodologico si è sviluppato attraverso un'articolata attività analitica, suddivisa in più ambiti di indagine complementari tra loro. Le analisi condotte hanno incluso lo studio storico-archivistico e documentale, l'analisi cronotipologica delle fasi costruttive e delle successive trasformazioni, l'esame morfologico e dimensionale dell'edificio e la caratterizzazione degli elementi costruttivi, con particolare attenzione alla loro consistenza, allo stato di conservazione e ai livelli prestazionali raggiunti.
Tali ambiti sono stati integrati da approfondimenti tecnico-prestazionali, comprensivi delle componenti impiantistiche e da un'analisi compositiva e distributiva degli spazi. Questo processo integrato di conoscenza ha permesso di restituire una lettura complessiva, sistematica e approfondita dell'organismo edilizio, funzionale all'orientamento consapevole delle successive fasi di progetto. In particolare, esso risulta essenziale per la definizione di strategie di riqualificazione energetica capaci di coniugare alte prestazioni con il rispetto della natura storica e architettonica dei manufatti analizzati.

L'intero percorso di ricerca è stato sviluppato in stretta collaborazione con le Forze Armate e in particolare con il personale del 14° Reparto Infrastrutture dell'Esercito, che ha fornito un prezioso supporto alla fase di acquisizione e interpretazione dei processi tecnico-amministrativi, contribuendo alla piena comprensione del contesto operativo e gestionale entro cui si colloca il patrimonio analizzato.

### 1.1 L'analisi storico documentale e le fonti archivistiche militari

Gli archivi del Genio militare costituiscono una fonte imprescindibile per la storia della costruzione di opere fortificate permanenti e campali, di caserme e di altri edifici militari (Fontana e Pisetti 2019).
Negli ultimi decenni, le fonti archivistiche militari hanno assunto un ruolo sempre più centrale nella ricerca storica contemporanea, dal momento che vanno ben oltre la semplice ricostruzione degli eventi bellici. Esse offrono, infatti preziose chiavi di lettura per la ricostruzione storica e la comprensione critica del patrimonio infrastrutturale della Difesa. Un approccio già promosso da studiosi come Piero Pieri, considerato il padre della storiografia militare italiana moderna, ha trovato nuovo slancio negli ultimi trent'anni, in particolare con iniziative di censimento, riordino e valorizzazione degli archivi istituzionali (Fontana e Pisetti 2019).
Questo rinnovato interesse si inserisce in una più ampia evoluzione del panorama storiografico italiano del secondo dopoguerra, caratterizzato da una crescente attenzione verso le fonti d'archivio. Tale processo fu favorito da una nuova sensibilità post-positivista, nonché da cambiamenti normativi come la legge del 1963 che ampliò l'accesso alle fonti. In questo clima di apertura, anche gli uffici storici delle Forze Armate iniziarono a promuovere la diffusione delle fonti militari, attraverso convegni, pubblicazioni e politiche di adeguamento alle norme generali sugli archivi pubblici (Trani 2018).

Tuttavia, nonostante i progressi normativi, permangono criticità. La legge del 1963 è stata in seguito abrogata e oggi la consultazione dei documenti militari è regolata dal quadro normativo vigente in materia di beni culturali, tutela della privacy e deontologia archivistica, valido per tutti gli archivi pubblici. Sebbene la presenza di archivi storici separati sia comprensibile per ragioni storiche consolidate, essa non può giustificare riduzioni delle garanzie di accesso o pratiche arbitrarie di selezione documentaria (CISM 2006).
La letteratura archivistica evidenzia come gli archivi storici militari si siano a lungo sviluppati in maniera autonoma rispetto a quelli civili, con normative interne rigide e prassi talvolta incoerenti con gli standard della disciplina archivistica. Fino agli anni Settanta, la mancanza di archivisti specializzati e di criteri strutturati per la selezione ha determinato fenomeni di dispersione documentale, distruzione non motivata e scarsa organizzazione dei fondi.
Alla luce di queste criticità, emerge la necessità di una riforma delle pratiche di selezione e scarto documentale, da affidare a commissioni specifiche e non all'arbitrio dei singoli uffici. La conservazione dei documenti militari deve seguire regolamenti chiari e l'eventuale trasferimento agli Archivi di Stato o al Ministero della Cultura deve avvenire

secondo criteri trasparenti e condivisi (CISM 2006). Nonostante i miglioramenti normativi degli ultimi anni, problemi strutturali quali la frammentazione dei fondi, la carenza di strumenti di corredo e la difficile accessibilità continuano a ostacolare un uso efficace delle fonti.
Un ulteriore nodo critico riguarda la carenza di personale specializzato. Gli archivi militari, soprattutto se gestiti come strutture separate, devono essere dotati di archivisti con formazione specifica, attrezzature adeguate e risorse stabili. La soppressione della qualifica di archivista presso l'Archivio dello Stato Maggiore dell'Esercito rappresenta, in questo senso, un grave arretramento. La memoria storica militare non è un patrimonio esclusivo delle Forze Armate, ma un bene collettivo la cui tutela è responsabilità dello Stato e della società civile (CISM 2006).

In questo quadro storico e istituzionale, si inserisce il presente lavoro di ricerca. Ai fini dello studio è stato analizzato l'importante patrimonio documentario attualmente conservato presso la sede del 14° Reparto infrastrutture dell'Esercito italiano, con sede presso la Caserma Riva Villasanta. I fondi archivistici conservati in questo luogo rappresentano un patrimonio documentario fondamentale per la ricostruzione della storia del medesimo nucleo storico, nonché delle peculiarità e delle vicende vissute dagli altri compendi oggetto di studio.
La documentazione qui conservata, che si articola in diverse centinaia di metri lineari, è relativa a diversi ambiti operativi e gestionali, sia di carattere tecnico che amministrativo. Questa, si trova in condizioni di conservazione precarie e l'archiviazione segue criteri organizzativi non sempre uniformi. Spesso, infatti, i fondi archivistici appaiono organizzati e suddivisi per materia, per singolo procedimento amministrativo e, più raramente, secondo una sequenza cronologica. Questo approccio non uniforme riflette le difficoltà gestionali e organizzative legate alla complessità della documentazione e alla carenza di personale archivistico specializzato negli uffici militari. L'assenza di mezzi descrittivi, inoltre, ha reso complessa la ricostruzione del contesto di provenienza e del contenuto dei documenti.

Al fine di aggirare le difficoltà descritte, la ricognizione effettuata ha adottato un approccio metodologico articolato in più fasi. La prima fase ha visto la ricognizione generale del patrimonio archivistico disponibile, volta all'individuazione dei fondi rilevanti. A seguire, una fase di selezione dei documenti utili per la ricostruzione storica, tecnica e gestionale degli edifici analizzati ha affiancato una terza fase di analisi approfondita, condotta attraverso lo studio incrociato di fonti scritte e iconografiche.
Il patrimonio documentale conservato presso l'archivio del 14° Reparto Infrastrutture, infatti, dispone attualmente di due sistemi complementari di conservazione e consultazione. Lo studio ha quindi previsto un'analisi simultanea sia dei materiali iconografici che del patrimonio documentario scritto.
Per quanto riguarda il patrimonio documentale scritto, sono stati individuati materiali di diversa natura, tra cui inventari militari, carteggi, atti di consegna, capitolati, computi metrici, contratti, convenzioni e disegni tecnici. La documentazione copre un arco temporale esteso, con materiali databili tra il 1954 e il 2000 e include anche una consistente sottoserie di disegni tecnici su carta lucida, conservati in cassettiere metalliche.
Per quanto riguarda i materiali iconografici, invece, è stata individuata una raccolta di disegni tecnici realizzati a china su carta lucida, conservati, arrotolati, all'interno di cassettiere metalliche.
Relativamente ai casi di studio approfonditi nell'ambito della presente ricerca, sono stati complessivamente censiti 16 faldoni e 104 rotoli.
A seguito della fase di ricognizione, è stata avviata un'attenta selezione dei documenti più significativi, cui ha fatto seguito un'analisi condotta attraverso lo studio incrociato delle fonti scritte e iconografiche. La documentazione tecnica – comprendente disegni, rilievi storici, verbali, atti di consegna, capitolati e computi – è stata esaminata in parallelo a quella amministrativa e gestionale, consentendo una lettura integrata dei processi costruttivi, delle trasformazioni nel tempo e delle modalità d'uso degli edifici.
Il corpus iconografico riordinato ha rappresentato una risorsa fondamentale per la datazione delle strutture e per l'analisi della consistenza materica dei corpi edilizi. Tale lavoro, condotto attraverso un processo critico di ricostruzione e contestualizzazione storica e tecnica, ha costituito la base per una comprensione approfondita del patrimonio studiato e ha permesso lo sviluppo di modelli informativi affidabili, capaci di integrare conoscenza, conservazione e valorizzazione del patrimonio infrastrutturale militare nel contesto contemporaneo.

## 1.2 Il rilievo

L'analisi dell'evoluzione storica e architettonica dei compendi oggetto di studio, avviata mediante lo studio critico delle fonti documentarie e iconografiche storiche, è stata successivamente approfondita attraverso il rilievo. Quest'ultimo ha rappresentato un passaggio metodologicamente imprescindibile, finalizzato alla restituzione oggettiva e dettagliata del compendio in tutte le sue componenti morfologiche, distributive, spaziali, materiche e degradative.
Di seguito sono riportate le definizioni e gli scopi dei vari rilievi effettuati per la conoscenza generale e specifica delle fabbriche oggetto di studio.

### 1.2.1 Il rilievo geometrico

Il rilievo geometrico consiste nell'insieme delle operazioni finalizzate alla rappresentazione numerica e grafica di un edificio, attraverso l'identificazione delle sue parti costitutive, delle relazioni dimensionali e delle caratteristiche morfologiche. Questa attività ha consentito di raccogliere dati metrici fondamentali, costituendo così una base solida per l'analisi integrata dell'organismo architettonico e del suo contesto. In questo senso, essa si configura non solo come strumento conoscitivo, ma anche come presupposto necessario per assicurare coerenza metodologica e attendibilità scientifica alle successive fasi di interpretazione, modellazione e valutazione del patrimonio esaminato.

Per rispondere alle esigenze conoscitive della ricerca e garantire la scientificità dell'intero processo, è stata adottata una metodologia operativa critica, basata sull'impiego combinato di tecnologie avanzate, in grado di restituire elaborati grafici dettagliati, coerenti e scientificamente validi.
In particolare, per la restituzione dell'involucro esterno è stata impiegata la fotogrammetria aerea, metodologia appartenente alla categoria dei rilievi indiretti, che ha consentito di acquisire immagini ad alta risoluzione mediante l'utilizzo di un drone dotato di fotocamera integrata. Questa tecnica ha offerto numerosi vantaggi operativi: la possibilità di acquisire una grande quantità di dati in tempi ridotti, l'assenza di contatto diretto con le superfici e la possibilità di effettuare misurazioni a posteriori. Il drone è stato pilotato da un operatore specializzato e la fotocamera è stata impostata per lo scatto automatico a intervalli regolari, in modo da garantire una copertura omogenea dell'area. Le immagini raccolte sono state selezionate in base a criteri di nitidezza, illuminazione e contrasto e successivamente elaborate tramite il software Agisoft PhotoScan, che ha permesso di generare un modello tridimensionale del compendio a partire dalla nuvola di punti derivata dalla fotogrammetria.
A supporto del rilievo aereo, è stata utilizzata una stazione totale Leica FlexLine TS10 per il tracciamento dei vertici della rete topografica di riferimento, assicurando precisione nelle misurazioni planimetriche e altimetriche e permettendo di georeferenziare con accuratezza i dati acquisiti.
Per la documentazione degli ambienti interni e per l'integrazione delle porzioni di rilievo non coperte dai sensori aerei, si è fatto ricorso a metodologie dirette. In particolare, il distanziometro laser Leica DISTO S910 ha consentito la misurazione di spazi complessi e difficilmente accessibili, colmando le lacune generate dalla presenza di vegetazione, arredi o altri ostacoli fissi. Inoltre, la fotogrammetria digitale terrestre, condotta mediante fotocamera Nikon D3500, ha permesso di rilevare in dettaglio gli elementi architettonici e costruttivi, fornendo una base informativa utile anche per la modellazione tridimensionale.
Nel complesso, l'adozione di questa metodologia integrata ha consentito di ottenere una rappresentazione fedele e articolata del compendio, costituendo una solida base per l'analisi topografica, geometrica e morfologica, nonché per le successive fasi di interpretazione, valorizzazione e modellazione informativa del patrimonio studiato.
La fase successiva ha previso l'elaborazione dei dati su software Autocad, al fine di riportare graficamente tutte le qualità architettoniche, le alterazioni e i fenomeni di degrado che caratterizzano le facciate oggetto di studio. Questo ha permesso di creare la base grafica, denominata "architettonico", da cui sono poi derivati gli elaborati successivi. Tra gli output prodotti si annoverano elaborati grafici di diversa natura e scala, tra cui: la planimetria generale del compendio, la planimetria delle coperture, sezioni ambientali, planimetrie e sezioni dei singoli corpi di fabbrica, spaccati assonometrici, prospetti architettonici, ortofoto e modelli tridimensionali ad alta risoluzione. Tali restituzioni sono state ottenute mediante l'integrazione di rilievi strumentali di precisione e tecniche fotogrammetriche, aeree e terrestri, garantendo un livello di dettaglio e affidabilità adeguato alle finalità conoscitive e progettuali della ricerca.

### 1.2.2 L'analisi materico-degrado

Dal momento che, secondo la UNI 11182 emanata nell'aprile del 2006, la scienza della conservazione richiede che la diagnosi e gli interventi siano basati sullo stato di conservazione del materiale, considerando alterazioni, presenza di acqua e organismi osservabili macroscopicamente sul manufatto, queste condizioni sono state riportate graficamente e documentate fotograficamente. Partendo quindi dalla base denominata "architettonico", che documenta in maniera precisa e dettagliata la configurazione attuale del manufatto, includendo elementi come la geometria delle strutture, le aperture, le partiture architettoniche, le superfici e i particolari costruttivi, sono stati sviluppati gli elaborati "materico" e "degrado". Il primo identifica e mappa la natura dei materiali impiegati nella costruzione, mentre il secondo registra i fenomeni di deterioramento osservati sulle superfici. Tali analisi confluiscono poi nell'elaborato di "sintesi materico-degrado", in cui le aree interessate da alterazioni o danneggiamenti vengono evidenziate attraverso specifiche campiture e codici cromatici, in modo da associare ciascun materiale ai relativi fenomeni di degrado e facilitare la lettura integrata delle criticità presenti.

*L'analisi dei materiali*

L'analisi materica di un edificio consiste nello studio dei materiali costruttivi utilizzati e delle tecniche impiegate nella realizzazione delle strutture architettoniche. Questo tipo di indagine ha l'obiettivo di comprendere la composizione, la stratificazione e lo stato di conservazione dei materiali, al fine di acquisire una conoscenza approfondita del manufatto, utile sia per la documentazione che per eventuali interventi di restauro, conservazione o riuso.
L'indagine è stata avviata tramite rilievi visivi diretti condotti in sito e successivamente approfondita attraverso lo studio delle unità stratigrafiche murarie. Durante questa fase sono stati rilevati elementi quali la tipologia delle murature, la presenza e le caratteristiche degli intonaci, le finiture superficiali, le tamponature, nonché i dettagli architettonici come infissi, zoccolature, marcapiani e rivestimenti dei gradini.

*L'analisi del degrado*

Per la classificazione delle forme di degrado, si è fatto riferimento alla norma UNI 11182:2006, che disciplina i materiali lapidei naturali e artificiali, includendo le relative definizioni, descrizioni delle alterazioni e termini di riferimento. Tale norma aggiorna e sostituisce il precedente lessico NOR.MA.L, introducendo una nomenclatura standardizzata e condivisa utile alla descrizione e alla mappatura del degrado macroscopico, ovvero visibile a occhio nudo.
L'analisi è stata sviluppata individuando e classificando i fenomeni di degrado più ricorrenti osservabili sulle superfici esterne dei fabbricati. L'indagine è stata svolta principalmente tramite osservazione diretta e sistematica delle superfici, con l'obiettivo di riconoscere le alterazioni presenti e valutarne l'estensione e la gravità. I dati rilevati sono stati successivamente rappresentati nelle tavole tematiche dedicate, in cui ciascun fenomeno è stato associato a una simbologia grafica e cromatica specifica, secondo quanto previsto dagli standard normativi.

L'attenzione si è concentrata in particolare sulle superfici intonacate e murarie, dove sono stati riscontrati vari fenomeni alterativi, legati sia a fattori ambientali che a condizioni di esposizione e manutenzione differenziate tra i prospetti. Tra i degradi più frequenti si segnalano distacchi di intonaco e tinteggiatura, fessurazioni, macchie, rigonfiamenti ed erosione, con maggiore incidenza nelle zone basamentali e negli spigoli esposti. Sono stati inoltre rilevati fenomeni di degrado biologico e accumuli di umidità causati da un insufficiente deflusso delle acque meteoriche.
Anche le porzioni in laterizio e gli elementi metallici hanno evidenziato forme di degrado significative, quali efflorescenze saline, polverizzazione, scagliatura e corrosione, in alcuni casi con perdita di materiale e compromissione strutturale.
Un ulteriore aspetto rilevante è il degrado di origine antropica, riconducibile alla presenza disordinata di impianti tecnici installati senza criteri di compatibilità con le strutture preesistenti, ma anche a eventi traumatici (come incendi o terremoti) e alla mancanza di manutenzione ordinaria, che può innescare fenomeni a catena. Un esempio tipico è il degrado progressivo di una copertura non manutenuta: la rottura del manto e l'ingresso di acqua favoriscono infiltrazioni che danneggiano l'orditura lignea, con conseguente collasso e ulteriore esposizione delle murature al vento e alla pioggia battente.
È stato inoltre considerato il comportamento specifico dei materiali analizzati. I materiali lapidei naturali (marmi, calcari, graniti, arenarie, ecc.) risultano particolarmente sensibili ai cicli di gelo-disgelo, alla salsedine, all'umidità di

risalita (tipica degli edifici fondati su terreni alluvionali o soggetti a falde superficiali) e all'azione meccanica del vento e della pioggia. I materiali lapidei artificiali, come laterizi, malte, intonaci e stucchi, presentano un comportamento chimico-fisico simile alle pietre naturali, ma con specifiche vulnerabilità, soprattutto in presenza di sali solubili e variazioni termo-igrometriche. Il legno, invece, è soggetto a attacchi da parte di insetti xilofagi (come tarli e termiti) e funghi lignivori, tra cui la carie a cubetti, che ne compromette drasticamente la resistenza meccanica.

Questa fase dell'indagine ha fornito un quadro analitico indispensabile per la valutazione critica dello stato di fatto e per la successiva elaborazione degli elaborati di sintesi e delle proposte progettuali. In particolare, la mappatura del degrado consente di individuare con precisione le aree critiche e orientare gli interventi di restauro o manutenzione secondo criteri di conservazione consapevole e compatibile con il contesto storico-architettonico.

### 1.2.3 Il rilievo funzionale

Il rilievo funzionale ha previsto un'analisi bidimensionale dell'organismo architettonico, finalizzata alla comprensione dell'organizzazione spaziale dei diversi piani e alla distribuzione interna delle funzioni. L'indagine si è concentrata sullo studio dell'aggregazione e articolazione degli ambienti, al fine di individuare la logica insediativa e le relazioni tra gli spazi.
Questa fase risulta fondamentale per la successiva elaborazione delle strategie progettuali, in particolare per la valutazione dei consumi energetici e la definizione degli interventi di riqualificazione, che devono necessariamente tener conto della reale destinazione d'uso degli ambienti.
Il disegno si conferma anche in questa fase uno strumento essenziale: non solo come mezzo di rappresentazione, ma come metodo di sintesi e interpretazione, capace di restituire in forma leggibile aspetti funzionali spesso non immediatamente riconoscibili nella sola osservazione diretta. Anche in questo caso, infatti, l'indagine è stata accompagnata dalla produzione di elaborati grafici, utili a rappresentare con chiarezza la distribuzione funzionale e le relazioni spaziali interne al complesso edilizio.

### 1.3 L'analisi crono-tipologica e delle trasformazioni

Il metodo utilizzato per l'analisi cronotipologica ha rappresentato uno strumento fondamentale per la ricostruzione dell'evoluzione storica, morfologica e tipologica di ciascun compendio studiato. L'approccio si è basato sull'integrazione tra l'analisi delle fonti storiche — documentarie, cartografiche e iconografiche — e gli esiti del rilievo geometrico, al fine di identificare e interpretare le trasformazioni architettoniche intervenute nel tempo.
La cartografia storica ha costituito un supporto essenziale per comprendere le modifiche nella distribuzione degli spazi, l'inserimento di nuovi corpi di fabbrica e la scomparsa di elementi originari. Il suo utilizzo è stato affiancato da un lavoro di descrizione e lettura critica delle fonti archivistiche, spesso corredate da annotazioni e simbologie grafiche, che hanno contribuito a definire le caratteristiche originarie e successive degli edifici.
Il processo si è quindi articolato in diverse fasi operative. La prima ha riguardato la digitalizzazione dei documenti storici, realizzata mediante acquisizione ottica ad alta risoluzione, finalizzata alla produzione di copie digitali fedeli. Le immagini ottenute sono state successivamente sottoposte a operazioni di editing grafico, volte a migliorarne la qualità visiva e a correggere eventuali imperfezioni.
Una volta digitalizzati, i documenti sono stati inseriti in un sistema di catalogazione strutturata, che ha seguito criteri gerarchici e standardizzati. Ogni documento è stato descritto tramite campi specifici (tipologia, titolo, datazione, ente produttore, lingua, annotazioni, note), ed è stato associato a un codice identificativo univoco, indispensabile per la gestione e il confronto delle informazioni all'interno dell'archivio.
L'analisi cronotipologica ha previsto poi la fase di confronto tra la cartografia storica e i dati del rilievo dello stato attuale, effettuata mediante sovrapposizione digitale. Tale confronto si è rivelato essenziale per individuare modifiche avvenute nel tempo, come demolizioni, ampliamenti, chiusure o nuove aperture, consentendo la ricostruzione delle sequenze costruttive e l'individuazione delle diverse fasi evolutive dell'organismo edilizio.
In assenza di datazioni certe, l'analisi si è basata su un approccio relativo e comparativo, volto a identificare intervalli temporali plausibili mediante la lettura incrociata delle fonti e delle evidenze riscontrate. Questo ha permesso di formulare ipotesi attendibili sull'epoca di costruzione o trasformazione degli edifici analizzati.
Infine, le informazioni raccolte sono state sintetizzate in elaborati grafici tematici, nei quali l'uso di diverse colorazioni ha consentito di rappresentare visivamente le fasi costruttive, distinguendo le porzioni originarie da quelle aggiunte successivamente o non più esistenti.
Il metodo ha quindi permesso di costruire una lettura stratigrafica dell'edificio, utile non solo per fini conoscitivi, ma anche per orientare interventi di restauro, valorizzazione o riuso compatibile, nel rispetto delle caratteristiche storico-architettoniche dell'immobile.

## 1.4 La sistematizzazione della conoscenza: il metodo Raumbuch

La gestione del patrimonio architettonico militare si è tradizionalmente basata sulla pratica degli inventari e sulla catalogazione e conservazione dei documenti d'archivio. Fin dalle epoche più remote, tali strumenti si sono rivelati essenziali per il controllo amministrativo e funzionale dei beni immobili. Nel tempo, questa metodologia si è evoluta in un sistema strutturato di raccolta, gestione e trasmissione delle informazioni, anticipando la logica dei moderni sistemi informativi applicati alla conoscenza e alla conservazione del patrimonio costruito. La pratica dell'inventariazione, infatti, ha progressivamente assunto un ruolo fondamentale nella costruzione di basi di dati complesse, finalizzate non solo al controllo amministrativo dei beni, ma anche alla loro lettura storica, alla gestione tecnica e alla progettazione degli interventi (Valli 2012).
Proprio in questo contesto di evoluzione metodologica, tra i vari metodi di analisi edilizia sviluppati negli ultimi decenni, il Raumbuch si distingue come uno strumento particolarmente adatto per lo studio dei grandi complessi e per la documentazione delle loro stratificazioni. La sua struttura si configura con una chiara affinità d'impianto rispetto a quella degli inventari militari, risultando estremamente valido per la sistematizzazione e la verifica incrociata delle complesse informazioni acquisite durante la fase di rilievo (Agus 2021).
Il Raumbuch, letteralmente "libro delle stanze", è una pratica nata nel contesto della Bauforschung mitteleuropea degli anni Venti del Novecento, sviluppatasi inizialmente in modo non formalizzato come strumento per la codifica e rappresentazione delle stratigrafie architettoniche, specialmente nell'ambito degli studi archeologici condotti dai Bauforscher su fabbriche storiche. In seguito, si è evoluto come metodo per la referenziazione delle operazioni manutentive, la progettazione degli interventi e, più in generale, per la documentazione e la gestione dei patrimoni immobiliari, assumendo la funzione di vero e proprio *Gebäudedatenrepositorium* (archivio dei dati edilizi) (Fiorino 2022).
Introdotto formalmente negli anni Ottanta come strumento di pianificazione, il Raumbuch è stato successivamente esteso alla conservazione del patrimonio monumentale, con l'obiettivo di raccogliere e documentare, in modo sistematico e multidisciplinare, informazioni su ogni fase della vita dell'edificio.
Così come negli inventari militari, il tratto essenziale del Raumbuch risiede nella scomposizione analitica e sistematica dell'edificio nei suoi elementi costitutivi, secondo uno schema logico rigoroso. La metodologia si basa sulla suddivisione dell'edificio in unità sempre più piccole, partendo dalle stanze, ciascuna identificata da una codifica univoca e analizzata in dettaglio, includendo pareti, pavimenti, soffitti, infissi, battiscopa, rivestimenti e arredi fissi. L'analisi procede quindi per scale, dall'intero complesso edilizio all'edificio, al piano, alla stanza e infine agli elementi specifici al suo interno (Fiorino, Grillo, et al. 2017)
Ogni elemento viene poi identificato e catalogato attraverso una numerazione articolata in serie e sottoserie, potenzialmente illimitate e correlate su base topografica. Tali numeri di repertorio possono inoltre rimandare a ulteriore materiale descrittivo, grafico o testuale, utile a qualificare nel dettaglio i corpi di fabbrica, le componenti costruttive e i materiali utilizzati. Il sistema Raumbuch integra diversi tipi di informazioni, come rilievi metrici e stratigrafici, analisi del degrado e delle fessure, oltre alla catalogazione dei materiali e degli elementi costruttivi, permettendo una restituzione ordinata e facilmente implementabile.
La metodologia combina informazioni grafiche — foto, disegni, planimetrie, assonometrie ed esplosi — con descrizioni scritte, migliorando così l'interpretabilità e la comprensione delle modalità costruttive e dei segni di dissesto statico. Il Raumbuch include dati generali sull'edificio (nome, proprietari, funzioni, architetti), sul contesto (localizzazione, accessibilità, dimensioni, descrizione delle facciate) e sui singoli ambienti (materiali, colori, funzioni), permettendo inoltre un esame cronologico delle modifiche e la ricostruzione delle condizioni storiche.

### 1.4.1 L'analisi e la catalogazione degli elementi costruttivi

Seguendo i principi del Raumbuch, è stato elaborato un sistema di schedatura dettagliato finalizzato a registrare, parametrizzare e correlare tutte le informazioni relative agli elementi costruttivi.
Il processo ha previsto la scomposizione progressiva degli edifici analizzati in unità sempre più elementari — vani, pavimenti, pareti, infissi, ecc. — ciascuna categorizzata in base alla propria tipologia. Ogni componente è stato identificato mediante una codifica strutturata, organizzata secondo una logica gerarchica a serie e sotto-serie, un sistema flessibile e potenzialmente estendibile all'infinito, in grado di adattarsi all'approfondimento progressivo dell'indagine.
Nel file Excel in cui è stato sviluppato il Raumbuch è stato adottato un formato di codifica univoca (campo Elemento) strutturato in tre segmenti.

Un esempio di formato di codifica Raumbuch è: 00_001_01

- 00 – Riferimento al piano. Indica il livello dell'edificio (es. "00" = piano terra; "01" = primo piano, ecc.).
- 001 – Unità/Alloggio. Identifica univocamente ciascuna unità all'interno di un piano. La numerazione è crescente (001, 002, 003, …) e riparte da 001 per ogni piano.
- 01 – Numero progressivo dell'infisso. Indica l'ordine dell'infisso all'interno di una specifica unità. La numerazione riparte da 01 per ogni unità, mantenendo l'univocità grazie ai due segmenti precedenti.

Esempi di applicazione della codifica:

- 00_001_01 = infisso n. 01 dell'unità 001 al piano terra.
- 01_002_04 = infisso n. 04 dell'unità 002 al primo piano.

La distinzione tra porte e finestre non incide sulla codifica numerica: entrambe seguono la stessa progressione numerica per unità. La differenza è riportata nel campo Codifica tipologia, dove ad esempio Ine_02a indica una finestra esterna di una determinata tipologia e Ine_01c una porta esterna.

Oltre alla codifica numerica gerarchica, è stato predisposto un documento di classificazione tipologica degli elementi costruttivi, suddivisi in categorie principali, tra cui:

Ine – Infissi esterni
Ini – Infissi interni
Pv – Pavimentazioni
Mui – Murature interne
Mue – Murature esterne
So – Solai
Fin – Finiture
Cv – Collegamenti verticali
Imca – Impianti di controllo ambientale
Ime – Impianti elettrici
Imis – Impianti idrici e sanitari
Om – Opere metalliche

Sta – Strutture in calcestruzzo armato

Ogni categoria è ulteriormente articolata in sottocategorie. Ad esempio, nella categoria Infissi esterni (Ine) è presente la sottocategoria finestre in legno e vetro (Ine_05), suddivisa in varianti contraddistinte da lettere progressive (Ine_05a, Ine_05b, Ine_05c, ecc.), determinate in base a caratteristiche quali il tipo di vetro, il numero di vetri e le dimensioni complessive.
Ogni elemento schedato è quindi corredato da: codice univoco (es. 00_001_01); codifica tipologica (es. Ine_05h); descrizione tecnica, documentazione fotografica identificativa.
Questo approccio consente di catalogare in modo dettagliato e sistematico l'intero patrimonio edilizio, mantenendo la flessibilità necessaria per aggiornare e ampliare i dati in funzione di nuove indagini o interventi di restauro.

I risultati della schedatura degli elementi costruttivi sono stati poi organizzati in schede di tipo compilativo che si articolano in cinque macro aree: identificazione, analisi dei valori, stato di conservazione, efficienza, diagnostica,

valutazione di interesse e interventi (tab. 1). Ogni categoria ha raccolto dati qualitativi e quantitativi, ottenuti attraverso un'accurata osservazione, con l'obiettivo di evitare omissioni o interpretazioni soggettive.
Per ogni sezione delle schede di catalogazione sono poi stati adottati precisi vocabolari di qualificazione che hanno permesso di rendere oggettive, omogenee e confrontabili le valutazioni.
L'obiettivo principale è stato quello di orientare le misure di tutela per identificare gli interventi più appropriati. Il piano di intervento privilegerà gli elementi del patrimonio a maggiore rischio di deterioramento e minore compatibilità con soluzioni energetiche e funzionali efficienti. Questa strategia mira a coniugare la salvaguardia del patrimonio culturale con l'efficientamento funzionale e termico dell'edificio.

| | |
|---|---|
| IDENIFICAZIONE | Codice edificio |
| | Codice piano |
| | Codice stanza |
| | Codice elemento |
| | Tipo |
| | Codice tipologia |
| | Descrizione |
| | Dati dimensionali |
| ANALISI DEI VALORI | Cronologia |
| | Valutazione di interesse |
| | Grado di trasformabilità |
| STATO DI CONSERVAZIONE | Descrizione stato di conservazione |
| | Codifica stato di conservazione |
| | Compromissione materica |
| | Lacuna/assenza |
| | Efficienza meccanica |
| | Efficienza termica |
| | Efficienza funzionale |
| | Gravità dell'inefficienza generale |
| | Categoria di danno specifica |
| | Causa del danno |
| | Diffusione del danno (%) |
| | Estensione del danno (mq) |
| | Gravità del danno |
| | Urgenza dell'intervento |
| DIAGNOSTICA | Conoscitiva |
| | Per patologia |
| INTERVENTI | Tipo di intervento |
| | Descrizione dell'intervento |

*Tabella 17. Scheda di catalogazione e analisi di un elemento costruttivo adottata nel processo di catalogazione con metodologia Raumbuch.*

### 1.4.2 L'analisi dei valori

La sezione dedicata all'analisi dei valori e alla verifica della sussistenza dell'interesse culturale ha previsto, in conformità all'art. 12 del D.Lgs. 42/2004, una prima valutazione attraverso una classificazione articolata in diversi livelli di tutela, suddivisi in: interesse storico–artistico, storico–costruttivo, storico–testimoniale e storico–tipologico. Questa classificazione ha consentito di definire in modo puntuale il valore culturale di ciascun elemento, tenendo conto sia degli aspetti estetici e formali, sia della loro rilevanza storica e testimoniale all'interno del contesto architettonico e urbano.
Gli elementi identificati come di interesse storico, artistico e testimoniale sono stati principalmente quelli realizzati contestualmente alla costruzione dell'edificio, come le murature portanti, oppure quelli ritenuti ancora originali, come i pavimenti, spesso non di successiva sostituzione. Tali componenti sono stati considerati particolarmente significativi poiché rappresentano testimonianze materiali della cultura architettonica e costruttiva dell'epoca, riflettendo le tecniche, i materiali e le scelte stilistiche proprie del periodo di riferimento. Inoltre, contribuiscono in modo sostanziale a definire le caratteristiche distintive del paesaggio urbano storico, permettendo una lettura coerente dell'evoluzione e dell'identità del contesto edilizio.
A supporto di questa analisi, è stato redatto un elaborato specifico denominato "sintesi dei valori", il quale ha raccolto esclusivamente gli elementi ritenuti di interesse storico, architettonico o funzionale. Questo strumento si è configurato come un riferimento operativo di rapida consultazione, finalizzato a facilitare la distinzione tra gli elementi da preservare, che rappresentano un valore storico-culturale da tutelare e quelli giudicati incongrui o privi di valore, per i quali si possono valutare interventi di modifica o sostituzione. Tale sintesi ha quindi costituito una base fondamentale per indirizzare le scelte progettuali successive, garantendo coerenza e rispetto nei confronti del patrimonio esistente.

A ciascun livello di interesse è stato associato un grado di trasformabilità, strettamente correlato al valore storico dell'elemento e inversamente proporzionale a esso: più alto è il valore storico, più basso è il margine di intervento consentito. Tale grado di trasformabilità è stato codificato mediante una scala numerica da 0 a 3, in modo da definire con chiarezza le possibilità di modifica o conservazione degli elementi analizzati.
In particolare, il grado 0 è stato riservato agli elementi di massimo interesse storico–artistico, la cui integrità deve essere rigorosamente preservata, limitando interventi di modifica o sostituzione. Il grado 1 comprende invece gli elementi che, pur mantenendo una coerente relazione con il manufatto originario, risultano compromessi o non più adeguati dal punto di vista tecnico-prestazionale, richiedendo pertanto interventi di manutenzione o aggiornamento mirati a migliorare la loro funzionalità senza alterarne significativamente l'aspetto storico. Il grado 2 si riferisce agli elementi privi di un interesse storico-artistico specifico, ma compatibili e integrati nella fabbrica edilizia esistente; per questi componenti, gli interventi di modifica o sostituzione sono ammessi, purché non compromettano la coerenza complessiva del bene. Infine, il grado 3 identifica quegli elementi che non risultano coerenti con il manufatto storico e che rappresentano degradi o alterazioni di origine antropica, i quali possono essere rimossi o sostituiti senza pregiudizio per il valore culturale complessivo.

L'analisi delle cronologie, infine, presenta una semplificazione di un processo storico suddiviso in fasi distinte, ciascuna associata a un diverso valore storico. Questo valore, definito come "alto", "medio" o "basso", indica l'importanza e la rilevanza storica di quella particolare fase. La fase 1 è considerata corrispondente al primo periodo di fondazione; La fase 2 rappresenta un periodo di transizione o di consolidamento in cui gli eventi sono rilevanti, ma non hanno lo stesso impatto trasformativo della fase precedente; La fase 3 è considerata la meno significativa dal punto di vista storico in quanto cronologicamente più recente.

**ANALISI DEI VALORI**

| | | |
|---|---|---|
| VALUTAZIONE INTERESSE | ISA | Interesse storico-artistico |
| | ISC | Interesse storico-costruttivo |
| | ITE | Interesse storico-testimoniale |
| | ITEF | Interesse storico-testimoniale-funzionale |
| | ITEM | Interesse storico-testimoniale-materico |
| | ITI | Interesse storico-tipologico |
| | NI | Nessun interesse |

| | | |
|---|---|---|
| | EI | Elemento incongruo |
| GRADO DI TRASFORMABILITA’ | 0 | Non trasformabile, interesse storico artistico |
| | 1 | Elemento di interesse storico artistico compromesso |
| | 2 | Elemento privo di interesse, ma compatibile |
| | 3 | Elemento da rimuovere |
| CRONOLOGIA | Fase 1 | Valenza storica alta |
| | Fase 2 | Valenza storica media |
| | Fase 3 | Valenza storica bassa |

*Tabella 18. Scheda per l’analisi dei valori relativi ad un elemento. Offre una valutazione preliminare dell'interesse culturale di un bene, classificandolo in base a diversi livelli di tutela (storico-artistico, storico-costruttivo, storico-testimoniale e storico-tipologico) e assegnando un grado di trasformabilità su una scala da 0 a 3. Viene inoltre analizzata la cronologia del bene, con le diverse fasi storiche valutate in termini di importanza (alta, media, bassa), per comprendere l'evoluzione del manufatto nel tempo.*

### 1.4.3 L'analisi della consistenza

La sezione dedicata all'analisi della consistenza ha fornito un quadro dettagliato sullo stato di conservazione e sulle efficienze meccaniche, termiche e funzionali degli elementi esaminati. Sebbene si tratti di valutazioni qualitative, queste si sono rivelate fondamentali per comprendere le condizioni generali di ciascun elemento e orientare eventuali approfondimenti diagnostici.
In particolare, il parametro della codifica dello stato di conservazione si articola in cinque livelli principali (da 0 a 4) in cui un valore pari a 0 indica un elemento in perfette condizioni, senza alcun segno di deterioramento o alterazione e un valore pari a 4 indica un elemento in condizioni critiche, a rischio di collasso o di perdita totale; il parametro della compromissione materica indica in modo diretto se l'elemento è stato danneggiato; il parametro della lacuna/assenza segnala la presenza di mancanze o la totale assenza di parti dell'elemento.
A integrazione di questi dati, è stata introdotta una sezione specifica per la valutazione delle efficienze meccanica, termica e funzionale. Tale analisi ha consentito di individuare le prestazioni residue degli elementi sotto il profilo tecnico, orientando scelte di intervento mirate al miglioramento funzionale e prestazionale, nel rispetto dei valori storici e architettonici. In questo modo, la valutazione storica è stata arricchita da criteri legati alla sostenibilità e all'efficienza, contribuendo a un quadro conoscitivo più ampio e coerente.
Ulteriori codifiche hanno permesso di definire altri aspetti chiave: la gravità dell'inefficienza complessiva, su scala da 0 a 4, ha indicato quanto il deterioramento compromettesse la funzionalità e la durabilità dell'elemento; la causa del danno ha distinto l'origine del degrado (ambientale, antropica, da uso improprio); la diffusione del danno ha descritto l'estensione percentuale della superficie o del volume compromesso; l'urgenza dell'intervento, anch'essa su scala da 0 a 4, ha espresso la necessità temporale di intervenire per salvaguardare l'elemento.
Alla luce di questa valutazione integrata – che mette a confronto la valenza storica, lo stato di conservazione e l'efficienza residua – è stata definita la categoria di intervento più appropriata per ciascun elemento. L'indicazione dell'intervento, formulata a valle del processo conoscitivo, rappresenta la soluzione ottimale per massimizzare la conservazione del singolo componente. Qualora si sia ritenuto non opportuno il mantenimento dell'elemento, è stata indicata la sua rimozione.

ANALISI DELLA CONSISTENZA

| | | |
|---|---|---|
| CODIFICA DELLO STATO DI CONSERVZIONE | 0 | Elemento non compromesso |
| | 1a | Fenomeni di umidità e di lieve entità |
| | 1b | Aggressione lieve delle finiture |
| | 1c | Danni strutturali di lieve entità |
| | 1d | Patologie lievi da utilizzo e scarsa manutenzione |
| | 1e | Disconnessioni a pavimenti e rivestimenti |
| | 1f | Interferenza e degrado antropico di su elementi superficiali e lieve entità |
| | 2a | Fenomeni di umidità di grave entità |
| | 2b | Aggressione grave delle finiture |
| | 2c | Danni strutturali di media e grave rilevanza |
| | 2d | Patologie gravi da utilizzo incongruo o abbandono |
| | 2e | Perdita anche rilevante di porzioni di pavimenti e rivestimenti |
| | 2f | Interferenza e degrado antropico diffuso |
| | 3a | Compromissione strutturale |
| | 3b | Interferenza e degrado antropico tale da compromettere la leggibilità architettonica |
| | 4 | Compromissione generale, rischio di perdita |
| | 5 | Altro: fenomeni di degrado non classificabili nelle categorie precedenti |
| COMPROMISSIONE MATERICA | Si/No | |
| LACUNA/ASSENZA | Si/No | |

| | | |
|---|---|---|
| EFFICIENZA MECCANICA, TERMICA E FUNZIONALE | 0 | Totalmente inefficiente |
| | 1 | Parzialmente inefficiente |
| | 2 | Lievemente inefficiente |
| | 3 | Efficiente |
| | NV | Non valutabile |
| GRAVITA' DELL'INEFFCIEINZA GENERALE | 0 | Nulla |
| | 1 | Bassa |
| | 2 | Media |
| | 3 | Alta |
| | 4 | Molto alta |
| CATEGORIA DI DANNO SPECIFICA | a | Cedimenti |
| | b | Ossidazione/corrosione |
| | c | Infiltrazione/risalita/ristagno |
| | d | Microflora/macroflora/attacco chimico |
| | e | Distacchi/fessurazioni/esfoliazioni/incrostazioni, depositi superficiali/alterazioni cromatiche/vandalismi |
| | f | Lacune/mancanze |
| CAUSA DEL DANNO | 1 | Mancata o scarsa manutenzione |
| | 2 | Aggressione ambientale |
| | 3 | Trasformazioni incongrue |
| | 4 | Rotture accidentali |
| | 5 | Utilizzo incongruo dei materiali |
| | 6 | Abbandono |
| | 7 | Degrado antropico |
| DIFFUSIONE DEL DANNO (%) | 1 | da 0% a 10% |
| | 2 | dal 10% a 30% |
| | 3 | dal 30% al 50% |
| | 4 | oltre il 50% |
| | 5 | 100% |
| URGENZA DELL'INTERVENTO | 0 | Nulla |
| | 1 | Bassa |
| | 2 | Media |
| | 3 | Alta |
| | 4 | Molto alta |

*Tabella 19. Scheda per l'analisi della consistenza relativa ad un elemento. Considera la compromissione materica, l'assenza di parti, la gravità e diffusione dei danni, le cause del deterioramento e l'urgenza degli interventi, fornendo un quadro completo per la diagnosi e la pianificazione degli interventi necessari.*

INTERVENTO

| | |
|---|---|
| TIPO DI INTERVENTO | Preconsolidamento |
| | Asportazione |
| | Pulitura |
| | Rimozione |
| | Aggiunte o integrazioni |
| | Consolidamento |
| | Protezione |
| | Rimozione |
| | Integrazione |

| | |
|---|---|
| | Sostituzione |
| | Manutenzione |
| | Adeguamento funzionale/prestazionale |
| DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO | Breve descrizione dell'intervento che si intende svolgere |

*Tabella 20. Scheda per la definizione della categoria di intervento finalizzata all'individuazione della soluzione ottimale per il singolo elemento con la finalità di massimizzare la funzionalità e tutelarne la conservazione.*

## 1.5 I descrittori tematici per la codifica della fabbrica e dei suoi elementi costruttivi

I descrittori sono parametri, composti da criteri e indicatori, utilizzati per analizzare e descrivere in maniera sistematica le caratteristiche di un manufatto e del suo contesto, al fine di supportarne la riqualificazione e il restauro. L'attività di ricerca svolta in questi anni, sviluppata anche nell'ambito del progetto IMASS-CHAIN con il supporto di una équipe multidisciplinare di ricercatori dell'Università di Cagliari (UNICA – DICAAR), ha portato alla loro elaborazione. La mia partecipazione al progetto mi ha consentito non solo di contribuire alla definizione e al perfezionamento dei descrittori, che verranno illustrati più avanti, ma anche di sperimentarne l'applicazione su casi studio concreti, favorendone la validazione e l'affinamento operativo. In particolare, l'obiettivo della tesi si concentra sui descrittori energetici, con l'intento di verificarne l'efficacia e l'adattabilità in contesti diversi, ponendo attenzione al rapporto tra efficienza energetica e tutela del patrimonio storico.

Parte di questi descrittori è stata selezionata e adattata dal sistema Ge.Pa.D.D. (Gestione Patrimoniale e Demaniale dell'Amministrazione della Difesa), sviluppato dalla Direzione Generale di AID per la gestione informatizzata del patrimonio immobiliare in uso al Ministero della Difesa.
Questo portale è articolato in sei sezioni (Patrimonio, Alloggi, Reportistica, Documenti, Oneri ineludibili, Avvisi). La sezione chiave per i descrittori è Patrimonio, che organizza i dati secondo una struttura ad albero:

- *Compendio* (insieme di fabbricati, con schede tecniche, catastali, amministrative, urbanistiche)
- *Struttura* (agglomerati di elementi o sotto-strutture)
- *Manufatto* (edificio, articolato in più piani)
- *Piano* (può contenere al suo interno Unità o Alloggi)
- *Unità* (unità immobiliare non residenziale, suddivisa in locali)
- *Alloggio* (unità immobiliare ad uso abitativo, articolato in locali)
- *Locale* (più piccola porzione identificabile dentro un'unità o un alloggio).

Questa articolazione è stata assunta come base per definire i descrittori, facilitando l'allineamento con i sistemi informativi pubblici e la successiva applicazione nei casi studio.
L'analisi dei campi è stata condotta con l'obiettivo di facilitare la condivisione dei dati e garantire l'allineamento con i sistemi informativi già adottati dalla pubblica amministrazione. Per evitare ridondanze, la descrizione dettagliata dei campi è stata riportata nella sezione dedicata agli approfondimenti su ciascun tipo di analisi e nei relativi casi studio, dove è organizzata secondo tematismi e livelli della struttura (compendio, struttura, manufatto, piano, unità/alloggio, locale). In tale sezione è possibile consultare anche esempi di applicazione concreta, con i campi effettivamente compilati.
La struttura ad albero e la categorizzazione tematica del Ge.Pa.D.D. hanno fornito un riferimento solido per la definizione dei descrittori, favorendone l'allineamento con una banca dati già operativa e assicurando così coerenza e interoperabilità.

A questo riferimento si sono aggiunti ulteriori descrittori estrapolati dal Raumbuch, che hanno arricchito la griglia con informazioni dettagliate sugli ambienti e sulle loro caratteristiche funzionali, oltre che sui singoli elementi architettonici. Per questi ultimi, sono state specificate la cronologia, il grado di interesse, la trasformabilità e le altre voci tipiche del sistema Raumbuch.

Parallelamente, sono stati integrati descrittori tratti dalla norma tecnica UNI 8290 (sezioni D, E, F e H), la quale classifica e definisce la terminologia del sistema tecnologico dell'edilizia residenziale articolandola su tre livelli distinti: classi di unità tecnologiche, unità tecnologiche ed elementi tecnici. Questa integrazione ha fornito una struttura sistematica per la catalogazione e l'analisi degli elementi costruttivi e tecnologici degli edifici, garantendo una maggiore precisione e uniformità nelle rilevazioni.

I descrittori definiti comprendono i seguenti aspetti fondamentali:

a. Analisi storico-archivistica e titolazione documentale;
b. Analisi cronotipologica, delle fasi costruttive e successive modificazioni, analisi dei caratteri storico identitari e del valore storico, artistico, testimoniale e culturale;
c. Analisi morfologica e dimensionale;
d. Analisi e caratterizzazione degli elementi costruttivi, loro consistenza e livelli di performance;
e. Analisi strutturale;

f. Analisi tecnico-prestazionale e impiantistica;
g. Analisi urbanistica;
h. Analisi compositiva e distributiva;
i. Analisi estimativa.

Parallelamente all'individuazione dei descrittori, è stata svolta un'analisi approfondita sulle diverse tipologie di dati che si possono generare, distinguendo tra dati strutturati e non strutturati. I dati strutturati comprendono elementi come numeri interi, numeri decimali, stringhe di testo, valori booleani e dati che possono presentare un numero variabile di istanze. Questi dati sono caratterizzati da una struttura ben definita, che ne facilita l'archiviazione, il rapido accesso e la gestione efficiente.
D'altra parte, i dati non strutturati includono contenuti più complessi e variegati, come file di testo, immagini, video e soprattutto le informazioni contenute nei modelli BIM (Building Information Modeling). Questi ultimi racchiudono dati fondamentali relativi al modello 3D, ai costi, ai tempi di realizzazione e alle proprietà tecniche degli elementi edilizi. Sebbene più difficili da organizzare e gestire rispetto ai dati strutturati, i dati non strutturati sono indispensabili per rappresentare in modo dettagliato e completo tutte le informazioni del modello BIM, offrendo così una visione più ricca e approfondita del progetto.

I tematismi individuati sono stati analizzati seguendo uno schema compilativo specifico. Tale schema prevede i seguenti elementi: il nome del descrittore, che include la sua definizione; una descrizione dettagliata in termini quantitativi e semantici; i vocabolari, ossia le voci ammesse per la compilazione (ad esempio menù a tendina o campi di testo liberi); la fonte del dato, come ad esempio Ge.Pa.D.D., Raumbuch, normative di riferimento e infine un campo note, destinato a riportare eventuali osservazioni o considerazioni aggiuntive.

| Nome | Descrizione | Vocabolari | Fonte | Note |
|---|---|---|---|---|
| Descrittore | | | | |

Nei capitoli successivi verranno approfonditi i descrittori effettivamente utilizzati ai fini del presente lavoro di tesi.

### 1.5.1 Descrittori storico-archivistici e documentali

I descrittori storico-archivistici e documentali definiscono un sistema di metadati finalizzato alla catalogazione e alla gestione dei disegni tecnici e dei documenti d'archivio collegati a un compendio o a un singolo manufatto. Si tratta di un insieme di campi che consente di garantire la tracciabilità e la conservazione del materiale, rendendolo accessibile e integrabile in processi di digitalizzazione e gestione archivistica.
Tali descrittori riguardano, in primo luogo, l'identificazione del documento, attraverso elementi come il titolo, eventuali titoli alternativi, i codici identificativi e i riferimenti al manufatto di appartenenza. Ad essi si affiancano informazioni relative alla collocazione spazio-temporale, come il toponimo riportato nei documenti, le cronologie specifiche o sintetiche e la lingua di redazione. Una seconda area di descrizione è legata alle caratteristiche materiali, comprendenti il supporto utilizzato, la tecnica impiegata per la realizzazione, il formato e, nei casi pertinenti, il numero di pagine o la scala di rappresentazione grafica.
Altri descrittori permettono di definire la tipologia documentaria e la finalità dell'elaborato, specificando se il documento corrisponde a un atto catastale, a un inventario militare, a un rilievo o a un progetto esecutivo, nonché le condizioni di conservazione e l'eventuale necessità di interventi. Completano il quadro i campi legati alla gestione archivistica, che comprendono la presenza di allegati, le modalità di riproduzione consentite, l'archivio di provenienza, l'esistenza di copie digitali, il soggetto conservatore, la collocazione dell'unità documentaria e i livelli di accesso previsti per la consultazione.

Tuttavia, nel presente lavoro essi vengono riportati soprattutto per completezza: essendo stati elaborati dal team multidisciplinare di ricerca e non costituendo il principale oggetto di indagine della tesi, non se ne presenta un'applicazione concreta, a differenza di quanto avviene per le altre categorie di descrittori tecnici.

### 1.5.2 Descrittori cronotipologici, delle fasi costruttive e successive modificazioni

Le tabelle contenenti i descrittori cronotipologici delle fasi costruttive e delle successive modificazioni si configurano come uno strumento di riferimento per descrivere in maniera sistematica le evoluzioni storiche e tipologiche che hanno interessato il compendio, i singoli manufatti e i relativi elementi architettonici. Esse consentono di raccogliere, ordinare e interpretare informazioni che spaziano dal periodo di costruzione alle caratteristiche tipologiche, dalle codifiche di catalogazione fino alle valutazioni legate alla tutela e alla trasformabilità.
Le tre tabelle che seguono mostrano come il sistema possa essere applicato in maniera scalare ai diversi livelli – compendio, manufatto ed elemento – permettendo di passare da una visione generale dell'organismo edilizio a una lettura di dettaglio del singolo componente architettonico, in un processo integrato di conoscenza e gestione del patrimonio costruito.
Nei capitoli successivi, dedicati all'analisi dei singoli casi studio, vengono riportati esempi applicativi delle tabelle con i campi compilati, al fine di mostrare in modo concreto le potenzialità e le modalità di utilizzo del metodo proposto.

| DESCRITTORI CRONOTIPOLOGICI - COMPENDIO | |
|---|---|
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch |
| DENOMINAZIONE | Nome descrittivo del compendio (esempio Caserma Riva Villasanta) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Anno costruzione | Indica il periodo in cui è stato realizzato l'intero compendio edilizio. |
| Tipologia | Definisce la configurazione complessiva del compendio, specificandone l'impianto tipologico. |
| Codifica Raumbuch | Identifica in maniera univoca il compendio all'interno del sistema di catalogazione Raumbuch. |
| Fase cronologica prevalente | Riferisce l'intervallo temporale principale in cui il compendio si colloca. |
| Interventi di restauro | Segnala l'assenza di proposte di intervento a fini conservativi e/o di restauro sull'intero compendio. |

*Tabella 21. Tabella dei descrittori cronotipologici relativi al compendio.*

| DESCRITTORI CRONOTIPOLOGICI - MANUFATTO | |
|---|---|
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch |
| DENOMINAZIONE | Nome descrittivo del manufatto (esempio Palazzina Comando) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Anno costruzione | Indica il periodo in cui è stato realizzato il manufatto all'interno del compendio. |
| Tipologia | Definisce la tipologia edilizia del singolo manufatto, specificandone caratteristiche e funzione originaria. |
| Codifica Raumbuch | Identifica in maniera univoca il manufatto all'interno del sistema di catalogazione Raumbuch. |
| Fase cronologica prevalente | Riferisce l'intervallo temporale principale in cui si colloca il manufatto. |
| Interventi di restauro | Segnala l'assenza di proposte di intervento a fini conservativi e/o di restauro sul manufatto. |

*Tabella 22. Tabella dei descrittori cronotipologici relativi al manufatto.*

| DESCRITTORI CRONOTIPOLOGICI - ELEMENTO | |
|---|---|
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch |
| CODICE PIANO | Identificativo che individua il livello altimetrico del manufatto |
| CODICE UNITA' | Codice attribuito alla singola unità spaziale |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Anno costruzione | Indica l'anno di realizzazione dell'elemento, espresso con un valore numerico di quattro cifre. |
| Tipologia | Definisce la tipologia dell'elemento architettonico o costruttivo, specificandone forma, materiali e funzione. |
| Codifica Raumbuch | Identifica in maniera univoca l'elemento nel sistema di catalogazione Raumbuch del manufatto. |
| Fase cronologica | Riferisce l'intervallo temporale in cui l'elemento si colloca. |
| Interventi di restauro | Segnala la presenza o l'assenza di proposte di intervento a fini conservativi e/o di restauro. I valori possibili sono: sì, no oppure non è noto. |
| Valutazione dell'interesse | Consente di identificare il valore storico, artistico o tecnico di un elemento architettonico, distinguendolo in diverse tipologie (artistico, costruttivo, testimoniale, tipologico). Serve a orientare gli interventi di tutela e conservazione in base alla rilevanza culturale del bene. |
| Grado di trasformabilità | Indica il livello di modificabilità ammissibile per l'elemento, in relazione al suo valore e alla necessità di tutela. Va da 0 (non trasformabile, interesse storico artistico) a 3 (da rimuovere, elemento incongruo) e serve a orientare gli interventi nel rispetto del patrimonio esistente. |

*Tabella 23. Tabella dei descrittori cronotipologici riferiti al livello di elemento.*

### 1.5.3 Descrittori morfologici e dimensionali

I descrittori morfologici e dimensionali costituiscono uno strumento fondamentale per la conoscenza e la caratterizzazione del patrimonio edilizio, poiché consentono di raccogliere in maniera sistematica dati che spaziano dalla scala del compendio a quella del singolo manufatto. Attraverso questi indicatori è possibile delineare non solo la consistenza quantitativa (numero di edifici, piani, locali, alloggi, ingressi), ma anche le caratteristiche qualitative e geometriche, quali le superfici, le volumetrie e le dimensioni lineari.
I descrittori morfologici si concentrano principalmente sulla configurazione spaziale e tipologica dell'oggetto studiato, descrivendone la forma, la distribuzione interna e la struttura compositiva (ad esempio tipologia edilizia, numero di piani, quantità di locali e ingressi).
I descrittori dimensionali, invece, riguardano le misure quantitative, restituendo parametri geometrici e fisici come superfici, volumi e altezze, che permettono di valutare le proporzioni e la scala dell'edificio.
Questi descrittori, integrati tra loro, offrono una visione d'insieme utile a comprendere la configurazione dell'organismo edilizio, la sua articolazione interna e l'evoluzione nel tempo. Si tratta di dati fondamentali non solo per la documentazione, ma anche per la pianificazione di eventuali interventi di valorizzazione, conservazione o trasformazione.

Le tabelle che seguono, con i descrittori morfologici e dimensionali applicabili a livello del compendio o del manufatto, restituiscono in forma schematica queste informazioni, facilitando l'analisi della consistenza e delle proporzioni degli organismi edilizi considerati.
Nei capitoli successivi, dedicati all'analisi dei singoli casi studio, vengono riportati esempi applicativi delle tabelle con i campi compilati, al fine di mostrare in modo concreto le potenzialità e le modalità di utilizzo del metodo proposto.

| DESCRITTORI MORFOLOGICI E DIMENSIONALI - COMPENDIO | |
|---|---|
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| DENOMINAZIONE | Nome descrittivo del compendio (esempio Caserma Riva Villasanta) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Numero complessivo edifici | Indica il numero totale degli edifici facenti parte dell'intero complesso. |
| Numero complessivo piani fuori terra | Indica il numero totale dei piani fuori terra facenti parte dell'intero complesso. Il dato è importante per avere una visione della volumetria, in superficie, del complesso. |
| Numero complessivo piani interrati | Indica il numero totale dei piani che si trovano sotto il livello del suolo. Il dato è utile per valutare la struttura e la funzionalità degli spazi non visibili in superficie. |
| Numero complessivo alloggi | Indica il numero totale di alloggi (appartamenti, unità residenziali) facenti parte dell'intero complesso. Ogni unità abitativa viene conteggiata separatamente |
| Numero complessivo locali | Indica il totale dei locali presenti nel compendio. I locali rappresentano gli ambienti identificabili all'interno dei vari piani, che non vengono classificati come alloggi. |
| Numero complessivo varchi/ingressi | Indica la quantità totale dei varchi di accesso presenti nel compendio. Comprende sia gli ingressi principali sia quelli secondari, ed è utile per caratterizzare la permeabilità dell'organismo edilizio e la sua articolazione funzionale. |

*Tabella 24. Tabella dei descrittori morfologici e dimensionali relativi al compendio.*

| DESCRITTORI MORFOLOGICI E DIMENSIONALI - MANUFATTO | |
|---|---|
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| DENOMINAZIONE | Nome descrittivo del manufatto (esempio Palazzina Comando) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Tipologia | Identifica la configurazione architettonica dell'edificio classificandolo secondo specifiche tipologie costruttive (palazzina isolata, edificio in linea, edificio a schiera, edificio a corte, aggregazione di volumi o altre tipologie non rientranti in queste categorie standard). |
| Numero complessivo piani fuori terra | Indica il numero totale dei piani fuori terra del singolo manufatto. Questo dato è utile per valutare la volumetria e la distribuzione degli spazi in elevazione. |
| Numero complessivo piani interrati | Indica il numero totale dei piani del manufatto che si trovano sotto il livello del suolo. L'informazione è importante per comprendere la struttura e la funzionalità degli spazi ipogei. |

| | |
|---|---|
| Numero complessivo alloggi | Indica il numero totale di unità abitative (appartamenti o alloggi) presenti all'interno del manufatto. Ogni unità viene conteggiata separatamente. |
| Numero complessivo locali | Indica il totale dei locali presenti nel manufatto. I locali rappresentano gli ambienti identificabili ai vari piani, esclusi quelli classificabili come alloggi. |
| SUPERFICIE | |
| Superficie totale coperta | Corrisponde alla proiezione sul piano orizzontale dell'ingombro massimo del manufatto fuori terra, delimitato dagli elementi verticali esterni (pareti perimetrali, pilastri, setti portanti). |
| Superficie di calpestio | È data dalla somma delle superfici utili e accessorie di pavimento, ovvero gli spazi effettivamente fruibili. |
| Superficie totale | Rappresenta la somma delle superfici di tutti i piani (fuori terra, seminterrati e interrati), calcolata entro il perimetro esterno dell'edificio. |
| VOLUMETRIA | |
| Volumetria fuori terra | Volume dell'edificio compreso al di sopra del piano di campagna. |
| Volume interrato | Volume dell'edificio compreso al di sotto del piano di campagna. |
| Volume totale | Volume complessivo dell'edificio, calcolato come prodotto della superficie totale di ciascun piano per la relativa altezza lorda. |
| DIMENSIONI LINEARI | |
| Altezza massima | Altezza maggiore registrata tra i diversi fronti del manufatto, misurata dal piano di campagna all'estremità superiore della copertura. |
| Altezza del piano | Distanza verticale tra il piano di calpestio di un livello e il piano di calpestio del livello immediatamente superiore. |
| Altezza utile | Altezza netta del vano, misurata dal piano di calpestio all'intradosso del solaio sovrastante. |
| Lunghezza | Dimensione lineare principale dell'edificio, misurata lungo il lato maggiore. |
| Larghezza | Dimensione lineare secondaria dell'edificio, misurata lungo il lato minore. |
| Perimetro | Sviluppo complessivo delle linee di contorno esterne del manufatto. |

*Tabella 25. Tabella dei descrittori morfologici e dimensionali relativi al manufatto.*

### 1.5.4 Descrittori degli elementi costruttivi, loro consistenza e livelli di performance

I descrittori utilizzati per la catalogazione, la valutazione e la gestione degli elementi costruttivi rappresentano uno strumento fondamentale per documentare in maniera sistematica le caratteristiche materiali e le condizioni conservative del patrimonio edilizio. Essi consentono non solo di individuare la consistenza fisica dell'elemento, ma anche di analizzarne le prestazioni strutturali e funzionali, fornendo una base solida per la programmazione degli interventi di manutenzione, restauro e riqualificazione.
La sezione iniziale dei descrittori riguarda l'identificazione dell'elemento, attraverso codici univoci (compendio, manufatto, piano, unità, elemento), classificazioni tipologiche e codifiche Raumbuch, che assicurano tracciabilità, riconoscibilità e interoperabilità dei dati. Accanto a questi, le informazioni quantitative relative a perimetro, area e volume garantiscono una misurazione precisa e comparabile della consistenza geometrica.
Segue la parte dedicata allo stato di conservazione, in cui si rilevano le condizioni materiali dell'elemento, la presenza di compromissioni materiche (lacune, assenze, erosioni) e la classificazione del degrado secondo livelli gerarchici che vanno dal "non compromesso" fino alla "compromissione generale e rischio di perdita". Questo quadro è ulteriormente arricchito dalla valutazione di efficienza meccanica (capacità strutturale) ed efficienza funzionale (capacità prestazionale), che insieme restituiscono la piena leggibilità del comportamento dell'elemento nel contesto dell'edificio.
I descrittori comprendono anche l'analisi della gravità dell'inefficienza complessiva, utile per attribuire priorità agli interventi, e l'individuazione delle categorie di danno specifiche, che dettagliano le patologie riscontrate (fessurazioni, distacchi, ossidazioni, ecc.). A queste si associano la definizione della causa (mancata manutenzione, azione ambientale, trasformazioni incongrue, eventi accidentali, ecc.) e della natura del danno (alluvione, cedimento, incendio, sisma), oltre ai parametri quantitativi che ne esprimono diffusione percentuale ed estensione areale.
Infine, la parte conclusiva è dedicata alla pianificazione delle azioni di intervento, in cui la tipologia dei lavori (adeguamento, miglioramento, rafforzamento locale, riparazione) è affiancata dalla valutazione del grado di urgenza, fondamentale per stabilire le priorità e programmare le risorse disponibili.
Nel loro insieme, queste tabelle consentono di passare da una semplice descrizione materiale a un vero e proprio sistema di gestione conoscitiva, capace di supportare decisioni consapevoli in materia di conservazione, manutenzione e valorizzazione del patrimonio costruito.

Le tabelle che seguono, dedicate ai descrittori degli elementi costruttivi, restituiscono in forma schematica le informazioni necessarie per l'identificazione, la valutazione dello stato di conservazione e l'analisi delle prestazioni dei singoli elementi costruttivi. Questo sistema di descrizione consente di individuare patologie, cause e gravità dei danni, oltre a definire tipologia e urgenza degli interventi da programmare.
Nei capitoli successivi, dedicati all'analisi dei singoli casi studio, vengono riportati esempi applicativi delle tabelle con i campi compilati, così da mostrare concretamente le modalità di utilizzo del metodo e la sua efficacia nel supportare le decisioni in materia di manutenzione, restauro e valorizzazione del patrimonio costruito.

| DESCRITTORI DEGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI | |
|---|---|
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| CODICE PIANO | Identificativo che individua il livello altimetrico del manufatto. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio 00, 01, 02, ecc.) |
| CODICE ALLOGGIO, LOCALE, UNITA' | Codice attribuito alla singola unità spaziale o funzionale. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio 00_01, 01_01, ecc.) |
| CODICE ELEMENTO | Identificativo univoco assegnato al singolo componente costruttivo. È definito secondo la codifica Raumbuch (esempio Mue_01). |

| DESCRITTORE | DESCRIZIONE |
|---|---|
| Anno di costruzione | Indica l'anno in cui l'elemento è stato realizzato o installato, espresso in formato numerico a quattro cifre e fornisce un riferimento temporale utile per valutazioni cronologiche e conservative. |
| Tipologia | Descrive la natura e la funzione dell'elemento costruttivo (fondazione, pavimento, infisso, muratura, strutture in c.a., collegamento verticale, finitura, chiusure orizzontali, opera metallica, elemento decorativo, impianto idrico-sanitario, impianto elettrico, impianti controllo ambientale). |
| Codice tipologia | Definisce la sottocategoria specifica dell'elemento costruttivo. |
| Codice Raumbuch | È un identificativo univoco assegnato a ciascun elemento costruttivo, utile per garantirne la riconoscibilità, la tracciabilità e facilitarne la gestione. |
| Descrizione | Fornisce una breve descrizione qualitativa dell'elemento, evidenziandone caratteristiche, materiali, stato o funzioni particolari |
| Perimetro | Misura della lunghezza complessiva del contorno dell'elemento |
| Area | Superficie complessiva in pianta occupata dall'elemento |
| Volume | Quantità di spazio tridimensionale occupato dall'elemento |
| Stato di conservazione | Descrive sinteticamente le condizioni materiali dell'elemento, indicando l'eventuale presenza di fenomeni di degrado o danni strutturali. Le condizioni possono essere classificate come: non compromesso, presenza di fenomeni di umidità di lieve entità, presenza di fenomeni di umidità di grave entità, compromissione strutturale, compromissione generale e rischio di perdita, altro. |
| Codifica stato di conservazione | Permette di descrivere sinteticamente le principali tipologie di degrado riscontrabili sugli elementi costruttivi, classificandole secondo un sistema gerarchico che va da situazioni non compromesse fino a casi di degrado estremo o non classificabile. Il sistema prevede sei livelli: non compromesso, degrado di lieve entità, degrado moderato/grave, compromissione strutturale, compromissione generale e rischio perdita, altro. I livelli, a loro volta, si articolano poi in sotto categorie più dettagliate. |
| Compromissione materica | Segnala l'alterazione o la perdita della materia originaria dell'elemento, indicando fenomeni come lacune, assenze o erosioni che ne compromettono l'integrità fisica. Viene espressa con valori quali0 "sì" (presenza di compromissione), "bo" (assenza di compromissione) o "parziale" (deterioramento limitato). |
| Lacuna/assenza | Indica la presenza di parti mancanti o totalmente assenti dell'elemento costruttivo, dovute a fenomeni di degrado, distacchi o rimozioni. |
| Efficienza meccanica | Fornisce una valutazione del comportamento strutturale dell'elemento, indicando il grado di resistenza e stabilità in relazione alla sua funzione portante o al contesto costruttivo in cui è inserito. Si classifica su una scala che va da totalmente inefficiente, gravemente inefficiente, parzialmente inefficiente, lievemente inefficiente, efficiente a non valutabile. |

| | |
|---|---|
| Efficienza funzionale | Descrive il livello di funzionamento dell'elemento in relazione al ruolo che svolge all'interno dell'edificio, evidenziando eventuali criticità o perdite di prestazione. Si classifica su una scala che va da totalmente inefficiente, gravemente inefficiente, parzialmente inefficiente, lievemente inefficiente, efficiente a non valutabile. |
| Gravità dell'inefficienza generale | Esprime un giudizio complessivo sull'inefficienza dell'elemento, tenendo conto di carenze strutturali, funzionali e conservative, utile per definire priorità di intervento. Si classifica su una scala che va da nulla, bassa, media, alta fino a molto alta. |
| Categoria di danno specifica | Individua in modo dettagliato le tipologie di degrado o patologie presenti sull'elemento (es. fessurazioni, distacchi, ossidazioni), offrendo un quadro analitico necessario alla progettazione di azioni conservative e di restauro mirate. |
| Causa del danno | Indica la possibile origine o motivo del deterioramento riscontrato sull'elemento, basandosi sull'analisi critica delle condizioni e dei segni di degrado presenti, al fine di comprendere i fattori che ne hanno determinato il danno. Tra le possibili cause prevede: mancata o scarsa manutenzione, l'aggressione ambientale, trasformazioni incongrue, rotture accidentali, utilizzo inappropriato dei materiali, abbandono o degrado di natura antropica. |
| Natura del danno | Contiene una descrizione sintetica della tipologia di danno riscontrato sull'elemento, come ad esempio alluvione, cedimento, frana, incendio o terremoto. |
| Diffusione del danno [%] | Indica la percentuale di estensione del fenomeno dannoso rispetto alla totalità dell'elemento analizzato, con valori che possono variare da 0% a oltre il 50%, fino al 100%. |
| Estensione del danno | Fornisce una misura dimensionale, espressa in metri quadrati (mq), che rappresenta l'area effettivamente interessata dal danno. |
| Gravità del danno | Esprime il livello di gravità del danno riscontrato, classificato su una scala che va da nulla, bassa, media, alta fino a molto alta. |
| Intervento | Indica la tipologia di lavori necessari per la conservazione o il restauro dell'elemento. Le principali tipologie sono: adeguamento, miglioramento, rafforzamento locale e riparazione. |
| Urgenza dell'intervento | Indica la tipologia di intervento necessario per la gestione del danno, che può comprendere adeguamento, miglioramento, rafforzamento locale o riparazione, oltre a una serie di categorie amministrative o gestionali relative a esigenze, atti, finanziamenti e verifiche tecniche. |
| Tipologia lavori | Fornisce un'indicazione sintetica del livello di urgenza con cui programmare e attuare l'intervento, classificata su una scala da nulla, bassa, media, alta fino a molto alta. |

*Tabella 26. Tabella dei descrittori su consistenza e livelli di performance degli elementi costruttivi.*

### 1.5.5 Descrittori strutturali

Anche i descrittori strutturali, come i descrittori storico-archivistici e documentali, non costituiscono parte integrante del presente lavoro di tesi in quanto sono stati raccolti dal gruppo di ricerca, ma sono stati per offrire un quadro descrittivo più completo, dal momento che rappresentano un sistema articolato di informazioni finalizzate a caratterizzare le componenti portanti di un edificio. Essi permettono di documentare le caratteristiche costruttive e meccaniche degli elementi strutturali, di leggere il comportamento statico e sismico del manufatto e di evidenziare eventuali criticità connesse alla sicurezza o alla conservazione.
Le informazioni considerate riguardano diversi ambiti. Da un lato vi sono i parametri territoriali e normativi, come la zonazione sismica, le categorie di sottosuolo e topografiche, le zonazioni vento e neve e le relative classi di esposizione, che derivano dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC2018) e che consentono di definire le azioni ambientali agenti sull'edificio. A queste si affiancano i dati sul rischio idrogeologico e ambientale, mutuati dalle classificazioni ISPRA, utili a inquadrare il contesto in cui l'edificio è inserito.
Un secondo gruppo di descrittori riguarda le caratteristiche tipologiche e funzionali del manufatto, come l'appartenenza o meno a unità strutturali e aggregati, la posizione rispetto al compendio, la presenza di vincoli di tutela, la destinazione d'uso attuale e le sue variazioni nel tempo. Questi dati sono fondamentali per interpretare l'evoluzione storica e funzionale dell'edificio, così come la sua vulnerabilità.
Un ulteriore insieme è dedicato agli elementi costruttivi veri e propri: tipologie strutturali in elevazione, solai e coperture, fondazioni superficiali o profonde, collegamenti tra livelli e regolarità della struttura in pianta e in altezza. Qui rientrano anche i descrittori sulla distribuzione delle tamponature, sulla presenza di giunti strutturali e sulle diverse configurazioni dei materiali impiegati (muratura, cemento armato, acciaio, legno, strutture miste).
Infine, completano il quadro i dati conoscitivi e diagnostici, come i livelli di conoscenza e i fattori di confidenza previsti da NTC2018, la presenza di analisi strutturali pregresse, la rilevazione di eventuali danni e le relative criticità. A livello di dettaglio, gli elementi possono essere ulteriormente descritti in base al materiale, alla funzione (portante verticale, orizzontale, collegamento, fondazione), alle dimensioni, alla sezione, ai dettagli costruttivi (armature, collegamenti, vincoli) e alle caratteristiche fisico-meccaniche.

Nel contesto della presente ricerca, essi vengono riportati per completezza e come cornice metodologica di riferimento, senza che ne venga mostrata un'applicazione diretta, poiché l'attenzione è stata rivolta principalmente ai descrittori energetici e prestazionali.

## 1.6 I descrittori del comportamento tecnico-prestazionale in ambito energetico

I descrittori tecnico-prestazionali e impiantistici costituiscono uno strumento per valutare in modo sistematico la qualità energetica e funzionale dell'edificio. Da un lato consentono di descrivere le caratteristiche dell'involucro edilizio – distinguendo tra chiusure opache (pareti, solai, coperture) e chiusure trasparenti (serramenti, vetrate) – e di evidenziare la presenza di ponti termici o altre criticità che incidono sull'efficienza complessiva. Dall'altro lato, permettono di analizzare la configurazione e le prestazioni degli impianti: riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, produzione e distribuzione di acqua calda sanitaria, illuminazione e, ove presenti, tecnologie basate su fonti rinnovabili (fotovoltaico, solare termico, geotermia, biomasse, ecc.). La raccolta di questi dati consente di descrivere lo stato attuale delle prestazioni energetiche, individuare le principali criticità e fornire un supporto concreto alla definizione di strategie di miglioramento.
Le tabelle che seguono restituiscono in forma schematica tali descrittori, offrendo un quadro integrato dell'involucro e degli impianti e rendendo più immediata la valutazione delle soluzioni da adottare in sede di progettazione, manutenzione o riqualificazione. Nei capitoli successivi, dedicati ai casi studio, vengono riportati esempi applicativi con i campi compilati, così da mostrare l'efficacia del metodo nel supportare decisioni consapevoli in materia di efficienza energetica e valorizzazione del patrimonio costruito.

### 1.6.1 Descrittori climatici della località:

I descrittori climatici della località (Tabella 27) rappresentano la base di riferimento per la valutazione del comportamento tecnico-prestazionale del manufatto. Essi consentono di collocare l'edificio nel proprio contesto geografico e ambientale, fornendo informazioni relative alla zona climatica e ai parametri termo-igrometrici di progetto (temperature, umidità, escursione termica, velocità del vento), oltre a dati altimetrici e localizzativi (regione, comune, coordinate geografiche, posizione in centro storico).

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| DESCRITTORI CLIMATICI DELLA LOCALITA' | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Zona climatica | Indica la fascia climatica in cui è ubicato l'edificio, secondo la classificazione nazionale. Ogni zona (da A a F) è associata a specifici limiti normativi relativi alla durata giornaliera e ai periodi annuali consentiti per l'attivazione degli impianti termici. |
| Regione | Individuazione della regione amministrativa italiana in cui ricade il sito oggetto di studio. |
| Comune di riferimento | Comune in cui è localizzato l'edificio, utile per l'applicazione delle normative edilizie e urbanistiche locali. |
| Localizzazione | Indirizzo o indicazione toponomastica specifica che permette di identificare con precisione la posizione dell'edificio. |
| Coordinate geografiche | Valori di latitudine e longitudine che definiscono in maniera univoca la posizione geografica del sito. |
| Edificio situato in centro storico | Indicazione binaria (sì/no) che segnala se l'edificio ricade all'interno del perimetro del centro storico comunale, con conseguenti vincoli normativi e prescrizioni di tutela. |
| Gradi Giorno invernali (GG) | Indice che rappresenta la severità del clima invernale, calcolato come somma, estesa al periodo annuale di riscaldamento, delle sole differenze positive tra temperatura interna convenzionale (20 °C) e temperatura media esterna giornaliera. |
| Temperatura esterna di progetto invernale | Valore di temperatura minima esterna utilizzato come riferimento per il dimensionamento termico degli impianti di riscaldamento. |

| | |
|---|---|
| Umidità relativa esterna invernale | Percentuale media di umidità atmosferica esterna durante la stagione invernale, utile per valutazioni termoigrometriche. |
| Temperatura esterna di progetto estiva | Valore di temperatura massima esterna utilizzato come riferimento per il dimensionamento degli impianti di raffrescamento. |
| Umidità relativa esterna estiva | Percentuale media di umidità atmosferica esterna durante la stagione estiva, rilevante per la valutazione del comfort e delle prestazioni di raffrescamento. |
| Escursione termica giornaliera estiva | Differenza media tra temperatura massima e minima giornaliera nella stagione estiva, utile per valutare le variazioni climatiche e i fabbisogni energetici per il raffrescamento. |
| Velocità del vento di progetto | Velocità media del vento utilizzata come parametro di riferimento per i calcoli termoenergetici e per la verifica delle condizioni di ventilazione naturale o forzata. |
| Altitudine del sito | Quota altimetrica del sito rispetto al livello del mare, espressa in metri, che influisce sui parametri climatici e sulle condizioni termoenergetiche. |

*Tabella 27. Descrittori climatici e localizzativi del manufatto.*

### 1.6.2 Descrittori identificativi:

I descrittori identificativi del manufatto (Tabella 28) hanno la funzione di raccogliere in modo sistematico le informazioni di base necessarie alla sua classificazione e tracciabilità all'interno del sistema di catalogazione. Essi includono dati anagrafici e cronologici (anno di costruzione, eventuale nuova edificazione o interventi successivi), la destinazione d'uso e lo stato di eventuali processi di riqualificazione energetica già eseguiti.
Un ulteriore gruppo di informazioni riguarda la prestazione energetica complessiva, attraverso la classe energetica, il codice identificativo e i riferimenti temporali dell'Attestato di Prestazione Energetica (APE), insieme all'organizzazione interna in zone termiche, che consente di distinguere le aree climatizzate dell'edificio.
Infine, sono previsti campi dedicati agli interventi strutturali post-costruzione, utili a documentare l'eventuale presenza di opere di adeguamento o miglioramento sismico e ad arricchire il quadro storico-tecnico del manufatto.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| DESCRITTORI IDENTIFICATIVI | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Oggetto | Identifica il manufatto. |
| Nuova costruzione | Indica se il manufatto è stato realizzato ex novo (risposta Sì/No), distinguendolo da edifici storici, esistenti o frutto di recupero edilizio. |
| Destinazione d'uso | Contiene una descrizione sintetica della funzione attuale del compendio o del manufatto, utile per comprendere le esigenze funzionali, impiantistiche e normative correlate. |
| Riqualificazione energetica | Segnala se l'edificio ha già beneficiato di interventi di efficientamento energetico (risposta Sì/No), informazione rilevante per l'analisi delle prestazioni energetiche e per la pianificazione di ulteriori interventi. |

| | |
|---|---|
| Classe energetica globale dell'edificio | Indica la qualità complessiva delle prestazioni energetiche dell'edificio, espressa secondo una scala prestabilita che va dalla **classe A4** (massima efficienza energetica) fino alla **classe G** (minima efficienza). Questa classificazione tiene conto dei consumi per riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria, ventilazione e illuminazione, laddove previsto. |
| Codice certificato di prestazione energetica | Rappresenta il codice identificativo univoco, generalmente costituito da una sequenza alfanumerica, che consente di individuare il relativo Attestato di Prestazione Energetica (APE) dell'edificio. Questo codice è assegnato dal sistema informativo regionale o nazionale al momento del rilascio dell'attestato. |
| Data di emissione | Corrisponde alla data indicata sull'Attestato di Prestazione Energetica, riportata nel formato giorno – mese per esteso – anno (es. 15 giugno 2024) e rappresenta il momento ufficiale di rilascio del documento da parte del tecnico abilitato. |
| Validità | Indica la data di scadenza dell'Attestato di Prestazione Energetica (APE), ovvero il termine entro cui il certificato è considerato valido. La data è espressa nel formato giorno – mese per esteso – anno (es. 15 giugno 2034) e corrisponde generalmente a 10 anni dalla data di emissione, salvo interventi significativi sull'edificio che richiedano un aggiornamento anticipato. |
| Zone termiche | Rappresentano le parti dell'edificio che vengono riscaldate (o eventualmente raffrescate) mantenendo una temperatura interna omogenea. Ogni zona termica è individuata con un numero intero n, che consente di distinguere le diverse aree climatizzate all'interno dello stesso edificio, in funzione della loro destinazione d'uso e del sistema impiantistico adottato. |
| Nessun intervento eseguito sulla struttura dopo la costruzione | Indica se, successivamente alla costruzione originaria, sono stati effettuati interventi strutturali sull'edificio. |
| Tipo di intervento eseguito | Se nel descrittore precedente è stata data risposta negativa, indicando quindi che sono stati eseguiti interventi dopo la costruzione, è necessario specificare la tipologia dell'intervento realizzato, distinguendo tra: adeguamento sismico, miglioramento sismico, altro. |

*Tabella 28. Descrittori identificativi del manufatto.*

### 1.6.3 Strutture opache verticali

I descrittori delle strutture opache verticali (Tabella 29) forniscono un quadro tecnico-prestazionale dettagliato delle pareti esterne non trasparenti dell'edificio. Attraverso questi parametri è possibile documentare la composizione stratigrafica (numero e tipologia degli strati), i materiali strutturali predominanti e lo spessore complessivo della parete, dati fondamentali per comprenderne il comportamento statico e termico. Vengono inoltre considerate le proprietà termo-fisiche che consentono di valutare la capacità isolante, l'inerzia termica e le prestazioni energetiche stagionali.
Ulteriori descrittori riguardano le condizioni di scambio termico (adduttanza interna ed esterna) e l'ambiente di contatto della parete (esterno, ambienti non climatizzati, terreno o zone interne), elementi indispensabili per la corretta definizione dei modelli energetici e per la stima delle dispersioni. Nel loro insieme, questi descrittori costituiscono la base conoscitiva per valutare le prestazioni dell'involucro edilizio e per orientare le strategie di miglioramento energetico e di comfort abitativo.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Codice elemento | Identificativo univoco assegnato a ciascun elemento costruttivo all'interno del sistema di catalogazione Raumbuch. |
| Stratigrafia | Identifica, mediante un codice numerico, la tipologia dell'elemento verticale analizzato, permettendo il collegamento con le specifiche stratigrafie tecniche associate a ciascun tipo di parete |
| Numero di strati | Indica il numero totale di strati che compongono la chiusura edilizia, specificando la stratigrafia dei materiali utilizzati. |
| Materiale strutturale principale | Indica il materiale costruttivo predominante della struttura verticale, utile per la valutazione del comportamento statico e termico della parete. Le principali categorie includono cemento armato, acciaio, acciaio-calcestruzzo, muratura, legno, strutture miste (es. muratura e c.a.) e prefabbricato in c.a. o c.a.p. |
| Spessore totale parete | Rappresenta la distanza complessiva tra la superficie interna e quella esterna della parete, espressa in centimetri. Questo valore è fondamentale per la determinazione delle prestazioni energetiche e della massa superficiale dell'elemento. |
| Trasmittanza termica (U) | Esprime il flusso medio di calore che attraversa 1 $m^2$ della struttura verticale per ogni grado Kelvin di differenza tra l'ambiente interno ed esterno. L'unità di misura è $W/m^2K$, ed è un parametro chiave per valutare la capacità isolante dell'involucro edilizio. |
| Trasmittanza termica periodica (Yie) | Descrive la capacità della parete di attenuare e sfasare il flusso termico durante un ciclo giornaliero di 24 ore. È particolarmente rilevante per la valutazione del comfort estivo. L'unità di misura è $W/m^2K$. |
| Massa superficiale (Ms) | Indica la quantità di massa presente per ogni metro quadrato della parete, espressa in $kg/m^2$. Questo parametro è strettamente legato all'inerzia termica dell'elemento e alla sua capacità di accumulo di calore. |
| Massa superficiale totale (Mst) | Parametro che rappresenta la massa complessiva per unità di superficie della struttura edilizia, espressa in $kg/m^2$. È utile per valutare le prestazioni termo-igrometriche e l'inerzia termica dell'involucro. |
| Ambiente di scambio | Definisce lo spazio con cui la parete è a contatto. Può trattarsi dell'ambiente esterno, di ambienti non climatizzati, del terreno o di altre zone interne all'edificio. Questo dato influisce sulla valutazione delle dispersioni termiche e sulla definizione delle condizioni al contorno nei modelli energetici. |

| | |
|---|---|
| Adduttanza interna ($h_i$) | Coefficiente di scambio termico superficiale sul lato interno della struttura edilizia, espresso in W/m²K. Rappresenta la capacità della superficie interna di trasmettere calore verso l'ambiente confinato. |
| Adduttanza esterna ($h_e$) | Coefficiente di scambio termico superficiale sul lato esterno della struttura edilizia, espresso in W/m²K. Indica la capacità della superficie esterna di disperdere calore verso l'ambiente esterno. |

*Tabella 29. Descrittori identificativi delle chiusure opache verticali del manufatto.*

### 1.6.4 Strutture opache orizzontali

I descrittori delle strutture opache orizzontali (Tabella 30) consentono di analizzare in dettaglio le caratteristiche tecniche e prestazionali dei solai, elementi fondamentali dell'involucro edilizio. Attraverso parametri relativi a stratigrafia, numero di strati, materiali strutturali e spessore complessivo, è possibile descrivere la composizione e la consistenza del solaio. Allo stesso tempo, indicatori quali trasmittanza termica, trasmittanza periodica, massa superficiale e adduttanze interne ed esterne permettono di valutarne il comportamento energetico e igrotermico. Infine, la definizione dell'ambiente di scambio fornisce informazioni utili per comprendere le condizioni al contorno e le potenziali dispersioni termiche.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Codice elemento | Identificativo univoco assegnato a ciascun elemento costruttivo all'interno del sistema di catalogazione Raumbuch. |
| Stratigrafia | Identifica, mediante un codice numerico, la tipologia del solaio analizzato, permettendo il collegamento con le specifiche stratigrafie tecniche associate a ciascun tipo. |
| Materiale strutturale principale | Indica il materiale costruttivo predominante del solaio, utile per la valutazione del comportamento statico e termico. Le principali categorie includono: cemento armato, acciaio, acciaio-calcestruzzo, muratura, legno, strutture miste (es. muratura e c.a.) e prefabbricato in c.a. o c.a.p. |
| Spessore totale | Rappresenta lo spessore complessivo del solaio, misurato tra l'intradosso e l'estradosso, espresso in centimetri. Questo valore è fondamentale per la determinazione delle prestazioni energetiche e della massa superficiale dell'elemento. |
| Trasmittanza termica (U) | Esprime il flusso medio di calore che attraversa 1 m² di solaio per ogni grado Kelvin di differenza tra l'ambiente interno ed esterno. L'unità di misura è W/m²K. |
| Trasmittanza termica periodica (Yie) | Descrive la capacità del solaio di attenuare e sfasare il flusso termico durante un ciclo giornaliero di 24 ore. È particolarmente rilevante per la valutazione del comfort estivo. L'unità di misura è W/m²K. |
| Massa superficiale (Ms) | Indica la quantità di massa presente per ogni metro quadrato di solaio, espressa in kg/m². Questo parametro è strettamente |

| | |
|---|---|
| | legato all'inerzia termica e alla capacità di accumulo di calore dell'elemento. |
| Massa superficiale totale (Mst) | Parametro che rappresenta la massa complessiva per unità di superficie del solaio, espressa in kg/m². È utile per valutare le prestazioni termo-igrometriche e l'inerzia termica dell'involucro. |
| Ambiente di scambio | Definisce lo spazio con cui il solaio è a contatto: ambiente esterno, ambienti non climatizzati, terreno o altre zone interne all'edificio. Questo dato influisce sulla valutazione delle dispersioni termiche e sulla definizione delle condizioni al contorno nei modelli energetici. |
| Adduttanza interna ($h_i$) | Coefficiente di scambio termico superficiale sul lato interno del solaio, espresso in W/m²K. Rappresenta la capacità della superficie interna di trasmettere calore verso l'ambiente confinato. |
| Adduttanza esterna ($h_e$) | Coefficiente di scambio termico superficiale sul lato esterno del solaio, espresso in W/m²K. Indica la capacità della superficie esterna di disperdere calore verso l'ambiente esterno. |

*Tabella 30. Descrittori identificativi delle chiusure opache verticali del manufatto.*

### 1.6.5 Chiusure trasparenti

I descrittori delle chiusure trasparenti (Tabella 31) consentono di analizzare in dettaglio le caratteristiche tecniche e prestazionali degli infissi, componenti fondamentali per l'efficienza energetica e il comfort abitativo. Attraverso questi parametri vengono descritti la tipologia, le dimensioni geometriche, i materiali e la stratigrafia, insieme alle prestazioni termo-fisiche (trasmittanza termica di vetro, telaio e infisso, fattore solare, presenza di gas in intercapedine, schermature interne o esterne). La loro combinazione permette di valutare il comportamento energetico del serramento, individuare criticità e definire strategie di miglioramento volte a ridurre le dispersioni termiche e ottimizzare l'apporto solare.

| **DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO** | |
|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Codice elemento | Identificativo univoco assegnato a ciascun infisso all'interno del sistema di catalogazione Raumbuch. |
| Tipologia infisso | Individua, tramite il codice numerico Raumbuch, la tipologia dell'infisso (es. finestra a due ante con sopraluce, porta scorrevole in alluminio, ecc.). |
| Esposizione | Orientamento dell'infisso rispetto ai punti cardinali (Nord, Sud, Est, Ovest). |
| Lunghezza | Dimensione orizzontale dell'infisso, espressa in centimetri [cm]. |
| Altezza | Dimensione verticale dell'infisso, espressa in centimetri [cm]. |
| Perimetro vetro | Lunghezza complessiva del bordo della parte vetrata, espressa in centimetri [cm]. |
| Area vetro | Superficie totale della parte trasparente (vetro), espressa in centimetri quadrati [cm²] o metri quadrati [m²]. |

| | |
|---|---|
| Area telaio | Superficie complessiva occupata dal solo telaio dell'infisso, espressa in centimetri quadrati [$cm^2$] o metri quadrati [$m^2$]. |
| Superficie infisso | Superficie complessiva dell'infisso (vetro + telaio), espressa in $m^2$. |
| Chiusure oscuranti interne | Segnalano la presenza di dispositivi schermanti collocati all'interno (es. tende, veneziane interne, pellicole a controllo solare), utili per regolare la radiazione solare e migliorare il comfort termo-visivo. |
| Schermature solari esterne | Indicano la presenza di sistemi oscuranti esterni (es. persiane, tapparelle, veneziane, brise-soleil, tende da sole, pergolati), fondamentali per ridurre il guadagno solare estivo. |
| Dimensioni sottofinestra | Misure, espresse in $m^2$, del vano murario sottostante al serramento, corrispondente alla parte interna del davanzale, rilevante per il comportamento termico del nodo finestra. |
| Dimensioni cassonetto | Misure complessive, espresse in $m^2$, del vano che ospita l'avvolgibile o altri sistemi oscuranti. |
| Stratigrafia cassonetto | Descrive i materiali che costituiscono il cassonetto, distinguendo tra versioni coibentate e non coibentate, con impatto diretto sulla trasmittanza termica del nodo finestra. |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | Dispersione termica complessiva dell'infisso (vetro + telaio), espressa in [$W/m^2 \cdot K$]. Valori più bassi corrispondono a migliori prestazioni energetiche. |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | Dispersione termica complessiva dell'infisso comprensiva degli effetti delle schermature, espressa in [$W/m^2 \cdot K$]. |
| VETRO | |
| Tipo | Definisce la tipologia di vetro utilizzata (es. vetro singolo, doppio vetro, doppio vetro basso emissivo, triplo vetro, ecc.), elemento determinante per il comfort e l'efficienza energetica. |
| Spessore del vetro | Indica lo spessore della lastra di vetro, espresso in millimetri [mm] o centimetri [cm]. |
| Spessore intercapedine | Indica lo spessore del canale distanziatore tra le lastre di vetro, espresso in centimetri [cm]. Uno spessore adeguato migliora isolamento termico e acustico. |
| Gas intercapedine | Identifica il tipo di gas presente tra i vetri (aria, argon, kripton, xenon), che contribuisce a incrementare le prestazioni isolanti. |
| Fattore solare (g) | Percentuale [%] di energia solare che attraversa il vetro (trasmessa + assorbita/irradiata). Valori più bassi riducono il surriscaldamento estivo. |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | Trasmittanza termica del solo vetro (escluso il telaio), espressa in [$W/m^2 \cdot K$]. Più basso è il valore, migliore è l'isolamento. |
| TELAIO | |
| Materiale telaio | Specifica il materiale di cui è composto il telaio (es. PVC, legno, alluminio, legno-alluminio), con ricadute sulle prestazioni termiche, acustiche e meccaniche. |
| Taglio termico | Segnala la presenza del taglio termico nel profilo del telaio, soluzione che riduce i ponti termici e migliora l'isolamento complessivo (valori possibili: Sì/No). |
| Spessore telaio | Indica lo spessore del telaio, espresso in centimetri [cm]. |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | Dispersione termica attraverso il solo telaio, espressa in [$W/m^2 \cdot K$]. |

| | |
|---|---|
| Tipologia distanziatori | Definisce il materiale del distanziatore tra i vetri (es. alluminio, acciaio inox, plastica), che influisce sulle prestazioni isolanti del serramento. |
| Trasmittanza distanziatori | Valore di trasmittanza termica attribuito al distanziatore, espresso in [W/m²·K], con effetti sul rendimento complessivo dell'infisso. |

*Tabella 31. Descrittori identificativi delle chiusure trasparenti del manufatto.*

### 1.6.6 Ponti termici

I descrittori dei ponti termici (Tabella 32 e Tabella 33) consentono di analizzare in modo sistematico le discontinuità presenti nell'involucro edilizio, individuando le tipologie ricorrenti, la loro incidenza sulle dispersioni energetiche e il peso relativo rispetto al comportamento termico complessivo dell'edificio.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| PONTI TERMICI DEL MANUFATTO | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Codice elemento | Identificativo assegnato a ciascun ponte termico utile a distinguerne la posizione (es. nodo parete/solaio, nodo parete/serramento, angolo sporgente, ecc.) e a collegarlo al relativo elemento di involucro. |
| Presenza di ponti termici | Indica se nell'elemento di involucro edilizio sono presenti ponti termici, con risposta Sì o No. |
| Tipologia prevalente | Definisce la tipologia predominante di ponti termici riscontrati all'interno dell'involucro, distinguendo tra ponti materici, dovuti a discontinuità nei materiali e ponti geometrici, legati a forme e giunzioni strutturali. |
| Dispersione totale | Quantifica la quantità complessiva di energia termica dispersa attraverso l'elemento analizzato, espressa in termini di flusso energetico. |
| Peso relativo sull'edificio | Indica, in percentuale, il contributo della dispersione termica dell'elemento rispetto alla dispersione termica totale dell'intero edificio. |

*Tabella 32. Descrittori identificativi dei ponti termici del manufatto.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| PONTI TERMICI DELL'ELEMENTO | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV)1 |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| CODICE ELEMENTO | Identificativo univoco che individua il singolo elemento costruttivo (es. Mue, Ine, ecc.). |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |

| | |
|---|---|
| Dispersione totale | Quantità complessiva di calore disperso attraverso il ponte termico, espressa in kWh o W/mK. |
| Peso relativo sull'edificio | Percentuale di incidenza del ponte termico rispetto alle dispersioni complessive dell'edificio. |
| Trasmittanza termica lineica | Grandezza che esprime il flusso termico addizionale dovuto al ponte termico, normalizzato per la differenza di temperatura e per la lunghezza della linea di discontinuità [W/mK]. |
| Coefficiente di accoppiamento termico L2D | Valore che rappresenta la dispersione termica bidimensionale associata al ponte termico [W/K], derivata da simulazioni agli elementi finiti. |
| Temperatura superficiale minima (Tsi) | Valore minimo della temperatura superficiale interna nel punto più critico del ponte termico, espresso in °C. |
| fRsi critico | Fattore di temperatura superficiale limite, definito dalle norme UNI, che consente di valutare il rischio di muffa in condizioni invernali. |
| fRsi calcolato | Fattore di temperatura superficiale effettivamente calcolato per il nodo analizzato, utile per il confronto con il valore critico. |
| Rischio muffa | Indicatore qualitativo (assente/presente) che segnala la probabilità di formazione di muffe superficiali nell'area del ponte termico. |

*Tabella 33. Descrittori identificativi dei ponti termici dell'elemento.*

### 1.6.7 Zone climatiche

L'individuazione delle zone climatiche interne rappresenta un passaggio fondamentale per la modellazione energetica, poiché consente di suddividere l'edificio in aree omogenee per caratteristiche d'uso, sistemi di climatizzazione e condizioni di comfort. I descrittori delle zone climatiche (Tabella 34) permettono di attribuire a ciascuna zona un codice identificativo univoco, di specificarne la tipologia impiantistica e di collegarla agli ambienti effettivamente serviti, garantendo una rappresentazione coerente e comparabile del comportamento termo-energetico complessivo.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| ZONE CLIMATICHE | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Codice zona | Identificativo univoco assegnato a ciascuna zona climatica interna, utile per distinguerla dalle altre aree dell'edificio. |
| Identificativo | Indica la tipologia di climatizzazione associata alla zona in base al periodo di utilizzo e al sistema impiantistico presente. Vocabolari: caldaia + pompa di calore; solo pompa di calore; solo caldaia; non climatizzata; altro. |
| Elenco unità/ambienti | Specifica gli ambienti o le unità funzionali comprese all'interno della zona climatica individuata, consentendo di collegare i dati energetici alle reali condizioni d'uso. |

*Tabella 34. Descrittori identificativi delle zone climatiche del manufatto.*

### 1.6.8 Gruppi termici

I gruppi termici costituiscono l'insieme degli impianti destinati alla produzione, distribuzione ed emissione del calore all'interno dell'edificio. L'analisi attraverso descrittori specifici (Tabella 35) consente di identificare le caratteristiche dei generatori, le modalità di distribuzione e il tipo di terminali installati, mettendo in relazione prestazioni energetiche ed efficienza complessiva del sistema impiantistico.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| GRUPPI TERMICI | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| GENERATORE | |
| Codice elemento | Identificativo univoco assegnato a ciascun generatore, utile per distinguere e tracciare ogni apparecchiatura. |
| Tipologia generatore | Identifica il tipo di generatore utilizzato. Le tipologie principali includono: caldaia a condensazione; generatore a biomassa; pompa di calore ARIA; pompa di calore ACQUA; teleriscaldamento; sistema ibrido; altro. |
| Alimentazione | Indica il vettore energetico utilizzato dal generatore (ad esempio: gas naturale, gasolio, biomassa, energia elettrica, ecc.). |
| Anno di installazione | Indica l'anno in cui il generatore è stato installato. |
| Potenza termica | Quantifica la potenza termica resa disponibile all'impianto. L'unità di misura è il kilowatt [kW]. |
| Temperatura mandata | Temperatura del fluido termovettore in uscita dal generatore verso il sistema di distribuzione, espressa in gradi Celsius [°C]. |
| Temperatura ritorno | Temperatura del fluido termovettore in ingresso al generatore dopo aver ceduto calore agli ambienti, espressa in gradi Celsius [°C]. |
| Zona di apparenza | Identifica la zona termica o climatica servita dal generatore, permettendo di collegare il sistema alla porzione di edificio interessata. |
| Sistema di distribuzione | Descrive la tipologia di rete impiantistica a cui il generatore è connesso (ad esempio: radiatori, ventilconvettori, pannelli radianti, aria canalizzata, altro). |
| Isolamento tubazioni | Caratterizza le modalità di posa e l'eventuale isolamento delle tubazioni di distribuzione del fluido termovettore. Le principali configurazioni possibili sono: distribuzione orizzontale in vista; Distribuzione incassata a pavimento – monotubo; Distribuzione incassata a pavimento – collettori; Montanti non isolati in traccia su pareti esterne; Montanti non isolati in traccia su pareti interne; Montanti non isolati in intercapedine di muri esterni. |
| RETI DI DISTRIBUZIONE E TERMINALI | |
| Codice elemento | Identificativo univoco assegnato a ciascun terminale all'interno del sistema di catalogazione, utile per distinguerne tipologia e posizione. |
| Tipologia | Specifica la categoria di terminali installati, tra cui: radiatori in ghisa, radiatori in acciaio, radiatori in alluminio, termoconvettori e ventilconvettori, pannelli radianti, split a parete. |

| | |
|---|---|
| Materiale | Indica il materiale costruttivo del terminale, rilevante per le prestazioni energetiche e la durabilità (ad esempio: ghisa, acciaio, alluminio). |
| Dimensioni | Riporta le misure caratteristiche del terminale, necessarie per definirne superficie ed estensione: altezza [cm], lunghezza [cm], profondità [cm] e interasse [cm]. |
| Numero dei terminali per tipologia | Definisce la quantità di terminali installati per ciascuna tipologia presente nell'edificio, utile per la valutazione complessiva della potenza installata. |
| Locali di appartenenza | Individua i locali o le zone termiche servite dai terminali, consentendo di collegare i dati impiantistici agli ambienti effettivamente climatizzati. |

*Tabella 35. Descrittori identificativi dei gruppi termici del manufatto.*

### 1.6.9 Impianti da FER

Gli impianti alimentati da fonti energetiche rinnovabili (FER) rappresentano un elemento centrale nella valutazione del comportamento tecnico-prestazionale del manufatto, in quanto contribuiscono alla riduzione dei consumi da fonti fossili e delle emissioni climalteranti. I descrittori individuati (Tabella 36) permettono di identificare la tipologia di impianto installato (solare termico, fotovoltaico, geotermico, eolico), le sue funzioni principali e la potenza resa disponibile, garantendo una visione completa del contributo delle FER al fabbisogno energetico dell'edificio.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| IMPIANTI DA FER | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Codice elemento | Identificativo univoco assegnato a ciascun impianto da fonte rinnovabile, utile per distinguerlo e tracciarne le caratteristiche. |
| Impianti solari termici | Sfruttano l'energia gratuita fornita dal sole per produrre calore, e in particolare acqua calda, che può essere utilizzata per usi sanitari o come integrazione per l'impianto di riscaldamento. |
| Impianti solari fotovoltaici | Sfruttano l'energia gratuita fornita dal sole per produrre energia elettrica, che può essere utilizzata oltre che per gli usi quotidiani (alimentazione elettrodomestici, illuminazione ecc…) anche per l'alimentazione di generatori elettrici per la climatizzazione (ad es. pompe di calore). |
| Impianti geotermici | Indica la presenza di sistemi capaci di sfruttare il calore del sottosuolo per il riscaldamento/raffrescamento degli edifici e la produzione di acqua calda sanitaria. |
| Impianti eolici | Indica la presenza di impianti in grado di produrre energia elettrica mediante lo sfruttamento dell'energia eolica. |
| Potenza | Indica la potenza ottenuta tramite fonti energetiche rinnovabili. |

*Tabella 36. Descrittori identificativi degli impianti da FER del manufatto.*

### 1.6.10 Fabbisogno e apporti termici

La valutazione del fabbisogno e degli apporti termici consente di quantificare l'energia richiesta dall'edificio per garantire condizioni di comfort interno e di analizzare la copertura fornita dalle fonti rinnovabili. I descrittori individuati (Tabella 37) permettono di distinguere tra fabbisogni termici ed elettrici, energia primaria effettivamente utilizzata e contributo delle FER, restituendo un quadro completo della prestazione energetica del manufatto.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| FABBISOGNO E APPORTI TERMICI | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Fabbisogno annuale di energia termica | Quantità di energia termica necessaria per garantire il comfort interno, intesa come calore da fornire in inverno o da sottrarre in estate. Si esprime in kilowattora [kWh]. |
| Fabbisogno energia elettrica | Energia elettrica richiesta dall'edificio per alimentare impianti e servizi, inclusi climatizzazione, illuminazione e apparecchiature. Si esprime in kilowattora [kWh]. |
| Fabbisogno di EP | Energia primaria richiesta dall'edificio per riscaldamento, raffrescamento e produzione di acqua calda sanitaria, calcolata a partire dal fabbisogno netto. Si esprime in kilowattora [kWh]. |
| Copertura da fonti energetiche rinnovabili (FER) | Quota percentuale del fabbisogno energetico complessivo soddisfatta tramite impianti alimentati da fonti rinnovabili. |

*Tabella 37. Descrittori identificativi dei fabbisogni e degli apporti termici del manufatto.*

### 1.6.11 Riscaldatori

I descrittori relativi ai riscaldatori (Tabella 38) consentono di caratterizzare i sistemi dedicati alla produzione di acqua calda sanitaria, evidenziando la tipologia di generatore utilizzato e l'eventuale presenza di serbatoi di accumulo. Questa classificazione permette di valutarne l'efficienza, la capacità di copertura del fabbisogno e l'integrazione con altri impianti dell'edificio.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| RISCALDATORI | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Generatore | Specifica la tipologia di apparecchiatura impiegata per la produzione di acqua calda sanitaria (ad esempio: caldaia, pompa di calore, scaldacqua elettrico, solare termico, ecc.). |
| Accumulo | Indica la presenza e le caratteristiche di eventuali serbatoi di accumulo per l'acqua calda sanitaria, utili a garantire continuità di servizio e disponibilità in base alla domanda. |

*Tabella 38. Descrittori identificativi dei riscaldatori del manufatto.*

### 1.6.12 Impianto di smaltimento aeriformi

I descrittori relativi alla ventilazione (Tabella 39) permettono di analizzare le caratteristiche dei sistemi di ricambio dell'aria, distinguendo la tipologia di impianto e quantificando i flussi d'aria immessi negli ambienti. Questa classificazione è utile per valutare la qualità dell'aria interna e l'efficienza energetica del manufatto.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| VENTILAZIONE | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Flusso d'aria della ventilazione | Indica la tipologia di impianto di ventilazione meccanica controllata adottato, distinguendo tra sistemi a singolo flusso e a doppio flusso. |
| Ricambio d'aria orario nelle ore diurne (n) | Numero di volte in cui, nell'arco di un'ora, l'intero volume d'aria di un ambiente viene sostituito con aria di rinnovo. |
| Portata d'aria di rinnovo nelle ore diurne | Quantità di aria esterna immessa negli ambienti interni durante le ore diurne per garantire il corretto ricambio e la qualità dell'aria. |

*Tabella 39. Descrittori identificativi dell'impianto di smaltimento aeriformi del manufatto.*

### 1.6.13 Impianto di illuminazione

I descrittori relativi all'illuminazione (Tabella 40) consentono di caratterizzare i sistemi installati negli ambienti, distinguendo le tipologie di apparecchi e la potenza assorbita. Questa classificazione è utile per valutarne l'efficienza energetica e l'incidenza sui consumi complessivi dell'edificio.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| ILLUMINAZIONE | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Tipologia | Specifica la tipologia di sistema di illuminazione adottato negli ambienti, distinguendo ad esempio tra lampade a incandescenza, fluorescenti, alogene, LED o altre soluzioni. |
| Potenza | Indica la potenza elettrica assorbita dagli apparecchi di illuminazione installati, espressa in watt [W], utile per valutarne l'efficienza e l'impatto sui consumi energetici complessivi. |

*Tabella 40. Descrittori identificativi dell'impianto di illuminazione del manufatto.*

### 1.6.14 Impianto fisso di trasporto

I descrittori relativi agli impianti fissi di trasporto (Tabella 41) permettono di individuare la presenza di sistemi di sollevamento negli edifici, specificandone la tipologia e la potenza motrice. Questa classificazione è utile per valutare sia l'accessibilità che l'impatto energetico del manufatto.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| IMPIANTO FISSO DI TRASPORTO | |
| CODICE COMPENDIO | Identificativo univoco assegnato all'intero complesso edilizio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio CRV) |
| CODICE MANUFATTO | Codice specifico che individua il singolo edificio all'interno del compendio. È costruito secondo la codifica Raumbuch (esempio PCDO) |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Tipologia | Specifica la presenza e la tipologia di impianti fissi di trasporto verticale installati nell'edificio (ad esempio: ascensori, montacarichi, piattaforme elevatrici). |
| Potenza | Indica la potenza nominale della macchina motrice che alimenta l'impianto, espressa in Watt [W]. |

*Tabella 41. Descrittori identificativi dell'impianto fisso di trasporto nel manufatto.*

# 2 LA MODELLAZIONE HBIM

## 2.1 L'approccio metodologico BIM

Il Building Information Modeling, da cui deriva l'acronimo BIM, è una metodologia finalizzata alla creazione e gestione integrata di un modello digitale rappresentativo di un progetto edilizio. Questo modello racchiude al suo interno tutti i dati relativi alle caratteristiche fisiche, funzionali e prestazionali dell'edificio, accompagnando il processo in tutte le sue fasi: dalla progettazione alla costruzione, fino alla manutenzione e gestione nel tempo.
Il concetto è stato elaborato inizialmente dal professor Charles M. Eastman, direttore dell'Institute of Physical Planning alla Carnegie-Mellon University e figura tra le più autorevoli nel campo della progettazione digitale. Nel suo celebre articolo del 1975 *"The Use of Computers Instead of Drawings in Building Design"*, Eastman muove una critica agli strumenti tradizionali usati in architettura – disegni e i modelli fisici – sottolineando come, pur essendo centrali nella pratica progettuale, siano in realtà strumenti limitati. I disegni, ad esempio, rappresentano solo due dimensioni in modo chiaro e richiedono un notevole sforzo per essere interpretati tridimensionalmente, mentre i modelli sono più intuitivi dal punto di vista spaziale ma difficili da aggiornare e gestire. Entrambi, inoltre, non permettono un'interazione diretta con le analisi numeriche e non facilitano la stima dei costi o delle quantità dei materiali. Da queste considerazioni nasce l'idea di una rappresentazione ideale dell'edificio: un sistema che unisca i vantaggi di disegni e modelli, superandone però le debolezze. Questa rappresentazione dovrebbe essere tridimensionale, facilmente modificabile, capace di aggiornare automaticamente tutte le viste derivate da un'unica modifica e in grado di dialogare direttamente con strumenti di analisi quantitativa e di controllo dei costi. Eastman propone quindi un sistema informatico – chiamato *Building Description System* – in cui l'edificio viene concepito come un insieme di elementi tridimensionali, ciascuno definito da una forma e da proprietà specifiche. Il progettista può definire e disporre questi elementi interattivamente, proprio come in un modellino fisico, ma con il vantaggio che da questa unica descrizione il computer può generare automaticamente qualsiasi tipo di vista (prospettive, sezioni, piante), tutte coerenti tra loro. L'aspetto più innovativo è che questa base dati digitale può essere letta direttamente dai software di analisi: non c'è più bisogno di estrarre a mano i dati dai disegni o dai modelli, e ciò apre la strada a un'integrazione completa tra progettazione, computazione e gestione. In altre parole, Eastman immagina già nel 1975 quello che oggi chiamiamo modello informativo dell'edificio: una base comune di dati tridimensionali, condivisa e continuamente aggiornata, che accompagna l'intero ciclo di vita dell'edificio, dalla progettazione fino alla manutenzione (Eastman 1975).
L'intuizione di Eastman ha segnato un punto di svolta nel settore delle costruzioni, aprendo la strada a nuovi scenari operativi basati su modelli tridimensionali parametrici e su un'inedita strutturazione digitale delle informazioni. Questo approccio ha introdotto pratiche collaborative che superano le modalità rappresentative tradizionali, prefigurando un ambiente integrato in cui progettazione, esecuzione e gestione dialogano all'interno di un unico ecosistema informativo.

Negli anni successivi, il BIM è stato formalizzato e strutturato da diversi enti e istituzioni internazionali. Ad esempio, la General Services Administration (GSA) degli Stati Uniti lo definisce come: *«lo sviluppo e l'utilizzo di un modello dati software multifaccettato, finalizzato non solo a documentare un progetto edilizio, ma anche a simulare la costruzione e il funzionamento di una nuova struttura (o di una struttura modernizzata). Il modello risultante è una rappresentazione digitale ricca di dati, basata su oggetti, intelligente e parametrica, dalla quale è possibile estrarre viste e informazioni differenziate in base alle esigenze dei diversi utenti»* (GSA 2011).
Il National Building Information Model Standard Project Committee pone invece l'accento sulla dimensione collaborativa e strategica del BIM: *«Una rappresentazione digitale delle caratteristiche fisiche e funzionali di una struttura. Il BIM è una risorsa condivisa di conoscenze, che fornisce una base affidabile per prendere decisioni durante l'intero ciclo di vita della costruzione, dalla prima concezione fino alla demolizione»* (NIBS 2014)
Infine, la norma ISO 19650-1:2018, norma internazionale che definisce i principi e i requisiti per la gestione delle informazioni nel ciclo di vita di un bene costruito, utilizzando il Building Information Modeling (BIM), definisce il BIM come «l'uso di una rappresentazione digitale condivisa di un bene costruito per facilitare i processi di progettazione, costruzione e gestione, al fine di costituire una base affidabile per le decisioni».
In continuità con l'approccio visionario di Eastman, queste definizioni dimostrano che il BIM non è solo una tecnologia, ma una trasformazione sistemica del modo in cui si progetta, si costruisce e si gestisce l'ambiente costruito. L'idea di una base dati unica e integrata per tutte le fasi del progetto, anticipata nel 1974, è oggi il pilastro centrale di un processo collaborativo e digitale, volto all'efficienza, alla sostenibilità e alla qualità del costruito.

Già nel 1974, Eastman sosteneva che la rappresentazione bidimensionale dell'architettura fosse inadeguata per una corretta gestione del progetto edilizio. Tuttavia, fu solo nel corso degli anni '80 che si assistette a una svolta significativa, con la comparsa dei primi software parametrici. In particolare, due figure centrali contribuirono in modo decisivo allo sviluppo degli strumenti oggi associati al BIM: Gábor Bojár e Leonid Raiz, fondatori rispettivamente di ArchiCAD e Revit.
ArchiCAD, sviluppato nel 1982 a Budapest dal fisico ungherese Bojár, fu il primo software BIM accessibile su personal computer. Il suo impiego iniziale fu limitato da un mercato poco ricettivo e dalle restrizioni hardware dell'epoca, che ne resero difficile l'adozione su progetti di larga scala. Solo a partire dal 2007 ArchiCAD registrò una crescita significativa, diventando uno strumento diffuso nella progettazione residenziale di piccola-media scala.
Nel frattempo, Leonid Raiz sviluppava un nuovo software in grado di affrontare la complessità crescente dei progetti edilizi. Nel 2000 nacque così Revit, un programma scritto in C++ e basato su un motore parametrico orientato agli oggetti. Il nome stesso, Revit, è la contrazione di revise e it, a sottolineare l'obiettivo di combinare velocità e flessibilità progettuale. Acquisito da Autodesk nel 2002, Revit divenne rapidamente uno degli strumenti principali nel panorama del Building Information Modeling, entrando in concorrenza diretta con l'allora diffuso Architectural Desktop.
Revit rivoluzionò il settore introducendo la modellazione parametrica associata alla quarta dimensione: il tempo. Ogni componente del modello poteva essere collegato a una sequenza temporale, permettendo agli appaltatori di simulare le fasi di costruzione e pianificare con maggiore precisione l'intero processo edilizio.
L'introduzione del BIM ha dunque trasformato radicalmente il modo di concepire, rappresentare e gestire l'architettura. A differenza della progettazione CAD, in cui la realtà veniva scomposta attraverso proiezioni ortogonali e ricomposta graficamente tramite segni convenzionali comprensibili solo agli addetti ai lavori, il BIM consente di costruire un modello digitale tridimensionale e informativo, accessibile e condiviso da tutti gli attori coinvolti.

Proprio in virtù della sua evoluzione e delle molteplici implicazioni operative, l'acronimo BIM ha assunto nel tempo significati differenti. Le stesse definizioni sopra riportate testimoniano come possa indicare, a seconda del contesto, tanto un modello informativo quanto un processo metodologico. Questa ambivalenza è dovuta al fatto che la lettera "M" può essere intesa con tre accezioni principali:

- **Model**: come rappresentazione digitale dell'edificio, con caratteristiche geometriche, fisiche e funzionali arricchite da dati tecnici;
- **Modeling**: come insieme di tecnologie e procedure per costruire modelli accurati che accompagnano ogni fase del ciclo edilizio;
- **Management**: come gestione strutturata delle informazioni lungo tutto il ciclo di vita del manufatto, includendo anche il contesto costruito.

Questa varietà di interpretazioni ha generato, negli anni, una certa ambiguità semantica, simile a quella che in passato aveva caratterizzato acronimi come CAD, CADD o CADFM, i cui significati erano spesso oggetto di discussione senza portare a reali chiarimenti operativi. Come osservato in letteratura, ogni lettera dell'acronimo BIM può evocare immagini e concetti differenti: la "B" di *Building* può essere interpretata in senso stretto, come involucro edilizio, oppure in senso più ampio, comprendendo le infrastrutture, il paesaggio e persino le strategie e le politiche legate all'ambiente costruito. La "I" di *Information* è probabilmente l'elemento più stabile e condiviso, rappresentando la componente fondamentale dell'intero sistema BIM. La "M", infine, rimane il termine più discusso e sfaccettato, in quanto può riferirsi tanto al modello (Model), quanto al processo di modellazione (Modeling) o alla gestione (Management) delle informazioni (Race 2013).

### 2.1.1 L'adozione nel BIM nel panorama internazionale

L'adozione del BIM a livello globale sta assumendo un ruolo sempre più centrale nel settore delle costruzioni, con numerosi paesi che hanno avviato politiche e strategie mirate per promuoverne l'uso soprattutto nel settore pubblico. Gli Stati Uniti, i paesi scandinavi, i Paesi Bassi e diverse nazioni asiatiche come la Corea del Sud rappresentano esempi significativi di questa tendenza, con iniziative che spaziano dall'introduzione di norme obbligatorie all'implementazione di programmi pilota e alla formazione specializzata. Di seguito, viene presentata una panoramica delle principali politiche, organismi coinvolti e livelli di adozione del BIM in queste realtà, mettendo in evidenza i traguardi raggiunti e le strategie adottate per favorire una diffusione sempre più capillare di questa tecnologia.

#### Stati Uniti

Gli Stati Uniti sono tra i pionieri nello sviluppo e nell'adozione del BIM nel settore delle costruzioni, con un forte coinvolgimento del settore pubblico a vari livelli, dalle agenzie nazionali alle università (Cheng 2015). Nel 2003, la General Services Administration (GSA) ha lanciato il "National 3D-4D program" per implementare gradualmente l'utilizzo di questo strumento durante l'intero ciclo di vita di un progetto (Ullah, Lill e Witt 2019).
Dal 2006, enti come l'USACE, la GSA e il Department of Veterans Affairs hanno imposto l'uso obbligatorio del BIM per grandi progetti pubblici. Anche diversi Stati e le stesse Università hanno adottato linee guida simili. Ad esempio, il Wisconsin obbliga l'uso del BIM per progetti oltre i 5 milioni di dollari, mentre la Indiana University richiede BIM per progetti con finanziamenti pari o superiori a 5 milioni (Cheng 2015).
L'adozione del BIM è cresciuta rapidamente negli ultimi anni e si prevede che continuerà (McGraw 2009). Nel 2009, metà del settore edile utilizzava BIM o strumenti correlati, con un aumento del 75% rispetto al 2007 (Zahedi e Sardroud 2022). Inoltre, il 42% degli utenti BIM si collocava a livello esperto o avanzato, triplicando la percentuale del 2007 (Wong, Wong e Nadeem 2010). Nel 2018, circa il 72% delle aziende americane aveva aderito all'utilizzo del BIM (Zahedi, Sardroud e Kazemi 2022).

#### Regno Unito

Il governo del Regno Unito ha avuto e continua ad avere un ruolo significativo nel settore delle costruzioni, confermandosi anch'esso come un paese leader nei processi BIM in Europa e nel mondo. Ha spinto per l'adozione obbligatoria del BIM entro il 2016 per tutti i progetti infrastrutturali pubblici, attraverso l'istituzione del BIM Task Group e la pubblicazione, nel 2011, del piano strategico per l'implementazione del BIM, con un budget dedicato di 5 milioni di sterline. Inoltre, il governo ha stanziato complessivamente 3,86 milioni di sterline per promuovere il BIM, contribuendo a rendere la Gran Bretagna il Paese con la più alta velocità di adozione della metodologia (Zahedi, Sardroud e Kazemi 2022).
I clienti pubblici stanno progressivamente incentivando l'utilizzo del BIM, in particolare nel settore delle infrastrutture, grazie anche al supporto di reti e comunità nate per facilitarne l'adozione. Queste coinvolgono istituzioni professionali (RIBA, RICS, CIOB, ICE, I.Struct.E, CIBSE), organizzazioni di ricerca e facilitazione (CIC, BRE, CIRIA, Regional BIM Hubs, NBS, CPIC), oltre all'Università di Cambridge, che ha pubblicato una roadmap per l'adozione del BIM articolata in cinque pilastri, da completarsi nel biennio conclusosi nel 2020 (Davies, et al. 2015). Nel 2015, la penetrazione del BIM nel Regno Unito era pari al 48%, percentuale salita al 54% nel 2018 (Zahedi, Sardroud e Kazemi 2022).

#### Francia

In Francia il settore pubblico ha tardato a sostenere il BIM, ma dal 2013 l'associazione "BIM France" e nel 2014 il Ministero dell'Edilizia hanno iniziato a promuovere attivamente il BIM, con l'obiettivo di renderlo obbligatorio nei contratti pubblici dal 2017. Diverse iniziative di formazione, incentivi e promozione stanno spingendo l'adozione. L'industria oggi vede il BIM come inevitabile e la Francia è nella fase di istituzionalizzazione del BIM, con un'accelerazione significativa dal 2014 (Davies, et al. 2015).

#### Paesi scandinavi (Finlandia, Danimarca, Norvegia e Svezia)

Anche i paesi scandinavi sono in prima linea nell'adozione del BIM (Ullah, Lill e Witt 2019).
In Finlandia, l'adozione del BIM è promossa da Senate Properties, che dal 2007 ne richiede l'uso in formato IFC per i progetti pubblici (Cheng, 2015). Secondo un sondaggio del 2007, il 93% degli studi di architettura e circa il 60% degli ingegneri utilizzava il BIM almeno parzialmente (Wong, Wong e Nadeem, 2010). Nel 2009 si è registrata

un'accelerazione significativa nell'adozione, e nel 2014 è stata approvata una roadmap nazionale per l'implementazione del BIM su dieci anni. Le InfraBIM Requirements, approvate nel 2015, hanno favorito la digitalizzazione delle infrastrutture. Già nel 2016, il 99% dei progetti edilizi in Finlandia utilizzava il BIM, rendendo il Paese un riferimento a livello internazionale (Zahedi, Sardroud e Kazemi 2022).

Già nel 2006, in Danimarca, secondo un sondaggio, circa il 50% degli architetti, il 40% degli ingegneri e il 29% dei committenti utilizzavano il BIM per alcune parti dei propri progetti (Wong, Wong e Nadeem, 2010). Le linee guida danesi per il BIM sono state pubblicate nel 2007, e dal 2008 è stato reso obbligatorio l'uso della modellazione 3D nei progetti pubblici con un valore superiore a 40 milioni di corone danesi, estendendo l'obbligo anche ai progetti di ristrutturazione pubblica dal 2008 e a quelli di edilizia residenziale dal 2009. Dal 2011, il BIM è richiesto in tutti i progetti pubblici con valore superiore a 2,7 milioni di euro (Zahedi, Sardroud e Kazemi 2022).

In Norvegia, l'implementazione del BIM è guidata dall'Istituto Statsbygg (Cheng, 2015). Nel 2010, il 22% dell'industria delle costruzioni norvegese utilizzava il BIM [28], e nello stesso anno il suo utilizzo è diventato obbligatorio per i nuovi edifici. Tra il 2010 e il 2014, sono stati investiti 21,7 milioni di euro per promuoverne l'adozione. Dal 2016, inoltre, diversi committenti norvegesi hanno iniziato a richiedere l'impiego del BIM nei progetti (Zahedi, Sardroud e Kazemi 2022).

Paesi Bassi

Negli ultimi anni, nei Paesi Bassi il settore pubblico ha aumentato significativamente l'uso del BIM.
La Rijkswaterstaat (RWS), la Direzione Generale delle Opere Pubbliche e della Gestione delle Acque, parte del Ministero delle Infrastrutture e dell'Ambiente olandese, ha lanciato un programma BIM con fondi dedicati e progetti pilota per testare e formare il personale (Cheng 2015) (Ullah, Lill e Witt 2019).
Nel 2011, la Government Buildings Agency (Rijksgebouwendienst) ha reso obbligatorio l'uso del BIM per i progetti pubblici con un valore superiore ai 10 milioni di euro (Zahedi, Sardroud e Kazemi 2022).

Asia (Singapore, Corea del sud)

A differenza degli altri casi analizzati, in questo paragrafo non si fa riferimento a un intero Stato, ma a una singola città-stato: Singapore. Questo perché Singapore si è distinta nettamente dal resto del paese per la rapidità e la profondità nell'adozione del BIM, assumendo un ruolo di riferimento a livello internazionale nel settore delle costruzioni. Singapore ha promosso il BIM dal 1995 con il progetto CORENET. Nel 2010, la Building and Construction Authority (BCA) ha lanciato una roadmap per far sì che l'80% del settore edile utilizzasse il BIM nei progetti pubblici di superficie superiore a 5000 $m^2$ entro il 2015, con l'obiettivo di aumentare la produttività del 25% in dieci anni (Cheng 2015).. Nel 2014 il tasso di adozione del BIM ha raggiunto il 65% e dal 2016 il BIM è obbligatorio per progetti con un valore superiore a 50 milioni di dollari USA (Zahedi, Sardroud e Kazemi 2022).

In Corea del Sud, l'uso del BIM è diventato obbligatorio dal 2011 per i progetti pubblici con un valore superiore ai 50 milioni di dollari, supportato da linee guida ministeriali introdotte già nel 2010 (Ullah, Lill e Witt, 2019). Negli anni 2000 il Paese ha iniziato a interessarsi al BIM, ma la sua diffusione è stata inizialmente lenta. Nel 2010 è stata presentata la roadmap per l'implementazione del BIM, mentre nel 2011 il Korea Public Procurement Service ha stabilito l'obiettivo di utilizzare il BIM per i progetti di grandi dimensioni (Zahedi, Sardroud e Kazemi, 2022).

Come si evince dall'analisi condotta, l'uso del BIM sta crescendo nei Paesi industrializzati, ma l'adozione è ancora lenta a livello globale per diversi motivi. In molti Paesi, come la Cina o in Russia, la sua diffusione è ostacolata dalla mancanza di formazione di professionisti e dalla percezione che i metodi tradizionali (2D) siano sufficienti - il settore delle costruzioni è considerato un'industria molto tradizionale, spesso vincolata dalle consuetudini (Jibril, Kolo e Muhammad 2024) (Kouider, Paterson e Thomson 2007). Inoltre, numerose imprese – in particolare le piccole e medie imprese – percepiscono il BIM più come un costo che come un investimento, scoraggiate dagli alti costi iniziali di implementazione, dalla necessità di assumere personale specializzato e dal tempo richiesto per la formazione.
Anche laddove vi siano regolamentazioni governative a favore del BIM, l'adozione resta lCoimitata a causa della scarsa consapevolezza dei suoi benefici, della mancanza di supporto gestionale e dell'assenza di strategie chiare a livello aziendale (Xinchen, et al. 2024). Le criticità più diffuse includono inoltre la scarsa cooperazione tra gli stakeholder, la resistenza al cambiamento e la preferenza per i tradizionali disegni 2D, oltre a problemi di interoperabilità e all'assenza di standard condivisi, come evidenziato da molte realtà in Europa, Asia, Africa e America (Zahedi, Sardroud e Kazemi, 2022).

Affinché il BIM venga effettivamente adottato, è poi fondamentale disporre delle risorse e del personale adeguati. Tuttavia, gran parte della ricerca si concentra sugli aspetti tecnici e di sviluppo software, trascurando le dimensioni sociali e formative legate all'adozione (Jibril, Kolo e Muhammad 2024). Il successo del BIM, infatti, non dipende solo dalla disponibilità tecnologica, ma anche dalla capacità delle organizzazioni di riorganizzare i propri processi interni, dalla presenza di leadership favorevole al cambiamento e da un'adeguata cultura digitale nel settore.
L'adozione diffusa del BIM richiede un approccio integrato che consideri non solo l'innovazione tecnologica, ma anche la gestione del cambiamento, la formazione continua e una forte collaborazione tra tutti gli attori coinvolti nel processo edilizio.

### 2.1.2 Il BIM in Italia

Il **Codice degli Appalti (D.Lgs. 50/2016)**, attuazione delle Direttive europee 2014/23/UE, 24/UE e 25/UE, introduce la possibilità per le stazioni appaltanti di richiedere l'uso del Building Information Modeling (BIM) per nuove opere e interventi complessi.
In particolare l'articolo 23, comma 1, del Codice stabilisce che "*la progettazione in materia di lavori pubblici si articola, secondo tre livelli [...] fattibilità tecnica ed economica, progetto definitivo e progetto esecutivo ed è intesa ad assicurare [...] il progressivo uso di metodi e strumenti elettronici specifici quali quelli di modellazione per l'edilizia e le infrastrutture*".
Il Codice prevede inoltre che un decreto ministeriale (poi emanato nel 2017) definisca modalità e tempi per l'introduzione progressiva dell'obbligo del BIM, tenendo conto della tipologia di opere e della strategia di digitalizzazione della PA e del settore delle costruzioni. L'introduzione obbligatoria del BIM in Italia è stata quindi disciplinata attraverso il **Decreto n. 560 del 2017** (cosiddetto "Decreto BIM"), successivamente aggiornato con il D.M. 312/2021, che ha previsto una progressiva adozione dei metodi e strumenti di modellazione elettronica nelle opere pubbliche, in base alla complessità e all'importo dei lavori. L'obiettivo è quello di accompagnare il settore verso una digitalizzazione strutturata.
Il processo è iniziato il 1° gennaio 2019, data dalla quale il BIM è diventato obbligatorio per i lavori particolarmente complessi con importi pari o superiori a 100 milioni di euro. L'anno successivo, l'obbligo è stato esteso alle opere di almeno 50 milioni di euro e, a partire dal 2021, ai lavori con importi superiori a 15 milioni. Dal 2022, il BIM è stato richiesto anche per tutte le nuove costruzioni e per gli interventi su edifici esistenti (esclusa l'ordinaria manutenzione) con importi a base di gara superiori ai 15 milioni di euro. A partire dal 2023, l'obbligo si è ampliato ulteriormente, includendo anche le opere di importo pari o superiore alla soglia europea prevista dall'articolo 35 del Codice dei Contratti Pubblici (circa 5,3 milioni di euro) (D.M. 2 agosto 2021, n. 312., art. 6). Infine, a partire dal 1° gennaio 2025, anche a seguito dell'aggiornamento previsto dal D.Lgs. 209/2024, l'utilizzo del BIM diventerà obbligatorio anche per i progetti di nuova costruzione e interventi su edifici esistenti con un valore stimato superiore a 2 milioni di euro e i lavori su beni culturali (ai sensi del D.Lgs. 42/2004), qualora l'importo superi i 5.382.000 euro (D.Lgs. 209/2024, art. 43).
Questa ultima scadenza rappresenta un passaggio fondamentale, in quanto amplia l'obbligatorietà del BIM anche a una fascia più ampia di opere pubbliche, coinvolgendo una porzione sempre più significativa del settore.
È prevista infine la facoltà per le stazioni appaltanti e gli enti concedenti di utilizzare la GID anche al di fuori dei casi obbligatori, attribuendo eventualmente punteggi premianti nei bandi di gara a chi adotta questi metodi.

Questa progressiva introduzione normativa ha avuto un impatto significativo sull'intero comparto delle costruzioni, contribuendo a stimolare un graduale processo di digitalizzazione anche tra i professionisti del settore. I dati raccolti negli ultimi anni mostrano infatti un trend positivo nell'adozione del BIM in Italia, segno di una crescente consapevolezza e preparazione degli operatori.
In particolare, secondo l'indagine condotta da ASSOBIM nel 2021, su un campione composto principalmente da studi di progettazione (circa il 59%) e società di ingegneria (16,4%), si evidenzia come oltre il 60% del campione dichiari di conoscere e utilizzare la metodologia BIM, con un incremento del 6% rispetto all'edizione precedente (2020). Un ulteriore 30% ne è a conoscenza ma non la utilizza, o lo fa solo in parte, mentre la quota di chi non ha mai sentito parlare del BIM si è ridotta al 7%, contro il 10% del 2020 (ASSOBIM 2021).
Il sondaggio ha valutato anche la qualità della diffusione del BIM, rilevando che il 17% degli operatori si dichiara molto sicuro delle proprie competenze, il 50% ha una preparazione buona o sufficiente, mentre il 33% presenta ancora carenze, pur in diminuzione. La tendenza generale è di crescita costante delle competenze BIM. Gli Ordini professionali migliorano leggermente il loro contributo, mentre ministero ed enti pubblici restano fanalino di coda, evidenziando il bisogno di maggiore supporto istituzionale (ASSOBIM 2021).
Come evidenziato anche dall'8° Report OICE[65] sulla digitalizzazione e sulle gare BIM 2024, questi dati riflettono una realtà di forte disomogeneità nella maturità digitale del settore costruzioni in Italia: se da un lato molte realtà private hanno già investito nella digitalizzazione riconoscendone i vantaggi, dall'altro permangono situazioni in cui il tema viene affrontato in modo superficiale e con poca consapevolezza, limitandosi a considerare il BIM come mero modello 3D anziché come processo digitale che copre l'intero ciclo di vita del progetto. Tale divario è

[65] *L'OICE è l'Associazione nazionale, aderente a Confindustria, che rappresenta le organizzazioni italiane di ingegneria, di architettura e di consulenza tecnico-economica.*

particolarmente marcato nel settore pubblico, dove la carenza di personale adeguatamente formato rappresenta un ostacolo significativo nell'adozione e nella gestione efficace delle nuove tecnologie digitali (OICE 2025).

## 2.2 Il quadro normativo

L'evoluzione del BIM è strettamente connessa allo sviluppo normativo, che oggi offre una rete solida di norme UNI, EN e ISO, aventi l'obiettivo di supportare l'adozione del metodo nella pratica quotidiana degli operatori del settore.

### 2.2.1 Norme ISO

L'ISO (International Organization for Standardization) è l'organizzazione internazionale che crea norme tecniche riconosciute a livello globale. Queste norme possono essere adottate volontariamente dai singoli paesi. La sigla UNI EN indica che la norma ISO è stata adottata sia in Italia (UNI) sia a livello europeo (EN) rendendola valida in entrambi gli ambiti.

**UNI EN ISO 19650**

La serie di norme EN ISO 19650 fornisce un quadro di riferimento internazionale per la gestione delle informazioni nei progetti edilizi e infrastrutturali lungo tutto il loro ciclo di vita. Queste norme stabiliscono principi e requisiti utili sia durante la fase di progettazione e costruzione — definita come fase di consegna — sia durante la fase successiva di gestione, funzionamento e manutenzione degli edifici e delle infrastrutture, chiamata fase operativa. L'obiettivo è garantire che tutti gli attori coinvolti, dalle imprese di costruzione ai gestori degli asset, abbiano un approccio condiviso e strutturato alla gestione delle informazioni.

La serie presenta sei parti pubblicate, ognuna delle quali affronta aspetti specifici della gestione delle informazioni nel ciclo di vita di un bene costruito:

- **UNI EN ISO 19650-1**: introduce i concetti e i principi fondamentali per la gestione delle informazioni lungo l'intero ciclo di vita dell'opera, dalla progettazione alla dismissione.
- **UNI EN ISO 19650-2**: definisce i processi per la gestione delle informazioni nella fase di consegna, (ovvero durante la progettazione e costruzione).
- **UNI EN ISO 19650-3**: si concentra sulla gestione delle informazioni nella fase operativa (che comprende l'uso, la manutenzione e la gestione del bene costruito).
- **EN ISO 19650-4**: specifica i requisiti per lo scambio delle informazioni nei processi BIM durante le fasi di sviluppo e gestione.
- **UNI EN ISO 19650-5**: stabilisce i requisiti per garantire la sicurezza delle informazioni all'interno del contesto BIM.
- **UNI EN ISO 19650-6:** è una delle più recenti integrazioni della serie e specifica i concetti e i principi per la classificazione, la condivisione e la fornitura di informazioni sulla salute e sulla sicurezza durante l'intero ciclo di vita di un bene costruito.

Analizzandole più in dettaglio:

La **UNI EN ISO 19650-1:2019**, *"Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni relative all'edilizia e alle opere di ingegneria civile, incluso il Building Information Modelling (BIM) - Gestione informativa mediante il Building Information Modelling - Parte 1: Concetti e principi"* è entrata in vigore il 14 marzo 2019 e descrive i principi per la gestione delle informazioni secondo l'approccio BIM, fornendo un quadro concettuale che guida lo scambio, l'organizzazione, l'aggiornamento e la registrazione delle informazioni tra tutti gli attori coinvolti. È applicabile a tutte le fasi del ciclo di vita di un cespite immobiliare: dalla pianificazione alla progettazione, costruzione, gestione, manutenzione e dismissione. Può essere adattata a progetti di qualsiasi scala e complessità, garantendo flessibilità e contenimento dei costi di implementazione. In Italia, si applica insieme alla serie UNI 11337, che ne costituisce il completamento normativo e ne armonizza i contenuti rispetto al quadro tecnico e giuridico nazionale.

La **UNI EN ISO 19650-2:2019**, *"Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni relative all'edilizia e alle opere di ingegneria civile, incluso il Building Information Modelling (BIM) - Gestione informativa mediante il Building Information Modelling - Parte 2: Fase di consegna dei cespiti immobili"* è entrata in vigore il 14 marzo 2019 e definisce i requisiti per la gestione delle informazioni, intesa come un processo organizzativo, durante la fase di consegna degli asset immobiliari e nello scambio di dati nel contesto dell'utilizzo del Building Information Modelling

(BIM). In particolare, la norma pone l'accento sull'importanza della gestione strutturata e trasparente delle informazioni durante la fase di consegna, promuovendo l'uso di una documentazione standardizzata per definire chiaramente requisiti, tempistiche, ruoli, responsabilità, metodi e procedure. Tali aspetti trovano espressione in documenti fondamentali quali: capitolato informativo, l'offerta di gestione informativa, il piano di gestione informativa e altri piani operativi che guidano l'intero processo di produzione e consegna dei dati.
La norma è applicabile a qualsiasi tipologia di bene costruito e può essere adottata da organizzazioni di ogni tipo e dimensione, indipendentemente dal modello di appalto utilizzato. Questa norma internazionale si integra con la serie UNI 11337, che ne rappresenta il complemento normativo a livello nazionale.

La **UNI EN ISO 19650-3:2021**, *"Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni relative all'edilizia e alle opere di ingegneria civile, incluso il Building Information Modelling (BIM) - Gestione informativa mediante il Building Information Modelling - Parte 3: Fase gestionale dei cespiti immobili"* è entrata in vigore l'8 aprile 2021 e definisce i requisiti per la gestione e lo scambio delle informazioni durante la fase operativa degli asset immobiliari nell'ambito del BIM. È applicabile a qualsiasi tipo di bene e organizzazione, indipendentemente da dimensioni o struttura.
Complementare alla UNI 11337, approfondisce le attività necessarie per una corretta gestione dei dati, garantendo aggiornamento, accessibilità e coerenza delle informazioni lungo tutto il ciclo di vita dell'opera.

La **UNI EN ISO 19650-4:2022**, *"Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni relative all'edilizia e alle opere di ingegneria civile, incluso il Building Information Modelling (BIM) - Gestione informativa mediante il Building Information Modelling - Parte 4: Scambio di informazioni"* è entrata in vigore il 17 novembre 2022 e definisce il processo e i criteri per eseguire correttamente lo scambio di informazioni, in linea con la serie ISO 19650, per garantire la qualità dei modelli informativi. Si applica sia alla fase di consegna (ISO 19650-2) sia alla fase gestionale (ISO 19650-3), ed è valida per tutti i tipi di asset, indipendentemente da dimensione o complessità, inclusi edifici singoli, reti infrastrutturali e portafogli immobiliari. I requisiti vanno adattati al contesto specifico del progetto.

La **UNI EN ISO 19650-5:2020**, *"Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni relative all'edilizia e alle opere di ingegneria civile, incluso il Building Information Modelling (BIM) - Gestione informativa mediante il Building Information Modelling - Parte 5: Approccio orientato alla sicurezza per la gestione informativa"* è entrata in vigore il 1° ottobre 2020 e definisce i principi e i requisiti per la gestione sicura delle informazioni nel contesto BIM, come previsto dalla serie ISO 19650. Si applica a tutte le fasi del ciclo di vita di un progetto o bene costruito e riguarda la protezione delle informazioni sensibili (dati commerciali, personali, proprietà intellettuale) ottenute, create o archiviate.
Promuove la creazione di una cultura della sicurezza tra le organizzazioni coinvolte, richiedendo il monitoraggio e la verifica della conformità. È rivolta a qualsiasi ente impegnato nella gestione delle informazioni durante la progettazione, costruzione, gestione, modifica o demolizione di asset, ma anche nella fornitura di servizi, ed è utile a chiunque voglia tutelare i propri dati sensibili nell'ambiente costruito.

La **UNI EN ISO 19650-6:2025**, *"Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni relative all'edilizia e alle opere di ingegneria civile, incluso il Building Information Modelling (BIM) - Gestione informativa mediante il Building Information Modelling - Parte 6: Informazioni sulla salute e sulla sicurezza"* è entrata in vigore il 20 marzo 2025 e definisce concetti e requisiti per la classificazione, condivisione e gestione collaborativa delle informazioni sulla salute e sicurezza durante tutto il ciclo di vita di un progetto o asset, con l'obiettivo di massimizzare i benefici economici, ambientali e sociali. Supporta la digitalizzazione di queste informazioni fin dalle prime fasi e stabilisce come condividerle efficacemente tra le parti coinvolte. Fornisce inoltre un quadro strutturato per identificare, utilizzare e generalizzare i dati H&S attraverso i processi di gestione informativa.
Si applica a tutte le figure e organizzazioni coinvolte nella progettazione, costruzione, utilizzo e dismissione di edifici e infrastrutture, anche in contesti che non adottano il BIM.

Sempre in ambito ISO è bene menzionare e ricordare l'esistenza di altre normative legate al BIM:

**UNI EN ISO 16757-2019** "*Strutture dati per i cataloghi elettronici di prodotto peri servizi in edilizia"*. La parte 1 "*Concetti, architetture e modelli*" definisce una struttura dati per i cataloghi elettronici di prodotti edilizi, permettendo lo scambio automatico di informazioni tra software BIM. Include metamodelli per descrivere classi di prodotto, proprietà e dati da trasmettere, specificando un modello generico e una struttura dei contenuti necessari per una corretta integrazione nei cataloghi digitali. La parte 2 "*Geometria*" definisce come modellare la geometria

dei prodotti per l'edilizia, ottimizzando lo scambio dei dati nei cataloghi digitali. Include la rappresentazione delle forme del prodotto, simboli per i diagrammi schematici, spazi funzionali, superfici visive e connessioni tra oggetti.

**UNI EN ISO 23386:2020**, "Metodologia per descrivere, creare e mantenere proprietà nei dizionari di dati interconnessi" è entrata in vigore nel 2020 e definisce regole e metodi per creare e gestire le proprietà usate in edilizia, garantendo una condivisione digitale sicura e continua tra i soggetti coinvolti nei processi BIM.

**UNI EN ISO 12006:2022**, "*Edilizia - Organizzazione delle informazioni sui lavori di costruzione*". La parte 2 "*Quadro per la classificazione delle informazioni*" è entrata in vigore nel 2020 e definisce una struttura guida per lo sviluppo di sistemi di classificazione edilizia, fornendo titoli di tabelle e criteri per organizzare le informazioni su oggetti secondo viste come forma o funzione. La parte 3 invece "*Struttura per le informazioni orientate agli oggetti*" è entrata in vigore nel 2022 e definisce un modello informativo multilingua per sviluppare dizionari digitali contenenti informazioni sulle opere di costruzione.

**UNI EN ISO 23387**, "*Building information modelling (BIM) - Modelli di dati per oggetti da costruzione utilizzati nel ciclo di vita dei beni edilizi - Concetti e principi*" è entrata in vigore nel 2020 e stabilisce come strutturare i dati sugli oggetti da costruzione per permettere uno scambio digitale chiaro e standardizzato. Usa un modello di classificazione e definisce le regole per collegare queste informazioni ai modelli IFC usati nel settore edile.

**UNI EN ISO 29481-3**, "*Modelli di informazioni di edifici - Guida per lo scambio di informazioni*". La parte 1: "*Metodologia e formato*", entrata in vigore nel 2017, spiega come collegare i processi lavorativi nel settore edile alle informazioni necessarie in ogni fase, dalla progettazione alla demolizione. Aiuta i diversi software a lavorare insieme e facilita la collaborazione tra chi partecipa al progetto, assicurando uno scambio di dati chiaro e affidabile. La parte 3, "*Schema dei dati*", entrata in vigore nel 2022, definisce come creare, scambiare e leggere in modo standard e automatico le specifiche del manuale di consegna delle informazioni (IDM).

### 2.2.2 Norme CEN

Il CEN (Comité Européen de Normalisation) è l'ente che produce norme valide a livello europeo, con l'obiettivo di uniformare la normativa tra i paesi membri. Le norme europee sono indicate con la sigla "EN". In particolare sul tema BIM se ne possono individuare specificatamente due:

**UNI EN 17412-1**, "*Building Information Modelling - Livello di fabbisogno informativo*" la quale, nella sua "Parte 1: Concetti e principi", entrata in vigore nel 2021, definisce i concetti e i principi per stabilire una metodologia utile a specificare il livello di fabbisogno informativo, descrive le caratteristiche dei diversi livelli di dettaglio e portata informativa necessari durante il ciclo di vita di un bene costruito e fornisce linee guida per identificare e gestire i fabbisogni informativi, facilitando uno scambio strutturato e collaborativo tra le parti coinvolte. È applicabile a tutte le fasi del ciclo di vita dell'opera, dalla pianificazione alla dismissione.

**UNI EN 17632-1**, "*Building information Modelling (BIM) - Modellazione e collegamento semantico (SML)*" la quale, nella sua "Parte 1: Schemi di modellazione generica" entrata in vigore nel 2023, affronta l'interoperabilità per le informazioni che descrivono i beni attraverso il loro ciclo di vita nell'ambiente costruito e garantisce che le informazioni siano non solo leggibili dalle macchine, ma anche comprensibili per tutti in modo coerente.

### 2.2.3 Norme UNI

**UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione**: si tratta della norma nazionale italiana.
In Italia, come abbiamo detto, si applica la UNI EN ISO 19650:2019 parti 1 e 2 (tradotta in italiano) attraverso la serie UNI 11337 nelle sue parti attualmente pubblicate: 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7. A dicembre 2019 è stata inoltre pubblicata la prassi di riferimento per la definizione del Sistema di Gestione Informativo delle organizzazioni (UNI/PdR 74:2019).

Prima delle norme ISO e CEN, in Italia esisteva la **UNI 11337**, una norma che dal 2017 è stata suddivisa in più parti (attualmente 7 pubblicate). Non tratta direttamente il BIM, ma affronta in generale la gestione digitale delle informazioni nel settore delle costruzioni. Ha anticipato molti concetti poi ripresi e sviluppati nelle norme europee, come la serie UNI EN ISO 19650.
Per sintetizzare i contenuti delle diverse parti, la **serie UNI 11337** attualmente a disposizione è così composta:
La **parte 1**, *"Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi"* entrata in vigore nel 2017, riguarda la gestione digitale delle informazioni nel settore delle costruzioni, trattando la struttura dei contenuti informativi, l'organizzazione delle informazioni nei processi e la descrizione informativa del prodotto finale. Si applica a qualsiasi tipo di opera (edificio o infrastruttura) e a tutte le fasi del processo (ideazione, realizzazione, gestione), sia per nuove costruzioni che per interventi di conservazione o riqualificazione;
La **parte 2**, "*Flussi informativi e processi decisionali nella gestione delle informazioni da parte della committenza"* entrata in vigore nel 2021, fornisce linee guida per applicare le norme BIM in Italia, in linea con la serie UNI EN ISO 19650. Si concentra sul legame tra gestione del progetto e gestione delle informazioni, con particolare attenzione al ruolo della **committenza** nella fase di progettazione di un immobile.
La **parte 3**, "*Modelli di raccolta, organizzazione e archiviazione dell'informazione tecnica per i prodotti da costruzione*", entrata in vigore nel 2015, fornisce linee guida per creare un modello operativo utile a raccogliere e archiviare in modo strutturato i dati tecnici dei prodotti da costruzione. Prevede sia una descrizione qualitativa, sia una descrizione quantitativa delle caratteristiche del prodotto. Il modello è pensato per essere usato da tutti gli operatori del settore edilizio, anche per attività come posa, manutenzione, trasporto e smaltimento.
La **parte 4**, "*Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e oggetti*", entrata in vigore nel 2017, tratta la gestione digitale delle informazioni nel settore delle costruzioni, sia in termini qualitativi che quantitativi, per supportare le decisioni durante tutte le fasi del processo (da 0 a 7, secondo la UNI 11337-1). Stabilisce gli obiettivi di ciascuna fase del processo, una scala comune per il livello di sviluppo informativo degli oggetti, una scala per gli stati di lavorazione e approvazione delle informazioni. Si applica a qualsiasi tipo di opera (edifici, infrastrutture, interventi territoriali) e a tutti i tipi di processo (ideazione, realizzazione, gestione), sia per nuove costruzioni che per interventi di conservazione, demolizione o riqualificazione.
Di grande utilità sono la **parte 5** "Flussi informativi nei processi digitalizzati" che definisce i ruoli, le regole ed i flussi necessari alla produzione , gestione e trasmissione delle informazioni e la loro connessione e interazione nei processi di costruzione digitalizzati, e la **parte 6**, "*Linea guida per la redazione del capitolato informativo"* che rappresenta una guida per redigere il capitolato informativo secondo la UNI 11337-5 in quanto fornisce indicazioni operative e uno schema dei contenuti da includere. Entrambe sono entrate in vigore nel 2017.
Infine la **parte 7**, "*Requisiti di conoscenza, abilità e competenza delle figure coinvolte nella gestione e nella modellazione informativa*", entrata in vigore nel 2018, definisce i requisiti professionali per le figure coinvolte nella gestione e modellazione informativa. Specifica compiti, conoscenze, abilità e competenze secondo il **quadro europeo delle qualifiche (EQF)**, utili sia per valutare l'apprendimento formale e informale, sia per verificare la conformità delle competenze.

La serie UNI 11337 si applica congiuntamente alla serie UNI EN ISO 19650 sopra descritta.

## 2.3 HBIM per la gestione e la valorizzazione dei grandi complessi militari

Sebbene il concetto di BIM abbia ormai superato i trent'anni, la sua applicazione diffusa è relativamente recente. Ancora oggi, gran parte del patrimonio edilizio è documentato in formato CAD o addirittura su supporto cartaceo, con elaborati 2D tra loro scollegati. Il BIM offre invece la possibilità di costruire un modello unico, integrato e informativo, capace non solo di rappresentare graficamente il manufatto, ma anche di automatizzare attività complesse che, con strumenti tradizionali, richiederebbero tempi molto più lunghi.
Quando si raggiungerà una soglia critica in cui la maggior parte degli edifici, nuovi o esistenti, sarà digitalmente modellata, si delineerà un nuovo mercato edilizio, basato su dati strutturati e accessibili. In tale scenario, saranno soprattutto i beni storici a trarne beneficio, grazie alla possibilità di coniugare conservazione e innovazione tecnologica. Tra questi, i complessi militari storici rappresentano un ambito particolarmente significativo, sia per l'ampiezza del patrimonio coinvolto sia per la complessità delle trasformazioni necessarie alla loro valorizzazione.
Il tema della valorizzazione, della gestione e della digitalizzazione del patrimonio militare sta infatti acquisendo crescente rilevanza, promuovendo la raccolta e l'archiviazione intelligente della documentazione esistente per preservarne il valore storico. In questo contesto, l'approccio HBIM sta contribuendo a sviluppare una maggiore sensibilità verso i valori identitari e architettonici dei manufatti militari, in particolare quelli realizzati tra il XIX e il XX secolo secondo tipologie codificate e ricorrenti in diversi contesti territoriali, che rappresentano un patrimonio ampio e ancora spesso sottovalutato.

L'applicazione della metodologia BIM alla gestione del patrimonio edilizio militare offre numerosi vantaggi, soprattutto quando applicata a edifici storici che testimoniano sperimentazioni costruttive e innovazioni tecnologiche. L'adozione di un modello HBIM consente infatti di pianificare interventi consapevoli per il riuso di questi beni, integrando competenze specialistiche e favorendo soluzioni compatibili con le specificità storiche e con il contesto.
Attraverso un sistema integrato di monitoraggio, documentazione e analisi, l'HBIM si configura come uno strumento interdisciplinare per la conservazione programmata, riducendo dispersioni informative e ottimizzando tempi e risorse. La metodologia è inoltre efficace per la documentazione dei danni strutturali e dei fenomeni di degrado dei materiali, offrendo un database strutturato utile per la conservazione e la tutela del bene. Questo modello digitale si propone anche come inventario degli elementi edilizi, includendo le partizioni interne e le componenti che caratterizzano il progetto originario. Ciò consente di mantenere traccia della storia costruttiva e di simulare scenari progettuali alternativi in vista di una scelta condivisa e consapevole.
L'uso del BIM consente un'esperienza immersiva all'interno del manufatto storico e facilita l'adozione di soluzioni smart per l'uso, la manutenzione e la gestione del bene. Per conciliare le esigenze funzionali e prestazionali con i vincoli storico-conservativi, la metodologia parte da un'approfondita fase conoscitiva basata su rilievi, indagini documentali e analisi storiche, da cui deriva la costruzione di un modello parametrico HBIM in grado di integrare competenze e saperi diversi.
Il modello HBIM, realizzato sulla base dello stato di fatto, funge da strumento di supporto decisionale per attività come la manutenzione, il restauro, la valutazione di retrofit e la gestione a lungo termine del patrimonio. Esso permette di visualizzare un insieme articolato di dati utili a individuare le aree di intervento compatibili con i vincoli esistenti e a guidare le trasformazioni nel rispetto delle peculiarità storiche e artistiche dei manufatti.
L'efficacia di tale approccio può costituire una premessa solida per la sua estensione ad altri casi analoghi, contribuendo alle strategie di recupero, riqualificazione e rifunzionalizzazione del patrimonio architettonico militare nel suo complesso.

## 2.4 Dal Raumbuch al BIM

Nell'ambito degli studi dedicati alla tutela del patrimonio militare, sia dismesso che in uso, il Raumbuch si è rivelato uno strumento efficace per sintetizzare e valutare le diverse componenti costruttive. Tale approccio supporta con precisione la gestione dei processi di sostituzione necessari per l'adeguamento funzionale e prestazionale degli edifici (Fiorino 2017). Il Raumbuch, infatti, raccoglie e organizza topograficamente tutti i dati rilevati su un edificio e le sue parti, documentando sia gli elementi costruttivi che i segni di degrado osservabili visivamente o con tecniche diagnostiche non distruttive. Tutti gli spazi e le superfici vengono identificati in modo progressivo e univoco, grazie a un sistema di numerazione a serie e sotto-serie aperte, che permette di catalogare e associare topograficamente elementi costruttivi e fenomeni di degrado agli spazi. Ogni numero di repertorio rimanda a documentazione descrittiva o grafica riferita a diverse scale di dettaglio, dai corpi di fabbrica ai singoli materiali.
Questi dati consentono di ricostruire una sequenza temporale basata su relazioni di contiguità e sovrapposizione, secondo i principi della stratigrafia in elevazione tipici dell'archeologia dell'architettura, favorendo la definizione della storia edilizia, soprattutto quando sono presenti elementi databili con precisione.
Le serie numeriche aperte facilitano l'aggiunta progressiva di nuove informazioni senza modificare quanto già registrato, permettendo inoltre di ritornare facilmente sui dati archiviate per aggiornarli e integrarli man mano che la conoscenza si approfondisce (Del Curto 2007). Questo metodo riflette la complessità del rilievo storico, dove la comprensione matura gradualmente, e solo nel tempo i dati assumono un significato più profondo rispetto alla somma delle singole osservazioni.
La struttura stabile e univoca delle serie del Raumbuch, insieme alla possibilità di correlare informazioni su più scale di dettaglio, lo rende uno strumento efficace non solo per il rilievo, ma anche per la progettazione, sia su edifici esistenti sia di nuova costruzione, consentendo inoltre di registrare ordinatamente le modifiche successive. Basandosi sull'osservazione delle superfici, il Raumbuch individua tutti i vani dell'edificio e rispecchia l'organizzazione pratica dei lavori edilizi e impiantistici, facilitando anche la gestione delle istruzioni esecutive.
Tuttavia, il confronto diretto tra categorie informative differenti — come le fasi costruttive e i fenomeni di degrado — risulta spesso difficoltoso, poiché queste sono registrate su serie parallele e non sempre immediatamente integrabili. Ciò può generare elaborati e operazioni ripetitive necessari per mettere in relazione o confrontare efficacemente i dati.
Ulteriori criticità emergono nell'applicazione del Raumbuch all'esistente, soprattutto a causa dell'evoluzione degli strumenti di rappresentazione: dal disegno cartaceo si è passati al CAD 2D e 3D e alla progettazione per elementi. In questo contesto, il metodo di rilievo basato sulle superfici può risultare insufficiente a descrivere elementi tridimensionali complessi o fenomeni di degrado che interessano superfici diverse (Del Curto e Grimoldi 2011).
Al contrario, il modello digitale dell'edificio, affiancato da un database integrato, costituisce il cuore del processo informativo contemporaneo, soprattutto in un contesto caratterizzato da una grande quantità di dati. Per trasformare questo sovraccarico informativo in conoscenza utile, è indispensabile una gestione strutturata e organica delle informazioni (Fiorino 2022).
Un principio fondamentale è che le informazioni devono essere strutturate, gestite una sola volta e scambiate in modo efficiente. È quindi importante evitare che il Raumbuch diventi uno strumento di raccolta dati aggiuntivo e separato, che frammenterebbe le informazioni invece di integrarle.
Allo stesso tempo, è altrettanto fondamentale non saltare direttamente all'adozione del BIM senza aver prima consolidato una base solida di conoscenza e organizzazione dei dati tramite il Raumbuch. Questo rappresenta un passaggio imprescindibile per strutturare, ordinare e approfondire le informazioni sull'edificio, facilitando una gestione progressiva e coerente. Solo consolidando questa base conoscitiva si potrà integrare efficacemente i dati nel modello digitale BIM, evitando sovraccarichi, ridondanze e dispersioni informative, e supportando un processo BIM realmente efficiente e sostenibile.

### 2.4.1 La codifica dei dati

Dopo aver illustrato le potenzialità del Raumbuch come strumento per l'organizzazione sistematica delle informazioni, questo capitolo approfondisce uno degli aspetti operativi fondamentali della metodologia: la codifica dei dati. In particolare, viene descritta la logica gerarchica utilizzata per attribuire un identificativo univoco a ciascun elemento rilevato, con l'obiettivo di rendere i dati facilmente leggibili, consultabili e interoperabili. Questa struttura di codifica, applicata inizialmente nel file Excel del Raumbuch, è stata concepita fin da subito per essere integrabile nel processo di modellazione HBIM. I dati organizzati secondo tale sistema sono infatti stati trasposti nel modello digitale, dove la *codifica Raumbuch* è stata associata direttamente a ciascun elemento costruttivo, mentre le relative caratteristiche tipologiche sono state inserite nelle proprietà dell'oggetto parametrico. In questo modo, si garantisce una continuità metodologica tra le fasi di rilievo e conoscenza e quelle di digitalizzazione e gestione in ambiente BIM.

### 2.4.2 La codifica degli infissi

Nel Raumbuch è stata adottata una codifica strutturata per identificare in modo univoco gli infissi esterni ed interni. Questa è organizzata secondo la gerarchia di seguito illustrata.

*Formato codifica Raumbuch elemento: 00_001_01*

- 00 - Riferimento al piano: Il primo segmento della codifica rappresenta il piano dell'edificio (es. "00" per il piano terra, "01" per il primo piano, e così via);
- 001 - Unita/Alloggio: Il secondo segmento identifica univocamente ciascuna unità / alloggio all'interno di un piano. La numerazione di queste unità è crescente (001, 002, 003, ...) per consentire l'aggiunta futura di nuove unità senza modificare quelle esistenti. La numerazione delle unità/alloggi riparte da 001 per ogni piano, poiché il riferimento al piano garantisce comunque l'univocità;
- 01 - Numero/Codice dell'infisso: Il terzo segmento rappresenta il numero progressivo assegnato agli infissi all'interno di ciascuna unità/alloggio. La numerazione è crescente (01, 02, 03, ...) per permettere l'inserimento successivo di infissi eventualmente dimenticati. La numerazione delle riparte da 01 per ogni unità / alloggio, poiché il riferimento al piano e all'unità garantisce comunque l'univocità.

Esempio di codifica Raumbuch:

- "00_001_01" indica l'infisso numero 01 dell'unità 001 al piano 00 (piano terra).
- "01_002_04" indica l'infisso numero 04 dell'unità 002 al piano 01 (primo piano).

*Codifica tipo e tipologia:*
Per ciascun infisso rilevato, oltre alla codifica dell'elemento, vengono associati due ulteriori campi informativi: "Tipo" e "Codifica tipologia", utili per classificare e distinguere le diverse caratteristiche tipologiche dell'elemento (Tabella 42).

- Il campo "Tipo" fa riferimento alla tipologia dell'infisso. Ad esempio, la sigla "Ine" indica un infisso esterno (come una finestra o una porta esterna). Al contrario, il campo "Ini" indica un infisso interno (come una porta interna).
- Per quanto riguarda la distinzione tra porte e finestre, va specificato che essa non incide sulla codifica numerica degli infissi nel Raumbuch. In una stessa unità/locale possono infatti essere presenti sia una finestra che una porta, ognuna identificata da un proprio codice univoco. Ad esempio, all'interno di una unità, il codice "00_001_01" può riferirsi alla finestra, mentre "00_001_02" alla porta. La differenza tra i due è evidenziata nel campo "Codifica tipologia", dove la finestra sarà ad esempio "Ine_02a" e la porta "Ine_01c".

| EDIFICIO | CODICE STANZA/UNITA' | CODICE ELEMENTO | TIPO | CODIFICA TIPOLOGIA |
|---|---|---|---|---|
| Casermetta 3S | 3S_00_042 | 00_042_01 | Ine | Ine_02a |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Casermetta 3S | 3S_00_042 | 00_042_02 | Ini | Ine_01c |

*Tabella 42. Esempio di codifica degli infissi.*

Questa stessa codifica è stata mantenuta anche nella fase di trasposizione dei dati in ambiente BIM, al fine di garantire la coerenza e l'interoperabilità delle informazioni tra i diversi strumenti utilizzati. In particolare, per ciascun infisso modellato all'interno del software BIM, è stato previsto un campo specifico denominato "Codifica Raumbuch", che consente di mantenere il collegamento diretto con il sistema informativo sviluppato nel file Excel. Parallelamente, la codifica della tipologia dell'elemento (ad esempio, Ine_02a per una finestra o Ine_01c per una porta) è stata inserita tra le proprietà dell'oggetto parametrico, rendendo possibile un'organizzazione strutturata e interrogabile del modello anche in fase di analisi o gestione.

### 2.4.3 La codifica dei muri

Anche per le murature, nel Raumbuch è stata ideata una codifica strutturata analoga a quella degli infissi, al fine di identificare in modo univoco ciascun setto murario rilevato. Tale codifica si basa su una logica gerarchica che riflette l'organizzazione spaziale dell'edificio.

*Formato codifica elemento: 00_01*

- 00 - Riferimento al piano: Il primo segmento della codifica rappresenta il piano dell'edificio (es. "00" per il piano terra, "01" per il primo piano, e così via);
- 01 - Tratto murario: Il secondo segmento individua progressivamente ciascun tratto lineare che costituisce il parametro murario, ovvero la porzione della muratura considerata nel rilievo. Anche in questo caso la numerazione è crescente (01, 02, 03, ...).

Esempio di codifica Raumbuch:

- "00_01" indica un muro localizzato al piano 00 (piano terra) e corrispondente al primo tratto della lunghezza del parametro murario.
- "01_02" indica un muro localizzato al piano 01 (primo piano) e corrispondente al secondo tratto della lunghezza del parametro murario.

*Codifica tipo e tipologia:*
Per ciascun tratto murario rilevato, oltre alla codifica spaziale, vengono associati due ulteriori campi informativi: "Tipo" e "Codifica tipologia", utili per classificare e distinguere le diverse caratteristiche costruttive dell'elemento (Tabella 43).

- Il campo "Tipo" serve a identificare la categoria funzionale della muratura all'interno dell'edificio. Ad esempio, la sigla "mue" indica un muro esterno. Al contrario, il campo "Mui" indica un muro interno. Tale classificazione permette una rapida distinzione tra elementi strutturalmente o termicamente rilevanti e quelli interni, spesso secondari ai fini prestazionali.
- Dal campo "Codifica tipologia" viene registrata la tipologia costruttiva specifica del tratto murario. La codifica è pensata per distinguere in maniera chiara le diverse tecniche o materiali impiegati nella costruzione, come ad esempio:

| EDIFICIO | CODICE STANZA/UNITA' | CODICE ELEMENTO | TIPO | CODIFICA TIPOLOGIA |
|---|---|---|---|---|
| Casermetta 3S | 3S_00_042; 3S_00_43; ecc. | 00_01 | Mue | Mue_01a |
| Casermetta 3S | 3S_00_062; 3S_00_63; ecc. | 00_02 | Mui | Mui_01a |

*Tabella 43. Esempio di codifica dei muri.*

Questa stessa codifica è stata mantenuta anche nella fase di trasposizione dei dati in ambiente BIM, al fine di garantire la coerenza e l'interoperabilità delle informazioni tra i diversi strumenti utilizzati. In particolare, per ciascun setto murario modellato all'interno del software BIM, è stato previsto un campo specifico denominato "Codifica Raumbuch", che consente di mantenere il collegamento diretto con il sistema informativo sviluppato nel Raumbuch. Parallelamente, la codifica della tipologia dell'elemento (ad esempio, Mue_01a per un setto esterno Mui_01a per un setto interno) è stata inserita tra le proprietà dell'oggetto parametrico, rendendo possibile un'organizzazione strutturata e interrogabile del modello anche in fase di analisi o gestione.

### 2.4.4 La codifica dei solai

Per i solai è stata adottata una codifica strutturata analoga a quella utilizzata per gli altri elementi, organizzata secondo una logica gerarchica in due segmenti. Tale codifica consente di identificare in modo univoco ciascun solaio rilevato e di organizzarne le informazioni in maniera sistematica nel Raumbuch.

*Formato codifica elemento: 00_01*

- 00 - Riferimento al piano: Il primo segmento della codifica rappresenta il piano dell'edificio (es. "00" per il piano terra, "01" per il primo piano, e così via);
- 01 – Riferimento alla porzione o tipologia: Il secondo segmento individua, rispettivamente, il primo/secondo/ecc. tipo di solaio rilevato su quel piano. La numerazione prosegue progressivamente (01, 02, 03, …) per ciascuna porzione o variante identificata.

Esempio di codifica Raumbuch:

- "00_01" fa riferimento al solaio localizzato al piano terra e corrispondente alla prima tipologia di solaio individuata.

*Codifica tipo e tipologia:*
Oltre alla codifica dell'elemento, per ciascun solaio è stato previsto il campo "Codifica tipologia", utile a distinguere la stratigrafia e la tipologia costruttiva del pavimento associato. A ogni tipologia di solaio corrisponde un codice identificativo specifico.

| EDIFICIO | CODICE STANZA/UNITA' | CODICE ELEMENTO | TIPO | CODIFICA TIPOLOGIA |
|---|---|---|---|---|
| Casermetta 3S | 3S_00_042; 3S_00_43; ecc. | 00_01 | So | So_01a |
| Casermetta 3S | 3S_00_062; 3S_00_63; ecc. | 00_02 | So | So_01b |

*Tabella 44. Esempio di codifica dei solai.*

Anche in questo caso, nella trasposizione in ambiente BIM, la codifica Raumbuch è stata associata a ciascun elemento modellato mediante un apposito campo informativo, mentre la "Codifica tipologia" è stata riportata nelle proprietà dell'oggetto parametrico, così da garantire continuità e interoperabilità tra modello digitale e database descrittivo.

### 2.4.5 La codifica delle coperture

Per i solai è stata adottata una codifica strutturata analoga a quella utilizzata per gli altri elementi, organizzata secondo una logica gerarchica in due segmenti. Tale codifica consente di identificare in modo univoco ciascuna copertura rilevata e di organizzarne le informazioni in maniera sistematica nel Raumbuch.

*Formato codifica elemento: 00_01*

- 00 - Riferimento al piano: Il primo segmento della codifica rappresenta il piano dell'edificio (es. "00" per il piano terra, "01" per il primo piano, e così via);
- 01 – Riferimento alla porzione o tipologia: Il secondo segmento individua, rispettivamente, il primo/secondo/ecc. tipo di solaio rilevato su quel piano. La numerazione prosegue progressivamente (01, 02, 03, …) per ciascuna porzione o variante identificata.

Esempio di codifica Raumbuch:

- "01_01" fa riferimento alla copertura localizzato al piano primo e corrispondente alla prima tipologia di copertura individuata.

*Codifica tipo e tipologia:*
Oltre alla codifica dell'elemento, per ciascuna copertura è stato previsto il campo "Codifica tipologia", utile a distinguere la stratigrafia e la tipologia costruttiva associata. A ogni tipologia di copertura corrisponde un codice identificativo specifico (Tabella 45).

| EDIFICIO | CODICE STANZA/UNITA' | CODICE ELEMENTO | TIPO | CODIFICA TIPOLOGIA | IMMAGINE |
|---|---|---|---|---|---|
| Casermetta 3S | 3S_00_042; 3S_00_43; ecc. | 00_01 | Cop | Cop_01a | |
| Casermetta 3S | 3S_00_042; 3S_00_43; ecc. | 00_02 | Cop | Cop_01b | |

*Tabella 45. Esempio di codifica delle coperture.*

Anche in questo caso, nella trasposizione in ambiente BIM, la codifica Raumbuch è stata associata a ciascun elemento modellato mediante un apposito campo informativo, mentre la "Codifica tipologia" è stata riportata nelle proprietà dell'oggetto parametrico, così da garantire continuità e interoperabilità tra modello digitale e database descrittivo.

## 2.5 La creazione del modello e la gestione dei dati

Il presente capitolo illustra nel dettaglio il processo di costruzione di un modello informativo per un edificio storico, sviluppato secondo la metodologia HBIM. L'obiettivo principale è evidenziare l'efficacia dell'integrazione tra strumenti tradizionali di analisi architettonica — come il Raumbuch — e le più recenti tecnologie digitali per la modellazione e la gestione del patrimonio.
In particolare, si intende sottolineare il ruolo chiave del Raumbuch come strumento di raccolta, classificazione e sistematizzazione dei dati relativi agli elementi costruttivi, funzionali e materici dell'edificio. Le informazioni strutturate attraverso questo approccio sono state successivamente digitalizzate e incorporate nel modello HBIM, dando vita a un sistema informativo coerente, interoperabile e aggiornabile nel tempo.

Lo sviluppo del modello si è basato sull'elaborazione di diverse fonti eterogenee:

- Planimetrie storiche;
- Elaborati grafici esistenti in formato CAD;
- Analisi tipologiche e morfologiche;
- Dati acquisiti tramite rilievi diretti e fotogrammetria;
- Dati estrapolati dal Raumbuch e dai descrittori;
- Librerie digitali di oggetti parametrici.

La combinazione tra l'analisi documentaria e il rilievo sul campo, supportata dal Raumbuch, ha permesso di costruire una base informativa solida e strutturata, utile a ridurre l'incertezza derivante dalla frammentarietà della documentazione storica. Questo ha favorito una modellazione più accurata e consapevole dell'edificio, restituendo un modello informativo capace di rappresentarne le caratteristiche tipologiche, morfologiche e materiche con un elevato livello di dettaglio.
Il modello HBIM è stato realizzato con Autodesk Revit e concepito come un contenitore dinamico di dati e informazioni, funzionale non solo alla rappresentazione grafica, ma anche alla gestione della conoscenza del bene. Ogni componente del modello può essere aggiornato e arricchito nel tempo, favorendo l'interoperabilità tra attori e strumenti diversi e supportando attività diagnostiche, valutazioni prestazionali e ipotesi di intervento finalizzate alla conservazione e al restauro.
In quest'ottica, l'integrazione tra Raumbuch e HBIM rappresenta una strategia metodologica efficace per il rilievo e la digitalizzazione del patrimonio costruito, con importanti ricadute sia in termini di gestione sostenibile che di tutela consapevole.
Nei prossimi paragrafi verranno approfondite le fasi operative attraverso cui sono stati sviluppati i modelli relativi ai vari casi di studio analizzati.

### 2.5.1 La costruzione delle librerie di progetto

Per garantire coerenza, precisione e interoperabilità nella modellazione, è stato avviato fin dalle fasi iniziali un lavoro sistematico di costruzione di una libreria digitale personalizzata, sviluppata all'interno di Autodesk Revit. Tale libreria raccoglie materiali, componenti e oggetti parametrici — come muri, solai, porte e finestre — progettati specificamente per rappresentare gli elementi costruttivi rilevati.
A partire dai dati raccolti durante il rilievo e dalle informazioni catalogate nel Raumbuch, è stato possibile definire una serie di famiglie parametriche arricchite da attributi informativi eterogenei. Ogni oggetto è stato modellato non solo in base alla sua geometria e alla morfologia, ma anche corredato da dati tecnici e documentari relativi alla tipologia, alle caratteristiche costruttive e ai materiali impiegati.
Questa fase ha rappresentato un passaggio cruciale per la strutturazione del modello HBIM, permettendo di associare in modo diretto e immediato i dati informativi alle componenti digitali del modello. La libreria così costruita costituisce un repertorio coerente e facilmente riutilizzabile, in grado di supportare l'aggiornamento e l'estensione del modello nel tempo, nonché il trasferimento dei dati verso altri ambienti software grazie alla sua piena interoperabilità.

#### 2.5.1.1 La modellazione dei muri

In Revit, i parametri associati agli elementi murari non si limitano a una semplice rappresentazione bidimensionale con valenza puramente geometrica, ma consentono una modellazione stratigrafica che riflette in maniera realistica il sistema edilizio di riferimento. Ogni muro è definito in base alla sua composizione materica e funzionale, specificando spessori, materiali e ruoli assegnati a ciascun componente della stratigrafia. Ogni strato è associato a un valore numerico che ne determina la posizione all'interno della sequenza, permettendo così di rappresentare in modo fedele la struttura reale dell'elemento.
Per ciascun materiale, Revit consente la compilazione di cinque categorie informative: identità, grafica, aspetto, proprietà fisiche e proprietà termiche. In particolare, per gli scopi di questo studio, l'attenzione si è concentrata sui parametri termici — come conducibilità, calore specifico, densità e permeabilità al vapore — al fine di valutare in modo più accurato il comportamento energetico dell'edificio e supportare analisi orientate alla sostenibilità. Nei casi in cui i materiali storici rilevati (come la pietra calcarea) non fossero già presenti nelle librerie native del software, si è proceduto alla loro definizione manuale, garantendo così l'aderenza tra rappresentazione digitale e realtà costruttiva.
L'integrazione tra la classificazione Raumbuch e la modellazione parametrica ha permesso di strutturare un modello informativo interrogabile, coerente e interoperabile, in grado di supportare non solo la fase conoscitiva, ma anche la gestione prestazionale e l'elaborazione di scenari conservativi nel tempo.
Nei capitoli dedicati ai casi di studio singoli sarà possibile entrare maggiormente nel dettaglio: verranno illustrate le specifiche codifiche adottate per ogni edificio, i materiali individuati, le stratigrafie implementate in Revit e come questi dati sono stati impiegati nelle analisi energetiche e conservazionistiche.

#### 2.5.1.2 La modellazione dei solai di base, interpiano e di copertura

Per la definizione delle stratigrafie relative ai solai negli edifici esistenti, si è fatto riferimento alla UNI/TS 11300-1 – Appendice A, che fornisce valori indicativi per il calcolo delle prestazioni energetiche nei casi in cui non sia possibile determinare con precisione le caratteristiche costruttive mediante rilievi diretti o documentazione tecnica. Questa norma rappresenta un valido supporto soprattutto in contesti in cui la conoscenza del dettaglio costruttivo risulta parziale o frammentaria.
Laddove il rilievo ha permesso di identificare la tecnologia strutturale impiegata, ma non le esatte stratigrafie, si è proceduto con una ricostruzione ipotetica basata su fonti storiche, manuali tecnici e consuetudini costruttive del periodo. Tale approccio consente di ottenere modelli coerenti con la realtà dell'epoca, pur in assenza di dati completi.
La modellazione è stata eseguita in Revit utilizzando famiglie di sistema per la definizione delle chiusure orizzontali. Il software consente la creazione di solai stratificati personalizzabili in base ai materiali, agli spessori e alla funzione di ciascun componente, rendendo possibile una rappresentazione accurata sia dal punto di vista geometrico che

informativo. Le principali tecnologie disponibili includono solai in laterocemento, in legno e metallici, selezionabili e modificabili in base al contesto.
Un passaggio preliminare fondamentale è stata la definizione dei livelli strutturali, attraverso l'impostazione dell'interpiano e l'aggiunta di piani intermedi per una corretta collocazione altimetrica degli elementi orizzontali. A ciascun solaio è stata poi associata una stratigrafia specifica, indicandone con precisione i materiali e le relative proprietà fisiche e termiche.
Le differenti tipologie di solaio sono state catalogate e rappresentate in tabelle di sintesi, corredate da schemi planimetrici per evidenziare la posizione e la distribuzione delle diverse stratigrafie all'interno del modello. In molti casi, le differenze tra le tipologie si limitano allo strato di finitura, mentre la struttura portante rimane pressoché invariata.
Nei capitoli dedicati ai casi di studio singoli sarà possibile entrare maggiormente nel dettaglio: verranno illustrate le specifiche codifiche adottate per ogni edificio, i materiali individuati, le stratigrafie implementate in Revit e come questi dati sono stati impiegati nelle analisi energetiche e conservazionistiche.

#### 2.5.1.3 La modellazione degli infissi

Seguendo lo stesso approccio utilizzato per gli altri elementi dell'involucro edilizio, anche gli infissi interni ed esterni sono stati inseriti nel modello informativo mediante l'impiego di famiglie parametriche. In Revit, infatti, porte e finestre sono gestite come oggetti intelligenti, dotati di proprietà specifiche e attributi informativi, in grado di rappresentare non solo le caratteristiche geometriche e materiche, ma anche le relazioni con gli elementi murari in cui sono inseriti.
La modellazione degli infissi è stata condotta a partire da componenti presenti nelle librerie del software, opportunamente modificati e adattati per riflettere le caratteristiche costruttive e formali degli elementi reali. Ove necessario, sono stati creati nuovi oggetti parametrici, al fine di garantire la coerenza tra rilievo e modello e una maggiore fedeltà rappresentativa.
Anche in questo caso, a ciascun infisso è stata associata una stratigrafia semplificata e una serie di proprietà fisiche e prestazionali, fondamentali per le analisi successive, come le valutazioni energetiche, acustiche o funzionali. L'inserimento strutturato e sistematico degli infissi contribuisce alla costruzione di un modello HBIM interoperabile e interrogabile, utile per una gestione informata e consapevole del patrimonio edilizio.
Anche per quanto riguarda gli infissi, nei capitoli dedicati ai casi di studio singoli sarà possibile entrare maggiormente nel dettaglio: verranno illustrate le specifiche codifiche adottate per ogni edificio, i materiali individuati, le stratigrafie implementate in Revit e come questi dati sono stati impiegati nelle analisi energetiche e conservazionistiche.

### 2.5.2 La creazione del modello parametrico

Una volta create e denominate tutte le famiglie personalizzate necessarie alla costruzione del modello — incluse le stratigrafie di muri e solai e i profili parametrici di porte e finestre — si è proceduto con la fase operativa di modellazione. Importando in Revit i disegni CAD dei diversi livelli dell'edificio, è stato possibile ricostruire digitalmente i vani, delimitandone con precisione il perimetro.
Un passaggio particolarmente rilevante in questa fase è stato quello relativo alla definizione dei locali. In Revit, infatti, i locali rappresentano entità astratte ma riconosciute come veri e propri oggetti, simili a muri o infissi: pur non avendo consistenza fisica, consentono di rilevare automaticamente superfici, volumi e altezze utili per l'analisi e la gestione dello spazio costruito.
La corretta individuazione dei locali ha permesso di controllare con precisione le dimensioni interne dell'edificio, supportando valutazioni metriche, distributive ed energetiche. Inoltre, trattandosi di entità interrogabili, i locali possono essere inseriti negli abachi del progetto, facilitando la redazione di elaborati quantitativi e sintetici a supporto delle fasi di diagnosi e progettazione.
I criteri adottati per la definizione e l'organizzazione dei locali verranno approfonditi nei capitoli dedicati ai singoli casi studio, dove saranno illustrate le specifiche esigenze e strategie modellative adottate in ciascun contesto.

### 2.5.3 Gestione ed estrapolazione dei dati

Gli abachi costituiscono uno strumento fondamentale all'interno di Revit per l'organizzazione e l'analisi dei dati presenti nel modello. Si tratta di tabelle dinamiche che raccolgono ed elaborano le proprietà degli elementi modellati, consentendo di visualizzare in modo strutturato tutte le istanze di uno o più componenti selezionati.
Attraverso gli abachi è possibile ordinare, filtrare, raggruppare o sommare le informazioni in base a criteri personalizzati, offrendo così un elevato livello di controllo sulle caratteristiche quantitative e qualitative del modello. Le istanze possono essere elencate singolarmente oppure accorpate per tipologia, a seconda delle impostazioni di visualizzazione adottate.
Un'ulteriore funzionalità utile è quella relativa alla gestione delle fasi temporali, che consente di tracciare le trasformazioni del modello nel tempo, distinguendo ad esempio tra stato di fatto, progetto e interventi successivi. Revit permette la creazione degli abachi in qualsiasi momento del processo progettuale, senza vincoli predefiniti, lasciando all'operatore la libertà di decidere tempi e modalità di utilizzo.
Nel presente lavoro, gli abachi sono stati generati sin dalle prime fasi di modellazione, poiché hanno rappresentato uno strumento essenziale per la verifica e il controllo costante dei dati. Grazie alla loro natura dinamica, ogni modifica apportata agli oggetti del modello si riflette automaticamente nell'abaco corrispondente, assicurando coerenza e aggiornamento in tempo reale. Questo approccio ha favorito una gestione più efficiente delle informazioni e una maggiore accuratezza nella costruzione del modello informativo.
Le modalità operative di costruzione e impiego degli abachi saranno approfondite nei capitoli dedicati ai singoli casi studio, in cui verranno illustrate le strategie adottate per l'organizzazione e la consultazione dei dati, in funzione delle specificità architettoniche e costruttive di ciascun edificio analizzato.

# 3 LA MODELLAZIONE ENERGETICA

Dopo la definizione del modello virtuale, è stato possibile avviare la fase di simulazione energetica al fine di valutare il comportamento degli edifici studiati in condizioni standardizzate. Tale fase ha rappresentato un passaggio fondamentale per l'analisi delle prestazioni energetiche e per l'individuazione di potenziali interventi di miglioramento, con l'obiettivo di aumentare l'efficienza, ridurre i consumi e le emissioni, nel rispetto dei principi di sostenibilità.

Nel quadro normativo di riferimento — costituito dalla Direttiva 2006/32/CE, dalla norma UNI CEI EN 16247 (parti 1, 2, 3 e 4) e dal D.Lgs. n. 102/2014, così come modificato dal D.Lgs. n. 141/2016 — la diagnosi energetica è stata concepita come uno strumento metodico, finalizzato all'acquisizione di una conoscenza approfondita dei consumi, all'individuazione delle inefficienze, alla valutazione delle opportunità di risparmio e alla stima dei relativi costi, benefici e ricadute ambientali.

L'approccio operativo che ha previsto, in primo luogo, la definizione di un modello informativo dettagliato mediante Building Information Modeling (BIM), ha consentito di strutturare e organizzare dati geometrici, materici e prestazionali in un unico ambiente integrato. Il modello è stato successivamente esportato in un software specifico per l'analisi energetica, dove è stato elaborato per stimare il fabbisogno energetico e verificare la conformità alle prestazioni richieste.

L'attenzione è stata rivolta soprattutto agli elementi maggiormente rilevanti per il bilancio energetico, come le strutture opache (muri e solai), gli elementi trasparenti (infissi, vetri e telai), i generatori di calore, i ponti termici e gli impianti. L'elaborazione di tali dati ha permesso di classificare l'edificio dal punto di vista energetico, evidenziando eventuali inefficienze e fornendo le basi per la definizione di scenari di intervento migliorativo.

Nei paragrafi che seguono verranno illustrati i principali passaggi che compongono questa prassi metodologica, con particolare attenzione agli aspetti operativi della simulazione energetica. La trattazione rimarrà di carattere generale, con l'obiettivo di chiarire la sequenza logica delle operazioni svolte, le scelte effettuate e gli strumenti utilizzati. Gli approfondimenti relativi ai risultati ottenuti, alle criticità riscontrate e alle proposte di intervento saranno invece sviluppati nei capitoli successivi, dedicati all'analisi specifica dei singoli casi studio.

## 3.1 Localizzazione e dati generali dell'edificio

Ai fini della simulazione energetica, una corretta definizione del contesto climatico in cui si inserisce l'edificio rappresenta un passaggio preliminare imprescindibile. Le condizioni ambientali locali influiscono direttamente sul fabbisogno termico per il riscaldamento e il raffrescamento e, di conseguenza, sulla prestazione energetica complessiva dell'organismo edilizio.

L'approccio metodologico ha previsto l'inserimento dei principali dati geografici e climatici: localizzazione del sito, classificazione in zona climatica, dati invernali ed estivi di progetto, temperature medie mensili e valori medi mensili di umidità relativa. In Italia, la suddivisione del territorio in zone climatiche è regolata dal D.P.R. n. 412 del 26 agosto 1993, che classifica i Comuni in sei fasce (da A a F) in base al numero di gradi giorno (GG). Tali valori sono essenziali per determinare il periodo di accensione degli impianti termici e il relativo fabbisogno energetico.
I dati climatici di riferimento sono conformi alla norma UNI 10349, che definisce le temperature medie mensili e l'umidità relativa in base a serie storiche. Inoltre, le Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente (ARPA) forniscono dati aggiornati su scala territoriale, comprendenti anche temperatura oraria, precipitazioni e umidità.
All'interno dei software di calcolo utilizzati, come Termus e Termolog, è stato possibile selezionare direttamente il Comune di riferimento: in questo modo, il programma ha caricato automaticamente i dati climatici validi per il territorio e ha impostato la normativa applicabile (nazionale o regionale, in funzione della località). Dopo aver definito il contesto climatico, è stato selezionato il tipo di intervento previsto - nei casi specifici classificato come "riqualificazione: involucro e impianto". Tale opzione ha permesso di attivare le sezioni dedicate alla verifica degli impianti coinvolti (riscaldamento, raffrescamento, produzione di acqua calda sanitaria), escludendo invece quelli non interessati dagli interventi.
La normativa di riferimento per il calcolo è stata quella nazionale, applicabile alla località selezionata.
Infine, sono stati compilati i campi relativi a parametri ambientali esterni e condizioni di contorno, come il coefficiente di protezione dal vento, le caratteristiche termo-fisiche del terreno e le adduttanze esterne, che influiscono sullo scambio termico tra edificio e ambiente.
Nel caso del compendio situato a Naarden, nei Paesi Bassi, si è presentata una problematica specifica: il software Termolog consente di effettuare simulazioni energetiche solo utilizzando dati climatici orari relativi a Comuni italiani. Per superare questo limite e ottenere valutazioni il più possibile attendibili, è stato necessario confrontare le condizioni climatiche di Naarden con quelle di varie località italiane, individuando infine il Comune italiano con caratteristiche meteo-climatiche più simili da adottare come riferimento per la simulazione. Tale approccio, pur costituendo una semplificazione, ha permesso di mantenere coerenza con gli strumenti normativi e operativi previsti dal software.

Una trattazione più dettagliata delle scelte effettuate e delle modalità di adattamento dei dati climatici verrà proposta nei paragrafi dedicati ai singoli casi studio, dove tali aspetti saranno approfonditi in relazione al contesto specifico analizzato.

## 3.2 Definizione degli edifici oggetto di certificazione

Nella fase di modellazione energetica, un passaggio preliminare e fondamentale ha riguardato la corretta definizione degli elementi edilizi che incidono sul bilancio energetico dell'edificio. Tale processo è partito dalla creazione di un modello informativo dettagliato, realizzato in ambiente BIM, nel caso di specie attraverso Revit, in cui sono state organizzate e strutturate le informazioni geometriche, materiche e prestazionali dell'edificio come spiegato nei capitoli precedenti.
Una volta completato il modello BIM, esso è stato esportato in un software di simulazione energetica — ACCA Termus o Termolog — per avviare la fase di calcolo. In alcuni casi questo passaggio ha presentato alcune criticità legate all'interoperabilità tra ambienti differenti. In particolare, le stratigrafie e i materiali definiti in Revit non sempre sono state riconosciute correttamente dal software di simulazione, rendendo necessaria un'attenta revisione e, in alcuni casi, la nuova immissione manuale di alcune le informazioni rilevanti per la certificazione energetica.
A tal fine, è stato costruito un archivio personalizzato all'interno del software di simulazione, una vera e propria libreria di progetto contenente gli oggetti parametrici da associare all'edificio: un set di elementi strutturati secondo le caratteristiche fisiche e prestazionali specifiche rilevate o ipotizzate. Le categorie di componenti che hanno richiesto maggiore attenzione in questa fase sono state:

- Le stratigrafie degli elementi opachi (muri, solai, coperture);
- Le stratigrafie degli elementi trasparenti (infissi, vetri e telai);
- I generatori di calore;
- I ponti termici.

L'utilizzo delle stratigrafie definite in precedenza — in sostituzione di componenti generici — è stata essenziale per ottenere stime più accurate dei parametri termici, elementi centrali nella valutazione del comfort termoigrometrico. Nel processo di reimportazione e validazione, ogni stratigrafia inserita viene elaborata per calcolare automaticamente grandezze fondamentali quali la trasmittanza termica, lo spessore, la massa superficiale ecc. Quando disponibili, tali valori sono stati confrontati con dati sperimentali provenienti da rilievi in situ (es. mediante termoflussimetro) per verificare l'attendibilità delle simulazioni numeriche.
La corretta definizione di questi parametri ha costituito la base tecnica necessaria per l'elaborazione dell'analisi energetica, nonché per l'identificazione di scenari di intervento migliorativi.

I passaggi metodologici e gli esiti di tali analisi verranno approfonditi nei capitoli successivi, dedicati alla descrizione dei singoli casi studio.

### 3.2.1 La localizzazione delle zone termiche

Ai fini della diagnosi energetica, la definizione delle zone termiche rappresenta un passaggio imprescindibile per stimare in modo attendibile i consumi energetici e individuare i bisogni dell'edificio. Il processo prende avvio con l'impostazione dell'Edificio Oggetto di Calcolo (EOdC), per il quale si seleziona la destinazione d'uso tra quelle proposte dal software di simulazione. Tale scelta consente di accedere ai parametri prestazionali standard previsti dalle normative vigenti, inclusi valori di riferimento per temperature interne ed esterne, umidità relativa, adduttanze e verifiche igrometriche.

L'inserimento delle zone termiche richiede la preliminare definizione degli elementi architettonici di delimitazione — pareti, solai, coperture — affinché il perimetro di ciascun vano risulti chiuso. A quel punto è possibile posizionare i vani all'interno del modello energetico, assegnando loro un nome univoco e coerente con la logica di classificazione adottata, spesso mutuata dal Raumbuch o da un sistema di codifica gerarchica.
Ogni vano viene poi associato a una specifica zona termica, secondo quanto definito dalla norma UNI/TS 11300, che identifica come zona termica una porzione di edificio climatizzata a una temperatura uniforme e gestita con la stessa modalità di regolazione. In presenza di ambienti adiacenti non separati fisicamente (es. disimpegni, vani scala), si possono utilizzare elementi di involucro fittizi per creare confini virtuali e assicurare il corretto funzionamento della simulazione.
L'assegnazione delle zone avviene specificando per ciascuna subunità le relative condizioni di utilizzo e i servizi associati (riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, ventilazione, ecc.). Le temperature interne di riferimento vengono generalmente impostate dal software secondo i valori standard normativi: 20 °C per il riscaldamento invernale e 26 °C per il raffrescamento estivo, salvo diverse indicazioni progettuali o normative regionali.
Il corretto accorpamento degli ambienti in zone termiche omogenee consente di migliorare l'accuratezza della simulazione energetica e di ottenere una rappresentazione coerente del comportamento termico dell'edificio nel suo complesso, facilitando successivamente l'analisi dei carichi e l'individuazione degli interventi migliorativi.

Anche in questo caso, tutti gli aspetti sopramenzionati verranno approfonditi nei capitoli dedicati ai singoli casi studio, dove saranno illustrate le scelte effettuate in relazione alle specificità architettoniche e funzionali di ciascun edificio analizzato.

### 3.2.2 L'individuazione e la definizione dei ponti termici

Per una corretta valutazione delle prestazioni energetiche dell'edificio, è necessario considerare anche le dispersioni termiche dovute ai ponti termici. Questi ultimi rappresentano punti critici dell'involucro in cui si verificano discontinuità geometriche o materiche, generando un flusso termico localizzato più elevato rispetto alle superfici omogenee. La loro presenza può influire sensibilmente sul bilancio energetico complessivo e sul comfort interno.

Nel processo di modellazione, l'identificazione dei ponti termici avviene attraverso l'analisi delle intersezioni tra elementi costruttivi, come giunzioni parete-solaio, angoli strutturali, contorni dei serramenti o raccordi tra materiali differenti. In assenza di rilievi termografici o dati specifici rilevati in situ, si ricorre generalmente a un approccio semplificato, basato sull'utilizzo degli abachi riportati nella norma UNI EN ISO 14683, che fornisce valori di trasmittanza termica lineica $\psi$ \[W/(m·K)] per diverse configurazioni costruttive.
I software di simulazione energetica mettono a disposizione strumenti per il riconoscimento automatico o manuale dei ponti termici, permettendo all'utente di selezionare le zone interessate direttamente all'interno della vista tridimensionale del modello. Una volta selezionati i nodi critici, è possibile assegnare loro la stratigrafia corrispondente e definire le proprietà fisiche necessarie per il calcolo. La trasmittanza lineica viene quindi determinata automaticamente dal software o tramite l'integrazione con librerie esterne o strumenti specialistici.
Questo passaggio consente di quantificare correttamente le dispersioni lineari e integrare i dati nel calcolo energetico complessivo, migliorando l'attendibilità delle simulazioni.

Il metodo adottato per l'individuazione e la valutazione dei ponti termici sarà illustrato in dettaglio nei capitoli dedicati ai singoli casi studio.

### 3.2.3 L'inserimento degli impianti

Per garantire un'analisi energetica accurata e rappresentativa del comportamento reale dell'edificio, si è proceduto con la modellazione degli impianti, fase imprescindibile per la stima dei consumi effettivi. Poiché la componente impiantistica incide significativamente sul bilancio energetico complessivo, si è ritenuto essenziale ricostruirne in modo dettagliato la configurazione, il funzionamento e le prestazioni.

L'attività è stata avviata con l'identificazione e il rilievo dei sistemi presenti, condotti tramite sopralluoghi tecnici, osservazioni dirette e, quando possibile, consultazione di documentazione tecnica esistente. Sono stati rilevati tutti gli elementi impiantistici visibili, con particolare attenzione ai terminali di emissione del calore, come radiatori in ghisa o alluminio. Per ciascun terminale si sono raccolti dati quali altezza di interasse, numero di elementi, modalità di installazione e condizioni operative, che hanno permesso di calcolare la potenza termica erogata in ciascun ambiente.
I dati raccolti sono stati aggregati per ambiente, consentendo di determinare la potenza complessiva distribuita ai diversi vani. Contemporaneamente, sono stati analizzati i generatori di calore e freddo, includendo sistemi come caldaie e pompe di calore, per i quali si è proceduto al reperimento dei dati prestazionali (potenza, rendimento, COP, temperature di esercizio) anche attraverso schede tecniche o manuali forniti dai produttori.
Nei casi in cui le informazioni disponibili non risultavano sufficienti, si è optato per rilievi sperimentali in situ. Sono state installate termocoppie nei punti strategici delle tubazioni per monitorare le temperature in mandata e ritorno, sia a livello di generatore che nei circuiti distribuiti ai terminali. I dati sono stati acquisiti mediante dispositivi di logging, in grado di convertire le differenze di potenziale elettrico in valori di temperatura, garantendo una lettura accurata e continua nel tempo.
È stato inoltre possibile integrare, dove presente, la componente relativa al trattamento aria, modellando sistemi aria-acqua connessi all'impianto idronico e configurando la tipologia di pompa di calore in funzione dei parametri rilevati.

Tutti i componenti sono stati inseriti all'interno del software di simulazione, associandoli alle rispettive zone termiche e verificandone la compatibilità con i vani e i servizi modellati. In questo modo, si è ottenuta una ricostruzione coerente e completa del sistema impiantistico, indispensabile per condurre simulazioni energetiche affidabili e confrontabili con i dati reali.

### 3.2.4 L'analisi dei consumi

Per la valutazione dei consumi energetici reali degli edifici analizzati, è stato adottato un approccio fondato sulla raccolta e l'elaborazione dei dati derivanti dalle bollette energetiche. Tale procedura ha consentito di acquisire informazioni relative ai consumi annuali di energia elettrica, alle tariffe applicate e all'identificazione dei punti di prelievo (POD) associati alle utenze in esame.
L'analisi è iniziata con la sistematizzazione dei dati contrattuali e tecnici, tra cui l'indirizzo dell'utenza, la destinazione d'uso, la potenza disponibile e i riferimenti di fornitura. Questi elementi si sono rivelati fondamentali per il riconoscimento delle utenze energeticamente più rilevanti e per l'individuazione di eventuali anomalie nei consumi.
I dati raccolti sono stati successivamente ordinati in base alle tre fasce orarie previste dal sistema tariffario nazionale (F1, F2, F3), in modo da valutare la distribuzione del carico in funzione delle ore di funzionamento degli impianti. Tale suddivisione ha permesso di comprendere meglio il profilo di utilizzo energetico, evidenziando le fasce orarie con maggiore incidenza sul consumo totale.
Nel caso di edifici dotati di un unico contatore, è stato necessario elaborare modelli estimativi per attribuire una quota parte dei consumi complessivi a porzioni specifiche del complesso edilizio. In assenza di sistemi di sub-metering, tale approccio è risultato indispensabile per stimare i consumi energetici parziali, sebbene con un certo grado di incertezza.
Le bollette disponibili, solitamente riferite a un periodo triennale, sono state analizzate per ottenere dati aggregati mensili, individuare i picchi di potenza e le variazioni stagionali. Sono state inoltre ricavate curve di carico, utili per comprendere le dinamiche di consumo e per correlare l'andamento energetico con l'utilizzo effettivo degli spazi.

Infine, l’analisi delle tendenze nel tempo ha consentito di evidenziare eventuali riduzioni o incrementi anomali nei consumi, riconducibili a variazioni nella destinazione d’uso, a interventi manutentivi, o a fattori esterni quali emergenze sanitarie o periodi di inattività parziale dell’edificio.

## 3.3 I risultati ottenuti dalla simulazione dello stato di fatto in condizioni standard

Una volta completata la modellazione dell'edificio, comprensiva della definizione geometrica e dell'implementazione delle caratteristiche termo-fisiche dell'involucro edilizio e dei sistemi impiantistici esistenti, si è proceduto con la simulazione energetica dello stato di fatto.
La procedura ha previsto l'utilizzo di software di calcolo che, sulla base dei dati climatici locali e dei parametri energetici definiti in accordo con la normativa vigente (UNI/TS 11300), ha permesso di valutare le prestazioni energetiche dell'edificio in condizioni standard. In questa fase, non sono stati considerati interventi migliorativi o modifiche all'assetto esistente, al fine di restituire un quadro oggettivo e comparabile delle condizioni attuali.

L'analisi ha riguardato in particolare:

- Il calcolo del fabbisogno di energia primaria e dell'indice di prestazione energetica globale (epgl), sia rinnovabile che non rinnovabile;
- La determinazione della classe energetica;
- La valutazione delle prestazioni energetiche invernali ed estive dell'involucro;
- La stima del fabbisogno termico utile per il riscaldamento e il raffrescamento;
- L'analisi degli apporti e delle dispersioni termiche (trasmissione, ventilazione, apporti solari e interni);
- La definizione dei periodi di accensione degli impianti di climatizzazione in base alla zona climatica di appartenenza.

I risultati della simulazione sono stati restituiti in forma tabellare e grafica, consentendo una lettura sintetica delle criticità energetiche e dei comportamenti termici dell'edificio analizzato.
Nel rispetto dell'approccio comparativo adottato, i risultati ottenuti per ciascun edificio oggetto di studio saranno presentati nel dettaglio nei capitoli successivi, in modo da evidenziare le specificità di ciascun caso e fornire una base solida per la successiva definizione degli interventi migliorativi.

## 4. L'ANALISI DI COMPATIBILITÀ

Gli esiti dell'analisi dei descrittori costituiscono la base conoscitiva necessaria per definire con consapevolezza la strategia di intervento. In particolare, la valutazione del livello di importanza storico-architettonica dei componenti edilizi permette di comprendere quali elementi contribuiscano in modo determinante all'identità del bene e quali, invece, presentino margini di trasformazione maggiori.
Su tali premesse metodologiche si inserisce la costruzione di una **matrice di efficacia**, che mette in relazione la valenza storica degli elementi con il loro potenziale di riduzione dei consumi energetici. Attraverso l'incrocio di questi due parametri è possibile individuare con immediatezza i casi in cui un intervento risulti strategico — ovvero quando l'impatto energetico è elevato e la significatività è medio-bassa — nonché riconoscere gli elementi per i quali l'azione dovrà mantenersi minima o esclusivamente conservativa. La matrice diventa dunque uno strumento di supporto decisionale che indirizza le priorità e la tipologia degli interventi, favorendo un equilibrio ragionato tra tutela e miglioramento prestazionale, in piena coerenza con gli esiti dell'analisi conoscitiva preliminare.

### 4.1 Indicatori del valore storico-architettonico

Per valutare in modo oggettivo il contributo dei singoli elementi edilizi al valore complessivo del bene, è stato definito un sistema di indicatori del valore storico-architettonico. Tali indicatori sono stati selezionati tra i descrittori precedentemente analizzati, individuando quelli più efficaci nel rappresentare i caratteri che conferiscono valore patrimoniale al manufatto.
A ciascun indicatore è attribuito un valore numerico, che consente di tradurre il giudizio qualitativo in un punteggio comparabile e facilmente integrabile nelle fasi successive della valutazione. I risultati vengono sintetizzati nella Tabella 46, nella quale la somma dei punteggi attribuiti agli indicatori consente di classificare la valenza storica dell'elemento su cinque livelli: molto alta, alta, media, bassa, nulla.
Questa classificazione rappresenta un passaggio centrale nel processo decisionale, poiché consente di definire le priorità di intervento e di orientare le strategie di efficientamento energetico nel rispetto dei valori storici e identitari dell'edificio.

| INDICATORI DEL VALORE STORICO-ARCHITETTONICO | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| INDICATORE | DESCRIZIONE | | RISULTATI | | |
| | | | GRADO DI TRASFORMABILITA' | VALENZA STORICA | VALORE |
| Valutazione dell'interesse | Interesse storico-artistico | Isa | Nullo | Molto alta | 4 |
| | Interesse storico-costruttivo | Isc | Nullo | Molto alta | 4 |
| | Interesse storico-testimoniale | Ite | Basso | Alta | 3 |
| | Interesse storico-testimoniale-funzionale | Itef | Basso | Alta | 3 |
| | Interesse storico-testimoniale-materico | Item | Basso | Alta | 3 |
| | Interesse storico-tipologico | Iti | Medio | Media | 2 |
| | Nessun interesse | Ni | Alto | Bassa | 1 |
| | Elemento incongruo | Ei | Molto alto | Nulla | 0 |

*Tabella 46. Indicatori del valore storico-architettonico degli elementi edilizi.*

| VALORE | NOTE |
|---|---|
| 4 | L'elemento definisce in modo eccezionale il carattere del bene. Qualsiasi forma di perdita o danneggiamento è considerata completamente inaccettabile o quasi. |
| 3 | L'elemento definisce sostanzialmente il carattere del bene. La perdita non è considerata accettabile e il danneggiamento dovrebbe essere ridotto al minimo assoluto. |
| 2 | L'elemento definisce in parte il carattere del bene. La perdita potrebbe essere considerata accettabile solo in circostanze particolari; il danneggiamento dovrebbe essere minimizzato. |
| 1 | L'elemento contribuisce lievemente al carattere del bene. Una perdita o un danneggiamento potrebbe essere considerato accettabile. |
| 0 | L'elemento non contribuisce a definire il carattere del bene. Una perdita o un danneggiamento non sarebbe considerato problematico e potrebbe persino essere ritenuto vantaggioso. |

*Tabella 47. La tabella mostra come elementi con valori finali alti (quindi di elevata valenza storica) richiedono la minima trasformazione, mentre quelli con valori finali bassi (quindi di bassa valenza storica) possono essere modificati più liberamente.*

## 4.2 Indicatori prestazionali del potenziale di risparmio energetico

Parallelamente alla valutazione del valore patrimoniale, attraverso l'applicazione dei descrittori tecnico-prestazionali è stata condotta un'analisi delle prestazioni termiche degli elementi trasparenti (Tabella 48) e opachi (Tabella 49) dell'involucro, al fine di determinarne il potenziale di riduzione del fabbisogno energetico. Nella tabella seguente possono essere inseriti i valori di trasmittanza termica (U) di ciascuna tipologia di elemento, assunti come indicatori del comportamento termico e confrontati con i corrispondenti valori limite normativi ($U_{rif}$). La differenza percentuale tra i due valori esprime lo scostamento rispetto ai requisiti di legge.

Per ottenere una valutazione più realistica del potenziale di miglioramento, il valore di scostamento viene corretto tramite specifici fattori di correzione che tengono conto delle effettive possibilità di intervento sull'elemento ($X_{int}$), della sua incidenza sulla superficie complessiva dell'involucro ($X_{sup}$) e della sua esposizione prevalente ($X_{esp}$). Questi coefficienti consentono di ponderare il contributo reale di ciascuna tipologia di elemento al miglioramento complessivo delle prestazioni energetiche dell'edificio, evitando di sovrastimare elementi di ridotta estensione o di orientamento favorevole.

In particolare:

- $X_{int}$ riflette il grado di trasformabilità dell'elemento, ossia la possibilità effettiva di intervenire in base ai vincoli storico-architettonici: varia da 1 (intervento completo, molto alto) a 0,2 (elemento vincolato, intervento nullo);
- $X_{sup}$ considera la percentuale di superficie finestrata rispetto all'involucro, con valori compresi tra 1 (>40%) e 0,2 (≤5%);
- $X_{esp}$ rappresenta la correzione per esposizione solare, che assume valori più elevati per gli orientamenti più favorevoli (Sud = 1) e più bassi per quelli sfavorevoli (Nord = 0,2).

* Il **fattore di correzione $X_{int}$** viene applicato come coefficiente moltiplicativo al potenziale percentuale di U migliorabile in funzione della possibilità reale di intervento: se l'infisso è protetto o di elevato valore storico, le soluzioni invasive sono ridotte (ad esempio, è consentita solo la sostituzione del vetro). In questi casi, il valore di $X_{int}$ sarà inferiore a 1 e, di conseguenza, anche il potenziale di riduzione della trasmittanza e del fabbisogno energetico risulterà proporzionalmente ridotto, poiché la percentuale di miglioramento viene moltiplicata per un numero minore di 1. Al contrario, se l'infisso è incongruo o di scarso valore storico, è possibile intervenire liberamente: in tal caso $X_{int}$ = 1, e il potenziale di miglioramento rimane invariato rispetto al valore teorico.

** I **fattori di correzione Xsup** ed **Xesp** consentono di ponderare il potenziale di miglioramento in funzione dell'incidenza reale dell'elemento sull'involucro complessivo e della sua esposizione prevalente, così da stimarne il contributo effettivo al comportamento termico globale dell'edificio.

Il **calcolo del potenziale corretto di riduzione del fabbisogno energetico ($P_{corr}$)** si articola in **due fasi**.

1. Nella prima fase, il valore teorico di miglioramento della trasmittanza (ΔU%) viene corretto in base alla possibilità effettiva di intervento sull'elemento, tramite il fattore $X_{int}$, ottenendo un potenziale di miglioramento a scala di singolo infisso ($P_{elem}$):

   $$P_{elem} = (\Delta U\%) \times X_{int}$$

   $\Delta U\%$= potenziale teorico di miglioramento della trasmittanza (differenza tra U e $U_{rif}$ in %);
   $X_{int}$= coefficiente che riduce il potenziale in base al grado di trasformabilità dell'elemento;
   $P_{elem}$ = potenziale massimo di miglioramento effettivo della trasmittanza corretto in base al vincolo di tutela applicato sull'elemento, espresso in W/(m²K).

2. Nella seconda fase, il valore sopra ottenuto viene ponderato rispetto alla superficie finestrata e all'esposizione dell'elemento sull'involucro edilizio, applicando i fattori $X_{sup}$ (superficie finestrata rispetto all'involucro) ed $X_{esp}$, (esposizione prevalente) così da stimarne il contributo reale al comportamento termico complessivo dell'edificio:

   $$P_{corr} = P_{elem} \times X_{sup} \times X_{esp}$$

oppure, sostituendo la prima formula:

$$P_{corr} = (\Delta U\%) \times X_{int} \times X_{sup} \times X_{esp}$$

$X_{sup}$= coefficiente che riduce il potenziale in base alla superficie finestrata rispetto all'involucro;
$X_{esp}$= coefficiente che riduce il potenziale in base all'esposizione prevalente dell'elemento.

Il valore così ottenuto ($P_{corr}$) è un valore % che descrive la capacità reale di ciascuna tipologia di elemento di incidere sulla riduzione della trasmittanza complessiva dell'edificio ($U_{tot}$), integrando le considerazioni energetiche con quelle di compatibilità storica e tecnica. In sintesi, è utile per dire "questa finestra ha un potenziale correttivo basso/medio/alto".

| INDICATORI PRESTAZIONALI – CHIUSURE TRASPARENTI | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **ELEMENTO** | **TRASMITTANZA** | | | **FATTORI DI CORREZIONE** | | | | | | | **RISULTATI** | |
| | | | | Possibilità di intervento | | | Superficie finestrata | | Esposizione | | | |
| Codice tipologia | Trasmittanza termica U (W/m²K) | Trasmittanza termica di riferimento $U_{rif}$ (W/m²K) | ΔU% *(% di scostamento di U rispetto a normativa)* Trasmittanza termica U (W/m²K) | Grado di trasformabilità | Fattore di correzione $X_{int}$ * | $P_{elem}$ *(% di miglioramento in base a $X_{int}$)* | Superficie finestrata rispetto all'involucro (%) | Fattore di correzione $X_{sup}$ ** | Esposizione prevalente | Fattore di correzione $X_{esp}$ ** | $P_{corr}$ CONTRIBUTO PONDERATO CHE L'ELEMENTO DÀ AL MIGLIORAMENTO COMPLESSIVO DELL'INVOLUCRO | |
| | | | | Molto alto *(intervento completo)* | 1 | 62% | > 40% | 1 | Sud | 1 | > 50% | Molto alto |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | Sud-est, Sud-ovest | 0.8 | 36/50% | Alto |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | Est | 0.5 | 21/35% | Medio |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | Ovest | 0.5 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | Nord | 0.2 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | Alto *(intervento leggermente limitato)* | 0.8 | 49.6 % | > 40% | 1 | Sud | 1 | 36/50% | Alto |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | Sud-est, Sud-ovest | 0.8 | 21/35% | Medio |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | Est | 0.5 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | Ovest | 0.5 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | Nord | 0.2 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | Medio *(intervento parziale)* | 0.6 | 37.2 % | > 40% | 1 | Sud | 1 | 36/50% | Alto |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | Sud-est, Sud-ovest | 0.8 | 21/35% | Medio |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | Est | 0.5 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | Ovest | 0.5 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | Nord | 0.2 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | Basso *(intervento molto limitato)* | 0.4 | 24.8 % | > 40% | 1 | Sud | 1 | 21/35% | Medio |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | Sud-est, Sud-ovest | 0.8 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | Est | 0.5 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | Ovest | 0.5 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | Nord | 0.2 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | Nessuno *(elemento vincolato)* | 0.2 | 12.4 % | > 40% | 1 | Sud | 1 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | Sud-est, Sud-ovest | 0.8 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | Est | 0.5 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | Ovest | 0.5 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | Nord | 0.2 | 0/10% | Nessuno |

*Tabella 48. La tabella mostra la trasmittanza termica e i fattori di correzione relativi a interventi su chiusure trasparenti, considerando la possibilità di intervento, la superficie finestrata e l'esposizione, per valutare il contributo di ogni elemento al miglioramento energetico dell'involucro.*

| INDICATORI PRESTAZIONALI – CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **ELEMENTO** | **TRASMITTANZA** | | | **FATTORI DI CORREZIONE** | | | | | | | **RISULTATI** | |
| | | | | Possibilità di intervento | | | Superficie interessata | | Esposizione | | | |
| Codice tipologia | Trasmittanza termica U ($W/m^2K$) | Trasmittanza termica di riferimento $U_{rif}$ ($W/m^2K$) | ΔU% *(% di scostamento di U rispetto a normativa)* Trasmittanza termica U ($W/m^2K$) | Grado di trasformabilità | Fattore di correzione $X_{int}$ * | $P_{elem}$ *(% di miglioramento in base a $X_{int}$)* | Superficie considerata rispetto all'involucro (%) | Fattore di correzione $X_{sup}$ ** | Esposizione prevalente | Fattore di correzione $X_{esp}$ ** | $P_{corr}$ CONTRIBUTO PONDERATO CHE L'ELEMENTO DÀ AL MIGLIORAMENTO COMPLESSIVO DELL'INVOLUCRO | |
| | | | | Molto alto *(intervento completo)* | 1 | 62% | > 40% | 1 | Sud | 1 | > 50% | Molto alto |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | Sud-est, Sud-ovest | 0.8 | 36/50% | Alto |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | Est | 0.5 | 21/35% | Medio |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | Ovest | 0.5 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | Nord | 0.2 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | Alto *(intervento leggermente limitato)* | 0.8 | 49.6 % | > 40% | 1 | Sud | 1 | 36/50% | Alto |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | Sud-est, Sud-ovest | 0.8 | 21/35% | Medio |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | Est | 0.5 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | Ovest | 0.5 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | Nord | 0.2 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | Medio *(intervento parziale)* | 0.6 | 37.2 % | > 40% | 1 | Sud | 1 | 36/50% | Alto |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | Sud-est, Sud-ovest | 0.8 | 21/35% | Medio |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | Est | 0.5 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | Ovest | 0.5 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | Nord | 0.2 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | Basso *(intervento molto limitato)* | 0.4 | 24.8 % | > 40% | 1 | Sud | 1 | 21/35% | Medio |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | Sud-est, Sud-ovest | 0.8 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | Est | 0.5 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | Ovest | 0.5 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | Nord | 0.2 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | Nessuno *(elemento vincolato)* | 0.2 | 12.4 % | > 40% | 1 | Sud | 1 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | Sud-est, Sud-ovest | 0.8 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | Est | 0.5 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | Ovest | 0.5 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | Nord | 0.2 | 0/10% | Nessuno |

*Tabella 49. La tabella mostra la trasmittanza termica e i fattori di correzione relativi a interventi sulle chiusure opache verticali, considerando la possibilità di intervento, la superficie considerata rispetto all'intero involucro e l'esposizione, per valutare il contributo di ogni elemento al miglioramento energetico del manufatto.*

| INDICATORI PRESTAZIONALI – CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **ELEMENTO** | **TRASMITTANZA** | | | **FATTORI DI CORREZIONE** | | | | | | **RISULTATI** |
| | | | | Possibilità di intervento | | | Superficie interessata | | | |
| Codice tipologia | Trasmittanza termica U ($W/m^2K$) | Trasmittanza termica di riferimento $U_{rif}$ ($W/m^2K$) | $\Delta U\%$ *(% di scostamento di U rispetto a normativa)* Trasmittanza termica U ($W/m^2K$) | Grado di trasformabilità | Fattore di correzione $X_{int}$ * | $P_{elem}$ *(% di miglioramento in base a $X_{int}$)* | Superficie considerata rispetto all'intera copertura (%) | Fattore di correzione $X_{sup}$ ** | $P_{corr}$ CONTRIBUTO PONDERATO CHE L'ELEMENTO DÀ AL MIGLIORAMENTO COMPLESSIVO DELL'INVOLUCRO | |
| | | | | Molto alto *(intervento completo)* | 1 | 62% | > 40% | 1 | > 50% | Molto alto |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | 36/50% | Alto |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | 21/35% | Medio |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | Alto *(intervento leggermente limitato)* | 0.8 | 49.6 % | > 40% | 1 | 36/50% | Alto |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | 21/35% | Medio |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | Medio *(intervento parziale)* | 0.6 | 37.2 % | > 40% | 1 | 36/50% | Alto |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | 21/35% | Medio |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | Basso *(intervento molto limitato)* | 0.4 | 24.8 % | > 40% | 1 | 21/35% | Medio |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | Nessuno *(elemento vincolato)* | 0.2 | 12.4 % | > 40% | 1 | 11/20% | Basso |
| | | | | | | | 25 / 40% | 0.8 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 15 / 25% | 0.6 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 5 / 15% | 0.4 | 0/10% | Nessuno |
| | | | | | | | 0 / 5% | 0.2 | 0/10% | Nessuno |

*Tabella 50. La tabella mostra la trasmittanza termica e i fattori di correzione relativi a interventi sulle chiusure opache orizzontali, considerando la possibilità di intervento, la superficie considerata rispetto all'intero involucro e l'esposizione, per valutare il contributo di ogni elemento al miglioramento energetico del manufatto.*

| Grado di trasformabilità | Fattore di riduzione $X_{int}$ | Descrizione |
|---|---|---|
| Molto alto | 1 | Si può intervenire liberamente. Potenziale di miglioramento prestazionale massimo. |
| Alto | 0.8 | Intervento significativo ma con alcune limitazioni conservativo-compatibili; la maggior parte delle azioni migliorative è però realizzabile. |
| Medio | 0.6 | Intervento parzialmente limitato. Potenziale di miglioramento prestazionale quasi dimezzato. |
| Basso | 0.4 | Intervento molto limitato. Solo azioni poco invasive o reversibili ammesse; potenziale prestazionale molto ridotto. |
| Nessuno | 0.2 | Pura conservazione. Nessun intervento di miglioramento prestazionale ammesso se non soluzioni minime e reversibili (es. schermature interne). |

*Tabella 51. La tabella illustra i diversi livelli di trasformabilità degli elementi edilizi, associati a un fattore di riduzione (Xint) che indica la possibilità di intervento e il potenziale di miglioramento prestazionale, da "molto alto" (interventi liberi e massimi miglioramenti) a "nessuno" (solo conservazione e interventi minimi reversibili).*

### 4.3 Matrice di efficacia energetico-patrimoniale

La definizione di efficacia degli interventi di efficientamento energetico negli edifici storici si fonda sull'equilibrio tra due fattori principali: il potenziale di risparmio energetico associato alla misura proposta e il grado di trasformabilità dell'elemento edilizio interessato, direttamente correlato alla sua valenza storico-architettonica.
La efficacia ideale si verifica quando il potenziale di risparmio energetico è elevato e la valenza storico-artistica dell'elemento è ridotta o nulla, poiché in tali casi il grado di trasformabilità è alto o molto alto e l'intervento consente un significativo miglioramento prestazionale senza compromettere i valori patrimoniali del bene. Al contrario, quando la valenza storica è molto alta, il grado di trasformabilità risulta minimo e gli interventi dovranno limitarsi a soluzioni conservative o reversibili, privilegiando strategie di controllo passivo e di riduzione dei fabbisogni piuttosto che modifiche dirette delle strutture o dei materiali.
La matrice che segue (Tabella 52) consente di visualizzare, attraverso l'incrocio dei due parametri, le condizioni di maggiore o minore efficacia, supportando le scelte progettuali verso un equilibrio coerente tra efficienza energetica e tutela del patrimonio.

| MATRICE DI EFFICACIA DEGLI INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO (E) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **$P_{corr}$ → Valenza storica. ↓** | **Molto alto** | **Alto** | **Medio** | **Basso** | **Nessuno** |
| **Molto alta** *(grado di trasformabilità nullo)* | Bassa | Nessuna | Nessuna | Nessuna | Nessuna |
| **Alta** *(grado di trasformabilità storica basso)* | Bassa | Bassa | Nessuna | Nessuna | Nessuna |
| **Media** *(grado di trasformabilità medio)* | Media | Media | Bassa | Nessuna | Nessuna |
| **Bassa** *(grado di trasformabilità alto)* | Molto alta | Alta | Media | Bassa | Nessuna |
| **Nulla** *(grado di trasformabilità molto alto)* | Molto alta | Molto alta | Alta | Media | Nessuna |

*Tabella 52. La matrice combina il potenziale miglioramento prestazionale con la valenza storica degli elementi.*

| MATRICE DI COMPATIBILITA' - ELEMENTO | |
|---|---|
| **RISULTATI** | |
| Efficacia (E) | Note |
| Molto alta | Intervento fortemente raccomandato: garantisce un elevato potenziale di risparmio energetico e riguarda elementi non tutelati o privi di valore storico. |
| Alta | Intervento consigliato: elevato potenziale di risparmio e elemento con tutela limitata. |
| Media | Intervento possibile ma da valutare: potenziale di risparmio medio oppure elemento con valore storico da preservare. |
| Bassa | Intervento generalmente sconsigliato: elemento con alta valenza storica oppure potenziale di risparmio basso. |

| | |
|---|---|
| Nessuna | Intervento non giustificato: valore storico molto elevato o assenza di reale beneficio energetico. Ogni modifica comporterebbe un impatto incompatibile o privo di motivazione. |

*Tabella 53. Esempio di applicazione operativa dello strumento di valutazione: l'efficacia dell'intervento è determinata dall'incrocio tra potenziale di risparmio energetico e livello di tutela dell'elemento.*

## 4.4 La scelta degli interventi

A partire dagli esiti della tabella sulla efficacia energetico-patrimoniale (E), è stato possibile definire un sistema di indirizzamento che orienta la scelta tra differenti livelli di intervento, graduati in base al loro impatto energetico e conservativo. Questo passaggio costituisce il punto di raccordo tra la fase valutativa e la fase operativa, traducendo i risultati della matrice in linee di azione concrete e proporzionate. L'obiettivo è individuare un insieme di strategie d'intervento progressive, che spaziano da operazioni puramente conservative a soluzioni combinanti obiettivi energetici e di tutela, nel rispetto dei criteri di reversibilità e efficacia materica.
Per garantire un'applicazione mirata del metodo, sono state elaborate specifiche tabelle di indirizzamento per ciascun elemento dell'involucro edilizio — chiusure trasparenti (Tabella 54), chiusure opache verticali (Tabella 55), solaio di copertura (Tabella 56).

| SCELTA DELL'INTERVENTO - CHIUSURE TRASPARENTI | | |
|---|---|---|
| **Efficacia** | **Obiettivo** | **Possibili interventi** |
| Molto alta | Recupero funzionale e miglioramento energetico congiunto. | Sostituzione dell'intero infisso con un serramento moderno a elevate prestazioni, in assenza di valore storico. |
| Alta | Recupero funzionale con mantenimento dei caratteri originari. | Sostituzione dell'intero infisso con una replica fedele, realizzata con materiali e profili analoghi ma prestazioni migliorate. |
| Media | Tutela prioritaria con miglioramento limitato. | Sostituzione del vetro o delle sole ante battenti. |
| Bassa | Riduzione dei fabbisogni con soluzioni reversibili. | Trattamento del vetro originario (pellicole termoisolanti o trattamenti superficiali) o inserimento di un secondo serramento interno. |
| Nulla | Pura conservazione e monitoraggio. | Nessun intervento energetico. Manutenzione e controllo periodico; eventuali schermature esterne o interne non invasive. |

*Tabella 54. Possibili interventi sugli infissi in funzione della classe di efficacia.*

| SCELTA DELL'INTERVENTO - CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
|---|---|---|
| **Efficacia** | **Obiettivo** | **Possibili interventi** |
| Molto alta | Interventi ad alto rendimento energetico, dato il basso valore storico dell'elemento. Soluzioni ampiamente ammissibili in assenza di vincoli. | Qualsiasi intervento, compreso il cappotto esterno tradizionale. |
| Alta | Interventi energeticamente efficaci, ma con maggiore attenzione all'aspetto materico e visivo. | Cappotto interno; Intonaco termoisolante esterno o interno. |
| Media | Interventi con buon equilibrio tra miglioramento energetico e tutela. Ammissibili su murature interne o su facciate esterne secondarie. | Intonaco termoisolante esterno o interno. |
| Bassa | Interventi limitati e reversibili, con impatto ridotto e finalità prevalentemente di regolazione. | Intonaco termoisolante interno. |
| Nulla | Interventi non compatibili con la tutela: presenza di murature a vista, elementi decorativi o vincoli storici. Ammesse solo azioni conservative. | Nessun intervento energetico. Manutenzione e controllo periodico. |

*Tabella 55. Possibili interventi sui muri in funzione della classe di efficacia.*

| SCELTA DELL'INTERVENTO - CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI DI COPERTURA | | |
|---|---|---|
| **Efficacia** | **Obiettivo** | **Possibili interventi** |
| Molto alta | Contesto con bassa valenza storico-architettonica della copertura (manto non originario, già sostituito, o non di interesse). Sono ammissibili interventi fortemente prestazionali e trasformativi. | - Sostituzione del manto di copertura e inserimento di uno strato isolante all'estradosso;<br>- Eventuale integrazione di intercapedine ventilata sopra l'isolante. |
| Alta | Copertura con valore storico medio-basso, manto recuperabile ma non di particolare pregio. Sono ammessi interventi prestazionali importanti, non necessariamente mantenendo il manto originale. | - Recupero del manto di copertura e inserimento di uno strato isolante all'estradosso sotto i coppi;<br>- Recupero del manto e creazione di pacchetto isolante con intercapedine areata con aumento moderato della quota di copertura. |
| Media | Coperture con manto storico da preservare e interni non decorati o già alterati. Si privilegiano interventi sull'intradosso, senza modificare l'immagine esterna. | - Recupero del manto di copertura e inserimento di uno strato isolante all'intradosso; |
| Bassa | Coperture con elevata sensibilità formale o costruttiva, dove sono ammesse solo soluzioni leggere e reversibili, a ridotto spessore e minimo impatto estetico. | - Recupero del manto di copertura e inserimento di membrana traspirante + utilizzo di feltri sottili, isolanti multistrato o materiali ad alte prestazioni a basso spessore (MTF, aerogel, VIP) per migliorare le prestazioni senza variazioni significative di quota. |
| Nulla | Coperture ad altissima valenza storico-artistica (manti originali, strutture lignee decorate, elementi di pregio) o fortemente vincolate. Gli interventi energetici diretti non sono compatibili. | - Pura conservazione: recupero e manutenzione del manto esistente, consolidamento delle strutture;<br>- Miglioramento microclimatico tramite ventilazione del sottotetto (uso come "buffer termico"), monitoraggio termoigrometrico senza inserimento di strati isolanti aggiuntivi. |

*Tabella 56. Possibili interventi sulle coperture in funzione della classe di efficacia.*

## 5. INDICATORI DELLO STATO DI CONSERVAZIONE DELL'ELEMENTO

La valutazione dello stato di conservazione degli elementi edilizi è stata condotta attraverso un processo articolato su tre livelli di approfondimento, finalizzato a restituire una lettura sintetica ma oggettiva del quadro patologico e delle condizioni funzionali del manufatto.

### 5.1 Dettaglio delle patologie

La Tabella 57 riporta il dettaglio analitico delle patologie riscontrate, suddivise per categoria di danno specifica (es. cedimenti, infiltrazioni, distacchi, ossidazioni, ecc.). Per ciascuna categoria vengono valutati quattro parametri principali:

- **Diffusione del danno (%):** quantifica l'estensione areale o volumetrica del fenomeno.
- **Progressione del danno:** indica se la patologia è stabile, in evoluzione o in fase regressiva.
- **Causa del danno:** identifica il fattore scatenante o le concause del degrado (es. abbandono, rotture, uso incongruo dei materiali, scarsa manutenzione, aggressione ambientale).
- **Gravità del danno:** misura l'intensità e gli effetti prodotti sul piano strutturale, materico o funzionale.

La somma dei punteggi attribuiti a ciascun parametro restituisce il totale parziale di patologia, che rappresenta il livello di criticità della singola categoria di danno. Il valore complessivo delle patologie (somma di tutti i totali parziali) può variare da 0 a 135, corrispondendo al passaggio da un quadro conservativo integro a uno fortemente compromesso.

| DETTAGLIO ANALITICO DELLE PATOLOGIE | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Categoria di danno specifica** | | **Diffusione del danno (%)** | | **Progressione del danno** | | **Causa del danno** | | **Gravità del danno** | | **Totale patologie** |
| Cedimenti / danni strutturali o meccanici | 10 | Da 0 al 10% | 0 | Si | 2 | Abbandono | 6 | Molto alta | 4 | 0 |
| Infiltrazioni / risalita / ristagni | 8 | Dal 10 al 30% | 1 | Parziale | 1 | Rotture accidentali | 5 | Alta | 3 | |
| Distacchi / lacune / mancanze / fessurazioni | 6 | Dal 30 al 50% | 2 | No | 0 | Trasformazioni incongrue | 4 | Media | 2 | |
| Ossidazioni / corrosioni / erosioni / esfoliazioni | 5 | Oltre il 50% | 3 | | | Uso incongruo dei materiali | 3 | Bassa | 1 | |
| Microflore / macroflore / attacchi chimici / marcescenze | 4 | 100% | 4 | | | Mancata/scarsa manutenzione | 2 | Nessuna | 0 | |
| Incrostazioni / depositi | 3 | | | | | Aggressione ambientale | 1 | | | |
| Degradi di origine antropica / vandalismi | 2 | | | | | Nessuna | 0 | | | |
| Alterazioni non patologiche (es. alterazioni cromatiche) | 1 | | | | | | | | | |

*Tabella 57. La tabella riporta il dettaglio analitico delle principali categorie di danno rilevate al fine di determinare il punteggio totale di patologia per ciascun fenomeno. Tale valore contribuisce alla definizione dello stato di conservazione complessivo dell'elemento e alla conseguente urgenza dell'intervento.*

## 5.2 Macro valutazione

La Tabella 58 fornisce una valutazione sintetica a scala di elemento, integrando le informazioni derivanti dall'analisi patologica.
La macro valutazione considera la condizione complessiva dell'elemento o del componente costruttivo in relazione a tre fattori principali:

- **Lacuna o assenza**: presenza di mancanze o perdite significative del materiale o della funzione.
- **Inefficienza funzionale e/o meccanica**: perdita parziale o totale della capacità strutturale, protettiva o d'uso.
- **Componenti**: grado di compromissione generale o rischio di perdita dell'elemento.

A ciascuna condizione è associato un punteggio predefinito che consente di ottenere il totale di macro valutazione. Il punteggio massimo conseguibile è 90, corrispondente a un elemento gravemente compromesso, con inefficienza materiale e funzionale.

| MACROVALUTAZIONE | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Componenti** *(più opzioni selezionabili)* | | **Lacuna / assenza** | | **Ineff. funzionale e/o meccanica** | | **Totale macro valutazione** |
| Compromissione generale e rischio perdita | 40 | Si | 20 | Si | 20 | 0 |
| Compromissione strutturale | 30 | Parziale | 10 | Parziale | 10 | |
| Fenomeni di umidità e/o degrado di grave entità | 20 | No | 0 | No | 0 | |
| Fenomeni di umidità e/o degrado di lieve entità | 10 | | | | | |
| Non compromesso | 0 | | | | | |

*Tabella 58. La tabella riporta una valutazione sintetica delle condizioni complessive dell'elemento edilizio. Il punteggio ottenuto, sommato a quello derivante dall'analisi delle patologie, concorre alla determinazione dello stato di conservazione complessivo.*

## 5.3 Classi stato di conservazione

Il punteggio complessivo viene poi interpretato attraverso una scala di classificazione per range, che suddivide i risultati in cinque classi di stato di conservazione. Queste classi descrivono il passaggio progressivo da una condizione di elemento non compromesso, privo di criticità significative, fino a uno stato di grave compromissione, caratterizzato da patologie diffuse e da un elevato rischio strutturale o di perdita materiale.
Tale classificazione consente di disporre di uno strumento comparabile e oggettivo per individuare le priorità d'intervento e orientare le scelte di conservazione e manutenzione (Tabella 59).

| STATO DI CONSERVAZIONE E URGENZA DELL'INTERVENTO | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Classe** | **Range** | **% sul totale** | **Note** | **Urgenza intervento (U)** |
| Non compromesso / Ottimo | 0 - 34 | 0 - 15% | Quadro conservativo buono; patologie assenti o lievi. L'intervento non è necessario. | Urgenza nulla (U = 1) |
| Buono / Lievi criticità | 35 – 79 | 16 – 35% | Degradi localizzati o fenomeni iniziali, bassa progressione. Monitoraggio e manutenzione. | Urgenza bassa (U = 2) |
| Discreto / Criticità moderate | 80 - 124 | 36–55% | Patologie diffuse, ma gli interventi sono programmabili. | Urgenza media (U = 3) |
| Scadente / Alte criticità | 125 – 169 | 56–75% | Degradi estesi o in progressione; richiesto intervento prioritario. | Urgenza alta (U = 4) |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Gravemente compromesso | 170 - 225 | 76–100% | Elemento gravemente compromesso, richiesto intervento immediato. | Urgenza molto alta (U = 5) |

*Tabella 59. La tabella riporta la classificazione dello stato di conservazione degli elementi edilizi. All'aumentare del punteggio cresce la gravità del degrado e, di conseguenza, la necessità di un intervento più tempestivo.*

## 5.4 Priorità degli interventi

La Tabella 60 sintetizza gli esiti del processo di correlazione tra il livello di urgenza (U), derivato dallo stato di conservazione dell'elemento, e il grado di efficacia (E), ottenuto dalla matrice. L'incrocio di questi due parametri consente di individuare la tipologia di intervento più appropriata — combinato, conservativo con miglioramento limitato o esclusivamente di tutela — e di definirne la priorità temporale.
Il sistema mira a garantire un equilibrio tra necessità conservative e obiettivi di efficientamento energetico, favorendo l'adozione di soluzioni compatibili con il valore storico e materico degli elementi analizzati. In tal modo, la tabella costituisce uno strumento operativo di supporto decisionale, utile per orientare la pianificazione degli interventi in funzione della loro urgenza, efficacia e ammissibilità.

| PRIORITA' DEGLI INTERVENTI | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Stato di conservazione e urgenza intervento | | Efficacia energetico-patrimoniale | | Tipo di intervento | Descrizione |
| U=5 *Urgenza molto alta* | Elemento gravemente compromesso, intervento immediato | E= 4-5 *efficacia alta o molto alta* | Intervento fortemente raccomandato: garantisce un elevato potenziale di risparmio energetico e riguarda elementi non tutelati o privi di valore storico. | Immediato urgente combinato | L'intervento è fortemente raccomandato: l'elemento presenta elevata urgenza conservativa e l'azione è pienamente compatibile sia dal punto di vista energetico che patrimoniale. È necessario intervenire tempestivamente con una strategia integrata che affronti congiuntamente le criticità conservative e il miglioramento prestazionale. |
| | | E= 3–2 *efficacia media o bassa* | Intervento possibile ma da valutare: potenziale di risparmio medio oppure elemento con valore storico da preservare. | Immediato conservativo con miglioramento limitato | L'elemento presenta un'elevata urgenza conservativa, ma una efficacia energetica solo media. L'intervento deve concentrarsi prioritariamente sulla messa in sicurezza e sul recupero materico, integrando solo misure di miglioramento energetico limitate e compatibili con i valori storici. |
| | | E= 1 *efficacia nulla* | Intervento energetico non giustificato: valore storico molto elevato o assenza di reale beneficio energetico | Immediato conservativo con energy veto | L'elemento si trova in condizioni critiche e richiede un intervento urgente, ma possiede un'elevata valenza storico-architettonica che esclude qualsiasi azione di efficientamento energetico. L'intervento dovrà quindi limitarsi alla conservazione e al consolidamento. |
| U=4 *Urgenza alta* | Elemento con alte criticità, intervento prioritario | E= 4-5 *efficacia alta o molto alta* | Intervento fortemente raccomandato: garantisce un elevato potenziale di risparmio energetico e riguarda elementi non tutelati o privi di valore storico. | Prioritario combinato | Intervento consigliato a breve termine: l'urgenza è elevata e la efficacia energetico-patrimoniale è alta. Prevedere un pacchetto integrato che affronti congiuntamente le criticità conservative e il miglioramento prestazionale. |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | E = 3–2 *efficacia media o bassa* | Intervento possibile ma da valutare: potenziale di risparmio medio oppure elemento con valore storico da preservare. | Prioritario conservativo con miglioramento limitato | L'elemento presenta un'elevata urgenza di intervento, ma una efficacia energetica solo media. Le azioni devono concentrarsi principalmente sugli aspetti conservativi, integrando eventualmente misure di efficientamento puntuali e reversibili. |
| | | E = 1 *efficacia nulla* | Intervento non giustificato: valore storico molto elevato o assenza di reale beneficio energetico. | Prioritario conservativo con energy veto | L'elemento richiede un intervento prioritario per ragioni conservative, ma la efficacia energetica è nulla. Sono ammesse esclusivamente operazioni di tutela, consolidamento e manutenzione straordinaria, escludendo qualsiasi intervento di efficientamento che possa compromettere i valori storico-architettonici o l'autenticità del bene. |
| U=3 *Urgenza media* | Elemento con criticità moderate, intervento programmabile | E = 4-5 *efficacia alta o molto alta* | Intervento fortemente raccomandato: garantisce un elevato potenziale di risparmio energetico e riguarda elementi non tutelati o privi di valore storico. | Programmabile combinato | L'elemento presenta un'urgenza moderata e un'elevata efficacia energetico-patrimoniale. L'intervento è energeticamente vantaggioso, ma non urgente; può essere pianificato nel medio periodo adottando soluzioni coordinate che uniscano miglioramento prestazionale e manutenzione. |
| | | E = 3–2 *efficacia media o bassa* | Intervento possibile ma da valutare: potenziale di risparmio medio oppure elemento con valore storico da preservare. | Programmabile conservativo con miglioramento limitato | L'elemento presenta un livello di urgenza medio e una efficacia energetica moderata. L'intervento può essere programmato nel medio periodo, privilegiando azioni conservative e manutentive, eventualmente integrate con miglioramenti energetici puntuali e reversibili, senza alterare i valori storici e materici dell'edificio. |
| | | E = 1 *efficacia nulla* | Intervento non giustificato: valore storico molto elevato o assenza di reale beneficio energetico. | Programmabile conservativo con energy veto | L'elemento mostra un'urgenza media ma un'elevata valenza storico-architettonica che rende non compatibili interventi di efficientamento energetico. Le azioni dovranno concentrarsi esclusivamente sulla conservazione. |
| U=2 *Urgenza bassa* | Elemento con lievi criticità, intervento manutentivo | E = 4-5 *efficacia alta o molto alta* | Intervento fortemente raccomandato: garantisce un elevato potenziale di risparmio energetico e riguarda elementi non | Conservativo migliorativo programmabile | L'elemento presenta una bassa urgenza di intervento ma un'elevata efficacia energetico-patrimoniale. L'intervento è ammissibile e |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | tutelati o privi di valore storico. | | potenzialmente efficace dal punto di vista energetico, ma non prioritario. Può essere inserito in un piano di miglioramento a lungo termine. |
| | | E = 3–2 *efficacia media o bassa* | Intervento possibile ma da valutare: potenziale di risparmio medio oppure elemento con valore storico da preservare. | Conservativo con miglioramento limitato programmabile | L'elemento presenta una bassa urgenza e una efficacia energetica media. L'intervento non è prioritario e potrà essere previsto solo in ottica di manutenzione programmata, privilegiando azioni conservative e miglioramenti prestazionali di lieve entità. |
| | | E = 1 *efficacia nulla* | Intervento non giustificato: valore storico molto elevato o assenza di reale beneficio energetico. | Conservativo con energy veto | L'elemento si trova in buone condizioni e possiede un'elevata valenza storico-architettonica, che esclude qualunque intervento di efficientamento energetico. Non è necessario alcun intervento prestazionale; si raccomanda esclusivamente la conservazione dello stato attuale, con attività di monitoraggio e manutenzione ordinaria. |
| U=1 *Urgenza nulla* | Elemento non compromesso / in ottime condizioni | E = 4-5 *efficacia alta o molto alta* | Intervento fortemente raccomandato: garantisce un elevato potenziale di risparmio energetico e riguarda elementi non tutelati o privi di valore storico. | Migliorativo programmabile | Intervento energetico ammissibile e fortemente vantaggioso, ma senza urgenza conservativa. Può essere pianificato nel medio-lungo periodo. |
| | | E = 3–2 *efficacia media o bassa* | Intervento possibile ma da valutare: potenziale di risparmio medio oppure elemento con valore storico da preservare. | Combinato | L'elemento si trova in buone condizioni e non presenta urgenze conservative. La efficacia energetica è media, pertanto l'intervento non è prioritario ma può essere valutato. |
| | | E = 1 *efficacia nulla* | Intervento non giustificato: valore storico molto elevato o assenza di reale beneficio energetico. | Nessuna azione | L'elemento è in buono stato e presenta alta valenza storico-architettonica. Non si giustifica alcun intervento energetico; si raccomanda solo la conservazione dello stato attuale e il monitoraggio periodico. |

*Tabella 60. La tabella riassume le strategie d'intervento derivate dall'incrocio tra urgenza (U) e efficacia energetico-patrimoniale (E). Per ciascuna combinazione U–C sono indicate la tipologia d'intervento e la relativa priorità, al fine di bilanciare esigenze conservative e obiettivi di efficientamento energetico.*

## 6. VALUTAZIONE CRITICA DEI LIMITI DEL METODO

L'approccio metodologico adottato per il rilievo dei compendi oggetto di studio ha consentito di acquisire un quadro conoscitivo articolato e multidimensionale, fondato sull'integrazione di rilievi diretti, fotogrammetrici e topografici. Tuttavia, nonostante l'efficacia complessiva del processo, permangono alcune criticità che ne limitano la piena applicabilità e che è opportuno evidenziare in una prospettiva valutativa. Tali limiti riguardano principalmente i tempi operativi, l'interoperabilità tra i diversi ambienti software, il livello di standardizzazione delle procedure e alcuni vincoli tecnologici legati alla natura degli strumenti impiegati.

### 6.1 Tempi operativi e condizioni al contorno

Il primo ambito critico riguarda i tempi necessari per l'esecuzione e la successiva elaborazione dei rilievi. La natura ibrida del metodo richiede una pianificazione accurata, sia per le riprese fotogrammetriche — fortemente dipendenti da condizioni ambientali favorevoli — sia per il rilievo diretto, spesso rallentato da ostacoli fisici, spazi di difficile accesso o scarsa illuminazione. A queste difficoltà si aggiunge il tempo necessario per la selezione delle immagini, la creazione delle nuvole di punti e la verifica della coerenza geometrica dei dataset, operazioni che incidono significativamente sulle tempistiche complessive.
A queste considerazioni si sommano i tempi rilevanti della fase di analisi crono-tipologica. La digitalizzazione della cartografia storica e dei documenti d'archivio, caratterizzati da formati eterogenei e condizioni conservative variabili, richiede acquisizioni ad alta risoluzione e una fase preliminare di editing. Anche la sovrapposizione tra cartografia storica e rilievo dello stato attuale comporta tempi significativi, dovuti all'allineamento digitale, alla ricerca delle corrispondenze e alla verifica delle deformazioni, spesso influenzati dalla qualità delle fonti storiche. In assenza di datazioni certe, l'analisi comparativa richiede ulteriori approfondimenti interpretativi basati su verifiche incrociate.
L'applicazione del metodo Raumbuch garantisce una sistematizzazione rigorosa nella catalogazione e analisi degli elementi costruttivi, ma richiede una dettagliata scomposizione dell'edificio dal livello generale al singolo componente. La raccolta, l'inserimento e la verifica dei dati, unitamente alla codifica univoca e alla compilazione delle schede strutturate, risultano particolarmente dispendiosi in termini di tempo, soprattutto nei complessi edilizi estesi e stratificati tipici del patrimonio militare.
Analogamente, l'introduzione e l'applicazione dei descrittori tematici per la codifica della fabbrica comportano un impegno operativo significativo. La molteplicità dei parametri da analizzare richiede una raccolta dati attenta, una verifica incrociata e una compilazione precisa, attività che si protraggono nel tempo soprattutto per strutture complesse e stratificate. Inoltre, la natura multidisciplinare dei descrittori — che spaziano dall'analisi storico-archivistica, alla valutazione energetica fino alla catalogazione tecnico-prestazionale e strutturale — impone la collaborazione di diverse figure professionali, con conseguenti tempi aggiuntivi per la coordinazione, l'allineamento metodologico e l'integrazione dei dati specialistici.
Questa complessità si riflette anche nella fase successiva di creazione del modello HBIM, che presenta criticità temporali significative legate alle operazioni di modellazione e gestione dei dati. In particolare, la costruzione delle librerie digitali personalizzate, con la definizione dettagliata di stratigrafie e parametri tecnici per muri, solai e infissi, richiede un impegno consistente, soprattutto quando si tratta di materiali storici non presenti nelle librerie standard. La modellazione parametrica e la corretta definizione dei locali in Revit, necessarie per un'analisi accurata, richiedono tempi importanti. Anche la configurazione e l'uso degli abachi per il controllo e l'estrazione dei dati, pur essendo strumenti fondamentali, comportano un'attività continua di verifica.
Infine, anche la fase di modellazione energetica si caratterizza per un elevato livello di complessità e richiede tempi operativi significativi. Dopo la definizione del modello virtuale, la preparazione del sistema informativo per la simulazione comporta una serie di passaggi meticolosi e articolati, indispensabili per garantire accuratezza e coerenza dei dati. La raccolta e l'inserimento dei dati climatici, la corretta localizzazione e classificazione delle zone termiche, nonché la definizione puntuale degli elementi edilizi e degli impianti, sono operazioni che richiedono un'attenta pianificazione e un'attività continua di verifica e correzione. L'analisi dei consumi reali, basata sulla raccolta e la sistematizzazione delle bollette energetiche, integra e convalida la simulazione numerica, ma aggiunge ulteriore complessità operativa legata alla gestione e interpretazione di dati spesso frammentari o non immediatamente riconducibili agli ambienti modellati.

In conclusione, la complessità e la molteplicità delle fasi coinvolte nel processo di rilievo, analisi e modellazione rappresentano il principale fattore limitante in termini di tempi operativi. La necessità di garantire accuratezza,

integrazione e coerenza tra dati di diversa natura e provenienza impone una gestione attenta e articolata delle attività, con inevitabili impatti sui tempi complessivi di progetto. Questi aspetti, seppur sfidanti, risultano imprescindibili per assicurare risultati affidabili e una conoscenza approfondita degli edifici studiati, evidenziando al contempo l'importanza di un continuo sviluppo e affinamento delle metodologie e degli strumenti impiegati.

### 6.2 Limiti conoscitivi del rilievo e margini di soggettività

Nel processo metodologico adottato, il rilievo è stato condotto attraverso una combinazione di rilievo fotogrammetrico, rilievo diretto e analisi crono-tipologica, con l'obiettivo di acquisire una rappresentazione dettagliata e multidimensionale dello stato di fatto degli edifici. Questa integrazione consente di raccogliere dati geometrici e informativi precisi relativi alle superfici e alle strutture accessibili. Tuttavia, il rilievo così eseguito presenta limiti intrinseci: documenta infatti solo le condizioni visibili e accessibili al momento dell'acquisizione, senza la possibilità di investigare aspetti nascosti o interni, come la presenza di vuoti, difetti strutturali interni o fenomeni termo-igrometrici che non si manifestano superficialmente.
In particolare, nel contesto degli edifici militari oggetto di studio, si è riscontrata una limitazione significativa dovuta all'inaccessibilità di alcune aree interne. Restrizioni di sicurezza o vincoli di riservatezza hanno impedito di accedere a tutti gli ambienti, rendendo impossibile effettuare rilievi fotografici o indagini strumentali in alcuni spazi chiusi. Questa inaccessibilità riduce la completezza del rilievo e genera lacune informative che possono influenzare la comprensione complessiva dello stato conservativo e funzionale della struttura.
Inoltre, pur facendo riferimento a normative consolidate come la UNI 11182:2006 per la classificazione dei fenomeni di degrado, le fasi di interpretazione e lettura delle superfici rimangono caratterizzate da un certo grado di soggettività. La qualità delle immagini acquisite, le condizioni di illuminazione durante il rilievo, la presenza di superfetazioni biologiche o di alterazioni superficiali compromettono la chiarezza e la precisione nell'individuazione e nella classificazione di materiali e fenomeni di degrado. Ciò richiede un costante lavoro di calibrazione e revisione dei criteri interpretativi adottati, oltre a un impegno continuo per uniformare codici grafici e categorie all'interno delle tavole tematiche "architettonico", "materico" e "degrado". Questa uniformazione è fondamentale per ridurre le discrepanze e aumentare l'affidabilità dei risultati ottenuti, soprattutto in strutture complesse e stratificate come quelle militari.
Per ovviare a tali limiti e ottenere un quadro conoscitivo più completo ed esaustivo, il rilievo così condotto deve necessariamente essere integrato con ulteriori approfondimenti, quali analisi diagnostiche strumentali (ad esempio carotaggi, termografie, prove non distruttive), studi storici documentali e indagini specialistiche. Solo attraverso questa combinazione multidisciplinare è possibile raggiungere un livello di conoscenza dettagliato e affidabile, indispensabile per pianificare efficacemente interventi di conservazione, manutenzione e gestione del patrimonio.

### 6.3 Interoperabilità dei dati e limiti degli ambienti software

Un'ulteriore criticità rilevante riguarda la gestione dei dati acquisiti e, in particolare, la loro interoperabilità tra i diversi software utilizzati nel processo. Il passaggio da piattaforme fotogrammetriche a programmi CAD, e successivamente a software orientati alla modellazione informativa e al processamento dei dati, comporta inevitabili trasformazioni dei file che possono causare perdite di dettaglio, necessità di semplificazioni e interventi manuali di riallineamento. Questa complessità è accentuata dalla mancanza di standard universalmente condivisi tra gli strumenti di rilievo e i software di modellazione, rendendo spesso difficile mantenere precisione e leggibilità negli elaborati finali.
In questo contesto, il formato IFC (Industry Foundation Classes) rappresenta uno degli standard aperti più diffusi per favorire lo scambio di modelli BIM tra piattaforme diverse. Tuttavia, l'effettiva interoperabilità attraverso l'IFC richiede competenze tecniche specifiche per gestire correttamente l'esportazione dai programmi BIM Authoring — come Revit, ad esempio — verso software di processing specializzati, come quelli utilizzati per la modellazione energetica. Solo un'attenta gestione di questo passaggio consente di trasferire in modo coerente geometrie, materiali, proprietà tecniche e parametri energetici, fondamentali per sviluppare ulteriori prodotti digitali, come l'Attestato di Prestazione Energetica (APE). Senza tali competenze, si rischia di dover intervenire con correzioni manuali o ricostruzioni parziali, con conseguente aumento dei tempi di lavorazione e possibili incoerenze tra i diversi output digitali.

# PARTE III | I CASI DI STUDIO

## 1. LA CASERMA RIVA VILLASANTA

### 1.1 Metodi e strumenti di analisi e documentazione

Il presente capitolo, richiamando il processo metodologico adottato, ha l'obiettivo di analizzare lo stato di fatto del compendio al fine di avere una solida base di conoscenza che permetta di ricostruire il suo comportamento tecnico/funzionale. Si tratta di una parte chiave della ricerca che ha richiesto l'uso di un approccio altamente multidisciplinare in quanto le analisi effettuate afferiscono a diversi settori tecnico/disciplinari. In sintesi, sono stati valutati aspetti relativi all'analisi storico/archivistica e documentale, all'analisi cronotipologica delle fasi costruttive e delle successive modificazioni, all'analisi morfologica e dimensionale, all'analisi e alla caratterizzazione degli elementi costruttivi, della loro consistenza e dei rispettivi livelli di performance, all'analisi tecnico prestazionale e impiantistica e, all'analisi compositiva e distributiva.
La comprensione di questi aspetti è essenziale per una comprensione accurata e sistematica dell'edificio e delle sue modifiche nel tempo in funzione della successiva operazione di promozione di progetti di efficientamento energetico "esemplari" dal punto di vista delle prestazioni energetiche ottenibili, delle peculiarità esecutive procedurali, nonché della valenza storico artistica dell'immobile studiato.

#### 1.1.1 L'analisi storico documentale e le fonti archivistiche militari

Cagliari, come molte città costiere del Mediterraneo, conserva un tessuto urbano ricco e stratificato, nel quale la presenza delle fortificazioni militari ha avuto un ruolo determinante. Le difese della città, modellate dagli Spagnoli a partire dal Cinquecento e successivamente ampliate dai Savoia nel Settecento, hanno segnato profondamente la morfologia urbana (Pirinu, Sanna e Utzeri 2020). Con la progressiva perdita di funzione difensiva dei bastioni, a metà Ottocento le caserme divengono i nuovi poli militari, sostituendo progressivamente il sistema murario ormai percepito come ostacolo all'espansione cittadina. La perdita dello status di "città militare" sancita dai Regi Decreti del 1866 e del 1867 (Fiorino, 2021) avviò infatti il lento abbandono delle mura, segnando l'avvio di una nuova fase per le infrastrutture militari urbane.
Il contesto mediterraneo e le esigenze di modernizzazione dell'esercito dopo l'Unità (Botti 1988); (Del Negro 1988) portarono a un'intensa stagione di costruzione di caserme e complessi logistici, molti dei quali derivati dalla riconversione di beni ecclesiastici soppressi. In questo quadro, il promontorio di Sant'Elia e l'area del Poetto assunsero un ruolo strategico per la città e per il sistema difensivo del golfo: una posizione dominante, facilmente difendibile e logisticamente collegata, che si prestava a ospitare nuove grandi strutture. Già dalla Prima guerra mondiale l'area si caratterizzava come nodo di concentrazione militare, densamente occupato da presidi, fortini e complessi casermali (Fiorino, 2021).

È in questo scenario che si collocano la Caserma Mereu (1932), la Caserma Monfenera/Funzionale A (anni '40) e la Caserma Riva Villasanta/Funzionale B, edificata tra il 1930 e il 1940. Quest'ultima, in particolare, ebbe un ruolo rilevante anche nel dopoguerra: tra il 1946 e il 1962 fu concessa al Comune di Cagliari per ospitare gli sfollati dopo i bombardamenti del 1943, che avevano colpito duramente il capoluogo. Negli anni successivi la struttura fu più volte oggetto di trattative tra Comune e Amministrazione militare per la restituzione e il ripristino, fino al rientro definitivo nelle disponibilità dell'Esercito a metà anni Sessanta.
Le vicende storiche della Caserma Riva Villasanta sono state ricostruite grazie a un lavoro sistematico di analisi archivistica, condotto presso l'Archivio del 14° Reparto Infrastrutture, tuttora ospitato all'interno del complesso. Tale patrimonio documentale si configura come una risorsa fondamentale per la comprensione della genesi e delle trasformazioni delle architetture militari del Novecento. Tuttavia, presenta criticità che rispecchiano i problemi storicamente associati agli archivi militari italiani: ordinamenti disomogenei, carenze di personale specializzato e pratiche conservative non uniformi (Casanova, 1966).

Il fondo documentario del 14° Reparto conserva oggi due tipologie principali di materiali:

- **Iconografici**, costituiti da lucidi e rilievi storici, in larga parte privi di datazione ma fondamentali per la comprensione della fase progettuale e delle varianti costruttive.

- **Documentali**, comprendenti atti di consegna, carteggi, verbali, progetti e computi metrici (1923–2004), che hanno consentito di ricostruire le fasi principali della vita della caserma.

L'analisi della documentazione ha consentito di delineare una cronologia attendibile, evidenziando il ruolo cruciale svolto dalla Caserma Riva Villasanta nel difficile dopoguerra. Tra il 1946 e il 1962 il complesso fu interamente concesso all'amministrazione comunale di Cagliari, che lo destinò ad accogliere gli sfollati. La città, colpita duramente dai devastanti bombardamenti del 27 e 28 febbraio e del 13 maggio 1943, si trovava infatti in condizioni drammatiche: gran parte del tessuto edilizio era stato distrutto o reso inagibile, e migliaia di cittadini erano rimasti senza casa. In questo contesto, la caserma divenne una risorsa fondamentale per fronteggiare l'emergenza abitativa e garantire un rifugio alle fasce più vulnerabili della popolazione.
Dei circa 7.000 edifici presenti prima della guerra, ben 2.500 (circa il 36%) riportarono danni gravi, costringendo la maggior parte dei cittadini a fuggire. Mentre la borghesia medio-alta, proprietaria di case e terreni nell'entroterra, riuscì a trovare sistemazioni più adeguate, molti altri cagliaritani furono relegati in alloggi di fortuna decisi dal Comune. Tra queste soluzioni vi erano proprio le caserme della zona di Is Mirrionis e di San Bartolomeo, che divennero rifugi temporanei per la popolazione più fragile (Santucciu, 2019).

Nel dettaglio, il 18 ottobre 1945 l'immobile di Riva Villasanta fu concesso in uso temporaneo al Comune di Cagliari per essere adattato ad alloggio per i senza tetto, con la clausola che l'Amministrazione Militare potesse richiederne in futuro la restituzione con messa in pristino dei locali, senza indennizzo per le opere eventualmente realizzate dal Comune. Successivamente, il 2 gennaio 1946, la struttura fu dismessa temporaneamente al Demanio dello Stato, con l'esclusione dei locali delle docce che rimasero in uso all'Amministrazione Militare (verbale del 20 marzo 1947).
Il 1° giugno 1949 fu poi regolarizzata una nuova concessione al Comune di Cagliari mediante consegna dell'intero immobile e contratto d'affitto.
Un ulteriore rinnovo avvenne il 2 maggio 1960, quando l'Intendenza di Finanza di Cagliari autorizzò nuovamente la concessione della caserma al Comune, con l'obbligo di lasciare liberi i locali a semplice richiesta scritta, senza apportare modifiche sostanziali e restituendo gli spazi nelle condizioni in cui si trovavano a partire dal novembre 1945. Nel 1961, sulla base della prima convenzione del '45, venne avviato un negozio giuridico che prevedeva la definitiva cessione al Comune di altri complessi (come la Caserma Monte Grappa, la Gioda e la Martinazzo), a fronte di un contributo economico da destinarsi al ripristino della Caserma Riva Villasanta, che sarebbe stata riconsegnata all'Amministrazione Militare sgombera entro il 1965.
Il 20 settembre 1965 venne redatto il verbale di constatazione d'uso dell'immobile, dal quale si evinceva che lo sgombero era stato completato pochi giorni prima (14 settembre 1965) e che il Comune aveva provveduto a murare gli accessi per prevenire occupazioni abusive. Lo stato complessivo della caserma appariva però mediocre: l'usura, gli agenti atmosferici e il recupero improprio di infissi e materiali ne avevano compromesso la qualità.

La vicenda proseguì con ulteriori passaggi: nel 1967 il Genio Militare della Sardegna segnalò la necessità di riacquisire la piena disponibilità del complesso per adeguarlo alle nuove esigenze dell'Esercito, mentre una successiva corrispondenza del 1968-69 tra i vertici militari e il Comune mise in evidenza criticità funzionali e questioni legali legate alla natura degli accordi di permuta, ritenuti non paritari e penalizzanti per l'Amministrazione Militare.
Oltre questa data è stato possibile conoscere, mediante i documenti reperiti all'interno dell'Archivio del sito di Riva Villasanta, ulteriori informazioni che consentono di ricostruire le vicissitudini che hanno interessato, in particolar modo, tre delle casermette che compongono il compendio. Alla data del 9 giugno 1987 risale infatti la documentazione relativa al progetto particolareggiato dei lavori di ristrutturazione delle casermette 3D e 2D, destinate all'accasermamento della 47ª Compagnia Trasmissioni, comprendente circa 300 unità fino ad allora dislocate in maniera precaria tra la Caserma Cascino e la Caserma Ederle.
Alla fine degli anni '80 le due strutture si presentavano in condizioni fortemente precarie, con soffitti in gran parte crollati, intonaci cadenti, infissi inutilizzabili, pavimentazioni usurate e assenza di impianti. L'intervento, finanziato all'interno del programma PLURAMM (02, CAP. 4005/87, n. 5) per un importo complessivo di 2,5 miliardi di Lire, comportò il rifacimento completo di murature, intonaci, solai, pavimenti, infissi e impianti, oltre alla realizzazione di nuovi servizi e alla riorganizzazione degli spazi in camerate, uffici, armerie e locali tecnici, così da ospitare in maniera stabile la Compagnia Trasmissioni.
Al 1986 risalgono invece i lavori di ristrutturazione della casermetta 3S, il cui assetto fu modificato per accogliere la nuova sede della Direzione di Amministrazione del C.R.M.SA., con interventi mirati al rifacimento degli intonaci, pavimenti, controsoffitti e impianti, nonché alla sostituzione degli infissi con nuovi elementi in alluminio anodizzato.

Accanto alla documentazione amministrativa, di particolare rilievo sono risultati gli elaborati grafici rinvenuti presso l'archivio del 14° Reparto Infrastrutture. In totale, sono stati recuperati circa novanta disegni, comprendenti planimetrie generali dell'intero compendio, planimetrie dei singoli manufatti, sezioni, prospetti e dettagli costruttivi di tutti i corpi di fabbrica della caserma. I disegni, sempre privi di firma e datazione, sono stati collocati cronologicamente grazie al confronto con la documentazione scritta e con le diverse intitolazioni assunte dal complesso nel tempo. Tra i materiali esaminati si segnalano, a titolo esemplificativo, le planimetrie generali che restituiscono l'intera articolazione del compendio e le rappresentazioni dei prospetti della palazzina comando e dei corpi di servizio, fondamentali per ricostruire le fasi originarie e le successive trasformazioni del complesso.

Questa sequenza di atti e concessioni dimostra come la Caserma Riva Villasanta sia stata al centro, per oltre vent'anni, di una complessa vicenda di usi civili e militari, oscillando tra funzione di accoglienza sociale e bene demaniale strategico, prima di essere definitivamente recuperata alle disponibilità dell'Esercito nella seconda metà degli anni Sessanta.

Attualmente, la Caserma Riva Villasanta continua a svolgere la sua funzione originaria come sede del Battaglione Gennargentu, ospitando anche il 14° Reparto Infrastrutture. Inserita in un più ampio contesto di architetture militari, spesso poco riconosciute e valorizzate, la caserma rappresenta un elemento significativo del patrimonio architettonico del colle di San Bartolomeo. Quest'area, caratterizzata da una forte vocazione militare sin dalla fine del XVIII secolo e consolidata nel corso del Novecento, si distingue per la sua eccezionale panoramicità.
Nonostante la frequentazione da parte di residenti e turisti, la consapevolezza del valore storico e culturale, sia materiale che immateriale, di questo prezioso patrimonio resta purtroppo limitata. Oggi infatti l'area è frequentata dai cagliaritani e dai turisti prevalentemente per attività sportive o per semplice svago, anche se la maggior parte dei fruitori è del tutto inconsapevole della valenza del promontorio.
L'intero quartiere, è oggetto, da oltre dieci anni, di studi e progetti finalizzati allo sviluppo sociale ed economico del luogo (Lazzaretto, Parco degli Anelli, nuovo stadio del Cagliari Calcio), i quali tuttavia sembrano non considerare adeguatamente l'archeologia militare dei colli e le potenzialità di fruizione culturale e turistica in un'ottica di parziale dismissione e di uso condiviso militare e civile (Fiorino, 2021).

### 1.1.2 Il rilievo

#### *1.1.2.1 Il rilievo geometrico*

Durante la fase di rilievo è stato possibile appurare che l'intero compendio della Caserma Riva Villasanta si compone di sei edifici (casermette) con conformazione tipologica a "C", di un edificio centrale adibito a Palazzina Comando, di un blocco destinato a mensa e di un'ex officina leggera.La configurazione planimetrica dell'insieme, l'organizzazione funzionale dei volumi e la distribuzione degli spazi lasciano chiaramente intendere l'adesione al modello delle caserme funzionali a padiglione, caratterizzato da edifici monofunzionali isolati, articolati attorno a spazi aperti e organizzati secondo logiche modulari e simmetriche.

La fase del rilievo ha rappresentato un processo essenziale al fine di rappresentare il compendio studiato in tutte le sue forme e componenti. Per garantire la scientificità dell'intero processo, è stata adottata una metodologia che ha combinato l'uso di diverse tecnologie. In particolare, sono stati impiegati: un drone con fotocamera integrata per acquisire immagini aeree; una stazione totale (Leica FlexLine TS10) per rilevare alcuni vertici della rete topografica; strumenti di rilievo diretto (Leica DISTO S910) per misurare gli ambienti interni e integrare i dati nelle aree difficilmente accessibili a causa di ostacoli come vegetazione o arredi fissi. La combinazione di queste tecniche ha permesso di ottenere una rappresentazione dettagliata e completa dell'intero complesso architettonico.
Per garantire un'accurata restituzione grafica del complesso, sono stati realizzati numerosi fotogrammi. Questi, insieme a un rilievo metrico con laser e all'analisi di disegni d'archivio, hanno permesso di creare dei fotomosaici. Ottenuti tramite software RDF, i fotomosaici rappresentano tutte le facciate esterne del complesso, incluse quelle che affacciano sulla piazza d'armi centrale. Successivamente sono stati realizzati gli elaborati, ottenuti attraverso il ridisegno sul software. La fase successiva ha previso l'elaborazione dei dati su software Autocad, al fine di riportare graficamente tutte le qualità architettoniche, le alterazioni e i fenomeni di degrado che caratterizzano le facciate oggetto di studio. Questo ha permesso di creare la base grafica, denominata "architettonico", da cui sono poi derivati gli elaborati successivi.

L'esigenza di condurre uno studio dettagliato ha portato a selezionare, durante i successivi step della ricerca, due edifici rappresentativi della varietà costruttiva e funzionale del complesso: la Palazzina Comando, per il ruolo centrale che riveste all'interno dell'impianto e per la maggiore complessità distributiva, e una delle sei casermette, esemplare dell'architettura seriale e razionale che caratterizza l'intero complesso.

- **La Palazzina Comando** è un edificio multipiano che si sviluppa con fronte a filo stradale e presenta una pianta rettangolare allungata. È articolata su tre livelli fuori terra (Fig. 13) e internamente organizzata secondo una disposizione simmetrica, con due setti longitudinali portanti in muratura che suddividono gli ambienti attorno a un nucleo centrale. Le murature interne suddividono i diversi spazi funzionali.
  L'organizzazione planimetrica si mantiene costante su tutti i livelli, con una distribuzione regolare degli ambienti disposti ai lati di un corridoio centrale. Al piano terra si evidenzia la presenza di due ingressi principali contrapposti e un sistema distributivo centrale con doppio vano scala e ascensore, che garantisce l'accessibilità ai piani superiori. Il primo piano presenta una configurazione analoga, con ambienti leggermente più articolati e parzialmente suddivisi, mentre il secondo piano, di dimensioni leggermente ridotte, è caratterizzato da spazi più compatti e da un numero inferiore di ambienti. La ripetitività modulare, la simmetria compositiva e l'ordine nella distribuzione funzionale degli spazi evidenziano l'impostazione razionale e gerarchica propria dell'edilizia militare del periodo.

- La casermetta analizzata, identificata come "**Casermetta 3S**" (Fig. 14), come le sue gemelle presenta una configurazione a "C" ed è composta da grandi camerate quadrangolari disposte trasversalmente rispetto allo sviluppo longitudinale del corpo di fabbrica, configurando un impianto modulare. La struttura portante è realizzata con muri in pietra calcarea, sia longitudinali (perimetrali e interni) che trasversali, questi ultimi disposti a interasse regolare. Le murature hanno uno spessore medio di circa 50 cm e costituiscono una maglia strutturale continua che sostiene le travi lignee di copertura. Il piano di calpestio interno risulta sopraelevato rispetto al terreno esterno, e ogni ingresso è servito da una breve rampa di gradini.
  Dall'analisi della planimetria del piano terra emerge una distribuzione interna caratterizzata da una successione regolare di ambienti rettangolari, disposti lungo i fronti principali e serviti da più ingressi collocati strategicamente sui lati esterni. I collegamenti verticali sono distribuiti nei punti nodali del fabbricato, a ridosso delle testate e degli snodi distributivi. L'articolazione degli spazi suggerisce una netta

distinzione tra le aree destinate alla permanenza collettiva (camerate) e i locali di servizio o transito, collocati in prossimità degli accessi o agli estremi dell'edificio. Il grande cortile interno, aperto su un lato, funge da spazio di disimpegno e manovra, coerente con la funzione militare dell'edificio e funzionale alla ventilazione e illuminazione naturale degli ambienti.

A completamento di questa fase conoscitiva, si presentano gli esiti del rilievo geometrico, che includono: la planimetria generale di inquadramento dell'intero compendio edilizio (Allegato 1A), le piante di copertura dell'intero complesso (Allegato 1B), i prospetti e le sezioni architettoniche relative ai due edifici selezionati per l'analisi – la Palazzina Comando (Allegato 2A) e la casermetta 3S (allegati 2B e 2C) – con l'obiettivo di documentarne con precisione la configurazione spaziale e costruttiva.

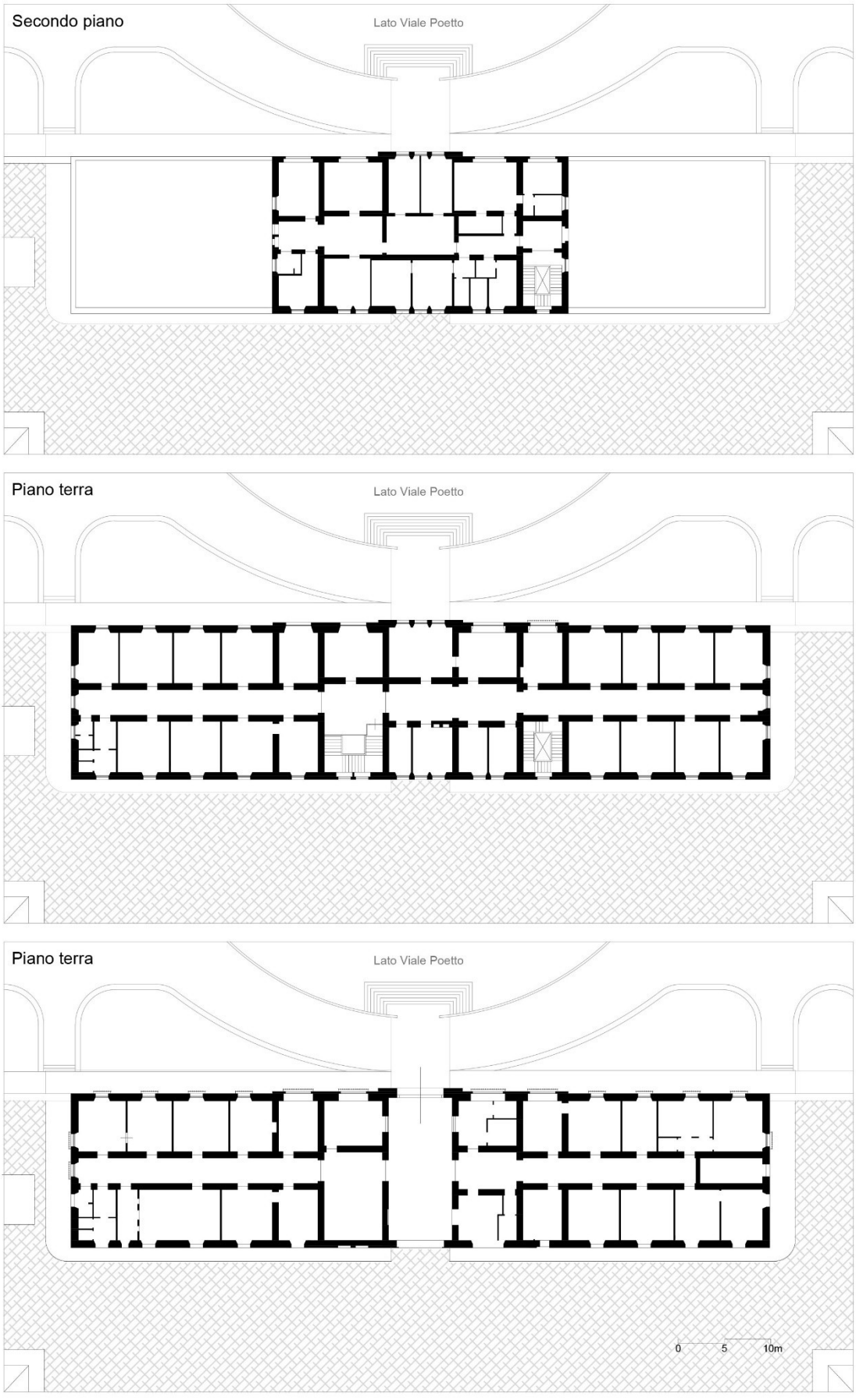



*Fig. 13. Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, elaborati planimetrici.*

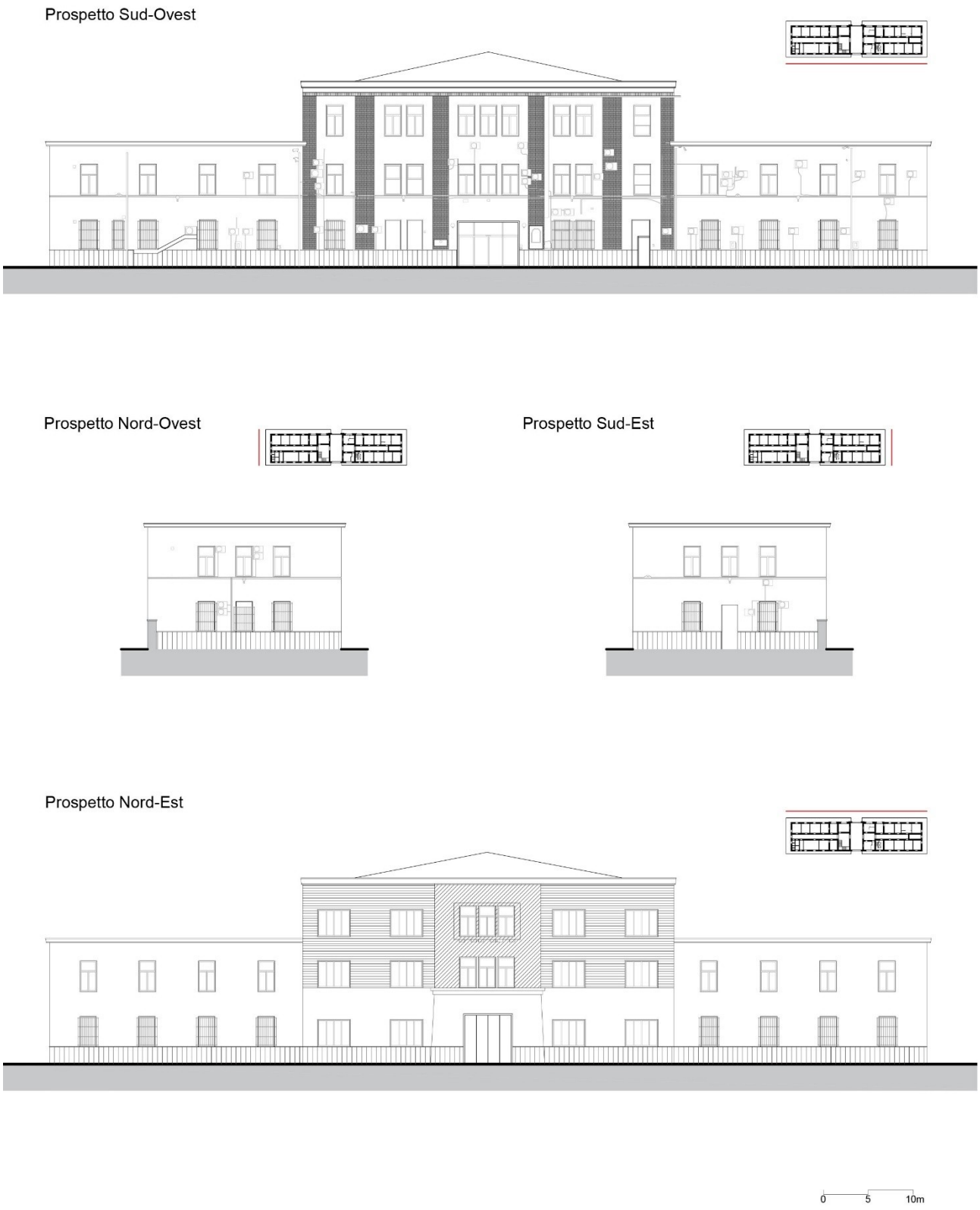



*Fig. 14. Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, prospetti.*

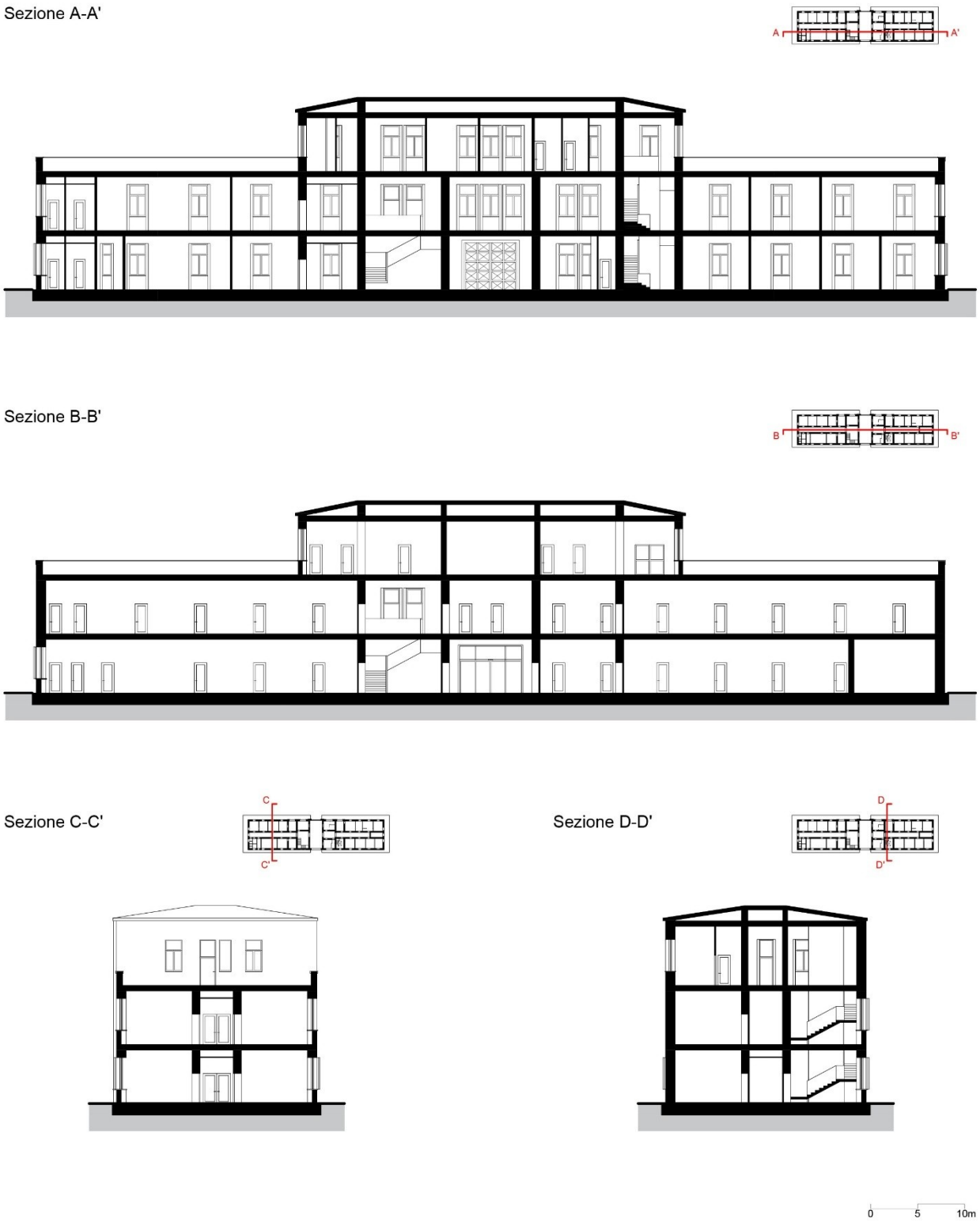



*Fig. 15. Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, sezioni.*

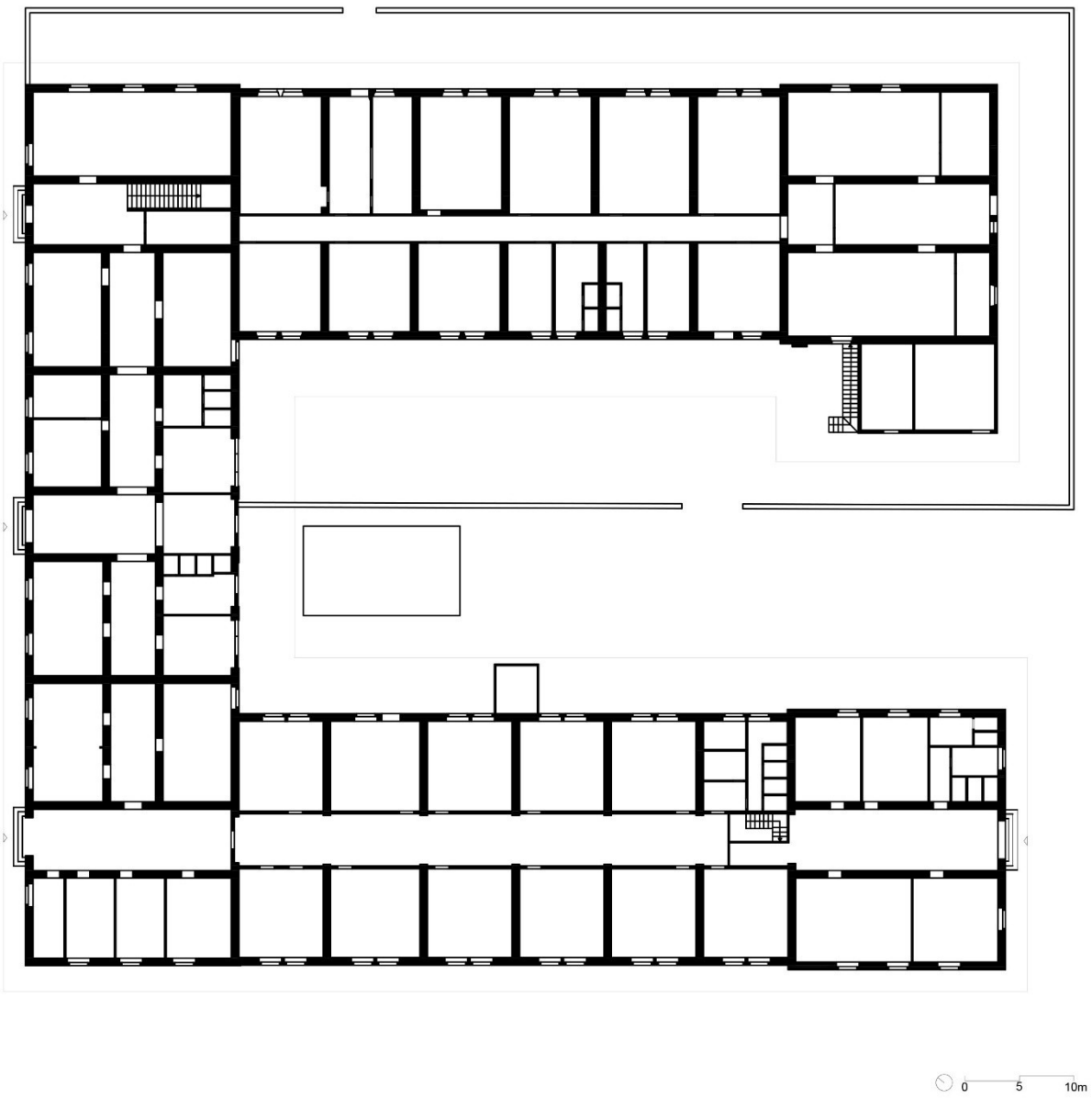



*Fig. 16. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, elaborato planimetrico del piano terra.*




*Fig. 17. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, prospetti.*

### *1.1.2.2 L'analisi materico-degrado*

Per la classificazione delle forme di degrado, si è fatto riferimento alla norma UNI 11182:2006, che disciplina le alterazioni dei materiali lapidei naturali e artificiali, fornendo un lessico tecnico condiviso per la descrizione, l'interpretazione e la catalogazione dei fenomeni di deterioramento osservati. Dal momento che, secondo la UNI 11182, la scienza della conservazione richiede che la diagnosi e i successivi interventi siano basati sullo stato di conservazione dei materiali, considerando le alterazioni visibili, la presenza di umidità e di organismi macroscopicamente osservabili sul manufatto, tali condizioni sono state puntualmente rappresentate graficamente e documentate attraverso rilievi fotografici.
Partendo dalla base denominata "architettonico", sono stati sviluppati gli elaborati "materico" e "degrado", che confluiscono negli elaborati di "sintesi materico-degrado" (Fig. 18 e Fig. 19). In quest'ultimo, le aree compromesse sono state evidenziate tramite campiture con trame e cromie differenziate, associate ai materiali costitutivi e ai rispettivi fenomeni di degrado, in modo da offrire una lettura integrata e immediata dello stato di conservazione dei manufatti.

Le forme di degrado che interessano i prospetti esterni riguardano sia la finitura superficiale in intonaco a base di calce e cemento, generalmente tinteggiata, sia le zone a vista della muratura, con particolare riferimento ai rivestimenti in laterizio. I fenomeni risultano particolarmente concentrati nei prospetti secondari, ovvero quelli non affacciati sulla strada o sulla piazza d'armi, verosimilmente meno soggetti a manutenzione e interventi di ripristino. Si è infatti osservato un grado di conservazione eterogeneo, con uno stato manutentivo mediamente migliore nei fronti principali, sottoposti a maggior visibilità.
Tra i fenomeni di degrado più ricorrenti, a livello del basamento, si rilevano macchie di umidità, distacco della tinteggiatura, sfogliamento dell'intonaco, fessurazioni e colature di origine atmosferica. Nelle superfici intonacate, si riscontrano rigonfiamenti, esfoliazioni e distacchi localizzati, con formazione di lacune evidenti, soprattutto nelle zone più esposte all'azione meteorica e meccanica, come cornici aggettanti, spigoli murari e zone adiacenti ai serramenti. In molti casi, questi fenomeni sono aggravati dalla stagnazione dell'acqua piovana e dall'assenza di sistemi di smaltimento efficaci, che hanno favorito l'insorgenza di colature e patine biologiche (muschi, alghe, licheni), talvolta estese.
Le porzioni in laterizio faccia a vista evidenziano efflorescenze saline, scagliature e processi erosivi più o meno avanzati. In alcune aree, il degrado ha comportato la perdita di materiale, con conseguente alterazione della tessitura muraria originaria e rischio di compromissione dell'integrità strutturale locale.
Le componenti metalliche – in particolare inferriate, pluviali e telai metallici – mostrano segni evidenti di corrosione, accentuata dalla mancanza di protezione superficiale e da esposizione diretta agli agenti atmosferici. In alcuni casi, tali elementi risultano anche deformati o lesionati per effetto di usura meccanica o interventi impropri.
L'analisi ha inoltre evidenziato un diffuso degrado di origine antropica, causato principalmente dalla presenza disordinata di impianti elettrici, reti tecnologiche e tubazioni di riscaldamento, spesso installati senza criteri di integrazione architettonica o compatibilità materica. Tali inserimenti, oltre a generare un impatto visivo negativo, risultano potenzialmente dannosi per le superfici murarie e compromettono la leggibilità dell'impianto originario dell'edificio.

A completamento di questa fase conoscitiva, gli esiti dell'analisi materico-degradativa sono stati raccolti negli allegati 3A, relativo alla Palazzina Comando, e 3B, relativo alla Casermetta 3S.

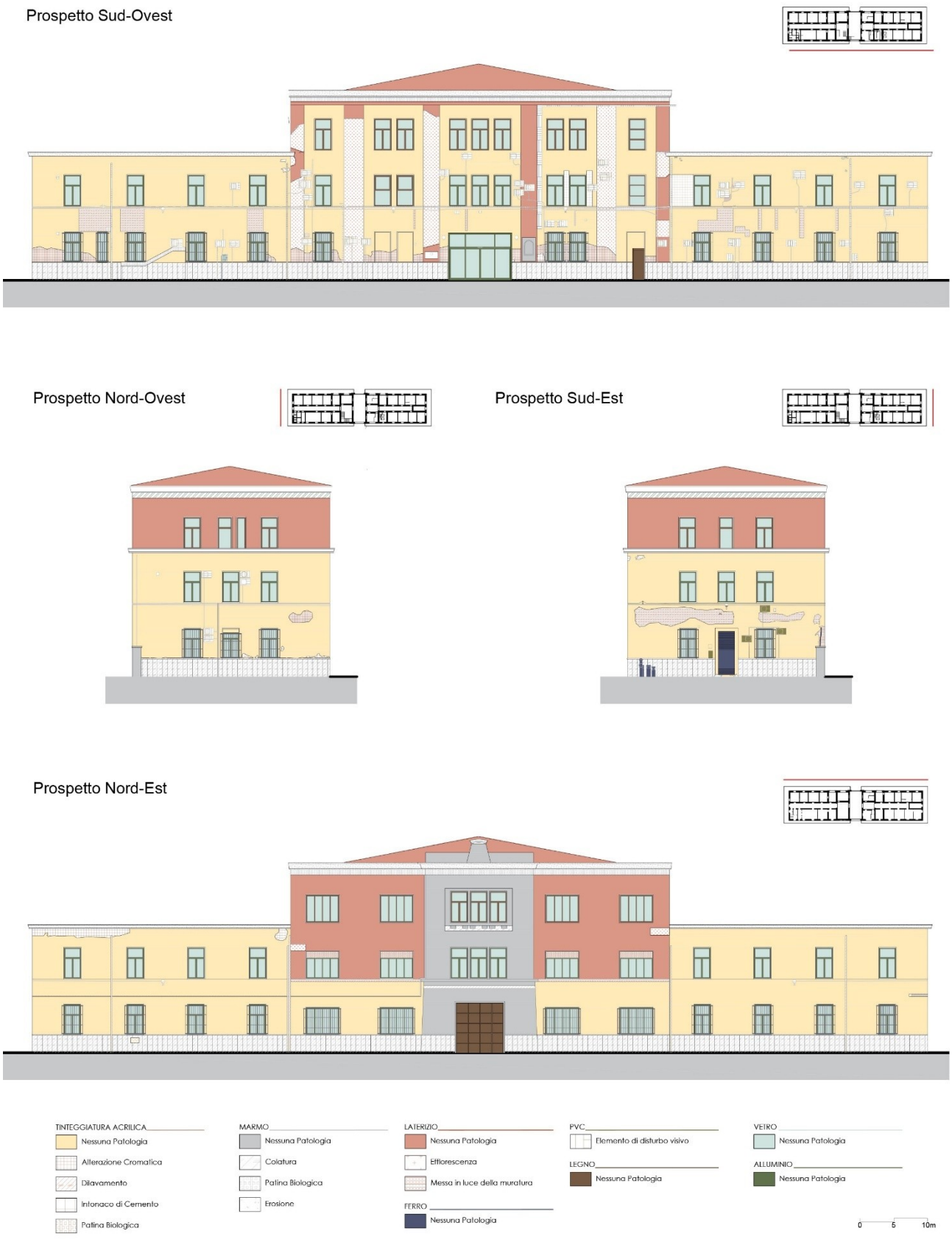



*Fig. 18. Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, analisi materico-degrado.*




*Fig. 19. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, analisi materico-degrado.*

### *1.1.2.3 Il rilievo funzionale*

Il rilievo funzionale offre un quadro chiaro e articolato dell'organizzazione interna degli edifici analizzati, contribuendo alla comprensione delle trasformazioni d'uso avvenute nel tempo e fornendo una base utile per eventuali ipotesi di rifunzionalizzazione.

L'analisi funzionale della Palazzina Comando (Fig. 20) evidenzia una struttura simmetrica a corridoio centrale, caratteristica dell'architettura razionalista militare. I corpi laterali ospitano prevalentemente uffici (in giallo), disposti in sequenza regolare su entrambi i lati del corridoio, mentre i nodi centrali e di testata accolgono spazi comuni e servizi.
Al piano terra è presente un ampio ingresso centrale (in rosso), che funge da nodo distributivo principale. Si rilevano inoltre servizi igienici (grigio), locali tecnici (verde chiaro) e un'aula conferenze (azzurro), elementi che confermano la vocazione rappresentativa e direzionale del livello.
Il primo piano ripropone una distribuzione simile, con un numero maggiore di ambienti destinati a uffici e spazi di lavoro. Il corpo scala e i disimpegni (rosa e rosa tratteggiato) definiscono con chiarezza la struttura distributiva verticale e orizzontale.
Il secondo piano, infine, presenta una densità inferiore di ambienti e due ampie terrazze laterali. La configurazione regolare e simmetrica si mantiene, ma l'organizzazione spaziale suggerisce un uso più limitato o specialistico del livello.

L'analisi funzionale della Casermetta 3S (Fig. 21) evidenzia una notevole varietà di destinazioni d'uso, indicativa di una rifunzionalizzazione adattiva rispetto agli usi originari, un tempo orientati all'accoglienza delle camerate.
L'edificio si sviluppa attorno a un corridoio longitudinale centrale (rosa tratteggiato), che collega i diversi ambienti funzionali. Gli uffici (giallo chiaro), distribuiti lungo i fronti principali, rappresentano la funzione prevalente, mentre nelle ali laterali e nelle testate si concentrano servizi igienici (grigio tratteggiato), locali tecnici e spogliatoi (arancione), nonché archivi e magazzini (verde e verde tratteggiato).
La zona sud-occidentale ospita una mensa con cucina (bianco), a servizio dell'intero complesso, mentre a nord sono presenti ulteriori ambienti di deposito. È presente anche un'aula conferenze (azzurro), localizzata nel braccio meridionale.
Completano il quadro funzionale alcune aree non in uso (grigio pieno), che rappresentano porzioni residuali prive di destinazione attiva. Dal punto di vista distributivo, ogni casermetta dispone in media di cinque ingressi principali: tre sul prospetto nord-occidentale e due nelle testate posteriori orientate a nord-est.

A completamento dell'analisi funzionale, la tavola di sintesi complessiva del rilievo per entrambe le strutture è riportata nell'Allegato 4A.




*Fig. 20. Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, mappatura delle destinazioni d'uso attuali.*




*Fig. 21. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, mappatura delle destinazioni d'uso attuali.*

### 1.1.3 L'analisi crono-tipologica e delle trasformazioni

La fase di sovrapposizione tra la cartografia storica e lo stato attuale si è rivelata determinante per ottenere una lettura stratigrafica approfondita delle trasformazioni subite dal complesso edilizio nel corso del tempo. Le carte storiche, considerate singolarmente, non risultano infatti sufficienti a comprendere la complessità e la progressività delle modifiche avvenute. Solo il confronto diretto con i dati raccolti in fase di rilievo ha consentito di identificare con precisione demolizioni, ampliamenti e inserimenti successivi, delineando così un quadro chiaro e documentato dell'evoluzione morfologica e funzionale del compendio.
Sebbene le immagini storiche non siano sempre perfettamente sovrapponibili ai rilievi attuali, a causa di variazioni nelle scale o nelle tecniche di rappresentazione, il confronto ha comunque permesso di ricostruire la sequenza costruttiva degli edifici, distinguendo le diverse fasi di sviluppo che hanno portato all'attuale configurazione dei parametri murari d'involucro e delle ripartizioni interne.
L'indagine archivistica ha restituito disegni non datati, rendendo difficile collocare con esattezza la fase costruttiva originaria. Tuttavia, l'analisi comparativa delle fonti ha permesso di ipotizzare una datazione relativa, circoscrivendo la costruzione del complesso militare tra il 1930 e il 1940, in linea con le tipologie edilizie introdotte dal Genio Militare in epoca fascista.
Le modifiche minori rilevate, invece, sembrano riferibili alla fase post-bellica, in particolare tra il 1946 e il 1960, periodo in cui la caserma fu ceduta all'Amministrazione Comunale di Cagliari e presumibilmente oggetto di interventi di adattamento funzionale.
Per facilitare la lettura e la comprensione della cronologia edilizia, si è fatto ricorso a una codifica grafica tramite colorazioni differenziate, evidenziando: le strutture originarie (in rosso); le aggiunte successive, riconducibili alla seconda metà del Novecento (in blu e verde); le strutture non più esistenti, ricavate da fonti storiche ma assenti

nello stato di fatto (in viola tratteggiato). In particolare, per quanto riguarda la Palazzina Comando (Fig. 22), l'analisi evidenzia come l'impianto originario (in rosso) sia stato ampiamente mantenuto nei tre livelli, confermando la coerenza tipologica e la stabilità della distribuzione spaziale nel tempo. Gli inserimenti successivi, limitati e circoscritti (in blu e verde), si concentrano in corrispondenza di ambienti secondari, come servizi, vani tecnici e scale di collegamento, senza alterare sostanzialmente la morfologia originaria dell'edificio.
Per quanto riguarda la Casermetta 3S (Fig. 23), invece, la lettura planimetrica mostra una maggiore incidenza di modifiche successive. Accanto al corpo murario originario (rosso), si osservano numerosi tramezzi e pareti in blu, spesso funzionali alla suddivisione degli ambienti per adattarli a nuove esigenze (uffici, locali di servizio). Si nota una trasformazione più marcata nella zona sud-ovest, coerente con quanto osservato nel rilievo funzionale, dove è collocata la mensa. Gli inserimenti in verde, in particolare scale e partizioni leggere, testimoniano una rifunzionalizzazione recente, probabilmente legata ad adeguamenti impiantistici o normativi.

Le tabelle seguenti illustrano l'applicazione dei descrittori cronotipologici a tre diversi livelli di analisi del bene: compendio, manufatto ed elemento. Per ciascun livello vengono riportati i dati identificativi, le informazioni storico-cronologiche e le valutazioni utili alla comprensione del contesto evolutivo e del grado di trasformabilità.
A completamento dell'analisi cronotipologica, la tavola di sintesi complessiva del rilievo per entrambe le strutture è riportata nell'Allegato 5A.

| DESCRITTORI CRONOTIPOLOGICI - COMPENDIO | | |
|---|---|---|
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| DENOMINAZIONE | Caserma Riva Villasanta | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **DESCRIZIONE** |
| Anno costruzione | 1930-1940 | Indica il periodo in cui è stato realizzato l'intero compendio edilizio. |
| Tipologia | Caserma a padiglioni | Definisce la configurazione complessiva del compendio, specificandone l'impianto tipologico. |
| Codifica Raumbuch | CRV | Identifica in maniera univoca il compendio all'interno del sistema di catalogazione Raumbuch. |
| Fase cronologica prevalente | Fase 1 | Riferisce l'intervallo temporale principale in cui il compendio si colloca. |
| Interventi di restauro | No | Segnala l'assenza di proposte di intervento a fini conservativi e/o di restauro sull'intero compendio. |

*Tabella 61. Tabella dei descrittori cronotipologici relativi al compendio, con dati identificativi e informazioni storico-cronologiche principali.*

| DESCRITTORI CRONOTIPOLOGICI - MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| DENOMINAZIONE | Palazzina Comando | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **DESCRIZIONE** |
| Anno costruzione | 1930-1940 | Indica il periodo in cui è stato realizzato il manufatto all'interno del compendio. |
| Tipologia | Casermetta funzionale | Definisce la tipologia edilizia del singolo manufatto, specificandone caratteristiche e funzione originaria. |
| Codifica Raumbuch | CRV_3S | Identifica in maniera univoca il manufatto all'interno del sistema di catalogazione Raumbuch. |
| Fase cronologica prevalente | Fase 1 | Riferisce l'intervallo temporale principale in cui si colloca il manufatto. |
| Interventi di restauro | No | Segnala l'assenza di proposte di intervento a fini conservativi e/o di restauro sul manufatto. |

*Tabella 62. Tabella dei descrittori cronotipologici relativi al manufatto, con dati identificativi e informazioni storico-cronologiche principali.*

| DESCRITTORI CRONOTIPOLOGICI - ELEMENTO | | |
|---|---|---|
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | 3S | |
| CODICE PIANO | 00 | |
| CODICE UNITA' | 3S_00_019 / 3S_00_020 | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **DESCRIZIONE** |
| Anno costruzione | 1930-1940 | Indica l'anno di realizzazione dell'elemento, espresso con un valore numerico di quattro cifre. |
| Tipologia | Mui_01a | Definisce la tipologia dell'elemento architettonico o costruttivo, specificandone forma, materiali e funzione. |
| Codifica Raumbuch | 00_15 | Identifica in maniera univoca l'elemento nel sistema di catalogazione Raumbuch del manufatto. |
| Fase cronologica prevalente | Fase 1 | Riferisce l'intervallo temporale in cui l'elemento si colloca. |
| Interventi di restauro | No | Segnala la presenza o l'assenza di proposte di intervento a fini conservativi e/o di restauro. |
| Valutazione dell'interesse | Isc | Esprime il grado di interesse storico, architettonico o documentale attribuibile all'elemento. |
| Grado di trasformabilità | 0 | Indica il livello di modificabilità ammissibile per l'elemento, in relazione al suo valore e alla necessità di tutela. |

*Tabella 63. Tabella dei descrittori cronotipologici riferiti al livello di elemento, applicata al muro Mui_01a, con indicazione di dati identificativi, tipologici e storico-evolutivi, utili per la valutazione dell'interesse e del grado di trasformabilità.*

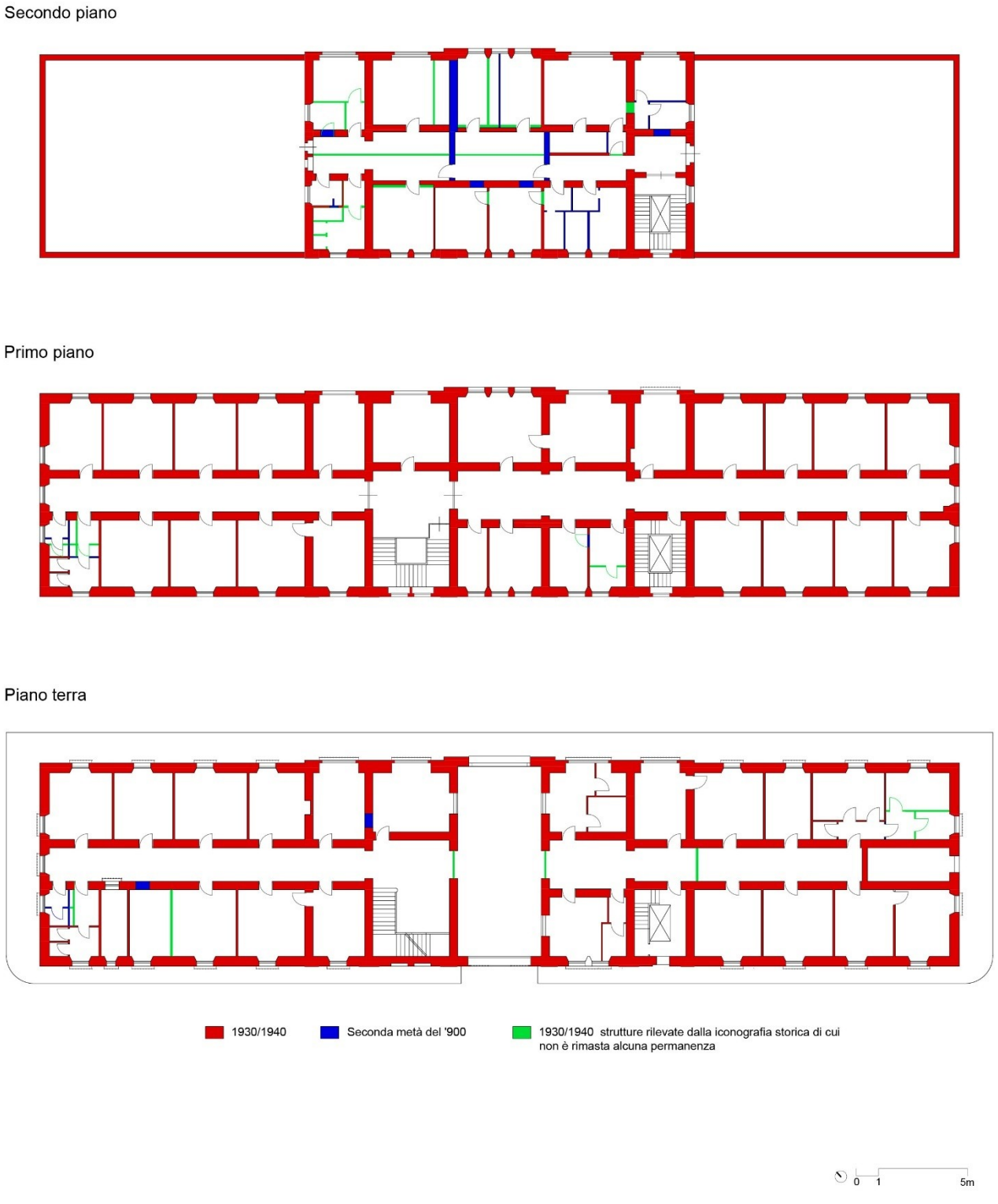



*Fig. 22. Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, analisi delle fasi costruttive.*

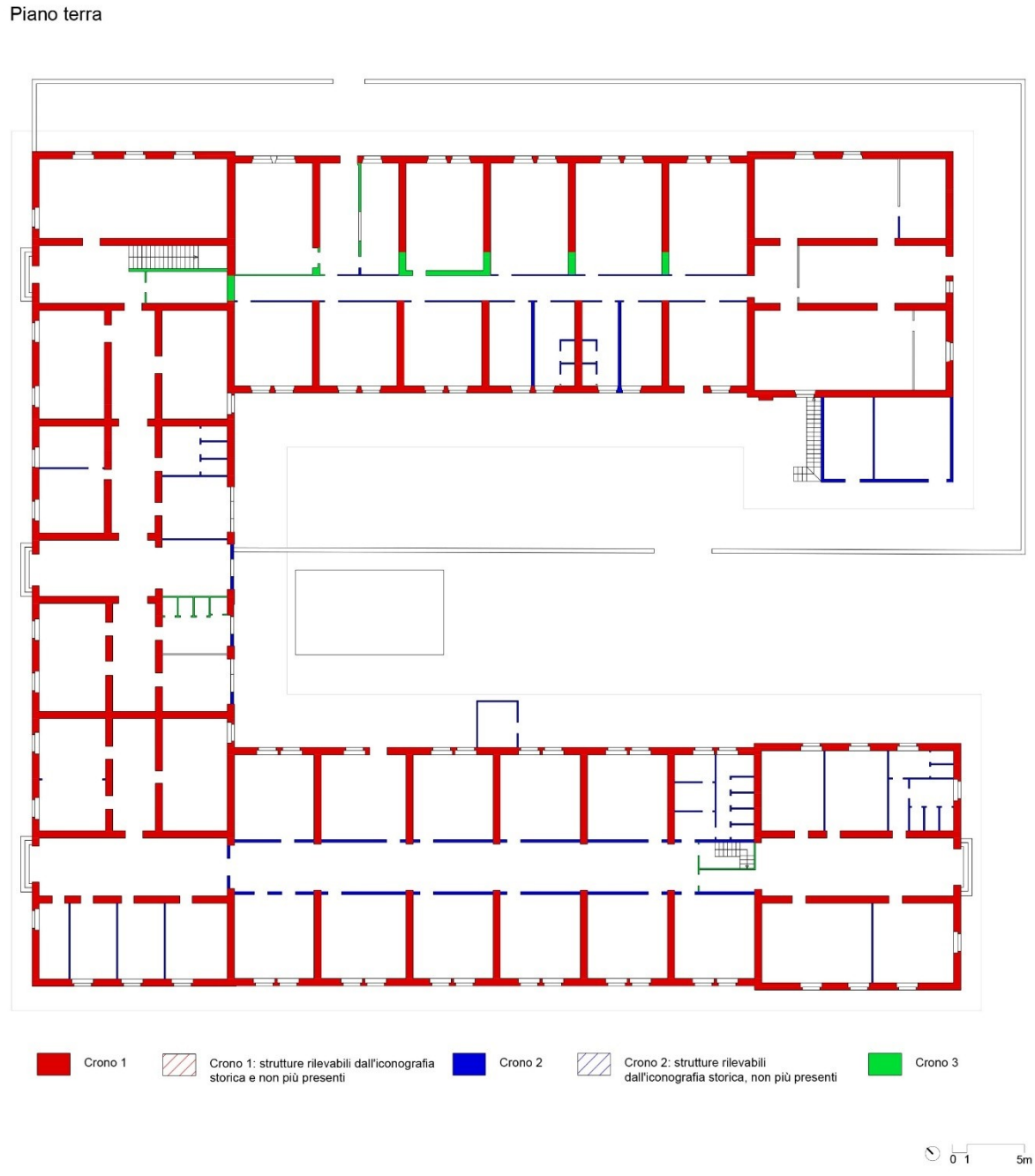



*Fig. 23. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, analisi delle fasi costruttive.*

### 1.1.4 La sistematizzazione della conoscenza: il metodo Raumbuch

#### *1.1.4.1 Le codifiche tipologiche e i vocabolari*

Al fine di avviare una sistematica operazione di schedatura, ogni componente è stato identificato con una codifica specifica. Si è utilizzata una numerazione organizzata per serie e sotto serie; un sistema estremamente flessibile che può essere implementato all'infinito. Particolarmente utile nelle fasi iniziali del rilievo, quando la conoscenza dell'edificio è ancora parziale e si necessita di un sistema di codifica in grado di evolversi parallelamente all'approfondimento dell'indagine, il metodo ha permesso di catalogare in modo dettagliato qualsiasi elemento dell'edificio.

Al fine di applicare la metodologia descritta, una delle operazioni preliminari è consistita nella redazione di un documento di codifica delle diverse tipologie esistenti. Tale documento, classifica gli elementi costruttivi della fabbrica in categorie specifiche, tra cui: infissi esterni (Ine), infissi interni (Ini), pavimentazioni (Pv), murature interne (Mui), murature esterne (Mue), solai (So), finiture (Fin), collegamenti verticali (Cv), impianti di controllo ambientale (Imca), impianti elettrici (Ime), impianti idrici e sanitari (Imis), opere metalliche (Om) e strutture in calcestruzzo armato (Sta). Ogni categoria è ulteriormente suddivisa in sottocategorie.
Per esempio, all'interno della categoria "infissi esterni", gli infissi sono divisi in base ai materiali impiegati e alla tipologia dell'infisso, come porta o finestra. Distinzioni simili sono state effettuate per tutte le altre categorie, con ciascun macrogruppo suddiviso in ulteriori sottoclassi.

Un esempio concreto riguarda la categoria "infissi esterni", che include la sottocategoria delle "finestre in legno e vetro". Poiché all'interno della fabbrica sono presenti numerosi modelli di finestre che combinano questi due materiali, sono stati assegnati specifici codici per ogni variante: ad esempio, Ine_05a, Ine_05b, Ine_05c, e così via. In questi codici, "Ine" indica "Infisso Esterno", "05" si riferisce alle finestre in legno e vetro, mentre la lettera finale identifica la variante progressiva di quel tipo di infisso. Le varianti sono determinate da caratteristiche come il tipo di vetro utilizzato, il numero di vetri e le dimensioni dell'infisso. Ogni variante è descritta in dettaglio attraverso il suo codice (ad esempio Ine_05h) e accompagnata da una descrizione e almeno una fotografia identificativa.

Questo processo di codifica è stato applicato a tutte le categorie e sottocategorie precedentemente menzionate.

### *1.1.4.2 Gli infissi*

Gli infissi sono stati classificati in due macro-categorie: Infissi esterni (Ine); Infissi interni (Ini).

All'interno della categoria degli infissi esterni, l'analisi ha permesso di individuare due tipologie principali: porte in alluminio (codice Ine_01) e finestre in alluminio (codice Ine_02). Ciascuna tipologia è stata ulteriormente articolata in varianti, identificate mediante lettere progressive, al fine di distinguere differenze dimensionali e morfologiche.

**Infissi esterni (Ine_01) – Categoria porte**

- **Ine_01a** – Porta d'ingresso in alluminio a doppia anta con lunetta superiore; dimensioni 3,30×2,50 m.
- **Ine_01b** – Porta d'ingresso in alluminio a doppia anta bipartita, con una parte fissa e una mobile, dotata di grata esterna; dimensioni 3,35 × 1,20 m.
- **Ine_01c** – Porta d'ingresso in alluminio a un'unica anta con parte fissa superiore; dimensioni 3,35 × 1,20 m.
- **Ine_01d** – Porta metallica destinata a locale tecnico, priva di elementi vetrati.

**Infissi esterni (Ine_02) – Categoria finestre**

- **Ine_02a** – Finestra in alluminio a doppia anta con lunetta superiore; dimensioni 2,40 × 1,20 m.
- **Ine_02b** – Finestra in alluminio a doppia anta con lunetta superiore, di dimensioni leggermente ridotte rispetto alla variante precedente (2,10 × 1,20 m).

Anche all'interno della categoria degli infissi interni sono state due tipologie principali: porte in legno (codice Ini_01) e porte in alluminio (codice Ini_02). Anche in questo caso, ciascuna tipologia è stata ulteriormente articolata in varianti, identificate mediante lettere progressive, al fine di distinguere differenze dimensionali e morfologiche.

**Infissi interni (Ini_01) – Categoria porte in legno**

- **Ini_01a** – Porta in legno lamellare a un'anta; dimensioni **0,80 × 2,10 m**.
- **Ini_01b** – Porta blindata in legno a un'anta; dimensioni **0,90 × 2,20 m**.
- **Ini_01c** – Porta in legno lamellare a un'anta, di dimensioni leggermente ridotte rispetto alla Ini_01a (0,70 × 2,10 m).

**Infissi interni (Ini_02) – Categoria porte in alluminio**

- **Ini_02a** – Porta in alluminio a doppia anta bipartita, composta da un pannello e una parte vetrata, con una anta fissa e una mobile; dimensioni 1,20 × 2,10 m.

Gli esiti del lavoro di catalogazione sono riportati in forma tabellare nel Raumbuch elaborato su Excel (di cui si riporta un estratto in Tabella 64 e Tabella 65) e in forma grafica negli Allegati 6C (di cui viene mostrato un dettaglio in Fig. 24) e 6D di cui viene mostrato un dettaglio in Fig. 25). Tali elaborati contengono il Raumbuch degli infissi della Palazzina 3S, con l'indicazione dei codici relativi al piano di riferimento, all'unità e ai numeri progressivi, elementi che consentono l'identificazione univoca di ciascun infisso.

| CODIFICA RAUMBUCH INFISSI ESTERNI – IDENTIFICAZIONE DELL'ELEMENTO | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Edificio** | **Codice stanza/unità** | **Codice elemento** | **Tipo** | **Codifica tipologia** | **Descrizione** |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 3S | 3S_00_056 | 00_056_01 | Ine | Ine_01a | Porta d'ingresso in alluminio, doppia anta e lunetta superiore (3,30 x 2,50 m) |
| 3S | 3S_00_054 | 00_054_01 | Ine | Ine_01b | Porta d'ingresso in alluminio, doppia anta bipartita, una fissa e una mobile, con grata esterna (3,35 x 1,20 m) |
| 3S | 3S_00_042 | 00_042_02 | Ine | Ine_01c | Porta d'ingresso in alluminio, unica anta con parte fissa superiore (3,35 x 1,20 m) |
| 3S | 3S_00_043 | 00_043_01 | Ine | Ine_01d | Porta metallica per locale tecnico unica anta (1,3 x 2,3) m |
| 3S | 3S_00_027 | 00_027_01 | Ine | Ine_02a | Finestra in alluminio a doppia anta con lunetta superiore (2,40 x 1,20 m) |
| 3S | 3S_00_001 | 00_001_01 | Ine | Ine_02b | Finestra in alluminio a doppia anta con lunetta superiore (2,10x1,20m) |

*Tabella 64. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sugli infissi esterni, esempio di codifica di identificativa dell'elemento.*

| CODIFICA RAUMBUCH INFISSI INTERNI – IDENTIFICAZIONE DELL'ELEMENTO | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Edificio** | **Codice stanza/unità** | **Codice elemento** | **Tipo** | **Codifica tipologia** | **Descrizione** |
| 3S | 3S_00_001 | 00_001_01 | Ini | Ini_01a | Porta in legno lamellare ad un'anta (0,8 x 2,1 m) |
| 3S | 3S_00_052 | 00_052_01 | Ini | Ini_01b | Porta blindata in legno, ad un'anta (0,9 x 2,2 m) |
| 3S | 3S_00_029 | 00_029_01 | Ini | Ini_01c | Porta in legno lamellare ad un'anta (0,7 x 2,1 m) |
| 3S | 3S_00_057 | 00_057_02 | Ini | Ini_02a | Porta in alluminio con doppia anta bipartita (pannello e vetro) una fissa e una mobile (1,2 x 2,1 m) |

*Tabella 65. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sugli infissi interni, esempio di codifica di identificativa dell'elemento.*

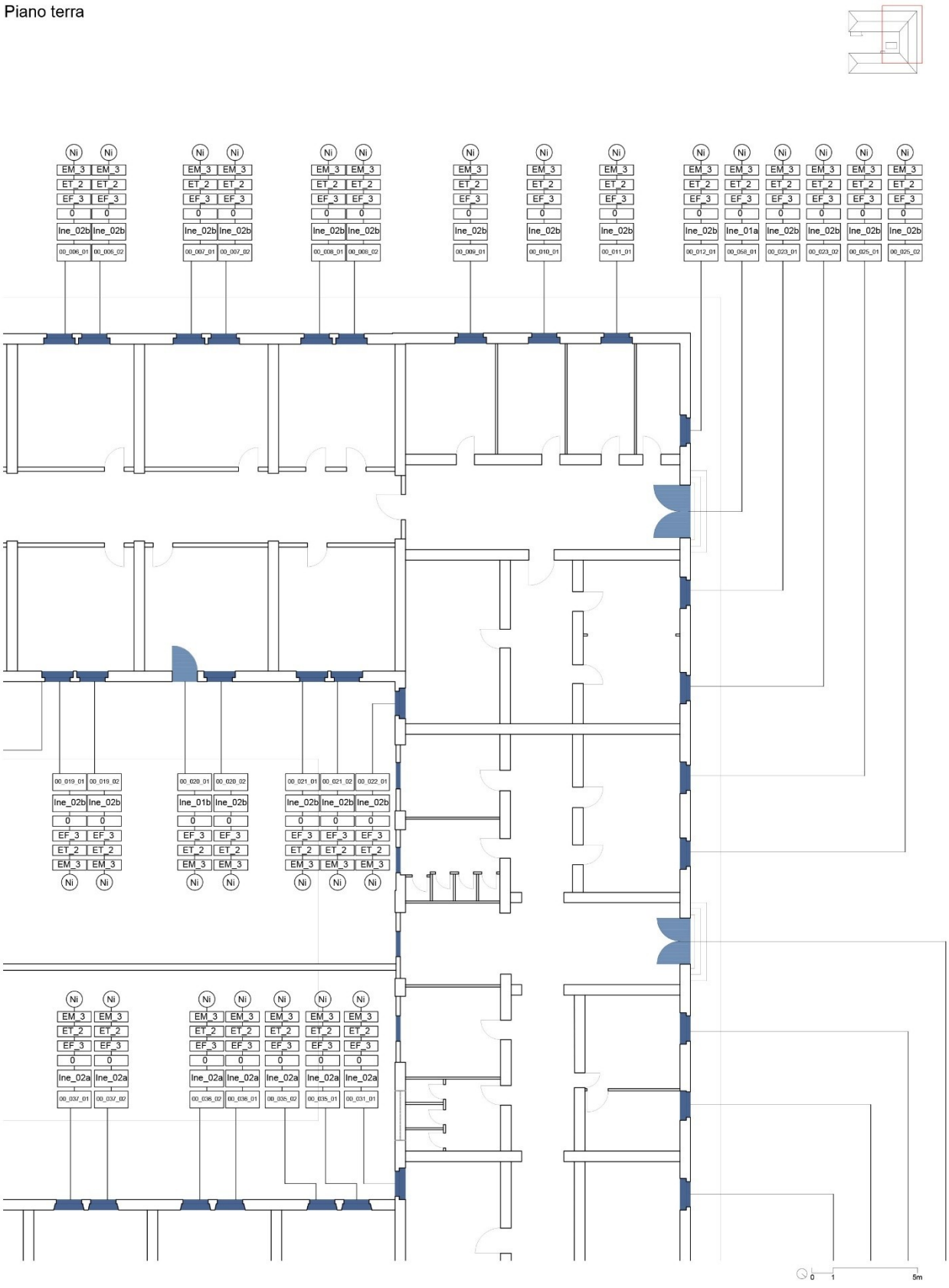



*Fig. 24. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, dettaglio dell'Allegato 6C - Raumbuch degli infissi esterni.*

Piano terra

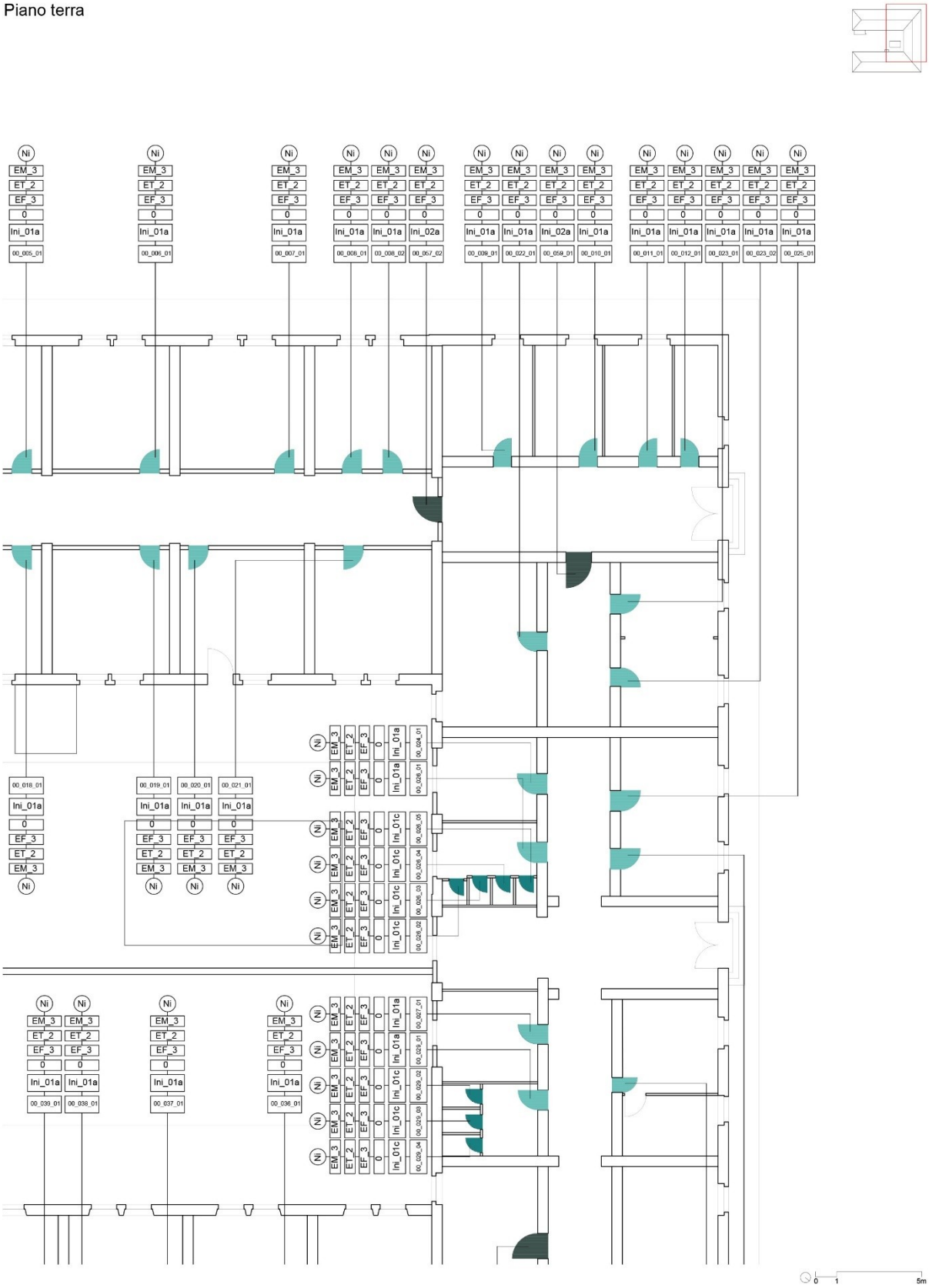



*Fig. 25. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, dettaglio dell'Allegato 6D - Raumbuch degli infissi interni.*

### *1.1.4.3 Le murature*

Le murature sono state classificate in due categorie principali: murature portanti (Mu_01) e murature di tamponamento (Mu_02).

All'interno della categoria delle murature esterne, l'analisi ha permesso di individuare una sola tipologia costruttiva in pietra cantone (codice Mue_01).

**Murature portanti esterne (Mue_01)**

- **Mue_01a** – Muratura portante in pietra cantone, spessore 0,50 m, con finitura in intonaco e tinteggiatura gialla.

All'interno della categoria delle murature interne, l'analisi ha permesso di individuare quattro tipologie principali: muratura portante in pietra cantone (codice Mui_01); murature di tamponamento in laterizio semipieno (codice Mui_02). Ciascuna tipologia è stata ulteriormente suddivisa in varianti, identificate mediante lettere progressive, al fine di distinguere le differenze dimensionali, materiche e di finitura.

**Murature portanti interne (Mui_01)**

- **Mui_01b** – Muratura portante in laterizio semipieno, spessore **0,20 m**, con finitura in intonaco e tinteggiatura gialla.

**Murature interne di tamponamento (Mui_02)**

- **Mui_02a** – Muratura in laterizio semipieno, spessore **0,20 m**, con finitura in intonaco e tinteggiatura bianca.
- **Mui_02b** – Muratura in laterizio semipieno, spessore **0,37 m**, con finitura in intonaco e tinteggiatura bianca.
- **Mui_02c** – Parete in cartongesso, spessore **0,10 m**, composta da profili e orditura metallica, materiale isolante e pannelli in cartongesso, con tinteggiatura bianca.

Gli esiti del lavoro di catalogazione sono riportati in forma tabellare nel Raumbuch elaborato su Excel (di cui si riporta un estratto in Tabella 66 e Tabella 67) e in forma grafica negli Allegati 7C (di cui viene mostrato un dettaglio in Fig. 26), 7D (di cui viene mostrato un dettaglio in Fig. 27) e 7E. Tali elaborati contengono il Raumbuch delle murature esterne ed interne della Palazzina 3S, con l'indicazione dei codici relativi al piano di riferimento, all'unità e ai numeri progressivi, elementi che consentono l'identificazione univoca di ciascuna muratura.

| CODIFICA RAUMBUCH MURI ESTERNI – IDENTIFICAZIONE DELL'ELEMENTO | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Edificio** | **Codice stanza/unità** | **Codice elemento** | **Tipo** | **Codifica tipologia** | **Descrizione** |
| 3S | 3S_00_001; 3S_00_002 | 00_01 | Mue | Mue_01a | Muratura portante esterna in pietra cantone spessore 0,5 m con finitura di intonaco tinteggiatura gialla |

*Tabella 66. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sui muri esterni, esempio di codifica di identificativa dell'elemento.*

| CODIFICA RAUMBUCH MURI INTERNI – IDENTIFICAZIONE DELL'ELEMENTO |
|---|

| Edificio | Codice stanza/unità | Codice elemento | Tipo | Codifica tipologia | Descrizione |
|---|---|---|---|---|---|
| 3S | 3S_00_001; 3S_00_002 | 00_01 | Mui | Mui_01a | Muratura portante interna in pietra cantone spessore 0,5 m con finitura di intonaco tinteggiatura gialla |
| 3S | 3S_00_003, 3S_00_004, 3S_00_005, 3S_00_006, 3S_00_007, 3S_00_008, 3S_00_016, 3S_00_057 | 00_01 | Mui | Mui_02a | Muratura in laterizio semipieno spessore 0,2 m con finitura di intonaco |
| 3S | 3S_00_001; 3S_00_002 | 00_01 | Mui | Mui_02b | Parete in cartongesso spessore 0,1 m composta da profili e orditura metalica, materiale isolante, tinteggiatura bianca |
| 3S | 052, 065 | 00_01 | Mui | Mui_02c | Muratura in laterizio semipieno spessore 0,37 m con finitura di intonaco |

*Tabella 67. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sugli infissi interni, esempio di codifica di identificativa dell'elemento.*

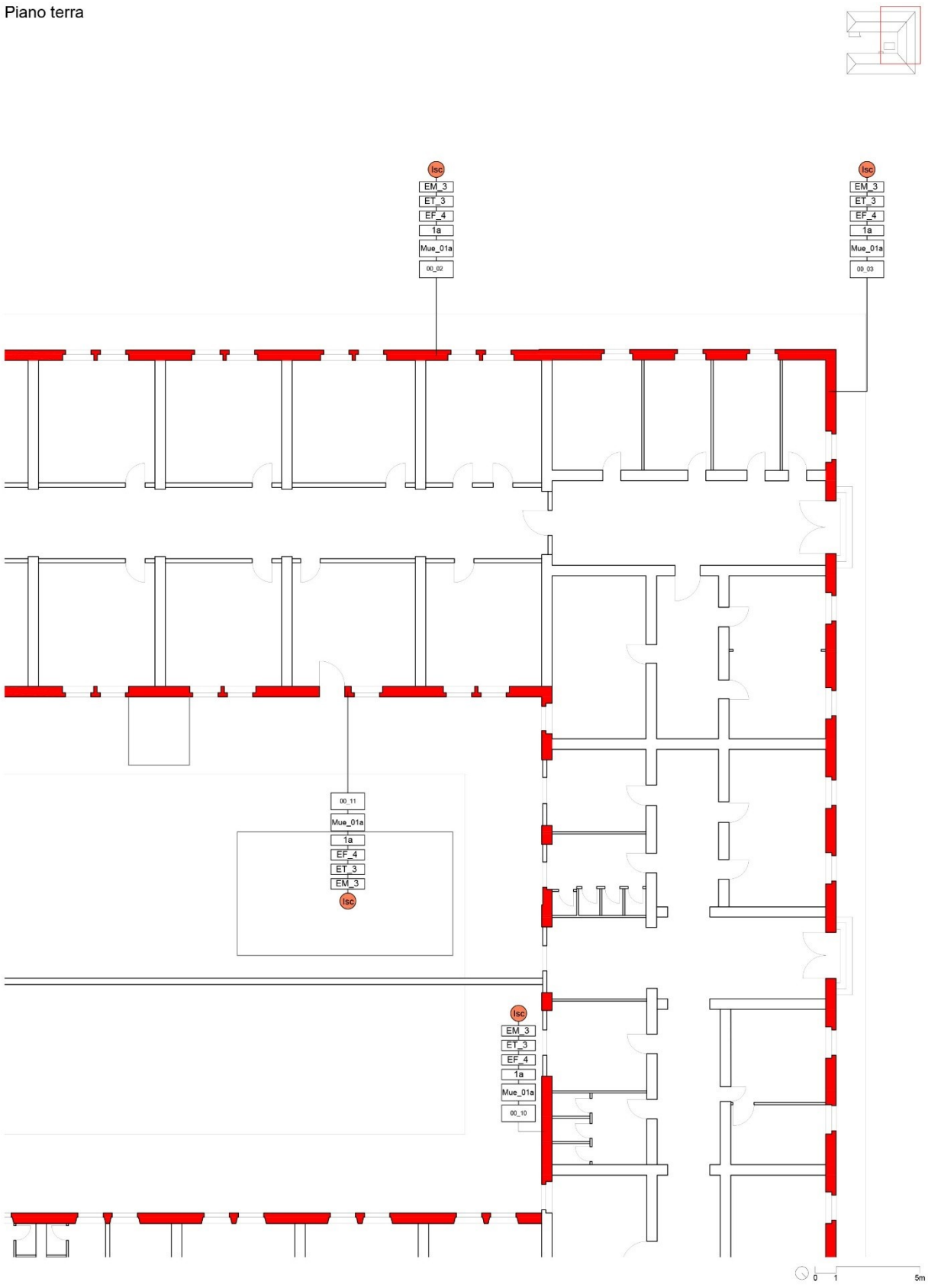



*Fig. 26. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, dettaglio dell'Allegato 7C - Raumbuch dei muri esterni.*

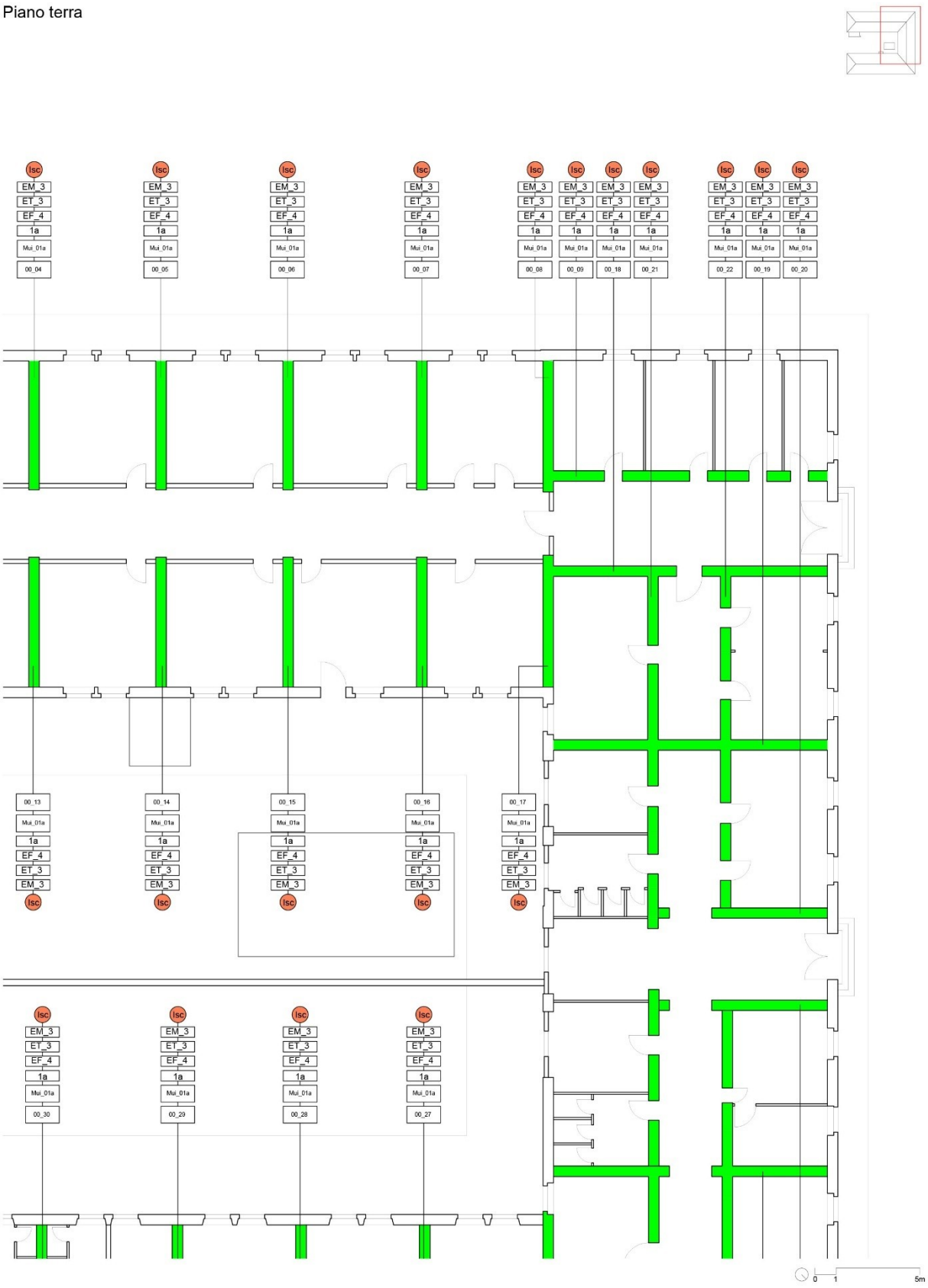



*Fig. 27. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, dettaglio dell'Allegato 7D - Raumbuch dei muri interni.*

### *1.1.4.4 I solai e i pavimenti*

Le tipologie di solaio (So) e pavimentazione (Pv) rilevate negli edifici oggetto di studio sono state raccolte in un'unica scheda (Allegato 8A), senza distinzione tra interne ed esterne, poiché le varianti riscontrate negli spazi esterni risultano numericamente limitate e non significative ai fini dell'analisi.
L'associazione tra tipologia di solaio e tipologia di pavimentazione ha permesso di definire un quadro completo del pacchetto strutturale e di finitura, individuando cinque configurazioni principali, articolate in varianti distinte.

**Solai in laterocemento con pavimentazioni in linoleum (So_01)**

- **So_01a** – Solaio in laterizio semipieno e getto di completamento in calcestruzzo con pavimento in linoleum, colori grigio chiaro e bianco, giunti allineati; formato 0,50 × 0,50 m.
- **So_01b** – Solaio in laterizio semipieno e getto di completamento in calcestruzzo con pavimento in linoleum a strisce nei colori grigio scuro e bianco, giunti allineati; formato 0,50 × 0,50 m.

**Solai in laterocemento con pavimentazioni in PVC (So_02)**

- **So_02a** – Solaio in laterizio semipieno e getto di completamento in calcestruzzo con pavimento flottante in PVC di colore grigio, giunti allineati; formato 0,30 × 0,30 m.

**Solai in laterocemento con pavimentazioni in gres porcellanato (So_03)**

- **So_03a** – Solaio in laterizio semipieno e getto di completamento in calcestruzzo con pavimento in gres porcellanato multicolore, giunti alternati; formato 0,30 × 0,30 m.
- **So_03b** – Solaio in laterizio semipieno e getto di completamento in calcestruzzo con pavimento in gres porcellanato nei colori grigio scuro e bianco, giunti allineati; formato 0,20 × 0,20 m.

Gli esiti della catalogazione sono riportati in forma tabellare nel Raumbuch elaborato su Excel (di cui si riporta un estratto in Fig. 28) e in forma grafica nell'Allegato 8A (Raumbuch dei solai e delle pavimentazioni della Palazzina 3S), dove sono indicati anche i codici relativi al piano di riferimento, all'unità e ai numeri progressivi, che consentono l'identificazione univoca di ogni combinazione solaio-pavimentazione.

| CODIFICA RAUMBUCH SOLAI – IDENTIFICAZIONE DELL'ELEMENTO | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Edificio** | **Codice stanza/unità** | **Codice elemento** | **Tipo** | **Codifica tipologia** | **Descrizione** |
| 3S | 3S_00_001; 3S_00_002; 3S_00_014; 3S_00_015; 3S_00_024; 3S_00_025; 3S_00_056; 3S_00_060; Ecc. | 00_01 | So | So _01a | Solaio costituito da laterizio semipieno e getto di completamento in calcestruzzo con Pavimento in linoleum, colori grigio chiaro e bianco, con giunti allineati (0,5 x 0,5 m) |
| 3S | 3S_00_035; 3S_00_036; 3S_00_037; 3S_00_038; 3S_00_041; 3S_00_042; 3S_00_049; 3S_00_050; Ecc. | 00_02 | So | So _01b | Solaio costituito da laterizio semipieno e getto di completamento in calcestruzzo con Pavimento in linoleum con strisce grigio scuro e bianco, con giunti allineati (0,5 x 0,5 m) |
| 3S | 3S_00_043; 3S_00_044; 3S_00_045; 3S_00_046; 3S_00_047; 3S_00_048; 3S_00_066; 3S_00_067; Ecc. | 00_03 | So | So _02a | Solaio costituito da laterizio semipieno e getto di completamento in calcestruzzo con Pavimento flottante in PVC, colore grigio, con giunti allineati (0,3 x 0,3 m) |
| 3S | 3S_00_003; 3S_00_004; 3S_00_005; 3S_00_006; 3S_00_007; 3S_00_008; 3S_00_009; 3S_00_010; Ecc. | 00_04 | So | So _03a | Solaio costituito da laterizio semipieno e getto di completamento in calcestruzzo con Pavimento in gres porcellanato, colori vari, giunti alternati (0,3 x 0,3 m) |
| 3S | Da 13.1 a 13.8; Da 16.1 a 16.8; Da 26.1 a 26.5; Ecc. | 00_05 | So | So_03b | Solaio costituito da laterizio semipieno e getto di completamento in calcestruzzo con Pavimento in gres porcellanato, colori grigio scuro e bianco, giunti allineati (0,2 x 0,2 m) |

*Tabella 68. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sul pacchetto solaio/pavimento, esempio di codifica di identificativa dell'elemento.*

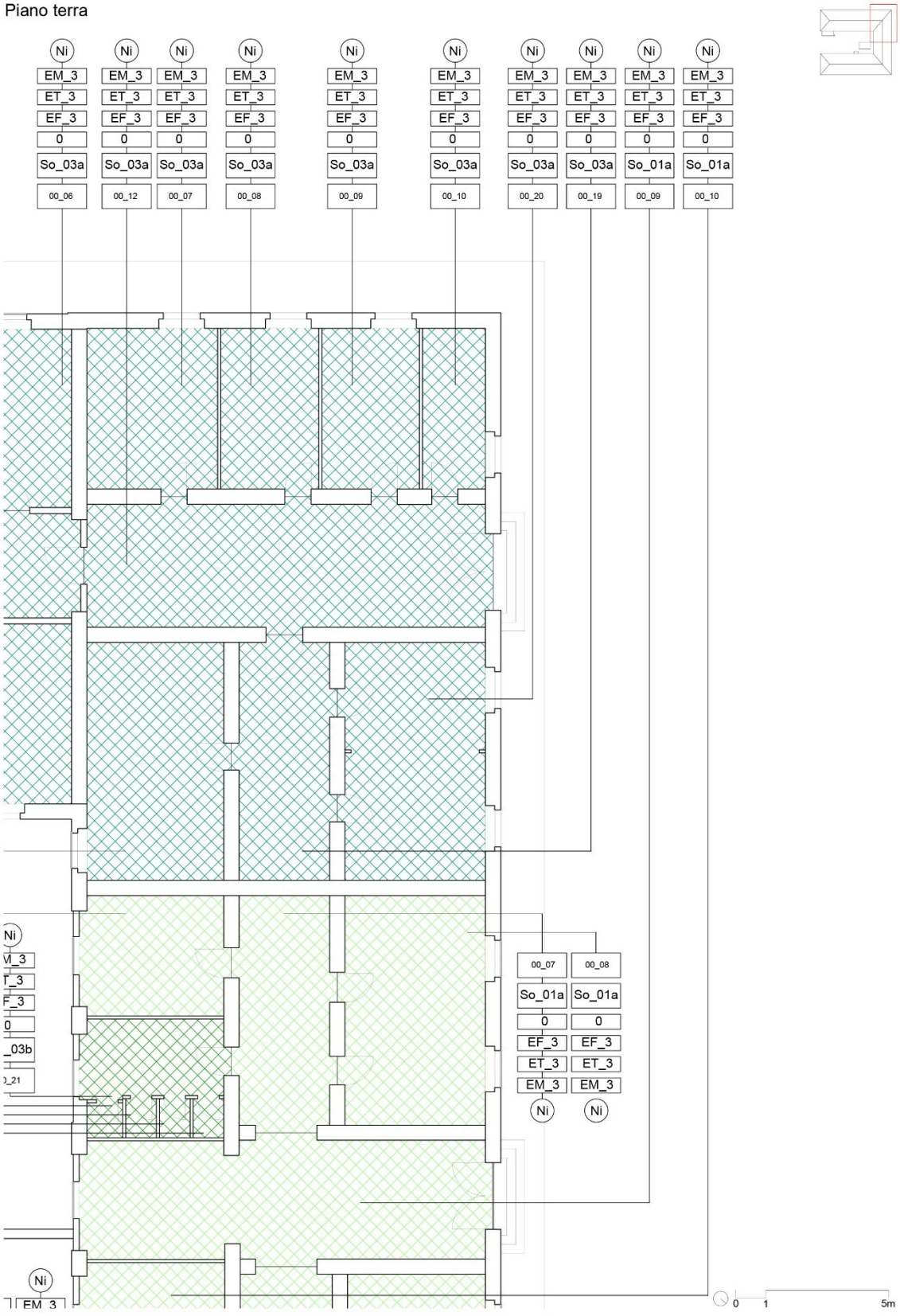



*Fig. 28. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, dettaglio dell'Allegato 8A - Raumbuch dei solai/pavimenti.*

### *1.1.4.5 I collegamenti verticali*

I collegamenti verticali (Cv) comprendono tutti gli elementi destinati al superamento di dislivelli tra i diversi livelli dell'edificio. Sono stati suddivisi in due categorie principali: collegamenti verticali esterni (Cv_01) e collegamenti verticali interni (Cv_02).

**Collegamenti verticali esterni (Cv_01)**

- **Cv_01a** – Scala in acciaio composta da 22 gradini, con alzata 0,15 m e pedata 0,30 m, progettata per garantire resistenza strutturale in contesti dove sono richieste solidità e durabilità.

**Collegamenti verticali interni (Cv_02)**

- **Cv_02a** – Scala interna con 17 gradini rivestiti in moquette nera, alzata 0,15 m e pedata 0,30 m, tipica di ambienti dove si privilegia comfort e assorbimento acustico.
- **Cv_02b** – Scala interna con 10 gradini rivestiti in legno, alzata 0,16 m e pedata 0,30 m, caratterizzata da un aspetto elegante e caldo, adatta per spazi di rappresentanza o contesti formali.

Gli esiti della catalogazione sono riportati in forma tabellare nel Raumbuch elaborato su Excel (di cui si riporta un estratto in Fig. 29) e in forma grafica nell'Allegato 9B (Raumbuch delle opere metalliche e dei collegamenti verticali), dove sono indicati anche i codici relativi al piano di riferimento, all'unità e ai numeri progressivi, che consentono l'identificazione univoca di ogni scala.

| CODIFICA RAUMBUCH COLLEGAMENTI VERTICALI – IDENTIFICAZIONE DELL'ELEMENTO | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Edificio** | **Codice stanza/unità** | **Codice elemento** | **Tipo** | **Codifica tipologia** | **Descrizione** |
| 3S | 3S_00_000 | 00_000_01 | Cv | Cv _01a | Collegamento verticale in acciaio, 22 gradini, alzata 0,15 m pedata 0,30 m |
| 3S | 3S_00_064 | 00_064_01 | Cv | Cv _02a | Collegamento verticale con rivestimento in moquette nero, 17 gradini, alzata 0,15 m, pedata 0,30 m |
| 3S | 3S_00_057 | 00_057_01 | Cv | Cv _02b | Collegamento verticale con rivestimento in legno, 10 gradini, alzata 0,16 m, pedata 0,30 m |

*Fig. 29. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare dei collegamenti verticali, esempio di codifica di identificativa dell'elemento.*

### *1.1.4.6 Le opere metalliche*

Le opere metalliche (Om) sono caratterizzate da una serie di elementi funzionali e protettivi, che variano per dimensioni, materiale e utilizzo. Le tipologie individuate sono:

- **Om_01a** – Recinzione metallica esterna, destinata a definire il perimetro e proteggere l'area esterna dell'edificio; realizzata con materiali resistenti per garantire durabilità e sicurezza.
- **Om_01b** – Porta metallica blindata; dimensioni 0,80 × 2,10 m; destinata ad assicurare un elevato livello di protezione per l'accesso a spazi riservati.
- **Om_01c** – Piastra metallica per il passaggio di impianti (cavi, tubazioni e condotti tecnici).
- **Om_01d** – Grata di protezione metallica fissa per infissi esterni.
- **Om_01e** – Grata di protezione metallica fissa per infissi esterni.
- **Om_01f** – Grata metallica apribile per porta di ingresso.
- **Om_01g** – Grata metallica apribile per porta di ingresso.

Gli esiti della catalogazione delle opere metalliche sono riportati solo in forma tabellare nel Raumbuch elaborato su Excel (di cui si riporta un estratto in Fig. 30) e in forma grafica nell'Allegato 9B (Raumbuch delle opere metalliche e dei collegamenti verticali), dove sono indicati anche i codici relativi al piano di riferimento, all'unità e ai numeri progressivi, che consentono l'identificazione univoca di ogni elemento metallico.

| CODIFICA RAUMBUCH OPERE METALLICHE – IDENTIFICAZIONE DELL'ELEMENTO | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Edificio** | **Codice stanza/unità** | **Codice elemento** | **Tipo** | **Codifica tipologia** | **Descrizione** |
| 3S | 3S_00_00 | 000_01 | Om | Om_01a | Recinzione metallica esterna |
| 3S | | | Om | Om_01b | Porta metallica blindata (0,8 x 2,1) |
| 3S | 3S_00_042 | 042_01 | Om | Om_01c | Piastra metallica per passaggio di impianti |
| 3S | 3S_00_007 | 007_01 | Om | Om_01d | Grata di protezione metallica per infissi esterni |
| 3S | 3S_00_037 | 037_01 | Om | Om_01e | Grata di protezione metallica per infissi esterni |
| 3S | 3S_00_054 | 054_01 | Om | Om_01f | Grata metallica apribile per porta di ingresso |
| 3S | 3S_00_061 | 061_01 | Om | Om_01g | Grata di protezione metallica apribile per porta d'ingresso |

*Fig. 30. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sulle opere metalliche, esempio di codifica di identificativa dell'elemento.*

### 1.1.5 L'analisi dei valori

#### *1.1.5.1 Gli infissi*

L'analisi dei valori applicata agli infissi esterni della Palazzina 3S (Fig. 31) evidenzia come tutte le tipologie codificate nel Raumbuch (Ine_01a, Ine_01b, Ine_01c, Ine_02a, Ine_02b, Ine_02c) siano collocate in Fase 3. Tale collocazione cronologica le associa al periodo più recente della storia costruttiva dell'edificio, caratterizzato da interventi successivi alla fase originaria e privi di particolare significatività dal punto di vista storico–artistico.
La valutazione dell'interesse riportata come "Ni" (nessun interesse) conferma che questi elementi non presentano un valore storico, architettonico o testimoniale tale da richiederne la tutela conservativa. Si tratta, di infissi di sostituzione, realizzati con materiali e tecniche contemporanee (alluminio), non coerenti con le caratteristiche tipologiche e materiche originarie dell'edificio.
Il grado di trasformabilità attribuito, pari a 2, è coerente con questa valutazione: esso indica elementi privi di un interesse storico specifico ma compatibili e integrati dal punto di vista funzionale, per i quali sono ammissibili interventi di modifica o sostituzione, a condizione che tali operazioni non compromettano la coerenza complessiva del manufatto.
L'esito dell'analisi per gli infissi esterni della Palazzina 3S suggerisce la possibilità di sostituzione o adeguamento tecnico-prestazionale, con l'obiettivo di migliorarne l'efficienza energetica e funzionale, eventualmente reintroducendo soluzioni più coerenti con l'aspetto originario dell'edificio e con il contesto storico di appartenenza.
Per quanto riguarda gli infissi interni (Fig. 32), l'analisi restituisce esiti del tutto analoghi. Tutte le tipologie registrate nel Raumbuch (Ini_01a, Ini_01b, Ini_01c, Ini_02a) sono collocate in Fase 3 e valutate come "Ni", in quanto si tratta di elementi di sostituzione recente, realizzati in legno lamellare o alluminio, privi di caratteri tipologici o costruttivi riconducibili alle fasi storicizzate dell'edificio. Anche in questo caso il grado di trasformabilità attribuito è 2, consentendo modifiche o sostituzioni purché compatibili con il contesto e rispettose della coerenza architettonica complessiva.
Questa condizione apre alla possibilità di interventi mirati al miglioramento funzionale e prestazionale, valutando soluzioni che possano richiamare maggiormente i caratteri originari e contribuire alla valorizzazione complessiva degli spazi interni.

| RAUMBUCH INFISSI ESTERI – ANALISI DEI VALORI | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Edificio** | **Codifica tipologia** | **Cronologia** | **Valutazione dell'interesse** | **Grado di trasformabilità** |
| 3S | Ine_01a | Fase 3 | Ni | 2 |
| 3S | Ine_01b | Fase 3 | Ni | 2 |
| 3S | Ine_01c | Fase 3 | Ni | 2 |
| 3S | Ine_02a | Fase 3 | Ni | 2 |
| 3S | Ine_02b | Fase 3 | Ni | 2 |
| 3S | Ine_02c | Fase 3 | Ni | 2 |

*Fig. 31. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sull'analisi dei valori degli infissi esterni.*

| RAUMBUCH INFISSI INTERNI – ANALISI DEI VALORI | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Edificio** | **Codifica tipologia** | **Cronologia** | **Valutazione dell'interesse** | **Grado di trasformabilità** |
| 3S | Ini_01a | Fase 3 | Ni | 2 |
| 3S | Ini_01b | Fase 3 | Ni | 2 |
| 3S | Ini_01c | Fase 3 | Ni | 2 |
| 3S | Ini_02a | Fase 3 | Ni | 2 |

*Fig. 32. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sull'analisi dei valori degli infissi interni.*

### *1.1.5.2 Le murature*

L'analisi dei valori relativa alle murature esterne (Mue_01a) della Palazzina 3S (Fig. 33) evidenzia la loro collocazione in Fase 1, corrispondente al periodo originario di costruzione dell'edificio. La valutazione attribuita (Isc, interesse storico–costruttivo) e il grado di trasformabilità 0 indicano che tali elementi costituiscono una parte fondamentale e autentica del manufatto, da preservare integralmente. La loro conservazione è prioritaria, poiché rappresentano una testimonianza materiale della tecnica costruttiva dell'epoca e contribuiscono in modo determinante alla lettura storica e architettonica del complesso.

Per quanto riguarda le murature interne, la situazione è più articolata (Fig. 34):

- **Mui_01a** (muratura portante interna in pietra cantone) appartiene anch'essa alla Fase 1, presenta un interesse storico–costruttivo (*Isc*) e un grado di trasformabilità 0, con conseguente necessità di tutela integrale.
- **Mui_02a** e **Mui_02b**, rispettivamente muratura in laterizio semipieno (0,2 m) e parete in cartongesso (0,1 m), sono collocate in Fase 2, senza interesse specifico (*Ni*) e con grado di trasformabilità 2; ciò le rende modificabili o sostituibili, purché gli interventi non compromettano la coerenza complessiva dell'edificio.
- **Mui_02c**, muratura in laterizio semipieno da 0,37 m, è di Fase 3, priva di interesse (*Ni*) e con grado di trasformabilità 2, confermando la sua natura recente e non vincolata.

L'esito dell'analisi individua nelle murature portanti originarie (esterne e interne) gli elementi di maggior pregio, per i quali si raccomanda la conservazione integrale. Le restanti tipologie, prive di valore storico, possono essere oggetto di interventi di adeguamento tecnico e funzionale, nel rispetto della coerenza complessiva del manufatto.

| RAUMBUCH MURI ESTERI – ANALISI DEI VALORI | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Edificio** | **Codifica tipologia** | **Cronologia** | **Valutazione dell'interesse** | **Grado di trasformabilità** |
| 3S | Mue_01a | Fase 1 | Isc | 0 |

*Fig. 33. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sull'analisi dei valori dei muri esterni.*

| RAUMBUCH MURI INTERNI – ANALISI DEI VALORI | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Edificio** | **Codifica tipologia** | **Cronologia** | **Valutazione dell'interesse** | **Grado di trasformabilità** |
| 3S | Mui_01a | Fase 1 | Isc | 0 |
| 3S | Mui_02a | Fase 2 | Ni | 2 |
| 3S | Mui_02b | Fase 2 | Ni | 2 |
| 3S | Mui_02c | Fase 3 | Ni | 2 |

*Fig. 34. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sull'analisi dei valori dei muri interni.*

### *1.1.5.3 I solai e i pavimenti*

L'analisi dei valori per il pacchetto solaio/pavimento della Palazzina 3S (Fig. 35) evidenzia come, in tutti i casi, le componenti (So_01a; So_01b; So_02a; So_03a; So_03b) risultino prive di interesse storico (*Ni*).
I solai, pur appartenendo alla Fase 2, sono costituiti da laterizio semipieno e getto di completamento in calcestruzzo, una tipologia costruttiva standard e priva di particolari elementi di pregio, riconducibile a interventi successivi alla costruzione originaria.
I pavimenti, invece, appartengono alla Fase 3 e sono anch'essi privi di interesse (*Ni*), trattandosi di finiture di sostituzione recente, non collegate alle fasi storicizzate dell'edificio.
Per entrambe le componenti è stato attribuito un grado di trasformabilità 2, che consente interventi di sostituzione o modifica senza particolari vincoli, a condizione che le soluzioni adottate siano compatibili con il contesto architettonico e non compromettano la lettura complessiva del manufatto.

| RAUMBUCH SOLAI E PAVIMENTI – ANALISI DEI VALORI | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Edificio** | **Codifica tipologia** | **Cronologia** | **Valutazione dell'interesse** | **Grado di trasformabilità** |
| 3S | So _01a | S: Fase 2<br>P: Fase 3 | S: Ni<br>P: Ni | 2 |
| 3S | So _01b | S: Fase 2<br>P: Fase 3 | S: Ni<br>P: Ni | 2 |
| 3S | So _02a | S: Fase 2<br>P: Fase 3 | S: Ni<br>P: Ni | 2 |
| 3S | So _03a | S: Fase 2<br>P: Fase 3 | S: Ni<br>P: Ni | 2 |
| 3S | So_03b | S: Fase 2<br>P: Fase 3 | S: Ni<br>P: Ni | 2 |

*Fig. 35. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sull'analisi dei valori del pacchetto solai/ pavimenti.*

### *1.1.5.5 Collegamenti verticali*

L'analisi dei valori relativa ai collegamenti verticali (Cv_01a; Cv_02a; Cv02b) della Palazzina 3S (Fig. 36) evidenzia la loro collocazione in Fase 3, corrispondente al periodo più recente della storia costruttiva dell'edificio. La valutazione dell'interesse evidenzia per Cv_01a la dicitura "Ei" (*elemento incongruo*), con un grado di trasformabilità pari a 3, che ne ammette la rimozione o sostituzione senza pregiudizio per il valore storico–culturale complessivo.
Per Cv_02a e Cv_02b, la valutazione è "Ni" (*nessun interesse*), con un grado di trasformabilità pari a 2, che consente interventi di modifica o sostituzione.
L'esito dell'analisi indica che l'eventuale sostituzione di tali elementi può essere orientata verso soluzioni più coerenti, che guardino soprattutto al miglioramento dell'accessibilità degli spazi.

| RAUMBUCH COLLEGAMENTI VERTICALI – ANALISI DEI VALORI | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Edificio** | **Codifica tipologia** | **Cronologia** | **Valutazione dell'interesse** | **Grado di trasformabilità** |
| 3S | Cv_01a | Fase 3 | Ei | 3 |
| 3S | Cv_02a | Fase 3 | Ni | 2 |
| 3S | Cv_02b | Fase 3 | Ni | 2 |

*Fig. 36. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sull'analisi dei valori dei collegamenti verticali.*

### *1.1.5.6 Opere metalliche*

L'analisi dei valori relativa alle opere metalliche della Palazzina 3S (Fig. *37*) evidenzia come tutte le tipologie individuate nel Raumbuch (Om_01a, Om_01b, Om_01c, Om_01d, Om_01e, Om_01f, Om_01g) siano collocate in Fase 2**,** ovvero interventi successivi alla costruzione originaria ma antecedenti alle modifiche più recenti. Tali elementi, installati con finalità di sicurezza, protezione o adeguamento tecnico, non presentano caratteristiche formali o materiche di particolare rilevanza storico–artistica.

La valutazione dell'interesse, riportata come "Ni" (*nessun interesse*), conferma l'assenza di valore culturale tale da richiederne la conservazione obbligata. Nello specifico:

- **Om_01a** (recinzione metallica esterna), **Om_01b** (porta metallica blindata) e **Om_01c** (piastra metallica per passaggio di impianti) presentano un grado di trasformabilità pari a 2, che ne consente la modifica o sostituzione con soluzioni compatibili e integrate nel contesto.
- **Om_01d** e **Om_01e** (grate di protezione per infissi esterni) e **Om_01f** e **Om_01g** (grate metalliche apribili per porte di ingresso) sono caratterizzati da un grado di trasformabilità pari a 3, in quanto elementi considerati incongrui rispetto al manufatto storico.

L'esito dell'analisi consente pertanto di prevedere interventi finalizzati al miglioramento della funzionalità e della sicurezza, privilegiando soluzioni che rispettino il linguaggio architettonico complessivo dell'edificio e il contesto storico di riferimento.

| RAUMBUCH OPERE METALLICHE – ANALISI DEI VALORI | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Edificio** | **Codifica tipologia** | **Cronologia** | **Valutazione dell'interesse** | **Grado di trasformabilità** |
| 3S | Om_01a | Fase 2 | Ni | 2 |
| 3S | Om_01b | Fase 2 | Ni | 2 |
| 3S | Om_01c | Fase 2 | Ni | 2 |
| 3S | Om_01d | Fase 2 | Ni | 3 |
| 3S | Om_01e | Fase 2 | Ni | 3 |
| 3S | Om_01f | Fase 2 | Ni | 3 |
| 3S | Om_01g | Fase 2 | Ni | 3 |

*Fig. 37. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sull'analisi dei valori delle opere metalliche.*

### 1.1.6 L'analisi della consistenza

#### *1.1.6.1 Gli infissi*

Per ragioni di sintesi, si riporta di seguito l'analisi della consistenza relativa a un caso rappresentativo di infisso esterno e a uno di infisso interno. Per la documentazione completa si rimanda al Raumbuch (allegato 6C per gli infissi esterni e 6D per gli infissi interni).

**Infisso esterno Ine_02b**

L'infisso codificato come Ine_02b si presenta in discreto stato di conservazione, senza compromissioni materiche o deformazioni evidenti. Lo stato di conservazione è stato classificato come 0 (non compromesso), a conferma dell'assenza di degrado fisico rilevante.

Dal punto di vista delle prestazioni:

- Efficienza meccanica (EM): 3, efficiente, con piena funzionalità dei meccanismi di apertura e chiusura;
- Efficienza termica (ET): 1, parzialmente inefficiente, poiché l'infisso non assicura prestazioni di isolamento adeguate e risulta carente dal punto di vista energetico;
- Efficienza funzionale (EF): 3, efficiente, garantendo un utilizzo regolare.

La valutazione della gravità dell'inefficienza generale è pari a 2 (media), indicando che, pur non compromettendo la funzionalità complessiva, le carenze prestazionali incidono sulla qualità energetica e sull'adeguatezza dell'infisso. La categoria di danno attribuita è G.5 – uso improprio, riconducibile a un utilizzo non coerente con i criteri originari dell'edificio. La diffusione del fenomeno interessa il 100% della superficie dell'infisso (pari a circa 4 m²), ma la gravità del danno è valutata pari a 1 (bassa). L'urgenza dell'intervento è pari a 2 (media), suggerendo la necessità di programmare operazioni di sostituzione o miglioramento in tempi medio-brevi, al fine di garantire prestazioni più adeguate alle esigenze attuali.

| RAUMBUCH INFISSI ESTERNI – ANALISI DELLA CONSISTENZA | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Descrizione stato di conservazione** | **Codifica stato di conservazione** | **Compromissione materica** | **Lacuna** | **EM** | **ET** | **EF** |
| L'infisso si presenta in buono stato di conservazione, privo di fenomeni di degrado visibili o compromissioni materiche | 0 | no | no | 3 | 1 | 3 |

| RAUMBUCH INFISSI ESTERNI – ANALISI DELLA CONSISTENZA | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Gravità dell'inefficienza generale** | **Categoria di danno specifica** | **Causa del danno** | **Diffusione del danno (%)** | **Estensione del danno (mq)** | **Gravità del danno** | **Urgenza dell'intervento** |
| 2 | G.5 | / | 100% | 4 | 1 | 2 |

*Fig. 38. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sull'analisi degli infissi esterni.*

**Infisso interno Ini_01a**

L'infisso codificato come Ini_01a si presenta in buono stato di conservazione, privo di fenomeni di degrado visibili o compromissioni materiche. Lo stato di conservazione è stato classificato come 0 (non compromesso), a conferma dell'integrità fisica del manufatto.

Dal punto di vista delle prestazioni:

- Efficienza meccanica (EM): 3, efficiente, con piena funzionalità dei meccanismi di apertura e chiusura;

- Efficienza termica (ET): 2, lievemente inefficiente, in quanto le prestazioni di isolamento risultano inferiori agli standard attuali;
- Efficienza funzionale (EF): 3, efficiente, garantendo un utilizzo regolare.

La valutazione della gravità dell'inefficienza generale è pari a 1 (bassa), riconducibile alle modeste carenze prestazionali di tipo energetico, mentre non sono state identificate categorie specifiche di danno (N.C. – non classificato).
La diffusione del fenomeno interessa il 100% della superficie dell'infisso (pari a circa 4 m²), ma la gravità del danno è valutata pari a 1 (bassa), limitata a eventuali operazioni di manutenzione programmata o sostituzione futura in ottica di adeguamento prestazionale.

| RAUMBUCH INFISSI INTERNI – ANALISI DELLA CONSISTENZA | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Descrizione stato di conservazione** | **Codifica stato di conservazione** | **Compromissione materica** | **Lacuna** | **EM** | **ET** | **EF** |
| L'infisso si presenta in buono stato di conservazione, privo di fenomeni di degrado visibili o compromissioni materiche | 0 | no | no | 3 | 2 | 3 |

| RAUMBUCH INFISSI INTERNI – ANALISI DELLA CONSISTENZA | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Gravità dell'inefficienza generale** | **Categoria di danno specifica** | **Causa del danno** | **Diffusione del danno (%)** | **Estensione del danno (mq)** | **Gravità del danno** | **Urgenza dell'intervento** |
| 1 | / | / | 100% | 1.68 | 1 | 1 |

*Fig. 39. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sull'analisi degli infissi interni.*

### *1.1.6.2 Le murature*

Per ragioni di sintesi, si riporta di seguito l'analisi della consistenza relativa a un caso rappresentativo di muratura esterna e a uno di muratura interna. Per la documentazione completa si rimanda al Raumbuch in formato tabellare elaborato su Excel (allegato 7C per le murature esterne e 7D per le murature interne).

**Muratura esterna Mue_01a**

L'elemento in muratura codificato come Mue_01a presenta fenomeni di degrado superficiale riconducibili principalmente a lesioni, distacchi localizzati dell'intonaco e presenza di patina biologica.
Lo stato di conservazione è stato classificato come 1a (*fenomeni di umidità e di lieve entità*), in quanto il degrado risulta diffuso ma non compromette in maniera significativa le caratteristiche meccaniche della struttura.

Dal punto di vista delle prestazioni:

- Efficienza meccanica (EM): 3, efficiente, in quanto la muratura conserva la capacità portante.
- Efficienza termica (ET): 3, efficiente, non essendo presenti difetti tali da ridurne sensibilmente le prestazioni.
- Efficienza funzionale (EF): 4, efficiente.

La valutazione della gravità dell'inefficienza generale è 0 (*nessuna inefficienza rilevante*), mentre non sono state rilevate compromissioni materiche o lacune strutturali.
Le categorie di danno identificate sono:

- A3.1 – lesioni/spaccature/fori/gallerie;
- C.1.1 – infiltrazioni;
- D.1 – microflora (alghe, funghi, licheni, muschi);
- E.3.3 – alterazioni cromatiche/pigmentarie.

La diffusione del danno è stimata tra il 10% e il 30% della superficie, mentre l'estensione puntuale non è stata misurata in mq data la frammentarietà delle manifestazioni. La gravità del danno e l'urgenza dell'intervento sono entrambe valutate pari a 1 (*bassa*), il che indica la possibilità di programmare un intervento di manutenzione ordinaria e pulitura in tempi non immediati.
La causa principale del degrado è stata ricondotta a mancata o scarsa manutenzione e aggressione ambientale, con infiltrazioni superficiali che hanno favorito lo sviluppo di microflora e alterazioni cromatiche.

| RAUMBUCH MURI ESTERI – ANALISI DELLA CONSISTENZA | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Descrizione stato di conservazione** | **Codifica stato di conservazione** | **Compromissione materica** | **Lacuna** | **EM** | **ET** | **EF** |
| L'elemento in muratura presenta lesioni superificiali, distacco di intonaco in più punti e patina biologica | 1a | no | no | 3 | 3 | 4 |

| RAUMBUCH MURI ESTERI – ANALISI DELLA CONSISTENZA | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Gravità dell'inefficienza generale** | **Categoria di danno specifica** | **Causa del danno** | **Diffusione del danno (%)** | **Estensione del danno (mq)** | **Gravità del danno** | **Urgenza dell'intervento** |
| 0 | A3.1 C.1.1 D.1 E.3.3 | 1 | dal 10% a 30% | | 1 | 1 |

*Fig. 40. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sull'analisi dei valori dei muri esterni.*

Muratura interna Mui_01a

L'elemento in muratura codificato come Mui_01a si presenta in buono stato di conservazione, privo di fenomeni di degrado visibili o alterazioni significative.
Lo stato di conservazione è stato classificato come 0 (non compromesso), in quanto non si rilevano fenomeni di umidità, distacchi, lesioni o altre patologie edilizie.

Dal punto di vista delle prestazioni:

- Efficienza meccanica (EM): 3, efficiente, la muratura mantiene integralmente la capacità portante.
- Efficienza termica (ET): 3, efficiente, senza segni di dispersioni o difetti che possano ridurne le prestazioni.
- Efficienza funzionale (EF): 4, efficiente, con piena rispondenza alle funzioni richieste.

La valutazione della gravità dell'inefficienza generale è 0 (nessuna inefficienza rilevante), e non sono presenti compromissioni materiche o lacune.
Non sono state identificate categorie di danno né cause di degrado (N.I. – non individuato), a conferma della piena integrità dell'elemento.
La diffusione del danno è pari allo 0% e l'urgenza di intervento è classificata come 1 (bassa), limitandosi a eventuali attività di monitoraggio periodico e manutenzione preventiva per preservare lo stato attuale.

| RAUMBUCH MURI INTERNI – ANALISI DELLA CONSISTENZA | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Descrizione stato di conservazione | Codifica stato di conservazione | Compromissione materica | Lacuna | EM | ET | EF |
| L'elemento in muratura si presenta in buono stato di conservazione | 0 | no | no | 3 | 3 | 4 |

| RAUMBUCH MURI INTERNI – ANALISI DELLA CONSISTENZA | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Gravità dell'inefficienza generale | Categoria di danno specifica | Causa del danno | Diffusione del danno (%) | Estensione del danno (mq) | Gravità del danno | Urgenza dell'intervento |
| 0 | N.I. | N.I. | N.I. | N.I. | N.I. | 1 |

*Fig. 41. Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, estratto dal Raumbuch in formato tabellare sull'analisi dei valori dei muri interni.*

## 1.2 LA MODELLAZIONE HBIM

### 1.2.1 Dal Raumbuch al BIM

#### *1.2.1.1 La codifica dei dati*

Dopo aver illustrato le potenzialità del Raumbuch come strumento di organizzazione sistematica delle informazioni, questo capitolo approfondisce la trasposizione dei dati all'interno del modello BIM. La codifica, inizialmente elaborata nel file Excel del Raumbuch, è stata concepita per integrarsi direttamente nel processo di modellazione HBIM. I dati sono stati quindi trasferiti nel modello digitale, associando la codifica a ciascun elemento costruttivo e inserendo le caratteristiche tipologiche nelle proprietà dell'oggetto parametrico. In questo modo si garantisce continuità tra le fasi di rilievo e conoscenza e quelle di digitalizzazione e gestione in ambiente BIM.
La classificazione degli elementi elaborata nel Raumbuch è stata direttamente trasposta nel modello HBIM della Palazzina Comando. A ciascun elemento è stato associato un campo parametrico denominato "Codifica Raumbuch", che ha permesso di mantenere la corrispondenza univoca tra la schedatura tabellare e la rappresentazione digitale.
Le proprietà tipologiche — quali codice di categoria (es. Ine/Ini), codice tipologia (es. Ine_01a, Ini_01b) e dimensioni caratteristiche — sono state inserite nelle famiglie parametriche degli oggetti BIM, così da consentire un'immediata interrogazione del modello. Questo approccio garantisce una piena interoperabilità dei dati, permettendo di:

- riconoscere con un solo click la tipologia di elemento modellata;
- accedere direttamente alle informazioni contenute nel Raumbuch (dimensioni, materiali, stato di conservazione, valutazioni di interesse e trasformabilità);
- esportare i dati in formati compatibili con software di analisi energetica.

In termini grafici, la modellazione ha rispettato la morfologia e le dimensioni rilevate, senza però entrare nel dettaglio costruttivo minuto: l'obiettivo non era infatti quello di realizzare un modello esecutivo, ma piuttosto un modello informativo a supporto delle fasi di analisi e gestione.
L'uso della codifica univoca, mantenuta costante tra Raumbuch e HBIM, ha permesso di costruire un sistema informativo integrato, dove ogni infisso è al contempo un oggetto geometrico e un contenitore di informazioni, interrogabile e aggiornabile in funzione delle esigenze conoscitive e progettuali future.

#### *La codifica degli infissi*

Il presente capitolo mostra gli esiti dell'analisi condotta sugli infissi della Palazzina Comando. Come descritto nei capitoli precedenti, gli infissi sono stati ricondotti a due macro-categorie principali: infissi esterni (Ine) e infissi interni (Ini). Ciascuna categoria è stata poi articolata in tipologie, a loro volta suddivise in varianti identificate mediante lettere progressive (a, b, c...), con l'obiettivo di distinguere le differenze dimensionali, materiche e morfologiche riscontrate.
A titolo dimostrativo, si riportano le tipologie di infissi esterni modellate per la creazione del BIM della Palazzina Comando.

## Infissi esterni (Ine)

Gli infissi esterni rilevati nella Palazzina Comando si distinguono principalmente in due gruppi materiali: alluminio e legno, comprendenti sia porte sia finestre. Gli elementi in alluminio, nella quasi totalità dei casi, sono sostituzioni contemporanee, prive di coerenza con i caratteri originari dell'edificio; quelli in legno, invece, risultano in parte coerenti con le tipologie tradizionali, sebbene presentino interventi di modifica o sostituzione.

### Ine_01 – Porte esterne in alluminio

**Ine_01a** – Porta d'ingresso a doppia anta bipartita; dimensioni 4,70 × 3,50 m.

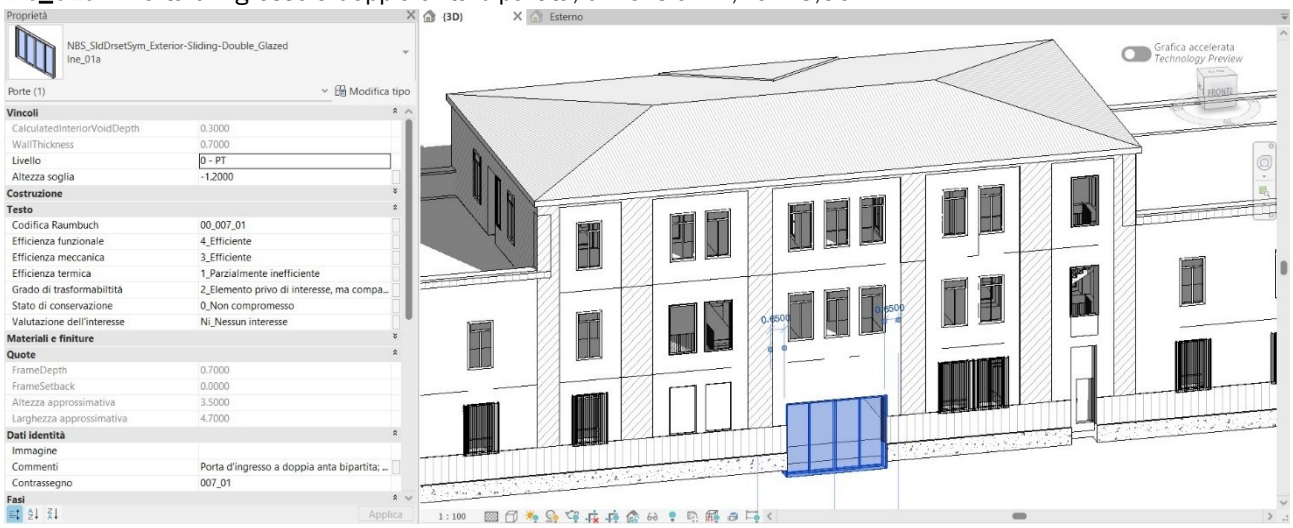



*Fig. 42. Vista 3D del modello HBIM della Palazzina Comando con evidenziata la finestra Ine_01a. Nella finestra delle proprietà si notano i parametri associati: codifica Raumbuch, valori prestazionali (efficienza meccanica, termica e funzionale), stato di conservazione e valutazione dell'interesse.*

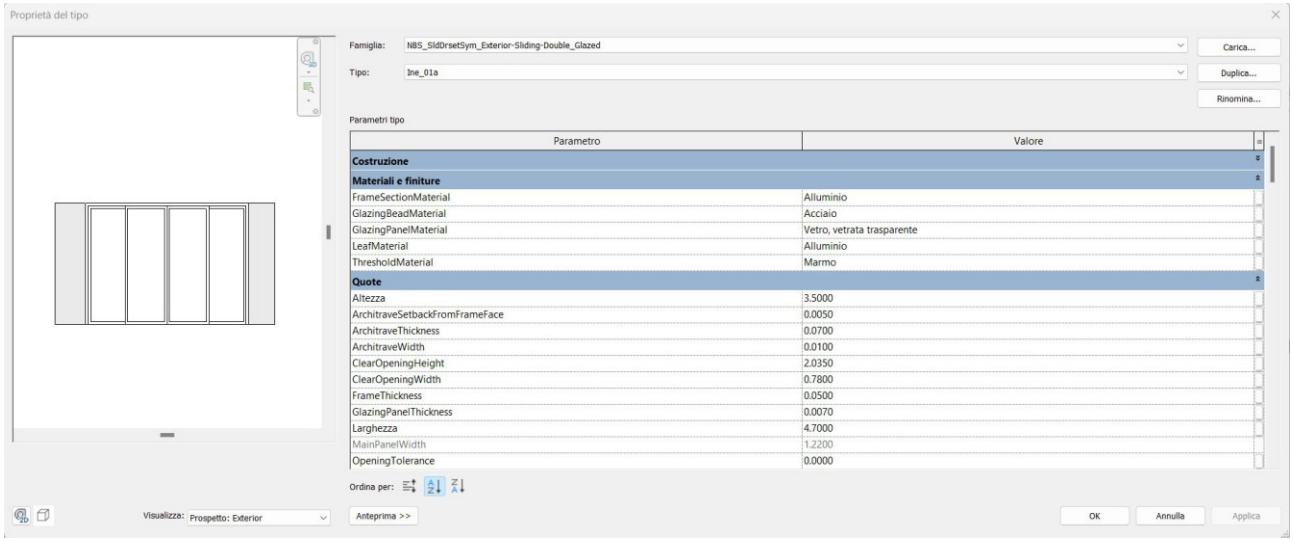



*Fig. 43. Proprietà parametriche della finestra esterna Ine_01a nel modello HBIM. Sono riportate le caratteristiche materiche (alluminio, marmo, vetro), le dimensioni principali e le proprietà analitiche, tra cui il coefficiente di scambio termico.*

## Ine_02 – Finestre esterne in alluminio

**Ine_02a** – Finestra a doppia anta con sopraluce; dimensioni 2,30 × 1,20 m.

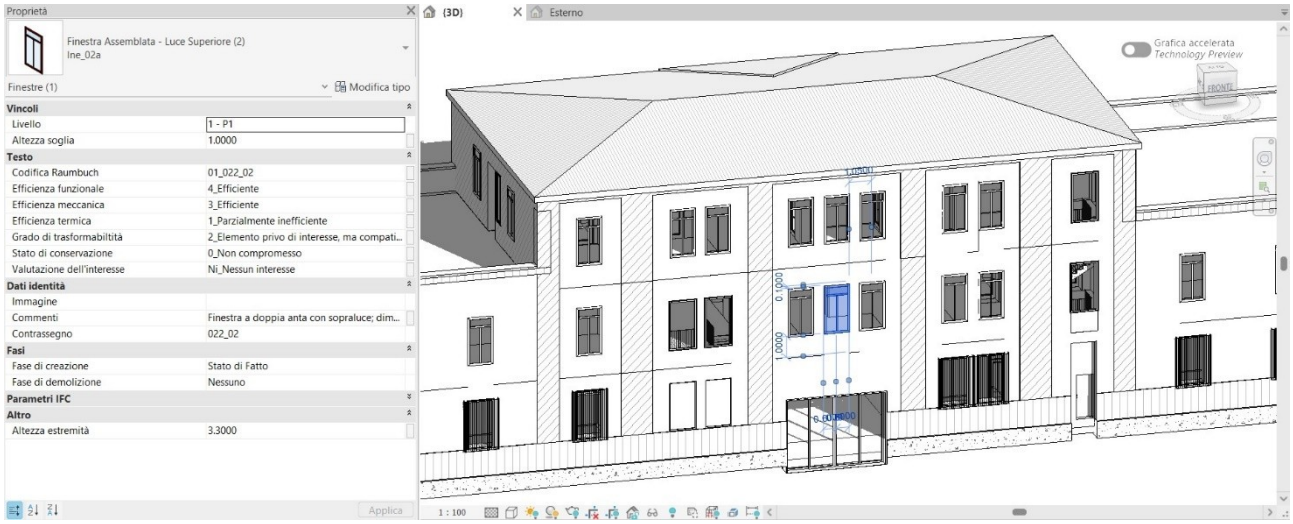



*Fig. 44. Vista 3D del modello HBIM della Palazzina Comando con evidenziata la finestra Ine_02a. Nella finestra delle proprietà si notano i parametri associati: codifica Raumbuch, valori prestazionali, stato di conservazione e valutazione dell'interesse.*

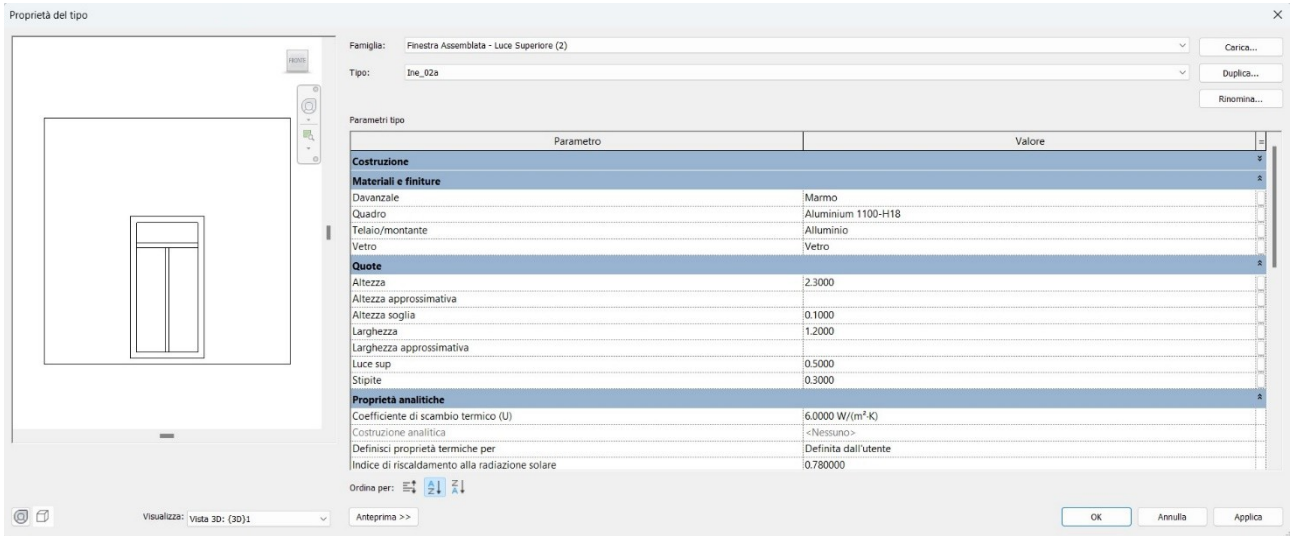



*Fig. 45. Proprietà parametriche della finestra esterna Ine_02a nel modello HBIM. Sono riportate le caratteristiche materiche (alluminio, marmo, vetro), le dimensioni principali e le proprietà analitiche, tra cui il coefficiente di scambio termico.*

**Ine_02c** – Finestra ad anta singola; dimensioni 0,70 x 2x30 m

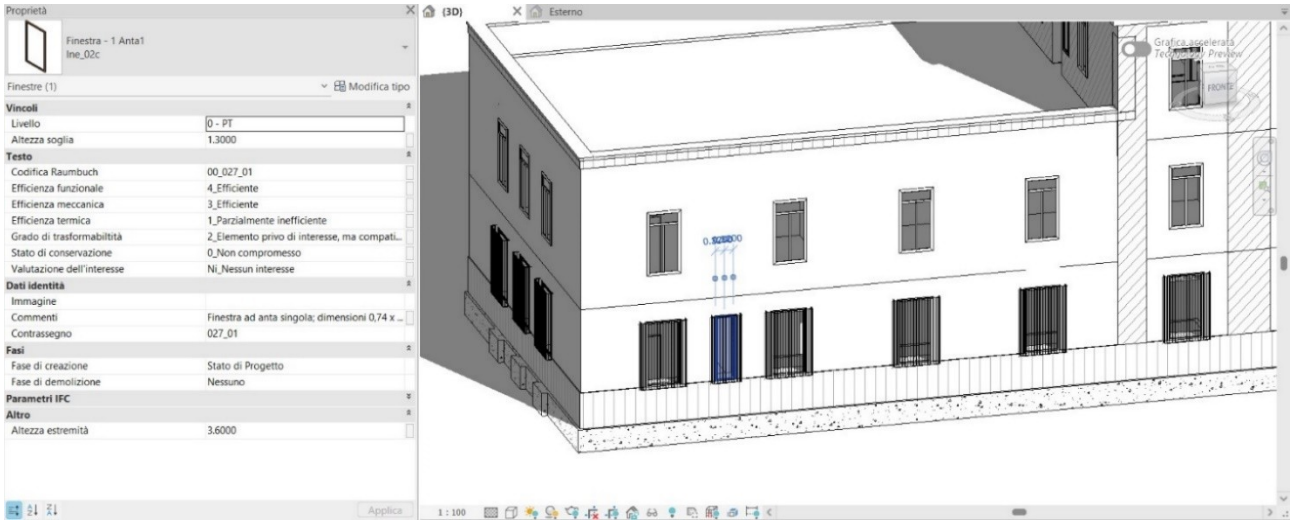



*Fig. 46. Vista 3D del modello HBIM della Palazzina Comando con evidenziata la finestra Ine_02c. Nella finestra delle proprietà si notano i parametri associati: codifica Raumbuch, valori prestazionali, stato di conservazione e valutazione dell'interesse.*

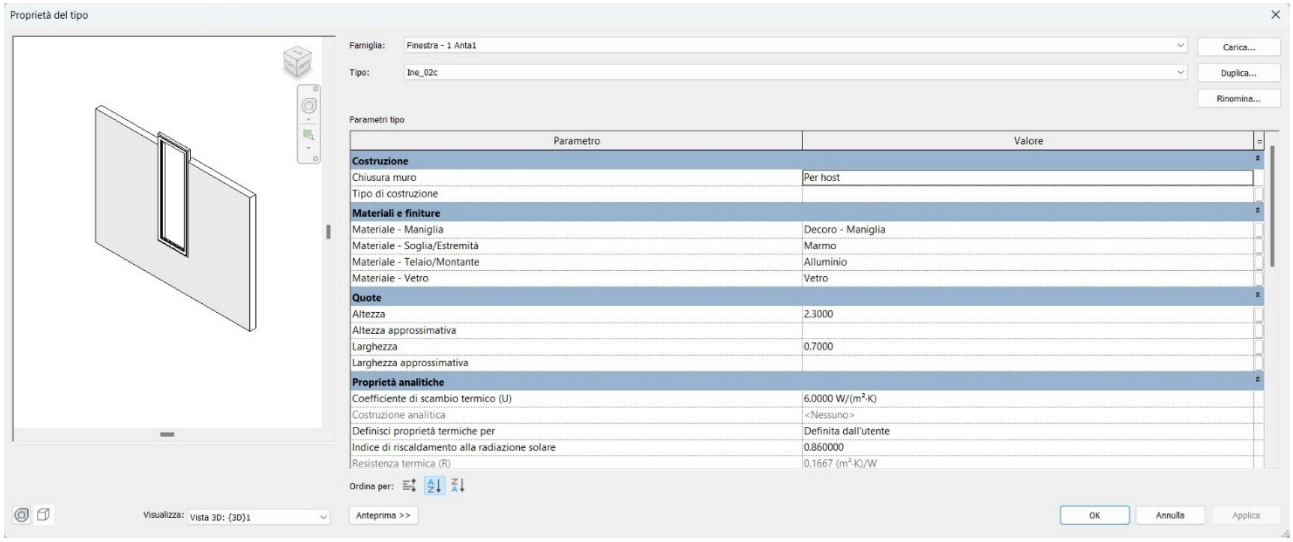



*Fig. 47. Parametri di tipo associati alla finestra Ine_02c nel modello HBIM. Sono riportate le caratteristiche materiche (alluminio, marmo, vetro), le dimensioni principali e le proprietà analitiche, tra cui il coefficiente di scambio termico.*

**Ine_02d** – Finestra quadripartita; dimensioni 2,00 x 2,40 m.

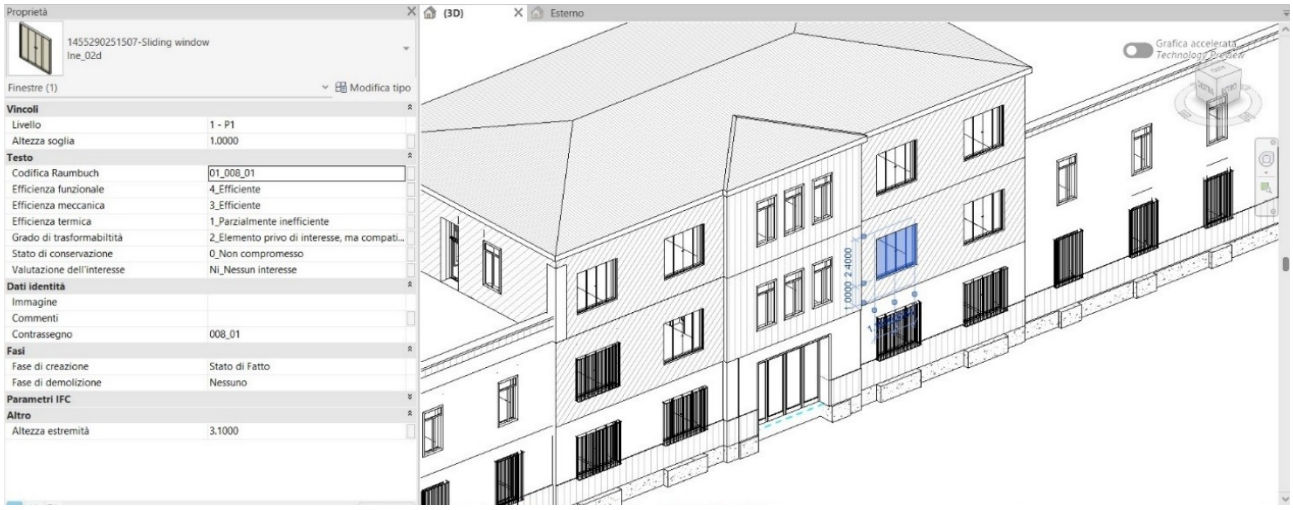



*Fig. 48. Vista 3D del modello HBIM della Palazzina Comando con evidenziata la finestra Ine_02d. Nella finestra delle proprietà si notano i parametri associati: codifica Raumbuch, valori prestazionali, stato di conservazione e valutazione dell'interesse.*

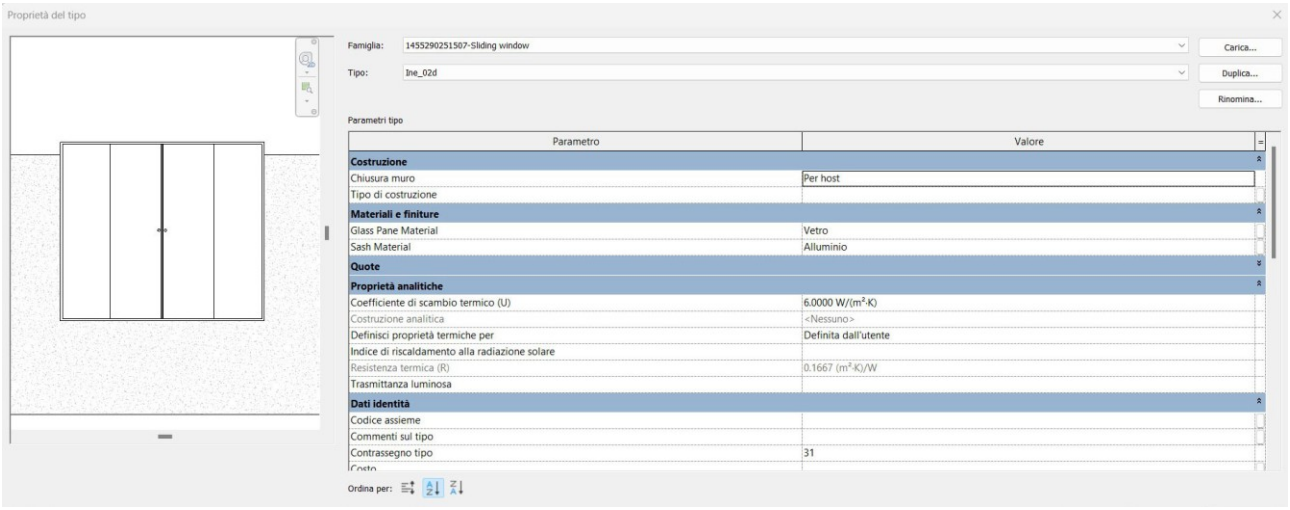



*Fig. 49. Proprietà parametriche della finestra esterna Ine_02d nel modello HBIM. Sono riportate le caratteristiche materiche (alluminio, marmo, vetro), le dimensioni principali e le proprietà analitiche, tra cui il coefficiente di scambio termico.*

*Ine_03 – Porte esterne in legno*

**Ine_03a** – Porta d'ingresso a doppia anta bipartita; dimensioni 3,70 × 3,70 m.




*Fig. 50. Vista 3D del modello HBIM della Palazzina Comando con evidenziata la finestra Ine_03a. Nella finestra delle proprietà si notano i parametri associati: codifica Raumbuch, valori prestazionali, stato di conservazione e valutazione dell'interesse.*

**Ine_03b** – Porta d'ingresso ad anta singola; dimensioni 0,80 × 2,10 m.

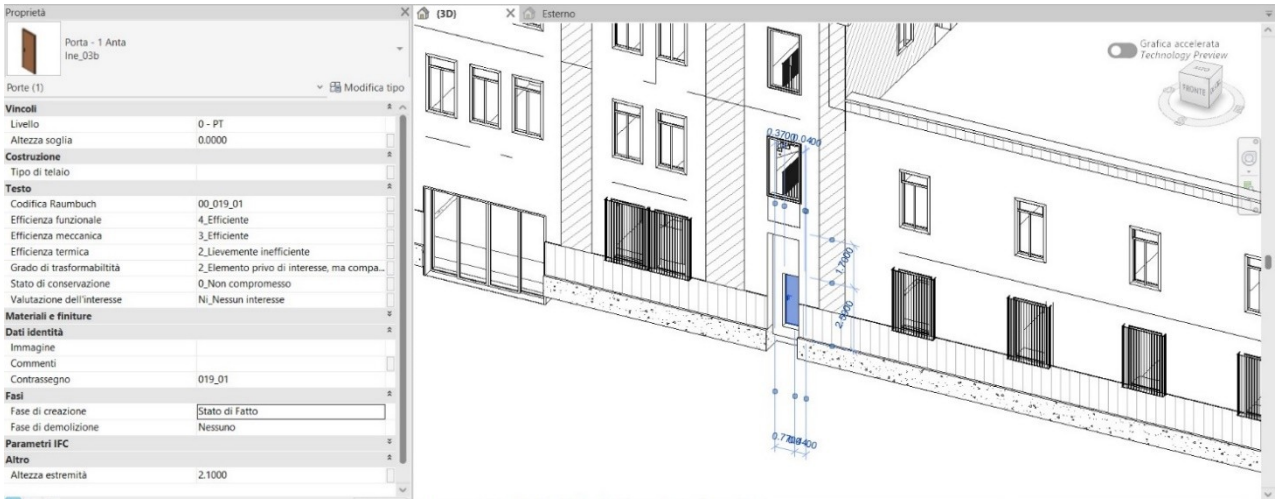



*Fig. 51. Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, infisso esterno in legno del tipo Ine_03b. Schermata acquisita da Autodesk Revit.*

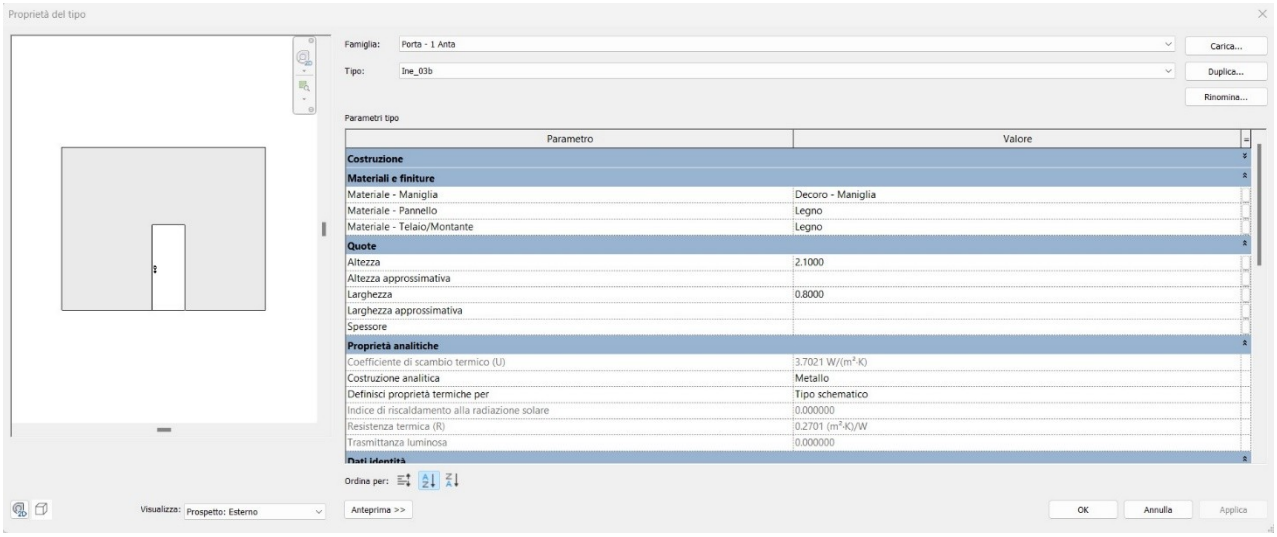



*Fig. 52. Parametri di tipo associati alla finestra Ine_03b nel modello HBIM. Sono riportate le caratteristiche materiche (legno, metallo), le dimensioni principali e le proprietà analitiche, tra cui il coefficiente di scambio termico.*

**Ine_03c** – Porta d'ingresso ad anta singola con pannello vetrato e sopraluce; dimensioni 1,20 × 3,30 m.

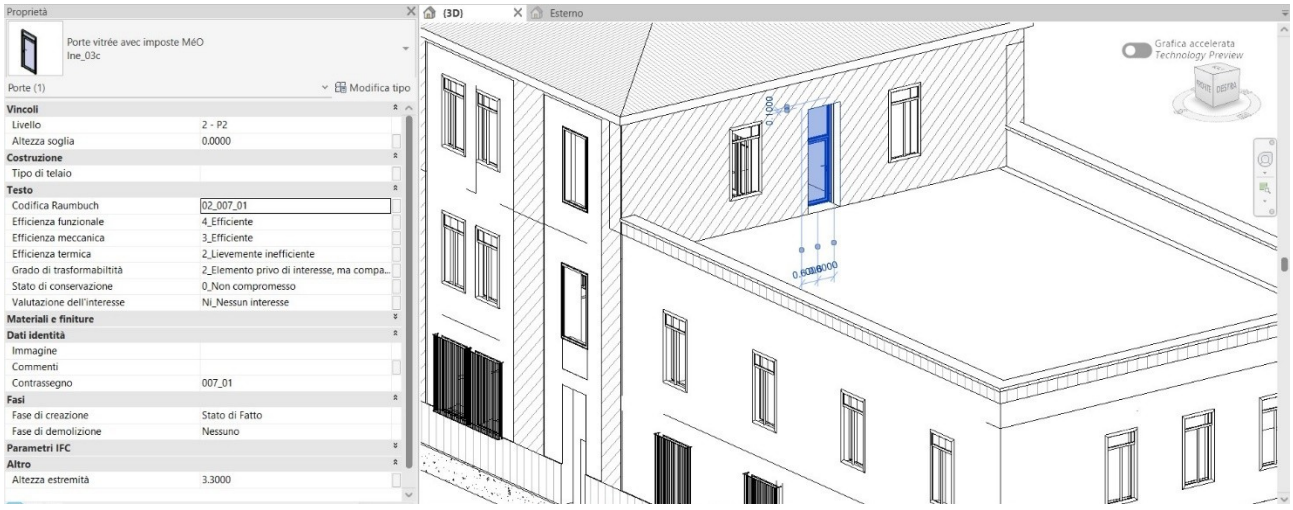



*Fig. 53. Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, infisso esterno in legno del tipo Ine_03c. Schermata acquisita da Autodesk Revit.*

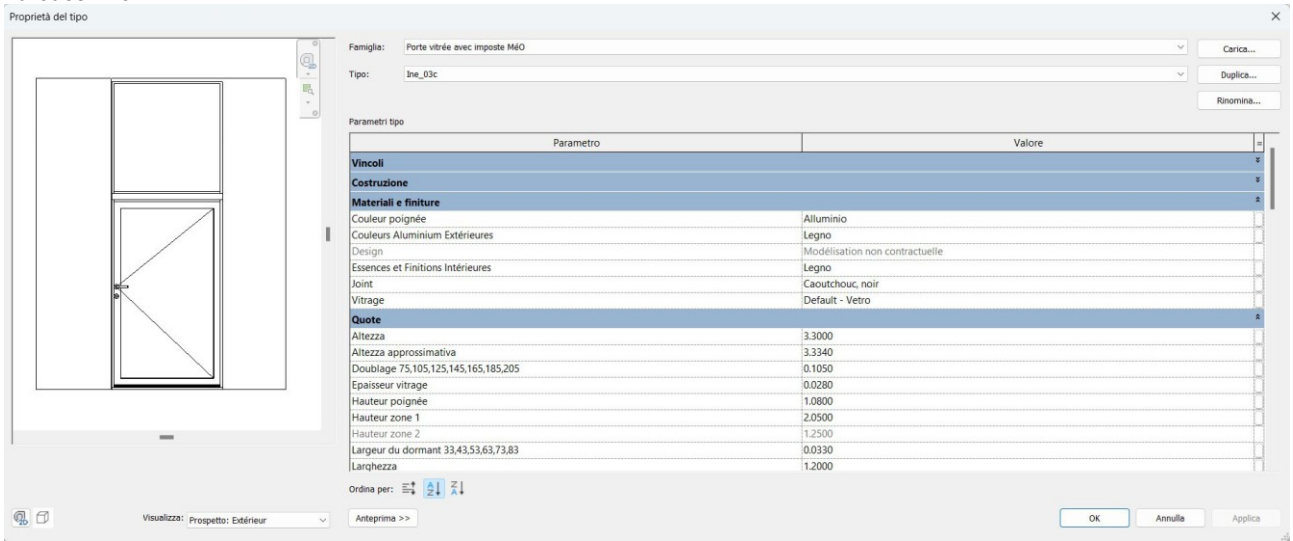



*Fig. 54. Parametri di tipo associati alla finestra Ine_03c nel modello HBIM. Sono riportate le caratteristiche materiche (legno, vetro, metallo), le dimensioni principali e le proprietà analitiche, tra cui il coefficiente di scambio termico.*

## Ine_04 – Finestre esterne in legno

**Ine_04a** – Finestra a doppia anta con sopraluce; dimensioni 2,30 × 1,20 m.

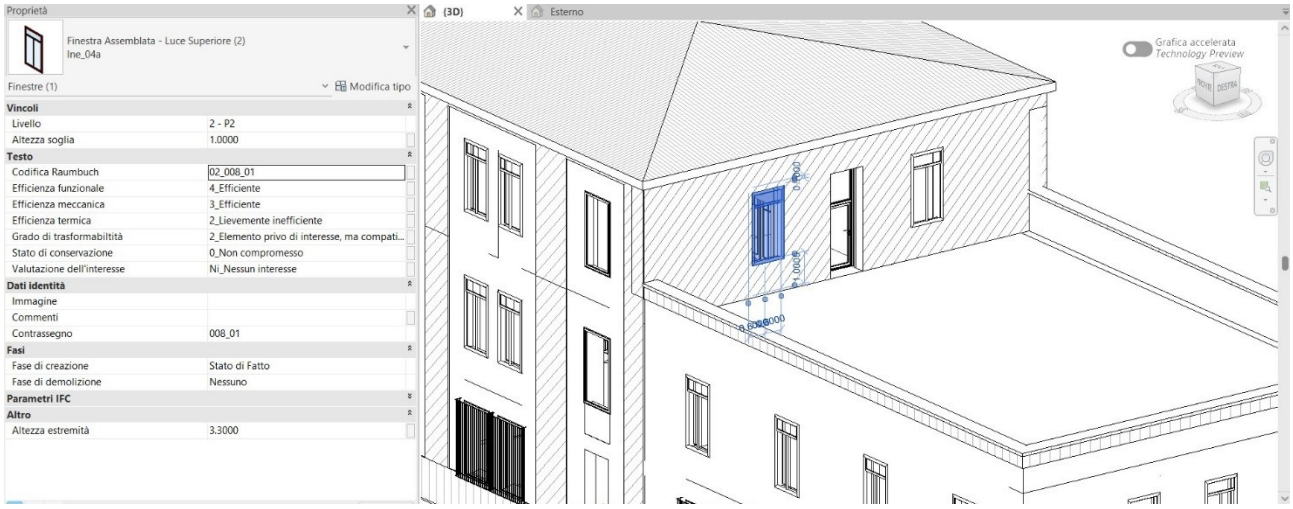



*Fig. 55. Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, infisso esterno in legno del tipo Ine_04a. Schermata acquisita da Autodesk Revit.*

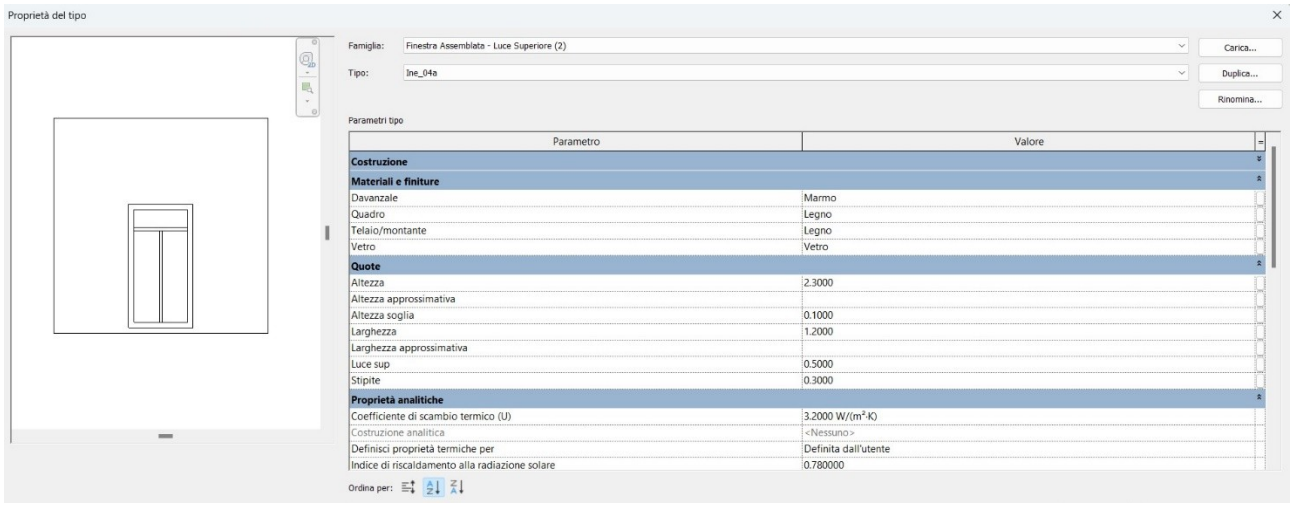



*Fig. 56. Parametri di tipo associati alla finestra Ine_04a nel modello HBIM. Sono riportate le caratteristiche materiche (legno, vetro, metallo), le dimensioni principali e le proprietà analitiche, tra cui il coefficiente di scambio termico.*

**Ine_04b** – Finestra ad anta singola; dimensioni 0,60 × 2,30 m.

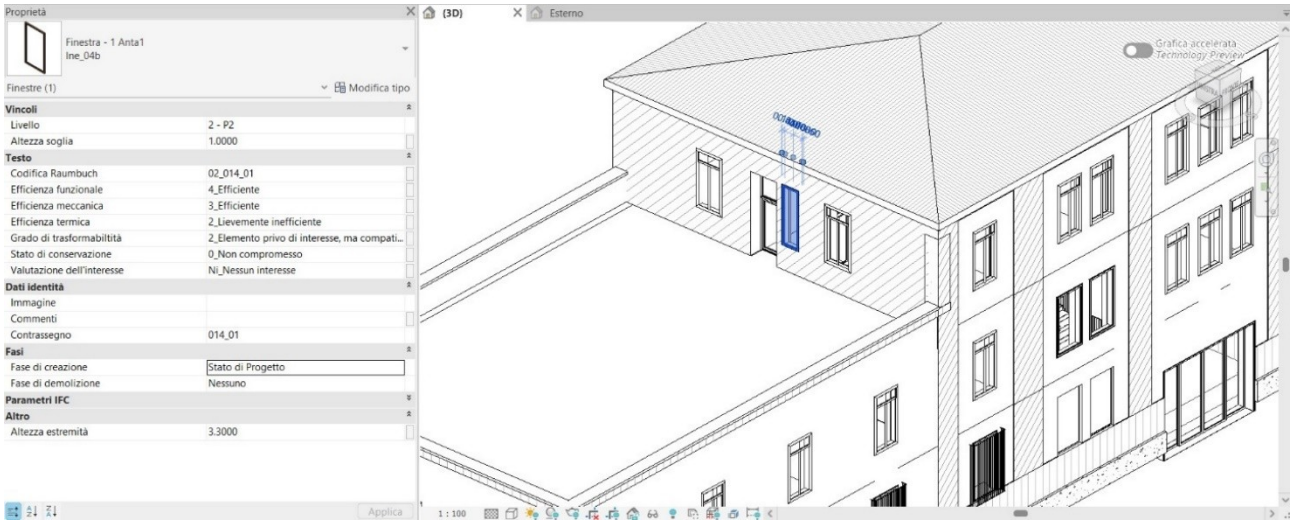



*Fig. 57. Vista 3D del modello HBIM della Palazzina Comando con evidenziata la finestra Ine_04b. Nella finestra delle proprietà si notano i parametri associati: codifica Raumbuch, valori prestazionali, stato di conservazione e valutazione dell'interesse.*

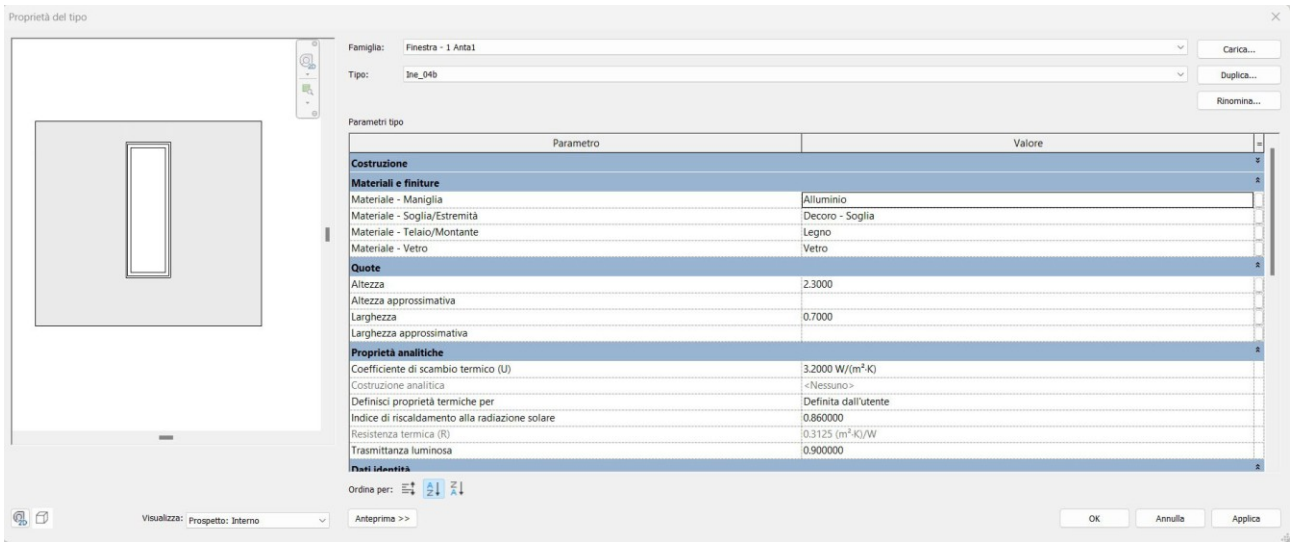



*Fig. 58. Parametri di tipo associati alla finestra Ine_04b nel modello HBIM. Sono riportate le caratteristiche materiche (legno, vetro, metallo), le dimensioni principali e le proprietà analitiche, tra cui il coefficiente di scambio termico.*

**Ine_04d** – Finestra quadripartita; dimensioni 2,00 x 2,40 m.

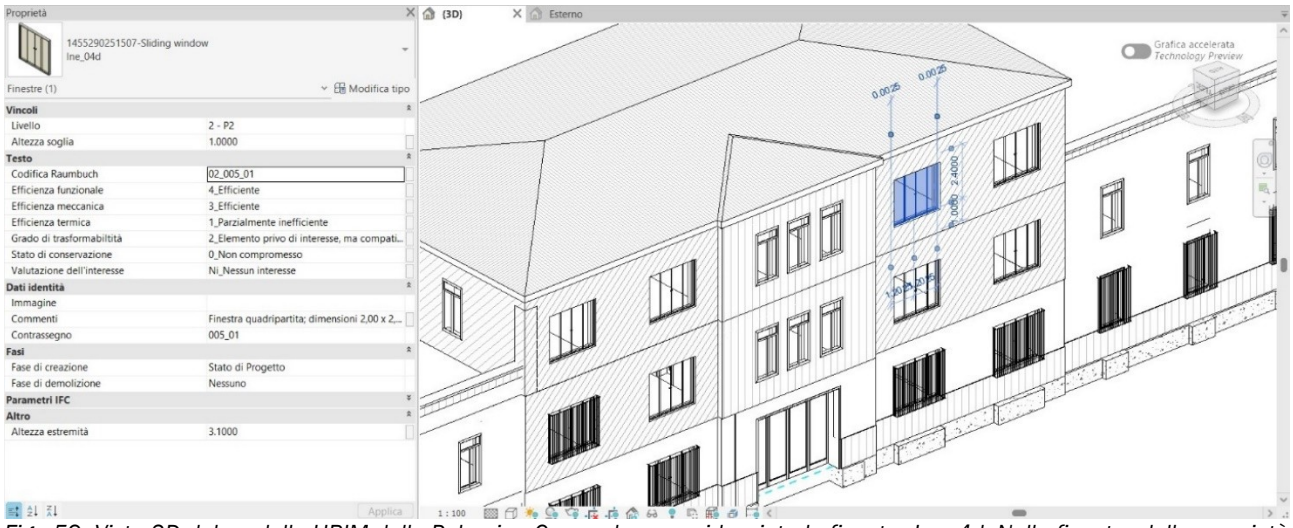



*Fig. 59. Vista 3D del modello HBIM della Palazzina Comando con evidenziata la finestra Ine_4d. Nella finestra delle proprietà si notano i parametri associati: codifica Raumbuch, valori prestazionali, stato di conservazione e valutazione dell'interesse.*

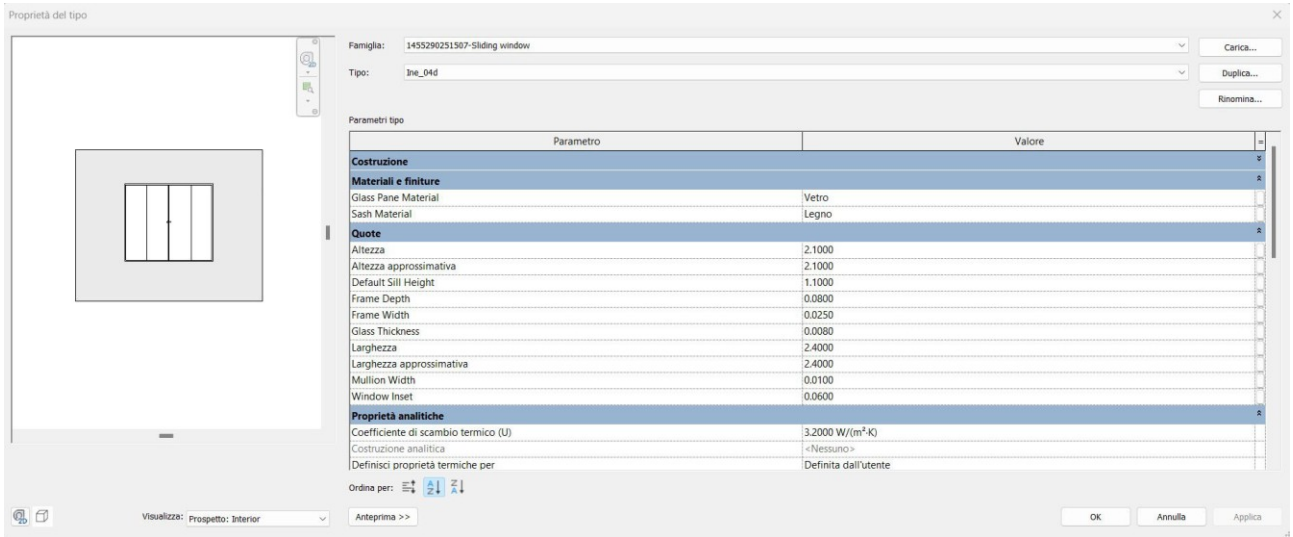



*Fig. 60. Parametri di tipo associati alla finestra Ine_04d nel modello HBIM. Sono riportate le caratteristiche materiche (legno, vetro, metallo), le dimensioni principali e le proprietà analitiche, tra cui il coefficiente di scambio termico.*

**Ine_04e** – Finestra ad anta singola; dimensioni 2,30 x 1,20 m.

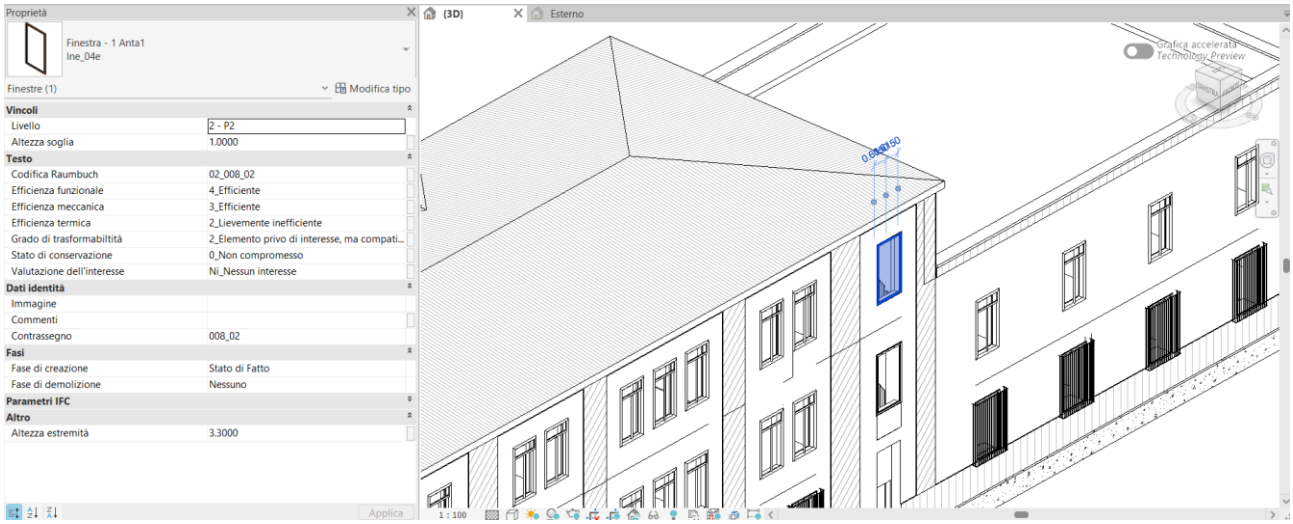



*Fig. 61. Vista 3D del modello HBIM della Palazzina Comando con evidenziata la finestra Ine_04e. Nella finestra delle proprietà si notano i parametri associati: codifica Raumbuch, valori prestazionali, stato di conservazione e valutazione dell'interesse.*

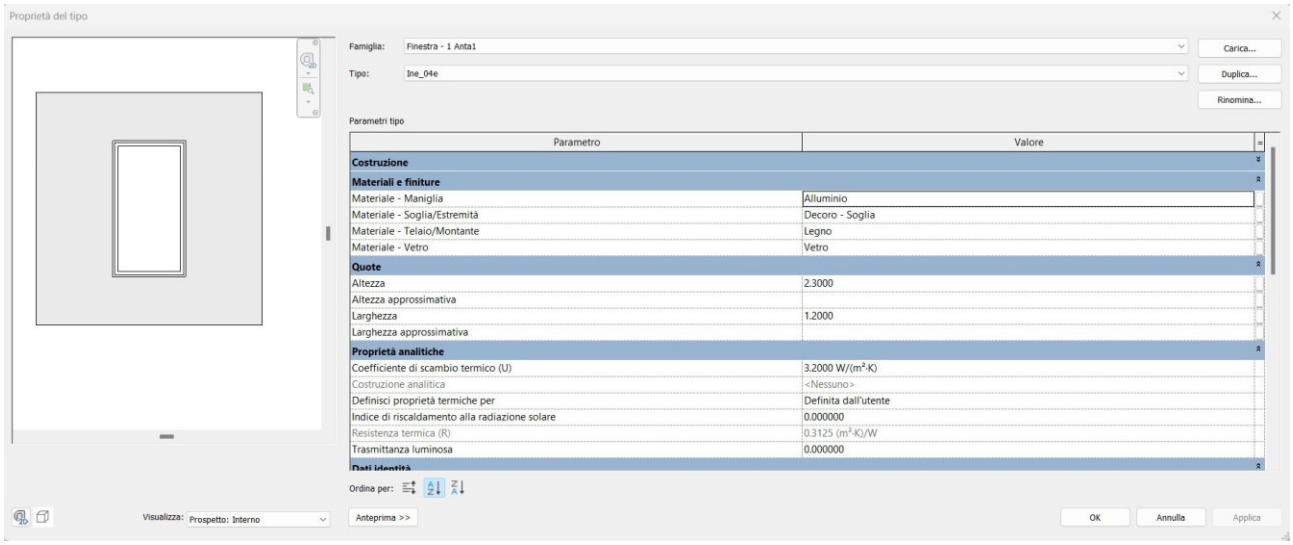



*Fig. 62. Parametri di tipo associati alla finestra Ine_04e nel modello HBIM. Sono riportate le caratteristiche materiche (legno, vetro, metallo), le dimensioni principali e le proprietà analitiche, tra cui il coefficiente di scambio termico.*

*La codifica dei muri*

Il presente capitolo mostra gli esiti dell'analisi condotta sulle murature della Palazzina Comando. Come descritto nei capitoli precedenti, le murature sono state ricondotte a due macro-categorie principali: murature esterne (Mue) e murature interne (Mui). Ciascuna categoria è stata ulteriormente articolata in tipologie, a loro volta suddivise in varianti identificate mediante lettere progressive (a, b, c…), con l'obiettivo di distinguere le differenze dimensionali, materiche e stratigrafiche riscontrate.
La trasposizione nel modello HBIM ha previsto la creazione di famiglie parametriche distinte per ogni tipologia, alle quali sono state associate le proprietà codificate nel Raumbuch. Questo ha permesso di riconoscere in maniera univoca ciascuna muratura, collegando la rappresentazione geometrica alle informazioni tabellari (spessore, materiali, stato di conservazione, interesse culturale e grado di trasformabilità). A titolo dimostrativo, si riportano di seguito le principali tipologie di murature esterne (Mue) modellate per la creazione del BIM della Palazzina Comando.

### Murature esterne (Mue)

Le murature esterne si caratterizzano prevalentemente per l'impiego di conci irregolari di pietra calcarea allettati con malta di calce, con spessori variabili tra i 40 e i 115 cm. Alcune tipologie presentano un rivestimento esterno in laterizio o in marmo, a testimonianza di interventi di rifinitura e di differenziazione funzionale o rappresentativa.

**Mue_01a** – Muratura in conci irregolari di pietra calcarea, malta di calce, sp. 70 cm.

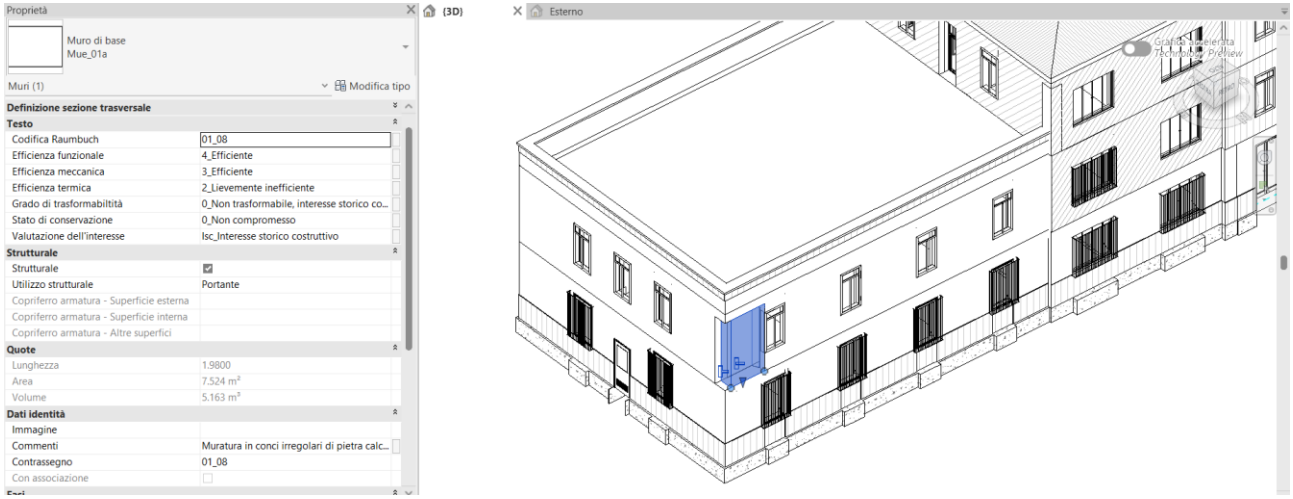



*Fig. 63. Vista tridimensionale del modello HBIM della Palazzina Comando in ambiente Revit. In evidenza la muratura esterna Mue_01a, per la quale è riportata la codifica Raumbuch e i parametri informativi associati.*

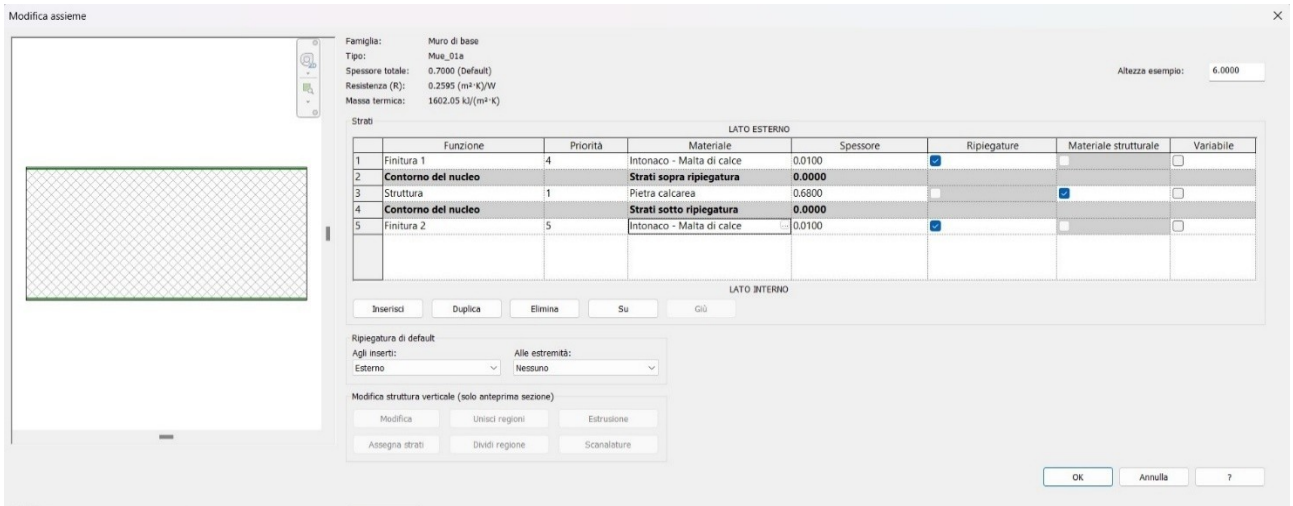



*Fig. 64. Struttura stratigrafica della muratura esterna Mue_01a nel modello HBIM. La sezione mostra la composizione a tre strati con intonaco esterno ed interno in malta di calce e nucleo strutturale in pietra calcarea, per uno spessore complessivo pari a 70 cm.*

**Mue_01b** – Muratura in conci irregolari di pietra calcarea, malta di calce, sp. 40 cm.

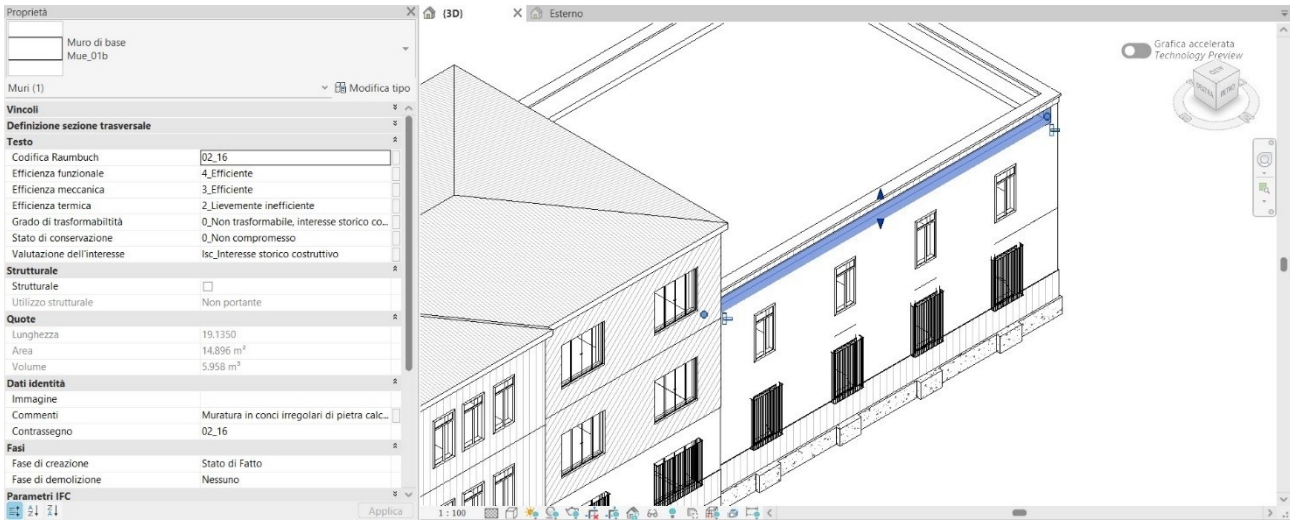



*Fig. 65. Vista tridimensionale del modello HBIM della Palazzina Comando in ambiente Revit. In evidenza la muratura esterna Mue_01b, per la quale è riportata la codifica Raumbuch e i parametri informativi associati.*

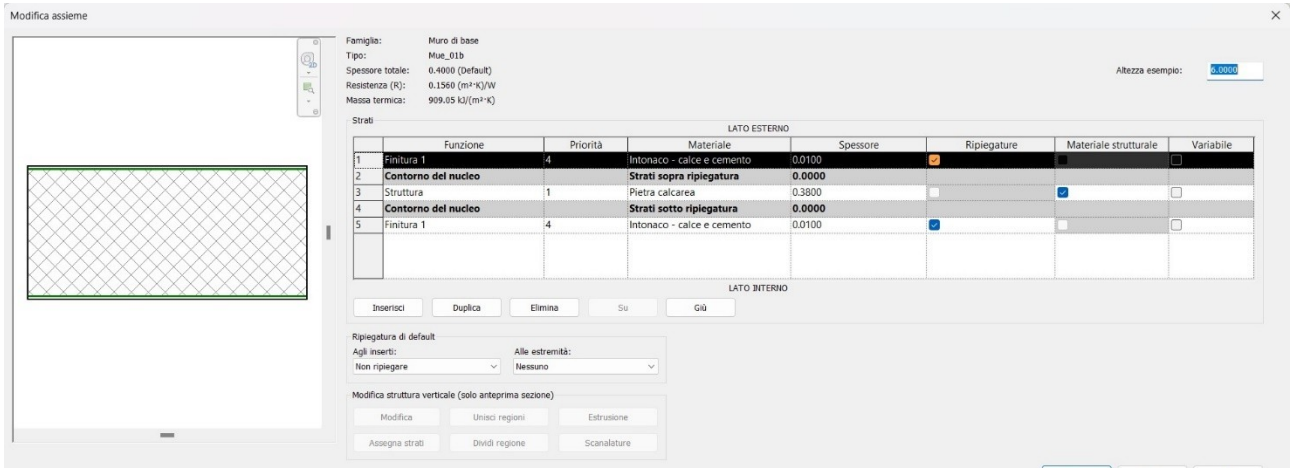



*Fig. 66. Struttura stratigrafica della muratura esterna Mue_01b nel modello HBIM. La sezione mostra la composizione a tre strati con intonaco esterno ed interno in malta di calce e nucleo strutturale in pietra calcarea, per uno spessore complessivo pari a 40 cm.*

**Mue_01c** – Muratura in conci irregolari di pietra calcarea, malta di calce, sp. 60 cm.

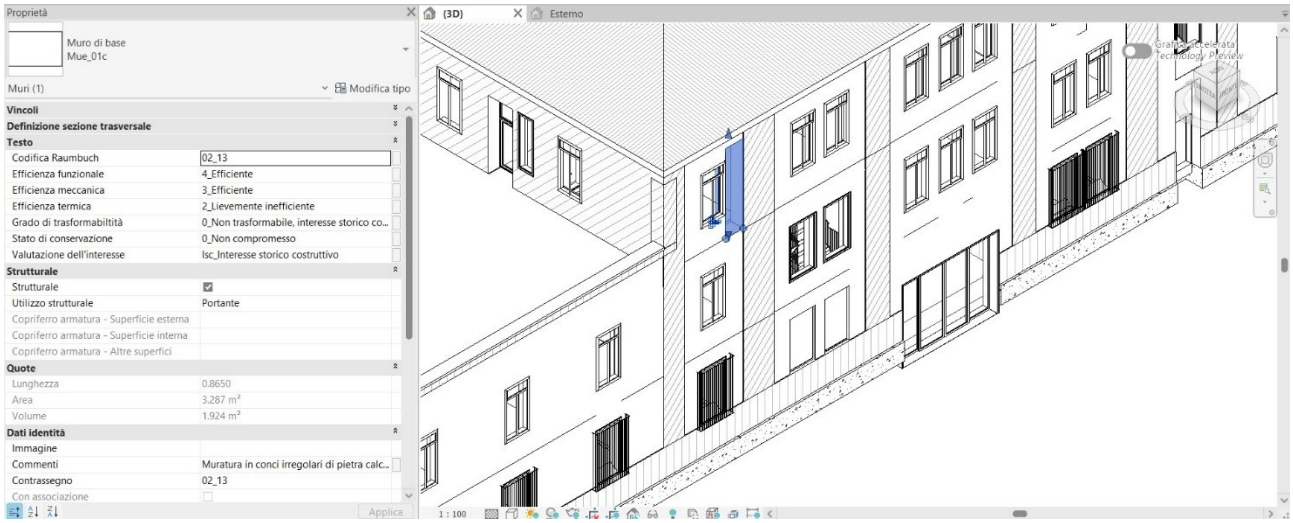



*Fig. 67. Vista tridimensionale del modello HBIM della Palazzina Comando in ambiente Revit. In evidenza la muratura esterna Mue_01c, per la quale è riportata la codifica Raumbuch e i parametri informativi associati.*

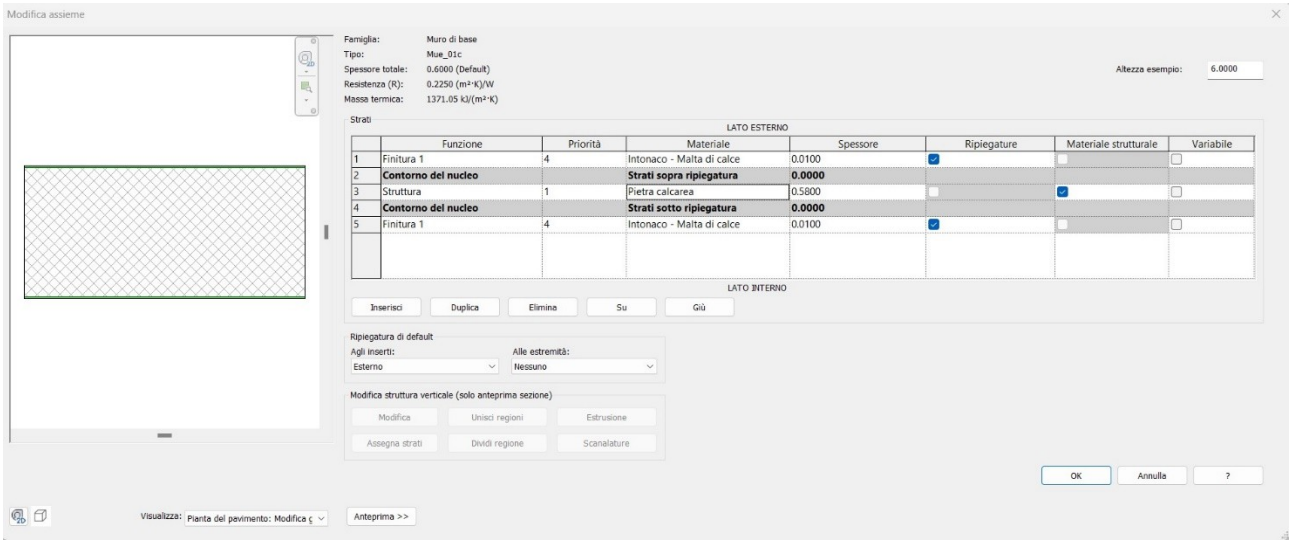



*Fig. 68. Struttura stratigrafica della muratura esterna Mue_01c nel modello HBIM. La sezione mostra la composizione a tre strati con intonaco esterno ed interno in malta di calce e nucleo strutturale in pietra calcarea, per uno spessore complessivo pari a 60 cm.*

**Mue_02a** – Muratura in pietra calcarea con rivestimento in laterizio, sp. 60 cm.

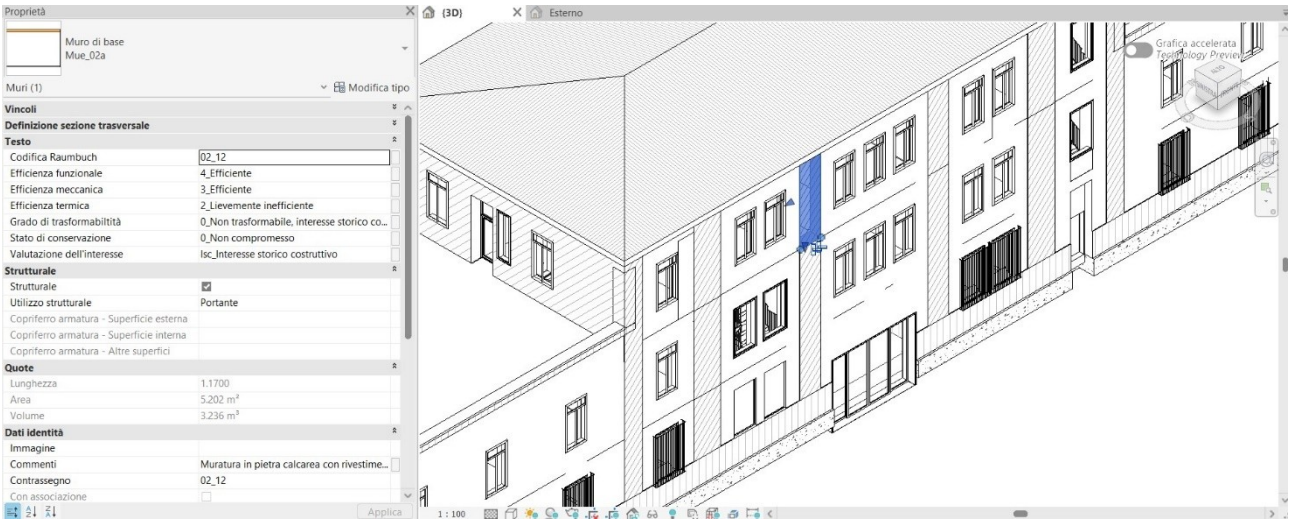



*Fig. 69. Vista tridimensionale del modello HBIM della Palazzina Comando in ambiente Revit. In evidenza la muratura esterna Mue_02a, per la quale è riportata la codifica Raumbuch e i parametri informativi associati.*

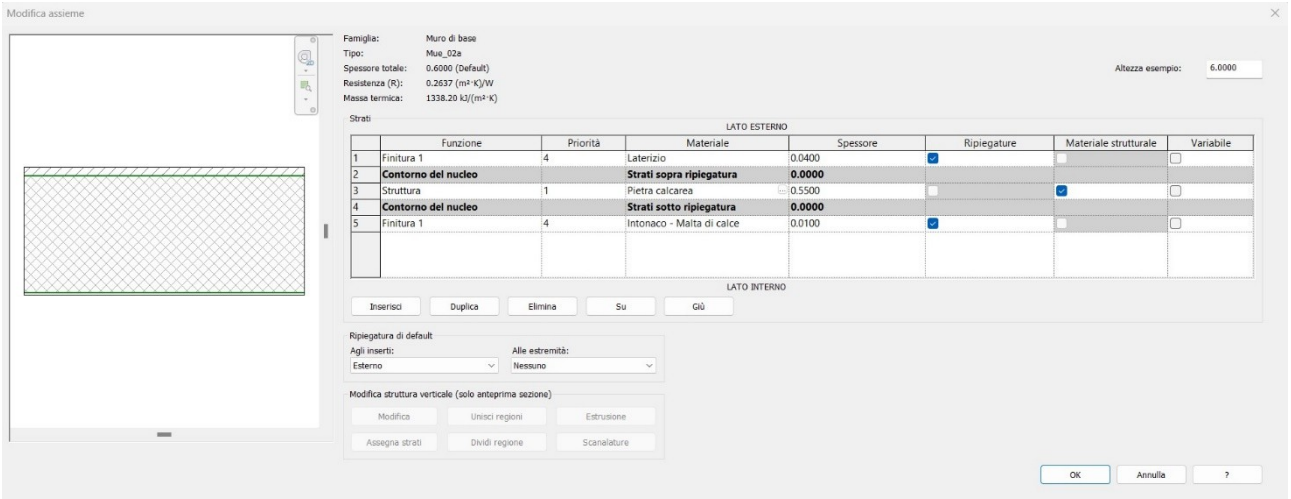



*Fig. 70. Struttura stratigrafica della muratura esterna Mue_02a nel modello HBIM. La sezione mostra un nucleo in conci irregolari di pietra calcarea, rivestito da laterizio esterno e intonaco interno in malta di calce, per uno spessore complessivo pari a 60 cm.*

**Mue_02b** – Muratura in pietra calcarea con rivestimento in laterizio, sp. 90 cm.

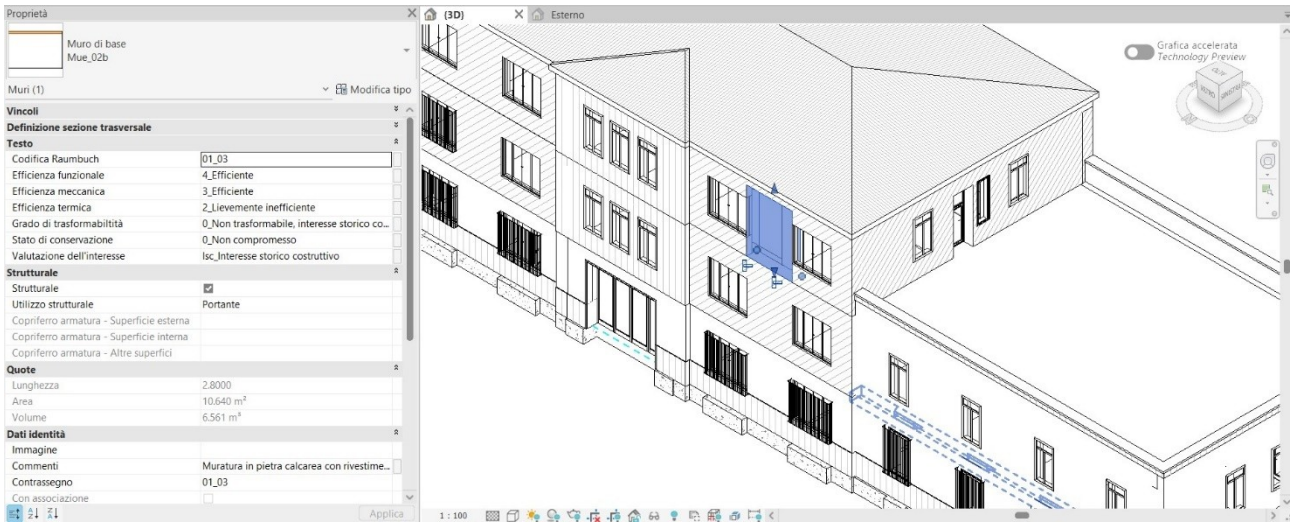



*Fig. 71. Vista tridimensionale del modello HBIM della Palazzina Comando in ambiente Revit. In evidenza la muratura esterna Mue_02b, per la quale è riportata la codifica Raumbuch e i parametri informativi associati.*

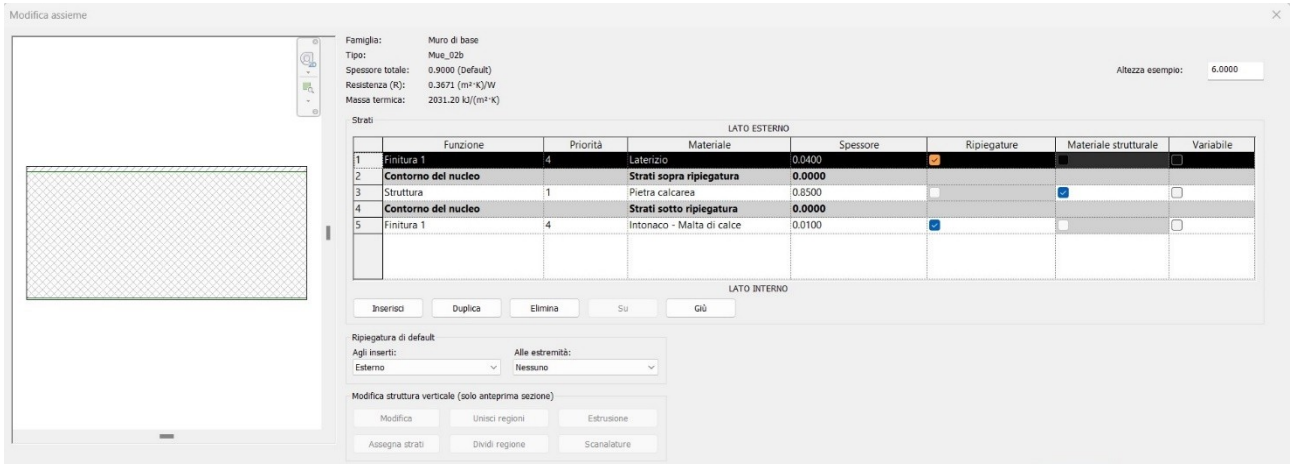



*Fig. 72. Struttura stratigrafica della muratura esterna Mue_02b nel modello HBIM. La sezione mostra un nucleo in conci irregolari di pietra calcarea, rivestito da laterizio esterno e intonaco interno in malta di calce, per uno spessore complessivo pari a 90 cm.*

**Mue_02c** – Muratura in pietra calcarea con rivestimento in laterizio, sp. 70 cm.

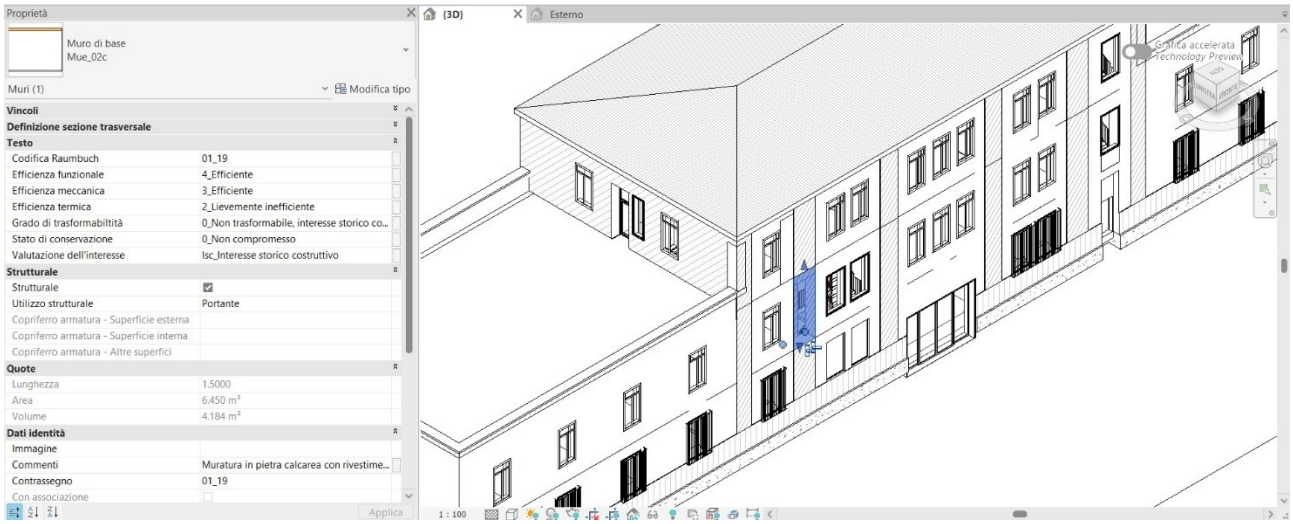



*Fig. 73. Vista tridimensionale del modello HBIM della Palazzina Comando in ambiente Revit. In evidenza la muratura esterna Mue_02c, per la quale è riportata la codifica Raumbuch e i parametri informativi associati.*

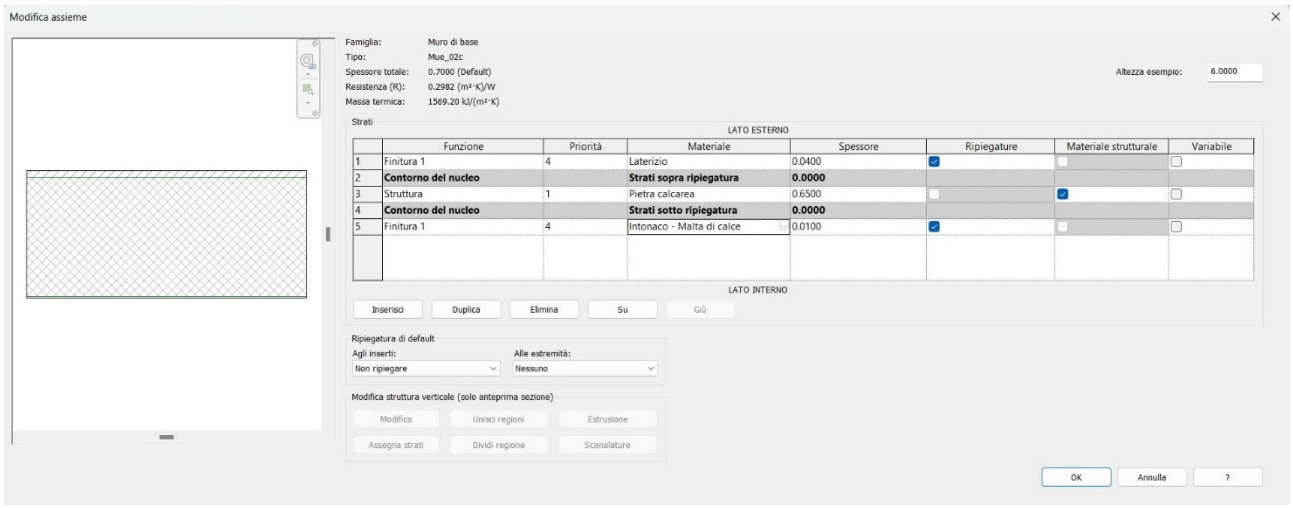



*Fig. 74. Struttura stratigrafica della muratura esterna Mue_02c nel modello HBIM. La sezione mostra un nucleo in conci irregolari di pietra calcarea, rivestito da laterizio esterno e intonaco interno in malta di calce, per uno spessore complessivo pari a 70 cm.*

**Mue_03a** – Muratura in pietra calcarea con rivestimento in marmo, sp. 70 cm.

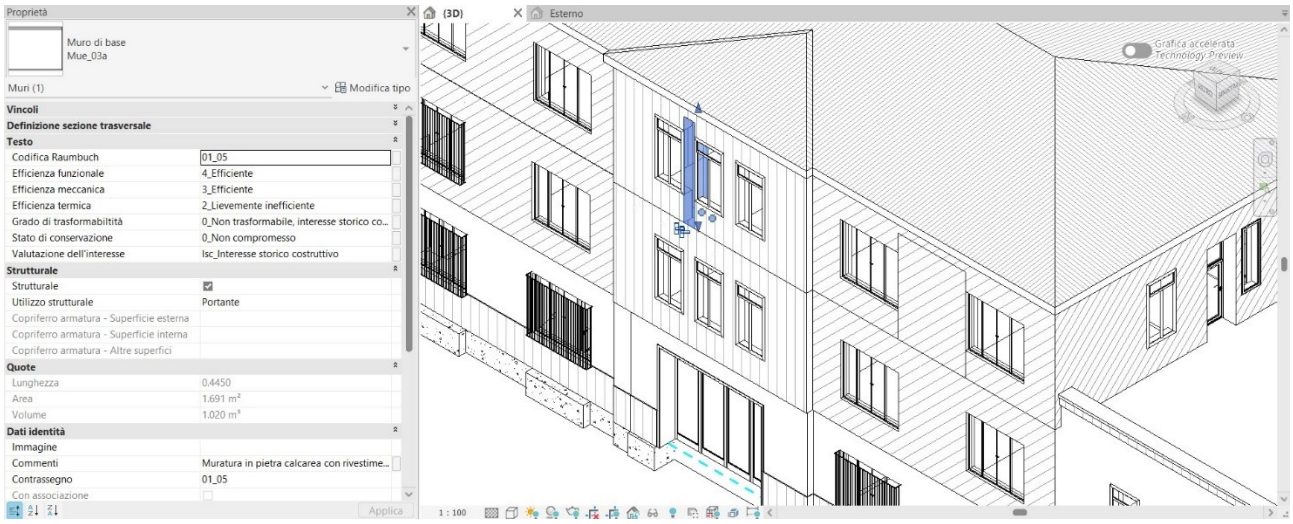



*Fig. 75. Vista tridimensionale del modello HBIM della Palazzina Comando in ambiente Revit. In evidenza la muratura esterna Mue_03a, per la quale è riportata la codifica Raumbuch e i parametri informativi associati.*

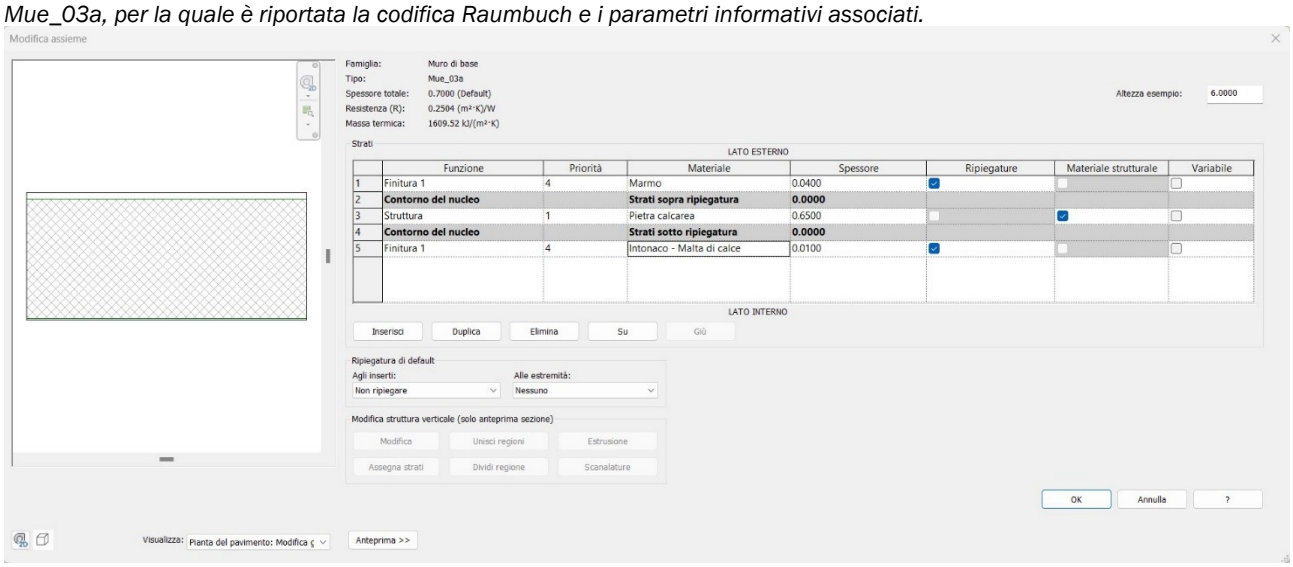



*Fig. 76. Struttura stratigrafica della muratura esterna Mue_03a nel modello HBIM. La sezione mostra un nucleo in pietra calcarea, rivestito da uno strato esterno in marmo e completato da intonaco interno in malta di calce, per uno spessore complessivo di 70 cm.*

**Mue_03b** – Muratura in pietra calcarea con rivestimento in marmo, sp. 115 cm.

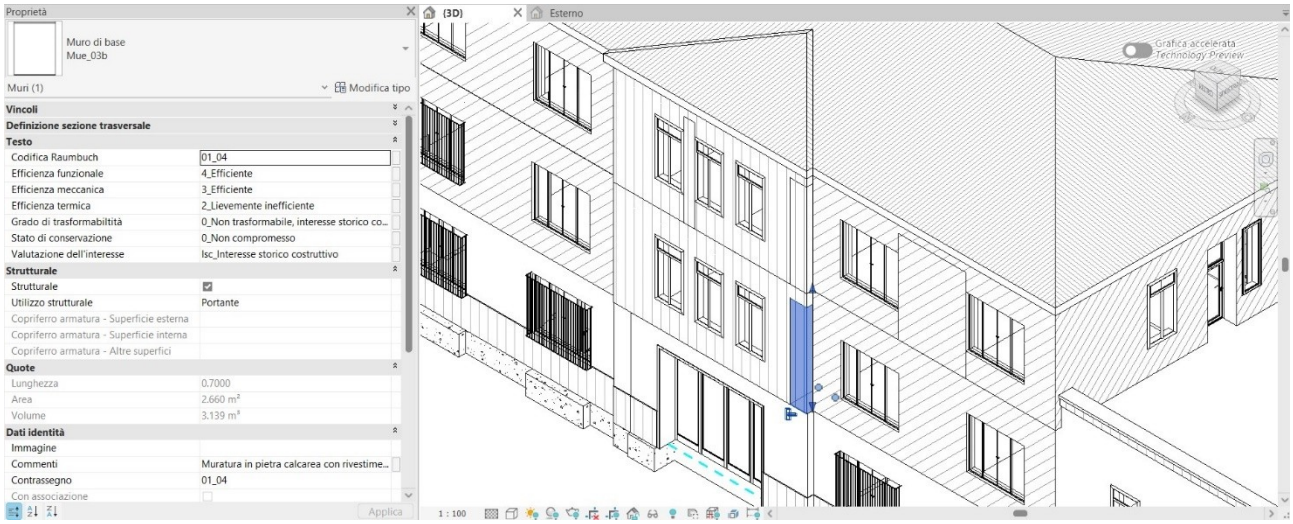



*Fig. 77. Vista tridimensionale del modello HBIM della Palazzina Comando in ambiente Revit. In evidenza la muratura esterna Mue_03b, per la quale è riportata la codifica Raumbuch e i parametri informativi associati.*

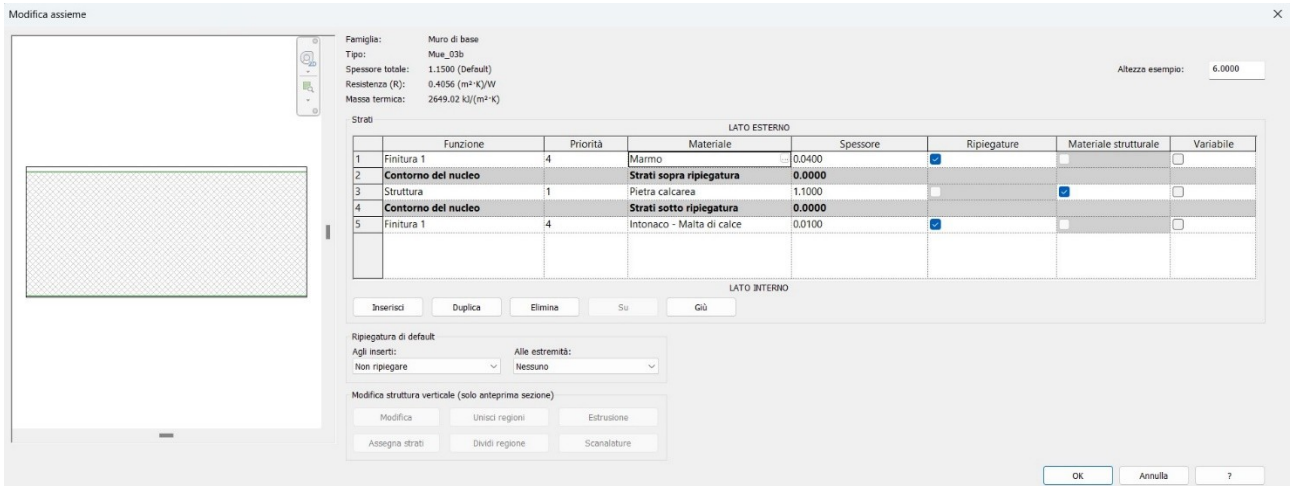



*Fig. 78. Struttura stratigrafica della muratura esterna Mue_03b nel modello HBIM. La sezione mostra un nucleo in pietra calcarea, rivestito da uno strato esterno in marmo e completato da intonaco interno in malta di calce, per uno spessore complessivo di 115 cm.*

**Mue_03c** – Muratura in pietra calcarea con rivestimento in marmo, sp. 85 cm.

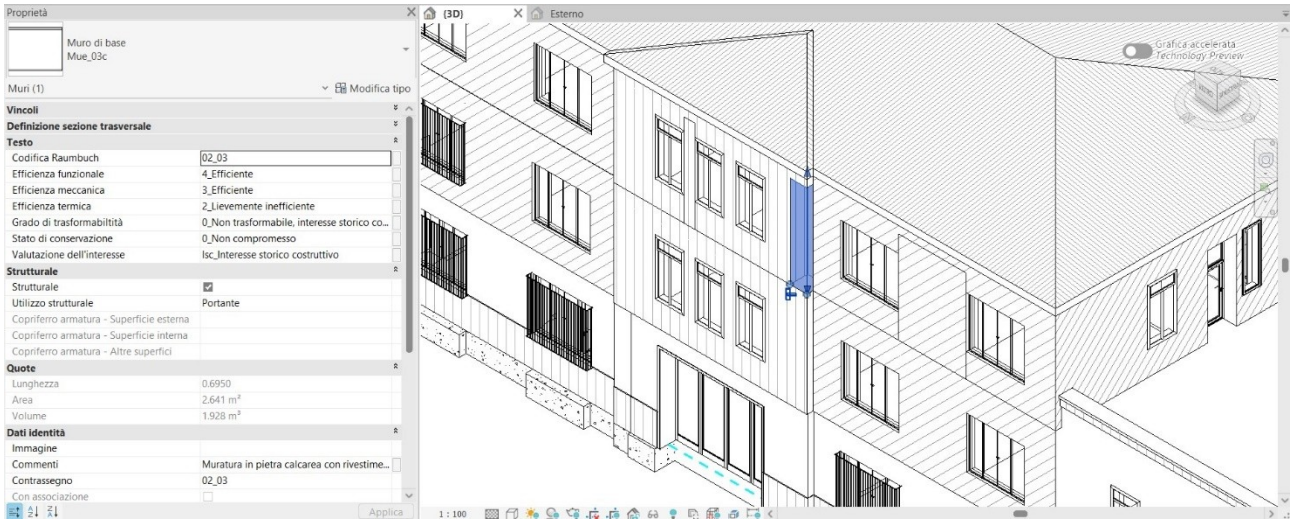



*Fig. 79. Vista tridimensionale del modello HBIM della Palazzina Comando in ambiente Revit. In evidenza la muratura esterna Mue_03c, per la quale è riportata la codifica Raumbuch e i parametri informativi associati.*

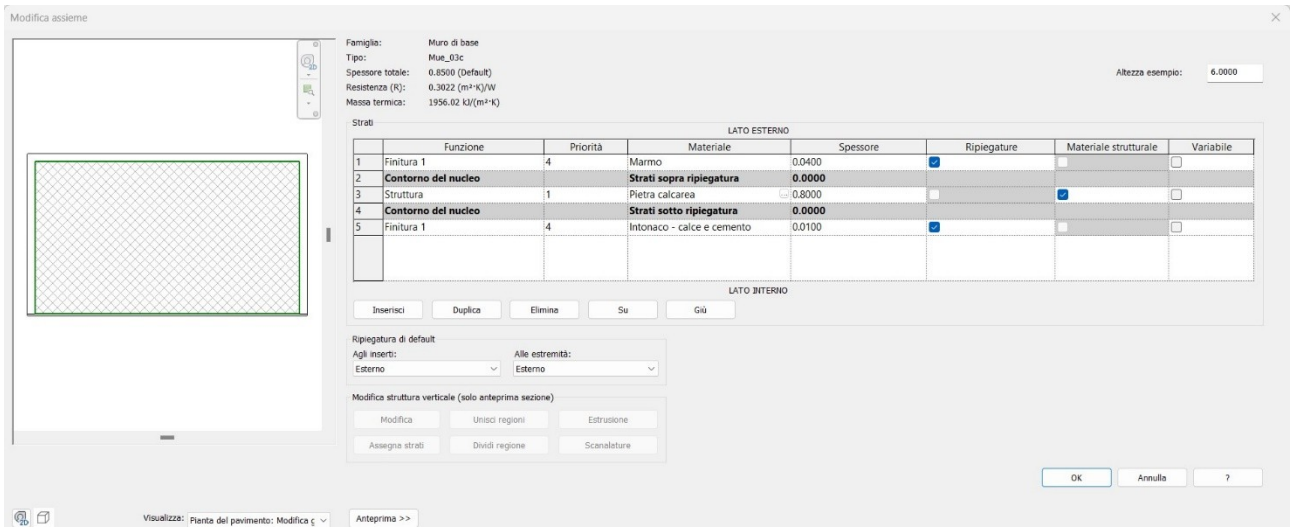



*Fig. 80. Schermata di Revit relativa alla definizione stratigrafica della muratura esterna Mue_03c. La sezione mostra un nucleo in conci irregolari di pietra calcarea, un rivestimento esterno in lastre di marmo e intonaco interno in malta di calce, per uno spessore complessivo pari a 85 cm.*

### 1.2.2 La creazione del modello parametrico

Una volta create e denominate tutte le famiglie che costituiscono l'ossatura informativa del progetto – comprendenti le stratigrafie dei muri e dei solai, nonché i profili parametrici di porte e finestre – si è passati alla costruzione del modello digitale.
Nel caso della Palazzina Comando, l'importazione in Revit dei disegni CAD relativi ai livelli dell'edificio ha permesso di utilizzare le planimetrie come base di riferimento, facilitando il tracciamento accurato dei perimetri e delle suddivisioni interne.

Un passaggio centrale di questa fase è stato l'inserimento e la definizione dei locali (rooms), strumenti informativi fondamentali per il controllo dimensionale e funzionale dell'edificio. In Revit, infatti, i locali non possiedono una consistenza fisica, ma sono entità logiche che si relazionano ai confini definiti dagli elementi architettonici (muri, solai, porte e finestre). Una volta posizionati, essi permettono di acquisire automaticamente dati relativi a superfici, volumi e altezze utili, che possono essere verificati e aggiornati in tempo reale in caso di modifiche geometriche (Fig. 81).
I locali, oltre a supportare la fase di modellazione, sono stati integrati con i sistemi di codifica del Raumbuch, mantenendo la corrispondenza univoca tra schedatura tabellare e modello digitale. L'associazione di parametri condivisi – come "Codifica Raumbuch", "Codice unità" e "Codice tipologia" – ha reso possibile un'interrogazione puntuale del modello, garantendo la piena interoperabilità dei dati.

Dal punto di vista operativo, questa scelta metodologica ha consentito di:

- ottenere un controllo immediato sulle quantità e sulle dimensioni dei vani;
- verificare la coerenza tra rilievo, schedatura e modellazione;
- predisporre abachi parametrici, interrogabili sia per finalità gestionali sia per successive elaborazioni analitiche (ad esempio, l'esportazione dei dati verso software di simulazione energetica).

In questo modo, la definizione dei locali non si è limitata a una funzione di supporto geometrico, ma si è configurata come uno strumento strategico per la costruzione di un modello HBIM informativo coerente e interrogabile, capace di integrare rilievo, conoscenza e gestione futura del manufatto.

Parallelamente, la costruzione del modello HBIM ha reso possibile l'estrazione automatica di elaborati grafici aggiornabili in tempo reale, quali piante, prospetti (Fig. 82), sezioni e planimetrie prospettiche (Fig. 84), utili sia nella fase di analisi che in quella di comunicazione e restituzione dei risultati.




*Fig. 81. Palazzina Comando, planimetrie dei tre livelli con definizione dei locali in ambiente Revit: individuazione e codifica univoca delle unità spaziali (PC_00_001, PC_01_014, ecc.) con relative superfici e volumi.*

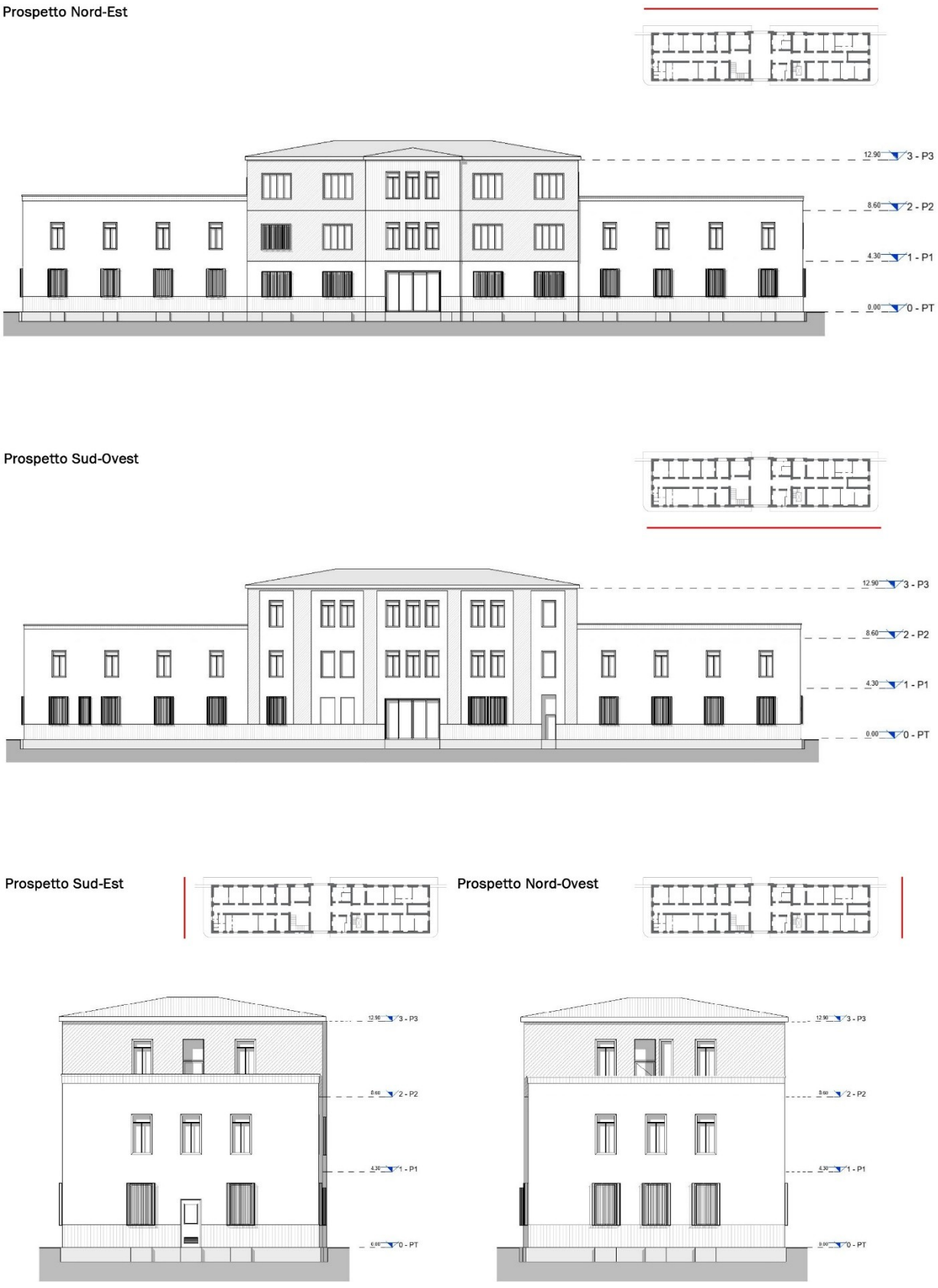



*Fig. 82. Prospetti delle quattro facciate della Palazzina Comando, estratte dal modello HBIM.*

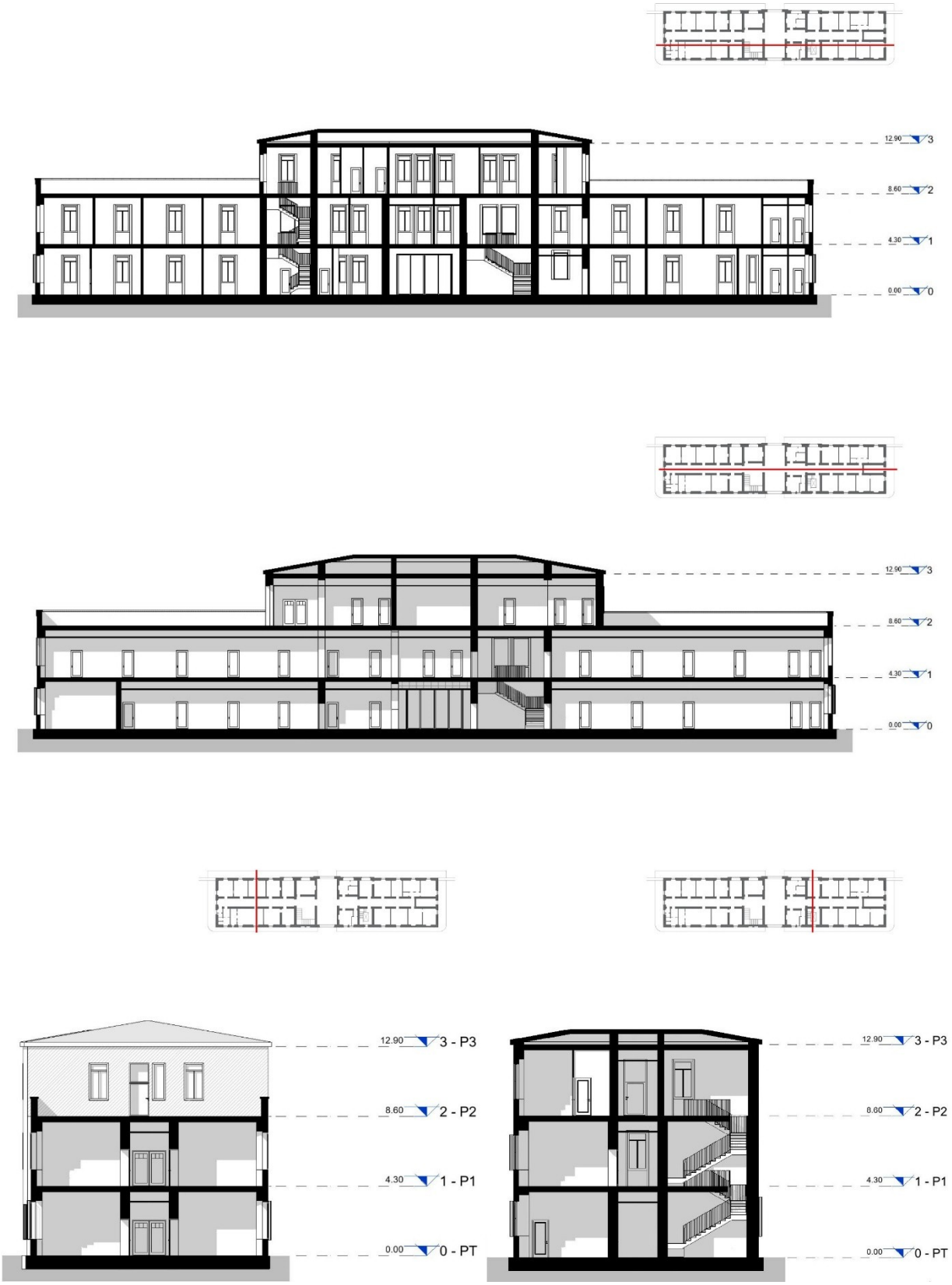
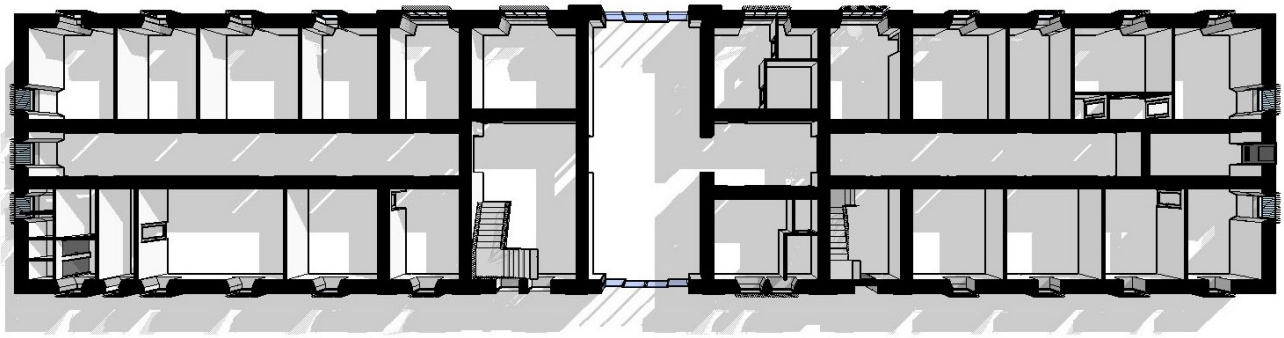



*Fig. 83. Sezioni longitudinali e trasversali della Palazzina Comando, estratte dal modello HBIM.*

Piano terra



Piano primo



Piano secondo



*Fig. 84. Piante prospettiche dei tre livelli della Palazzina Comando, estratte dal modello HBIM.*

### 1.2.3 Gli abachi per la gestione ed estrapolazione dei dati

In Revit, gli abachi costituiscono uno degli strumenti principali per la gestione e l'estrapolazione dei dati dal modello. Si tratta di grandi tabelle che raccolgono e organizzano le informazioni contenute all'interno delle proprietà degli oggetti modellati. Attraverso gli abachi è stato possibile visualizzare e ordinare tutte le istanze relative a una specifica categoria di elementi (ad esempio infissi, muri o locali), oppure raggrupparle secondo criteri predefiniti, così da ottenere una visione sintetica e strutturata delle caratteristiche dell'edificio.

Nel caso della Palazzina Comando, gli abachi di Revit hanno rappresentato uno strumento fondamentale per la gestione, il controllo e l'estrapolazione dei dati dal modello digitale. Gli abachi sono stati impostati sin dalle prime fasi della modellazione, al fine di garantire un monitoraggio costante della coerenza tra rilievo, codifica Raumbuch e costruzione del modello BIM. Questa scelta metodologica ha consentito di sfruttare la natura dinamica dello strumento: ogni modifica apportata al modello si rifletteva infatti automaticamente sugli abachi, che si aggiornavano in tempo reale.

Sono stati predisposti diversi tipi di abachi, ciascuno orientato a specifiche esigenze conoscitive:

- Abaco delle murature e delle stratigrafie, impiegato per validare la corretta associazione dei parametri costruttivi (materiali, spessori, resistenze termiche) alle famiglie modellate (Fig. 85);
- Abaco dei locali, utile per il controllo delle superfici e dei volumi dei vani, in stretta relazione con la codifica Raumbuch (Fig. 86).
- Abaco degli infissi, finalizzato a verificare la corretta trasposizione delle tipologie e a monitorare le caratteristiche geometriche e materiche di porte e finestre (Fig. 87);

Questa organizzazione ha reso possibile non solo un controllo accurato dei dati già durante la modellazione, ma anche la predisposizione del modello per successive elaborazioni. Gli abachi, infatti, sono stati utilizzati come base per l'esportazione dei dati verso software di analisi energetica, garantendo la continuità informativa lungo le diverse fasi del workflow.

<Abaco dei muri>

| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Famiglia e tipo | Codifica Raumbuch | Larghezza | Lunghezza | Area | Volume | Stato di conservazione | Valutazione dell'interesse | Materiale strutturale | Massa termica | Resistenza termica | Efficienza funzionale | Efficienza meccanica | Efficienza termica |
| Muro di base: Mue_01a | 00_02 | 0.70 | 1.98 | 5.80 m² | 4.05 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_01 | 0.70 | 3.46 | 7.77 m² | 5.43 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_01 | 0.70 | 1.65 | 4.13 m² | 2.88 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_02 | 0.70 | 3.06 | 8.11 m² | 5.67 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_02 | 0.70 | 3.29 | 8.24 m² | 5.75 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_22 | 0.70 | 1.29 | 3.21 m² | 2.22 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_22 | 0.70 | 1.32 | 3.30 m² | 2.28 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_01 | 0.70 | 3.53 | 9.69 m² | 6.77 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_01 | 0.70 | 1.65 | 4.13 m² | 2.88 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_22 | 0.70 | 3.28 | 8.21 m² | 5.73 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_22 | 0.70 | 1.98 | 4.06 m² | 2.84 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_22 | 0.70 | 3.30 | 8.24 m² | 5.75 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_22 | 0.70 | 0.49 | 1.21 m² | 0.84 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_12 | 0.70 | 0.90 | 2.25 m² | 1.58 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_10 | 0.70 | 3.27 | 8.18 m² | 5.71 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_10 | 0.70 | 3.27 | 8.18 m² | 5.71 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_10 | 0.70 | 3.27 | 8.18 m² | 5.71 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_10 | 0.70 | 1.98 | 5.83 m² | 4.07 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_09 | 0.70 | 3.53 | 7.94 m² | 5.55 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_09 | 0.70 | 1.65 | 4.13 m² | 2.88 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_09 | 0.70 | 1.65 | 4.13 m² | 2.88 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_09 | 0.70 | 3.48 | 9.56 m² | 6.69 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_08 | 0.70 | 1.98 | 4.18 m² | 2.92 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_08 | 0.70 | 3.27 | 8.18 m² | 5.71 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_08 | 0.70 | 3.27 | 8.18 m² | 5.71 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_08 | 0.70 | 3.27 | 8.18 m² | 5.71 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_08 | 0.70 | 2.41 | 5.20 m² | 3.63 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |
| Muro di base: Mue_01a | 00_05 | 0.70 | 6.60 | 6.75 m² | 4.73 m³ | 0_non compromesso | Isc_interesse storico-costru | Pietra calcarea | 1602.05 kJ/(m² K) | 0.2595 (m² K)/W | 4_efficiente | 3_efficiente | 2_lievemente inefficiente |

*Fig. 85. Estratto dell'abaco dei muri della Palazzina Comando. Viene riportato, a titolo esemplificativo, il caso della muratura codificata come Mue_01a, con evidenza dei codici Raumbuch, delle caratteristiche geometriche e materiche e dei parametri prestazionali (efficienza meccanica, termica e funzionale). Immagine estratta dal modello HBIM.*

# <Abaco dei locali>

| A | B | C | D | E | F | G |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Livello | N° | Destinazione d'uso | Perimetro | Area | Altezza non delimitata | Volume |
| 0 - PT | PC 00 001 | Ufficio | 20.20 | 22.6 m² | 4.00 | 89.14 m³ |
| 0 - PT | PC 00 002 | Ufficio | 18.80 | 20.6 m² | 4.00 | 81.53 m³ |
| 0 - PT | PC 00 003 | Ufficio | 20.80 | 25.4 m² | 4.00 | 100.49 m³ |
| 0 - PT | PC 00 004 | Ufficio | 18.40 | 19.7 m² | 4.00 | 77.74 m³ |
| 0 - PT | PC 00 005 | Ufficio | 18.20 | 19.2 m² | 4.00 | 63.38 m³ |
| 0 - PT | PC 00 006 | Ufficio | 20.70 | 24.8 m² | 4.00 | 98.04 m³ |
| 0 - PT | PC 00 007 | Ingresso | 40.61 | 83.8 m² | 4.00 | 316.97 m³ |
| 0 - PT | PC 00 008 | Ufficio | 16.20 | 13.2 m² | 4.00 | 52.31 m³ |
| 0 - PT | PC 00 008.1 | Ufficio | 10.90 | 7.4 m² | 4.00 | 29.27 m³ |
| 0 - PT | PC 00 008.2 | Ufficio | 9.00 | 4.2 m² | 4.00 | 16.42 m³ |
| 0 - PT | PC 00 009 | Ufficio | 18.20 | 19.2 m² | 4.00 | 75.89 m³ |
| 0 - PT | PC 00 010 | Ufficio | 20.24 | 24.2 m² | 4.00 | 95.61 m³ |
| 0 - PT | PC 00 011 | Ufficio | 16.84 | 16.0 m² | 4.00 | 63.37 m³ |
| 0 - PT | PC 00 012 | Ufficio | 20.64 | 25.2 m² | 4.00 | 99.40 m³ |
| 0 - PT | PC 00 013 | Ufficio | 20.34 | 23.0 m² | 4.00 | 90.88 m³ |
| 0 - PT | PC 00 014 | Vano tecnico | 17.40 | 14.6 m² | 4.00 | 57.85 m³ |
| 0 - PT | PC 00 015 | Ufficio | 18.20 | 19.2 m² | 4.00 | 75.85 m³ |
| 0 - PT | PC 00 016 | Ufficio | 18.00 | 20.2 m² | 4.00 | 79.63 m³ |
| 0 - PT | PC 00 017 | Ufficio | 19.60 | 24.0 m² | 4.00 | 94.80 m³ |
| 0 - PT | PC 00 018 | Ufficio | 19.20 | 23.0 m² | 4.00 | 91.01 m³ |
| 0 - PT | PC 00 019 | Vano scala | 17.00 | 17.8 m² | 4.00 | 70.42 m³ |
| 0 - PT | PC 00 020 | Ufficio | 19.50 | 23.4 m² | 4.00 | 92.33 m³ |
| 0 - PT | PC 00 021 | Disimpegno | 37.50 | 39.2 m² | 4.00 | 129.49 m³ |
| 0 - PT | PC 00 022 | Disimpegno | 18.62 | 19.9 m² | 4.00 | 65.55 m³ |
| 0 - PT | PC 00 023 | Vano scala | 27.70 | 45.9 m² | 4.00 | 181.96 m³ |
| 0 - PT | PC 00 024 | Disimpegno | 50.86 | 54.8 m² | 4.00 | 181.34 m³ |
| 0 - PT | PC 00 025 | Ufficio | 17.00 | 17.8 m² | 4.00 | 58.61 m³ |
| 0 - PT | PC 00 026 | Ufficio | 19.20 | 23.0 m² | 4.00 | 91.02 m³ |
| 0 - PT | PC 00 027 | Ufficio | 24.90 | 36.7 m² | 4.00 | 145.04 m³ |
| 0 - PT | PC 00 027.1 | Ufficio | 13.40 | 9.1 m² | 4.00 | 36.02 m³ |
| 0 - PT | PC 00 028 | Servizi igienici | 17.50 | 17.5 m² | 4.00 | 58.14 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 001 | Ufficio | 18.60 | 18.7 m² | 4.00 | 73.99 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 002 | Ufficio | 20.40 | 24.5 m² | 4.00 | 96.72 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 003 | Ufficio | 19.20 | 21.6 m² | 4.00 | 85.34 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 004 | Ufficio | 20.00 | 23.5 m² | 4.00 | 92.93 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 005 | Ufficio | 18.20 | 19.2 m² | 4.00 | 63.46 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 006 | Sala conferenze | 20.70 | 24.8 m² | 4.00 | 98.02 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 007 | Ufficio | 23.80 | 29.6 m² | 4.00 | 101.57 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 008 | Ufficio | 20.72 | 24.9 m² | 4.00 | 98.20 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 009 | Ufficio | 18.13 | 19.2 m² | 4.00 | 76.04 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 010 | Ufficio | 20.30 | 24.2 m² | 4.00 | 95.78 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 011 | Ufficio | 17.10 | 16.6 m² | 4.00 | 65.44 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 012 | Ufficio | 20.60 | 25.5 m² | 4.00 | 100.76 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 013 | Ufficio | 20.20 | 23.2 m² | 4.00 | 91.63 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 014 | Disimpegno | 80.34 | 98.1 m² | 4.00 | 323.71 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 015 | Ufficio | 19.50 | 20.9 m² | 4.00 | 82.52 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 016 | Ufficio | 18.30 | 19.4 m² | 4.00 | 76.81 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 017 | Ufficio | 20.40 | 24.5 m² | 4.00 | 96.72 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 018 | Ufficio | 20.00 | 23.5 m² | 4.00 | 92.93 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 019 | Vano scala | 17.78 | 18.2 m² | 4.00 | 72.36 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 020 | Ufficio | 14.56 | 11.7 m² | 4.00 | 46.05 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 021 | Ufficio | 14.74 | 12.0 m² | 4.00 | 47.56 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 022 | Ufficio | 17.60 | 16.9 m² | 4.00 | 56.39 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 023 | Ufficio | 13.50 | 9.4 m² | 4.00 | 31.35 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 024 | Vano scala | 29.30 | 46.9 m² | 4.00 | 174.72 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 025 | Ufficio | 17.80 | 18.2 m² | 4.00 | 60.51 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 026 | Ufficio | 20.00 | 23.5 m² | 4.00 | 92.96 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 028 | Ufficio | 20.10 | 23.8 m² | 4.00 | 93.87 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 029 | Servizi igienici | 17.32 | 14.1 m² | 4.00 | 46.77 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 030 | Servizi igienici | 8.70 | 4.0 m² | 4.00 | 13.50 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 031 | Disimpegno | 50.90 | 54.8 m² | 4.00 | 181.00 m³ |
| 1 - P1 | PC 01 0207 | Ufficio | 19.80 | 23.0 m² | 4.00 | 91.03 m³ |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2 - P2 | PC 02 001 | Ufficio | 19.00 | 20.3 m² | 4.00 | 80.62 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 002 | Ufficio | 20.90 | 26.3 m² | 4.00 | 104.29 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 003 | Ufficio | 17.50 | 15.4 m² | 4.00 | 61.24 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 004 | Ufficio | 17.50 | 15.5 m² | 4.00 | 61.32 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 005 | Ufficio | 20.90 | 26.3 m² | 4.00 | 104.29 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 006 | Disimpegno | 6.53 | 2.3 m² | 4.00 | 8.98 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 006.1 | Ufficio | 13.87 | 11.6 m² | 4.00 | 45.95 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 006.2 | Ufficio | 10.53 | 6.5 m² | 4.00 | 25.69 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 007 | Disimpegno | 13.40 | 9.6 m² | 4.00 | 31.91 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 007.1 | Disimpegno | 15.20 | 10.2 m² | 4.00 | 33.71 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 008 | Vano scala | 18.80 | 19.6 m² | 4.00 | 77.73 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 009 | Ufficio | 21.90 | 27.0 m² | 4.00 | 107.01 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 010 | Ufficio | 17.70 | 17.6 m² | 4.00 | 70.00 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 011 | Ufficio | 16.98 | 17.0 m² | 4.00 | 67.39 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 012 | Ufficio | 19.22 | 21.0 m² | 4.00 | 83.25 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 013 | Ufficio | 17.90 | 14.4 m² | 4.00 | 57.07 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 014 | Disimpegno | 27.99 | 30.4 m² | 4.00 | 101.14 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 015 | Disimpegno | 19.40 | 21.7 m² | 4.00 | 71.62 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 016 | Disimpegno | 14.00 | 8.3 m² | 4.00 | 27.22 m³ |
| 2 - P2 | PC 02 017 | Servizi igienici | 8.40 | 4.1 m² | 4.00 | 16.43 m³ |

*Fig. 86. Abaco dei locali dei tre piani della Palazzina Comando, con indicazione dei codici dei vari ambienti, delle destinazioni d'uso, delle superfici e dei volumi. Immagine estratta dal modello HBIM.*

<Abaco delle finestre>

| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tipo | Livello | Codifica Raumbuch | Altezza | Altezza soglia | Grado di trasformabiltità | Valutazione dell'interesse | Efficienza funzionale | Efficienza meccanica | Efficienza termica | Larghezza | Resistenza termica (R |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_001_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_001_02 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_002_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_003_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_004_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_010_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_011_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_012_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_013_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_013_02 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_015_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_015_02 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_016_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_017_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_018_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_020_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_020_02 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_024_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_025_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_026_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_027_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_027_02 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_028_01 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |
| Ine_02a | 0 - PT | 00_028_02 | 2.30 | 1.30 | 2_Elemento privo di interesse, ma compatibile | Ni_Nessun interesse | 4_Efficiente | 3_Efficiente | 1_Parzialmente ine | 1.20 | 0.1667 (m² K)/W |

*Fig. 87. Estratto dell'abaco degli infissi: esempio della tipologia Ine_02a (finestra a doppia anta con sopraluce). Sono riportati i principali parametri dimensionali (altezza, larghezza, altezza soglia) e le valutazioni prestazionali derivate dal sistema di codifica Raumbuch.*

## 1.3 LA MODELLAZIONE ENERGETICA

### 1.3.1 Localizzazione, dati climatici della località e descrittori identificativi:

Per lo svolgimento della simulazione energetica è stato innanzitutto necessario definire il contesto climatico e geografico in cui si inserisce l'edificio oggetto di studio. L'approccio preliminare ha riguardato l'acquisizione dei dati relativi alla localizzazione, alla classificazione climatica del Comune, ai dati di progetto invernali ed estivi, nonché alle grandezze meteorologiche medie (temperature e umidità relativa mensili).
A livello normativo, il fabbisogno termico di una zona viene determinato sulla base della suddivisione del territorio nazionale in sei zone climatiche, individuate in funzione dei gradi giorno. In particolare, il Comune di Cagliari rientra in zona climatica C, caratterizzata da un numero di gradi giorno compreso tra 901 e 1400. Tale classificazione è stata introdotta con il D.P.R. n. 412/1993, recante norme sugli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi energetici.
Per la scala regionale, i dati climatici vengono monitorati dall'ARPAS – Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Sardegna, che mette a disposizione valori medi orari e giornalieri di temperatura, umidità relativa e precipitazioni. A livello nazionale, la norma UNI 10349 costituisce il riferimento per la determinazione delle temperature medie mensili (°C) e dell'umidità relativa (%).

All'interno del software di simulazione energetica Termus, l'inserimento del Comune di riferimento consente l'adozione automatica dei dati climatici ufficialmente in vigore ( Fig. 88). Nella schermata "Dati Generali – Calcolo" vengono infatti riportati i valori di temperatura esterna di progetto, umidità relativa, gradi giorno, velocità del vento e andamento mensile delle grandezze climatiche, che costituiscono gli input di base per la simulazione.

Successivamente, è stata selezionata la tipologia di intervento corrispondente a "riqualificazione: involucro e impianto" ( Fig. 89).
L'edificio è stato modellato come composto da un'unica unità immobiliare, essendo servito da un impianto termico autonomo. La destinazione d'uso individuata corrisponde alla categoria E2 – Edifici adibiti a uffici e assimilabili, secondo quanto stabilito dai prospetti della normativa tecnica.
Sono stati quindi definiti i parametri generali richiesti dal software per la simulazione, tra cui il coefficiente di protezione dal vento; le proprietà termo-fisiche del terreno; le adduttanze esterne, ossia i coefficienti di scambio termico con l'ambiente esterno.

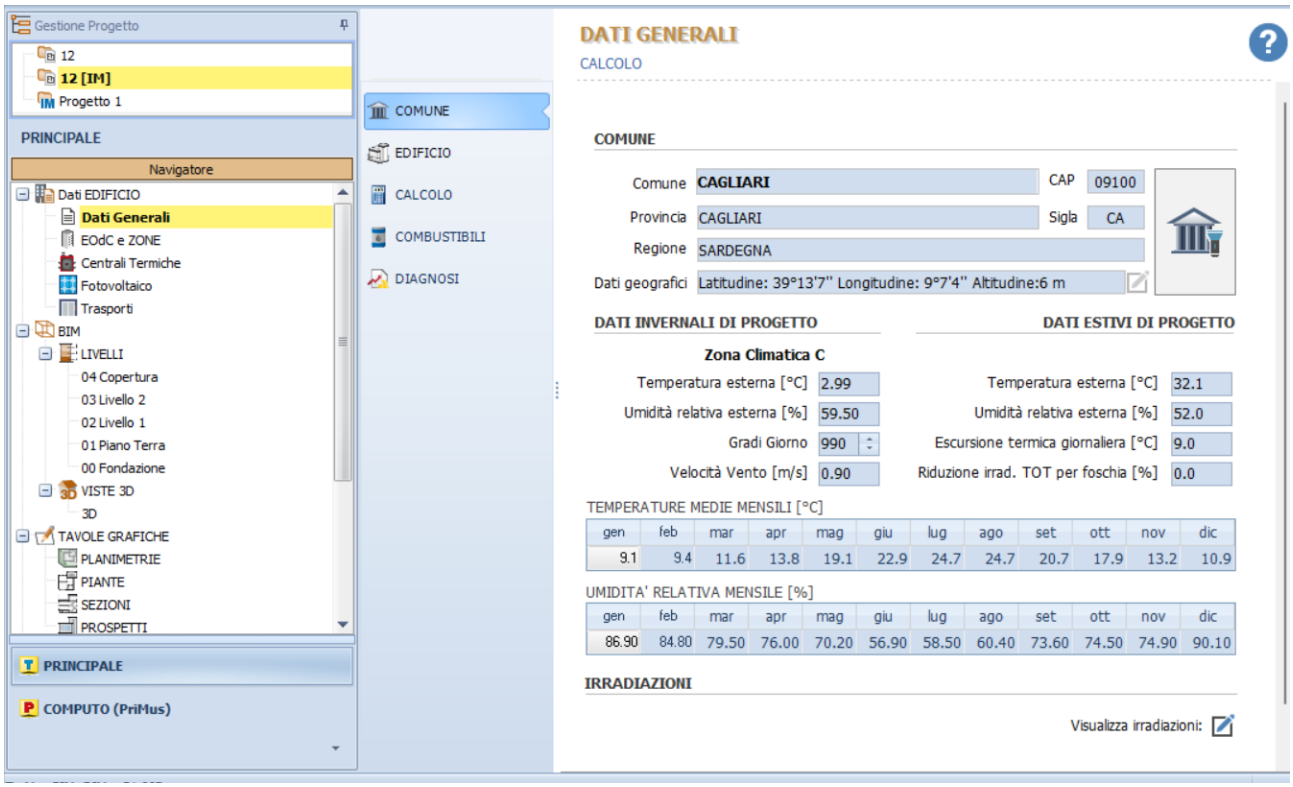



*Fig. 88. Interfaccia del software Termus: schermata "Dati Generali" relativa al Comune di Cagliari. Sono riportati i dati climatici di progetto e i valori medi mensili di temperatura e umidità, utilizzati come input per la simulazione energetica.*

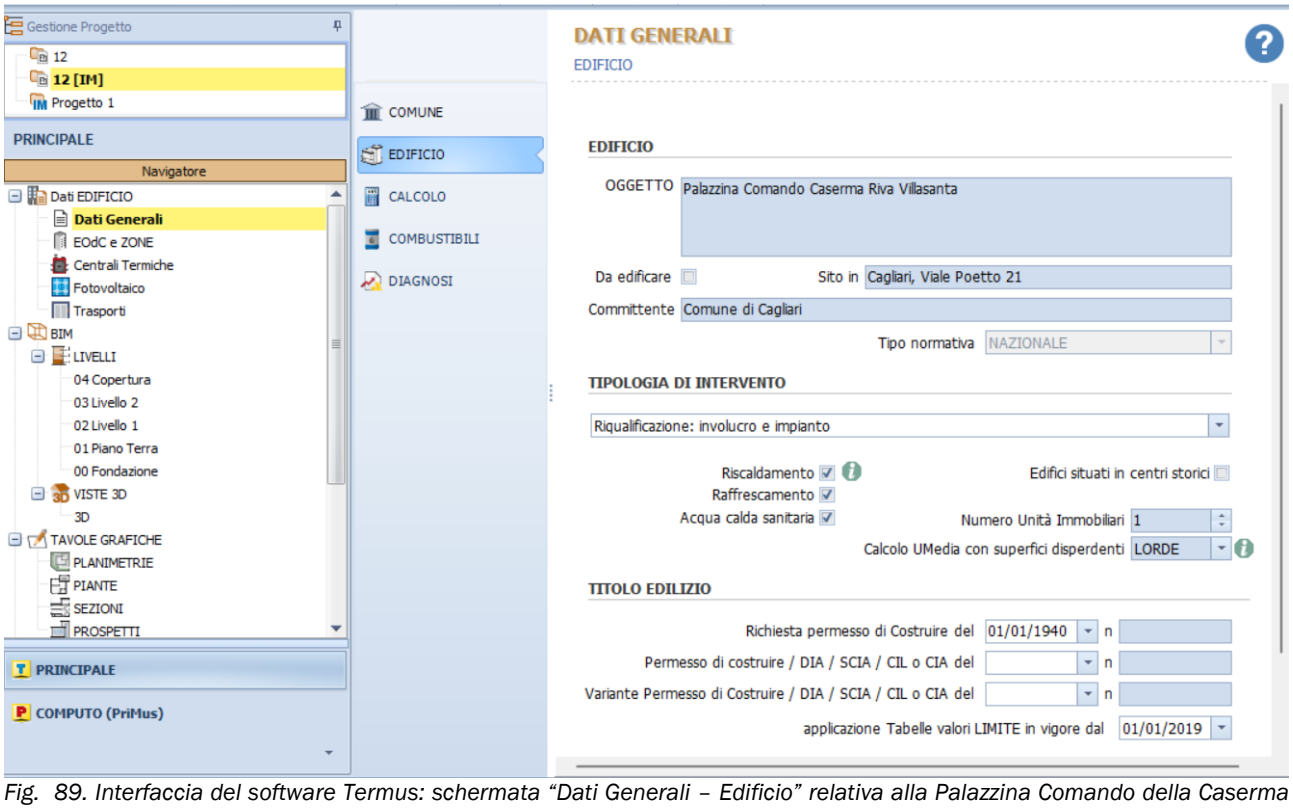



*Fig. 89. Interfaccia del software Termus: schermata "Dati Generali – Edificio" relativa alla Palazzina Comando della Caserma Riva Villasanta. Sono riportati i dati identificativi dell'edificio (localizzazione, committenza, tipologia d'intervento selezionata "riqualificazione: involucro e impianto") e le opzioni attivate per la simulazione energetica (riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria).*

Al termine della fase preliminare, i dati di input si traducono nella compilazione dei descrittori climatici della località (Tabella 69) e dei descrittori identificativi (Tabella 70).

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| DESCRITTORI CLIMATICI DELLA LOCALITA' | |
| CODICE COMPENDIO | CRV |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Zona climatica: | C |
| Gradi Giorno invernali (GG): | 990 |
| Temperatura esterna di progetto invernale: | 2,99 °C |
| Umidità relativa esterna invernale: | 59,5 % |
| Temperatura esterna di progetto estiva: | 32,1 °C |
| Umidità relativa esterna estiva: | 52,0 % |
| Escursione termica giornaliera estiva: | 9,0 °C |
| Velocità del vento di progetto: | 0,90 m/s |
| Altitudine del sito: | 6 m s.l.m. |
| Regione | Sardegna |
| Comune di riferimento | Cagliari, (CA) |
| Localizzazione | Viale Poetto 21 |
| Coordinate geografiche: | Lat. 39°13'7'' N – Long. 9°7'4'' E |
| Edificio situato in centro storico | No |

*Tabella 69. Applicazione dei descrittori climatici della località.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| DESCRITTORI CLIMATICI DELLA LOCALITA' | |
| CODICE COMPENDIO | CRV |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| Oggetto | Palazzina Comando Caserma Riva Villasanta |
| Nuova costruzione | No |
| Anno di costruzione | 1940 |
| Destinazione d'uso | Uffici (E2 – edifici adibiti a uffici e assimilabili) |
| Riqualificazione energetica | No |
| Classe energetica globale dell'edificio | Da definire |
| Codice certificato di prestazione energetica | Non disponibile |
| Data di emissione | Non disponibile |
| Validità | Non disponibile |
| Zone termiche | 1 |
| Nessun intervento eseguito sulla struttura dopo la costruzione | Sì |
| Tipo di intervento eseguito | - |

*Tabella 70. Applicazione dei descrittori identificativi dell'edificio.*

### 1.3.2 La libreria di progetto

Il processo di modellazione energetica si è fondato sulla costruzione di una libreria di progetto all'interno del software Termus, analoga per logica a quella già sviluppata in ambiente Revit. Anche Termus, infatti, dispone di archivi interni di materiali e componenti, che possono essere integrati o personalizzati in funzione delle specifiche esigenze del caso di studio.
In continuità con la metodologia adottata, i dati già sistematizzati attraverso il Raumbuch e successivamente implementati nel modello HBIM realizzato in Revit, sono stati trasferiti e rielaborati in Termus. Tale concatenazione ha garantito coerenza tra la fase documentale, la modellazione geometrico-informativa e la simulazione energetica.
La libreria di progetto è stata pertanto strutturata includendo le tipologie di elementi maggiormente rilevanti ai fini della certificazione energetica e del monitoraggio prestazionale, in particolare:

- Stratigrafie degli elementi opachi (muri e solai), desunte dalle analisi materiche e costruttive riportate nel Raumbuch e rese parametriche in Revit;
- Stratigrafie degli elementi trasparenti (infissi, vetri e telai), codificate secondo le categorie già adottate nel modello HBIM;
- Generatori di calore, parametrizzati per potenze, rendimenti e combustibili, in modo da rappresentare le condizioni reali dell'impianto;
- Ponti termici, modellati in base alle connessioni costruttive più ricorrenti e alle criticità emerse dall'analisi tipologica.

La creazione di questa libreria non ha rappresentato un passaggio isolato, ma un anello di congiunzione fra la fase di catalogazione e codifica (Raumbuch), la modellazione HBIM (Revit) e la successiva simulazione energetica (Termus). In tal modo è stato possibile mantenere un flusso di lavoro integrato, basato su dati coerenti e aggiornabili, evitando ridondanze e garantendo la tracciabilità delle informazioni su più piattaforme.
A titolo esemplificativo, l'analisi si concentra sullo studio condotto all'interno della caserma sulla palazzina comando, da qui in avanti identificata con il codice manufatto PCDO.

#### *1.3.2.1 Strutture opache verticali e relativi descrittori*

Grazie alla funzione "Involucro" di Termus è stato possibile definire le diverse tipologie di chiusure verticali opache – muri portanti, tramezzi, tamponature esterne – e, più in generale, tutti gli elementi edilizi di separazione non trasparenti. L'involucro, in quanto oggetto parametrico, viene rappresentato graficamente dal solo perimetro, ma al suo interno raccoglie un insieme articolato di informazioni relative alla stratigrafia, ai materiali, alle proprietà geometriche e prestazionali.
In questa fase l'obiettivo principale è stato quello di gestire le stratigrafie già codificate nel modello HBIM di Revit, importandole correttamente in Termus per garantire continuità al flusso metodologico impostato a partire dal Raumbuch. È stata quindi creata una libreria dedicata alle stratigrafie verticali della Palazzina Comando, organizzata per spessori murari: a ciascuna tipologia è stata associata una struttura specifica che descrive puntualmente le caratteristiche della parete analizzata.
Per ogni stratigrafia definita, Termus calcola automaticamente spessore complessivo, trasmittanza termica, massa superficiale e capacità termica areica. A tali valori di progetto sono stati affiancati i risultati dei rilievi diretti effettuati in situ mediante termoflussimetro, così da confrontare i dati simulati con quelli reali. Le verifiche hanno mostrato una buona corrispondenza, confermando l'attendibilità della modellazione.
L'elaborazione delle stratigrafie ha consentito di tradurre le informazioni geometriche e termo-fisiche in descrittori di involucro, integrando così la fase di catalogazione con quella di calcolo energetico.

**Mue_01a** – Muratura in conci irregolari di pietra calcarea, malta di calce, sp. 70 cm.

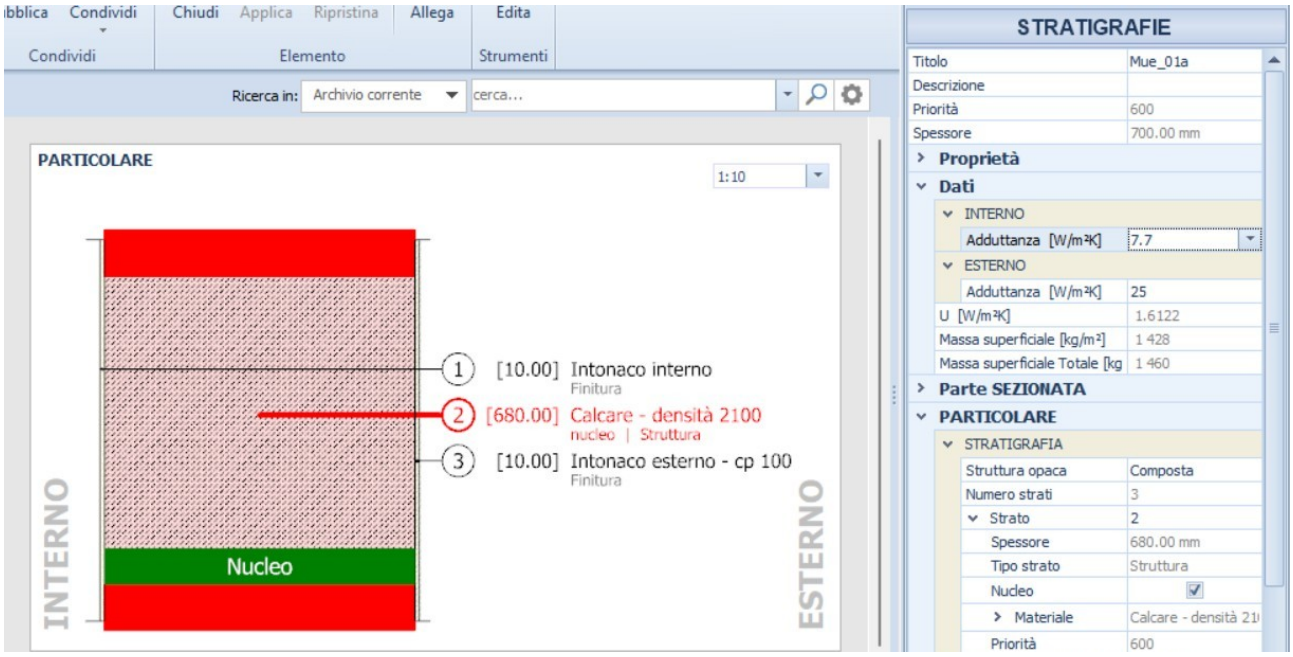



*Fig. 90. Stratigrafia Mue_01 all'interno di Termus con relative proprietà termofisiche e parametri di calcolo.*

Per la stratigrafia Mue_01a è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Mue_01a (codice identificativo)* | - |
| *Numero di strati* | *3* | - |
| *Materiale strutturale principale* | *Pietra calcarea* | - |
| *Spessore totale parete* | *700* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *1,61* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *0,054* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *1428* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *1460* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/esterno* | - |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,7* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25* | *W/m²K* |

*Tabella 71. Applicazione dei descrittori sulle strutture opache verticali alla muratura Mue_01a.*

**Mue_01b** – Muratura in conci irregolari di pietra calcarea, malta di calce, sp. 40 cm.

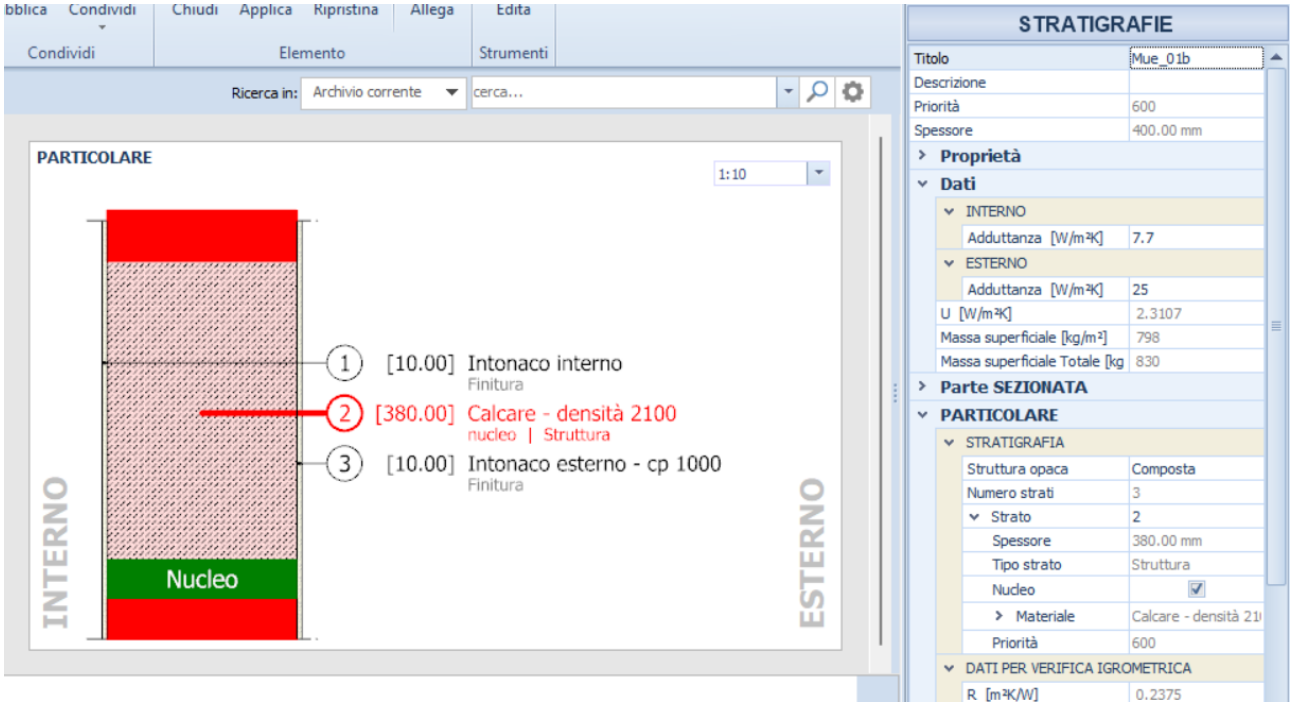



*Fig. 91. Stratigrafia verticale Mue_01b all'interno di Termus con relative proprietà termofisiche e parametri di calcolo.*

Per la stratigrafia Mue_01b è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Mue_01b (codice identificativo)* | - |
| *Numero di strati* | *3* | - |
| *Materiale strutturale principale* | *Pietra calcarea* | - |
| *Spessore totale parete* | *400* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *2,31* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *798* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *830* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/esterno* | - |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,7* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25* | *W/m²K* |

*Tabella 72. Applicazione dei descrittori sulle strutture opache verticali alla muratura Mue_01b.*

**Mue_01c** – Muratura in conci irregolari di pietra calcarea, malta di calce, sp. 60 cm.

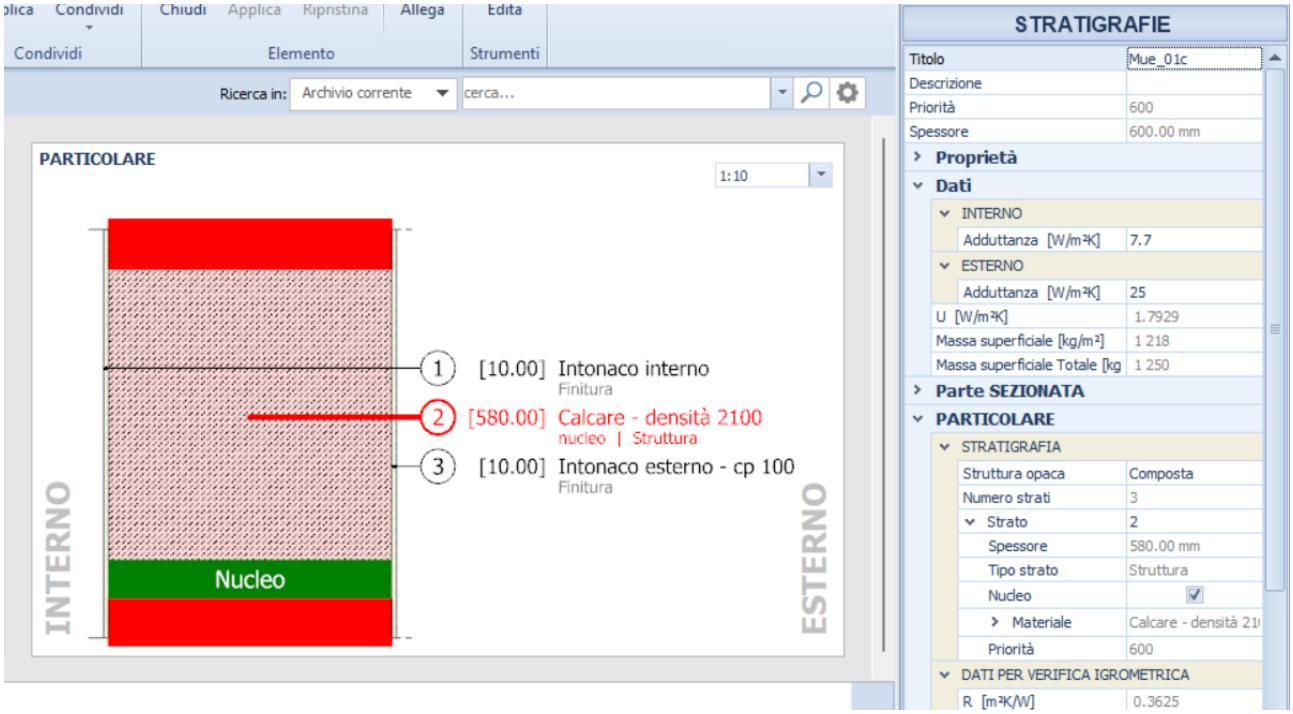



*Fig. 92. Stratigrafia Mue_01 all'interno di Termus con relative proprietà termofisiche e parametri di calcolo.*

Per la stratigrafia Mue_01c è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Mue_01c (codice identificativo)* | - |
| *Numero di strati* | *3* | - |
| *Materiale strutturale principale* | *Pietra calcarea* | - |
| *Spessore totale parete* | *600* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *1,79* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *0,108* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *1218* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *1250* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/esterno* | - |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,7* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25* | *W/m²K* |

*Tabella 73. Applicazione dei descrittori sulle strutture opache verticali alla muratura Mue_01c.*

**Mue_02a** – Muratura in pietra calcarea con rivestimento in laterizio, sp. 63 cm.

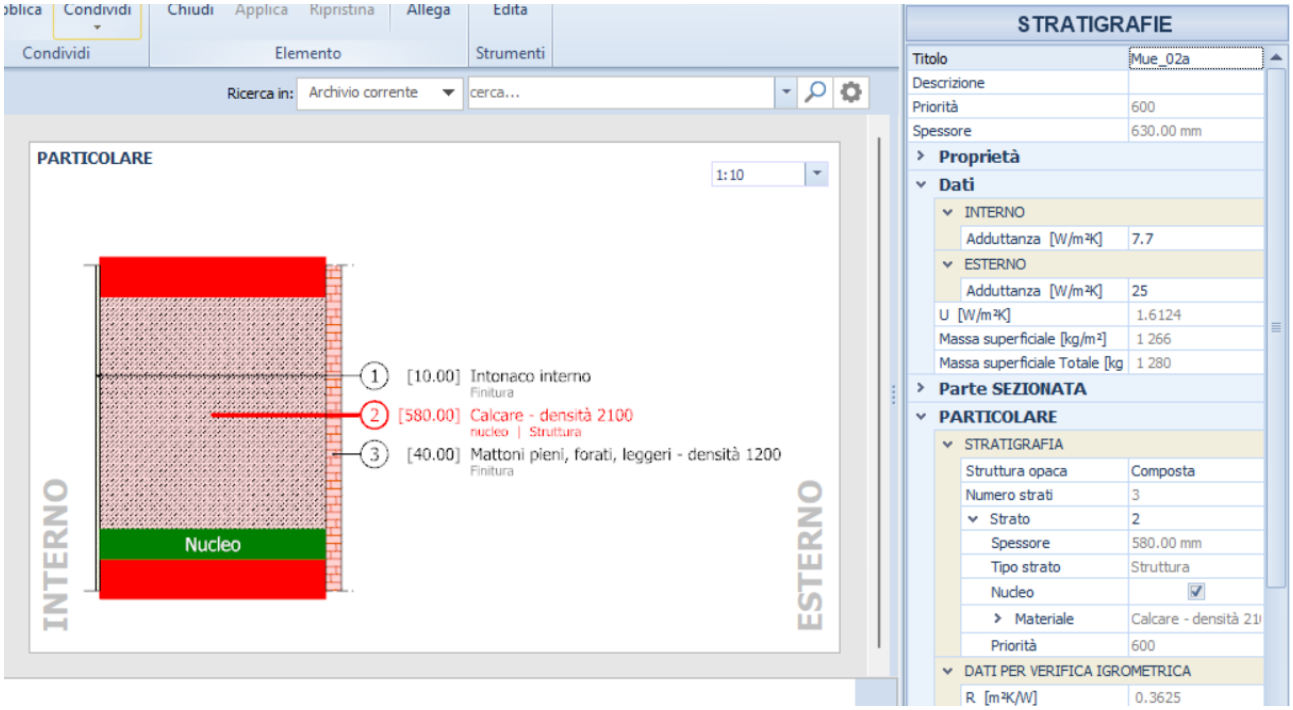



*Fig. 93. Stratigrafia verticale Mue_02a all'interno di Termus con relative proprietà termofisiche e parametri di calcolo.*

Per la stratigrafia Mue_02a è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Mue_02a (codice identificativo)* | - |
| *Numero di strati* | *3* | - |
| *Materiale strutturale principale* | *Pietra calcarea* | - |
| *Spessore totale parete* | *630* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *1,61* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *0,068* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *1266* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *1280* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/esterno* | - |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,7* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25* | *W/m²K* |

*Tabella 74. Applicazione dei descrittori sulle strutture opache verticali alla muratura Mue_02a.*

**Mue_02b** – Muratura in pietra calcarea con rivestimento in laterizio, sp. 93 cm.

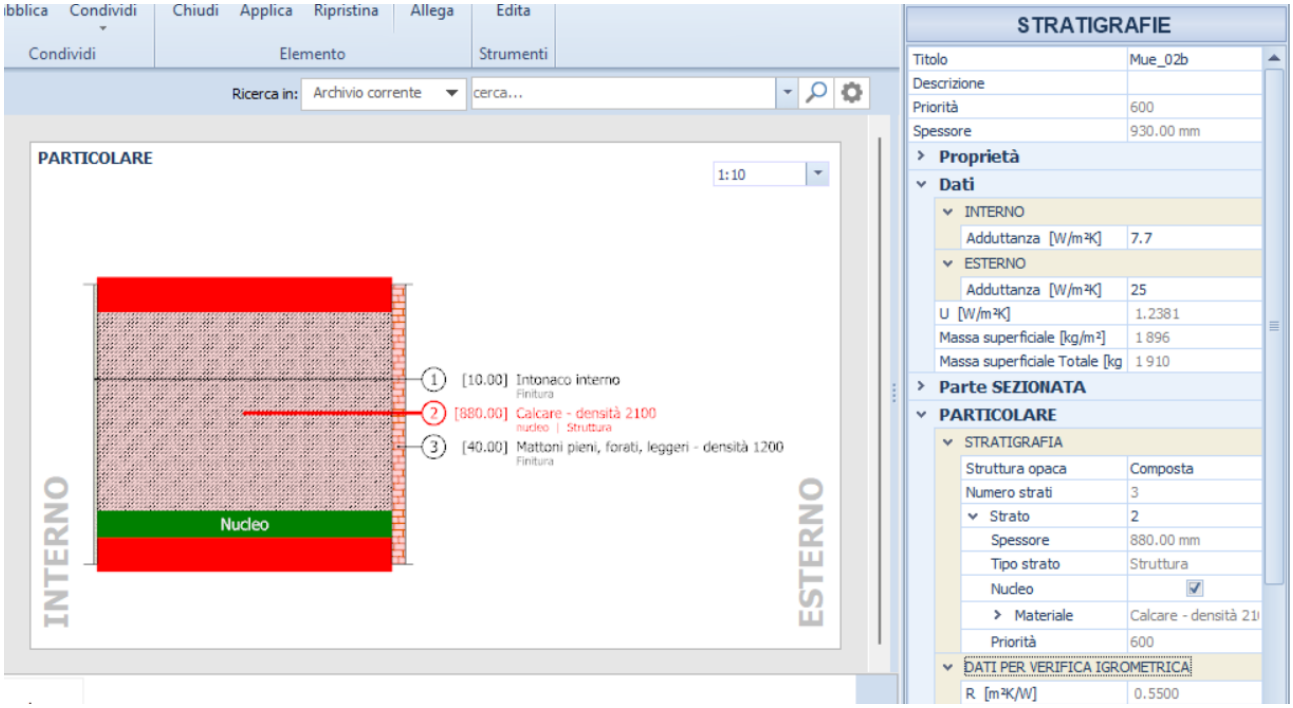



*Fig. 94. Stratigrafia verticale Mue_02b all'interno di Termus con relative proprietà termofisiche e parametri di calcolo.*

Per la stratigrafia Mue_02b è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Mue_02b (codice identificativo)* | - |
| *Numero di strati* | *3* | - |
| *Materiale strutturale principale* | *Pietra calcarea* | - |
| *Spessore totale parete* | *930* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *1,24* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *0,01* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *1896* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *1910* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/esterno* | |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,7* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25* | *W/m²K* |

*Tabella 75. Applicazione dei descrittori sulle strutture opache verticali alla muratura Mue_02b.*

**Mue_02c** – Muratura in pietra calcarea con rivestimento in laterizio, sp. 73 cm.

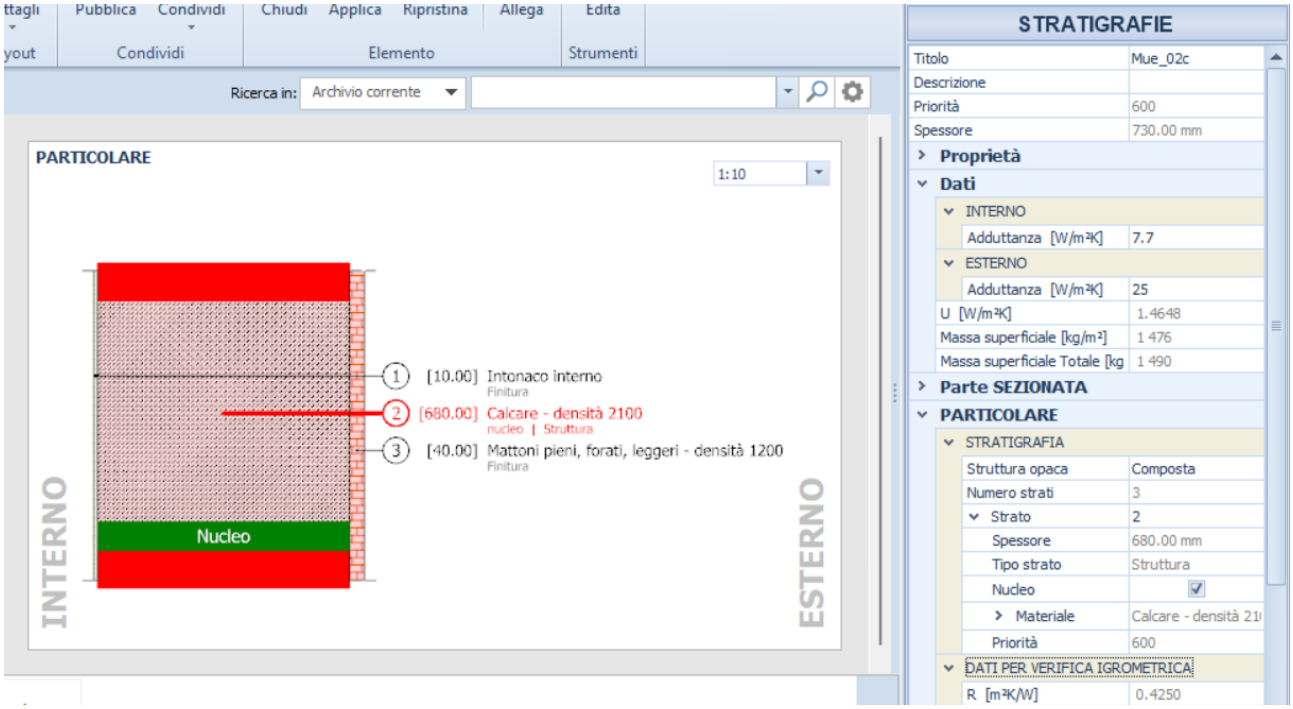



*Fig. 95. Stratigrafia verticale Mue_02c all'interno di Termus con relative proprietà termofisiche e parametri di calcolo.*

Per la stratigrafia Mue_02c è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Mue_02c (codice identificativo)* | - |
| *Numero di strati* | *3* | - |
| *Materiale strutturale principale* | *Pietra calcarea* | - |
| *Spessore totale parete* | *730* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *1,46* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *0,034* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *1476* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *1490* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/esterno* | - |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,7* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25* | *W/m²K* |

*Tabella 76. Applicazione dei descrittori sulle strutture opache verticali alla muratura Mue_02c.*

**Mue_03a** – Muratura in pietra calcarea con rivestimento in marmo, sp. 73 cm.

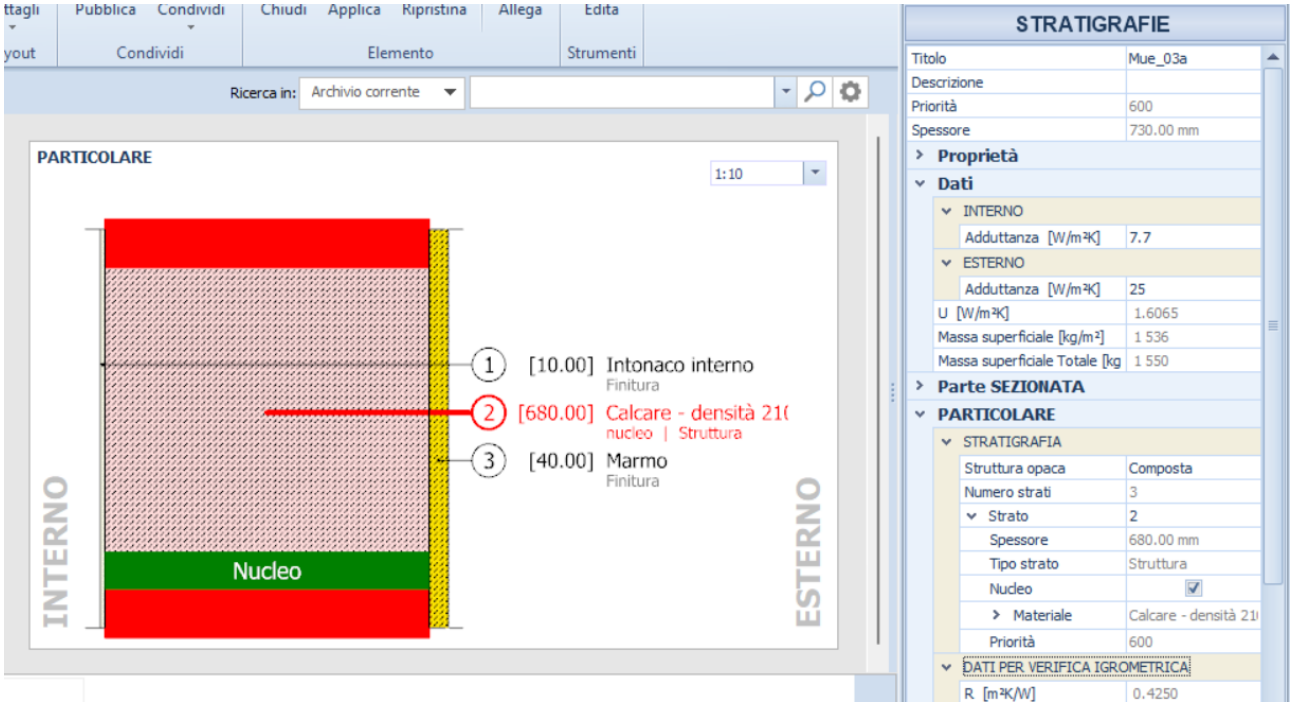



*Fig. 96. Stratigrafia verticale Mue_03a all'interno di Termus con relative proprietà termofisiche e parametri di calcolo.*

Per la stratigrafia Mue_03a è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Mue_03a (codice identificativo)* | - |
| *Numero di strati* | *3* | - |
| *Materiale strutturale principale* | *Pietra calcarea* | - |
| *Spessore totale parete* | *730* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *1,60* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *0,049* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *1536* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *1550* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/esterno* | - |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,7* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25* | *W/m²K* |

*Tabella 77. Applicazione dei descrittori sulle strutture opache verticali alla muratura Mue_03a.*

**Mue_03b** – Muratura in pietra calcarea con rivestimento in marmo, sp. 118 cm.

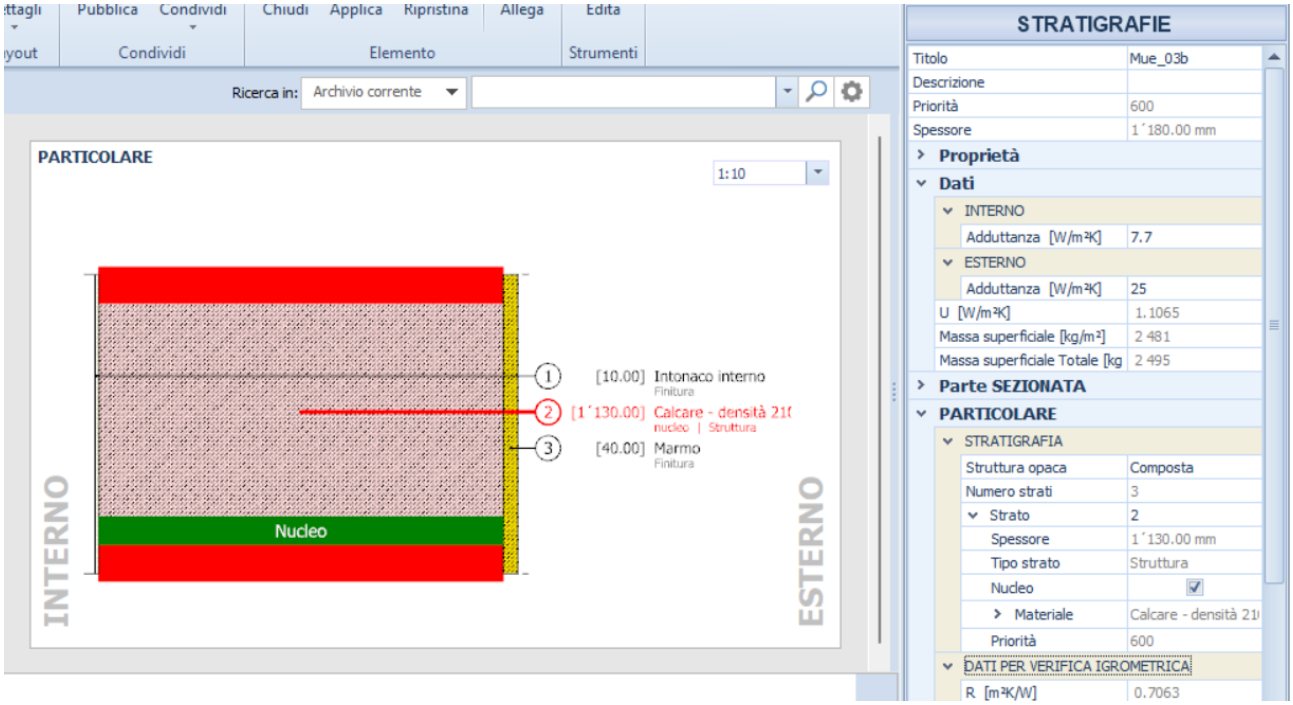



*Fig. 97. Stratigrafia verticale Mue_03b all'interno di Termus con relative proprietà termofisiche e parametri di calcolo.*

Per la stratigrafia Mue_03b è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Mue_03b (codice identificativo)* | - |
| *Numero di strati* | *3* | - |
| *Materiale strutturale principale* | *Pietra calcarea* | - |
| *Spessore totale parete* | *1180* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *1,10* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *0,002* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *2461* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *2495* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/esterno* | - |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,7* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25* | *W/m²K* |

*Tabella 78. Applicazione dei descrittori sulle strutture opache verticali alla muratura Mue_03b.*

**Mue_03c** – Muratura in pietra calcarea con rivestimento in marmo, sp. 88 cm.

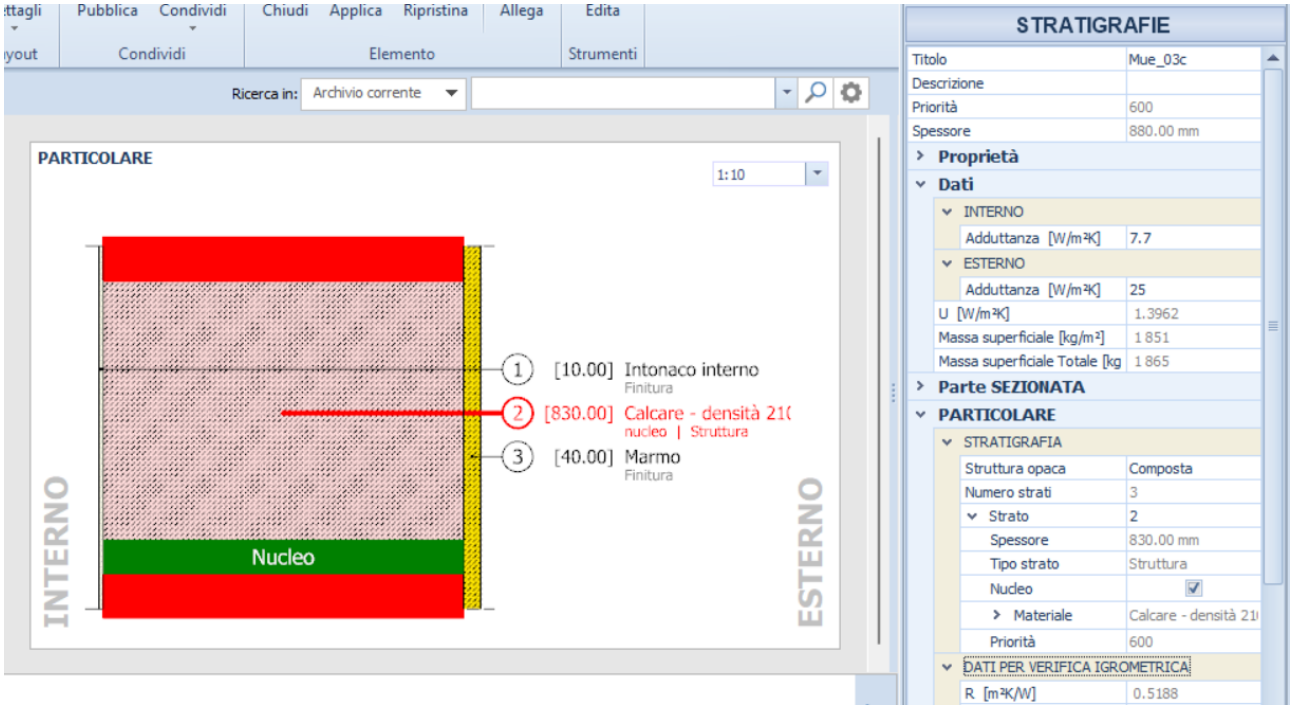



*Fig. 98. Stratigrafia verticale Mue_03c all'interno di Termus con relative proprietà termofisiche e parametri di calcolo.*

Per la stratigrafia Mue_03c è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Mue_03c (codice identificativo)* | - |
| *Numero di strati* | *3* | - |
| *Materiale strutturale principale* | *Pietra calcarea* | - |
| *Spessore totale parete* | *880* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *1,39* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *0,017* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *1851* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *1865* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/esterno* | - |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,7* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25* | *W/m²K* |

*Tabella 79. Applicazione dei descrittori sulle strutture opache verticali alla muratura Mue_03c.*

#### *1.3.2.2 Stratigrafie degli elementi opachi orizzontali e relativi descrittori*

Anche per le chiusure orizzontali si è resa necessaria una fase di ricostruzione stratigrafica, finalizzata a definire i parametri di trasmissione termica dei diversi pacchetti tecnologici. Nel caso specifico della Palazzina Comando, questa operazione è risultata particolarmente complessa a causa della scarsità di documentazione d'archivio: non sono infatti disponibili disegni esecutivi o inventari materiali in grado di descrivere nel dettaglio gli orizzontamenti. Per questo motivo si è fatto ricorso a rilievi diretti in sito, integrati da misure strumentali tramite termoflussimetro, e a confronti con bibliografia tecnica relativa agli edifici storici del primo Novecento.
Sulla base di questi dati, è stato possibile definire le principali tipologie di solaio presenti. Il solaio a contatto con il terreno, poggiante sulla platea di fondazione, è stato ricostruito come vespaio aerato, con pavimentazione in piastrelle ceramiche (Fig. 99). I solai interpiano e quelli delle due terrazze esterne sono stati invece identificati come laterocemento alleggerito, caratterizzati dalla presenza di pignatte tra travetti e completati da una cappa in calcestruzzo di 4–5 cm, anch'essi rifiniti superiormente da rivestimento ceramico (Fig. 101). La copertura dell'edificio è costituita da un tetto a due falde, impostato sopra un'ulteriore chiusura piana, a completamento dell'orizzontamento di sottotetto. Quest'ultima è stata modellata attraverso due diverse stratigrafie: la prima corrispondente alla terrazza praticabile (Fig. 103), la seconda alla copertura a falde (Fig. 105).
Tutti i pacchetti stratigrafici sono stati modellati inizialmente in Revit, per essere poi importati in Termus, dove sono stati costruiti in maniera dettagliata nella libreria del progetto. Per ciascun solaio è stata definita una specifica stratigrafia, calibrata in modo da ottenere valori di trasmittanza in linea con i risultati sperimentali. A tal fine, sono stati creati ad hoc i materiali riscontrati in fase di rilievo, attribuendo loro le proprietà fisiche derivate dalle misure strumentali.

Le schermate del software riportate di seguito illustrano le finestre di lavoro utilizzate per l'inserimento e la gestione delle stratigrafie dei solai, documentando in maniera puntuale la composizione e le caratteristiche termiche delle chiusure orizzontali della Palazzina Comando.
L'elaborazione delle stratigrafie ha poi consentito di tradurre le informazioni geometriche e termo-fisiche in descrittori di involucro, integrando così la fase di catalogazione con quella di calcolo energetico.

*Solaio di base*

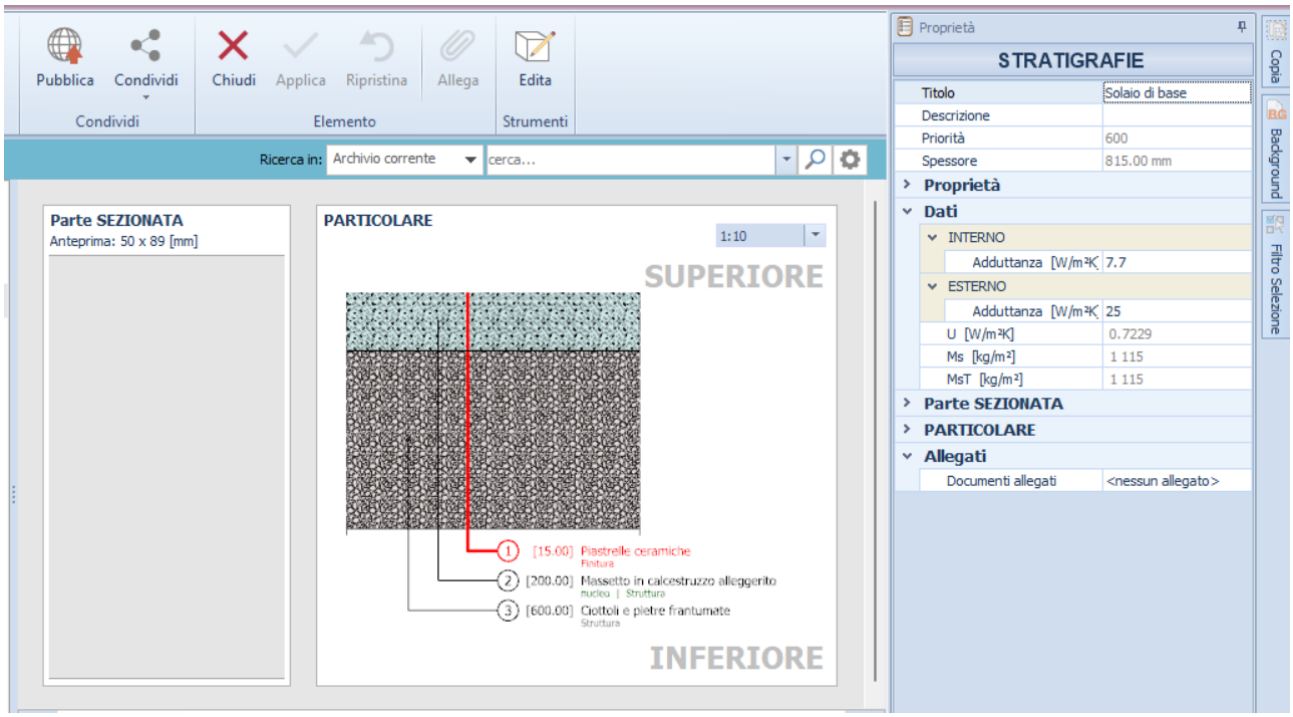



*Fig. 99. Definizione della stratigrafia del solaio di base all'interno di Termus.*

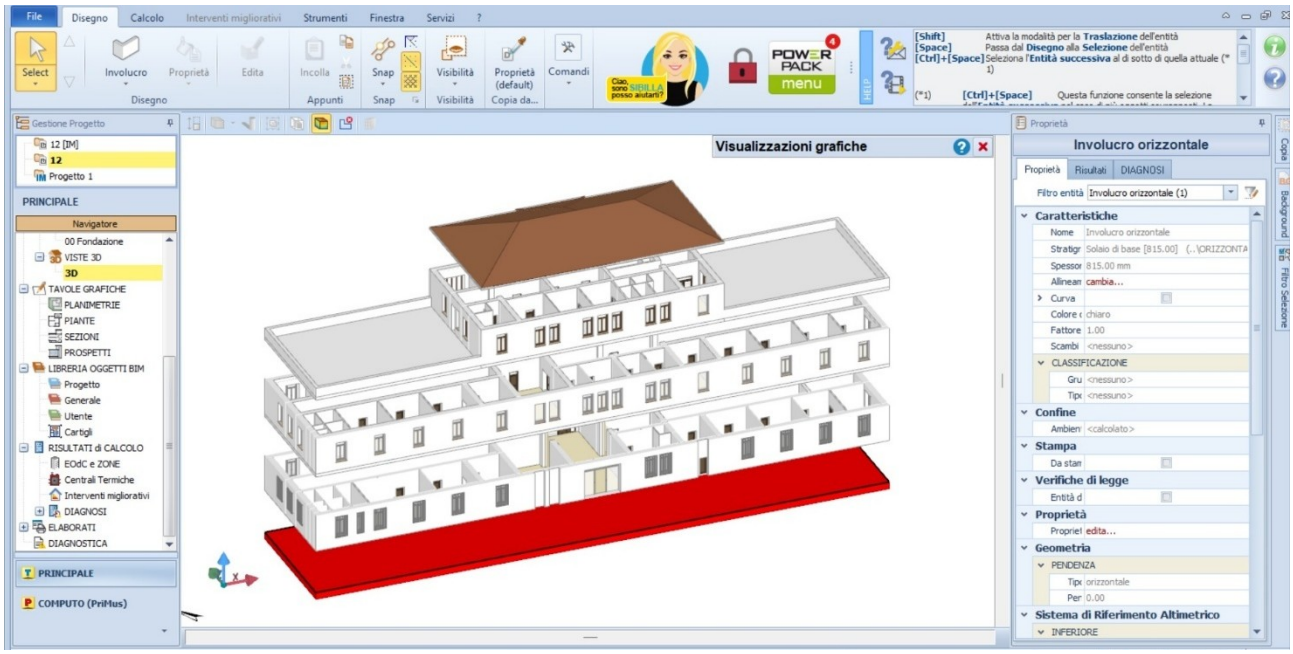



*Fig. 100. Modellazione 3D della Palazzina Comando in Termus: evidenziato in rosso il solaio di base.*

Per la stratigrafia del solaio di base è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |

| | | |
|---|---|---|
| *Stratigrafia* | *Solaio di base* | *-* |
| *Materiale strutturale principale* | *Conglomerato lapideo (ciottoli e pietrame frantumato, con massetto in calcestruzzo alleggerito* | *-* |
| *Spessore* | *815* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *0,70* | *W/m²K* |
| *Resistenza termica* | *1,38* | *m²K/W* |
| *Conduttanza termica* | *0,82* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *1114* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *1114* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/superiore – Esterno/inferiore (verso terreno)* | *-* |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *5,9* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25* | *W/m²K* |

*Tabella 80. Applicazione dei descrittori sulla struttura opaca orizzontale del solaio di base.*

*Solaio intermedio*

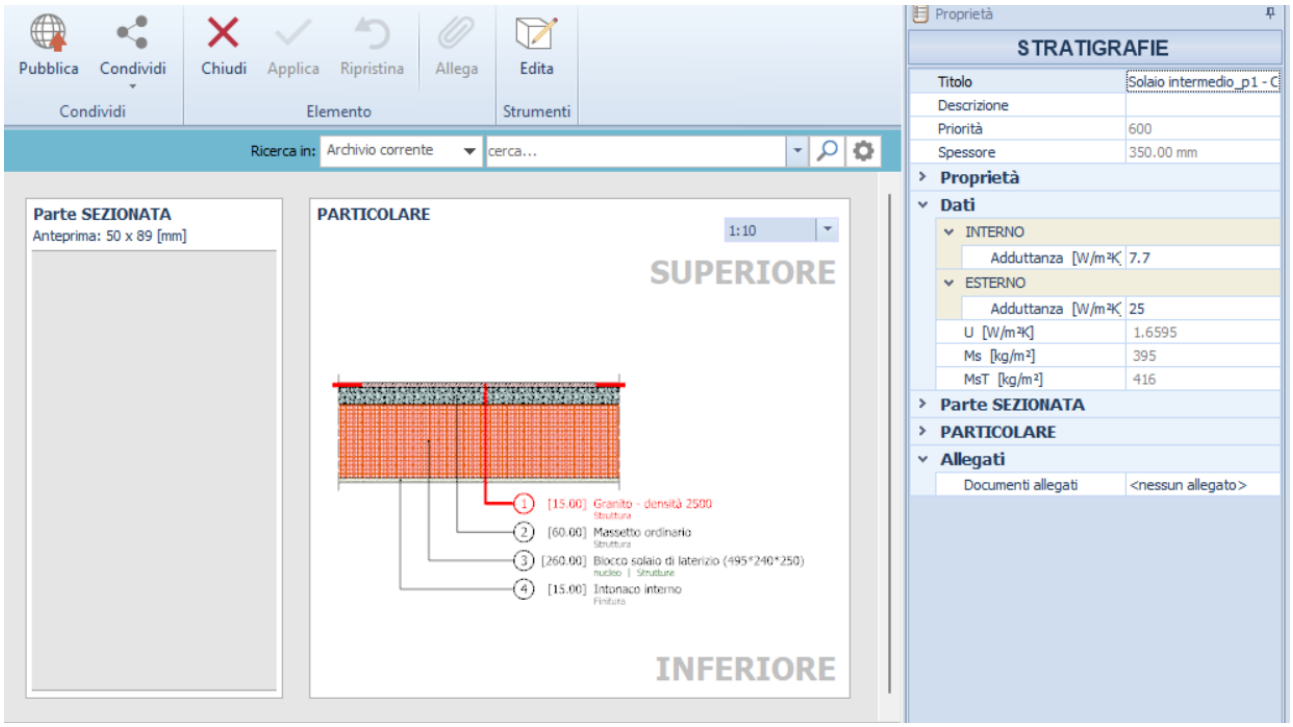



*Fig. 101. Definizione della stratigrafia del solaio interpiano in laterocemento all'interno di Termus.*

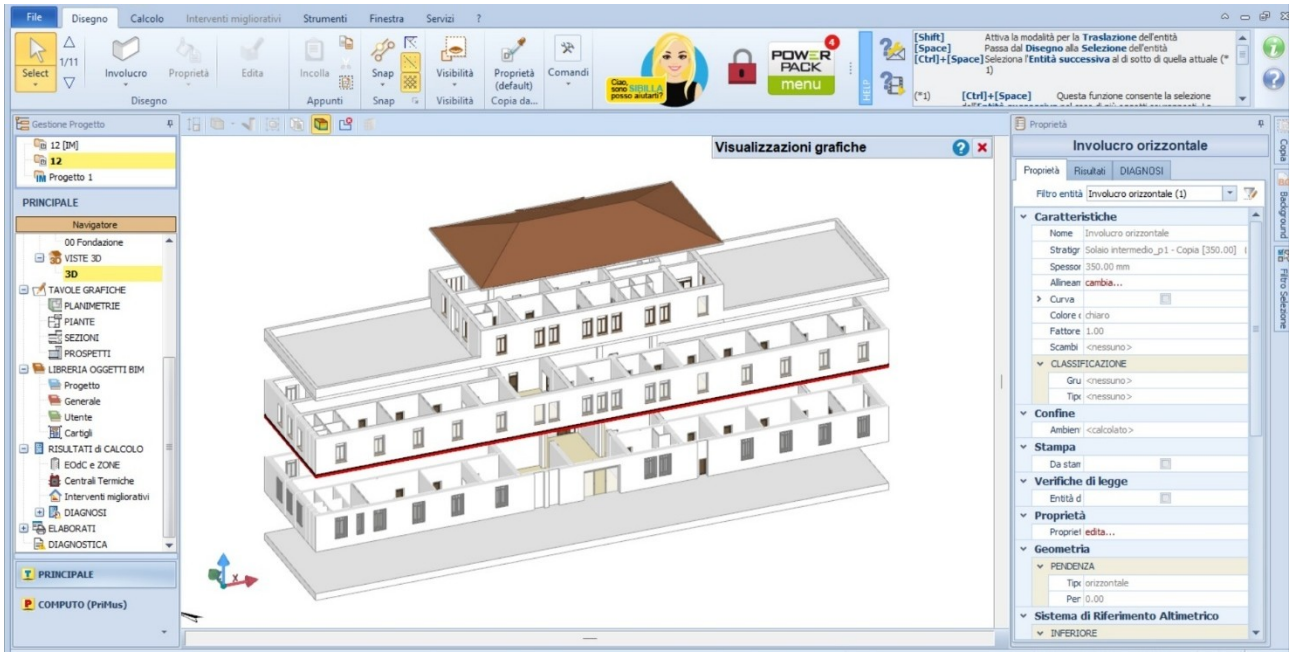



*Fig. 102. Modellazione 3D della Palazzina Comando in Termus: evidenziato in rosso il solaio interpiano.*

Per la stratigrafia del solaio di intermedio è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |

| | | |
|---|---|---|
| *Stratigrafia* | *Solaio intermedio* | - |
| *Materiale strutturale principale* | *Laterizio* | - |
| *Spessore* | *350* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *1,66* | *W/m²K* |
| *Resistenza termica* | *0,60* | *m²K/W* |
| *Conduttanza termica* | *2,31* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *394* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *415* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/interno* | - |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,7* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *7,7* | *W/m²K* |

*Tabella 81. Applicazione dei descrittori sulla struttura opaca orizzontale del solaio intermedio.*

*Solaio terrazzo*

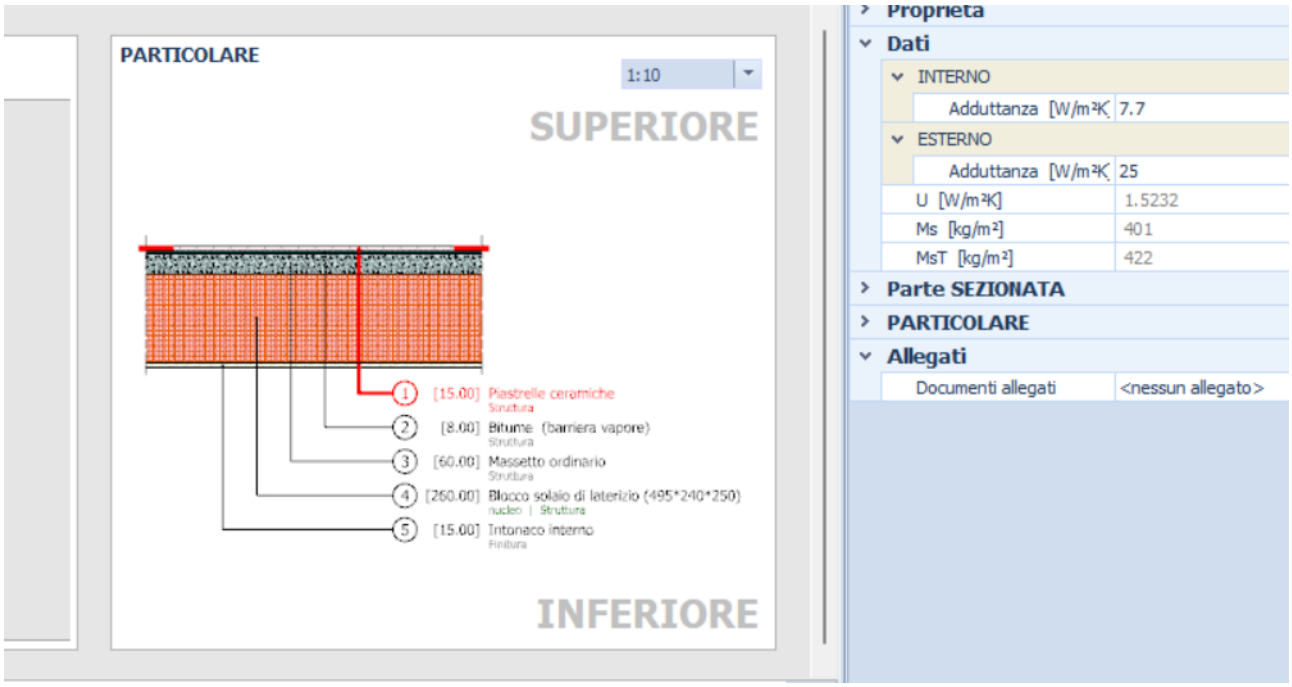



*Fig. 103. Definizione della stratigrafia del solaio di copertura delle terrazze nello stato di fatto, modellata in Termus.*

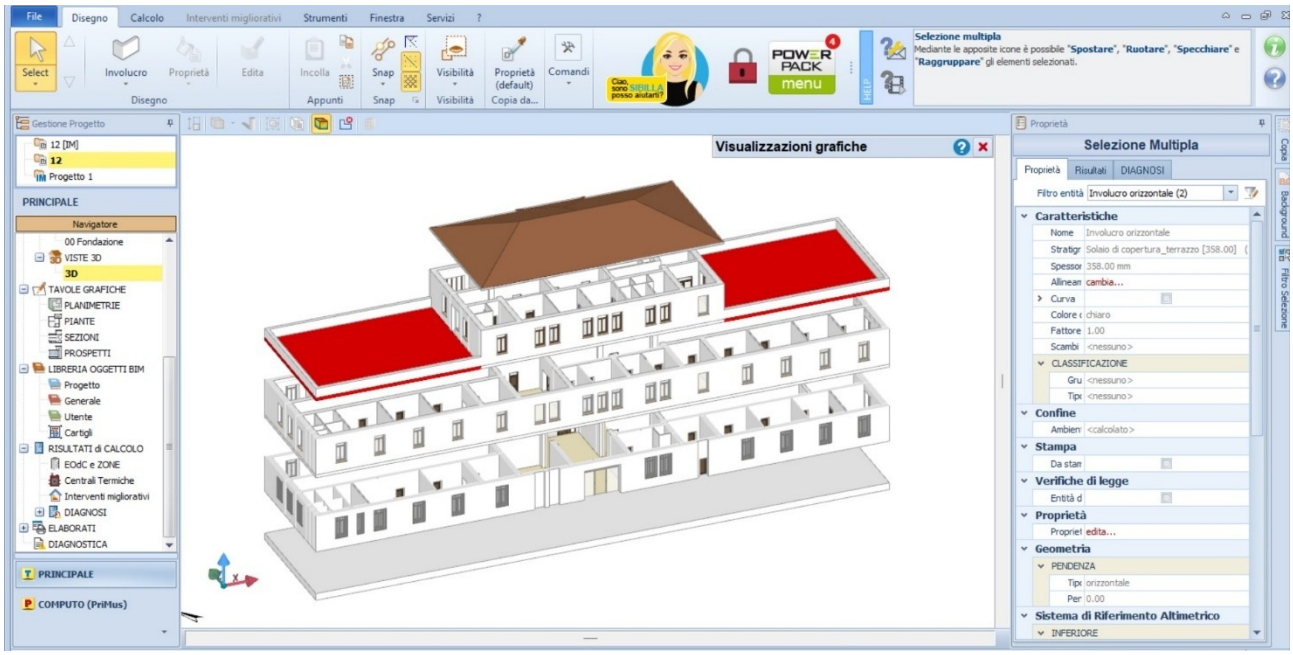



*Fig. 104. Modellazione 3D della Palazzina Comando in Termus: evidenziato in rosso il solaio di copertura delle terrazze.*

Per la stratigrafia del solaio delle terrazze è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Solaio terrazze* | - |
| *Materiale strutturale principale* | *Laterizio* | - |

| | | |
|---|---|---|
| *Spessore* | *358* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *1,52* | *W/m²K* |
| *Resistenza termica* | *-* | *m²K/W* |
| *Conduttanza termica* | *2,05* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *401* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *422* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/esterno* | *-* |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,7* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25* | *W/m²K* |

*Tabella 82. Applicazione dei descrittori sulla struttura opaca orizzontale del solaio delle terrazze.*

*Solaio copertura*

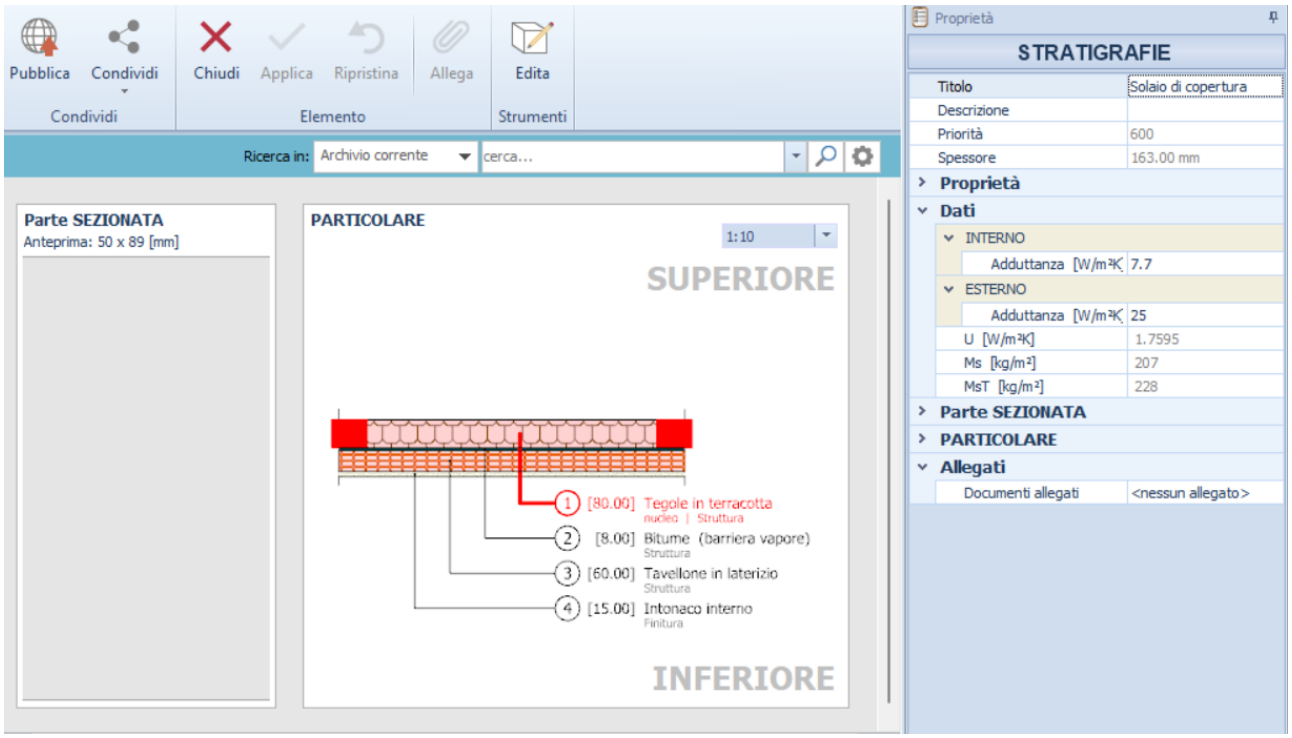



*Fig. 105. Definizione della stratigrafia della copertura a falde all'interno di Termus.*

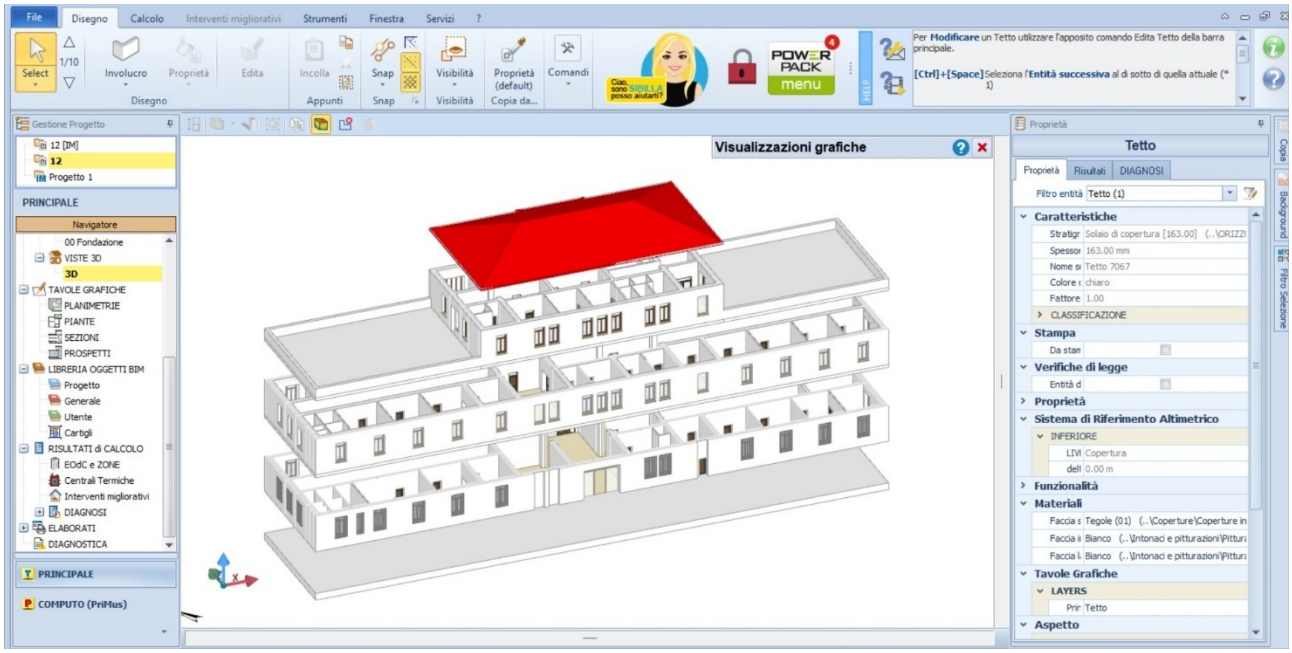



*Fig. 106. Modellazione 3D della Palazzina Comando in Termus: evidenziato in rosso il solaio della copertura a falde.*

Per la stratigrafia del solaio di copertura è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |

| | | |
|---|---|---|
| *Stratigrafia* | *Solaio di copertura* | - |
| *Materiale strutturale principale* | *Laterizio* | - |
| *Spessore* | *163* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *1,76* | *W/m²K* |
| *Resistenza termica* | *0,57* | *m²K/W* |
| *Conduttanza termica* | | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *207* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *228* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/esterno* | - |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,7* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25* | *W/m²K* |

*Tabella 83. Applicazione dei descrittori sulla struttura opaca orizzontale del solaio di copertura.*

### *1.3.2.3 Stratigrafie delle chiusure trasparenti e relativi descrittori*

La definizione degli infissi della Palazzina Comando è stata condotta a partire dal Raumbuch, che ha permesso di distinguere le diverse tipologie presenti e di organizzarle nella libreria oggetti BIM. Questa classificazione è stata poi trasferita nel modello energetico in Termus, dove gli infissi sono stati inseriti tramite lo strumento finestra.
La differenza principale riguarda i serramenti dei primi due piani e quelli del secondo piano. I primi sono stati modellati come vetro singolo con telaio in alluminio, assumendo i valori della norma UNI EN ISO 10077-1 e selezionando nel database del software la tipologia meno performante (U = 5,8 W/m²K). I secondi, più recenti, sono stati rappresentati come vetrocamera con intercapedine da 11 mm e telaio in legno, con trasmittanza pari a U = 3,3 W/m²K.
Anche i sistemi di oscuramento sono stati catalogati nel Raumbuch: tapparelle esterne in PVC con cassonetti in legno e tende interne in tessuto bianco. Poiché in Termus è possibile associare un solo sistema di schermatura per ciascuna finestra, si è scelto di considerare le tapparelle, ritenute più significative dal punto di vista energetico.
L'integrazione tra rilievo, Raumbuch, modellazione BIM e simulazione in Termus ha quindi permesso di rappresentare gli infissi in maniera coerente, garantendo una corrispondenza diretta tra il dato architettonico e le proprietà termo-fisiche utilizzate nei calcoli energetici.

**Ine_01 – Porte esterne in alluminio**

**Ine_01a** – Porta d'ingresso a doppia anta bipartita, scorrevole. Dimensioni complessive: 4,70 × 3,50 m. L'area vetrata è pari a 13,5 m², con vetro singolo di spessore 4 mm. Il telaio è in alluminio privo di taglio termico. Sono presenti sistemi di oscuramento esterni costituiti da avvolgibili, mentre tende interne in tessuto bianco compaiono solo in alcuni ambienti. Dal punto di vista prestazionale, la vetrata presenta una trasmittanza Ug = 5,7 W/m²K, mentre il telaio ha valore Uf = 7,0 W/m²K.

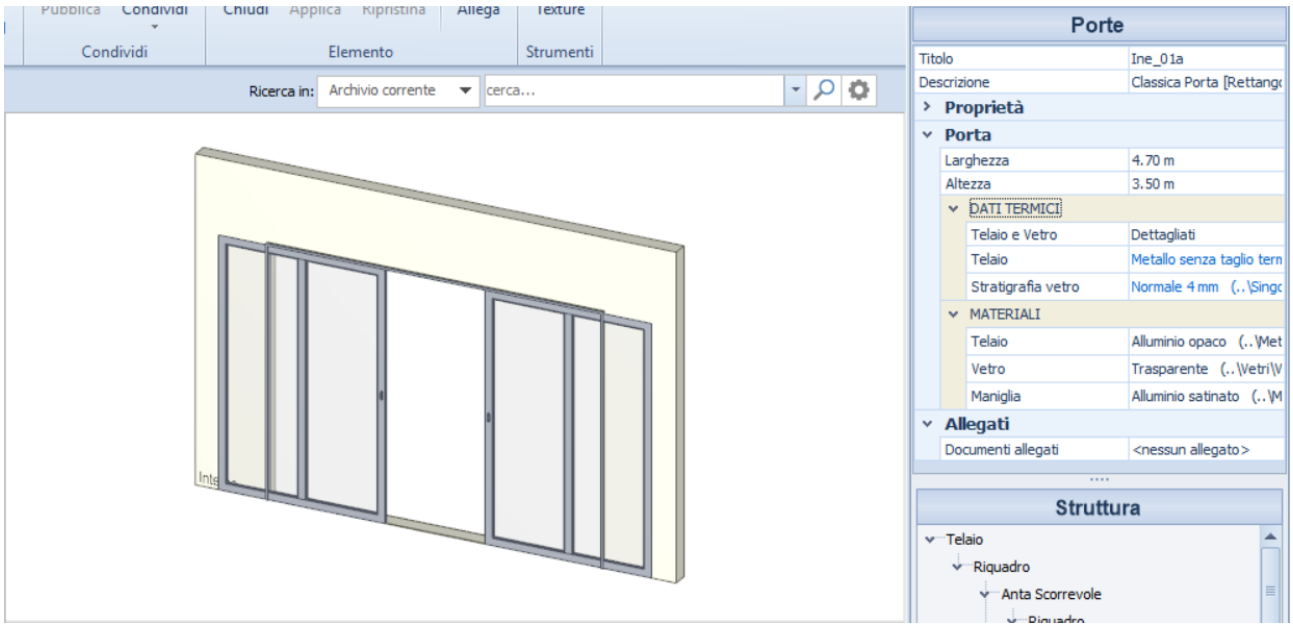


*Fig. 107. Definizione della finestra Ine_01a all'interno di Termus.*

Per la stratigrafia dell'infisso Ine_01a è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Ine_01a* | - |

| | | |
|---|---|---|
| *Esposizione* | *-* | *-* |
| *Lunghezza* | *4,70* | *m* |
| *Altezza* | *3,50* | *m* |
| *Perimetro vetro* | *30,25* | *m* |
| *Area vetro* | *14,43* | *m²* |
| *Area telaio* | *2,01* | *m²* |
| *Superficie infisso* | *16,45* | *m²* |
| *Chiusure oscuranti interne* | *Tende, avvolgibili* | *-* |
| *Schermature solari esterne* | *Non presenti* | *-* |
| *Dimensioni sottofinestra* | *Assente* | *-* |
| *Dimensioni cassonetto* | *Assente* | *-* |
| *Stratigrafia cassonetto* | *-* | *-* |
| *Trasmittanza termica intero infisso (Uw)* | *5,9* | *W/m²K* |
| *Tipo vetro* | *Vetro singolo* | *-* |
| *Spessore del vetro* | *4* | *mm* |
| *Spessore intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Gas intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Fattore solare (g)* | *0,85* | *-* |
| *Trasmittanza termica vetro (Ug)* | *5,75* | *W/m²K* |
| *Materiale telaio* | *Alluminio* | *-* |
| *Taglio termico* | *No* | *-* |
| *Spessore telaio* | *50* | *mm* |
| *Trasmittanza termica telaio (Uf)* | *7,00* | *W/m²K* |
| *Tipologia distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Trasmittanza distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |

*Tabella 84. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente Ine_02a.*

**Ine_02 – Finestre esterne in alluminio**

**Ine_02a** – Finestra a doppia anta con sopraluce. Dimensioni complessive: 2,30 × 1,20 m. L'area vetrata è pari a 2,90 m², con vetro singolo di spessore 4 mm. Il telaio è in alluminio privo di taglio termico. Sono presenti sistemi di oscuramento esterni costituiti da avvolgibili, mentre tende interne in tessuto bianco compaiono solo in alcuni ambienti. Dal punto di vista prestazionale, la vetrata presenta una trasmittanza Ug = 5,7 W/m²K, mentre il telaio ha valore Uf = 7,0 W/m²K.

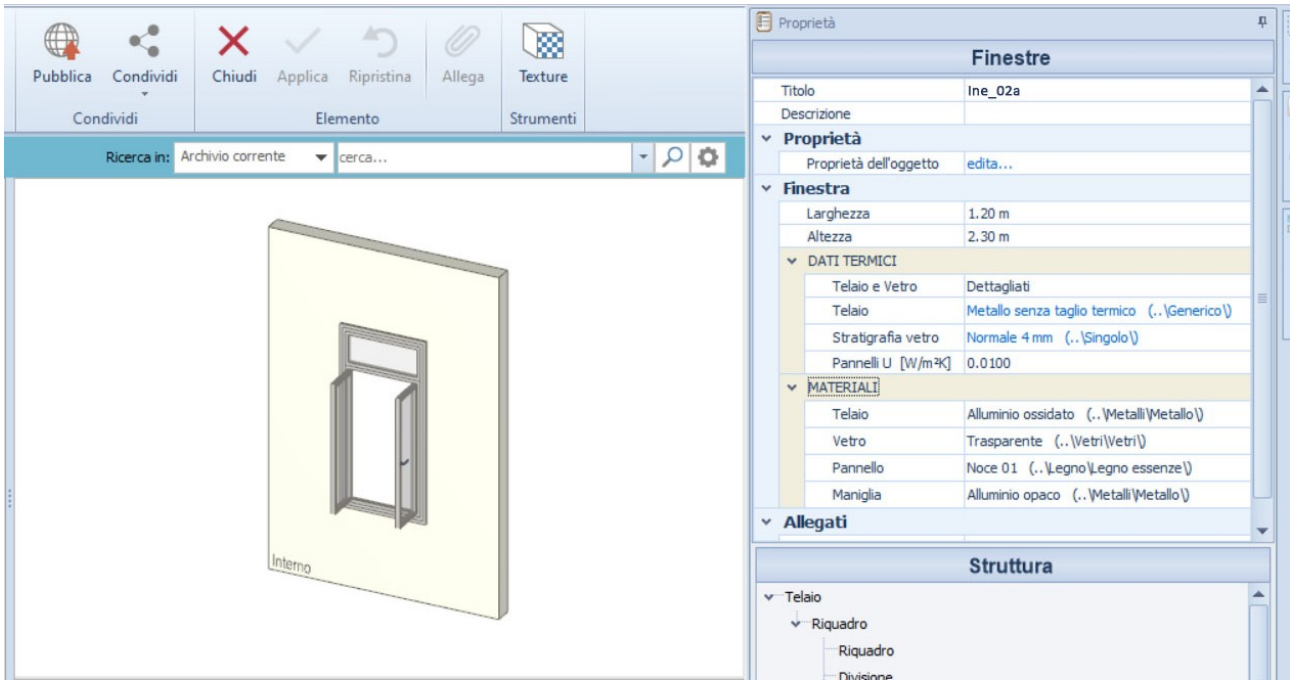


*Fig. 108. Definizione della finestra Ine_02a all'interno di Termus.*

Per la stratigrafia dell'infisso Ine_02a è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Ine_02a* | - |
| *Esposizione* | - | - |
| *Lunghezza* | *1,20* | *m* |
| *Altezza* | *2,30* | *m* |
| *Perimetro vetro* | *10,47* | *m* |
| *Area vetro* | *1,60* | *m²* |
| *Area telaio* | *1,19* | *m²* |
| *Superficie infisso* | *2,78* | *m²* |
| *Chiusure oscuranti interne* | *Tende, avvolgibili* | - |
| *Schermature solari esterne* | *Non presenti* | - |
| *Dimensioni sottofinestra* | *1,56 (L); 1,00 (H)* | *m* |
| *Dimensioni cassonetto* | - | - |
| *Stratigrafia cassonetto* | - | - |

| | | |
|---|---|---|
| *Trasmittanza termica intero infisso (Uw)* | *6,28* | *W/m²K* |
| *Tipo vetro* | *Vetro singolo* | *-* |
| *Spessore del vetro* | *4* | *mm* |
| *Spessore intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Gas intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Fattore solare (g)* | *0,85* | *-* |
| *Trasmittanza termica vetro (Ug)* | *5,75* | *W/m²K* |
| *Materiale telaio* | *Alluminio* | *-* |
| *Taglio termico* | *No* | *-* |
| *Spessore telaio* | *-* | *-* |
| *Trasmittanza termica telaio (Uf)* | *7,00* | *W/m²K* |
| *Tipologia distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Trasmittanza distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |

*Tabella 85. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente Ine_02a.*

**Ine_02b** – Finestra a doppia anta con sopraluce. Dimensioni complessive: 2,10 × 1,20 m. L'area vetrata è pari a 1,57 m², con vetro singolo di spessore 4 mm. Il telaio è in alluminio privo di taglio termico. Sono presenti sistemi di oscuramento esterni costituiti da avvolgibili, mentre tende interne in tessuto bianco compaiono solo in alcuni ambienti. Dal punto di vista prestazionale, la vetrata presenta una trasmittanza Ug = 5,7 W/m²K, mentre il telaio ha valore Uf = 7,0 W/m²K.

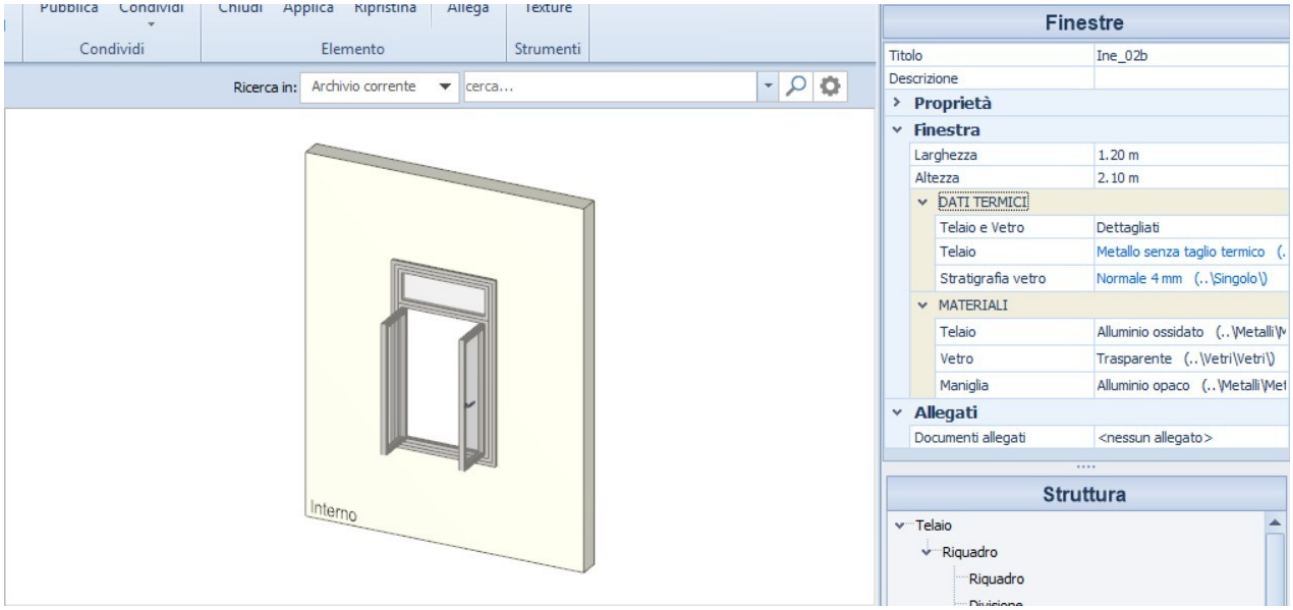



*Fig. 109. Definizione della finestra Ine_02b all'interno di Termus.*

Per la stratigrafia dell'infisso Ine_02b è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Ine_02b* | - |
| *Esposizione* | - | - |
| *Lunghezza* | *1,20* | *m* |
| *Altezza* | *2,10* | *m* |
| *Perimetro vetro* | *10,42* | *m* |
| *Area vetro* | *1,57* | *m²* |
| *Area telaio* | *1,18* | *m²* |
| *Superficie infisso* | *2,76* | *m²* |
| *Chiusure oscuranti interne* | *Tende, avvolgibili* | |
| *Schermature solari esterne* | *Non presenti* | |
| *Dimensioni sottofinestra* | *1,56 (L); 1,00 (H)* | *m* |
| *Dimensioni cassonetto* | - | |
| *Stratigrafia cassonetto* | - | |
| *Trasmittanza termica intero infisso (Uw)* | *6,29* | *W/m²K* |
| *Tipo vetro* | *Vetro singolo* | - |
| *Spessore del vetro* | *4* | *mm* |

| | | |
|---|---|---|
| *Spessore intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Gas intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Fattore solare (g)* | *0,85* | *-* |
| *Trasmittanza termica vetro (Ug)* | *5,75* | *W/m²K* |
| *Materiale telaio* | *Alluminio* | *-* |
| *Taglio termico* | *No* | *-* |
| *Spessore telaio* | *50* | *mm* |
| *Trasmittanza termica telaio (Uf)* | *7,00* | *W/m²K* |
| *Tipologia distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Trasmittanza distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | |

*Tabella 86. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente Ine_02b.*

**Ine_02c** – Finestra ad anta singola con sopraluce. Dimensioni complessive: 0,74 × 2,30 m. L'area vetrata è pari a 1,54 m², con vetro singolo di spessore 4 mm. Il telaio è in alluminio privo di taglio termico. L'oscuramento è garantito da avvolgibili esterni, mentre tende interne in tessuto bianco sono presenti solo in alcuni ambienti. Dal punto di vista prestazionale, la vetrata presenta una trasmittanza Ug = 5,7 W/m²K, mentre il telaio ha un valore di Uf = 7,0 W/m²K.

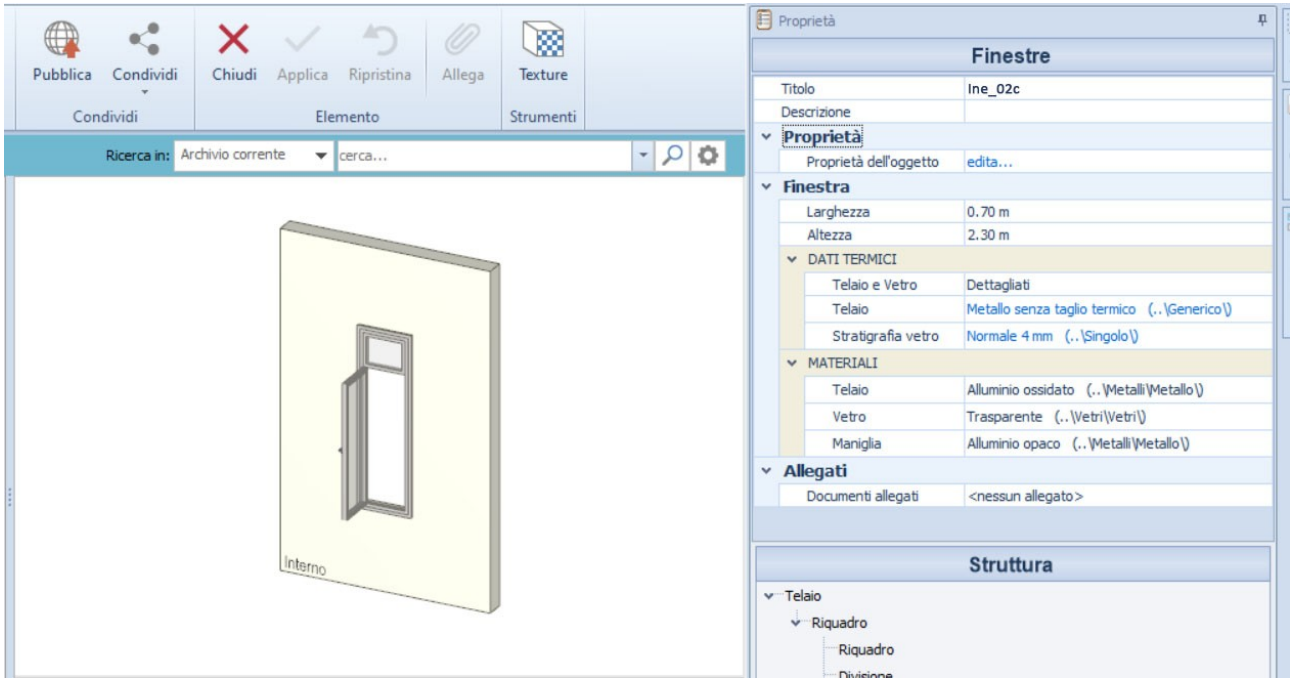



*Fig. 110. Definizione della finestra Ine_02c all'interno di Termus.*

Per la stratigrafia dell'infisso Ine_02c è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Ine_02c* | - |
| *Esposizione* | - | - |
| *Lunghezza* | *0,74* | *m* |
| *Altezza* | *2,30* | *m* |
| *Perimetro vetro* | *5,40* | *m* |
| *Area vetro* | *0,71* | *m²* |
| *Area telaio* | *0,66* | *m²* |
| *Superficie infisso* | *1,38* | *m²* |
| *Chiusure oscuranti interne* | *Tende, avvolgibili* | |
| *Schermature solari esterne* | *Non presenti* | |
| *Dimensioni sottofinestra* | *1,30 (L); 1,00 (H)* | *m* |
| *Dimensioni cassonetto* | - | |
| *Stratigrafia cassonetto* | - | - |
| *Trasmittanza termica intero infisso (Uw)* | *6,35* | *W/m²K* |

| | | |
|---|---|---|
| *Tipo vetro* | *Vetro singolo* | *-* |
| *Spessore del vetro* | *4* | *mm* |
| *Spessore intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Gas intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Fattore solare (g)* | *0,85* | *-* |
| *Trasmittanza termica vetro (Ug)* | *5,75* | *W/m²K* |
| *Materiale telaio* | *Alluminio* | *-* |
| *Taglio termico* | *No* | *-* |
| *Spessore telaio* | *50* | *mm* |
| *Trasmittanza termica telaio (Uf)* | *7,00* | *W/m²K* |
| *Tipologia distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Trasmittanza distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |

*Tabella 87. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente Ine_02c.*

**Ine_02d** – Finestra a quadrupla anta. Dimensioni complessive: 2,40 × 2,00 m. La superficie vetrata è costituita da un vetro singolo di spessore 4 mm, con telaio in alluminio privo di taglio termico. L'oscuramento è garantito da avvolgibili esterni, mentre tende interne in tessuto bianco sono presenti solo in alcuni ambienti. Dal punto di vista prestazionale, la vetrata presenta una trasmittanza Ug = 5,7 W/m²K, mentre il telaio ha un valore di Uf = 7,0 W/m²K.

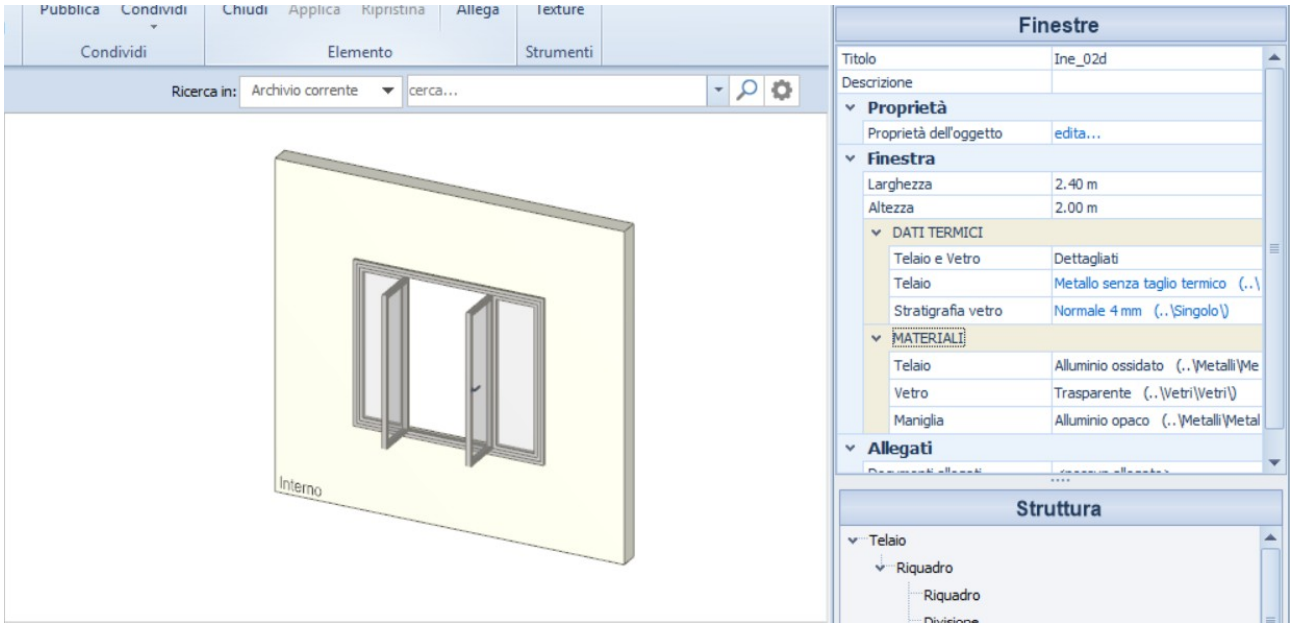



*Fig. 111. Definizione della finestra Ine_02d all'interno di Termus.*

Per la stratigrafia dell'infisso Ine_02d è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Ine_02d* | - |
| *Esposizione* | - | - |
| *Lunghezza* | *2,40* | *m* |
| *Altezza* | *2,00* | *m* |
| *Perimetro vetro* | *18,8* | *m* |
| *Area vetro* | *3,69* | *m²* |
| *Area telaio* | *1,48* | *m²* |
| *Superficie infisso* | *5,18* | *m²* |
| *Chiusure oscuranti interne* | *Tende, avvolgibili* | - |
| *Schermature solari esterne* | *Non presenti* | - |
| *Dimensioni sottofinestra* | *2,76 (L); 1,00 (H)* | *m* |
| *Dimensioni cassonetto* | - | - |
| *Stratigrafia cassonetto* | - | - |
| *Trasmittanza termica intero infisso (Uw)* | *6,11* | *W/m²K* |
| *Tipo vetro* | *Vetro singolo* | - |

| | | |
|---|---|---|
| *Spessore del vetro* | *4* | *mm* |
| *Spessore intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Gas intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Fattore solare (g)* | *0,85* | *-* |
| *Trasmittanza termica vetro (Ug)* | *5,75* | *W/m²K* |
| *Materiale telaio* | *Alluminio* | *-* |
| *Taglio termico* | *No* | *-* |
| *Spessore telaio* | *50* | *mm* |
| *Trasmittanza termica telaio (Uf)* | *7,00* | *W/m²K* |
| *Tipologia distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Trasmittanza distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | |

*Tabella 88. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente Ine_02d.*

Ine_03 – Porte esterne in legno

**Ine_03c** – Porta d'ingresso ad anta singola. Dimensioni complessive: 1,00 × 2,10 m. L'infisso è costituito interamente da telaio in legno, privo di elementi vetrati. Di conseguenza i parametri relativi a Ug, g e intercapedini non sono applicabili. Dal punto di vista prestazionale, l'infisso presenta una trasmittanza termica complessiva Uw pari a 7,00 W/m²K, coincidente con il valore di Uf del telaio, in quanto unica parte costruttiva dell'elemento.

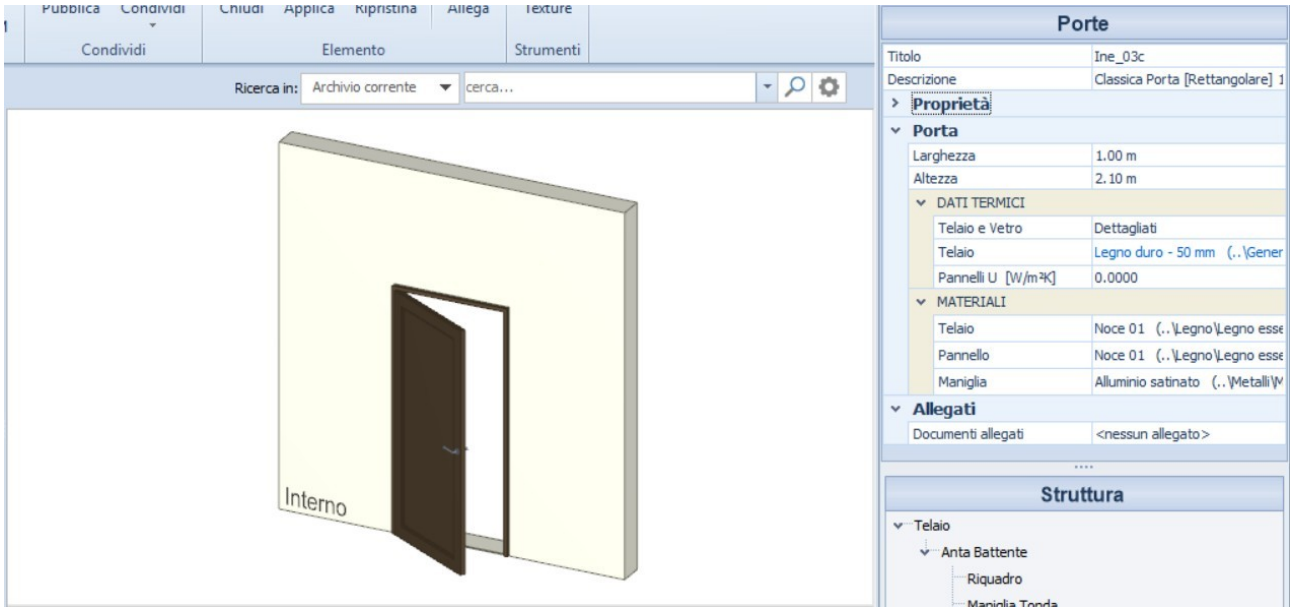



*Fig. 112. Definizione della finestra Ine_03c all'interno di Termus.*

Per la stratigrafia dell'infisso Ine_03c è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Ine_03c* | - |
| *Esposizione* | - | - |
| *Lunghezza* | *1,00* | *m* |
| *Altezza* | *2,10* | *m* |
| *Perimetro vetro* | *0,00* | *m* |
| *Area vetro* | *0,00* | *m²* |
| *Area telaio* | *1,89* | *m²* |
| *Superficie infisso* | *1,89* | *m²* |
| *Chiusure oscuranti interne* | *Assenti* | - |
| *Schermature solari esterne* | *Assenti* | - |
| *Dimensioni sottofinestra* | *Assente* | *m* |
| *Dimensioni cassonetto* | *Assente* | - |
| *Stratigrafia cassonetto* | *Assente* | - |
| *Trasmittanza termica intero infisso (Uw)* | *7,00* | *W/m²K* |
| *Tipo vetro* | *Non applicabile* | - |

| | | |
|---|---|---|
| *Spessore del vetro* | *Non applicabile* | *-* |
| *Spessore intercapedine* | *Non applicabile* | *-* |
| *Gas intercapedine* | *Non applicabile* | *-* |
| *Fattore solare (g)* | *Non applicabile* | *-* |
| *Trasmittanza termica vetro (Ug)* | *Non applicabile* | *W/m²K* |
| *Materiale telaio* | *Legno* | *-* |
| *Taglio termico* | *No* | *-* |
| *Spessore telaio* | *50* | *mm* |
| *Trasmittanza termica telaio (Uf)* | *7,00* | *W/m²K* |
| *Tipologia distanziatori* | *Non applicabile* | *-* |
| *Trasmittanza distanziatori* | *Non applicabile* | *-* |

*Tabella 89. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente Ine_02d.*

**Ine_04 – Finestre esterne in legno**

**Ine_04a** – Finestra a doppia anta con sopraluce. Dimensioni complessive: 2,30 × 1,20 m. L'area vetrata è pari a 2,76 m², con vetro singolo di spessore 4 mm. Il telaio è in legno. Sono presenti sistemi di oscuramento esterni costituiti da avvolgibili, mentre tende interne in tessuto bianco compaiono solo in alcuni ambienti. Dal punto di vista prestazionale, la vetrata presenta una trasmittanza Ug = 5,7 W/m²K, mentre il telaio ha valore Uf = 2,2 W/m²K.

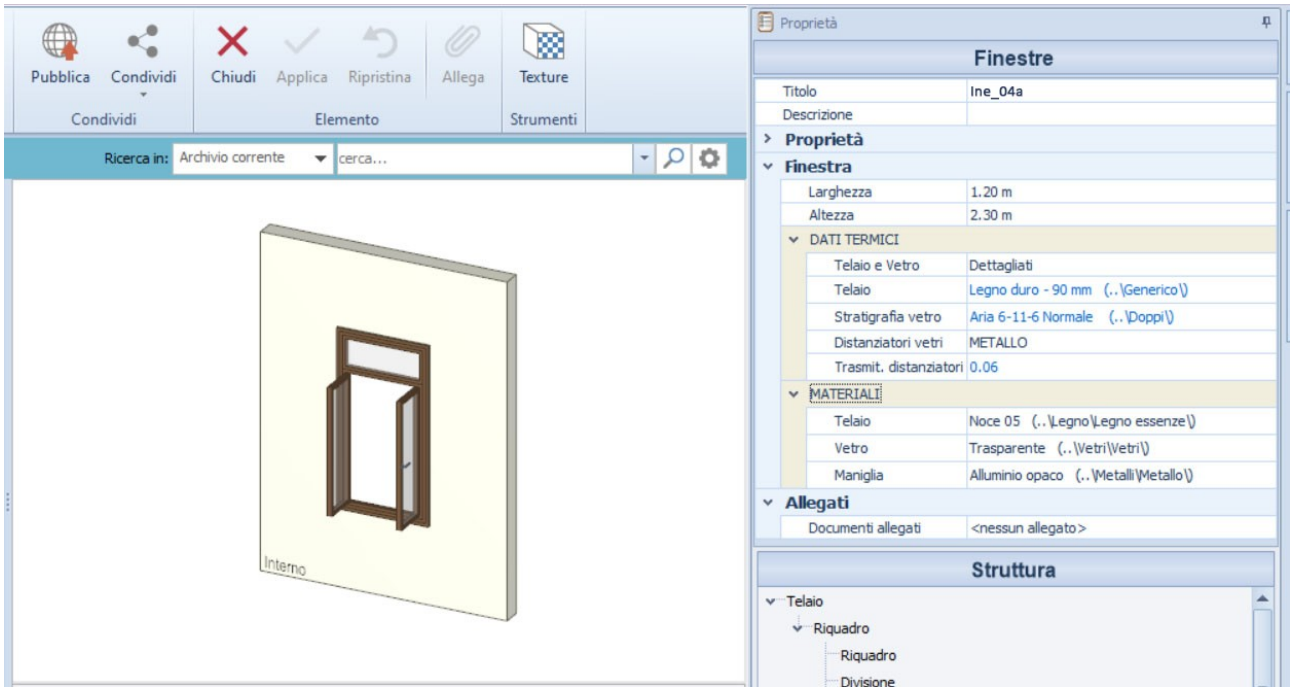



*Fig. 113. Definizione della finestra Ine_04a all'interno di Termus.*

Per la stratigrafia dell'infisso Ine_04a è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Ine_04a* | - |
| *Esposizione* | - | - |
| *Lunghezza* | *1,20* | *m* |
| *Altezza* | *2,30* | *m* |
| *Perimetro vetro* | *10,42* | *m* |
| *Area vetro* | *1,57* | *m²* |
| *Area telaio* | *1,18* | *m²* |
| *Superficie infisso* | *2,76* | *m²* |
| *Chiusure oscuranti interne* | *Tende, avvolgibili* | |
| *Schermature solari esterne* | *Non presenti* | |
| *Dimensioni sottofinestra* | *1,56 (L); 1,00 (H)* | *m* |
| *Dimensioni cassonetto* | - | - |
| *Stratigrafia cassonetto* | - | - |

| | | |
|---|---|---|
| *Trasmittanza termica intero infisso (Uw)* | *4,23* | *W/m²K* |
| *Tipo vetro* | *Vetro singolo* | *-* |
| *Spessore del vetro* | *4* | *mm* |
| *Spessore intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Gas intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Fattore solare (g)* | *0,85* | *-* |
| *Trasmittanza termica vetro (Ug)* | *5,75* | *W/m²K* |
| *Materiale telaio* | *Legno* | *-* |
| *Taglio termico* | *No* | *-* |
| *Spessore telaio* | *50* | *mm* |
| *Trasmittanza termica telaio (Uf)* | *2,20* | *W/m²K* |
| *Tipologia distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Trasmittanza distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |

*Tabella 90. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente Ine_04a.*

**Ine_04c** – Finestra ad anta singola con sopraluce. Dimensioni complessive: 0,70 × 2,30 m. L'area vetrata è pari a 0,91 m², con vetro singolo di spessore 4 mm. Il telaio è in legno. L'oscuramento è garantito da avvolgibili esterni, mentre tende interne in tessuto bianco sono presenti solo in alcuni ambienti. Dal punto di vista prestazionale, la vetrata presenta una trasmittanza Ug = 5,7 W/m²K, mentre il telaio ha un valore di Uf = 2,2 W/m²K.

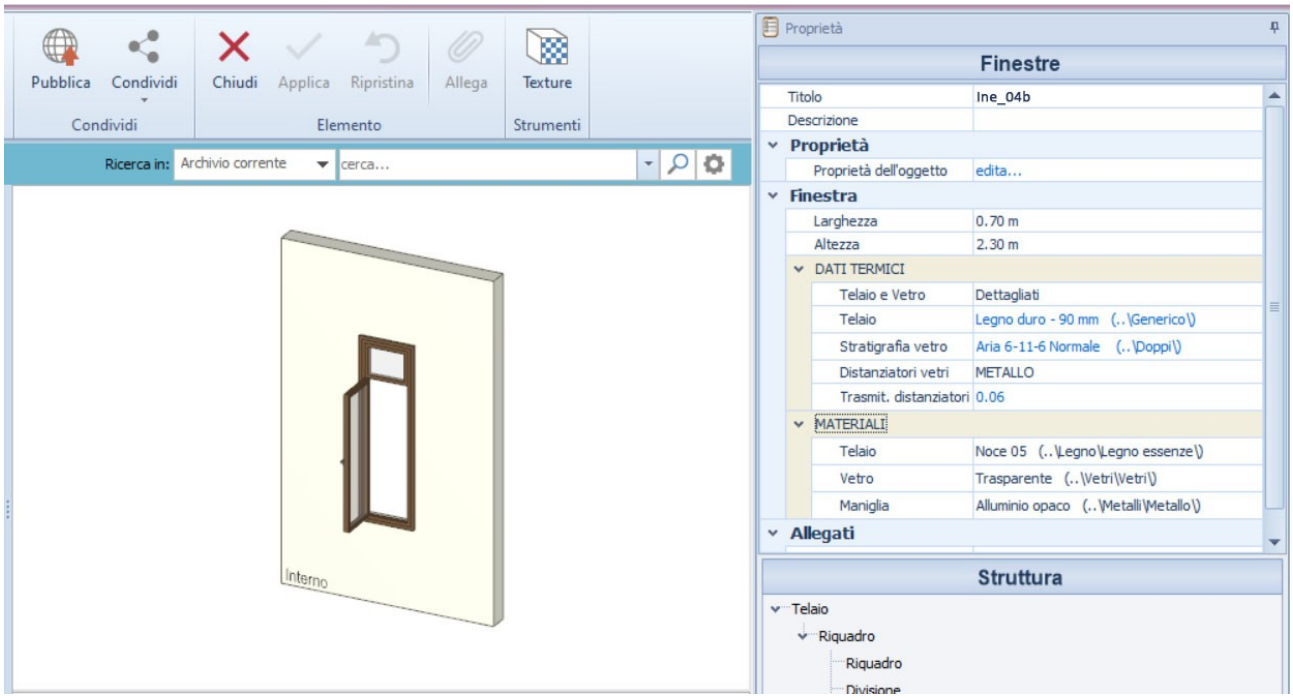



*Fig. 114. Definizione della finestra Ine_04c all'interno di Termus.*

Per la stratigrafia dell'infisso Ine_04b è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Ine_04c* | - |
| *Esposizione* | - | - |
| *Lunghezza* | *0,70* | *m* |
| *Altezza* | *2,30* | *m* |
| *Perimetro vetro* | *5,80* | *m* |
| *Area vetro* | *0,91* | *m²* |
| *Area telaio* | *0,69* | *m²* |
| *Superficie infisso* | *1,61* | *m²* |
| *Chiusure oscuranti interne* | *Tende, avvolgibili* | - |
| *Schermature solari esterne* | *Non presenti* | - |
| *Dimensioni sottofinestra* | *1,00 (L); 1,00 (H)* | *m* |
| *Dimensioni cassonetto* | - | - |
| *Stratigrafia cassonetto* | - | - |
| *Trasmittanza termica intero infisso (Uw)* | *4,21* | *W/m²K* |

| | | |
|---|---|---|
| *Tipo vetro* | *Vetro singolo* | *-* |
| *Spessore del vetro* | *4* | *mm* |
| *Spessore intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Gas intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Fattore solare (g)* | *0,85* | *-* |
| *Trasmittanza termica vetro (Ug)* | *5,75* | *W/m²K* |
| *Materiale telaio* | *Legno* | *-* |
| *Taglio termico* | *No* | *-* |
| *Spessore telaio* | *50* | *mm* |
| *Trasmittanza termica telaio (Uf)* | *2,20* | *W/m²K* |
| *Tipologia distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Trasmittanza distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |

*Tabella 91. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente Ine_04c.*

**Ine_04d** – Finestra a quadrupla anta. Dimensioni complessive: 2,40 × 2,10 m. La superficie vetrata è costituita da un vetro singolo di spessore 4 mm, con telaio in legno. L'oscuramento è garantito da avvolgibili esterni, mentre tende interne in tessuto bianco sono presenti solo in alcuni ambienti. Dal punto di vista prestazionale, la vetrata presenta una trasmittanza Ug = 5,7 W/m²K, mentre il telaio ha un valore di Uf = 2,2 W/m²K.

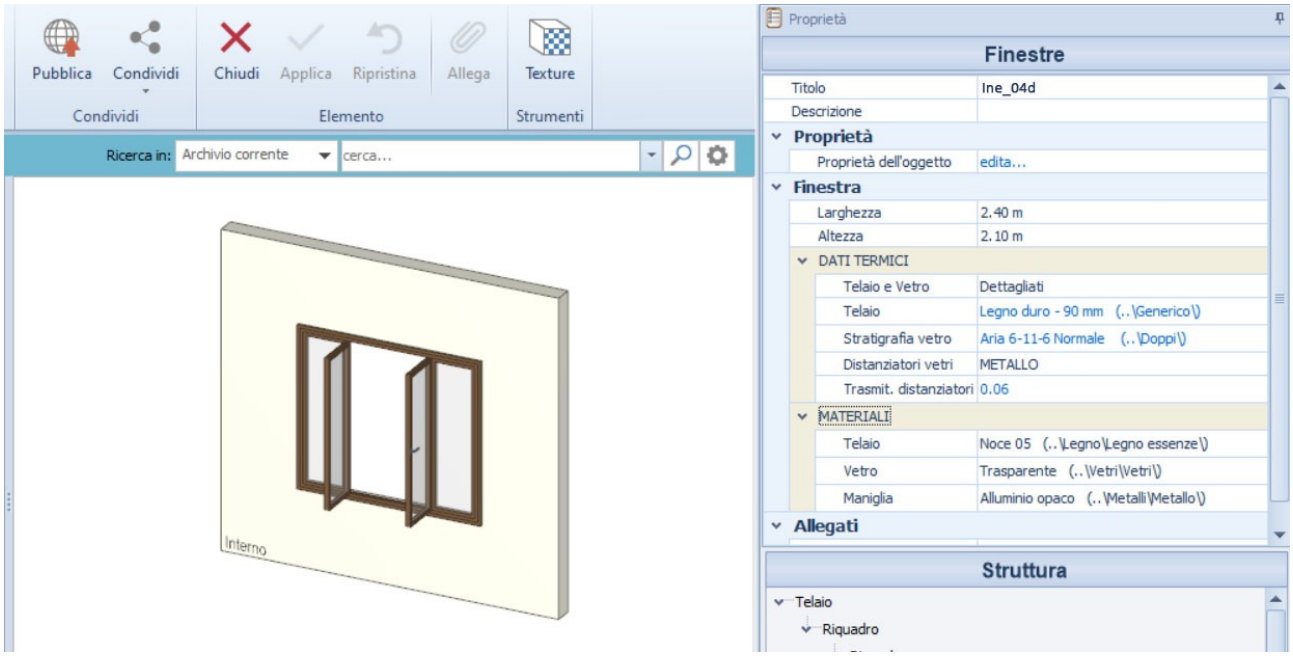



*Fig. 115. Definizione della finestra Ine_04d all'interno di Termus.*

Per la stratigrafia dell'infisso Ine_04d è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Ine_04d* | - |
| *Esposizione* | - | - |
| *Lunghezza* | *2,40* | *m* |
| *Altezza* | *2,10* | *m* |
| *Perimetro vetro* | *18,72* | *m* |
| *Area vetro* | *3,57* | *m²* |
| *Area telaio* | *1,47* | *m²* |
| *Superficie infisso* | *5,04* | *m²* |
| *Chiusure oscuranti interne* | *Tende, avvolgibili* | |
| *Schermature solari esterne* | *Non presenti* | |
| *Dimensioni sottofinestra* | *2,76 (L); 1,00 (H)* | *m* |
| *Dimensioni cassonetto* | - | |
| *Stratigrafia cassonetto* | - | |
| *Trasmittanza termica intero infisso (Uw)* | *4,71* | *W/m²K* |
| *Tipo vetro* | *Vetro singolo* | - |
| *Spessore del vetro* | *4* | *mm* |

| | | |
|---|---|---|
| *Spessore intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Gas intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Fattore solare (g)* | *0,85* | *-* |
| *Trasmittanza termica vetro (Ug)* | *5,75* | *W/m²K* |
| *Materiale telaio* | *Legno* | *-* |
| *Taglio termico* | *No* | *-* |
| *Spessore telaio* | *50* | *mm* |
| *Trasmittanza termica telaio (Uf)* | *2,20* | *W/m²K* |
| *Tipologia distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Trasmittanza distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |

*Tabella 92. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente Ine_04d.*

**Ine_04e** – Finestra ad anta singola. Dimensioni complessive 2,30 x 1,20 m. La superficie vetrata è costituita da un vetro singolo di spessore 4 mm, con telaio in legno. L'oscuramento è garantito da avvolgibili esterni, mentre tende interne in tessuto bianco sono presenti solo in alcuni ambienti. Dal punto di vista prestazionale, la vetrata presenta una trasmittanza Ug = 5,7 W/m²K, mentre il telaio ha un valore di Uf = 2,2 W/m²K.

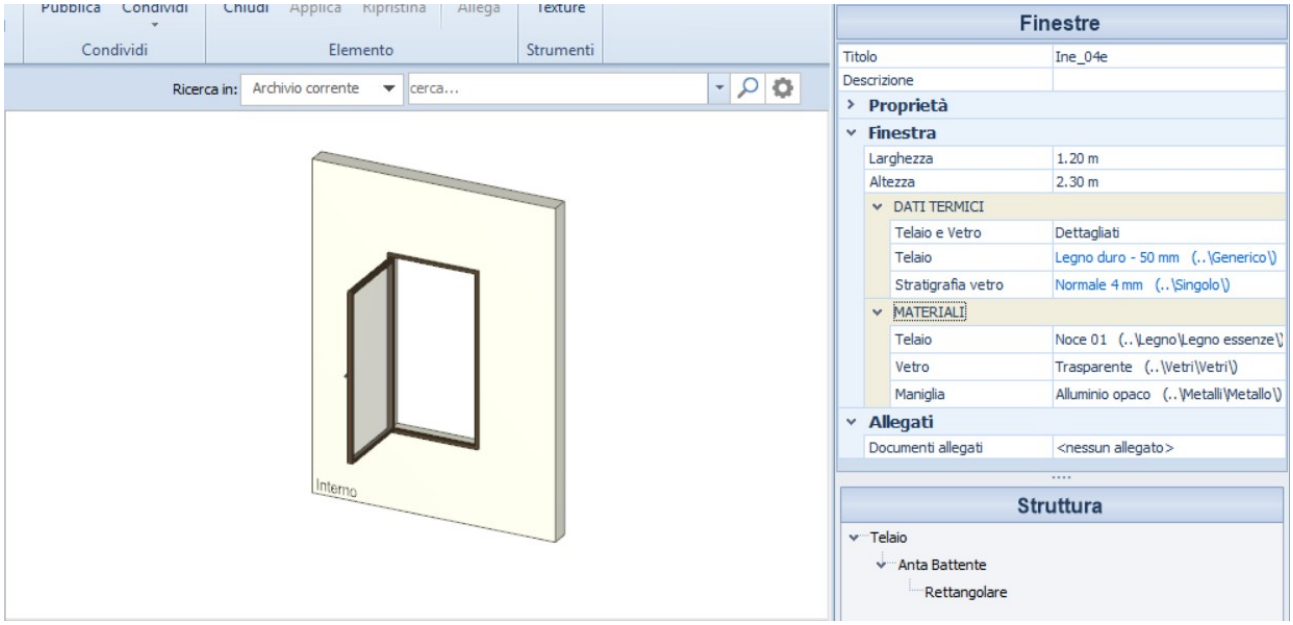


*Fig. 116. Definizione della finestra Ine_04e all'interno di Termus.*

Per la stratigrafia dell'infisso Ine_04d è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Ine_04e* | - |
| *Esposizione* | - | - |
| *Lunghezza* | *2,30* | *m* |
| *Altezza* | *1,20* | *m* |
| *Perimetro vetro* | *6,36* | *m* |
| *Area vetro* | *2,22* | *m²* |
| *Area telaio* | *0,53* | *m²* |
| *Superficie infisso* | *2,76* | *m²* |
| *Chiusure oscuranti interne* | *Tende, avvolgibili* | - |
| *Schermature solari esterne* | *Non presenti* | - |
| *Dimensioni sottofinestra* | *1,56 (L); 1,00 (H)* | *m* |
| *Dimensioni cassonetto* | - | - |
| *Stratigrafia cassonetto* | - | - |
| *Trasmittanza termica intero infisso (Uw)* | *5,21* | *W/m²K* |
| *Tipo vetro* | *Vetro singolo* | - |
| *Spessore del vetro* | *4* | *mm* |

| | | |
|---|---|---|
| *Spessore intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Gas intercapedine* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Fattore solare (g)* | *0,85* | *-* |
| *Trasmittanza termica vetro (Ug)* | *5,75* | *W/m²K* |
| *Materiale telaio* | *Legno* | *-* |
| *Taglio termico* | *No* | *-* |
| *Spessore telaio* | *50* | *mm* |
| *Trasmittanza termica telaio (Uf)* | *2,20* | *W/m²K* |
| *Tipologia distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |
| *Trasmittanza distanziatori* | *Non applicabile (vetro singolo)* | *-* |

*Tabella 93. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente Ine_04d.*

### 1.3.3 La definizione dell'edificio oggetto di certificazione

#### *1.3.3.1 I vani*

Ai fini della diagnosi energetica, per stimare in maniera realistica i consumi e i fabbisogni dell'edificio, si è reso necessario definire i dati dell'Edificio Oggetto di Certificazione (EOdC), individuando preliminarmente le zone termiche e i relativi vani di calcolo.
L'inserimento dei vani richiede che ciascun ambiente sia delimitato da un perimetro chiuso. Per questo motivo, dopo aver definito le stratigrafie degli elementi verticali e orizzontali, è stato ricostruito un modello architettonico che rappresentasse il più fedelmente possibile le caratteristiche della Palazzina Comando. Attraverso l'apposita funzione di modellazione energetica del software, sono stati quindi posizionati i vani, assegnando a ciascuno un nome in linea con la codifica già stabilita nella fase di compilazione del *Raumbuch*.
La suddivisione in 73 ambienti ha permesso di associare ad ogni vano i dati geometrici ed energetici necessari alla diagnosi. Il software, come mostrato in Fig. 117, visualizza per ciascun vano parametri quali superfici, volumi, carichi termici e portate di ventilazione.
In alcuni casi, per distinguere ambienti contigui privi di partizioni reali (ad esempio vano scala e disimpegno), è stato necessario ricorrere a oggetti involucro fittizi, che hanno permesso di creare virtualmente la separazione utile al calcolo. Attraverso i campi *unità, zone o confine*, i vani sono stati quindi organizzati nei tre livelli che compongono la Palazzina Comando, collegandoli ai rispettivi servizi energetici.

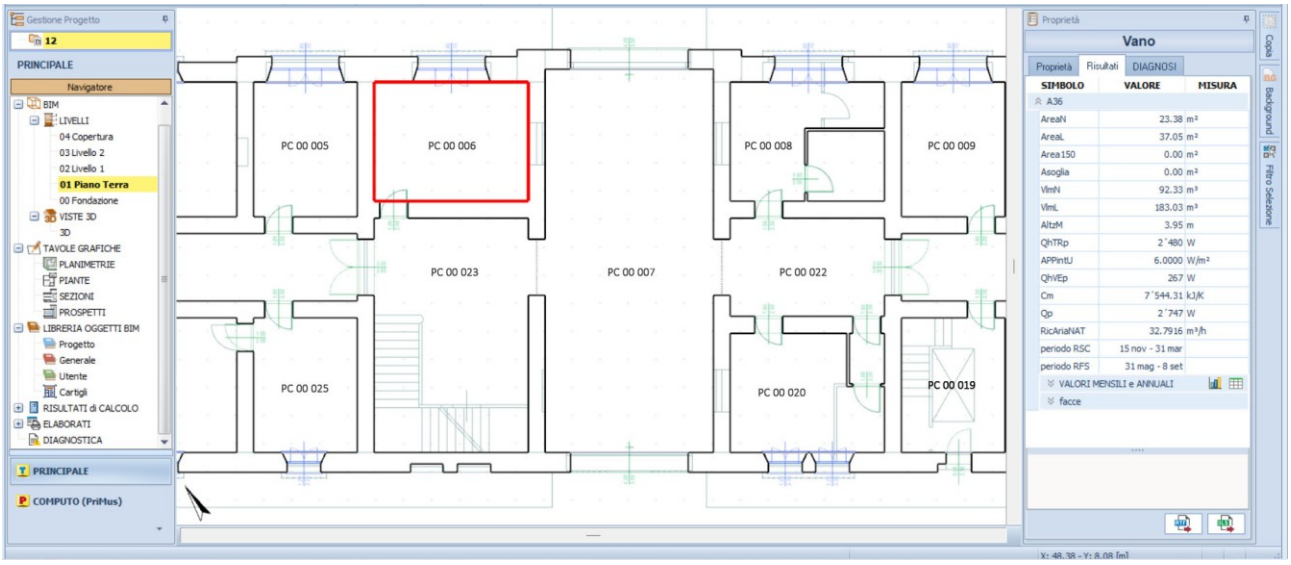



*Fig. 117. Interfaccia del software Termus durante la definizione dei vani al piano terra della Palazzina Comando. In evidenza il vano PC 00 006, per il quale vengono riportati i dati geometrici (superfici, volumi, altezze).*

### *1.3.3.2 Unità, zone e confini termici*

Secondo la UNI/TS 11300, una zona termica è definita come una porzione di edificio climatizzata ad una determinata temperatura e con modalità di regolazione omogenee. Il calcolo energetico prende avvio dall'individuazione dei confini che separano vani climatizzati e non climatizzati; dei limiti delle diverse zone di calcolo; delle condizioni climatiche esterne e interne di riferimento.
Nel software, tramite il nodo EOdC e zone, è stato selezionato l'EOdC corrispondente, indicando la destinazione d'uso come edificio pubblico. L'editor ha quindi reso disponibili le sezioni relative al calcolo della prestazione energetica, con i valori riepilogativi di temperatura interna, adduttanze, verifica igrometrica e carichi termici stagionali.
Come previsto dalla UNI TS 11300-1, la temperatura interna di progetto è stata fissata a 20 °C per il riscaldamento e 26 °C per il raffrescamento, valori standardizzati non modificabili quando è attiva l'opzione valutazione sul progetto o standard. Per la Palazzina Comando si è scelto di definire un unico EOdC, raggruppando tutti i locali serviti dallo stesso sistema di generazione ed emissione. Al suo interno sono state create diverse subUnità, ciascuna associata a specifiche zone termiche e ai relativi servizi (riscaldamento, raffrescamento, acqua calda sanitaria, ventilazione).

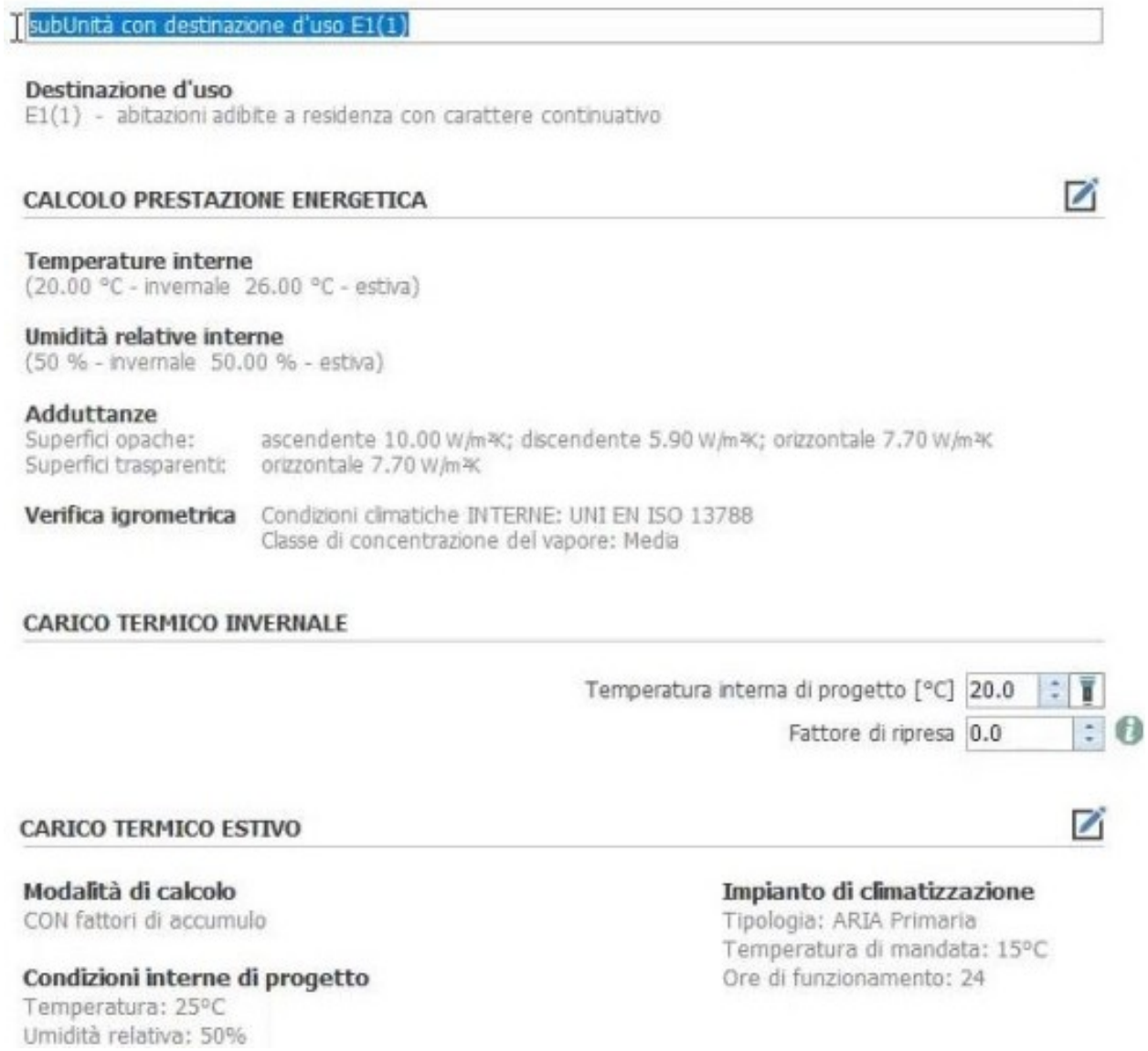



*Fig. 118. Interfaccia di Termus per la definizione delle zone termiche: riepilogo dei parametri energetici interni (temperature, umidità, adduttanze), verifica igrometrica e carichi termici stagionali per la Palazzina Comando.*

#### *1.3.3.3 Zone termiche e servizi*

*Zona H – Riscaldamento*

Per ogni vano associato a questa zona, il software genera un radiatore virtuale, al quale sono collegate le caratteristiche termiche complessive dell'ambiente. Nella sezione *descrizione* viene riportata la denominazione della zona e l'elenco dei vani inclusi, mentre nella sezione *emissione* è possibile selezionare la tipologia di terminali effettivamente riscontrata durante il sopralluogo.
Come mostrato in Fig. 119, l'editor consente di specificare la tipologia di terminali (radiatori, pannelli radianti, ecc.), la potenza totale, il rendimento e la modalità di funzionamento. Questi dati vengono poi utilizzati per calcolare la potenza termica complessiva dei terminali installati per ciascuna subUnità. Analogamente, la sezione *regolazione* permette di indicare il sistema di regolazione adottato (ad esempio climatica/centralizzata o on/off), parametro fondamentale per la valutazione della prestazione energetica dell'edificio.

*Zona C – Raffrescamento*

L'editor dedicato funziona in modo analogo a quello del riscaldamento. È stato possibile definire la tipologia di terminali di raffrescamento e associare a ciascuna zona i relativi vani, personalizzandone la denominazione.
Come mostrato in Fig. 120, nella sezione emissione è stata selezionata la tipologia di terminali a espansione diretta (split), con una potenza totale calcolata pari a 3,20 kW. Sono inoltre riportati il rendimento e la modalità di funzionamento (continuo). Nella sezione regolazione è stata invece indicata una gestione di tipo climatico/centralizzato con modulazione, parametro utile a definire le modalità di regolazione e controllo dei carichi termici estivi.

*Zona W – Acqua calda sanitaria (ACS)*

Per questa zona sono stati associati i vani serviti dall'impianto di produzione di ACS, riportati in elenco all'interno dell'editor (Fig. 121). Il software consente di definire i parametri principali relativi alla produzione di acqua calda, tra cui la temperatura di erogazione, fissata a 40 °C, e il fabbisogno giornaliero specifico pari a 0,2 l/(G*m²).
Nella sezione dedicata ai giorni di utilizzo mensili, è stato inoltre possibile specificare la continuità del servizio lungo tutto l'anno, con valori variabili da 28 a 31 giorni a seconda del mese. Questa impostazione permette di valutare i fabbisogni energetici legati alla produzione di ACS con maggiore aderenza alle condizioni d'uso dell'edificio.

*Zona V – Ventilazione*

La ventilazione è stata impostata come ventilazione naturale, coerentemente con le condizioni effettive dell'edificio (Fig. 122). I parametri di calcolo riportano un ricambio d'aria di 39,60 m³/(h·persona), con un indice di affollamento pari a 0,06 persone/m². Il coefficiente correttivo per impianti misti è stato mantenuto a 1,00 e l'efficienza della ventilazione è stata assunta pari a 0,80, mentre i ricambi d'aria complessivi per la valutazione dei carichi termici, sia estivi che invernali, sono stati definiti in 0,50 vol/h. Questi valori permettono di tenere in considerazione il contributo della ventilazione alla determinazione del fabbisogno energetico, pur in assenza di un sistema meccanico di immissione e controllo.

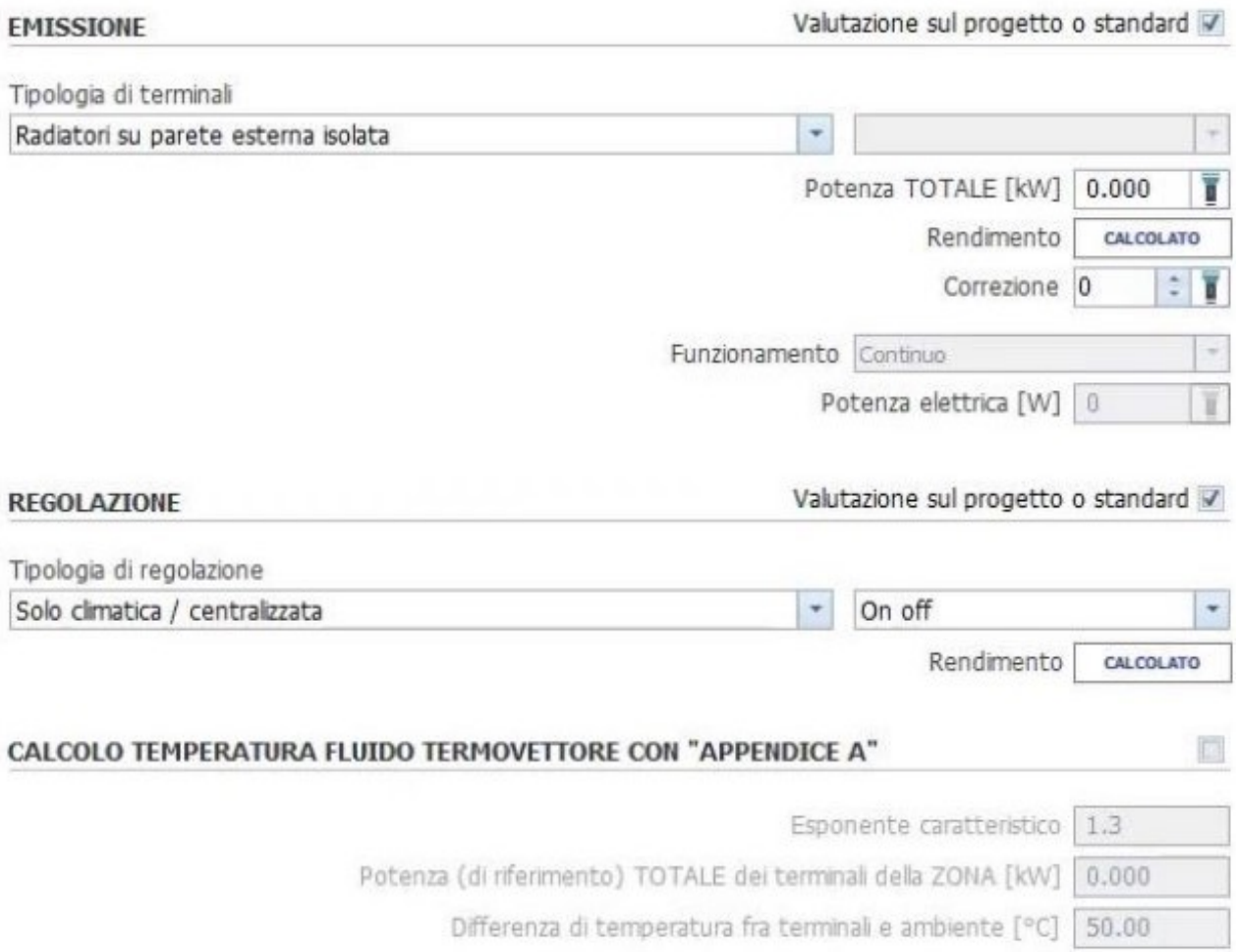



*Fig. 119. Interfaccia di Termus per la definizione della Zona C – Raffrescamento: schermata di configurazione dei sistemi di regolazione climatica per la Palazzina Comando.*

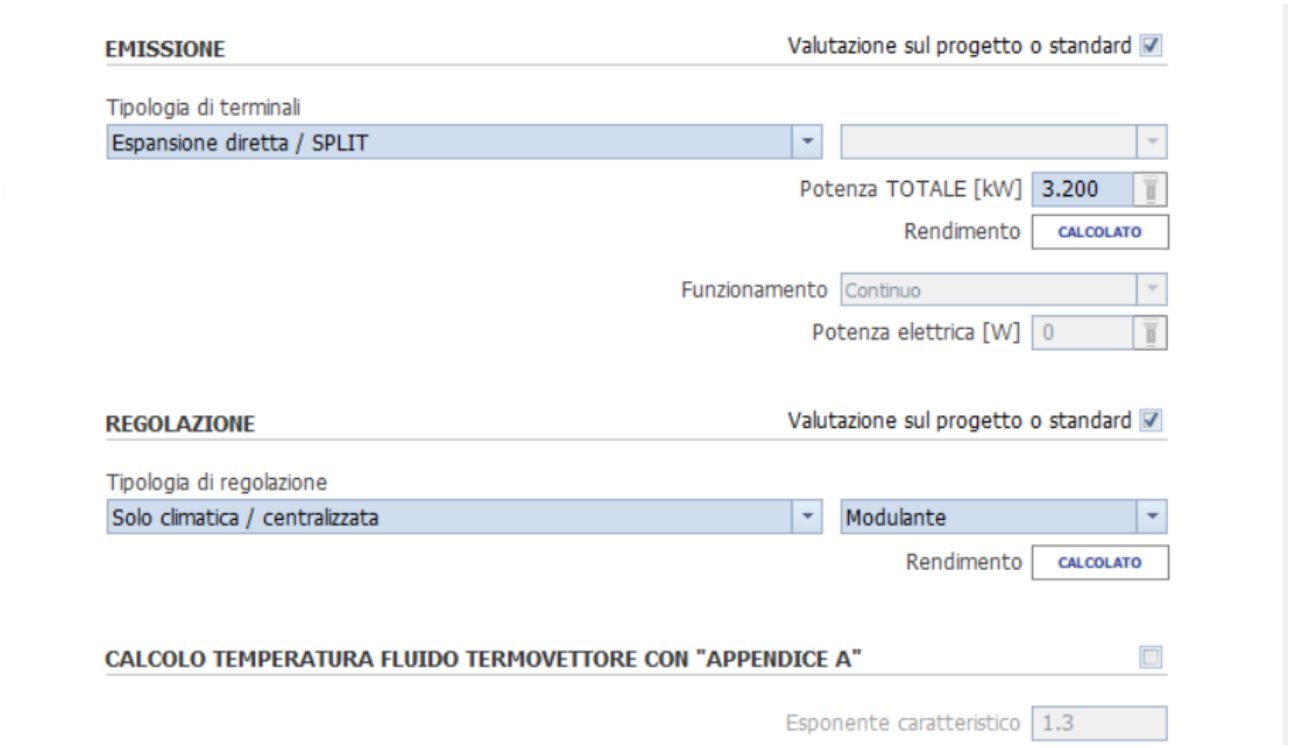



*Fig. 120. Interfaccia di Termus per la definizione della Zona C – Raffrescamento: schermata di configurazione di regolazione climatica per la Palazzina Comando.*




*Fig. 121. Interfaccia di Termus per la definizione della Zona W – Acqua calda sanitaria: parametri di erogazione (temperatura e fabbisogno specifico) e giorni di utilizzo mensili dei vani collegati nella Palazzina Comando.*




*Fig. 122. Interfaccia di Termus per la definizione della Zona V – Ventilazione: parametri impostati per la ventilazione naturale (ricambi d'aria, indice di affollamento, efficienza e ricambi orari) nella Palazzina Comando.*

### 1.3.4 L'inserimento degli impianti e i relativi descrittori

L'analisi impiantistica ha avuto come obiettivo la ricostruzione fedele dello stato di fatto e la successiva modellazione energetica dei sistemi di climatizzazione e riscaldamento presenti nell'edificio. Il lavoro si è articolato in più fasi: dal rilievo in situ e dalla raccolta delle informazioni tecniche (schede di caldaia, pompe e split), alla definizione nel software Termus delle caratteristiche geometriche, funzionali e prestazionali di generatori, reti di distribuzione e terminali.

#### *1.3.4.1 Generatori*

##### *Caldaia a gasolio*

L'edificio è servito da una caldaia pressurizzata ICI GREENOx.e 35 (Fig. 123), con potenza termica nominale pari a 350 kW e rendimento variabile tra il 95 e il 100% in base al regime di funzionamento. La caldaia, alimentata a gasolio, è dotata di un bruciatore bistadio Baltur TBL 45P e lavora con temperatura di mandata standard pari a 80 °C.
La centrale è completata da pompe di circolazione Grundfos UPS a funzionamento alternato (Fig. 124), responsabili della distribuzione dell'acqua calda ai circuiti radiatori.
Le principali caratteristiche dell'impianto sono sintetizzate nella Tabella 94, relativa ai descrittori applicati al generatore a gasolio della Palazzina Comando.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| GENENRATORE | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia generatore | Caldaia a gasolio pressurizzata ICI GREENOx.e 35 | - |
| Anno di installazione generatore | Sconosciuto | - |
| Potenza termica generatore | 350 | kW |
| Temperatura mandata generatore | 80 | °C |
| Zona di appartenenza | Intero edificio della Palazzina Comando | - |

*Tabella 94. Applicazione dei descrittori alla caldaia a gasolio della Palazzina Comando.*




*Fig. 123. Centrale termica della Palazzina Comando. A sinistra, dettaglio della targhetta identificativa della caldaia ICI GREENOx.e 35. A destra, vista frontale della caldaia installata all'interno del locale tecnico.*

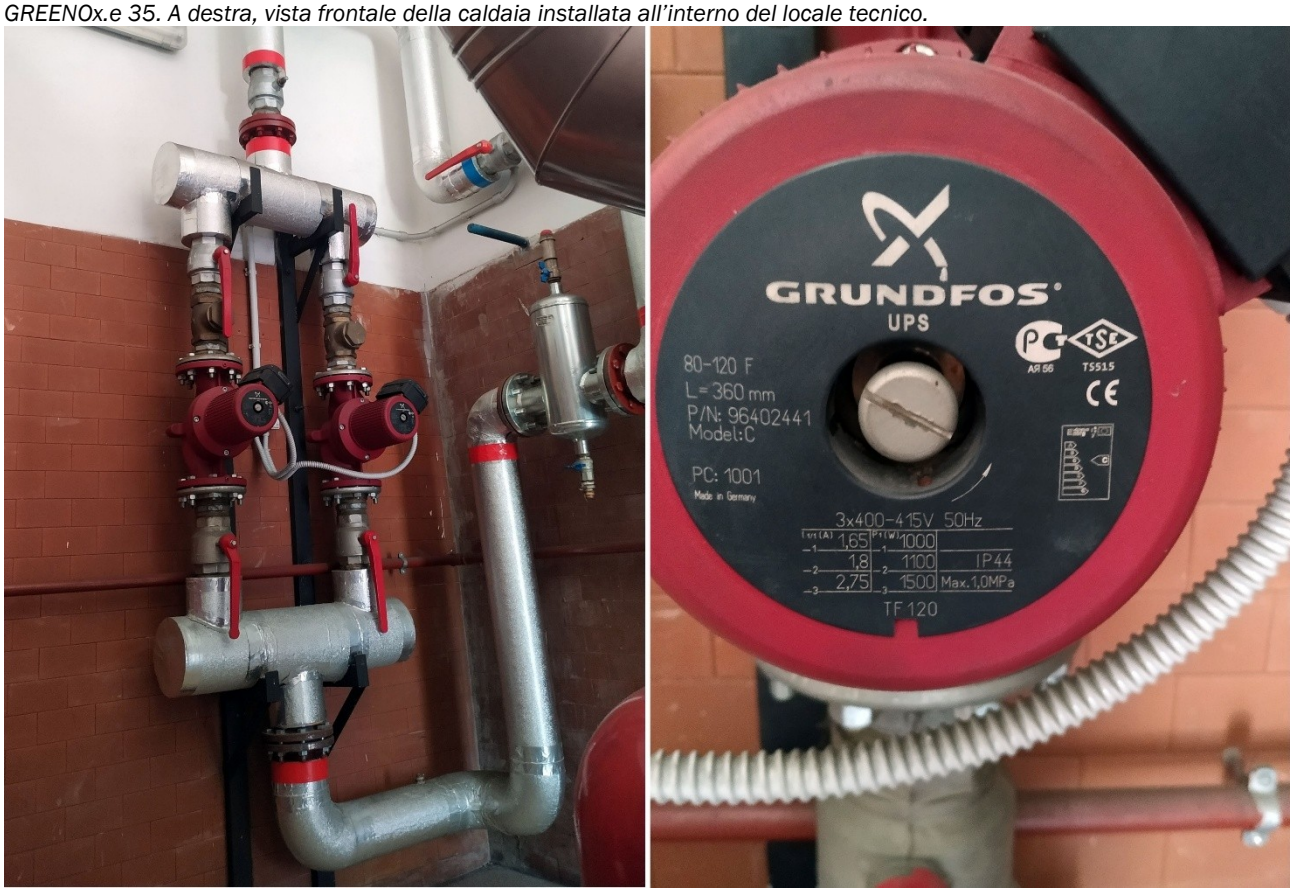
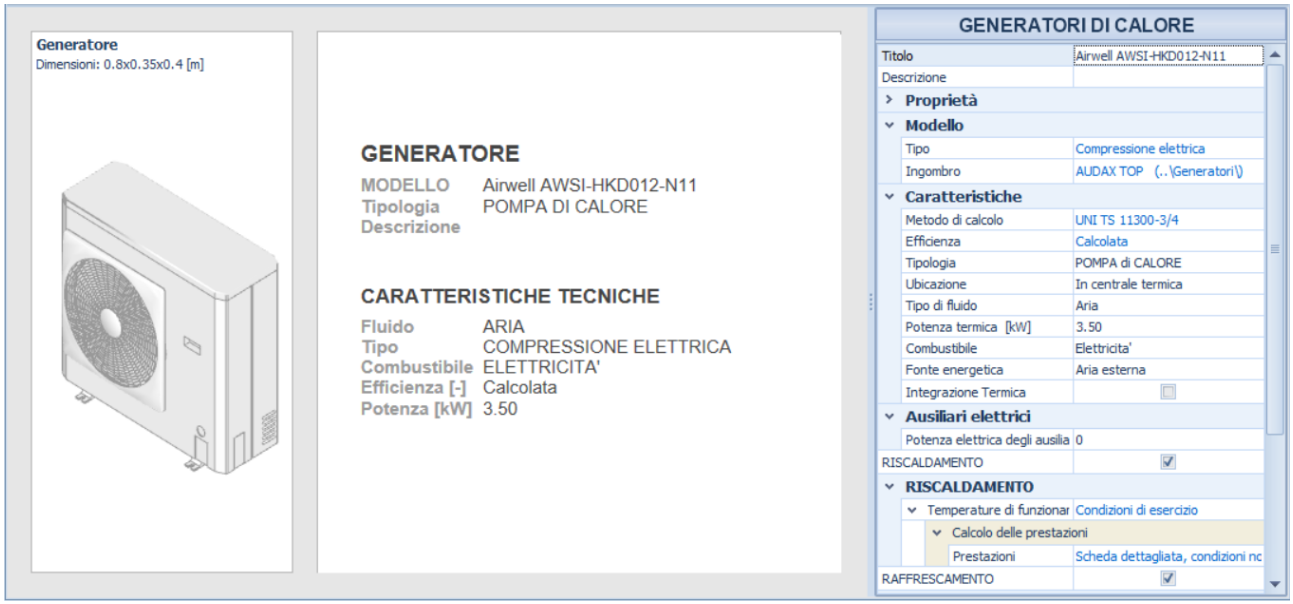



*Fig. 124. Pompe di circolazione Grundfos UPS installate in parallelo e, a destra, dettaglio della targhetta tecnica di una delle pompe.*

*Pompe di calore*

È stato inoltre possibile integrare un sistema di trattamento aria connesso all'impianto idrico, definendo all'interno di Termus – tramite la categoria dedicata alle pompe di calore – la tipologia di impianto aria–acqua destinata sia alla climatizzazione invernale sia al raffrescamento estivo.
Durante il sopralluogo sono state individuate dieci diverse tipologie di pompe di calore, con prestazioni tra loro non radicalmente differenti, poiché la maggior parte adotta compressori e refrigeranti simili. L'analisi dei manuali del produttore si è rivelata fondamentale per ricostruire l'intervallo delle caratteristiche prestazionali di ciascun modello, in particolare attraverso le curve caratteristiche che correlano la potenza termica erogata e il COP con variabili operative quali la temperatura della sorgente, la temperatura di mandata e le portate del fluido all'evaporatore e al condensatore.
Sono state quindi definite le caratteristiche dei generatori presenti nell'edificio:

**Airwell AWSI-HKD012**




Le principali caratteristiche dell'impianto sono sintetizzate nella Tabella 95 relativa ai descrittori applicati al generatore Airwell AWSI-HKD012.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| GENERATORE | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia generatore | Pompa di calore aria-aria Airwell AWSI-HKD012 | - |
| Anno di installazione generatore | Sconosciuto | - |
| Potenza termica generatore | 3,5 (riscald.) – 3,54 (raffresc.) | kW |
| Temperatura mandata generatore | Aria (non applicabile) | - |
| Zona di appartenenza | Ambienti A34, B25 | - |

*Tabella 95. Applicazione dei descrittori generatore Airwell AWSI-HKD012 della Palazzina Comando.*

Daitsu ASD9-12UI DN




Le principali caratteristiche dell'impianto sono sintetizzate nella Tabella 96 relativa ai descrittori applicati al generatore Daitsu ASD9-12UI DN.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| GENERATORE | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia generatore | Pompa di calore aria-aria Daitsu ASD9-12UI DN | - |
| Anno di installazione generatore | Sconosciuto | - |
| Potenza termica generatore | 3,4 (riscald.) – 3,2 (raffresc.) | kW |
| Temperatura mandata generatore | Aria (non applicabile) | - |
| Zona di appartenenza | Ambienti A42, A43, A44, B9, B10, B11 | - |

*Tabella 96. Applicazione dei descrittori generatore Daitsu ASD9-12UI DNdella Palazzina Comando.*

Fuji Electric LM RSG12LM




Le principali caratteristiche dell'impianto sono sintetizzate nella Tabella 97 relativa ai descrittori applicati al generatore Daitsu ASD9-12UI DN.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| GENERATORE | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia generatore | Pompa di calore aria-aria Fuji Electric LM RSG12LM | - |
| Anno di installazione generatore | Sconosciuto | - |
| Potenza termica generatore | 4,0 (riscald.) – 3,4 (raffresc.) | kW |
| Temperatura mandata generatore | Aria (non applicabile) | - |
| Zona di appartenenza | Ambienti C23, C26, C27, C44, C45, C48, C49, C51 | - |

*Tabella 97. Applicazione dei descrittori generatore Fuji Electric LM RSG12LM della Palazzina Comando.*

Gree GWH12AAB-K6DNA1A




Le principali caratteristiche dell'impianto sono sintetizzate nella Tabella 98 relativa ai descrittori applicati al generatore Gree GWH12AAB-K6DNA1A.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| GENERATORE | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia generatore | Pompa di calore aria-aria Gree GWH12AAB-K6DNA1A | - |
| Anno di installazione generatore | Sconosciuto | - |
| Potenza termica generatore | 3,4 (riscald.) – 3,2 (raffresc.) | kW |
| Temperatura mandata generatore | Aria (non applicabile) | - |
| Zona di appartenenza | Ambienti A38, B3 | - |

*Tabella 98. Applicazione dei descrittori generatore Gree GWH12AAB-K6DNA1A della Palazzina Comando.*

Haier AS12BS4HRA

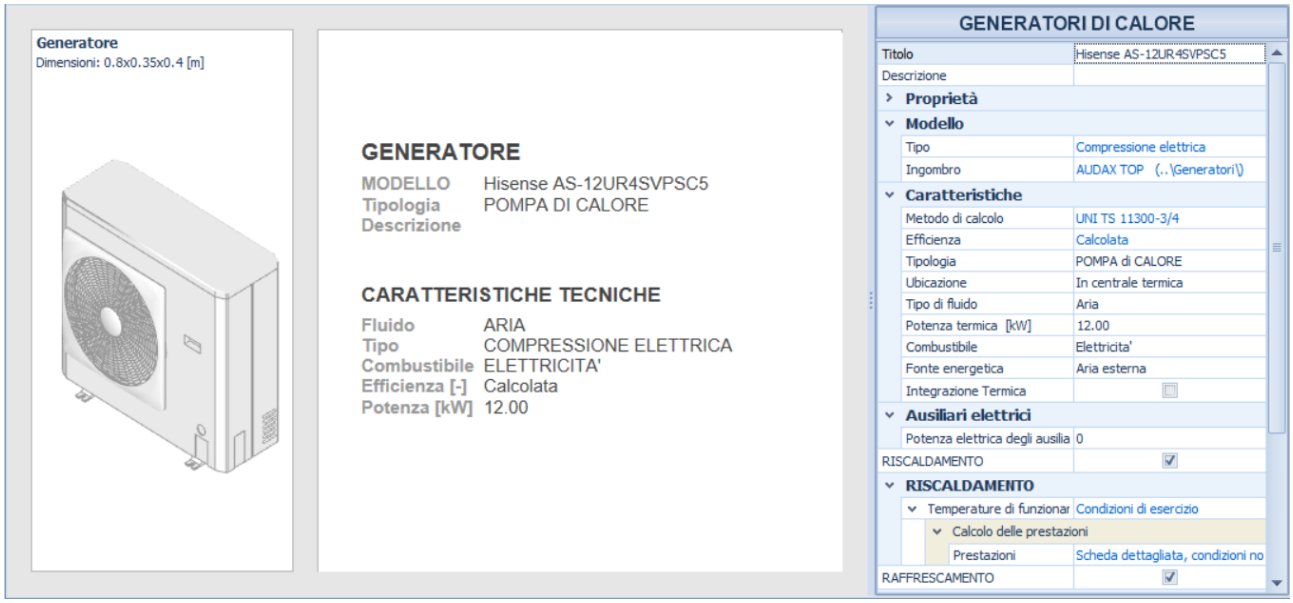



Le principali caratteristiche dell'impianto sono sintetizzate nella Tabella 99 relativa ai descrittori applicati al generatore Haier AS12BS4HRA.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| GENERATORE | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia generatore | Pompa di calore aria-aria Haier AS12BS4HRA | - |
| Anno di installazione generatore | Sconosciuto | - |
| Potenza termica generatore | 3,7 (riscald.) – 3,2 (raffresc.) | kW |
| Temperatura mandata generatore | Aria (non applicabile) | - |
| Zona di appartenenza | Ambienti A26, A27, A29, A31, A38, B1, B2, B4, B18, B19, B21 | - |

*Tabella 99. Applicazione dei descrittori generatore Haier AS12BS4HRA della Palazzina Comando.*

Hisense AS-12UR4SVPSC5




Le principali caratteristiche dell'impianto sono sintetizzate nella Tabella 100 relativa ai descrittori applicati al generatore Hisense AS-12UR4SVPSC5.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| GENERATORE | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia generatore | Pompa di calore aria-aria Hisense AS-12UR4SVPSC5 | - |
| Anno di installazione generatore | Sconosciuto | - |
| Potenza termica generatore | 3,3 (riscald.) – 3,5 (raffresc.) | kW |
| Temperatura mandata generatore | Aria (non applicabile) | - |
| Zona di appartenenza | Ambienti A32, A33, A40, A41, B5, B6, B23, B24, B27 | - |

*Tabella 100. Applicazione dei descrittori generatore Hisense AS-12UR4SVPSC5 della Palazzina Comando.*

Midea MSMA2BU-12HRDN8




Le principali caratteristiche dell'impianto sono sintetizzate nella Tabella 101 relativa ai descrittori applicati al generatore Midea MSMA2BU-12HRDN8.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| GENERATORE | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia generatore | Pompa di calore aria-aria Midea MSMA2BU-12HRDN8 | - |
| Anno di installazione generatore | Sconosciuto | - |
| Potenza termica generatore | 2,7 (riscald.) – 3,5 (raffresc.) | kW |
| Temperatura mandata generatore | Aria (non applicabile) | - |
| Zona di appartenenza | Ambienti A46, B13, B14, C42, C43, C50 | - |

*Tabella 101. Applicazione dei descrittori generatore Midea MSMA2BU-12HRDN8 della Palazzina Comando.*

Orieme K19657-ICE12




Le principali caratteristiche dell'impianto sono sintetizzate nella Tabella 102 relativa ai descrittori applicati al generatore Orieme K19657-ICE12.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| GENERATORE | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia generatore | Pompa di calore aria-aria Orieme K19657-ICE12 | - |
| Anno di installazione generatore | Sconosciuto | - |
| Potenza termica generatore | 4,1 (riscald.) – 3,5 (raffresc.) | kW |
| Temperatura mandata generatore | Aria (non applicabile) | - |
| Zona di appartenenza | Ambienti A35, B26 | - |

*Tabella 102. Applicazione dei descrittori generatore Orieme K19657-ICE12 della Palazzina Comando.*

Panasonic KIT-XE12-NKE




Le principali caratteristiche dell'impianto sono sintetizzate nella Tabella 103 relativa ai descrittori applicati al generatore Panasonic KIT-XE12-NKE.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| GENERATORE | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia generatore | Pompa di calore aria-aria Panasonic KIT-XE12-NKE | - |
| Anno di installazione generatore | Sconosciuto | - |
| Potenza termica generatore | 4,0 (riscald.) – 3,5 (raffresc.) | kW |
| Temperatura mandata generatore | Aria (non applicabile) | - |
| Zona di appartenenza | Ambiente B15 | - |

*Tabella 103. Applicazione dei descrittori generatore Panasonic KIT-XE12-NKE della Palazzina Comando.*

Sharp AY-X12RSR




Le principali caratteristiche dell'impianto sono sintetizzate nella Tabella 104 relativa ai descrittori applicati al generatore Sharp AY-X12RSR.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| GENERATORE | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia generatore | Pompa di calore aria-aria Sharp AY-X12RSR | - |
| Anno di installazione generatore | Sconosciuto | - |
| Potenza termica generatore | 3,5 (riscald.) – 3,5 (raffresc.) | kW |
| Temperatura mandata generatore | Aria (non applicabile) | - |
| Zona di appartenenza | Ambiente A28, B20 | - |

*Tabella 104. Applicazione dei descrittori generatore Sharp AY-X12RSRdella Palazzina Comando.*

Risultano invece privi di sistema di riscaldamento con pompa di calore i seguenti ambienti: A23, A24, A25, A30, A47, A48, B7, B8, B12, B16, B28, B29, B30, C22, C23, C24, C25, C41, C46 e C47.

*Sistema di distribuzione e terminali di erogazione*

La distribuzione dell'acqua calda avviene tramite rete in tubazioni Mannesmann isolate, con tratti finali in ferro non coibentato. Nel modello Termus è stata distinta la tubazione primaria (mandata/ritorno dalla centrale) e la tubazione secondaria a servizio delle zone interne (Fig. 125, Fig. 126, Fig. 127).

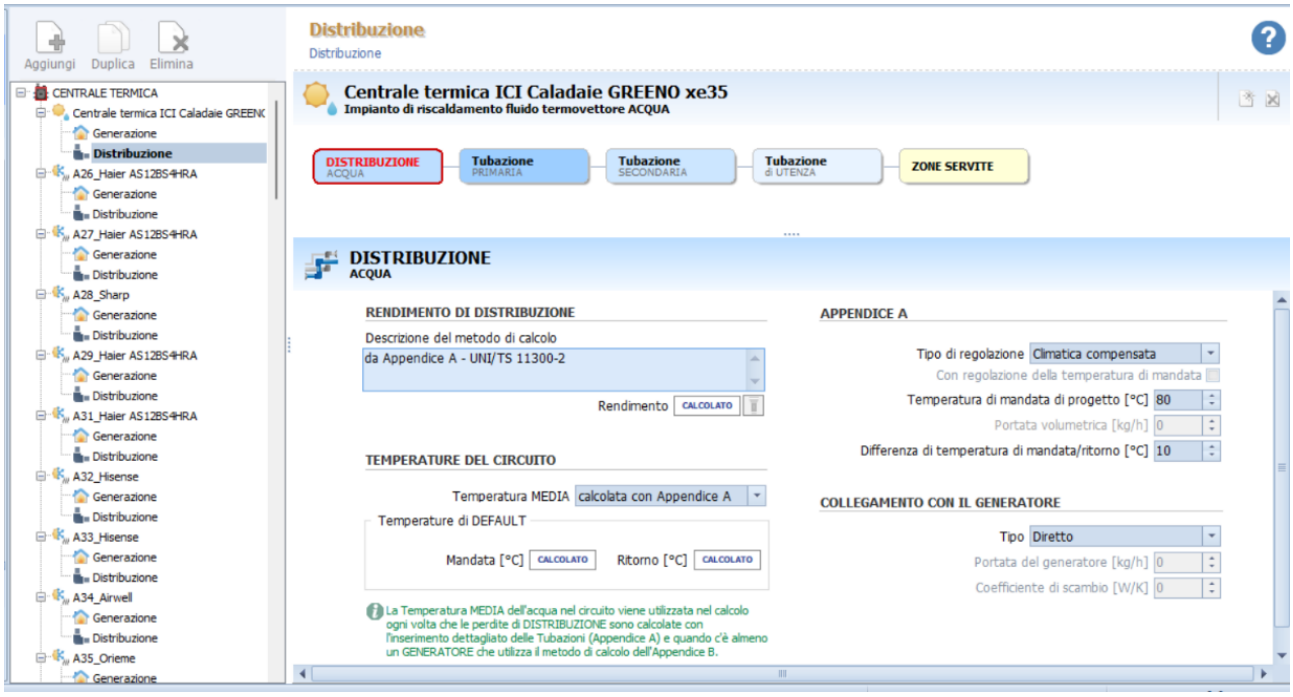



*Fig. 125. Sistema di distribuzione del fluido termovettore nel software Termus.*

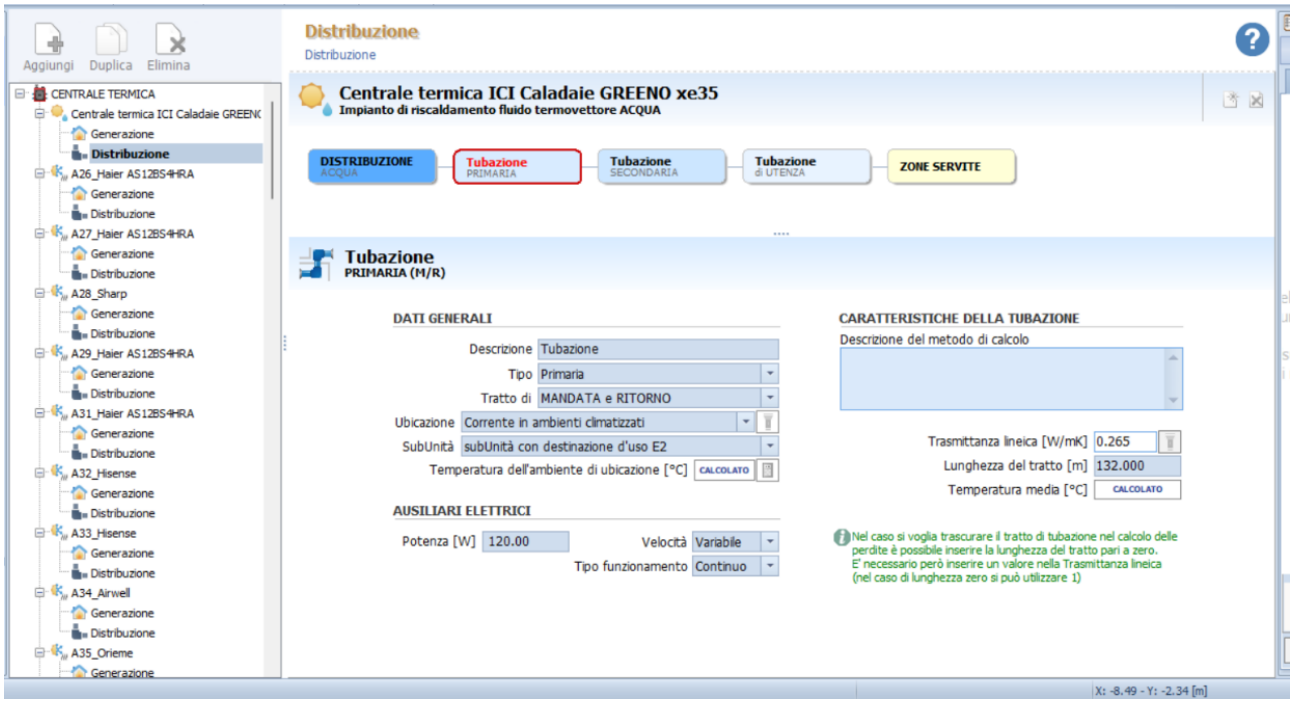



*Fig. 126. Modellazione del circuito secondario di distribuzione del riscaldamento in Termus.*

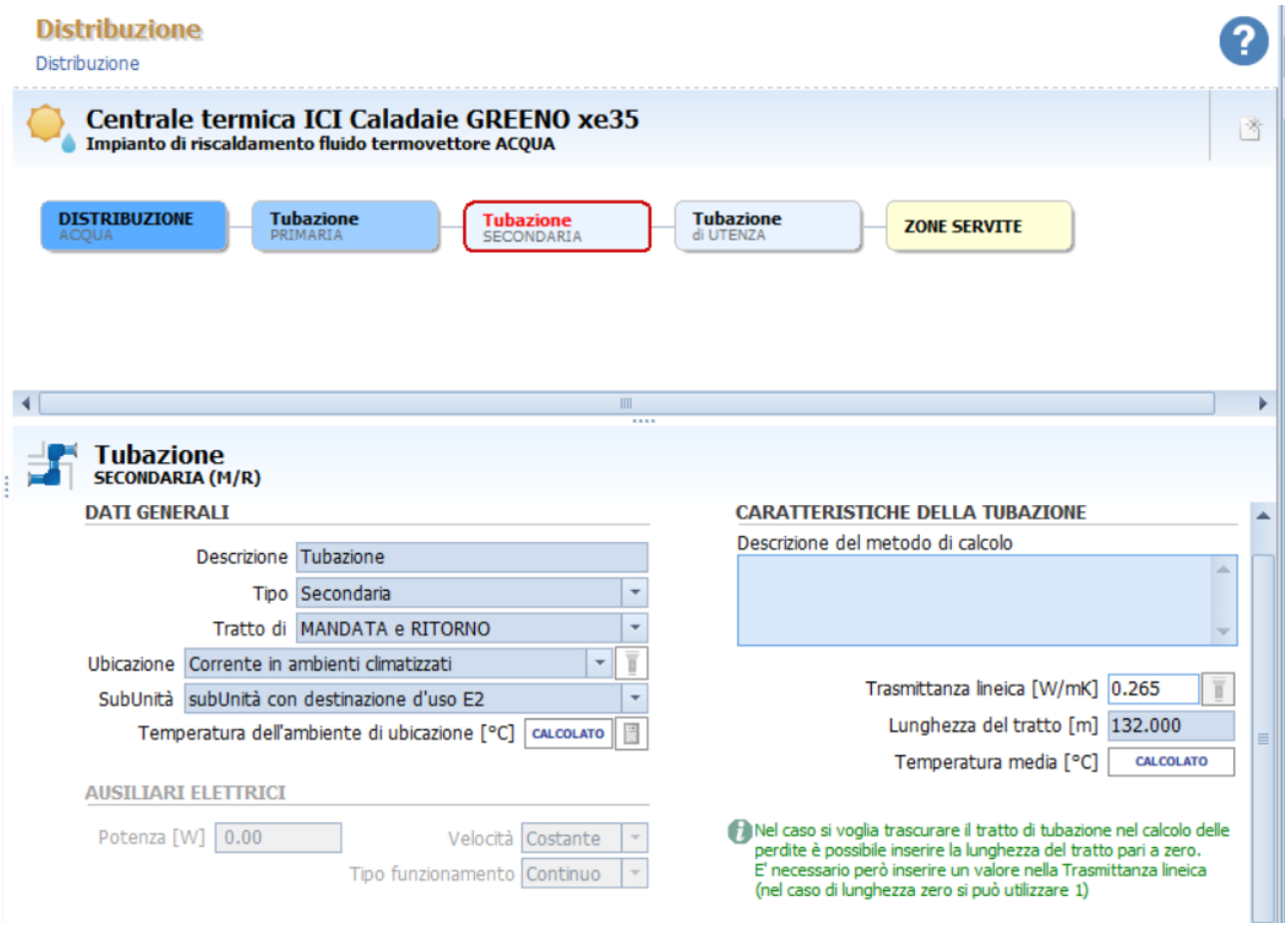



*Fig. 127. Modellazione del circuito secondario di distribuzione del riscaldamento in Termus.*

La Tabella 105 riporta i descrittori applicati al sistema di distribuzione dell'impianto termico, distinguendo i materiali impiegati per le tubazioni e riportando i parametri prestazionali di riferimento (lunghezza complessiva e trasmittanza lineica). I valori sono stati ricavati dal rilievo diretto e dalla modellazione in Termus.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| RETI DI DISTRIBUZIONE | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Sistema di distribuzione | Rete a doppio circuito: primaria (mandata/ritorno) e secondaria di utenza | - |
| Materiale tubazioni | Acciaio Mannesmann coibentato (principale), ferro non isolato (finale) | - |
| Trasmittanza lineica tubazioni | 0,265 | W/mK |
| Lunghezza tubazioni principali | 132 | m |

*Tabella 105. Applicazione dei descrittori al sistema di distribuzione della Palazzina Comando.*

*Termosifoni*

I termosifoni rappresentano i terminali dell'impianto, ovvero gli elementi che cedono direttamente calore all'ambiente interno. Nella Palazzina Comando sono state riscontrate due tipologie principali: radiatori in alluminio e in ghisa. Per ciascuna tipologia è stato necessario stimare la potenza termica effettivamente resa in esercizio, al fine di valutare correttamente i flussi energetici in ingresso nei diversi ambienti.
Il dimensionamento dei radiatori è stato effettuato partendo da parametri rilevati in sito, tra cui l'altezza di interasse (pari a 70 cm), il numero di elementi che compongono ciascun terminale e il valore del salto termico $\Delta t = 50°C$. Quest'ultimo è calcolato come differenza tra la temperatura dell'acqua di mandata all'interno dei radiatori (circa 70°C) e la temperatura ambiente da garantire (20°C).
Sulla base di questi dati, è stato possibile determinare la potenza unitaria di ciascun elemento (espressa in Watt) e moltiplicarla per il numero di colonne di ogni radiatore, ottenendo così la potenza complessiva emessa da ciascun terminale. La somma di questi valori per ambiente ha consentito di stimare il fabbisogno termico coperto dall'impianto di emissione, come riportato nelle tabelle di calcolo dei termosifoni relative ai tre piani dell'edificio.

Dall'elaborazione dei dati emerge che:al piano terra i radiatori forniscono una potenza complessiva di circa 50.312 W (Tabella 107) ;al piano primo il valore è di circa 54.760 W (Tabella 108); al piano secondo, dove i terminali sono in numero ridotto, la potenza totale è pari a 15.096 W (Tabella 109).
Complessivamente, l'intero edificio risulta dotato di un sistema di emissione con una potenza termica di circa 120.168 W distribuita in modo variabile nei diversi ambienti in funzione della tipologia e del numero di elementi presenti.

La Tabella 106 riporta i descrittori applicati al sistema di distribuzione della Palazzina Comando, comprendente i radiatori. I valori sono stati ricavati dall'analisi diretta, dalla documentazione tecnica e dalla modellazione su Termus.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| TERMINALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia terminali | Radiatori in ghisa + radiatori in alluminio | - |
| Dimensioni | Altezza interasse 70 – profondità/lunghezza variabili | cm |
| Numero terminali per tipologia | | - |
| Zone servite dai radiatori | Zona termica E2 – Uffici Palazzina Comando | |
| Potenza unitaria | Alluminio ≈ 148 – Ghisa ≈ 135 (con $\Delta t = 50$ °C) | W/elemento |
| Potenza complessiva terminali (per piano) | Piano terra: 50.312<br>Piano primo: 54.760<br>Piano secondo: 15.096 | W |
| Potenza complessiva terminali (totale edificio) | 120.168 | W |
| Anno di installazione terminali | Sconosciuto | - |

*Tabella 106. Applicazione dei descrittori relativi ai terminali di emissione (radiatori) della Palazzina Comando.*

*CALCOLO TERMOSIFONI – PIANO TERRA*

| *Ambiente* | *Tipologia* | *N° elementi* | *Potenza unitaria (W)* | *Potenza complessiva (W)* |
|---|---|---|---|---|
| *A23* | */* | */* | */* | */* |
| *A24* | */* | */* | */* | */* |
| *A25* | *Alluminio* | *20* | *148* | *2960* |
| *A26* | *Alluminio* | *12* | *148* | *1776* |
| *A27* | *Alluminio* | *13* | *148* | *1924* |
| *A28* | *Alluminio* | *30* | *148* | *4440* |
| *A29* | *Alluminio* | *8* | *148* | *1184* |
| *A30a* | *Alluminio* | *6* | *148* | *888* |
| *A30b* | *Alluminio* | *6* | *148* | *888* |
| *A31* | *Alluminio* | *19* | *148* | *2812* |
| *A32* | *Alluminio* | *13* | *148* | *1924* |
| *A33* | *Alluminio* | *11* | *148* | *1628* |
| *A34* | *Alluminio* | *12* | *148* | *1776* |
| *A35* | *Alluminio* | *13* | *148* | *1924* |
| *A36* | *Alluminio* | *19* | *148* | *2812* |
| *A37* | *Alluminio* | *6* | *148* | *888* |
| *A37a* | *Alluminio* | *6* | *148* | *888* |
| *A38* | *Alluminio* | *12* | *148* | *1776* |
| *A39* | *Alluminio* | *13* | *148* | *1924* |
| *A40* | *Alluminio* | *9* | *148* | *1332* |
| *A41* | *Alluminio* | *12* | *148* | *1776* |
| *A41a* | *Alluminio* | *13* | *148* | *1924* |
| *A42* | *Alluminio* | *10* | *148* | *1480* |
| *A42a* | *Alluminio* | *10* | *148* | *1480* |
| *A43* | *Alluminio* | *12* | *148* | *1776* |
| *A44* | *Alluminio* | *14* | *148* | *2072* |
| *A45* | */* | */* | */* | */* |
| *A46* | *Alluminio* | *10* | *148* | *1480* |
| *A47* | *Alluminio* | *20* | *148* | *2960* |
| *A48* | *Ghisa* | *12* | *135* | *1620* |
| *Totale* | | | | *50.312* |

*Tabella 107. Calcolo della potenza termica dei termosifoni presenti al piano terra della Palazzina Comando.*

*CALCOLO TERMOSIFONI – PIANO PRIMO*

| *Ambiente* | *Tipologia* | *N° elementi* | *Potenza unitaria (W)* | *Potenza complessiva (W)* |
|---|---|---|---|---|
| *B1* | *Alluminio* | *19* | *148* | *2812* |
| *B2* | *Alluminio* | *13* | *148* | *1924* |
| *B3* | *Alluminio* | *10* | *148* | *1480* |
| *B4* | *Alluminio* | *13* | *148* | *1924* |
| *B5* | *Alluminio* | *13* | *148* | *1924* |
| *B6* | *Alluminio* | *13* | *148* | *1924* |
| *B7* | *Alluminio* | *12* | *148* | *1776* |
| *B8* | *Alluminio* | *10* | *148* | *1480* |
| *B9* | *Alluminio* | *10* | *148* | *1480* |
| *B10* | *Alluminio* | *12* | *148* | *1776* |
| *B11* | *Alluminio* | *14* | *148* | *2072* |
| *B12* | */* | */* | */* | */* |
| *B13* | *Alluminio* | *9* | *148* | *1332* |
| *B14* | *Alluminio* | *8* | *148* | *1184* |
| *B15* | *Alluminio* | *11* | *148* | *1628* |
| *B16* | *Alluminio* | *8* | *148* | *1184* |
| *B17* | */* | */* | */* | */* |
| *B18* | *Alluminio* | *12* | *148* | *1776* |
| *B19* | *Alluminio* | *13* | *148* | *1924* |
| *B20* | *Alluminio* | *11* | *148* | *1628* |
| *B21* | *Alluminio* | *12* | *148* | *1776* |
| *B22* | *Alluminio* | *19* | *148* | *2812* |
| *B23* | *Alluminio* | *13* | *148* | *1924* |
| *B24* | *Alluminio* | *13* | *148* | *1924* |
| *B25* | *Alluminio* | *12* | *148* | *1776* |
| *B26* | *Alluminio* | *13* | *148* | *1924* |
| *B27* | *Alluminio* | *9* | *148* | *1332* |
| *B28* | *Alluminio* | *6* | *148* | *888* |
| *B28a* | *Alluminio* | *6* | *148* | *888* |
| *B29* | *Alluminio* | *20* | *148* | *2960* |
| *B30* | *Alluminio* | *29* | *148* | *4292* |
| *Totale* | | | | *54.760* |

*Tabella 108. Calcolo della potenza termica dei termosifoni presenti al primo piano della Palazzina Comando.*

*CALCOLO TERMOSIFONI – PIANO SECONDO*

| *Ambiente* | *Tipologia* | *N° elementi* | *Potenza unitaria (W)* | *Potenza complessiva (W)* |
|---|---|---|---|---|
| *C22* | */* | */* | */* | */* |
| *C23* | *Alluminio* | *16* | *148* | *2368* |
| *C23a* | *Alluminio* | *6* | *148* | *888* |
| *C23b* | *Alluminio* | *6* | *148* | *888* |
| *C23c* | *Alluminio* | *6* | *148* | *888* |
| *C23d* | *Alluminio* | *6* | *148* | *888* |
| *C24* | */* | */* | */* | */* |
| *C25* | */* | */* | */* | */* |
| *C26* | *Alluminio* | *20* | *148* | *2960* |
| *C27* | *Alluminio* | *10* | *148* | *1480* |
| *C27a* | *Alluminio* | *6* | *148* | *888* |
| *C41* | */* | */* | */* | */* |
| *C42* | *Alluminio* | *10* | *148* | *1480* |
| *C43* | *Alluminio* | *10* | *148* | *1480* |
| *C44* | */* | */* | */* | */* |
| *C45* | */* | */* | */* | */* |
| *C46* | *Alluminio* | *6* | *148* | *888* |
| *C47* | */* | */* | */* | */* |
| *C48* | */* | */* | */* | */* |
| *C49* | */* | */* | */* | */* |
| *C50* | */* | */* | */* | */* |
| *C51* | */* | */* | */* | */* |
| *Totale* | | | | *15.096* |

*Tabella 109. Calcolo della potenza termica dei termosifoni presenti al secondo piano della Palazzina Comando.*

*Pompe di calore*

In aggiunta al sistema centralizzato, la Palazzina Comando è dotata di numerose unità split aria-aria installate nei singoli locali. Durante il sopralluogo sono state individuate 10 tipologie differenti di pompe di calore con prestazioni simili, differenziate per potenza resa, consumi e indici di efficienza (COP ed EER).

In Tabella 110 si riportano i principali dati:

| Modello | Ambienti serviti | Potenza resa riscaldamento (kW) | Potenza resa raffrescamento (kW) | Potenza assorbita riscaldamento (kW) | Potenza assorbita raffrescamento (kW) | COP | EER |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Airwell AWSI-HKD012 | A34, B25 | 3,5 | 3,54 | 0,94 | 1,09 | 4,4 | 6,8 |
| Daitsu ASD9-12UI DN | A42, A43, A44, B9, B10, B11 | 3,4 | 3,2 | 0,94 | 0,99 | 4,0 | 6,1 |
| Fuji Electric LM RSG12LM | C23, C26, C27, C44, C45, C48, C49, C51 | 4,0 | 3,4 | 1,02 | 0,97 | 4,0 | 7,0 |
| Gree GWH12AAB-K6DNA1A | A38, B3 | 3,4 | 3,2 | 0,94 | 0,99 | 4,0 | 6,1 |
| Haier AS12BS4HRA | A26, A27, A29, A31, A38, B1, B2, B4, B18, B19, B21 | 3,7 | 3,2 | 0,95 | 1,00 | 3,9 | 3,8 |
| Hisense AS-12UR4SVPSC5 | A32, A33, A40, A41, B5, B6, B23, B24, B27 | 3,3 | 3,5 | 1,04 | 1,06 | 3,65 | 3,3 |
| Midea MSMA2BU-12HRDN8 | A46, B13, B14, C42, C43, C50 | 2,7 | 3,5 | 1,10 | 1,20 | 3,5 | 2,9 |
| Orieme K19657-ICE12 | A35, B26 | 4,1 | 3,5 | 1,11 | 1,06 | 3,69 | 3,32 |
| Panasonic KIT-XE12-NKE | B15 | 4,0 | 3,5 | 0,93 | 0,88 | 4,3 | 4,1 |
| Sharp AY-X12RSR | A28, B20 | 3,5 | 3,5 | 1,01 | 1,03 | 3,8 | 5,7 |

*Tabella 110. Pompe di calore aria-aria installate nella Palazzina Comando*

La Tabella 111 dei descrittori relativi alle pompe di calore split sintetizza i principali parametri caratteristici degli impianti split locali, includendo tipologia, potenze resa e assorbita in riscaldamento/raffrescamento, coefficienti di prestazione (COP, EER), zone servite e numero di unità rilevate. I valori sono stati ricavati dalle schede tecniche e dall'analisi in situ.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| TERMINALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| **Tipologia terminali** | Split a parete | - |
| **Numero dei terminali per tipologia** | 10 tipologie differenti (con più macchine per ciascun modello) | - |
| **Potenza resa in riscaldamento (gamma)** | 2,7 – 4,1 | kW |
| **Potenza resa in raffrescamento (gamma)** | 3,2 – 3,54 | kW |
| **Potenza assorbita in riscaldamento (gamma)** | 0,93 – 1,11 | kW |
| **Potenza assorbita in raffrescamento (gamma)** | 0,88 – 1,20 | kW |
| **COP (Coefficient of Performance)** | 3,5 – 4,4 | - |
| **EER (Energy Efficiency Ratio)** | 2,9 – 7,0 | - |
| **Distribuzione negli ambienti** | Locali uffici ai piani A, B, C (es. A26–A46, B1–B27, C23–C51) | - |
| **Zona di appartenenza** | Zona termica E2 – Uffici Palazzina Comando | - |

*Tabella 111. Applicazione dei descrittori relativi ai terminali di emissione (split) della Palazzina Comando.*

### 1.3.5 I risultati ottenuti dalla simulazione dello stato di fatto in condizioni standard

In questo capitolo vengono presentati e analizzati i risultati più significativi ottenuti dalla simulazione energetica della Palazzina Comando, sviluppata dopo aver definito in dettaglio sia le caratteristiche geometriche e materiche dell'involucro, sia i sistemi impiantistici rilevati in sito e successivamente modellati in Termus.

L'edificio si colloca in classe energetica F, con un indice di prestazione energetica globale non rinnovabile (EPgl,nren) pari a 209,88 kWh/m²anno (Fig. 128). La collocazione in questa classe evidenzia come l'edificio presenti un sistema di riscaldamento obsoleto, infissi poco performanti e un involucro edilizio privo di isolamento, fattori che determinano dispersioni elevate e un conseguente notevole dispendio di energia.
L'analisi di dettaglio (Fig. 129) restituisce valori che confermano le criticità emerse. L'indice di prestazione energetica globale si attesta a 222,36 kWh/m²anno. La prestazione invernale risulta particolarmente penalizzante: l'indice di prestazione termica utile per il riscaldamento (EPh,nd) è pari a 92,35 kWh/m²anno, mentre quello relativo al raffrescamento (EPc,nd) raggiunge i 23,85 kWh/m²anno.
Per quanto riguarda i servizi energetici, l'indice di prestazione energetica per il riscaldamento risulta pari a 169,82 kWh/m²anno, mentre quello per il raffrescamento si attesta a 45,60 kWh/m²anno, evidenziando come entrambi i sistemi incidano in maniera significativa sul bilancio complessivo.

Per il riscaldamento, il fabbisogno di energia termica utile è pari a 139.878,84 kWh, a fronte di un fabbisogno di energia primaria totale che raggiunge i 257.202,51 kWh, di cui soltanto una minima parte (3.439,22 kWh) proveniente da fonte rinnovabile. Per il raffrescamento, il fabbisogno di energia frigorifera utile ammonta a 36.121,27 kWh, con un fabbisogno di energia primaria totale pari a 69.058,79 kWh. Infine, per l'acqua calda sanitaria (ACS) il fabbisogno di energia termica utile si attesta a 3.019,19 kWh, confermando il peso relativamente limitato di questo servizio rispetto ai consumi complessivi (Fig. 130).

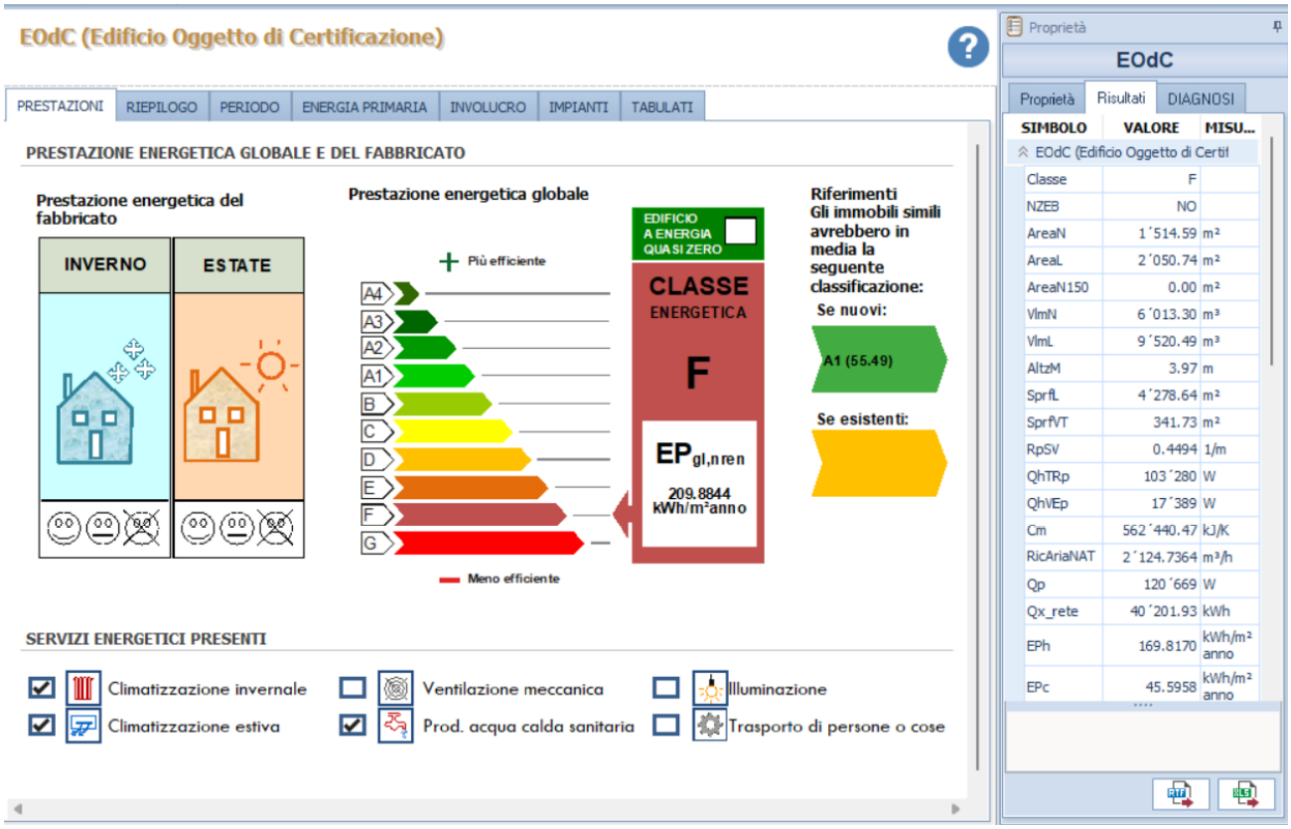


*Fig. 128. Certificazione energetica della Palazzina Comando: classe F con EPgl,nren pari a 209,88 kWh/m²anno.*

L'analisi più approfondita dei flussi energetici evidenzia la centralità delle dispersioni per trasmissione (QhTR) durante l'inverno, che raggiungono i valori massimi nei mesi di gennaio e febbraio, ma si mantengono significative per tutto il periodo di esercizio. Nel periodo estivo, invece, i consumi sono fortemente influenzati dagli apporti solari diretti (Qsol), che, in assenza di adeguati sistemi di schermatura, determinano un incremento consistente del fabbisogno di raffrescamento soprattutto nei mesi di giugno, luglio e agosto (Fig. 131).

Il bilancio energetico conferma, inoltre, le difficoltà legate agli impianti esistenti. Per il riscaldamento, i fabbisogni risultano molto elevati a causa di un rendimento non ottimale della caldaia e delle dispersioni lungo il sistema di distribuzione. Nel caso del raffrescamento, invece, i consumi elettrici sono fortemente influenzati dagli apporti interni e da quelli solari, fattori che, combinati, aumentano in maniera significativa il fabbisogno complessivo (Fig. 132).




*Fig. 129. Indici di prestazione energetica globale, di riscaldamento e raffrescamento.*

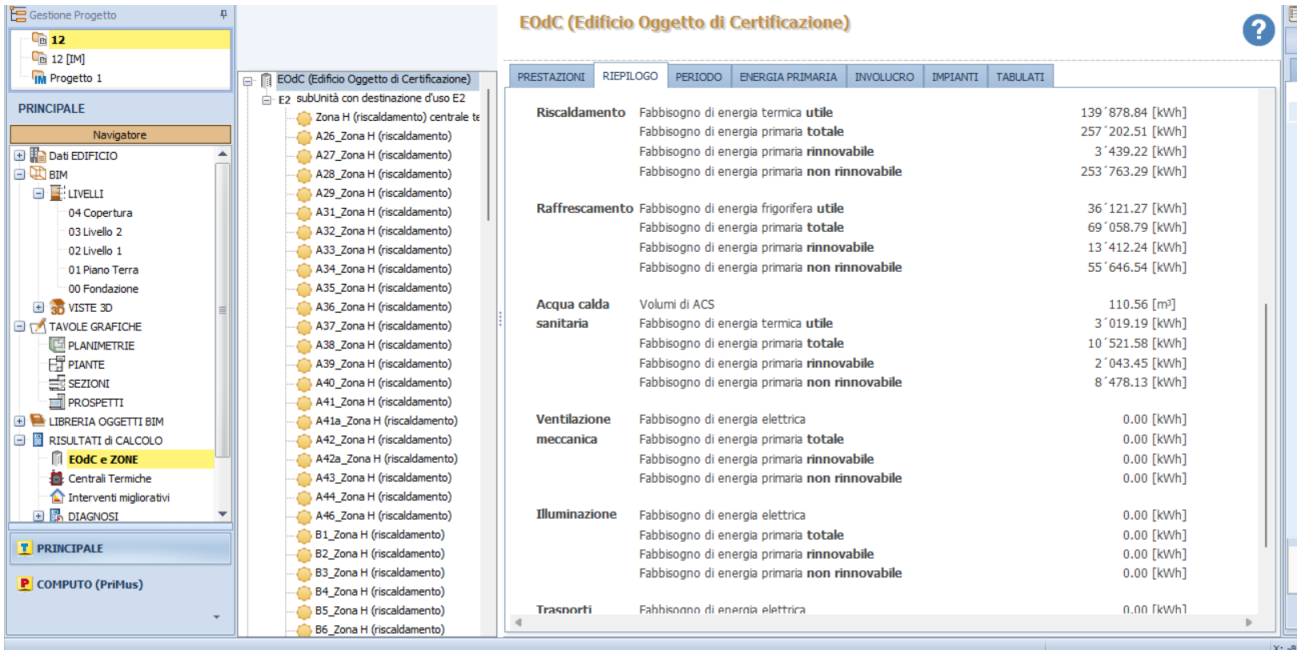



*Fig. 130. Risultati tabellari dei fabbisogni di riscaldamento, raffrescamento e ACS.*

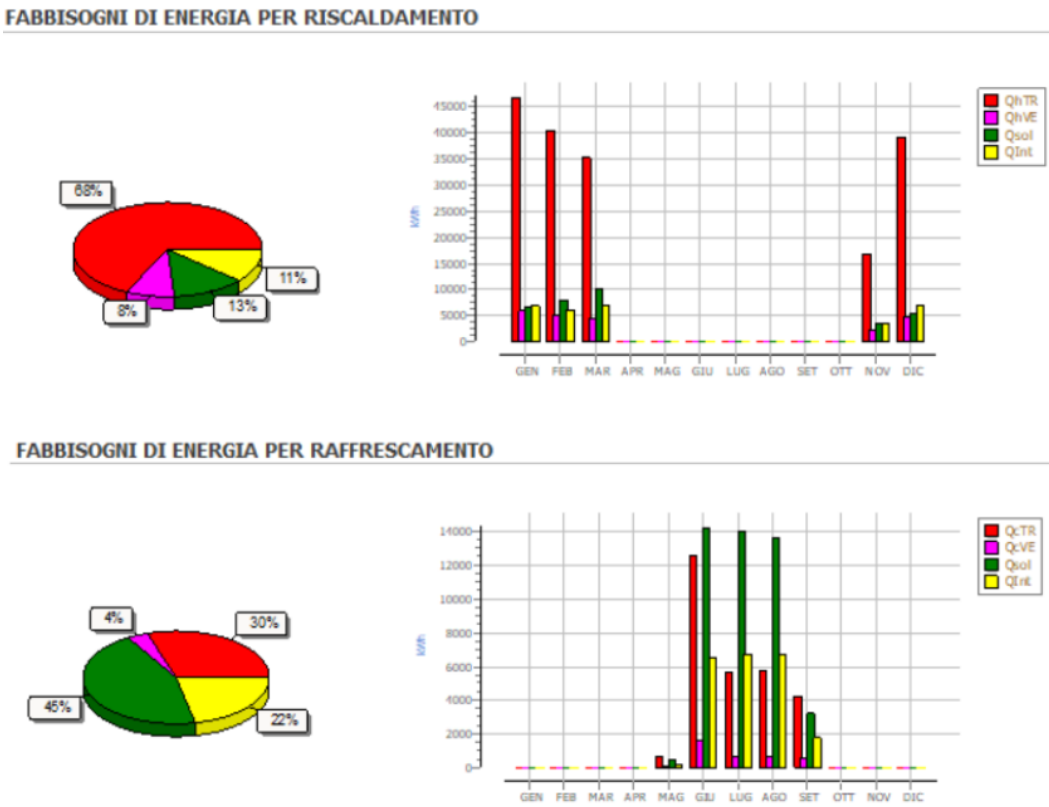



*Fig. 131. Fabbisogni di energia per riscaldamento e il raffrescamento.*

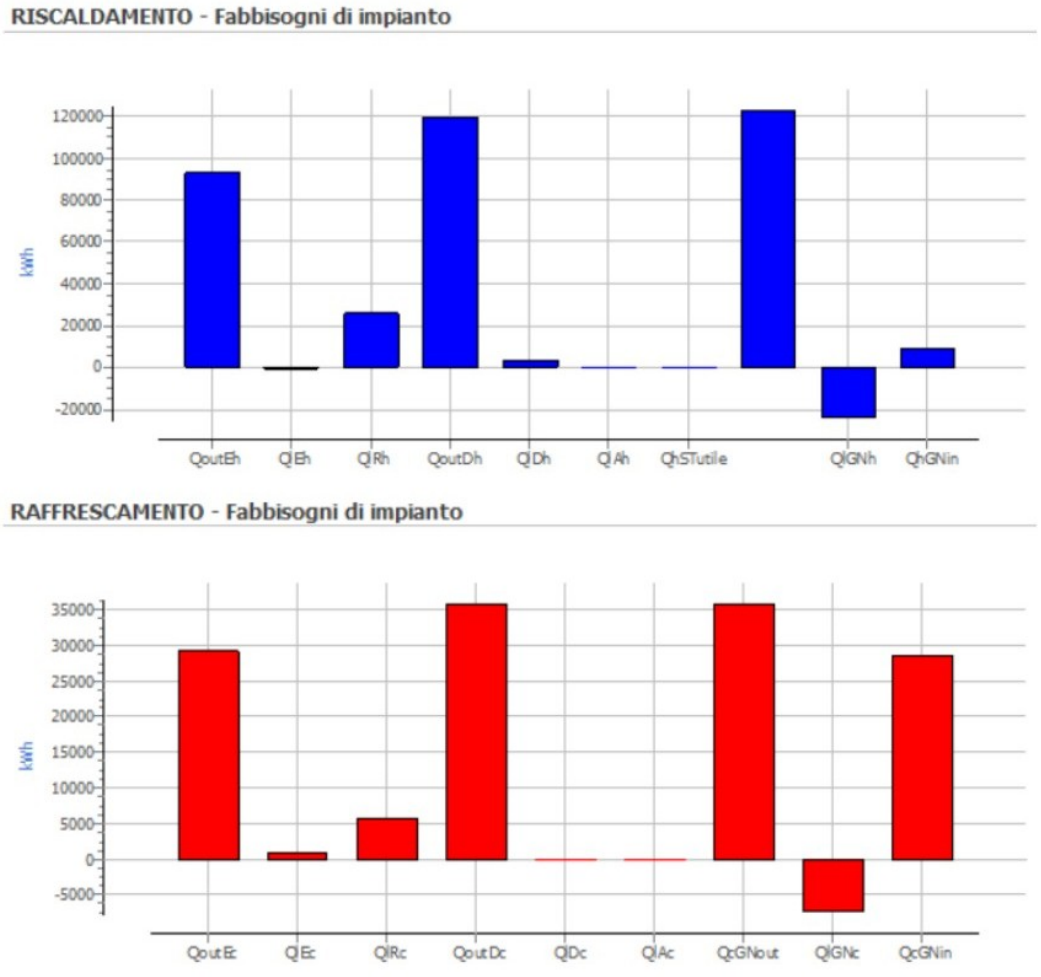



*Fig. 132. Fabbisogni di impianto per il riscaldamento e il raffrescamento.*

La Tabella 112 sintetizza i descrittori energetici della Palazzina Comando, riportando classe energetica, fabbisogni termici ed elettrici, quota da fonti rinnovabili e generatore di ACS. I valori evidenziano consumi elevati e una copertura FER limitata (6–7%). I valori sono stati ricavati dalle schede tecniche e dall'analisi in situ.

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| GRUPPI TERMICI | | |
| RISULTATI DI CALCOLO | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Classe energetica globale dell'edificio | F | - |
| Fabbisogno annuale di energia termica | Riscaldamento (utile): 139.878,84<br>Raffrescamento (utile): 36.121,27<br>ACS: 3.019,19 | kWh |
| Fabbisogno di energia elettrica | | |
| Fabbisogno di EP | Riscaldamento: 257.202,51<br>Raffrescamento: 69.058,79<br>ACS: 10.521,58 | kWh |
| Copertura da FER | Riscaldamento: 3.439,22<br>Raffrescamento: 13.404,25<br>ACS: 478,13 | kWh |
| Percentuale FER complessiva | 6–7 | % |
| Generatore acqua calda sanitaria | Caldaia a gasolio (modello ICI GREENOx.e 35) | - |
| Accumulo acqua calda sanitaria | | |
| Flusso d'aria della ventilazione | | |
| Ricambio d'aria orario nelle ore diurne (n) | | |
| Portata d'aria di rinnovo nelle ore diurne | | |
| Tipologia illuminazione | | |
| Potenza luminosa | | |
| Tipologia piattaforme elevatrici | | |
| Potenza forza motrice | | |

*Tabella 112. Applicazione dei descrittori energetici globali alla Palazzina Comando, risultati di calcolo.*

## 1.4 L'analisi di compatibilità

Gli esiti dell'analisi dei descrittori hanno costituito la base conoscitiva necessaria per definire con consapevolezza la strategia di intervento. In particolare, la valutazione del livello di importanza storico-architettonica dei componenti edilizi ha permesso di comprendere quali elementi contribuiscano in modo determinante all'identità del bene e quali, invece, presentino margini di trasformazione maggiori.

### 1.4.1 Indicatori del valore storico-architettonico

La Tabella 113 sintetizza i risultati della valutazione, applicata al caso studio della palazzina comando della Caserma Villasanta. Ogni riga corrisponde a uno specifico elemento edilizio – identificato attraverso il codice Raumbuch (ad esempio Ine_03a, Mue_01a) – al quale viene associato un indicatore di interesse storico (storico-artistico, costruttivo, testimoniale, materico, tipologico) e un punteggio compreso tra 0 e 4. La somma dei punteggi consente di classificare la valenza storica dell'elemento su cinque livelli: molto alta, alta, media, bassa, nulla.
Nella tabella vengono riportati solo alcuni elementi edilizi, scelti a titolo esemplificativo, utili per illustrare il funzionamento del sistema valutativo. Gli indicatori applicati riguardano diverse forme di interesse storico:
per gli infissi esterni (Ine), come Ine_03a relativo alla porta d'ingresso in legno a doppia anta, è stato considerato l'interesse storico-artistico (Isa), che raggiunge un livello di valenza molto alta (punteggio 4); per le murature esterne (Mue_01a) e interne (Mui_01a), la valutazione si concentra sull'interesse storico-costruttivo (Isc), anch'esso associato a un livello molto alto; la categoria dell'interesse storico-testimoniale è articolata in tre declinazioni—Ite (testimoniale), Itef (funzionale) e Item (materico)—che nel caso studio corrispondono a elementi con valenza storica alta (punteggio 3); la copertura della palazzina (So_c) è associata all'interesse storico-tipologico (Iti), con una valenza di livello medio (punteggio 2); numerosi infissi esterni in alluminio, identificati dai codici Ine_01a, Ine_02a, Ine_02c e Ine_02d, rientrano nella categoria "nessun interesse" (Ni), con valenza bassa (punteggio 1); infine, l'elemento di collegamento verticale (Cv_01a) è stato classificato come elemento incongruo (Ei), con valenza nulla (punteggio 0).
La presentazione di questi elementi esemplificativi consente di mostrare in modo chiaro l'applicazione del metodo e di definire un quadro interpretativo utile per la successiva definizione delle priorità di intervento e delle strategie progettuali, in particolare nell'ambito dell'efficientamento energetico compatibile con i valori storici della palazzina comando.

| INDICATORI DEL VALORE STORICO-ARCHITETTONICO | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| INDICATORE | ELEMENTO | | DESCRIZIONE | | RISULTATI | | |
| | Tipo | Codice Raumbuch | | | GRADO DI TRASFORMABILITA' | VALENZA STORICA | VALORE |
| Valutazione dell'interesse | Ine | Ine_03a | Interesse storico-artistico | Isa | Nullo | Molto alta | 4 |
| | Mue | Mue_01a | Interesse storico-costruttivo | Isc | Nullo | Molto alta | 4 |
| | Mui | Mui_01a | Interesse storico-costruttivo | Isc | Nullo | Molto alta | 4 |
| | So | So_c | Interesse storico-tipologico | Iti | Medio | Media | 2 |
| | Ine | Ine_01a | Nessun interesse | Ni | Alto | Bassa | 1 |
| | Ine | Ine_02a | Nessun interesse | Ni | Alto | Bassa | 1 |
| | Ine | Ine_02c | Nessun interesse | Ni | Alto | Bassa | 1 |
| | Ine | Ine_02d | Nessun interesse | Ni | Alto | Bassa | 1 |

*Tabella 113. Indicatori del valore storico-architettonico degli elementi edilizi.*

| VALORE | NOTE |
|---|---|
| 4 | L'elemento definisce in modo eccezionale il carattere del bene. Qualsiasi forma di perdita o danneggiamento è considerata completamente inaccettabile o quasi. |
| 3 | L'elemento definisce sostanzialmente il carattere del bene. La perdita non è considerata accettabile e il danneggiamento dovrebbe essere ridotto al minimo assoluto. |
| 2 | L'elemento definisce in parte il carattere del bene. La perdita potrebbe essere considerata accettabile solo in circostanze particolari; il danneggiamento dovrebbe essere minimizzato. |
| 1 | L'elemento contribuisce lievemente al carattere del bene. Una perdita o un danneggiamento potrebbe essere considerato accettabile. |
| 0 | L'elemento non contribuisce a definire il carattere del bene. Una perdita o un danneggiamento non sarebbe considerato problematico e potrebbe persino essere ritenuto vantaggioso. |

*Tabella 114. La tabella mostra come elementi con valori finali alti (quindi di elevata valenza storica) richiedono la minima trasformazione, mentre quelli con valori finali bassi (quindi di bassa valenza storica) possono essere modificati più liberamente.*

### 1.4.2 Indicatori prestazionali del potenziale di risparmio energetico

Parallelamente alla valutazione del valore patrimoniale, l'analisi del potenziale di miglioramento energetico è stata applicata agli elementi d'involucro della palazzina. Si riportano alcuni esempi a titolo esemplificativo.
Per la valutazione del potenziale reale di riduzione del fabbisogno energetico degli elementi edilizi, in particolare degli infissi esterni, è stata applicata la seguente metodologia basata sul calcolo del potenziale corretto di miglioramento della trasmittanza termica (Pcorr).

1. Nella prima fase, il valore teorico di miglioramento della trasmittanza (ΔU%) viene corretto in base alla possibilità effettiva di intervento sull'elemento, tramite il fattore $X_{int}$, ottenendo un potenziale di miglioramento a scala di singolo infisso ($P_{elem}$):

   $$P_{elem} = (\Delta U\%) \times X_{int}$$

   $\Delta U\%$= potenziale teorico di miglioramento della trasmittanza (differenza tra U e $U_{rif}$ in %);
   $X_{int}$= coefficiente che riduce il potenziale in base al grado di trasformabilità dell'elemento;
   $P_{elem}$ = potenziale massimo di miglioramento effettivo della trasmittanza corretto in base al vincolo di tutela applicato sull'elemento, espresso in W/(m²K).

2. Nella seconda fase, il valore sopra ottenuto viene ponderato rispetto alla superficie finestrata e all'esposizione dell'elemento sull'involucro edilizio, applicando i fattori $X_{sup}$ (superficie finestrata rispetto all'involucro) ed $X_{esp}$, (esposizione prevalente) così da stimarne il contributo reale al comportamento termico complessivo dell'edificio:

   $$P_{corr} = P_{elem} \times X_{sup} \times X_{esp}$$

   oppure, sostituendo la prima formula:

   $$P_{corr} = (\Delta U\%) \times X_{int} \times X_{sup} \times X_{esp}$$

   $X_{sup}$= coefficiente che riduce il potenziale in base alla superficie finestrata rispetto all'involucro;
   $X_{esp}$= coefficiente che riduce il potenziale in base all'esposizione prevalente dell'elemento.

Il valore così ottenuto ($P_{corr}$) è un valore % che descrive la capacità reale di ciascuna tipologia di elemento di incidere sulla riduzione della trasmittanza complessiva dell'edificio ($U_{tot}$), integrando le considerazioni energetiche con quelle di compatibilità storica e tecnica. In sintesi, è utile per dire "questa finestra ha un potenziale correttivo basso/medio/alto".

- **Ine_01a**

Analizzando la Tabella 115, focalizzandoci sull'infisso di tipo *Ine_01a* (porta d'ingresso a doppia anta), si vede come per questo elemento la trasmittanza termica misurata è pari a 5,9 W/m²K, a fronte di un valore limite normativo (Urif) di 2,2 W/m²K, con un potenziale teorico di miglioramento della trasmittanza (ΔU%) del 62,7%. Considerando il grado di trasformabilità elevato (X_int = 1), la superficie relativamente contenuta rispetto all'involucro (X_sup = 0,2) e un'esposizione prevalente con fattore correttivo X_esp = 0,8, si ottiene un potenziale corretto di riduzione della trasmittanza complessiva dell'edificio (Pcorr) pari al 10,0%. Questo valore indica che, nonostante il margine teorico di miglioramento significativo, il contributo reale di questo infisso alla riduzione del fabbisogno energetico globale è proporzionalmente più contenuto, a causa delle caratteristiche dimensionali e dell'orientamento.

- **Ine_02a**

Passando all'infisso di tipo *Ine_02a*, caratterizzato da una trasmittanza termica pari a 6,3 W/m²K, si applica lo stesso metodo di valutazione. In questo caso, a fronte di un valore limite normativo (Urif) di 2,2 W/m²K, si ha un potenziale teorico di miglioramento della trasmittanza (ΔU%) del 65%. Considerando il grado di trasformabilità elevato (X_int = 1), la superficie interessata estesa rispetto all'involucro (X_sup = 0,8) e un'esposizione prevalente con fattore correttivo X_esp = 0,8, si ottiene un potenziale corretto di riduzione della trasmittanza complessiva dell'edificio (Pcorr) pari al 41,6%. Questo valore indica che, grazie alla significativa estensione e all'orientamento

favorevole dell'infisso, il contributo reale di questo elemento al miglioramento energetico globale è consistente e rappresenta un ambito prioritario per gli interventi di efficientamento.

- **Ine 02d**

Per l'infisso di tipo *Ine_02d*, la trasmittanza termica misurata è pari a 6,1 W/m²K, mentre il valore limite normativo (Urif) è di 2,2 W/m²K, con un potenziale teorico di miglioramento della trasmittanza (ΔU%) del 65%. Considerando un grado di trasformabilità elevato (X_int = 1), una superficie ridotta rispetto all'involucro (X_sup = 0,4) e un'esposizione prevalente verso nord, con fattore correttivo X_esp = 0,2, il potenziale corretto di riduzione della trasmittanza complessiva dell'edificio (Pcorr) si attesta tra lo 0% e il 10%. Questo indica che, nonostante il margine teorico di miglioramento significativo e la possibilità di intervento completa, il contributo reale di questo infisso alla riduzione del fabbisogno energetico globale è piuttosto limitato, principalmente a causa della sua modesta estensione e dell'esposizione poco favorevole.

- **Ine03a**

Per l'infisso di tipo Ine_03a, la trasmittanza termica rilevata è pari a 2,0 W/m²K, superiore al valore limite normativo (Urif) di 2,4 W/m²K, con un potenziale teorico di miglioramento negativo pari al -20%, indicante una prestazione già conforme o migliore rispetto ai requisiti normativi. Il grado di trasformabilità è classificato come nullo (X_int = 0,2) a causa di vincoli conservativi sull'elemento. Considerando una superficie contenuta (X_sup = 0,2) e un'esposizione verso nord (X_esp = 0,2), il potenziale corretto di riduzione della trasmittanza complessiva risulta tra 0% e 10%. Di conseguenza, questo elemento non rappresenta un ambito significativo per interventi di miglioramento energetico, sia per le sue buone prestazioni termiche sia per i vincoli di tutela che ne limitano l'intervento.

| INDICATORI PRESTAZIONALI – CHIUSURE TRASPARENTI | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **ELEMENTO** | **TRASMITTANZA** | | | **FATTORI DI CORREZIONE** | | | | | | | **RISULTATI** | |
| | | | | Possibilità di intervento | | | Superficie finestrata | | Esposizione | | | |
| Codice tipologia | Trasmittanza termica U ($W/m^2K$) | Trasmittanza termica di riferimento $U_{rif}$ ($W/m^2K$) | ΔU% *(% di scostamento di U rispetto a normativa)* Trasmittanza termica U ($W/m^2K$) | Grado di trasformabilità | Fattore di correzione $X_{int}$ * | $P_{elem}$ *(% di miglioramento in base a $X_{int}$)* | Superficie finestrata rispetto all'involucro (%) | Fattore di correzione $X_{sup}$ ** | Esposizione prevalente | Fattore di correzione $X_{esp}$ ** | $P_{corr}$ CONTRIBUTO PONDERATO CHE L'ELEMENTO DÀ AL MIGLIORAMENTO COMPLESSIVO DELL'INVOLUCRO | |
| Ine_01a | 5,9 | 2,2 | 62% | Molto alto *(intervento completo)* | 1 | 62% | 0 / 5% | 0.2 | Sud-est, Sud-ovest | 0.8 | 0/10% | Nessuno |
| Ine_02a | 6,3 | 2,2 | 65% | Molto alto *(intervento completo)* | 1 | 65% | 25 / 40% | 0.8 | Sud-est, Sud-ovest | 0.8 | 36/50 % | Alto |
| Ine_02d | 6,1 | 2,2 | 65% | Molto alto *(intervento completo)* | 1 | 65% | 5 / 15% | 0.4 | Nord | 0.2 | 0/10% | Nessuno |
| Ine_03a | 2 | 2,4 | -20% | Nessuno *(elemento vincolato)* | 0.2 | 4% | 0 / 5% | 0.2 | Nord | 0.2 | 0/10% | Nessuno |

*Tabella 115. La tabella mostra la trasmittanza termica e i fattori di correzione relativi a interventi su chiusure trasparenti, considerando la possibilità di intervento, la superficie finestrata e l'esposizione, per valutare il contributo di ogni elemento al miglioramento energetico dell'involucro.*

| Grado di trasformabilità | Fattore di riduzione $X_{int}$ | Descrizione |
|---|---|---|
| Alto | 0.8 | Intervento significativo ma con alcune limitazioni conservativo-compatibili; la maggior parte delle azioni migliorative è però realizzabile. |
| Nessuno | 0.2 | Pura conservazione. Nessun intervento di miglioramento prestazionale ammesso se non soluzioni minime e reversibili (es. schermature interne). |

*Tabella 116. La tabella illustra i diversi livelli di trasformabilità degli elementi edilizi, associati a un fattore di riduzione (Xint) che indica la possibilità di intervento e il potenziale di miglioramento prestazionale, da "molto alto" (interventi liberi e massimi miglioramenti) a "nessuno" (solo conservazione e interventi minimi reversibili).*

### 1.4.3 Matrice di efficacia energetico-patrimoniale

La definizione di efficacia degli interventi di efficientamento energetico negli edifici storici si fonda sull'equilibrio tra due fattori principali: il potenziale di risparmio energetico associato alla misura proposta e il grado di trasformabilità dell'elemento edilizio interessato, direttamente correlato alla sua valenza storico-architettonica.
La efficacia ideale si verifica quando il potenziale di risparmio energetico è elevato e la valenza storico-artistica dell'elemento è ridotta o nulla, poiché in tali casi il grado di trasformabilità è alto o molto alto e l'intervento consente un significativo miglioramento prestazionale senza compromettere i valori patrimoniali del bene. Al contrario, quando la valenza storica è molto alta, il grado di trasformabilità risulta minimo e gli interventi dovranno limitarsi a soluzioni conservative o reversibili, privilegiando strategie di controllo passivo e di riduzione dei fabbisogni piuttosto che modifiche dirette delle strutture o dei materiali.
La matrice che segue (Tabella 117) consente di visualizzare, attraverso l'incrocio dei due parametri, le condizioni di maggiore o minore efficacia, supportando le scelte progettuali verso un equilibrio coerente tra efficienza energetica e tutela del patrimonio.

*Chiusure trasparenti verticali*

Nell'applicazione pratica ai quattro infissi analizzati, emergono risultati coerenti con questa logica. L'infisso Ine_02a, caratterizzato da un potenziale corretto di miglioramento energetico (Pcorr) elevato e da una valenza storica bassa, si colloca nella fascia di efficacia molto alta secondo la matrice di efficacia degli interventi di efficientamento energetico, indicando un'opportunità concreta per interventi significativi senza compromettere il valore patrimoniale.
Al contrario, gli infissi Ine_01a e Ine_02d, pur avendo valenza storica bassa, mostrano un potenziale corretto di miglioramento praticamente nullo, risultando quindi nell'area di efficacia "nessuna" nella matrice, suggerendo che interventi energetici diretti su questi elementi sarebbero poco efficaci o rilevanti.
Infine, l'infisso Ine_03a, che presenta una valenza storica molto alta e un potenziale corretto di miglioramento anch'esso nullo, si colloca anch'esso nella fascia "nessuna" di efficacia, confermando che in presenza di elevati vincoli storico-architettonici e prestazioni già adeguate, le strategie di efficientamento devono puntare su interventi conservativi o di controllo passivo piuttosto che su modifiche strutturali.

| MATRICE DI EFFICACIA DEGLI INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO (E) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **$P_{corr}$ → Valenza storica. ↓** | **Molto alto** | **Alto** | **Medio** | **Basso** | **Nessuno** |
| **Molto alta** *(grado di trasformabilità nullo)* | Bassa | Nessuna | Nessuna | Nessuna | **Ine_03a Nessuna** |
| **Alta** *(grado di trasformabilità storica basso)* | Bassa | Bassa | Nessuna | Nessuna | Nessuna |
| **Media** *(grado di trasformabilità medio)* | Media | Media | Bassa | Nessuna | Nessuna |
| **Bassa** *(grado di trasformabilità alto)* | Molto alta | Alta | Media | Bassa | Nessuna |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Nulla** *(grado di trasformabilità molto alto)* | Molto alta | **Ine_02a** **Molto alta** | Alta | Media | **Ine_01a** **Ine_02d** **Nessuna** |

*Tabella 117. La matrice combina il potenziale miglioramento prestazionale con la valenza storica degli elementi.*

| MATRICE DI COMPATIBILITA' - ELEMENTO | | |
|---|---|---|
| **RISULTATI** | | |
| Elemento | Efficacia (E) | Note |
| Ine_02a | Molto alta | Intervento fortemente raccomandato: garantisce un elevato potenziale di risparmio energetico e riguarda elementi non tutelati o privi di valore storico. |
| Ine_01a<br>Ine_03a<br>Ine_02d | Nessuna | Intervento non giustificato: valore storico molto elevato o assenza di reale beneficio energetico. Ogni modifica comporterebbe un impatto incompatibile o privo di motivazione. |

*Tabella 118. Esempio di applicazione operativa dello strumento di valutazione: l'efficacia dell'intervento è determinata dall'incrocio tra potenziale di risparmio energetico e livello di tutela dell'elemento.*

### 1.4.4 La scelta degli interventi

A partire dagli esiti della Tabella 115 sulla efficacia energetico-patrimoniale, è stato possibile definire un sistema di indirizzamento che orienta la scelta tra differenti livelli di intervento, graduati in base al loro impatto energetico e conservativo. Questo passaggio costituisce il punto di raccordo tra la fase valutativa e la fase operativa, traducendo i risultati della matrice in linee di azione concrete e proporzionate. L'obiettivo è individuare un insieme di strategie d'intervento progressive, che spaziano da operazioni puramente conservative a soluzioni combinanti obiettivi energetici e di tutela, nel rispetto dei criteri di reversibilità e efficacia materica.
Per garantire un'applicazione mirata del metodo, sono state elaborate specifiche tabelle di indirizzamento per ciascun elemento dell'involucro edilizio — di seguito si riporta la tabella relativa agli interventi sulle chiusure trasparenti (Tabella 119) con l'evidenziazione degli indirizzi più appropriati in relazione ai quattro infissi analizzati nel caso studio.

Per l'infisso **Ine_02a**, che presenta un potenziale corretto di miglioramento energetico elevato e una valenza storica bassa, è consigliabile la sostituzione completa con un serramento moderno ad alte prestazioni, in quanto ciò permette un significativo miglioramento energetico senza compromettere il valore patrimoniale.
Per gli infissi **Ine_01a** e **Ine_02d**, nonostante la valenza storica bassa, il potenziale corretto di miglioramento energetico risulta nullo principalmente perché questi elementi rappresentano una parte molto ridotta rispetto alla superficie complessiva dell'involucro e sono situati in posizioni di scarsa esposizione solare, poco utili ai fini energetici. Di conseguenza, rientrano nella fascia di efficacia "nulla", e pertanto gli interventi energetici su questi elementi risultano non prioritari.
Infine, l'infisso **Ine_03a** presenta una valenza storica molto alta e un potenziale energetico nullo; pertanto, gli interventi devono essere esclusivamente di tipo conservativo. In questi casi si privilegia la pura conservazione e il monitoraggio continuo, senza alcun intervento energetico diretto. Sono pertanto consigliate esclusivamente attività di manutenzione ordinaria e controllo periodico, eventualmente integrate da schermature esterne o interne di tipo non invasivo, così da garantire il pieno rispetto dei vincoli conservativi e la salvaguardia del valore storico-architettonico.

| SCELTA DELL'INTERVENTO - CHIUSURE TRASPARENTI | | | |
|---|---|---|---|
| **Elemento** | **Efficacia** | **Obiettivo** | **Possibili interventi** |
| Ine_02a | Molto alta | Recupero funzionale e miglioramento energetico congiunto. | Sostituzione dell'intero infisso con un serramento moderno a elevate prestazioni, in assenza di valore storico. |
| Ine_01a<br>Ine_03a<br>Ine_02d | Nulla | Pura conservazione e monitoraggio. | Nessun intervento energetico.<br>Manutenzione e controllo periodico; |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | | eventuali schermature esterne o interne non invasive. |

*Tabella 119. Possibili interventi sugli infissi in funzione della classe di efficacia.*

### 1.4.5 Indicatori dello stato di conservazione dell'elemento

La valutazione dello stato di conservazione degli elementi edilizi è stata condotta attraverso un processo articolato su tre livelli di approfondimento, finalizzato a restituire una lettura sintetica ma oggettiva del quadro patologico e delle condizioni funzionali del manufatto.

*Dettaglio delle patologie degli elementi trasparenti verticali*

La Tabella 1201 riporta il dettaglio analitico delle patologie riscontrate sugli infissi, suddivise per categorie specifiche di danno, quali ad esempio degradi di origine antropica e vandalismi. Per ciascuna categoria sono stati valutati quattro parametri principali:

- Diffusione del danno (%): tutti gli infissi presentano un'estensione del danno compresa tra il 0 e il 10%, quindi limitata;
- Progressione del danno: il fenomeno risulta stabile, senza evidenze di peggioramento in atto;
- Causa del danno: le criticità sono imputabili principalmente a mancata o scarsa manutenzione, senza interventi di ripristino recenti;
- Gravità del danno: la severità riscontrata è minima o assente, con effetti contenuti sia sul piano strutturale che funzionale.

La somma dei punteggi attribuiti a ciascun parametro ha quindi restituito per tutti gli infissi un totale parziale uniforme, corrispondente a un livello di criticità basso. In termini complessivi, il quadro conservativo degli infissi Ine_01a, Ine_02a, Ine_02d e Ine_03a risulta quindi sostanzialmente integro, senza segnali di compromissioni significative che richiedano interventi urgenti.

| DETTAGLIO ANALITICO DELLE PATOLOGIE | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Elemento** | **Categoria di danno specifica** | | **Diffusione del danno (%)** | | **Progressione del danno** | | **Causa del danno** | | **Gravità del danno** | | **Totale patologie** |
| Ine_01a<br>Ine_02a<br>Ine_03a<br>Ine_02d | Degradi di origine antropica / vandalismi | 2 | Da 0 al 10% | 0 | No | 0 | Mancata/scarsa manutenzione | 2 | Nessuna | 0 | **4** |

*Tabella 121. La tabella riporta il dettaglio analitico delle principali categorie di danno rilevate. Tale valore contribuisce alla definizione dello stato di conservazione complessivo dell'elemento e alla conseguente urgenza dell'intervento.*

*Macro valutazione degli elementi trasparenti verticali*

La Tabella 122 fornisce una valutazione sintetica a scala di singolo elemento, integrando le informazioni derivanti dall'analisi patologica condotta sugli infissi. La macro valutazione prende in considerazione la condizione complessiva di ciascun infisso rispetto a tre fattori principali:

- **Lacuna o assenza**: presenza di mancanze o perdite significative del materiale o della funzione.
- **Inefficienza funzionale e/o meccanica**: perdita parziale o totale della capacità strutturale, protettiva o d'uso.
- **Componenti**: grado di compromissione generale o rischio di perdita dell'elemento.

Nel caso degli infissi Ine_01a, Ine_02a, Ine_02d e Ine_03a, la valutazione evidenzia la presenza di fenomeni di degrado di lieve entità, associati a un punteggio di 10, senza lacune o assenze significative e con inefficienza funzionale o meccanica assente. Il totale della macro valutazione per ciascuno di questi elementi risulta quindi pari a 20, indicando una condizione parziale di degrado contenuta e gestibile mediante interventi di manutenzione ordinaria.

| MACROVALUTAZIONE | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Elemento** | **Componenti** *(più opzioni selezionabili)* | **Lacuna / assenza** | **Ineff. funzionale e/o meccanica** | **Totale macro valutazione** |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ine_01a<br>Ine_02a<br>Ine_03a<br>Ine_02d | Fenomeni di umidità e/o degrado di lieve entità | 10 | No | 0 | Parziale | 10 | **20** |

*Tabella 122. La tabella riporta una valutazione sintetica delle condizioni complessive dell'elemento edilizio. Il punteggio ottenuto, sommato a quello derivante dall'analisi delle patologie, concorre alla determinazione dello stato di conservazione complessivo.*

### *Classi stato di conservazione*

Il punteggio complessivo, pari a 24, ottenuto dalla somma del totale derivante dall'analisi dettagliata delle patologie e del punteggio risultante dalla macrovalutazione viene poi interpretato attraverso una scala di classificazione per range, che suddivide i risultati in cinque classi di stato di conservazione. Queste classi descrivono il passaggio progressivo da una condizione di elemento non compromesso, privo di criticità significative, fino a uno stato di grave compromissione, caratterizzato da patologie diffuse e da un elevato rischio strutturale o di perdita materiale.
Tale classificazione consente di disporre di uno strumento comparabile e oggettivo per individuare le priorità d'intervento e orientare le scelte di conservazione e manutenzione (Tabella 124).

| STATO DI CONSERVAZIONE E URGENZA DELL'INTERVENTO | | | | |
|---|---|---|---|---|
| **Classe** | **Range** | **% sul totale** | **Note** | **Urgenza intervento (U)** |
| Non compromesso / Ottimo | 0 - 34 | 0 - 15% | Quadro conservativo buono; patologie assenti o lievi. L'intervento non è necessario. | Urgenza nulla (U = 1) |

*Tabella 123. La tabella riporta la classificazione dello stato di conservazione degli infissi analizzati.*

## 1.4.6 Priorità degli interventi

La Tabella 125 sintetizza i risultati del processo di correlazione tra il livello di urgenza (U), derivato dalla valutazione dello stato di conservazione degli infissi, e il grado di efficacia (E), ottenuto dalla matrice energetico-patrimoniale. Nel caso applicativo considerato, tutti gli infissi presentano un livello di urgenza nullo (U = 1), indicando assenza di necessità di interventi conservativi urgenti.
Per quanto riguarda il grado di efficacia, l'infisso Ine_02a si distingue con un valore "molto alto", per il quale è fortemente raccomandato un intervento migliorativo. Questo intervento garantisce un elevato potenziale di risparmio energetico e riguarda un elemento privo di vincoli di tutela o valore storico, pertanto è ammissibile e vantaggioso dal punto di vista energetico. Sebbene non vi sia urgenza conservativa, l'intervento può essere pianificato e realizzato nel medio-lungo periodo.
Gli altri infissi (Ine_01a, Ine_02d e Ine_03a), presentando un'efficacia nulla, non giustificano alcun intervento energetico. In particolare, Ine_03a è caratterizzato da una valenza storico-architettonica molto elevata e uno stato conservativo buono, mentre Ine_01a e Ine_02d mostrano un beneficio energetico trascurabile. Per questi elementi si raccomanda esclusivamente la conservazione dello stato attuale e il monitoraggio periodico, evitando interventi che potrebbero compromettere il valore storico o risultare non efficaci dal punto di vista energetico.
Questo approccio integrato consente di orientare la pianificazione degli interventi in modo equilibrato, bilanciando le esigenze di tutela con gli obiettivi di efficientamento energetico, e definendo priorità e modalità d'intervento coerenti con le caratteristiche specifiche di ciascun elemento.

| PRIORITA' DEGLI INTERVENTI | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Stato di conservazione e urgenza intervento | | Efficacia energetico-patrimoniale | | Tipo di intervento | Descrizione |
| U=1 *Urgenza nulla* | Elemento non compromesso / in ottime condizioni | E = 4-5 *efficacia alta o molto alta* | Intervento fortemente raccomandato: garantisce un elevato potenziale di risparmio energetico e | Migliorativo programmabile | Intervento energetico ammissibile e fortemente vantaggioso, ma senza urgenza conservativa. Può essere pianificato nel medio-lungo periodo. |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | riguarda elementi non tutelati o privi di valore storico. | | |
| | | E = 1<br>*efficacia nulla* | Intervento non giustificato: valore storico molto elevato o assenza di reale beneficio energetico. | Nessuna azione | L'elemento è in buono stato e presenta alta valenza storico-architettonica. Non si giustifica alcun intervento energetico; si raccomanda solo la conservazione dello stato attuale e il monitoraggio periodico. |

*Tabella 124. La tabella riassume le strategie d'intervento derivate dall'incrocio tra urgenza (U) e efficacia energetico-patrimoniale (E).*

## 1.5 GLI INTERVENTI MIGLIORATIVI

Gli esiti delle valutazioni preliminari sul valore storico-architettonico, sulle prestazioni termiche e sullo stato di conservazione degli elementi costruttivi hanno fornito un quadro chiaro e articolato per l'indirizzamento degli interventi di riqualificazione energetica della Palazzina Comando. In particolare, l'analisi approfondita di quattro tipologie rappresentative di infissi — selezionate come casi esemplificativi per illustrare l'applicazione del metodo di valutazione integrata — ha permesso di definire criteri di priorità e modalità di intervento coerenti con il valore patrimoniale e il potenziale di miglioramento energetico. Tuttavia, la stessa metodologia è stata estesa a tutte le altre tipologie di infissi presenti nell'edificio, nonché ad ulteriori componenti dell'involucro edilizio, al fine di assicurare una valutazione complessiva e omogenea. Questo approccio ha consentito di identificare con precisione le soluzioni più adeguate, calibrando gli interventi in funzione del grado di trasformabilità, del valore storico, della condizione conservativa e dell'efficacia energetica di ciascun elemento.
I risultati di questa fase valutativa hanno quindi guidato la scelta degli interventi migliorativi, orientando l'attenzione verso soluzioni a basso impatto conservativo ma capaci di garantire un miglioramento significativo delle prestazioni energetiche. Tra queste, si segnalano in primo luogo la sostituzione dei serramenti esistenti con modelli più performanti, dotati di doppi vetri e profili a taglio termico, e la coibentazione delle chiusure orizzontali di copertura, scelte che rispettano il carattere architettonico dell'edificio senza ricorrere a interventi invasivi come l'applicazione di cappotti termici esterni, vietati dai vincoli storici.
Successivamente, l'attenzione si è spostata sugli impianti termici, valutando la possibilità di sostituire la caldaia tradizionale centralizzata con un sistema a pompe di calore, dimensionato in base ai fabbisogni energetici stimati.
Infine, al termine della definizione degli scenari di intervento, gli stessi descrittori tecnico-prestazionali e impiantistici utilizzati nelle fasi di analisi sono stati applicati allo stato di progetto, permettendo una verifica quantitativa dei miglioramenti ottenuti e un confronto diretto con i valori iniziali. In questo modo, il metodo ha assunto anche la funzione di strumento di monitoraggio e controllo, assicurando coerenza e rigore metodologico nel processo di riqualificazione.

### 1.5.1 Il miglioramento prestazionale dell'involucro

#### *1.5.1.1 Intervento 1: Sostituzione degli infissi*

Il primo intervento, finalizzato al miglioramento della classe energetica dell'edificio, ha riguardato l'isolamento delle superfici trasparenti. Nella Palazzina Comando sono infatti presenti infissi obsoleti con vetri singoli, privi di qualsiasi capacità termoisolante e non conformi ai requisiti di sicurezza previsti dalla normativa vigente. Tali serramenti determinano elevate dispersioni termiche, con conseguente incremento dei consumi per il riscaldamento invernale e il raffrescamento estivo.
La scelta di sostituire gli infissi è stata quindi ponderata con particolare attenzione, considerando il ruolo centrale che le superfici finestrate rivestono negli scambi energetici e nel comfort termo–ambientale complessivo dell'edificio.
Le Linee Guida Nazionali per la Certificazione Energetica aggiornate con il D.M. 26/06/2015 definiscono i valori limite di trasmittanza termica da rispettare per ciascuna zona climatica (inclusiva dell'incidenza dei ponti termici). Nel caso in esame, la città di Cagliari ricade in zona climatica C, con un valore limite di 2,20 W/m²K.
Tenendo conto di tale parametro, si è optato per la sostituzione dei serramenti esistenti con infissi ad alte prestazioni, costituiti da telai in alluminio con taglio termico e vetrocamera 4-12-4. Per incrementarne ulteriormente le prestazioni, la cavità interna è stata riempita con gas krypton e i vetri sono stati dotati di rivestimento basso emissivo, che riduce le dispersioni senza penalizzare l'ingresso della luce naturale.

Il confronto tra lo stato di fatto e la soluzione di progetto evidenzia un notevole miglioramento dell'indice di trasmittanza termica (U), parametro che misura la capacità della finestra di trattenere il calore all'interno durante l'inverno e di limitarne l'ingresso nei mesi estivi.

*Stratigrafie delle chiusure trasparenti e relativi descrittori*

***Ine_05a*** *– Finestra a doppia anta con sopraluce; dimensioni 2,30 × 1,20 m.*

Nello scenario di progetto, l'infisso Ine_05a (Fig. 133), modellato in Termus e caratterizzato da parametri nettamente più performanti (vetrocamera con gas Krypton, telaio in legno con taglio termico, Ug = 1,3 W/m²K, Uf = 1,6 W/m²K), sostituisce gli infissi esistenti Ine_02a e Ine_04a.
Questi ultimi, entrambi a doppia anta con sopraluce (dimensioni complessive 2,30 × 1,20 m), presentavano una superficie vetrata in vetro singolo da 4 mm e telai privi di taglio termico: alluminio con Uf = 7,0 W/m²K nel caso di Ine_02a e legno con Uf = 2,2 W/m²K nel caso di Ine_04a. L'oscuramento era garantito da avvolgibili esterni, mentre tende interne in tessuto bianco erano presenti solo in alcuni ambienti.
In seguito alla definizione della nuova tipologia, sono stati aggiornati i descrittori della chiusura trasparente, compilando nuovamente i campi relativi alla stratigrafia, ai materiali, alle superfici e alle prestazioni termo–fisiche (Tabella 125). Il confronto con il nuovo serramento Ine_05a mette in evidenza un salto prestazionale significativo, con una sensibile riduzione delle dispersioni termiche e un miglioramento complessivo del comfort ambientale.

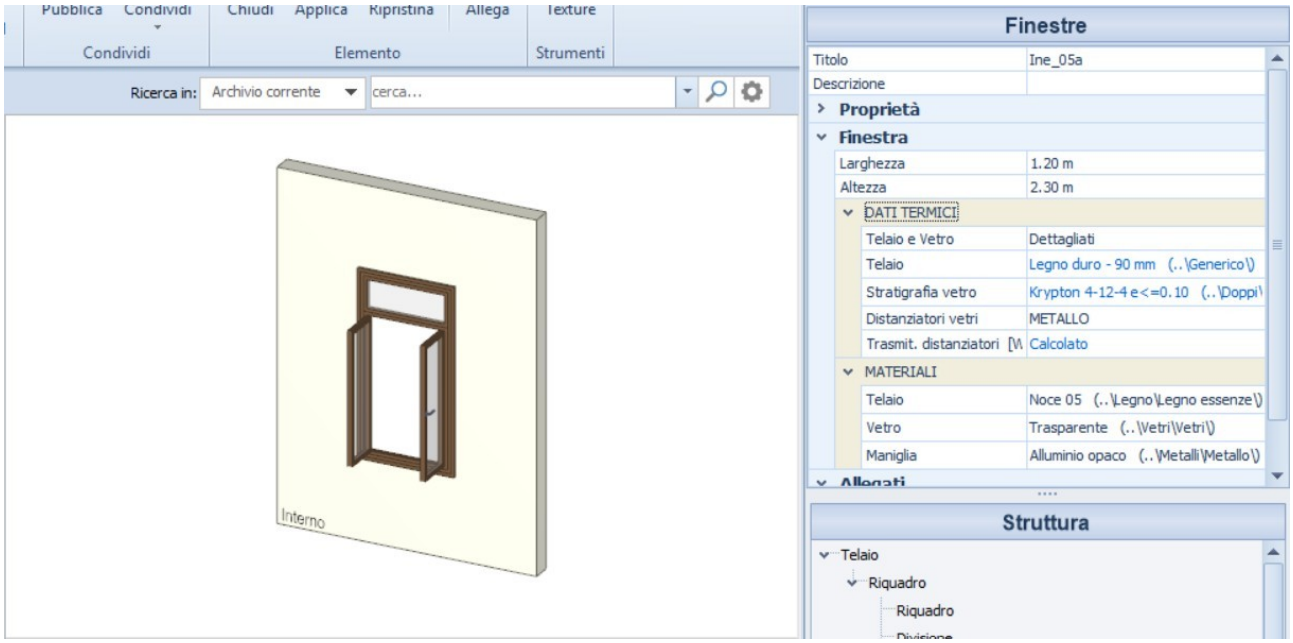


*Fig. 133. Definizione della finestra Ine_05a all'interno di Termus.*

Per la stratigrafia dell'infisso Ine_05a è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| **DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO** | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Ine_05a* | - |
| *Esposizione* | - | - |
| *Lunghezza* | *1,20* | *m* |
| *Altezza* | *2,30* | *m* |
| *Perimetro vetro* | *10,42* | *m* |
| *Area vetro* | *1,58* | *m²* |
| *Area telaio* | *1,84* | *m²* |
| *Superficie infisso* | *2,76* | *m²* |
| *Chiusure oscuranti interne* | *Tende, avvolgibili* | - |
| *Schermature solari esterne* | *Non presenti* | - |

| | | |
|---|---|---|
| *Dimensioni sottofinestra* | *1,56 (L); 1,00 (H)* | *m* |
| *Dimensioni cassonetto* | - | - |
| *Stratigrafia cassonetto* | - | - |
| *Trasmittanza termica intero infisso (Uw)* | *1,65* | *W/m²K* |
| *Tipo vetro* | *Vetro doppio* | - |
| *Spessore del vetro* | *4* | *mm* |
| *Spessore intercapedine* | *12* | *mm* |
| *Gas intercapedine* | *Krypton* | - |
| *Fattore solare (g)* | *0,67* | - |
| *Trasmittanza termica vetro (Ug)* | *1,30* | *W/m²K* |
| *Materiale telaio* | *Legno* | - |
| *Taglio termico* | *No* | - |
| *Spessore telaio* | *90* | *mm* |
| *Trasmittanza termica telaio (Uf)* | *1,60* | *W/m²K* |
| *Tipologia distanziatori* | *Metallo* | - |
| *Trasmittanza distanziatori* | | - |

*Tabella 125. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente Ine_05a.*

### Ine_05c – Finestra ad anta singola; dimensioni 0,60 × 2,30 m.

Nello scenario di progetto, l'infisso Ine_05c (Fig. 134), modellato in Termus e caratterizzato da parametri nettamente più performanti (vetrocamera con gas Krypton, telaio in legno con taglio termico, Ug = 1,3 W/m²K, Uf = 1,6 W/m²K), sostituisce gli infissi esistenti Ine_02c e Ine_04c.
Entrambi a singola anta con sopraluce, presentavano superfici vetrate in vetro singolo da 4 mm e telai privi di taglio termico: alluminio con Uf = 7,0 W/m²K nel caso di Ine_02c (0,74 × 2,30 m, area vetrata 1,54 m²) e legno con Uf = 2,2 W/m²K nel caso di Ine_04c (0,70 × 2,30 m, area vetrata 0,91 m²).
Anche in questo caso, i descrittori della chiusura trasparente sono stati aggiornati per lo stato di progetto, così da documentare puntualmente il salto prestazionale (Tabella 126). Il confronto con il nuovo serramento Ine_05c evidenzia un notevole miglioramento prestazionale, con una marcata riduzione delle dispersioni energetiche e un incremento della qualità termo–igrometrica degli ambienti interni.

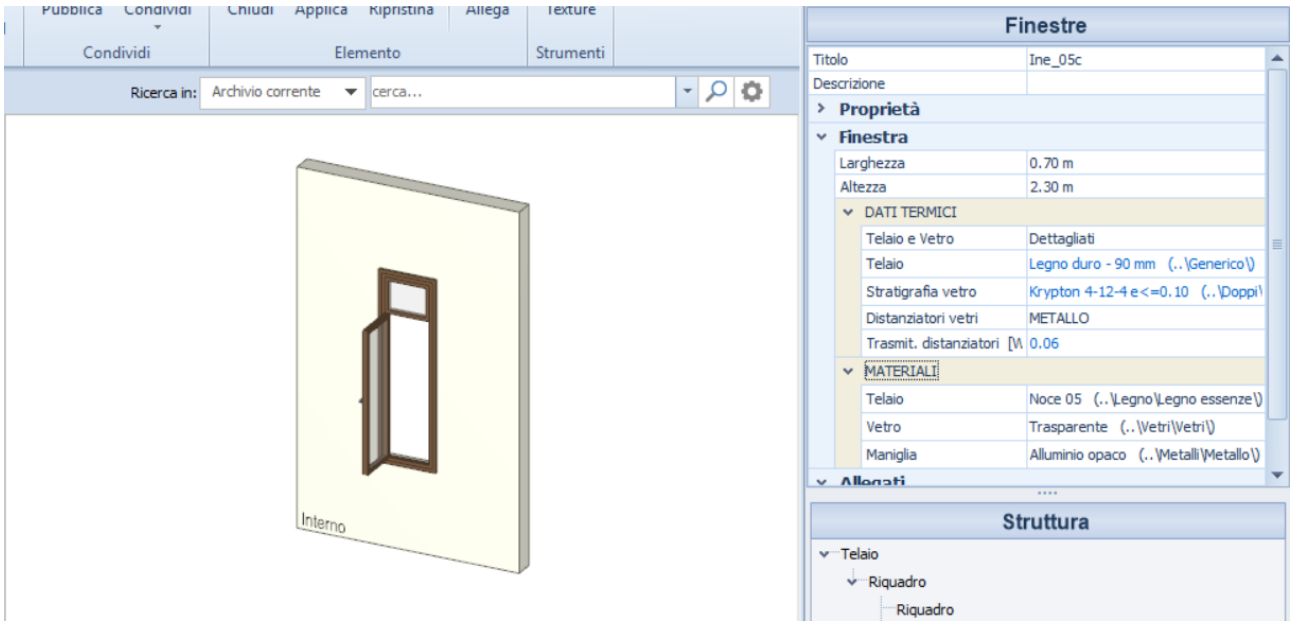



*Fig. 134. Definizione della finestra Ine_05c all'interno di Termus.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Ine_05c* | *-* |
| *Esposizione* | *-* | *-* |
| *Lunghezza* | *0,70* | *m* |
| *Altezza* | *2,30* | *m* |
| *Perimetro vetro* | *5,80* | *m* |
| *Area vetro* | *0,91* | *$m^2$* |
| *Area telaio* | *0,69* | *$m^2$* |
| *Superficie infisso* | *1,61* | *$m^2$* |
| *Chiusure oscuranti interne* | *Tende, avvolgibili* | *-* |
| *Schermature solari esterne* | *Non presenti* | *-* |
| *Dimensioni sottofinestra* | *1,00 (L); 1,30 (H)* | *m* |
| *Dimensioni cassonetto* | *-* | *-* |
| *Stratigrafia cassonetto* | *-* | *-* |
| *Trasmittanza termica intero infisso (Uw)* | *1,64* | *$W/m^2K$* |
| *Tipo vetro* | *Vetro doppio* | *-* |
| *Spessore del vetro* | *4* | *mm* |
| *Spessore intercapedine* | *12* | *mm* |
| *Gas intercapedine* | *Krypton* | *-* |
| *Fattore solare (g)* | *0,67* | *-* |
| *Trasmittanza termica vetro (Ug)* | *1,30* | *$W/m^2K$* |
| *Materiale telaio* | *Legno* | *-* |
| *Taglio termico* | *No* | *-* |
| *Spessore telaio* | *90* | *mm* |
| *Trasmittanza termica telaio (Uf)* | *1,60* | *$W/m^2K$* |
| *Tipologia distanziatori* | *Metallo* | *-* |
| *Trasmittanza distanziatori* | | *$W/m^2K$* |

*Tabella 126. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente Ine_05c.*

Nella Palazzina Comando, gli infissi esistenti Ine_02d (quadrupla anta con telaio in alluminio privo di taglio termico) e Ine_04d (quadrupla anta con telaio in legno) presentano entrambi una superficie vetrata in vetro singolo da 4 mm, con prestazioni energetiche molto scarse: Ug = 5,7 W/m²K per il vetro e valori di telaio pari a Uf = 7,0 W/m²K (alluminio) e Uf = 2,2 W/m²K (legno).
Nello scenario di progetto tali serramenti sono stati sostituiti con il nuovo infisso Ine_05d (Fig. 135), modellato in Termus e caratterizzato da vetrocamera con gas Krypton e telaio in legno con taglio termico. Le prestazioni risultano nettamente superiori: Ug = 1,3 W/m²K per il vetro e Uf = 1,6 W/m²K per il telaio.
Anche in questo caso, i descrittori della chiusura trasparente sono stati aggiornati per documentare in maniera puntuale il miglioramento ottenuto (Tabella 127). Il confronto tra lo stato di fatto e lo stato di progetto evidenzia un notevole salto prestazionale, con una drastica riduzione delle dispersioni energetiche e un conseguente miglioramento del comfort termo–igrometrico interno.

**Ine_05d** – Finestra a quadrupla anta. Dimensioni complessive: 2,40 × 2,10 m.

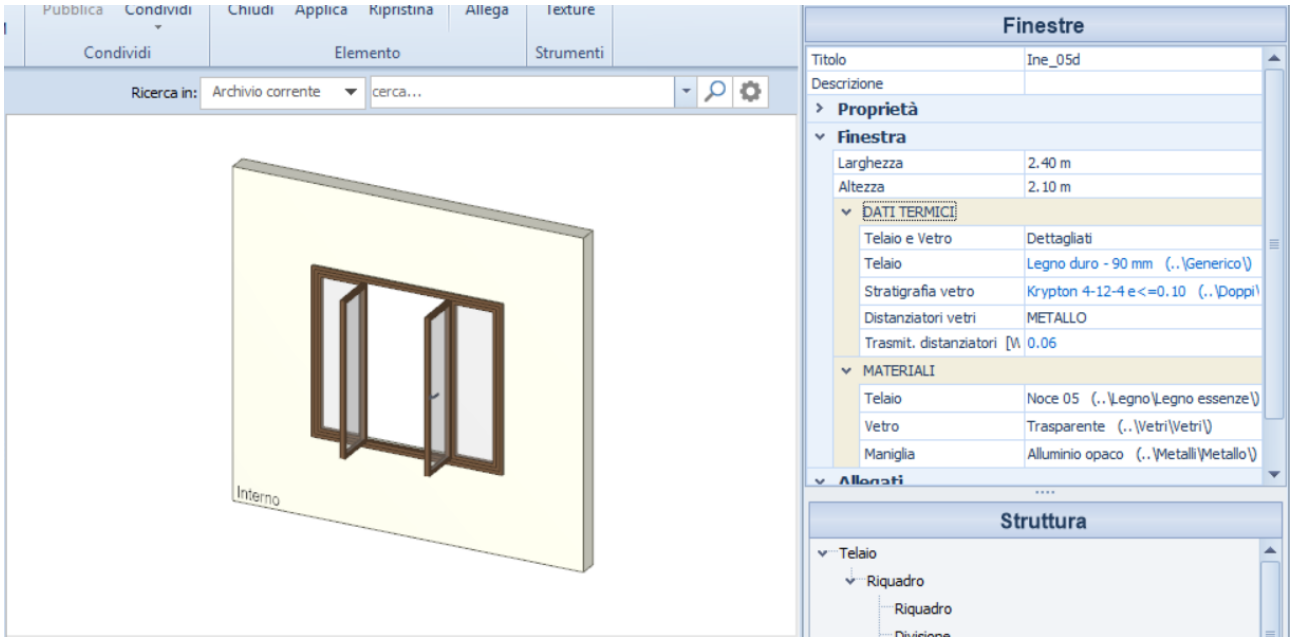


*Fig. 135. Definizione della finestra Ine_05d all'interno di Termus.*

Per la stratigrafia dell'infisso Ine_05d è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| **DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO** | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Ine_05d* | - |
| *Esposizione* | - | - |
| *Lunghezza* | *2,40* | *m* |
| *Altezza* | *2,10* | *m* |
| *Perimetro vetro* | *18,8* | *m* |
| *Area vetro* | *3,69* | *m²* |
| *Area telaio* | *1,48* | *m²* |
| *Superficie infisso* | *5,18* | *m²* |
| *Chiusure oscuranti interne* | *Tende, avvolgibili* | - |

| | | |
|---|---|---|
| *Schermature solari esterne* | *Non presenti* | - |
| *Dimensioni sottofinestra* | *2,76 (L); 1,00 (H)* | *m* |
| *Dimensioni cassonetto* | - | - |
| *Stratigrafia cassonetto* | - | - |
| *Trasmittanza termica intero infisso (Uw)* | *1,60* | *W/m²K* |
| *Tipo vetro* | *Vetro doppio* | - |
| *Spessore del vetro* | *4* | *mm* |
| *Spessore intercapedine* | *12* | *mm* |
| *Gas intercapedine* | *Krypton* | - |
| *Fattore solare (g)* | *0,67* | - |
| *Trasmittanza termica vetro (Ug)* | *1,30* | *W/m²K* |
| *Materiale telaio* | *Legno* | - |
| *Taglio termico* | *No* | - |
| *Spessore telaio* | *90* | *mm* |
| *Trasmittanza termica telaio (Uf)* | *1,60* | *W/m²K* |
| *Tipologia distanziatori* | *Metallo* | - |
| *Trasmittanza distanziatori* | | *W/m²K* |

*Tabella 127. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente Ine_05d.*

### Ine_05e – Finestra ad anta singola; dimensioni 2,30 x 1,20 m.

Nello scenario di progetto, l'infisso Ine_05e (Fig. 136), modellato in Termus e caratterizzato da vetrocamera con gas Krypton e telaio in legno con taglio termico (Ug = 1,3 W/m²K, Uf = 1,6 W/m²K), sostituisce gli infissi esistenti Ine_02e e Ine_04e. L'infisso Ine_02e, con telaio in alluminio privo di taglio termico e vetro singolo da 4 mm (Ug = 5,7 W/m²K; Uf = 7,0 W/m²K), presentava prestazioni energetiche molto ridotte.
L'infisso Ine_04e, invece, è una finestra ad anta singola di dimensioni complessive pari a 2,30 × 1,20 m, con superficie vetrata in vetro singolo da 4 mm e telaio in legno privo di taglio termico (Ug = 5,7 W/m²K; Uf = 2,2 W/m²K). Anche in questo caso, i descrittori della chiusura trasparente sono stati aggiornati per documentare in maniera puntuale il miglioramento ottenuto (Tabella 128). Il confronto con il nuovo serramento Ine_05e mette in evidenza un notevole salto prestazionale, con una significativa riduzione delle dispersioni termiche e un miglioramento complessivo del comfort ambientale.

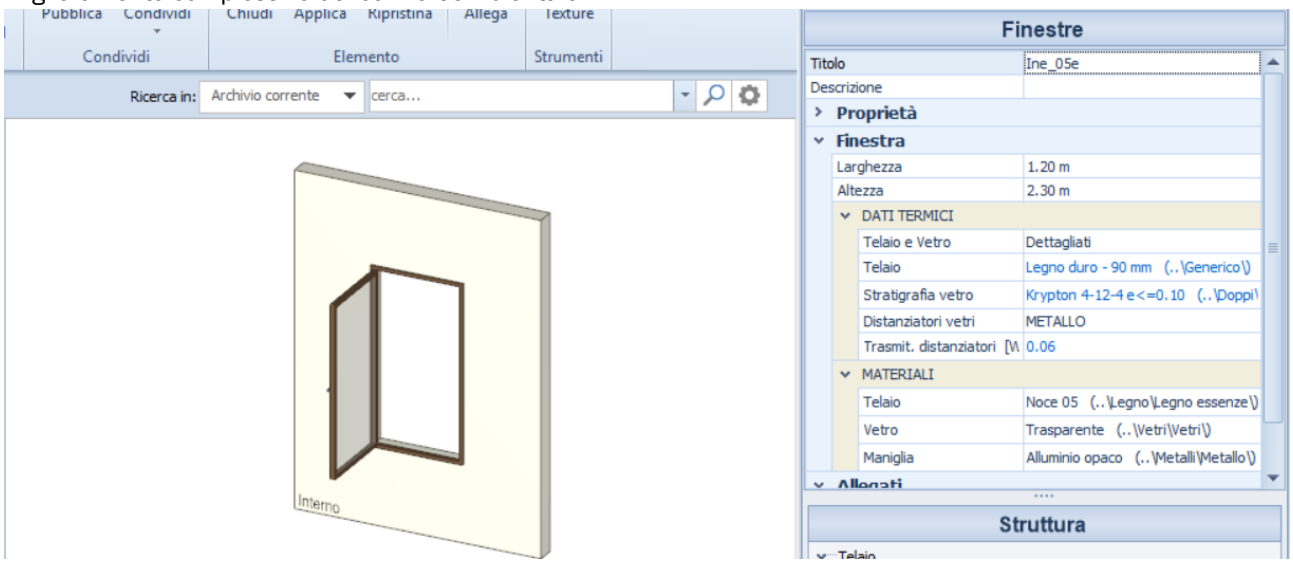



*Fig. 136. Definizione della finestra Ine_05e all'interno di Termus.*

Per la stratigrafia dell'infisso Ine_05e è stato possibile compilare i seguenti descrittori:

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *Ine_05e* | *-* |
| *Esposizione* | *-* | *-* |
| *Lunghezza* | *2,30* | *m* |
| *Altezza* | *1,20* | *m* |
| *Perimetro vetro* | *6,36* | *m* |
| *Area vetro* | *2,22* | *$m^2$* |
| *Area telaio* | *0,53* | *$m^2$* |
| *Superficie infisso* | *2,76* | *$m^2$* |
| *Chiusure oscuranti interne* | *Tende, avvolgibili* | *-* |
| *Schermature solari esterne* | *Non presenti* | *-* |
| *Dimensioni sottofinestra* | *1,56 (L); 1,00 (H)* | *m* |
| *Dimensioni cassonetto* | *-* | *-* |
| *Stratigrafia cassonetto* | *-* | *-* |
| *Trasmittanza termica intero infisso (Uw)* | *1,35* | *$W/m^2K$* |
| *Tipo vetro* | *Vetro doppio* | *-* |
| *Spessore del vetro* | *4* | *mm* |
| *Spessore intercapedine* | *12* | *mm* |
| *Gas intercapedine* | *Krypton* | *-* |
| *Fattore solare (g)* | *0,67* | *-* |
| *Trasmittanza termica vetro (Ug)* | *1,30* | *$W/m^2K$* |
| *Materiale telaio* | *Legno* | *-* |
| *Taglio termico* | *No* | *-* |
| *Spessore telaio* | *90* | *mm* |
| *Trasmittanza termica telaio (Uf)* | *1,60* | *$W/m^2K$* |
| *Tipologia distanziatori* | *Metallo* | *-* |
| *Trasmittanza distanziatori* | | *$W/m^2K$* |

*Tabella 128. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente Ine_05e.*

### *1.5.1.2 Intervento 2: coibentazione delle chiusure orizzontali dell'involucro*

Un ulteriore intervento di riqualificazione ha riguardato l'isolamento della copertura a falde e dei due solai praticabili delle terrazze del secondo piano, elementi particolarmente critici dell'involucro edilizio per le rilevanti dispersioni termiche che generano.
Poiché non è stato possibile intervenire sulle chiusure verticali esterne a causa dei vincoli storico–artistici, l'attenzione si è concentrata esclusivamente sulle strutture opache orizzontali, con l'obiettivo di ridurre le perdite di calore e migliorare il comfort termo–igrometrico degli ambienti interni.
L'intervento è stato progettato in conformità alle Linee Guida Nazionali per la Certificazione Energetica (DM 26/06/2015), che stabiliscono i valori limite di trasmittanza per le strutture opache di copertura verso l'esterno e verso ambienti non riscaldati. Per la zona climatica C, in cui ricade la città di Cagliari, il valore massimo consentito è pari a 0,33 W/m²K.

*Intervento sulle terrazze*

Nel caso delle terrazze praticabili, la stratigrafia di progetto è stata definita in Termus come segue: piastrelle ceramiche da 15 mm, barriera al vapore in bitume da 10 mm, pannello isolante in polistirene estruso (XPS) da 100 mm, massetto ordinario da 60 mm, blocco solaio in laterizio con pignatte da 260 mm e intonaco interno da 15 mm. Il pacchetto così costituito, per uno spessore complessivo di 460 mm, presenta una trasmittanza pari a U = 0,29 W/m²K, ampiamente inferiore al limite normativo, con una resistenza termica complessiva di R = 3,44 m²K/W.
Il pacchetto costruttivo delle terrazze è stato successivamente ridefinito come segue: piastrelle ceramiche da 1,5 cm, barriera al vapore in bitume da 1 cm, pannello isolante in XPS da 10 cm, massetto in calcestruzzo ordinario da 6 cm, solaio in laterocemento con pignatte da 26 cm e intonaco interno da 1,5 cm (Fig. 137). Lo spessore complessivo risulta pari a 46 cm.
Grazie all'inserimento dello strato isolante in XPS, la trasmittanza termica del solaio è stata ridotta in maniera significativa, passando da U = 1,52 W/m²K nello stato di fatto a U = 0,29 W/m²K nello scenario di progetto, rientrando così ampiamente nei limiti previsti dalla normativa per la zona climatica C.
I principali descrittori applicati sono riportati in Tabella 129 che sintetizza le caratteristiche termo–fisiche della nuova stratigrafia del solaio delle terrazze.

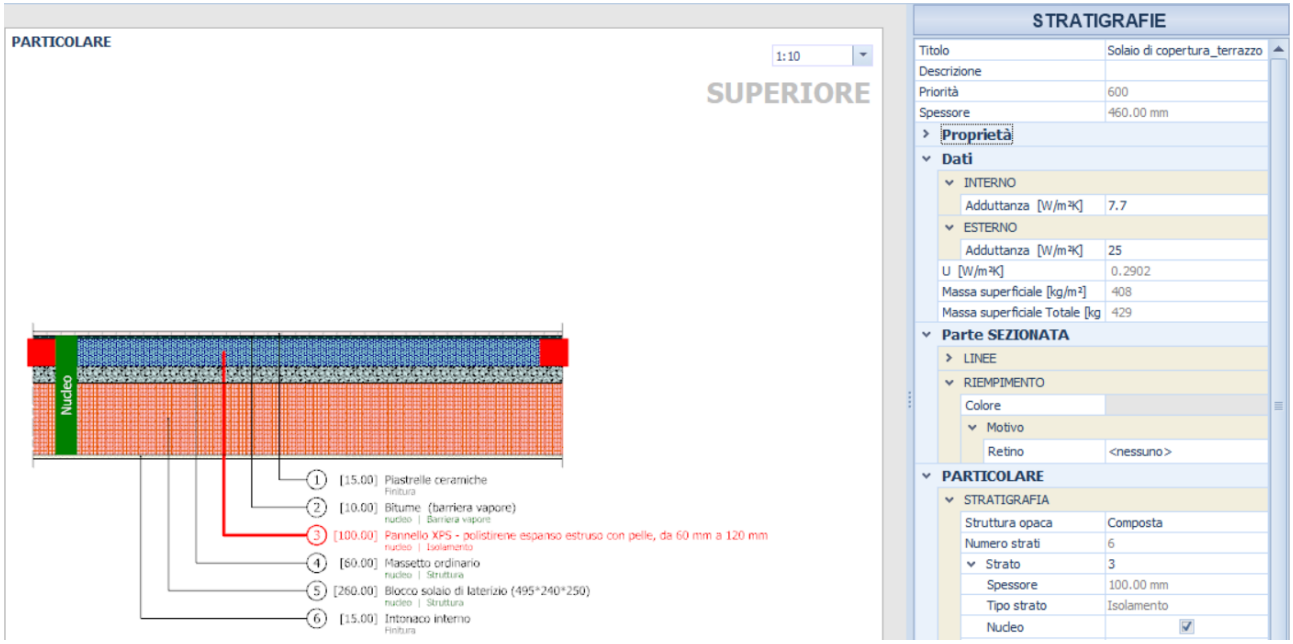


*Fig. 137. Definizione della stratigrafia del solaio di copertura delle terrazze nello scenario di progetto, modellata in Termus.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI | |
| CODICE COMPENDIO | CRV |

| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
|---|---|---|
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *+++* | *-* |
| *Materiale strutturale principale* | *Laterizio* | *-* |
| *Spessore* | *460* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *0,29* | *W/m²K* |
| *Resistenza termica* | *3,33* | *m²K/W* |
| *Conducibilità* | | |
| *Massa superficiale (Ms)* | *408* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *429* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/esterno* | *-* |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,7* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25* | *W/m²K* |

*Tabella 129. Applicazione dei descrittori sulla struttura opaca orizzontale del solaio delle terrazze – scenario di progetto.*

*Intervento sulla copertura*

Nel caso della copertura a falde, lo stato di fatto presenta una stratigrafia composta da piastrelle in porcellana (10 mm), pannello XPS (80 mm), massetto ordinario (20 mm), soletta piana in laterocemento (175 mm) e intonaco interno (20 mm). Il pacchetto, per uno spessore complessivo di 305 mm, mostra una trasmittanza termica pari a U = 1,76 W/m²K, valore che supera ampiamente i limiti normativi previsti per la zona climatica C.
L'intervento migliorativo è stato ipotizzato non sulla copertura inclinata esterna, ma sul solaio del sottotetto, così da ridurre le dispersioni termiche senza alterare la morfologia architettonica del manufatto. La nuova stratigrafia è stata definita come segue: piastrelle ceramiche da 1 mm, pannello isolante in polistirene espanso estruso (XPS) da 8 cm, massetto in calcestruzzo ordinario da 2 cm, solaio in laterocemento da 17 cm e intonaco interno da 2 mm (Fig. 138). Lo spessore complessivo è pari a 30 cm.

Grazie a questo intervento, la trasmittanza termica è stata ridotta in maniera significativa, passando da U = 1,76 W/m²K nello stato di fatto a U = 0,32 W/m²K nello scenario di progetto. Anche in questo caso, i valori ottenuti rispettano i limiti di legge e garantiscono un incremento sostanziale delle prestazioni termo–fisiche dell'involucro.

I principali descrittori della nuova stratigrafia del solaio di copertura sono sintetizzati in Tabella 130.

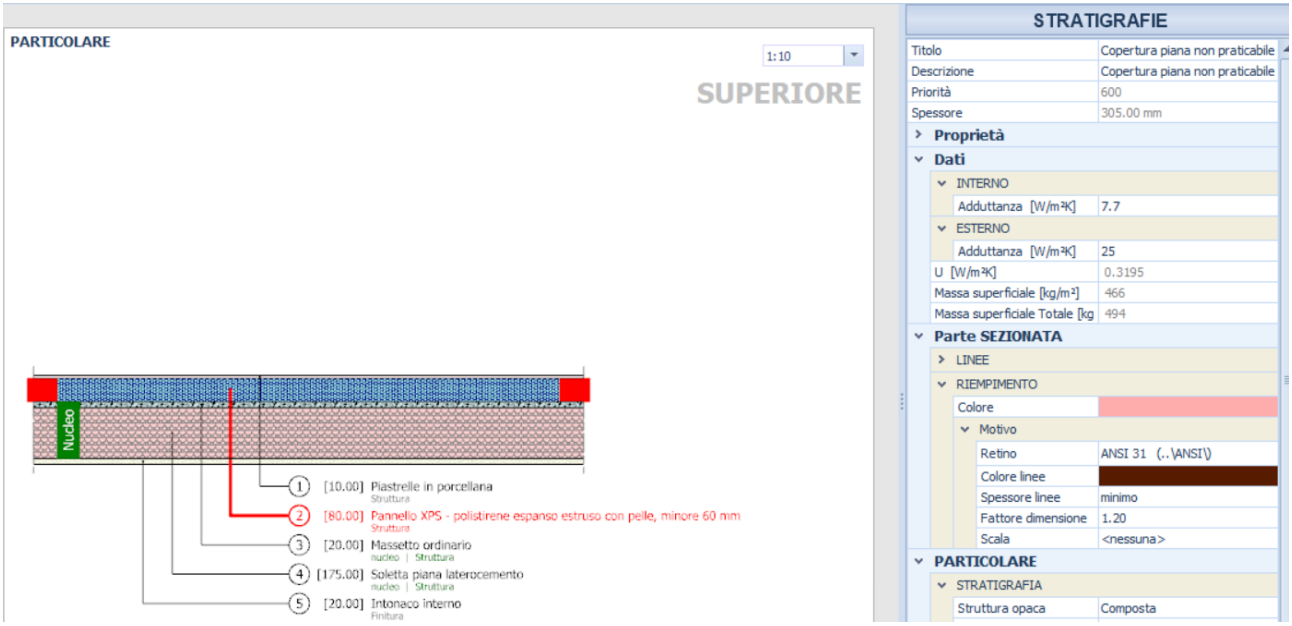



*Fig. 138. Definizione della stratigrafia del solaio di copertura a falde nello scenario di progetto, modellata in Termus.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Stratigrafia* | *+++* | *-* |
| *Materiale strutturale principale* | *Laterizio* | *-* |
| *Spessore* | *300* | *mm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *0,32* | *W/m²K* |
| *Resistenza termica* | *3,12* | *m²K/W* |
| *Conducibilità* | | |
| *Massa superficiale (Ms)* | *466* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *494* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno/esterno* | *-* |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,7* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25* | *W/m²K* |

*Tabella 130. Applicazione dei descrittori sulla struttura opaca orizzontale del solaio di copertura a falde – scenario di progetto.*

In entrambi i casi, l'inserimento di pannelli in polistirene estruso (XPS) si è rivelato determinante: grazie alla struttura a celle chiuse, questo materiale garantisce un'elevata capacità isolante, un'ottima resistenza alla compressione e un'elevata idrorepellenza, risultando particolarmente adatto per coperture e terrazze praticabili. Con spessori medi compresi tra 60 e 100 mm, i pannelli XPS hanno consentito di abbattere le trasmittanze iniziali (U = 1,76 W/m²K per la copertura e U = 2,05 W/m²K per le terrazze) fino a valori inferiori al limite di 0,33 W/m²K imposto dalla normativa. Questo intervento ha determinato non solo un rilevante miglioramento delle prestazioni energetiche dell'edificio, ma anche un incremento del comfort termo–ambientale interno e una significativa riduzione delle dispersioni termiche.

### 1.5.2 L'adeguamento impiantistico

#### *1.5.2.1 Generatore*

L'intervento più semplice e meno invasivo ha riguardato la sostituzione del vecchio impianto di riscaldamento alimentato a gasolio con un nuovo sistema elettrico a pompe di calore reversibili monoblocco, dotate di condensazione ad aria e ventilatori elicoidali. Le caldaie a gasolio, oltre a rappresentare una tipologia ormai obsoleta, sono responsabili di elevate emissioni inquinanti, hanno costi di gestione significativi e rendimenti piuttosto bassi (in zona climatica C intorno al 70%).
Per definire correttamente il nuovo impianto è stato necessario analizzare le caratteristiche e la potenza del generatore esistente, la superficie radiante e la potenza dei caloriferi, nonché la dispersione termica dell'involucro edilizio e la temperatura interna di progetto (20 °C). Sulla base dei fabbisogni calcolati è stato stimato il carico termico complessivo e, aggiungendo un margine del 10% per compensare le perdite di distribuzione, si è proceduto al dimensionamento della nuova macchina.
La scelta è ricaduta su una pompa di calore Rhoss, modello EasyPACK TCAEY-THAEY (Fig. 139), con una capacità di 144 kW in raffrescamento e 151,7 kW in riscaldamento, valori che soddisfano ampiamente i fabbisogni energetici dell'edificio (pari rispettivamente a 36 kW per il raffrescamento e 140 kW per il riscaldamento nello stato di fatto).
L'intervento non incide direttamente sulle dispersioni termiche dell'involucro, poiché non sono state modificate le superfici disperdenti, ma comporta un miglioramento significativo sul piano dell'efficienza energetica, grazie al rendimento più elevato delle pompe di calore rispetto al vecchio generatore a gasolio. Inoltre, l'analisi ha evidenziato come l'impianto preesistente fosse sovradimensionato: la caldaia installata aveva infatti una potenza di 300 kW, superiore di circa il 50% rispetto alla potenza richiesta dall'attuale sistema.

I descrittori associati al nuovo generatore sono riportati in Tabella 131, dove vengono esplicitati i parametri caratteristici: tipologia, potenza, temperatura di mandata e zona servita.

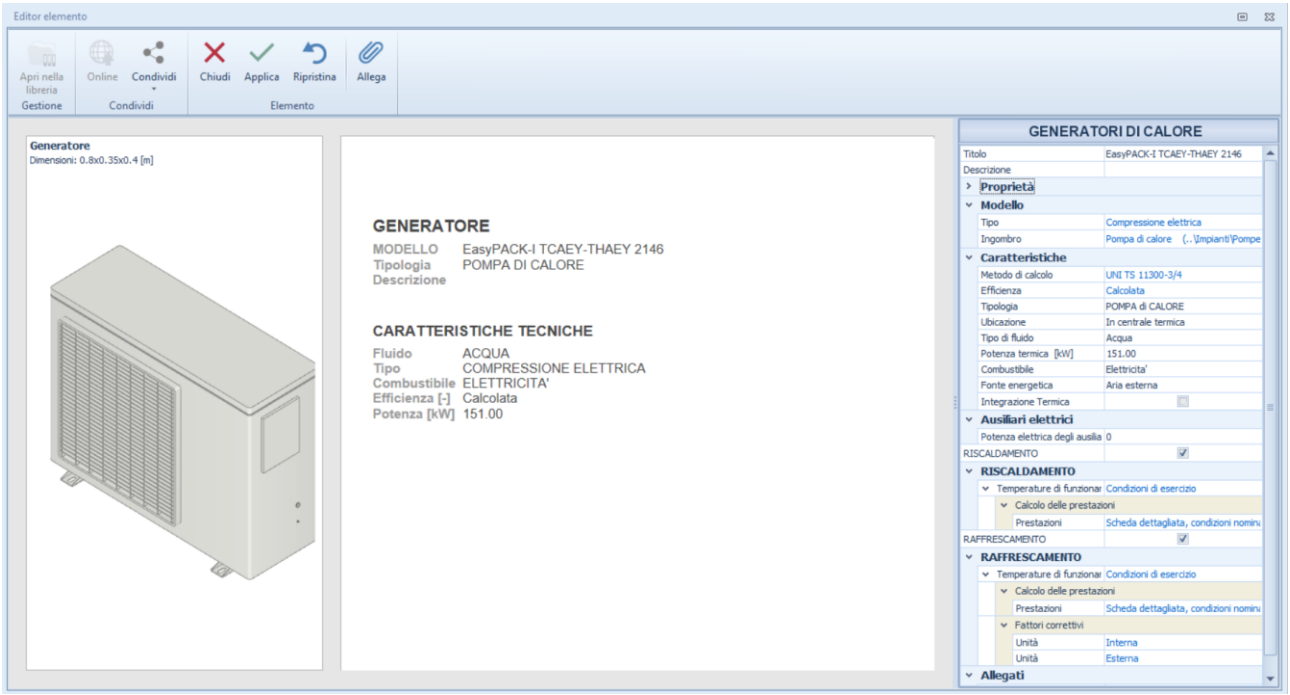


*Fig. 139. Schermata di Termus relativa al generatore di nuovo inserimento corrispondente a pompa di calore ad acqua EasyPACK-I TCAEY-THAEY 2146, con potenza termica di 151 kW ed efficienza calcolata secondo UNI TS 11300.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| GRUPPI TERMICI | |
| GENERATORE | |
| CODICE COMPENDIO | CRV |

| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
|---|---|---|
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia generatore | Pompa di calore aria-acqua EasyPACK-I TCAEY-THAEY 2146 | - |
| Anno di installazione generatore | Sconosciuto | - |
| Potenza termica generatore | 151 | kW |
| Temperatura mandata generatore | 35 | °C |
| Zona di appartenenza | Zona termica E2 – Uffici Palazzina Comando | - |

*Tabella 131. Applicazione dei descrittori ai generatori principali della Palazzina Comando.*

### *1.5.2.2 Sistema di distribuzione e terminali di erogazione*

La distribuzione dell'acqua calda è stata modellata in Termus come impianto centralizzato a montanti non isolati con distribuzione orizzontale nel camminatoio, secondo quanto previsto da UNI/TS 11300-2 (Prospetti 21–23). Le temperature di esercizio del circuito sono impostate a 55 °C in mandata e 50 °C in ritorno per il funzionamento invernale, mentre per il funzionamento estivo i valori sono 7 °C in mandata e 12 °C in ritorno.

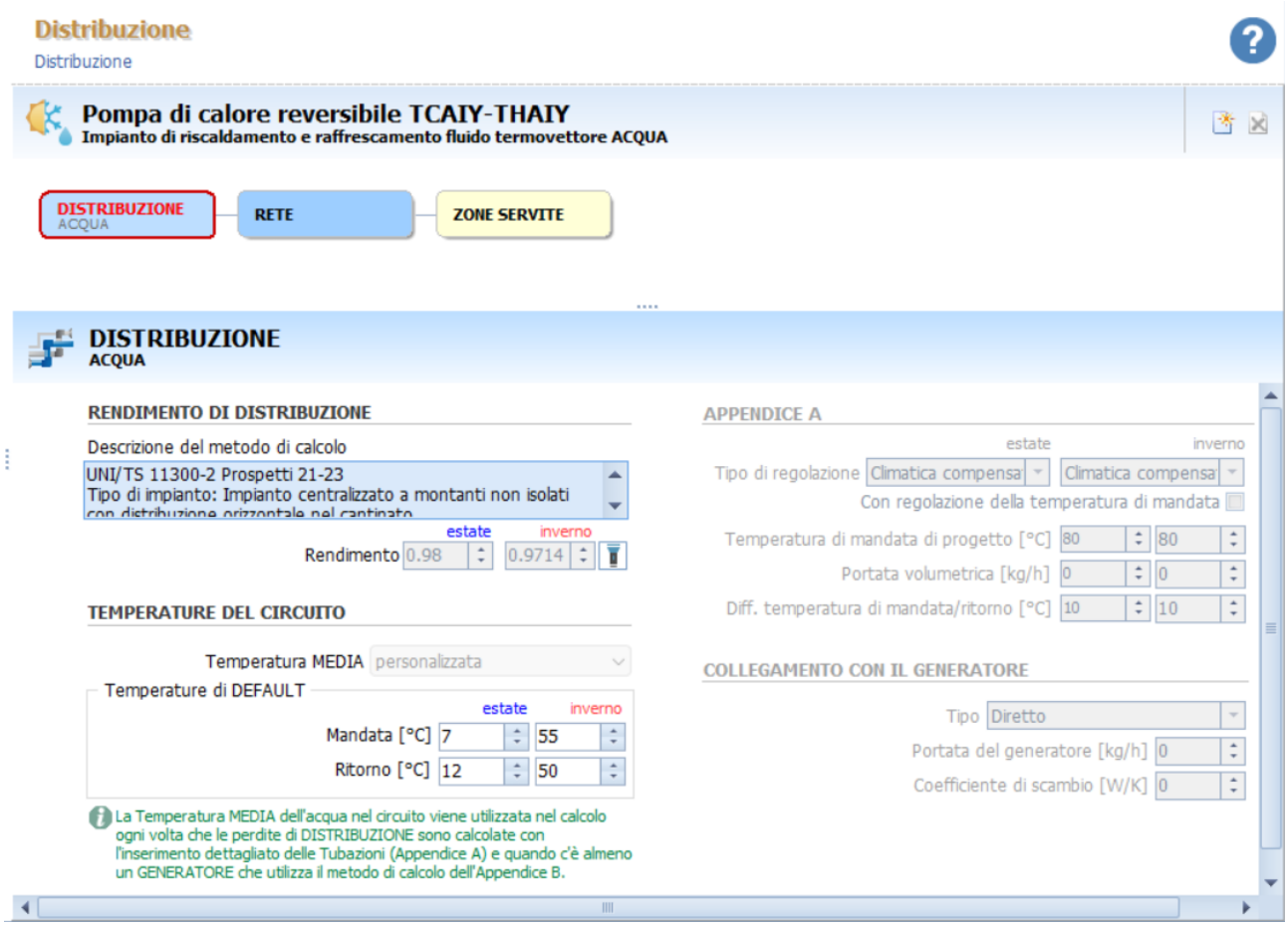



*Fig. 140. Sistema di distribuzione del fluido termovettore nel software Termus.*

La Tabella 132 riporta i descrittori applicati al sistema di distribuzione dell'impianto termico, distinguendo i materiali impiegati per le tubazioni e riportando i parametri prestazionali di riferimento (lunghezza complessiva e trasmittanza lineica). I valori sono stati ricavati dalla modellazione in Termus.

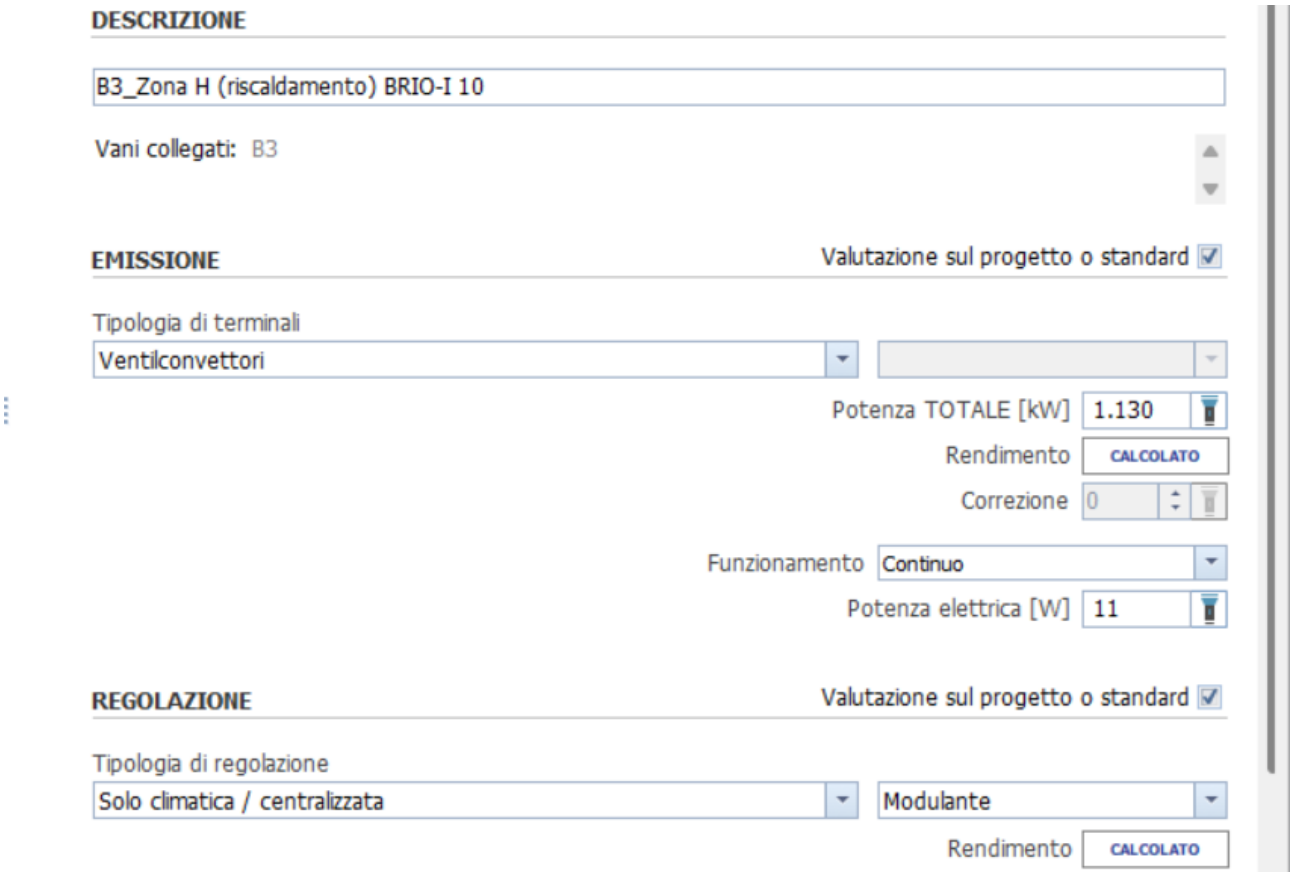
| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO |
|---|

| GRUPPI TERMICI | | |
|---|---|---|
| RETI DI DISTRIBUZIONE | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Sistema di distribuzione | Impianto centralizzato a montanti non isolati correnti nell'intercapedine dei muri esterni | - |
| Materiale tubazioni | Acciaio (tubazioni Mannesmann) con distribuzione orizzontale isolata secondo DPR 412/93; tratti terminali in ferro non coibentato. | - |
| Trasmittanza lineica tubazioni | - | - |
| Lunghezza tubazioni principali | - | - |

*Tabella 132. Applicazione dei descrittori al sistema di distribuzione della Palazzina Comando.*

Dopo aver analizzato i vantaggi derivanti dalla sostituzione dell'impianto a gasolio con un sistema a pompa di calore, si è scelto di abbinare alla nuova macchina dei ventilconvettori, così da disporre di un impianto di emissione in grado di lavorare a temperature più basse e, di conseguenza, ridurre i consumi energetici complessivi.
Nella Palazzina Comando, i radiatori tradizionali e le numerose tipologie di split a parete sono stati sostituiti dai ventilconvettori: dispositivi che, pur ricordando esteticamente i caloriferi, garantiscono prestazioni nettamente superiori. Grazie al funzionamento basato sull'interazione tra un flusso d'acqua e un flusso d'aria incrociato, i ventilconvettori permettono non solo di riscaldare durante l'inverno, ma anche di sfruttare la pompa di calore in modalità estiva per il raffrescamento degli ambienti.
Per questa riqualificazione è stata scelta la linea BRIO-I SLIM, dotata di motore elettronico EC a regolazione continua di velocità, soluzione che assicura un'elevata efficienza, una gestione modulata delle portate e un miglior comfort termo–ambientale rispetto ai terminali preesistenti.

BRIO-I 10

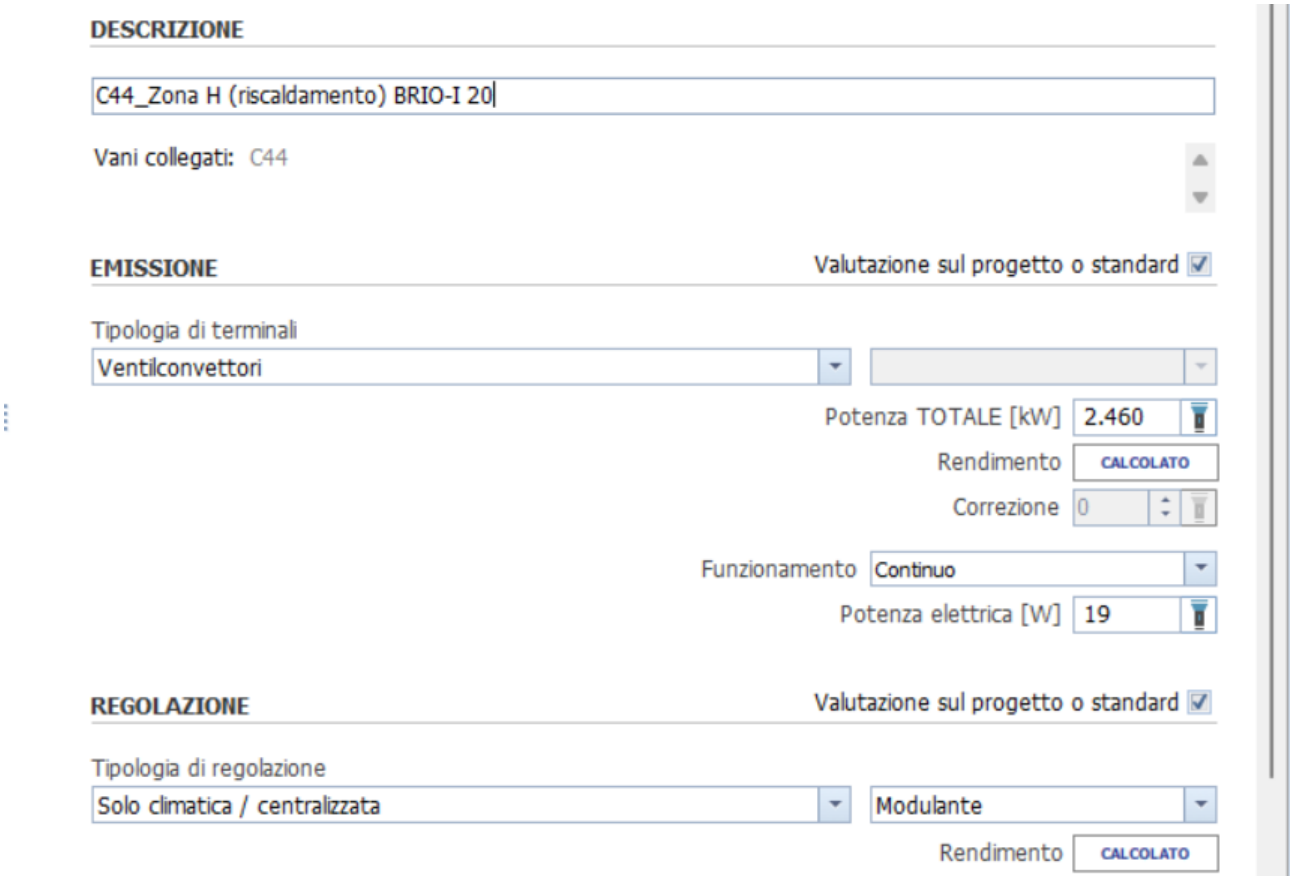



*La Tabella 133 riporta i descrittori applicati al sistema di distribuzione della Palazzina Comando, comprendente i radiatori. I valori sono stati ricavati dall'analisi diretta, dalla documentazione tecnica e dalla modellazione su Termus.*

| GRUPPI TERMICI | | |
|---|---|---|
| TERMINALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia terminali | Ventilconvettore Rhoss Brio-I Slim Mvp 10 a pavimento | - |
| Dimensioni | 723 (L) x 579 (A) x 149 (P) | mm |
| Numero terminali per tipologia | 18 | - |
| Zone servite dai radiatori | Ambienti A29, A30, A37, A48, A35, B3, B5, B9, B13, B14, B26, B28, B42, B43, C27, C25, C41, C46 | - |
| Potenza unitaria | 1,39 | kW |
| Potenza complessiva terminali (per piano) | Piano terra: 6,95;<br>Piano primo: 12,51;<br>Piano secondo: 5,56 | kW |
| Potenza complessiva terminali (totale edificio) | 25 | kW |
| Anno di installazione terminali | Situazione di progetto | - |

*Tabella 133. Applicazione dei descrittori relativi ai terminali di emissione del tipo BRIO-I-10 (ventilconvettori) della Palazzina Comando.*

BRIO-I 20



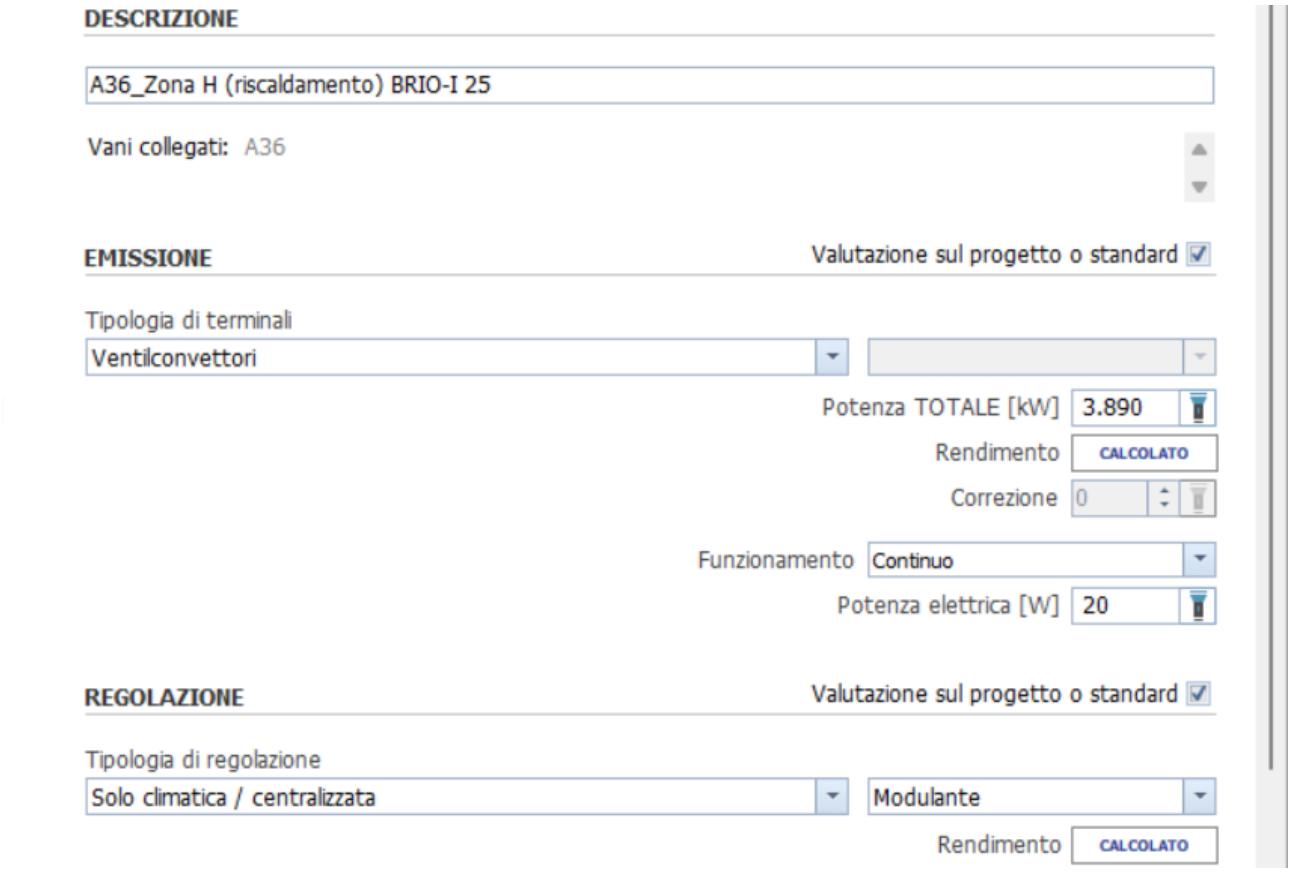

La Tabella 134 riporta i descrittori applicati al sistema di distribuzione della Palazzina Comando, comprendente i radiatori. I valori sono stati ricavati dall'analisi diretta, dalla documentazione tecnica e dalla modellazione su Termus.

| GRUPPI TERMICI | | |
|---|---|---|
| TERMINALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia terminali | Ventilconvettore Rhoss Brio-I Slim Mvp 20 a pavimento | - |
| Dimensioni | 923 (L) x 579 (A) x 149 (P) | mm |
| Numero terminali per tipologia | 46 | - |
| Zone servite dai radiatori | Ambienti A26, A27, A28, A31, A32, A33, A34, A36, A37, A38, A39, A40, A42, A43, A44, A46, A47, A49, B4, B10, B11, B13, B14, B15, B18, B19, B20, B21, B22, B23, B24, B25, B26, B27, B29, B30, C23, C26, C27, C45, C46, C47, C48, A25, A30, B7, B8, B16. | - |
| Potenza unitaria | 2,46 | kW |

| | | |
|---|---|---|
| Potenza complessiva terminali (per piano) | Piano terra: 56,58;<br>Piano primo: 51,66;<br>Piano secondo: 19,68 | kW |
| Potenza complessiva terminali (totale edificio) | 56 | kW |
| Anno di installazione terminali | Situazione di progetto | - |

*Tabella 134. Applicazione dei descrittori relativi ai terminali di emissione del tipo BRIO-I-20 (ventilconvettori) della Palazzina Comando.*

BRIO-I 25



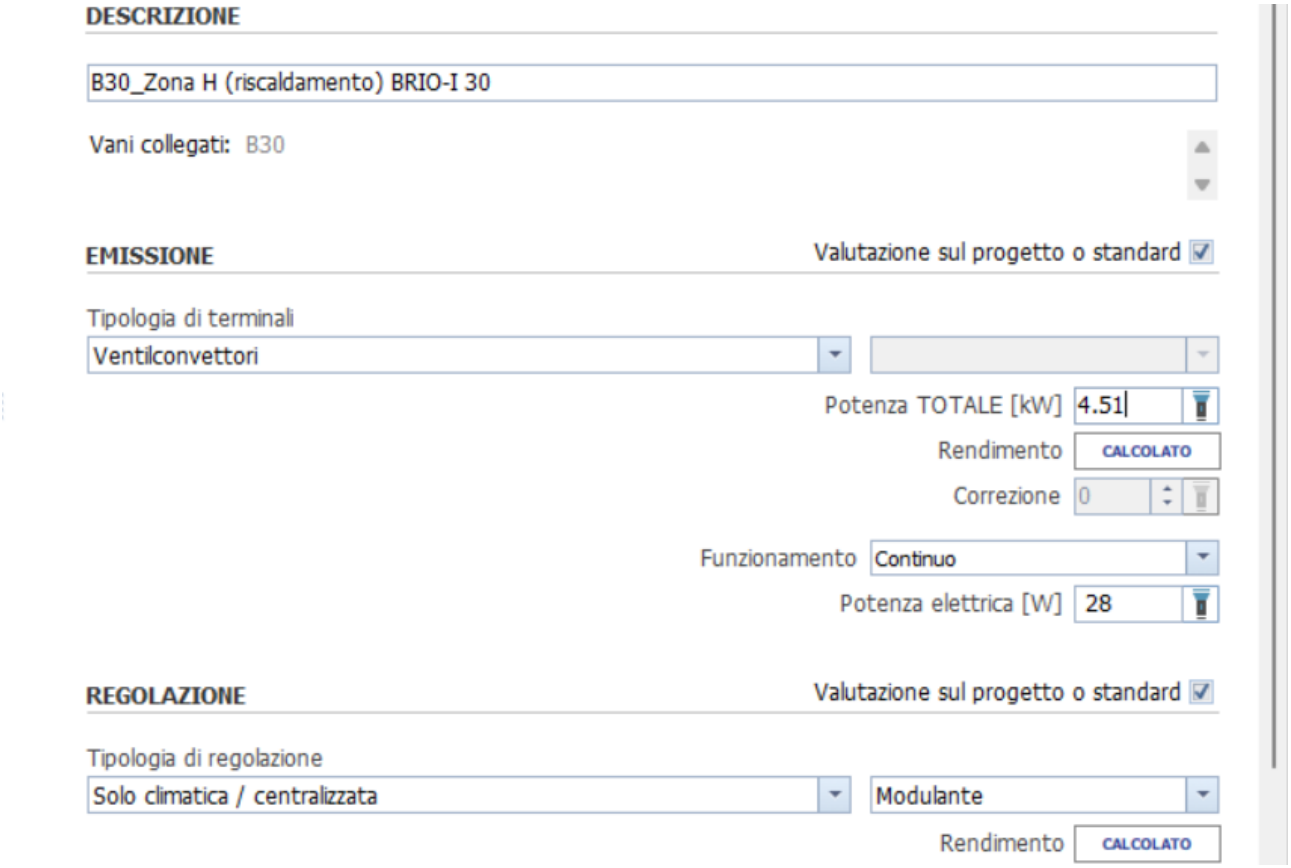

La Tabella 135 riporta i descrittori applicati al sistema di distribuzione della Palazzina Comando, comprendente i radiatori. I valori sono stati ricavati dall'analisi diretta, dalla documentazione tecnica e dalla modellazione su Termus.

| GRUPPI TERMICI | | |
|---|---|---|
| TERMINALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia terminali | Ventilconvettore Rhoss Brio-I Slim Mvp 25 a pavimento | - |
| Dimensioni | 1123 (L) x 579 (A) x 149 (P) | mm |
| Numero terminali per tipologia | 5 | - |
| Zone servite dai radiatori | Ambienti A29, A35, A41, B1, B2 | - |
| Potenza unitaria | 3,89 | kW |

| | | |
|---|---|---|
| Potenza complessiva terminali (per piano) | Piano terra: 11,67;<br>Piano primo: 7,78 | kW |
| Potenza complessiva terminali (totale edificio) | 19,45 | kW |
| Anno di installazione terminali | Situazione di progetto | - |

*Tabella 135. Applicazione dei descrittori relativi ai terminali di emissione del tipo BRIO-I-25 (ventilconvettori) della Palazzina Comando.*

BRIO-I 30




La Tabella 136 riporta i descrittori applicati al sistema di distribuzione della Palazzina Comando, comprendente i radiatori. I valori sono stati ricavati dall'analisi diretta, dalla documentazione tecnica e dalla modellazione su Termus.

| GRUPPI TERMICI | | |
|---|---|---|
| TERMINALI | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | PCDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Tipologia terminali | Ventilconvettore Rhoss Brio-I Slim Mvp 30 a pavimento | - |
| Dimensioni | 1323 (L) x 579 (A) x 149 (P) | mm |
| Numero terminali per tipologia | 1 | - |

| | | |
|---|---|---|
| Zone servite dai radiatori | Ambienti B30 | - |
| Potenza unitaria | 4,51 | kW |
| Potenza complessiva terminali (per piano) | Piano primo: 4,51 | kW |
| Potenza complessiva terminali (totale edificio) | 4,51 | kW |
| Anno di installazione terminali | Situazione di progetto | - |

*Tabella 136. Applicazione dei descrittori relativi ai terminali di emissione del tipo BRIO-I-30 (ventilconvettori) della Palazzina Comando.*

### 1.5.3 I risultati ottenuti dalla simulazione post-interventi

I risultati della simulazione energetica dimostrano in modo evidente quanto sia fondamentale la sinergia tra interventi sull'impianto, sugli infissi e sulle chiusure orizzontali di copertura. Solo l'integrazione di queste azioni consente di ridurre sensibilmente le dispersioni termiche e di ottenere un risparmio consistente sui consumi globali dell'edificio.

Il nuovo calcolo del fabbisogno energetico, finalizzato alla determinazione della classe di prestazione, colloca la Palazzina Comando in classe A4, il livello più alto previsto dalla normativa vigente per gli edifici a elevata efficienza e bassi consumi. Questo risultato è il frutto di un intervento mirato e coordinato: l'impiego di materiali isolanti ad alte prestazioni per la coibentazione delle coperture, l'installazione di un impianto di riscaldamento moderno ed efficiente, l'adozione di soluzioni impiantistiche basate sulle fonti rinnovabili e la sostituzione degli infissi obsoleti con serramenti performanti. Insieme, queste scelte hanno determinato un salto qualitativo notevole sia dal punto di vista energetico che ambientale.
Il miglioramento conseguito non si traduce soltanto in un incremento del comfort interno e in una riduzione dell'impatto ambientale, ma soprattutto in un abbattimento significativo dei consumi. Per rendere il confronto più concreto, si considerino i dati annui: nello stato di fatto, la Palazzina Comando risultava in Classe Energetica F, con consumi fino a 210 kWh/m²·anno; nello scenario di progetto, l'edificio raggiunge la Classe A4, con consumi ridotti a 14 kWh/m²·anno.

La stessa differenza emerge anche dagli indici di prestazione energetica:

- Stato di fatto ⟶ consumo massimo ≤ 3,50 EP; consumo minimo ≤ 2,60 EP;
- Scenario di progetto ⟶ consumo massimo ≤ 0,40 EP.

Il passaggio in Classe A4 equivale, quindi, ad avere un immobile ad altissima efficienza energetica, capace di generare risparmi consistenti in bolletta e di garantire al contempo un funzionamento sostenibile e durevole nel tempo.

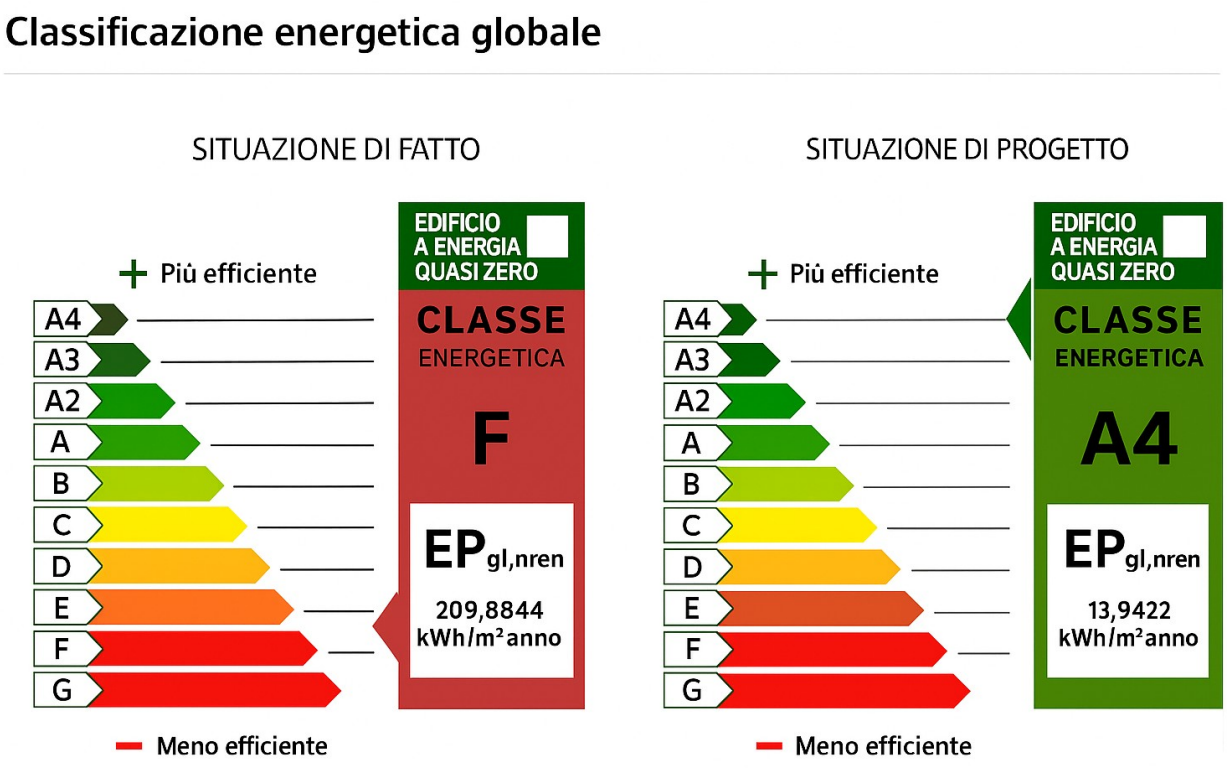



*Fig. 141. Confronto della classificazione energetica globale dell'edificio nello stato di fatto e nello stato di progetto.*

L'analisi comparativa dei fabbisogni energetici evidenzia un miglioramento complessivo estremamente significativo tra lo stato di fatto e lo stato di progetto. Le emissioni di $CO_2$ si riducono di oltre il 93%, passando da 121.443,34 kg a 9.008,82 kg, mentre il fabbisogno di energia primaria totale (QP) cala da 677.889,25 kWh a 73.831,56 kWh, con una riduzione pari all'89%.
Il dettaglio dei fabbisogni conferma una contrazione generalizzata: il riscaldamento invernale (QPh) registra un -91%, il raffrescamento estivo (QPc) un -90%, e gli ausiliari per il riscaldamento (Qauxh) arrivano a -98%. Anche il costo di esercizio subisce una contrazione pressoché totale.
L'unica criticità rilevata riguarda l'aumento del fabbisogno di energia termica utile per il raffrescamento (Qc_nd), con una variazione positiva del 12%. Tale fenomeno può essere attribuito al miglioramento dell'isolamento dell'involucro, che da un lato riduce sensibilmente le dispersioni invernali, dall'altro può accentuare il rischio di surriscaldamento estivo. Per bilanciare tale effetto, risulta necessario introdurre strategie integrative di mitigazione, quali sistemi di ventilazione naturale, schermature solari mobili o l'adozione di materiali ad elevata inerzia termica.

Lo scenario post–interventi migliorativi si configura come notevolmente più efficiente sia dal punto di vista energetico, grazie alla riduzione del fabbisogno e delle dispersioni, sia sotto il profilo del comfort termo–igrometrico, con prestazioni superiori che contribuiscono indirettamente ad accrescere il valore complessivo dell'edificio. L'adozione di impianti caratterizzati da maggior rendimento ed efficienza ha consentito un salto prestazionale di ben otto classi energetiche

La Tabella 137 sintetizza i descrittori energetici applicati alla situazione post interventi della Palazzina Comando.

| DESCRIZIONE | UM | SdF | IIM | Variazione | Variaz.... |
|---|---|---|---|---|---|
| EMISSIONI di CO2 TOTALI | kgCO2 | 121 443.34 | 9 008.82 | -112434.5 | -93 ↓ |
| COSTO TOTALE di esercizio | € | 0.00 | 0.00 | --- | — |
| Fabbisogno di energia primaria TOTALE (QP) | kWh | 677 889.25 | 73 831.56 | -604057.6 | -89 ↓ |
| Fabbisogno di energia termica utile per riscaldamento (Qh_nd) | kWh | 117 986.91 | 93 503.14 | -24483.77 | -21 ↓ |
| Fabbisogno di energia termica utile per raffrescamento (Qc_nd) | kWh | -39 704.89 | -34 800.40 | 4904.48 | -12 ↑ |
| Fabbisogno di energia termica per ACS (Qw) | kWh | 0.00 | 0.00 | --- | — |
| Fabbisogno di energia primaria per riscaldamento (QPh) | kWh | 592 245.86 | 55 445.37 | -536800.4 | -91 ↓ |
| Fabbisogno di energia primaria per raffrescamento (QPc) | kWh | 75 121.80 | 7 864.61 | -67257.19 | -90 ↓ |
| Fabbisogno di energia primaria per ACS (QPw) | kWh | 10 521.58 | 10 521.58 | 0.00 | 0 — |
| Fabbisogno totale di energia elettrica ausiliari per riscaldamento ( | kWh | 237 067.43 | 4 047.53 | -233019.9 | -98 ↓ |
| Fabbisogno totale di energia elettrica ausiliari per raffrescamento | kWh | 0.00 | 3 249.84 | --- | — |
| Fabbisogno totale di energia elettrica ausiliari per ACS (Qxw) | kWh | 0.00 | 0.00 | --- | — |
| Fabbisogno di energia elettrica per ventilazione meccanica (QxV | kWh | 0.00 | 0.00 | --- | — |
| Fabbisogno di energia elettrica per illuminazione artificiale (Qxill) | kWh | 0.00 | 0.00 | --- | — |
| Fabbisogno di energia elettrica per trasporti (QxT) | kWh | 0.00 | 0.00 | --- | — |
| Energia prodotta dall'impianto Solare Termico (Q_STout) | kWh | 0.00 | 0.00 | --- | — |
| Energia termica utile fornita dall'impianto solare termico per Risca | kWh | 0.00 | 0.00 | --- | — |
| Energia termica utile fornita dall'impianto solare termico per ACS | kWh | 0.00 | 0.00 | --- | — |
| Energia elettrica prodotta dall'impianto fotovoltaico (QelPVout) | kWh | 0.00 | 0.00 | --- | — |
| Costo di esercizio per riscaldamento | € | 0.00 | 0.00 | --- | — |
| Costo di esercizio per raffrescamento | € | 0.00 | 0.00 | --- | — |

*Fig. 142. Confronto tra stato di fatto e stato di progetto dei fabbisogni energetici ed emissioni di $CO_2$.*

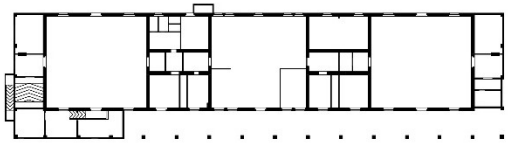
| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI ENERGETICI GLOBALI – STATO DI FATTO | | |
| CODICE COMPENDIO | CRV | |
| CODICE MANUFATTO | CPDO | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Classe energetica globale dell'edificio | A4 | - |
| Fabbisogno annuale di energia termica | Riscaldamento: 93.503,14<br>Raffrescamento: –34.800,40 | kWh |
| Fabbisogno di energia elettrica | Riscaldamento (Qauxh): 4.047,53<br>Raffrescamento (Qauxc): 3.249,84 | kWh |
| Fabbisogno di EP | 13,9422 | kWh |
| Copertura da FER | 0 | kWh |
| Percentuale FER complessiva | 0 | % |
| Generatore acqua calda sanitaria | - | - |
| Accumulo acqua calda sanitaria | - | - |
| Flusso d'aria della ventilazione | - | - |
| Ricambio d'aria orario nelle ore diurne (n) | - | - |
| Portata d'aria di rinnovo nelle ore diurne | - | - |
| Tipologia illuminazione | - | - |
| Potenza luminosa | - | - |
| Tipologia piattaforme elevatrici | - | - |
| Potenza forza motrice | - | - |

*Tabella 137. Applicazione dei descrittori energetici globali allo stato post interventi della Palazzina Comando della Caserma Villasanta.*

.

# ALLEGATI

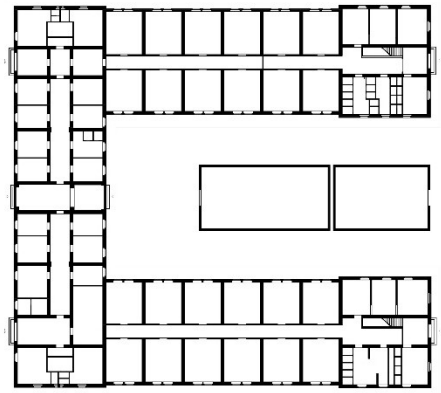
BLOCCO MENSA



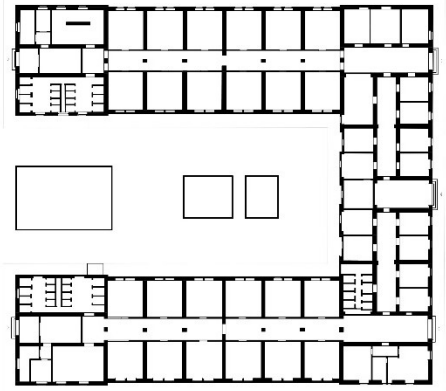
CASERMETTA 3S



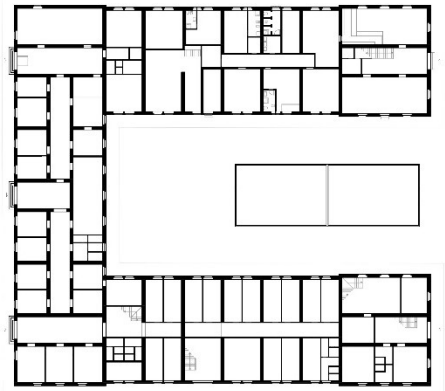
CASERMETTA 3D



CASERMETTA 2S

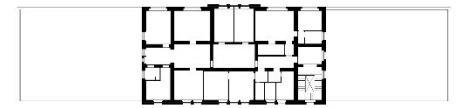


CASERMETTA 1D

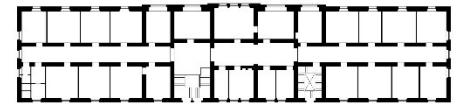


PALAZZINA COMANDO

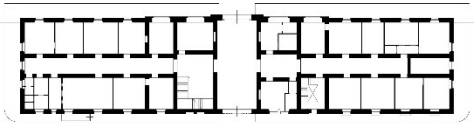
PIANO SECONDO



PIANO PRIMO



PIANO TERRA





**01. CASERMA RIVA VILLASANTA**
**IN CAGLIARI**

## ALLEGATO 1A

PLANIMETRIA COMPLESSIVA COMPENDIO

| Data | | Scala |
|---|---|---|
| 28/07/2023 | ALLEGATO 1A | 1:200 |

*Fig. 143. Allegato 1A, Caserma Riva Villasanta, Planimetria complessiva del compendio.*

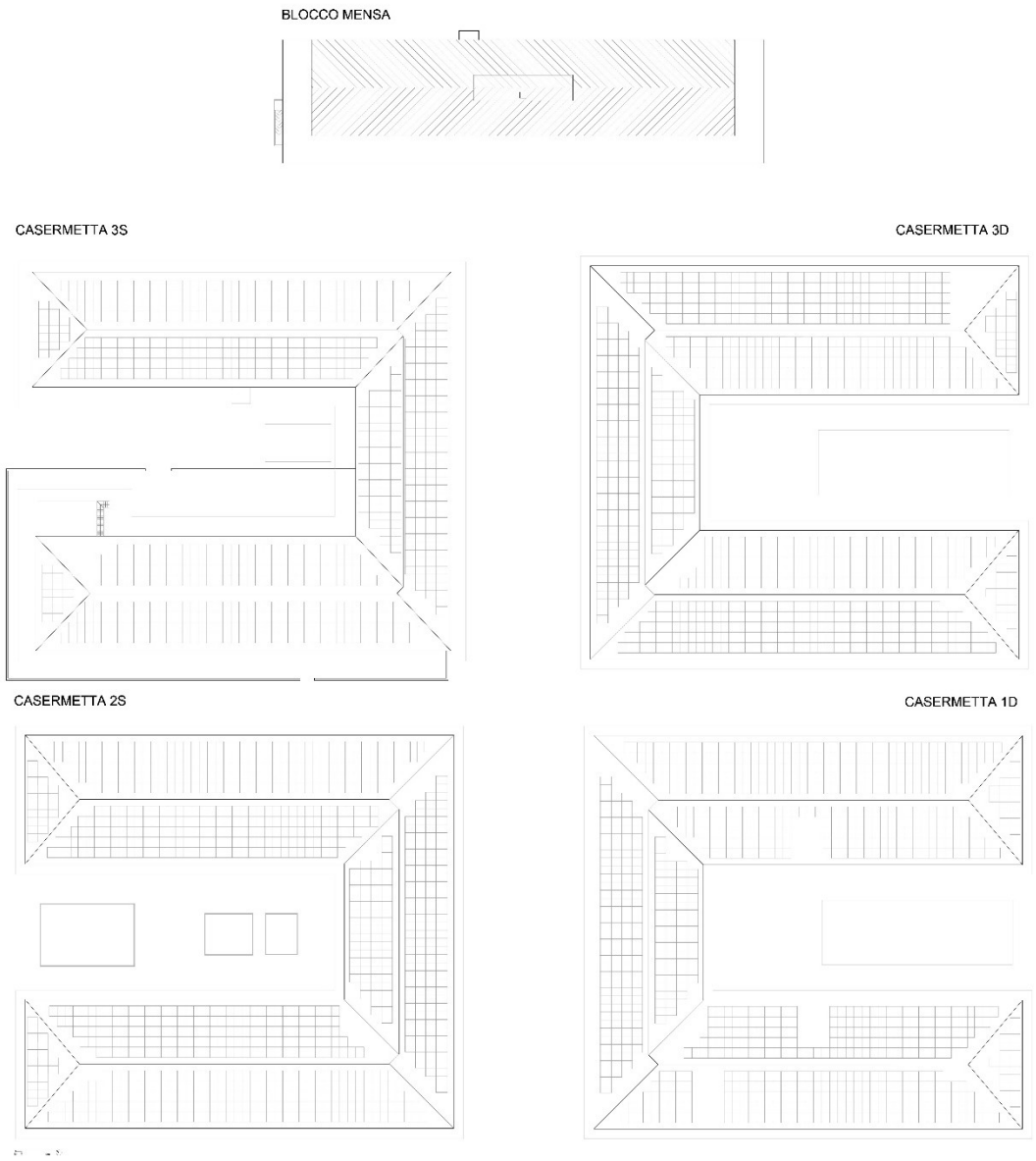
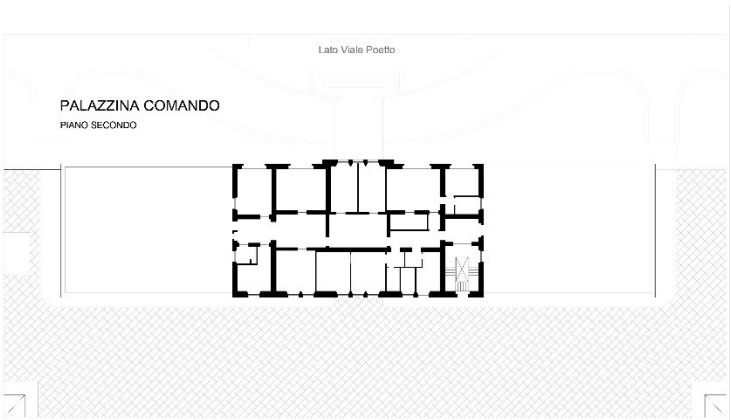
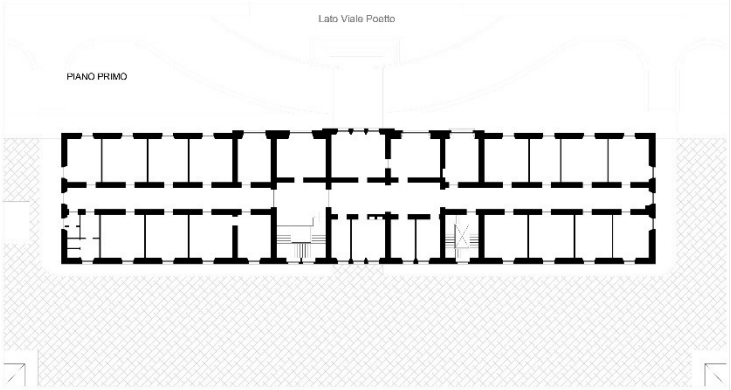
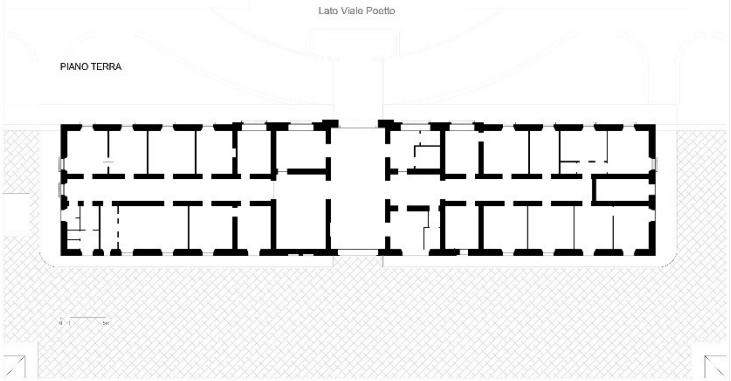
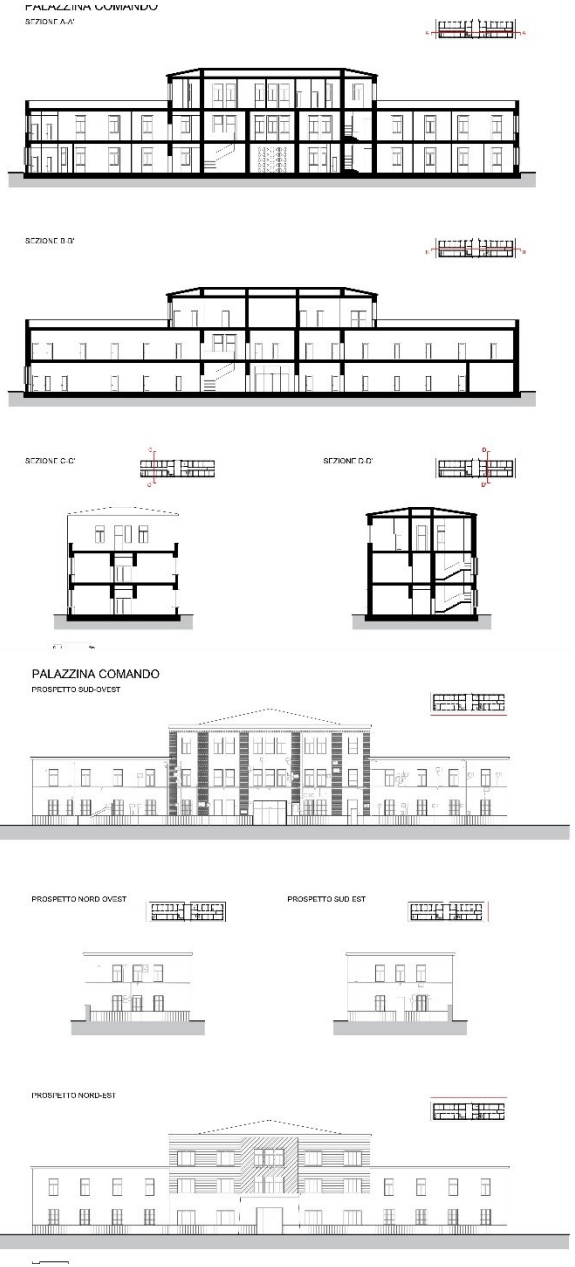


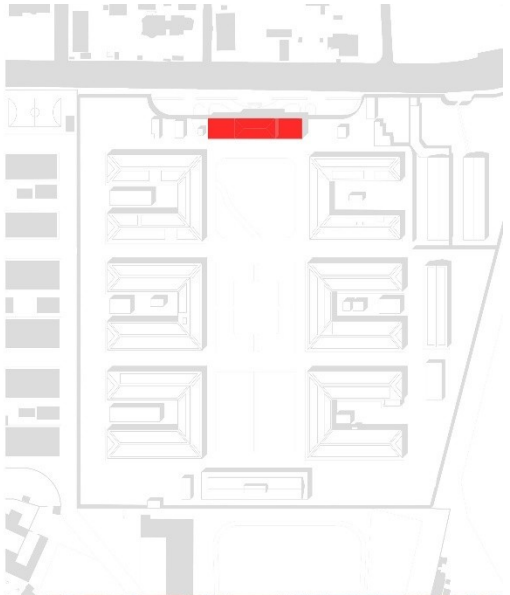

*Fig. 144. Allegato 1B, Caserma Riva Villasanta, Pianta coperture del compendio.*





**01. CASERMA RIVA VILLASANTA**
**IN CAGLIARI**

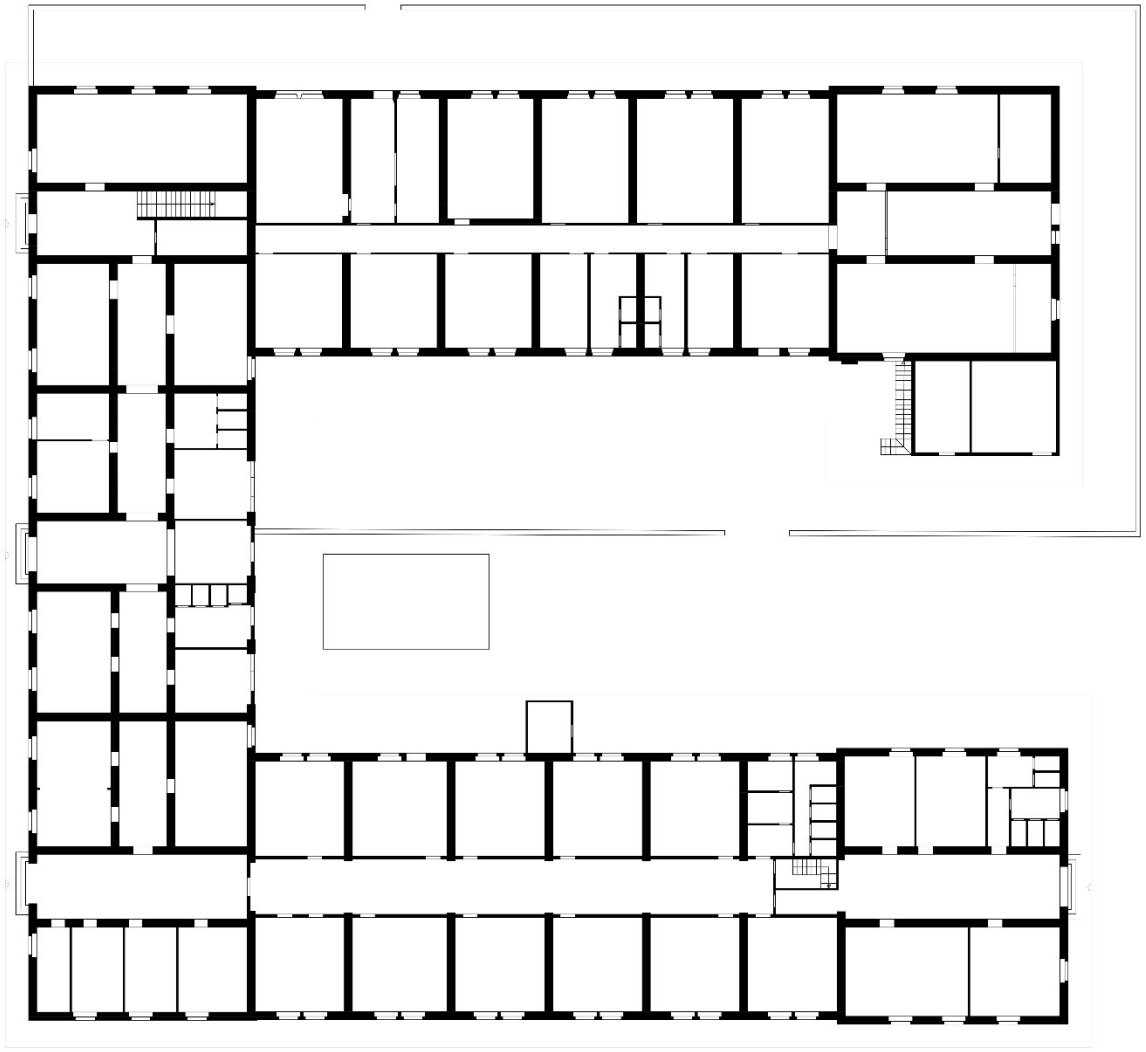
**ALLEGATO 2A**

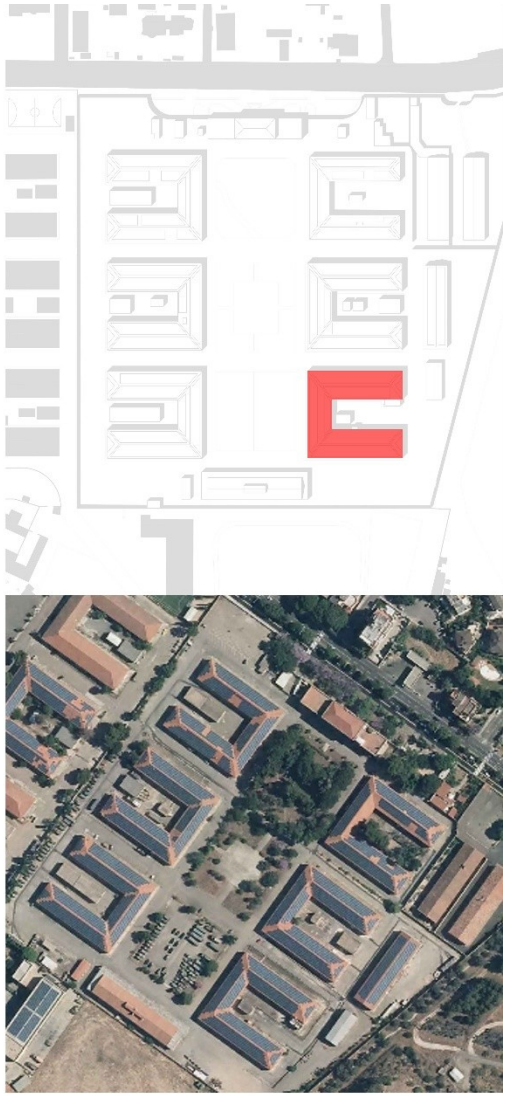
PALAZZINA COMANDO

| Data: | | Scala: |
|---|---|---|
| 28/07/2023 | PIANTE, PROSPETTI E SEZIONI | 1:200 |

*Fig. 145. Allegato 2A, Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, piante, prospetti e sezioni.*

CASERMETTA 3S



01. CASERMA RIVA VILLASANTA
IN CAGLIARI

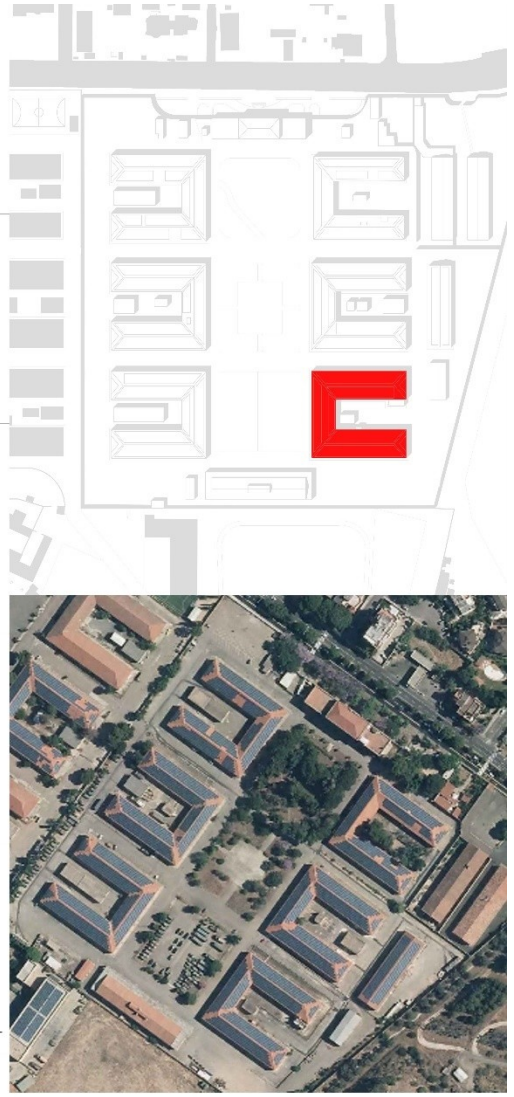
**ALLEGATO 2B**

CASERMETTA 3S

| Data: 28/07/2023 | PIANTA | Scala: 1:200 |
|---|---|---|

*Fig. 146. Allegato 2B, Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, pianta.*





**01. CASERMA RIVA VILLASANTA**
**IN CAGLIARI**

## ALLEGATO 2C

CASERMETTA 3S

| Data: | | Scala: |
|---|---|---|
| 28/07/2023 | PROSPETTI | 1:200 |

*Fig. 147. Allegato 2C, Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, prospetti.*

PALAZZINA COMANDO

PROSPETTO SUD-OVEST



PROSPETTO NORD-OVEST



PROSPETTO SUD-EST



PROSPETTO NORD-EST



TINTEGGIATURA ACRILICA
- Nessuna Patologia
- Alterazione Cromatica
- Dilavamento
- Intonaco di Cemento
- Patina Biologica

MARMO
- Nessuna Patologia
- Colatura
- Patina Biologica
- Erosione

LATERIZIO
- Nessuna Patologia
- Efflorescenza
- Messa in luce della muratura

FERRO
- Nessuna Patologia

PVC
- Elemento di disturbo visivo

LEGNO
- Nessuna Patologia

VETRO
- Nessuna Patologia

ALLUMINIO
- Nessuna Patologia

0 1 5m



**01. CASERMA RIVA VILLASANTA IN CAGLIARI**

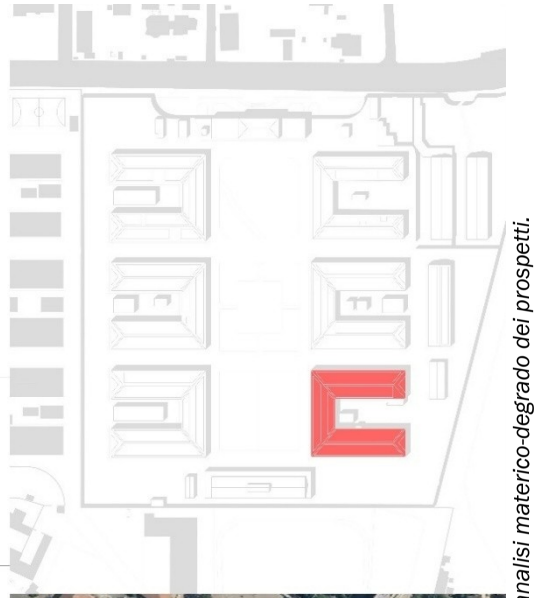
## ALLEGATO 3A

PALAZZINA COMANDO

| Data: 26/07/2023 | SINTESI MATERICO DEGRADO | Scala: 1:200 |
|---|---|---|

*Fig. 148. Allegato 3A, Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, analisi materico-degrado dei prospetti.*







**01. CASERMA RIVA VILLASANTA**
**IN CAGLIARI**

**ALLEGATO 3B**

CASERMETTA 3S

| Data: 28/07/2023 | SINTESI MATERICO-DEGRADO | Scala: 1:200 |
|---|---|---|

*Fig. 149. Allegato 3B, Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, analisi materico-degrado dei prospetti.*

# CASERMETTA 3S

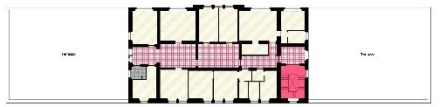
## PIANO TERRA



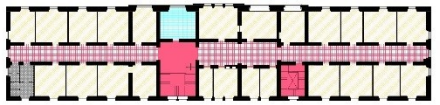



PALAZZINA COMANDO

PIANO SECONDO



PIANO PRIMO



PIANO TERRA



**01. CASERMA RIVA VILLASANTA IN CAGLIARI**

**ALLEGATO 4A**

CASERMETTA 3S, PALAZZINA COMANDO

| Data: 26/07/2023 | DESTINAZIONI D'USO ATTUALI | Scala: 1:200 |
|---|---|---|

*Fig. 150. Allegato 4A, Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S e Palazzina Comando, analisi delle destinazioni d'uso attuali.*

CASERMETTA 3S

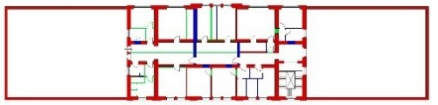


SINTESI DELLE CRONOLOGIE

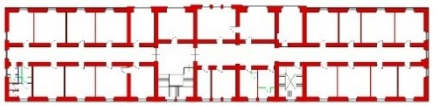
| Codifica | Descrizione |
|---|---|
| CRONOLOGIE | Cronо 1 |
| | Cronо 1: strutture elevate coll'omogenea storica e non più presenti |
| | Cronо 2 |
| | Cronо 2: strutture elevate coll'omogenea storica e non più presenti |
| | Cronо 3 |

PALAZZINA COMANDO

PIANO SECONDO



PIANO PRIMO



PIANO TERRA



1930/1940 Seconda metà del 900 1930/1940 strutture rilevate dalla iconografia storica di cui non è rimasta alcuna permanenza



**01. CASERMA RIVA VILLASANTA IN CAGLIARI**

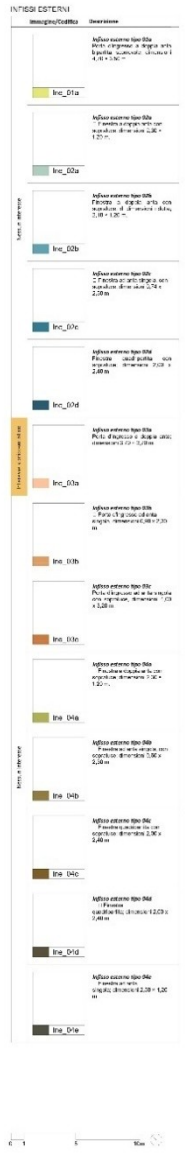
**ALLEGATO 5A**

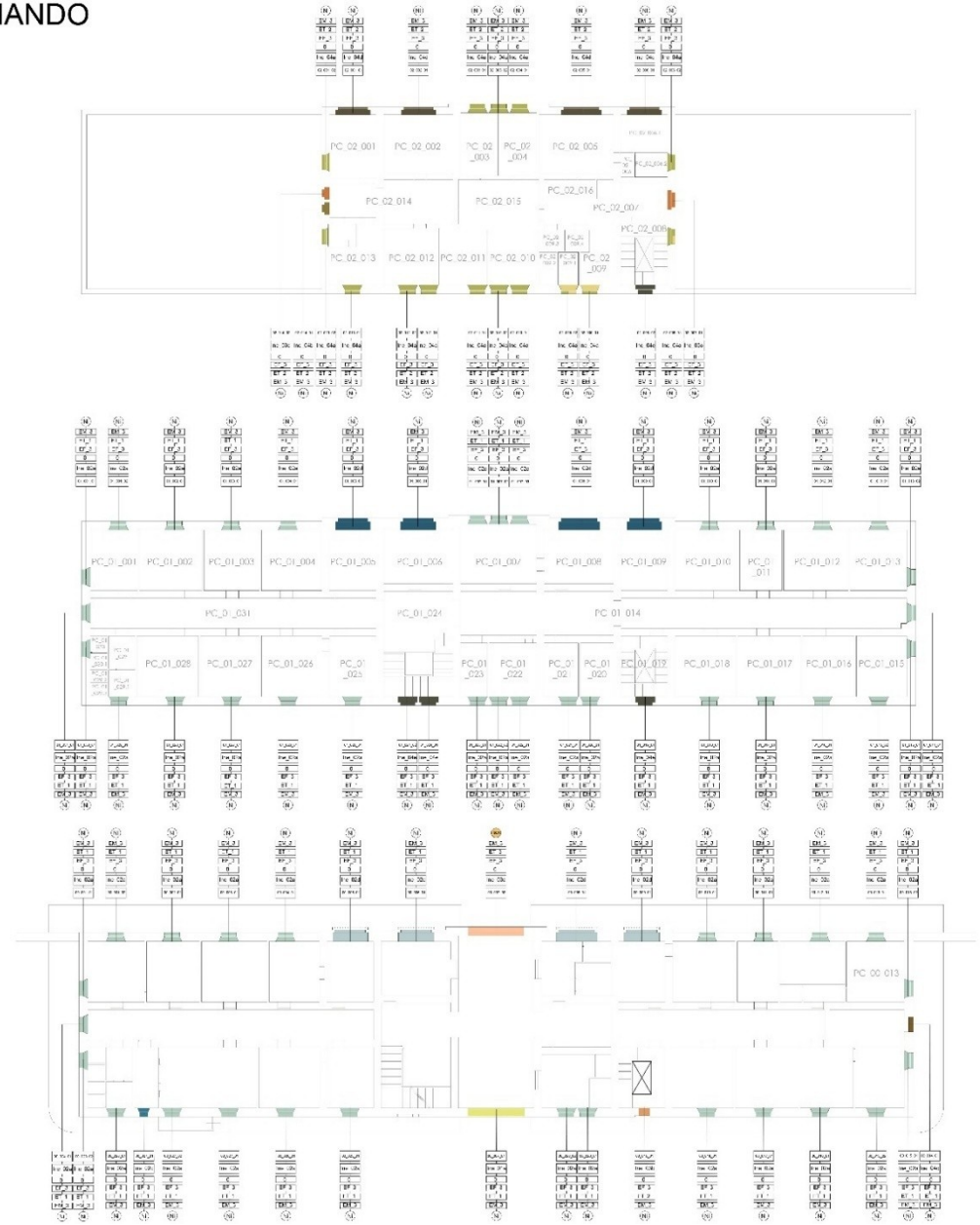
CASERMETTA 3S, PALAZZINA COMANDO

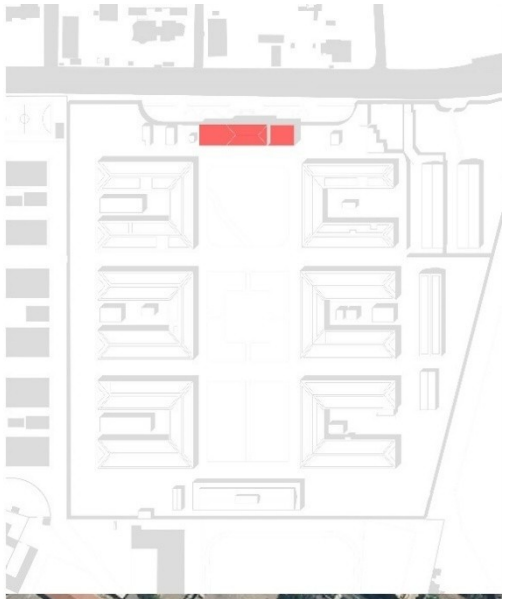
| Data: | CRONOLOGIE | Scala: |
|---|---|---|
| 28/07/2023 | | 1:200 |

*Fig. 151. Allegato 5A, Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S e Palazzina Comando, analisi delle fasi costruttive.*

PALAZZINA COMANDO





**01. CASERMA RIVA VILLASANTA**
**IN CAGLIARI**

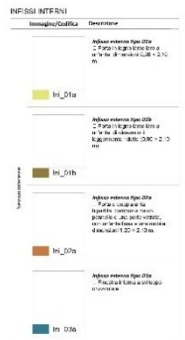
**ALLEGATO 6A**

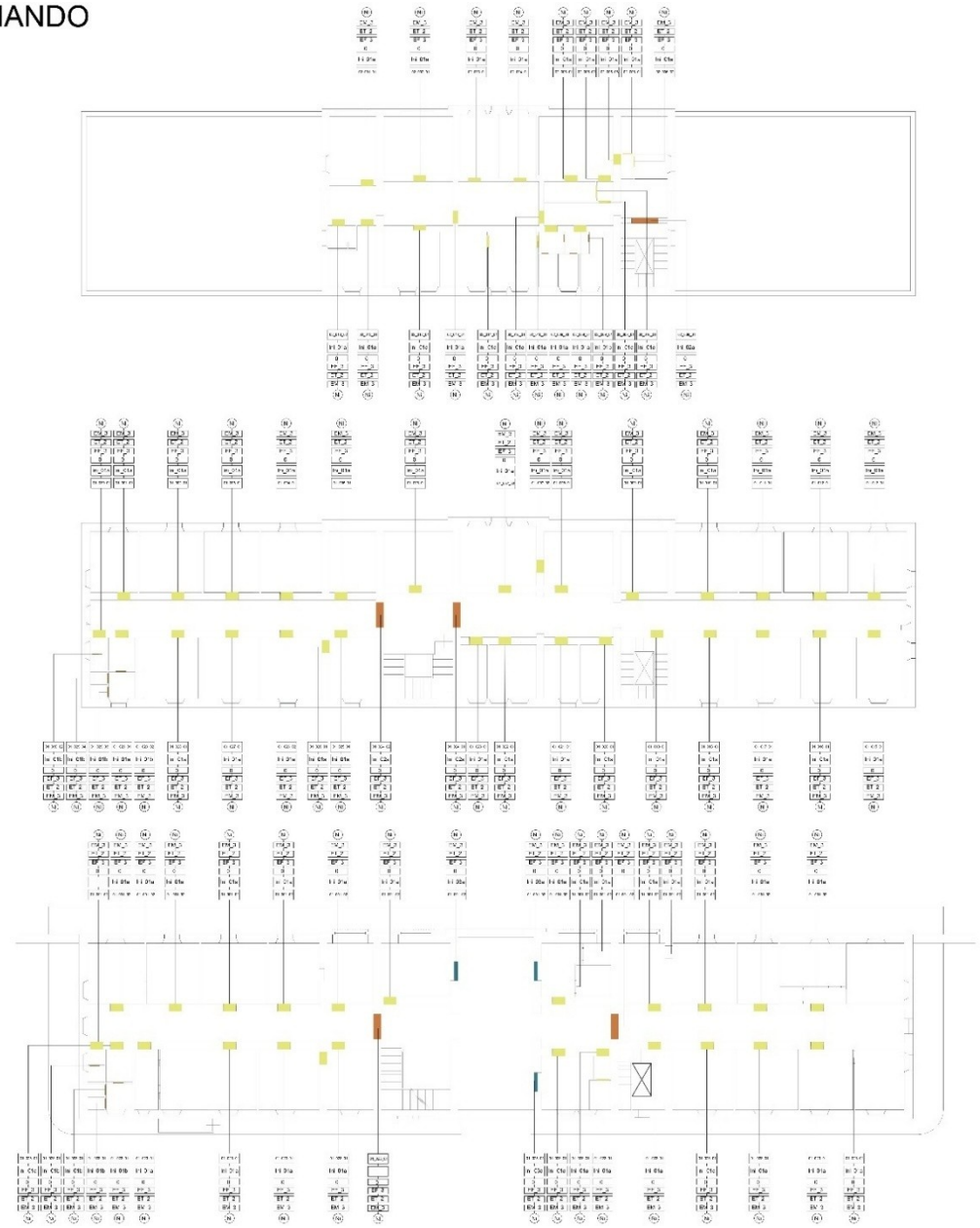
PALAZZINA COMANDO

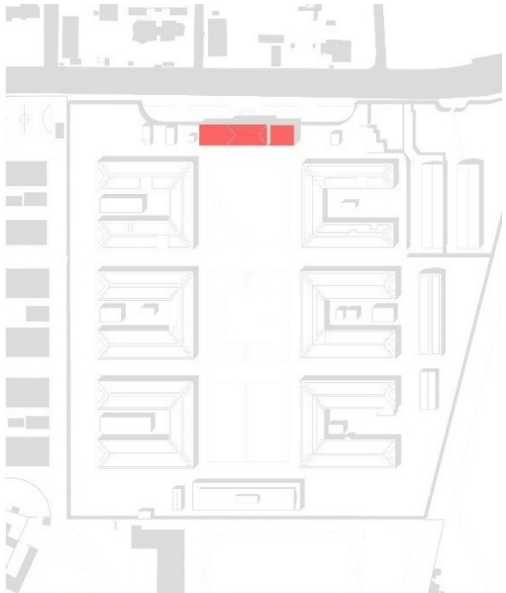
| Data: | | Scala: |
|---|---|---|
| 26/07/2023 | RAUMBUCH INFISSI ESTERNI | 1:200 |

*Fig. 152. Allegato 6A, Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, Raumbuch degli infissi esterni.*

PALAZZINA COMANDO







**01. CASERMA RIVA VILLASANTA**
**IN CAGLIARI**

## ALLEGATO 6B

PALAZZINA COMANDO

| Data: 26/07/2023 | RAUMBUCH INFISSI INTERNI | Scala: 1:200 |
|---|---|---|

*Fig. 153. Allegato 6B, Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, Raumbuch degli infissi interni.*

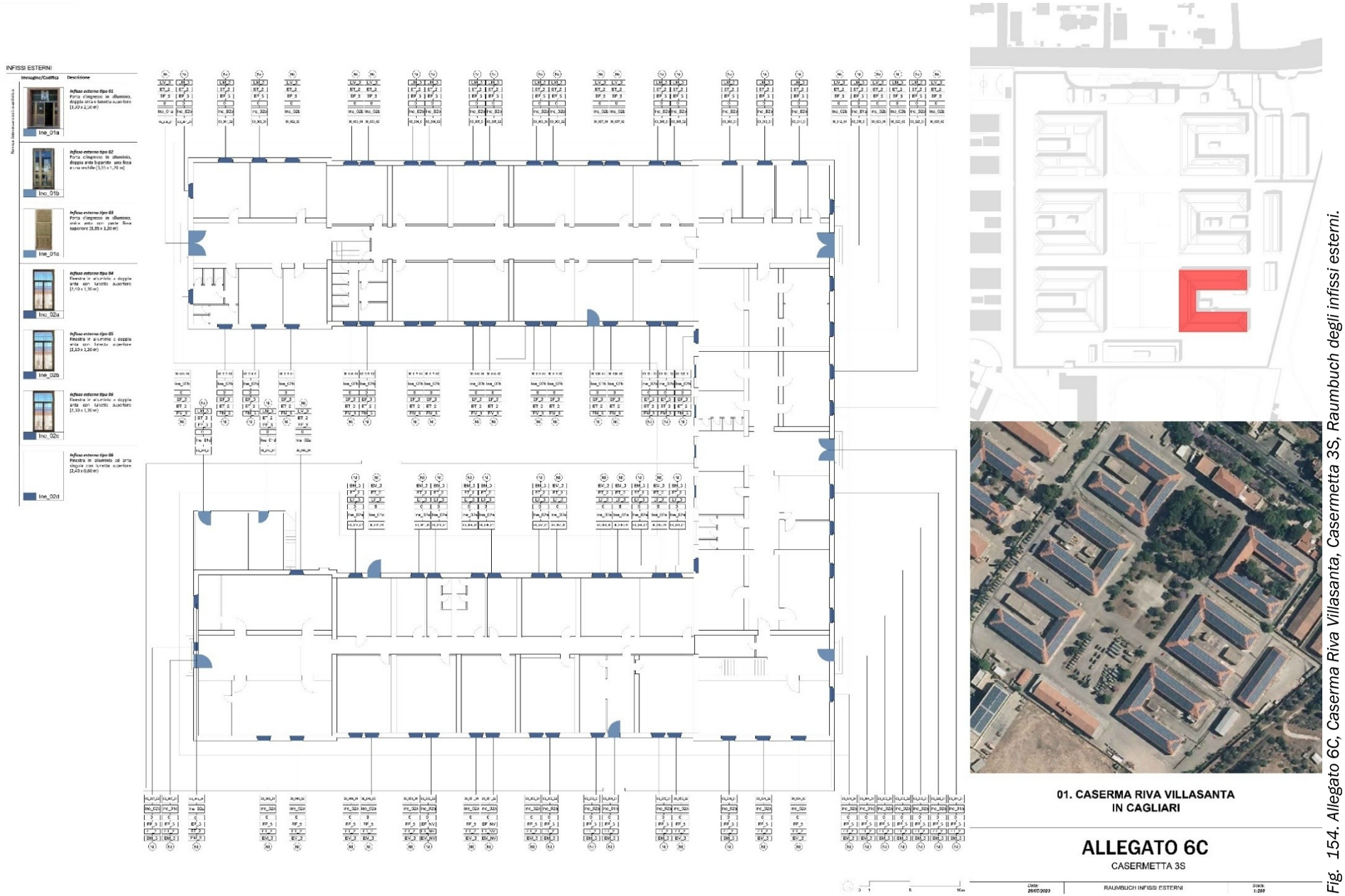
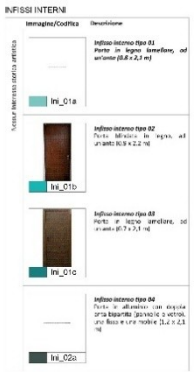
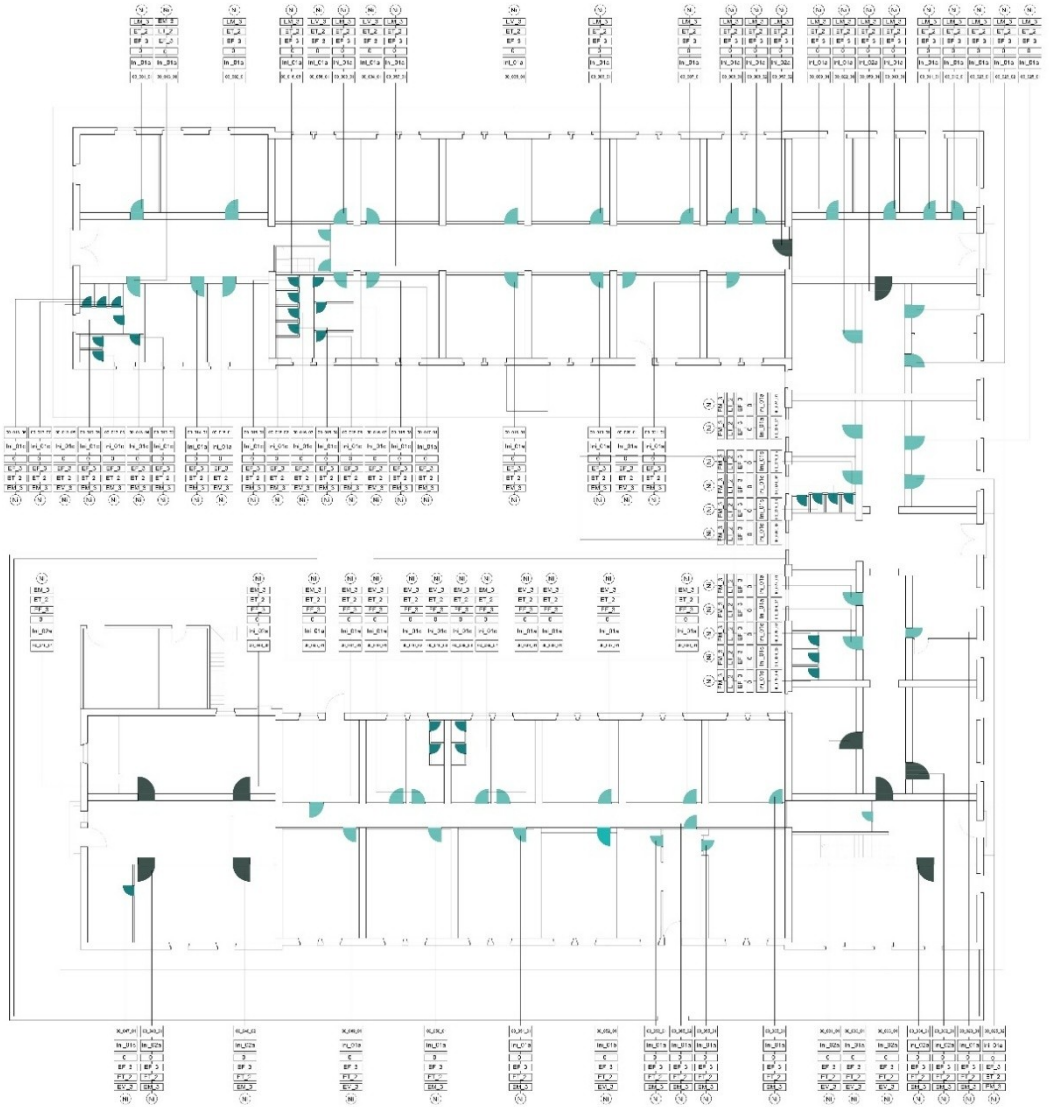


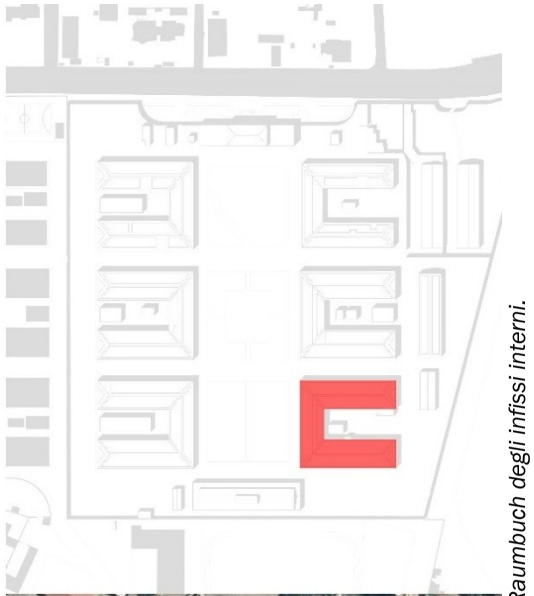

*Fig. 154. Allegato 6C, Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, Raumbuch degli infissi esterni.*

# CASERMETTA 3S

## PIANO TERRA







**01. CASERMA RIVA VILLASANTA**
**IN CAGLIARI**

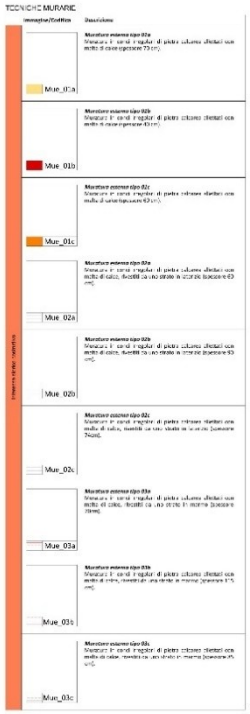
## ALLEGATO 6D

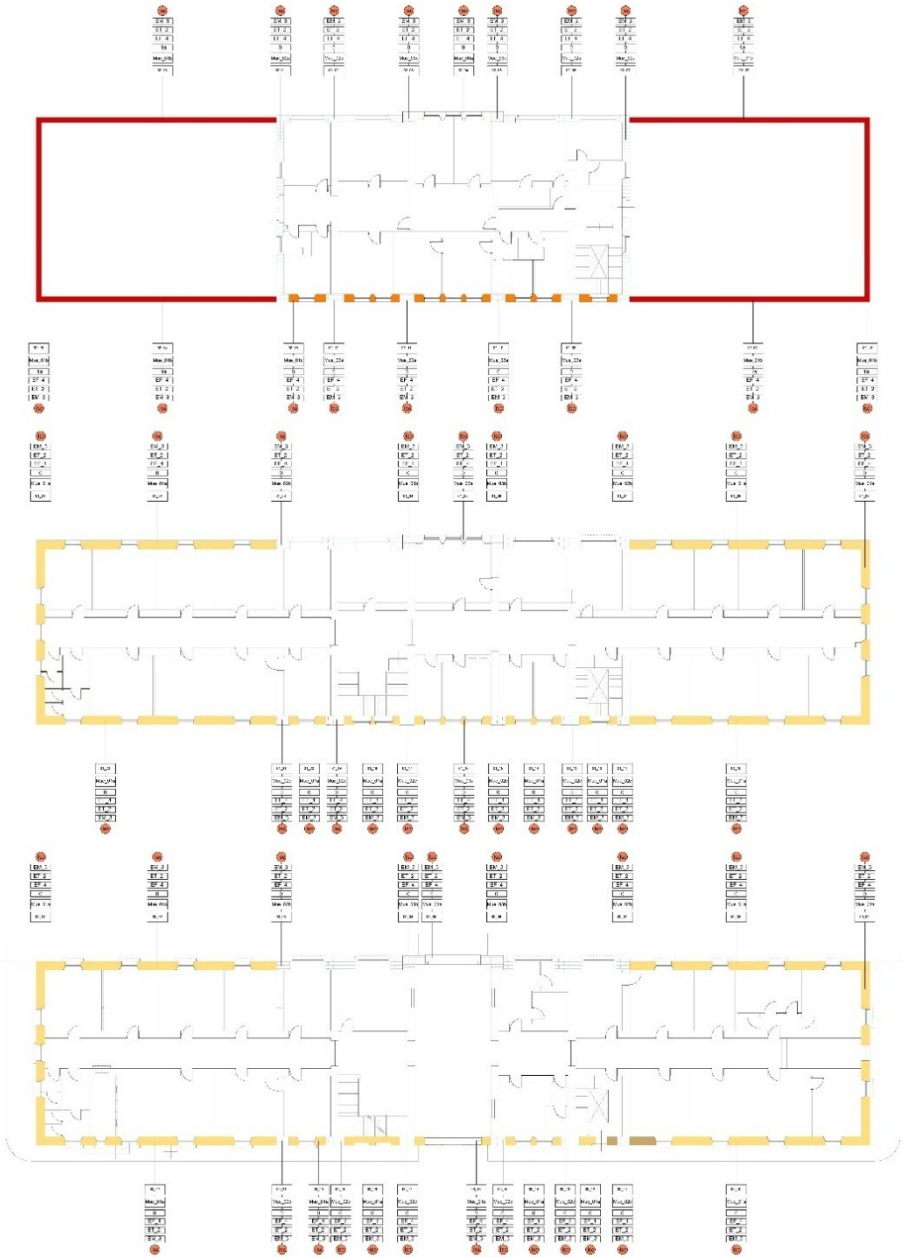
CASERMETTA 3S

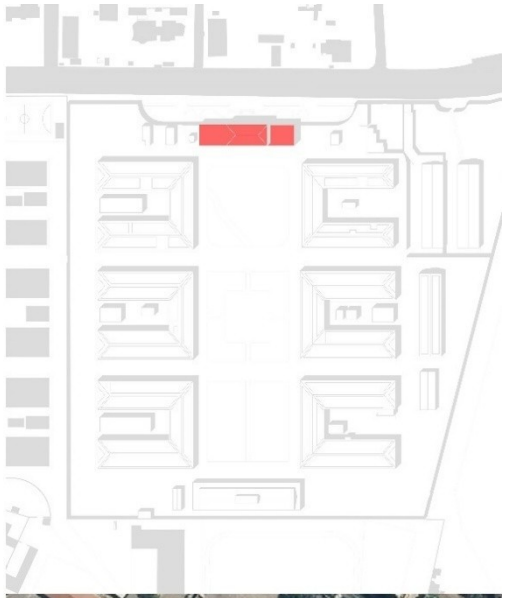
| Data | RAUMBUCH INFISSI INTERNI | Scala |
|---|---|---|
| 20/07/2023 | | 1:200 |

*Fig. 155. Allegato 6D, Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, Raumbuch degli infissi interni.*

PALAZZINA COMANDO







**01. CASERMA RIVA VILLASANTA**
**IN CAGLIARI**

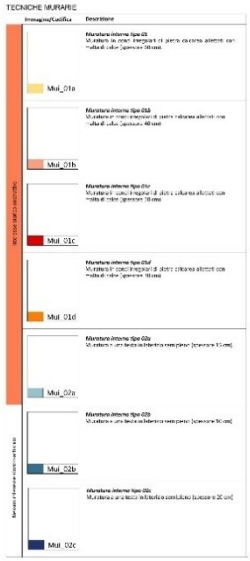
**ALLEGATO 7A**

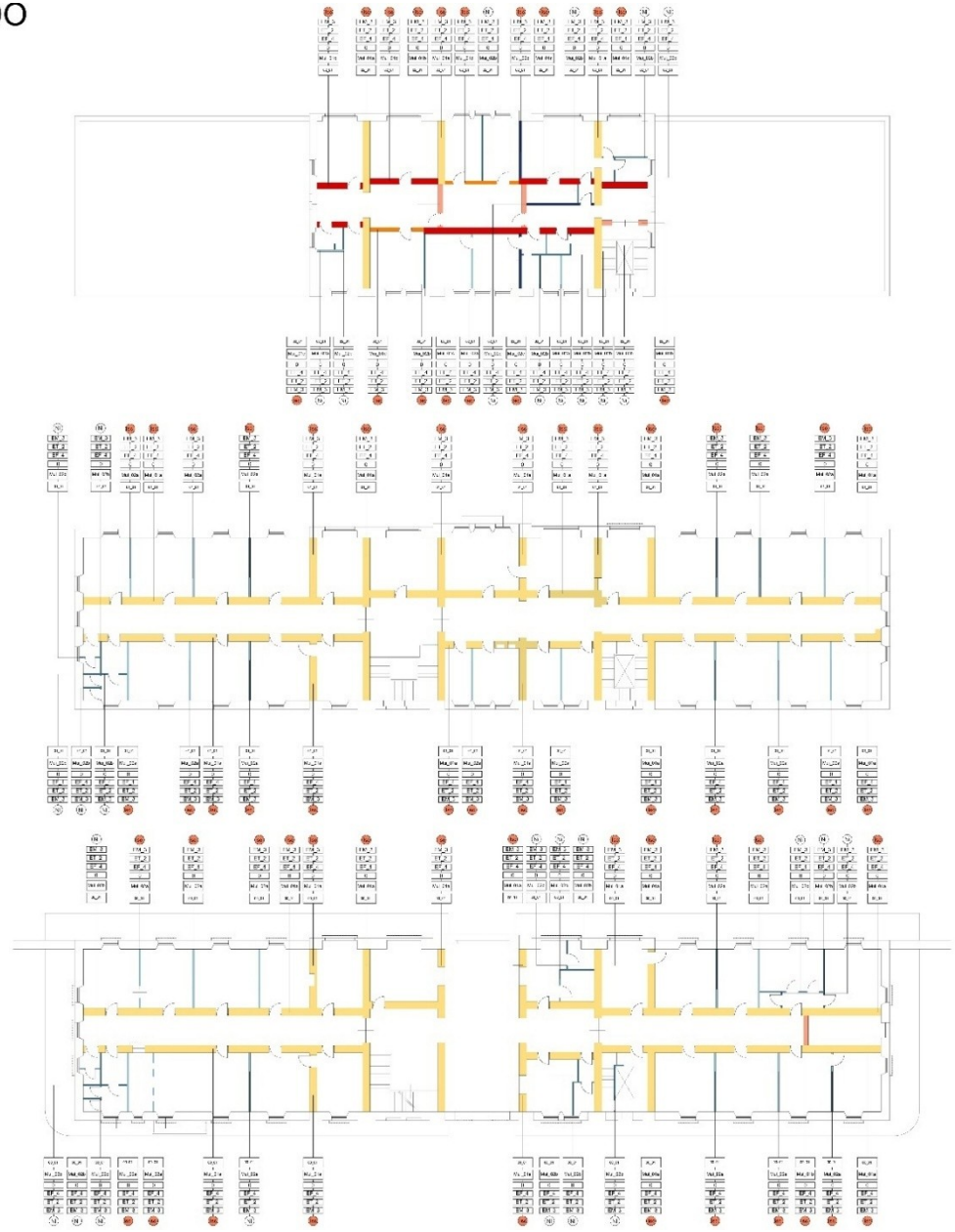
PALAZZINA COMANDO

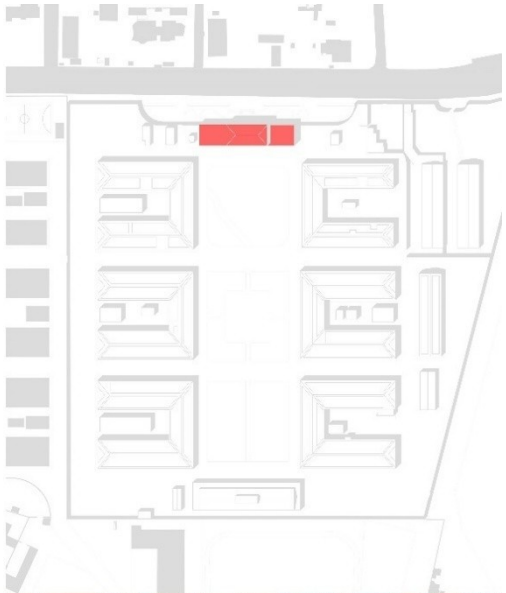
| Data: 20/07/2023 | RAUMBUCH MURI ESTERNI | Scala: 1:200 |
|---|---|---|

*Fig. 156. Allegato 7A, Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, Raumbuch dei muri esterni.*

PALAZZINA COMANDO







01. CASERMA RIVA VILLASANTA
IN CAGLIARI

**ALLEGATO 7B**

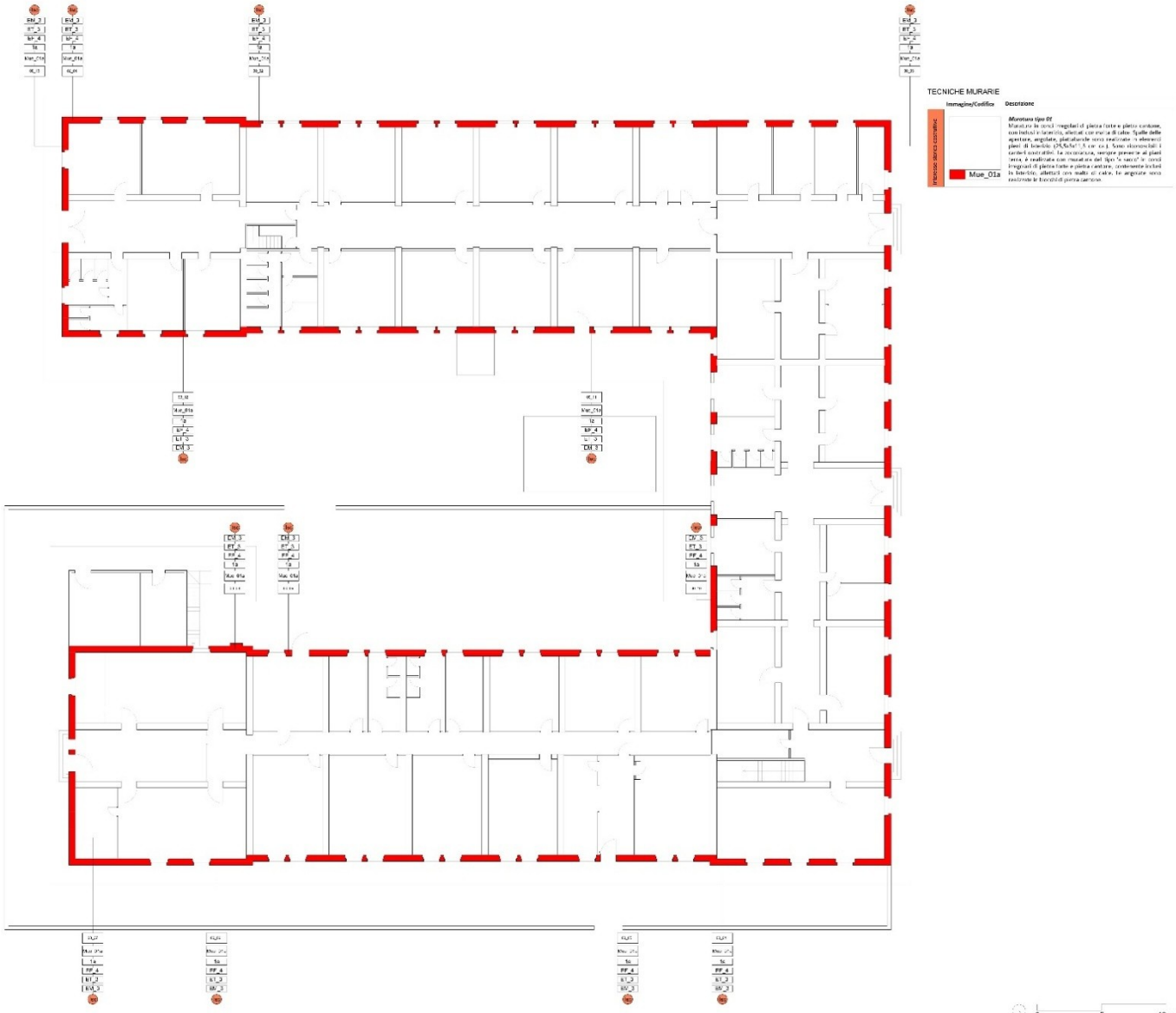
PALAZZINA COMANDO

| Data: | | Scala: |
|---|---|---|
| 20/07/2023 | RAUMBUCH MURI INTERNI | 1:200 |

*Fig. 157. Allegato 7B, Caserma Riva Villasanta, Palazzina Comando, Raumbuch dei muri interni.*

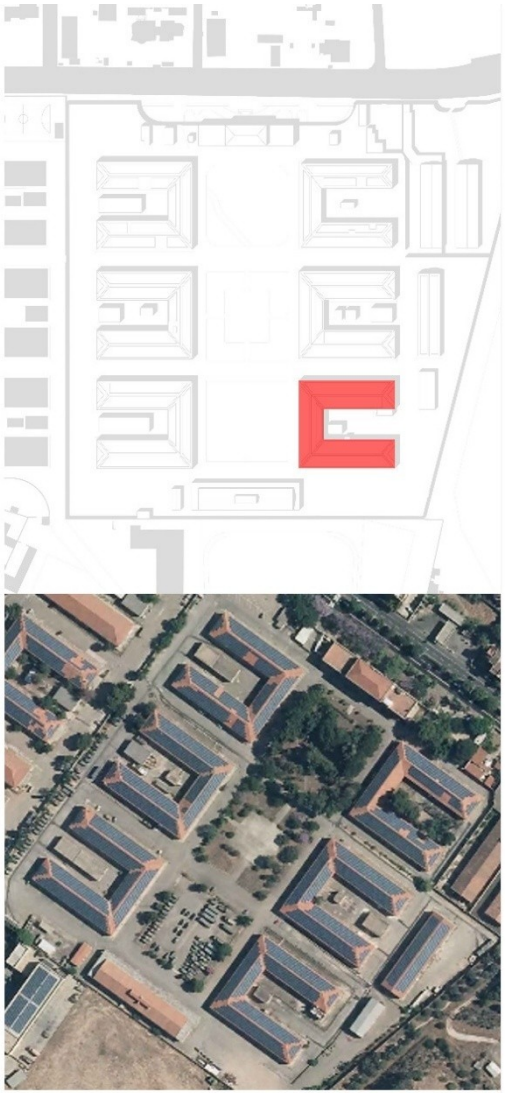
# CASERMETTA 3S

PIANO TERRA



TECNICHE MURARIE

| Immagine/Codifica | Descrizione |
|---|---|
| Mue_01a | *Muratura tipo 01* Muratura in conci irregolari di pietra tufo e pietra cantone, con indizi a tessitura, allettati con malta di calce. Spalle delle aperture, angolate, piattabande sono realizzate in elementi piani di bordato (25/30x15 cm ca.). Sono riconoscibili i cardini cardinali. La muratura, eseguita poggiando al piano terra, è realizzata con maestose del tipo "a sacco" in conci irregolari di pietra tufo e pietra cantone, contenente inclusi in bitume, allettati con malta di calce, le angolate sono realizzate in blocchi di pietra cantone. |



**01. CASERMA RIVA VILLASANTA IN CAGLIARI**

**ALLEGATO 7C**

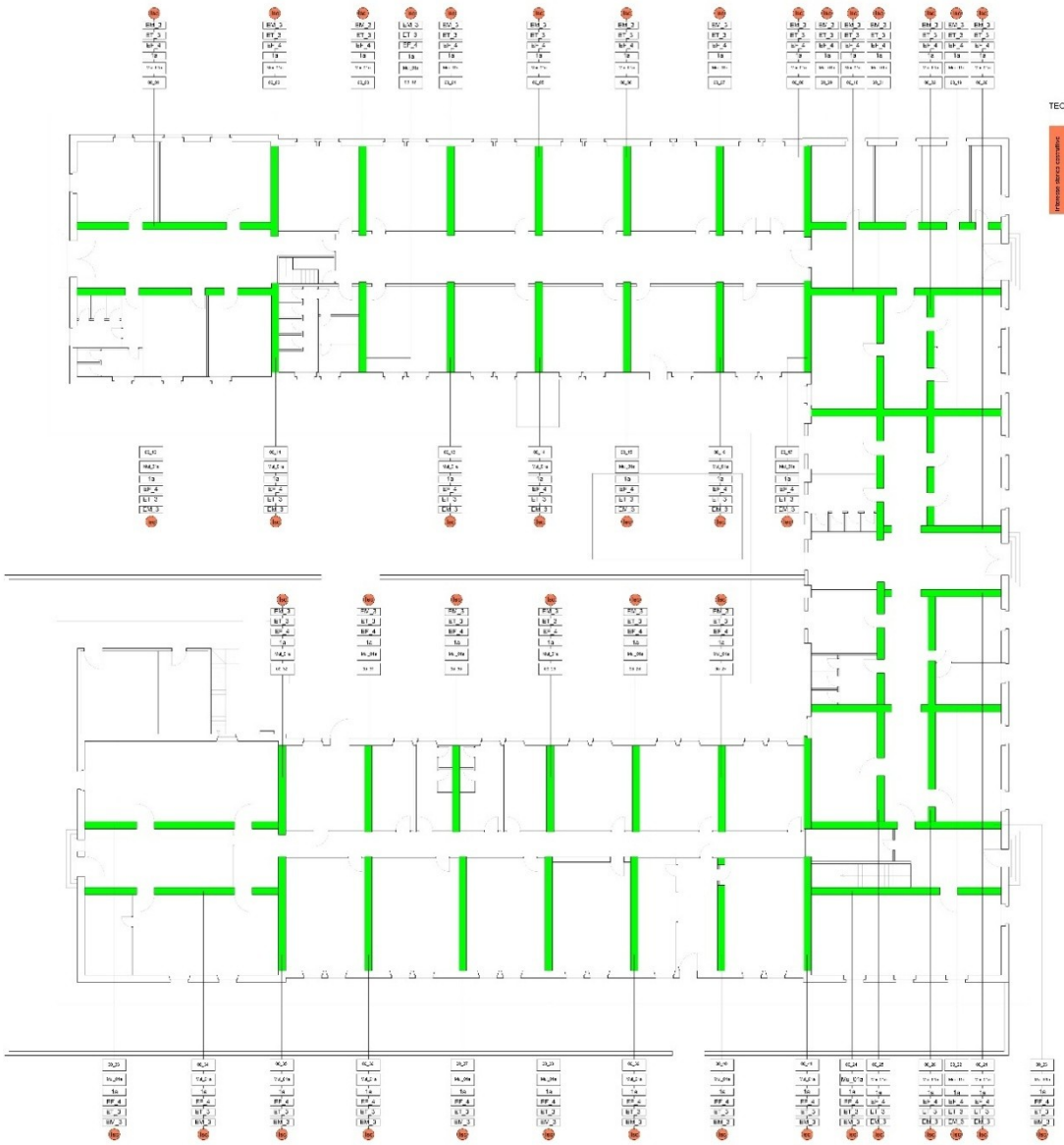
CASERMETTA 3S

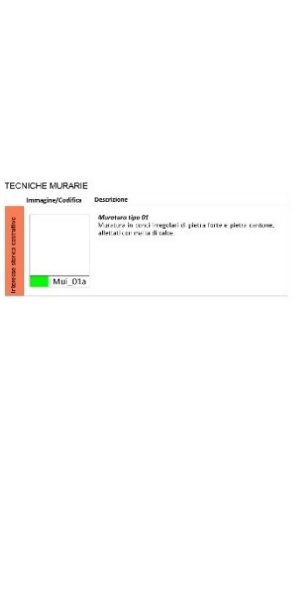
| Data: | | Scala: |
|---|---|---|
| 28/07/2023 | RAUMBUCH MURI ESTERNI | 1:200 |

*Fig. 158. Allegato 7C, Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, Raumbuch dei muri esterni.*

# CASERMETTA 3S

PIANO TERRA





TECNICHE MURARIE

| Immagine/Codifica | Descrizione |
|---|---|
| Mur_01a | **Muratura tipo 01** Muratura in conci irregolari di pietra forte e pietre cantone, allettati con malta di calce. |



0 5 10m

**01. CASERMA RIVA VILLASANTA IN CAGLIARI**

**ALLEGATO 7D**

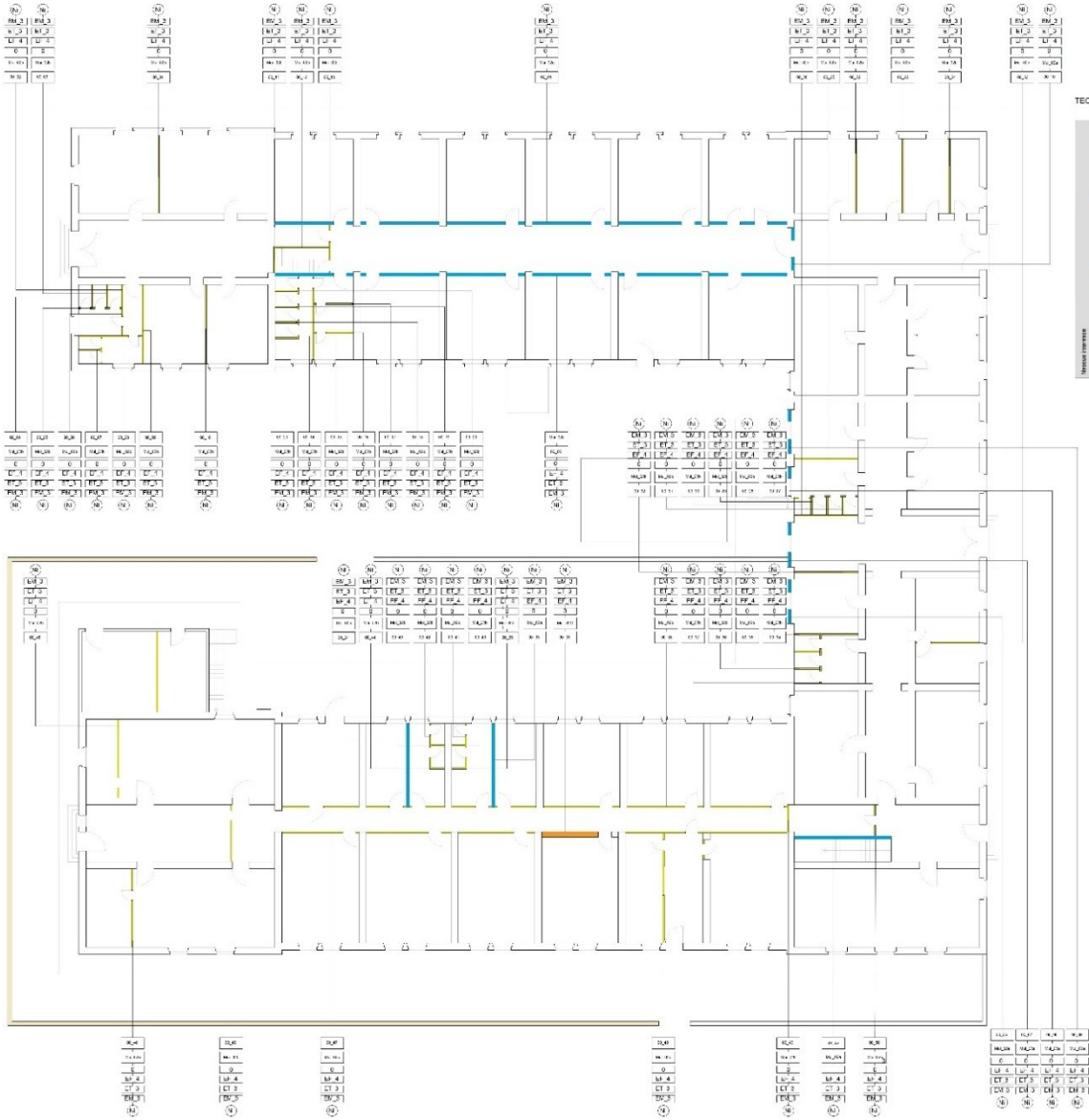
CASERMETTA 3S

| Data: | | Scala: |
|---|---|---|
| 20/07/2023 | RAUMBUCH MURI INTERNI | 1:200 |

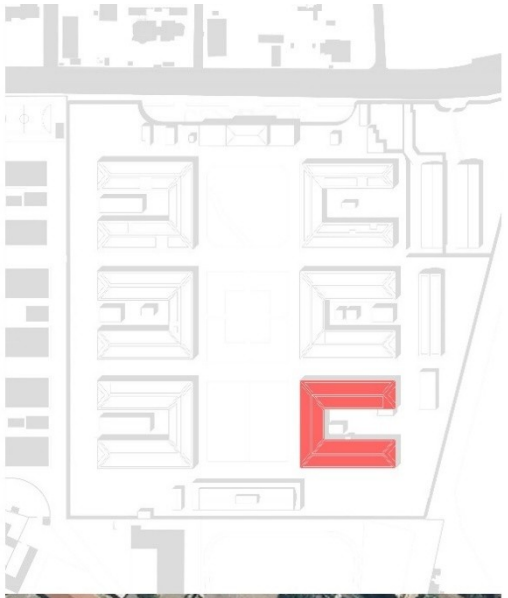
*Fig. 159. Allegato 7D, Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, Raumbuch dei muri interni.*

# CASERMETTA 3S

PIANO TERRA







**01. CASERMA RIVA VILLASANTA IN CAGLIARI**

**ALLEGATO 7E**

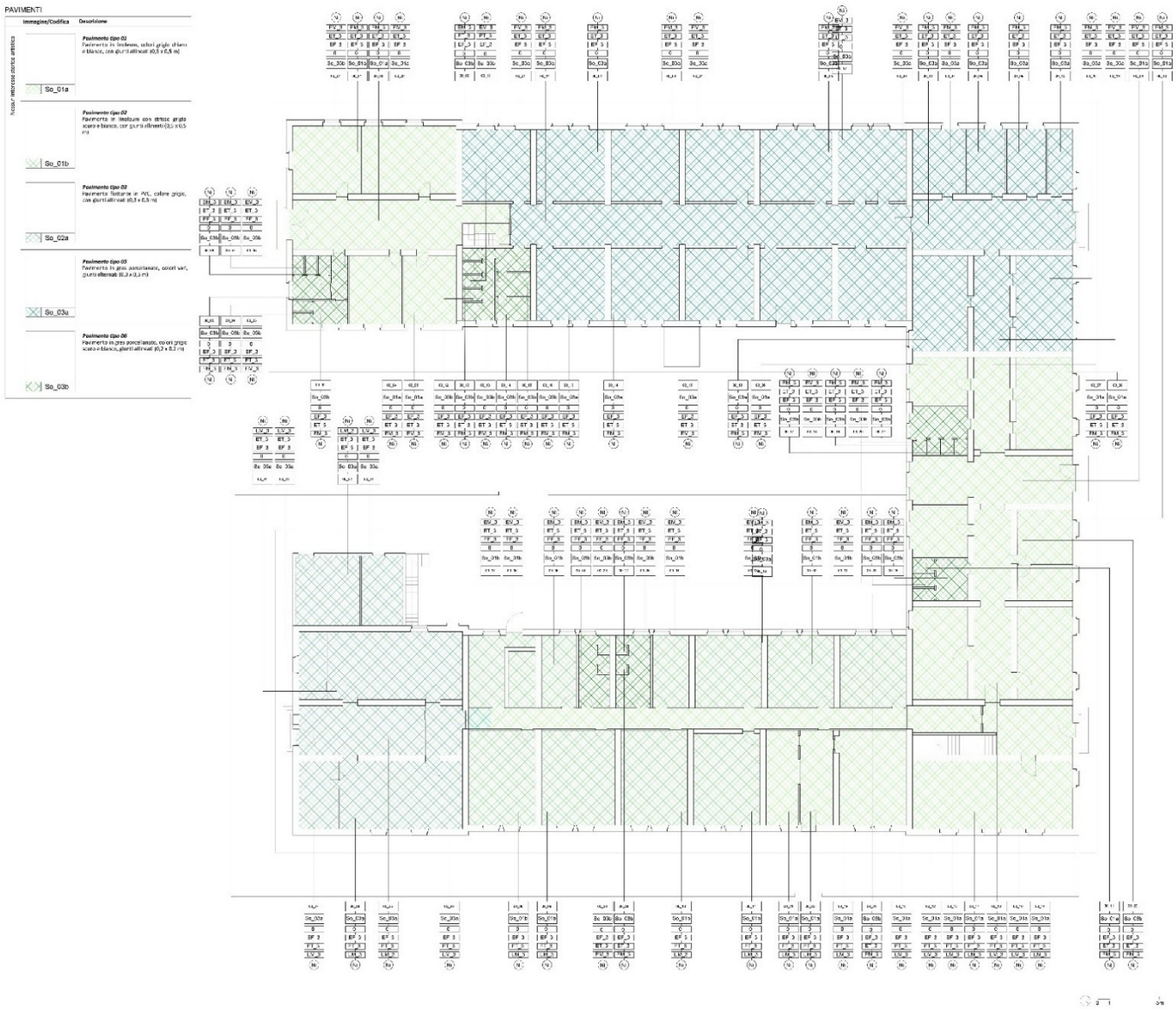
CASERMETTA 3S

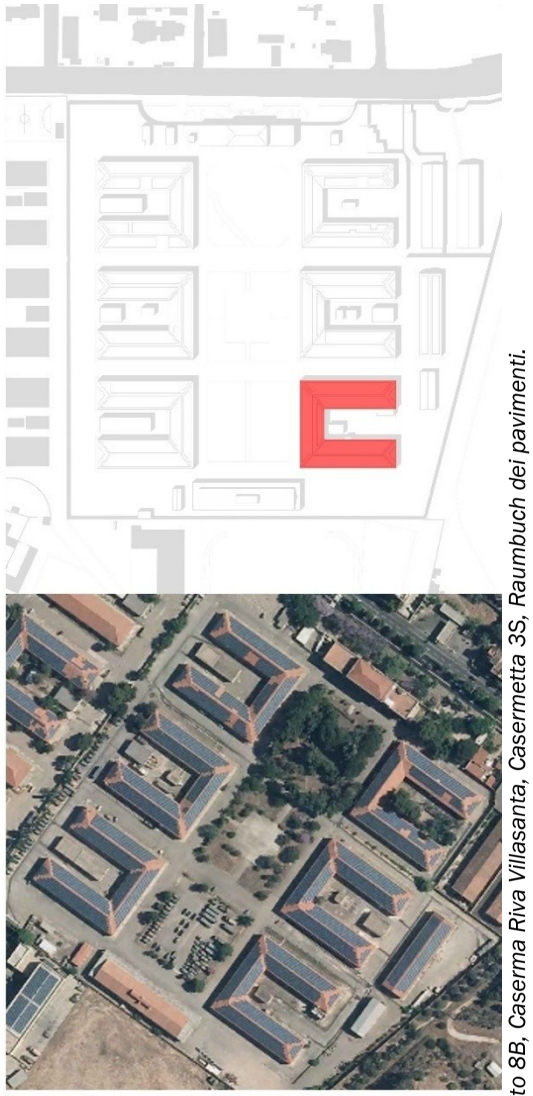
| Data: 28/07/2023 | RAUMBUCH MURI INTERNI | Scala: 1:200 |
|---|---|---|

*Fig. 160. Allegato 7E, Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, Raumbuch dei muri interni.*

# CASERMETTA 3S

PIANO TERRA



**01. CASERMA RIVA VILLASANTA**
**IN CAGLIARI**

**ALLEGATO 8B**

CASERMETTA 3S

| Data | RAUMBUCH PAVIMENTI | Scala |
|---|---|---|
| 20/07/2023 | | 1:200 |

*Fig. 161. Allegato 8B, Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, Raumbuch dei pavimenti.*

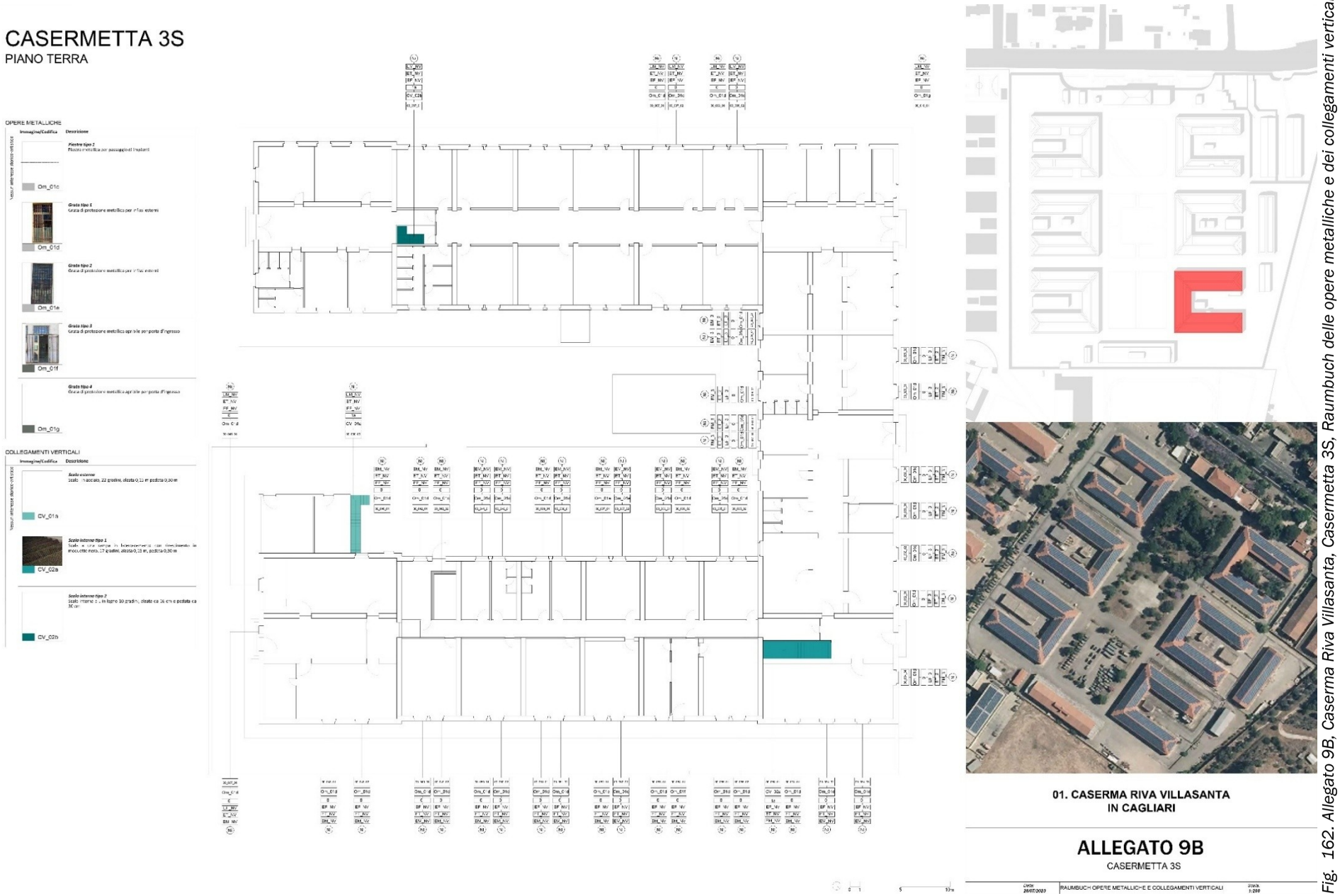



*Fig. 162. Allegato 9B, Caserma Riva Villasanta, Casermetta 3S, Raumbuch delle opere metalliche e dei collegamenti verticali.*

# 2 LA CASERMA PROMERS

## Introduzione

I Paesi Bassi hanno storicamente basato il proprio sistema energetico sul gas naturale, a seguito della scoperta nel 1959 del grande giacimento di Slochteren a Groningen, il più grande in Europa e il decimo al mondo. Questo ha favorito la diffusione capillare della rete di distribuzione del gas, tanto che ancora oggi la maggior parte delle abitazioni olandesi è riscaldata tramite questa fonte (OECD 2023), (De Jong, Pieterse e Jansma 2024). Nel 2019, ad esempio, oltre il 90% delle famiglie olandesi utilizzava ancora caldaie a gas naturale, una quota di gran lunga superiore alla media europea (27%) (OECD 2023).
Tuttavia, il progressivo esaurimento del giacimento e i problemi di instabilità del terreno che hanno causato terremoti indotti dalla produzione nella provincia di Groningen hanno spinto il governo a riconsiderare il proprio modello energetico. Dal 1991 si sono registrati numerosi eventi sismici, il più forte dei quali ha raggiunto magnitudo 3,5 nel 2012 (Vlek 2019). Le continue scosse hanno generato resistenza sociale, con danni strutturali agli edifici e richieste di chiusura da parte della popolazione locale (van der Voort 2015).
Di fronte a tali pressioni, il governo olandese ha deciso di chiudere definitivamente il giacimento nell'ottobre 2023, giustificando la scelta con la potenziale minaccia che, continuando l'estrazione, si verificassero terremoti di magnitudo maggiore (Bommer, Zoback e Elk 2024). Questa decisione ha rappresentato una svolta epocale nella politica energetica del Paese, che mira ora a sostituire progressivamente il gas con reti di teleriscaldamento sostenibili, pompe di calore elettriche e un maggiore ricorso a fonti rinnovabili, in linea con l'impegno a eliminare l'uso del gas naturale entro il 2050 (Mulder e Perey 2018) (OECD 2023).
Nonostante i progressi, i Paesi Bassi non sono ancora sulla traiettoria per centrare i target climatici europei. Per accelerare la transizione, dal 2018 è in vigore un divieto di installazione di caldaie a gas nei nuovi edifici, mentre l'Accordo sul Clima del 2019 ha fissato l'obiettivo di convertire 1,5 milioni di abitazioni e edifici esistenti a sistemi di riscaldamento sostenibili tra il 2022 e il 2030 (Government of the Netherlands 2019). Nel 2022 il governo ha introdotto l'obbligo, a partire dal 2026, di sostituire le caldaie a gas esistenti con soluzioni più sostenibili, in particolare si punta su sistemi basati su pompe di calore elettriche, fotovoltaico o su reti di teleriscaldamento sostenibili che sfruttano calore geotermico (A. I. IEA 2024).

Nei Paesi Bassi, lo sfruttamento della geotermia è relativamente recente: il primo doppietto geotermico profondo è stato realizzato con successo nel 2006. Dopo quel pozzo, ne sono stati realizzati altri 22 (Ministry of Economic Affairs and Climate Policy 2018).
Un doppietto consiste in due pozzi: uno di produzione, che estrae acqua calda a profondità tra 1,5 e 3 km, e uno di reiniezione, che reimmette l'acqua raffreddata nel serbatoio dopo lo scambio termico. Questo sistema chiuso consente di garantire la sostenibilità della risorsa e ridurre l'impatto ambientale.
Nel 2017 sono stati prodotti 3,4 PJ di calore geotermico (Ministry of Economic Affairs and Climate Policy 2018). I primi doppietti di successo hanno determinato un vero e proprio boom, con quasi 100 licenze di esplorazione geotermica rilasciate nel 2010 che coprivano vaste aree dei Paesi Bassi (Van Wees, et al. 2020).
Recentemente è stato pubblicato il documento programmatico "Masterplan Aardwarmte Nederland", redatto da DAGO (Dutch Association of Geothermal Operators); in questo documento si prevede che il numero di doppietti geotermici operativi passi a 175 entro il 2030 e a 700 entro il 2050.

Un ruolo interessante nella transizione energetica dei Paesi Bassi è svolto anche dal settore della Difesa, che ha elaborato una strategia specifica per ridurre l'impatto ambientale delle proprie attività. Nel **Defence Energy Transition Plan of Action** (2020-2022), derivato dalla **Defensie Energie en Omgevingsstrategie – DEOS**, gli obiettivi energetici sono stati tradotti in misure concrete per rendere più sostenibile l'organizzazione militare, tenendo conto sia delle risorse finanziarie disponibili che dei compiti costituzionali delle forze armate.
Per il dominio operativo sono stati fissati traguardi chiari: entro il 2030 la dipendenza dai combustibili fossili dovrà ridursi di almeno il 20% rispetto al 2010, e del 70% entro il 2050. Inoltre, sempre entro il 2030, almeno il 50% dell'energia necessaria nei campi militari dovrà provenire da fonti rinnovabili, con l'obiettivo di raggiungere la completa autosufficienza energetica al 2050.
All'interno del Defence Energy Transition Plan of Action, il patrimonio immobiliare militare – caserme, complessi residenziali e infrastrutture logistiche – rappresenta il settore più promettente per la sperimentazione di soluzioni energetiche innovative.

Il settore militare olandese sta dunque avviando un processo di integrazione delle fonti rinnovabili nelle proprie infrastrutture e la geotermia rappresenta una delle soluzioni più promettenti in questa direzione. Pur trovandosi ancora in fase sperimentale, il suo utilizzo nei siti della Difesa costituisce un passo significativo verso la riduzione della dipendenza dai combustibili fossili e l'obiettivo di lungo termine dell'autosufficienza energetica dei campi militari entro il 2050.

Proprio a partire da questo approccio, il caso studio di Naarden si inserisce come un laboratorio ideale: una struttura militare storica che, attraverso la sperimentazione di soluzioni basate sull'energia geotermica e sulle reti locali di distribuzione del calore, può diventare un esempio concreto di come coniugare la valorizzazione del patrimonio storico con la transizione energetica.
Nei paragrafi che seguono vengono illustrati i passaggi relativi alla modellazione energetica dello stato attuale dell'edificio, con l'applicazione dei relativi descrittori. Successivamente sono presentati gli interventi migliorativi ipotizzati e, ancora una volta, l'applicazione dei descrittori, così da verificarne l'efficacia anche nella fase di progetto. L'attenzione è posta in particolare sul testing dei descrittori in un contesto differente, caratterizzato da un'architettura fortificata parzialmente interrata, e non da una caserma a padiglioni come quella della Riva Villasanta a Cagliari. Questo confronto consente di valutare la robustezza e l'adattabilità del sistema di descrittori, evidenziando le potenzialità e i limiti del metodo quando applicato a tipologie edilizie militari profondamente diverse per morfologia, materiali e comportamento energetico.

## 2.1 LA MODELLAZIONE ENERGETICA

### 2.1.1 Individuazione della località climatica di riferimento

Poiché il caso studio è localizzato a Naarden (Paesi Bassi), ma il software Termolog consente simulazioni energetiche solo su database meteorologici italiani, si è resa necessaria l'individuazione di una località di riferimento. In questo passaggio i descrittori climatici hanno avuto un ruolo fondamentale, consentendo di confrontare in maniera oggettiva i parametri della città olandese con quelli di diverse città italiane.

Come fonte principale è stato utilizzato Meteostat.net, scelto per l'ampia copertura geografica, la disponibilità di dati aggiornati e la possibilità di confrontare in modo diretto le variabili climatiche (temperature medie, precipitazioni, vento, pressione atmosferica, umidità).
In una prima fase sono state analizzate numerose città del Nord Italia (tra cui Alessandria, Aosta, Bergamo, Bolzano, Cuneo, Genova, Udine, Venezia, Verona) al fine di individuare condizioni simili a quelle di Naarden. Il confronto sui dati del 2024 ha evidenziato che nessuna località italiana riproduce fedelmente il profilo climatico olandese; tuttavia, Alessandria si distingue come la più simile, con una temperatura media annuale identica (11,8 °C) e una velocità media del vento quasi sovrapponibile (12,8 km/h contro i 12 km/h di Naarden). La principale differenza riguarda il livello di precipitazioni, sensibilmente più elevato ad Alessandria.
Per consolidare i risultati, è stato effettuato un secondo confronto sui dati del 2023, che ha confermato la corrispondenza tra Naarden e Alessandria soprattutto per temperatura e ventosità, con valori di precipitazioni ancora più prossimi.
Sulla base di questa doppia verifica, Alessandria è stata scelta come località climatica di riferimento per le simulazioni in Termolog. I valori corrispondenti sono stati inseriti nella scheda generale della pratica energetica, nella scheda climatica di progetto e nella base dati mensile della stazione meteorologica di Alessandria-Lobbi, utilizzata per i calcoli dei fabbisogni energetici.

In questo quadro, i descrittori climatici e identificativi hanno permesso di tradurre i dati estratti dal software in un sistema strutturato, garantendo tracciabilità e confrontabilità con altri casi studio. Nelle tabelle successive (Tab. 1 e Tab. 2) sono riportati i descrittori compilati relativi rispettivamente al contesto climatico di riferimento e all'edificio analizzato.

| Città | T media (°C) | Precipitazioni (mm) | Vento Medio (km/h) | Pressione (hPa) |
|---|---|---|---|---|
| Naarden | 11.8 | 1064.3 | 12.0 | 1014.3 |

| Città | T media (°C) | Precipitazioni (mm) | Vento Medio (km/h) | Pressione (hPa) |
|---|---|---|---|---|
| Alessandria | 11.8 | 1569.8 | 12.8 | 1016.1 |
| Cuneo | 13.2 | 1196.3 | 8.5 | 1016.2 |
| Ivrea | 14.2 | 1521.2 | 6.5 | 1016.0 |
| Udine | 14.8 | 1365.2 | 8.3 | 1015.8 |
| Verona | 14.9 | 1287.4 | 7.3 | 1015.6 |
| Venezia | 15.1 | 1286.0 | 10.2 | 1015.5 |

*Tabella 138. Confronto dei principali parametri climatici tra Naarden e alcune città del Nord Italia (anno 2024).*

| Città | T media (°C) | Precipitazioni (mm) | Vento Medio (km/h) | Pressione (hPa) |
|---|---|---|---|---|

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Naarden | 11.8 | 1179.6 | 12.8 | 1014.0 |

| Città | T media (°C) | Precipitazioni (mm) | Vento Medio (km/h) | Pressione (hPa) |
|---|---|---|---|---|
| Alessandria | 12.1 | 1013.4 | 13.3 | 1015.7 |
| Cuneo | 12.8 | 850.4 | 7.7 | 1015.8 |
| Ivrea | 14.6 | 966 | 6.8 | 1015.4 |
| Udine | 14.4 | 1130.5 | 7.4 | 1015.2 |
| Verona | 15 | 772.4 | 7.3 | 1015.0 |
| Venezia | 14.9 | 1005.6 | 10.2 | 1014.9 |

*Tabella 139. Confronto dei principali parametri climatici tra Naarden e alcune città del Nord Italia (anno 2024).*

Dal confronto climatico con diverse città del Nord Italia (anno 2024) è emerso che nessuna località riproduce fedelmente il profilo di Naarden. Tuttavia, Alessandria risulta la più simile grazie a una temperatura media identica e a una ventosità pressoché equivalente, pur distinguendosi per precipitazioni più elevate. L'analisi dei dati del 2023 ha confermato la solidità di questa scelta, riducendo il rischio di anomalie temporanee e rafforzando l'adozione di Alessandria come riferimento climatico.

### 2.1.2 Localizzazione, dati climatici e descrittori identificativi dell'edificio

Per lo svolgimento della simulazione energetica è stato innanzitutto necessario definire il contesto climatico e geografico in cui si inserisce l'edificio oggetto di studio. L'approccio preliminare ha riguardato l'acquisizione dei dati relativi alla localizzazione, alla classificazione climatica del Comune, ai dati di progetto invernali ed estivi, nonché alle grandezze meteorologiche medie (temperature e umidità relativa mensili).
Nella scheda generale della pratica energetica (Fig. 163) sono stati definiti i parametri identificativi: anno di costruzione (1876), localizzazione e tipologia di intervento (ristrutturazione importante di secondo livello), oltre alla destinazione d'uso prevalente classificata come E.2 – Edifici adibiti a uffici e assimilabili, in linea con la funzione amministrativa e lavorativa dell'edificio. L'unica eccezione è costituita da un piccolo spazio adibito a ristorante, che tuttavia non incide significativamente sulla classificazione complessiva.
Successivamente, è stata compilata la scheda climatica del comune di Alessandria (Fig. 164), nella quale sono riportati i parametri climatici di progetto secondo normativa: temperatura esterna invernale di riferimento (12 °C), temperatura massima estiva (30 °C), escursione termica giornaliera (10 K) e velocità media del vento (12 m/s). Tali valori, come discusso nel confronto preliminare con i dati di Naarden, risultano sufficientemente rappresentativi per lo scenario simulativo.
Infine, i dati climatici mensili standard della stazione meteorologica di Alessandria-Lobbi (Fig. 165) mostrano l'andamento delle temperature medie esterne (Te), delle ore di soleggiamento e delle precipitazioni. Questo quadro consente di avere un riferimento costante e strutturato per il calcolo dei fabbisogni energetici, garantendo una base metodologica solida e trasparente.
In questo quadro, l'impiego dei descrittori climatici e prestazionali assume un ruolo fondamentale per garantire la tracciabilità e la confrontabilità dei dati utilizzati nelle simulazioni. I descrittori consentono infatti di tradurre le caratteristiche climatiche, morfologiche e funzionali dell'edificio in valori misurabili, facilmente confrontabili e coerenti con le normative vigenti.

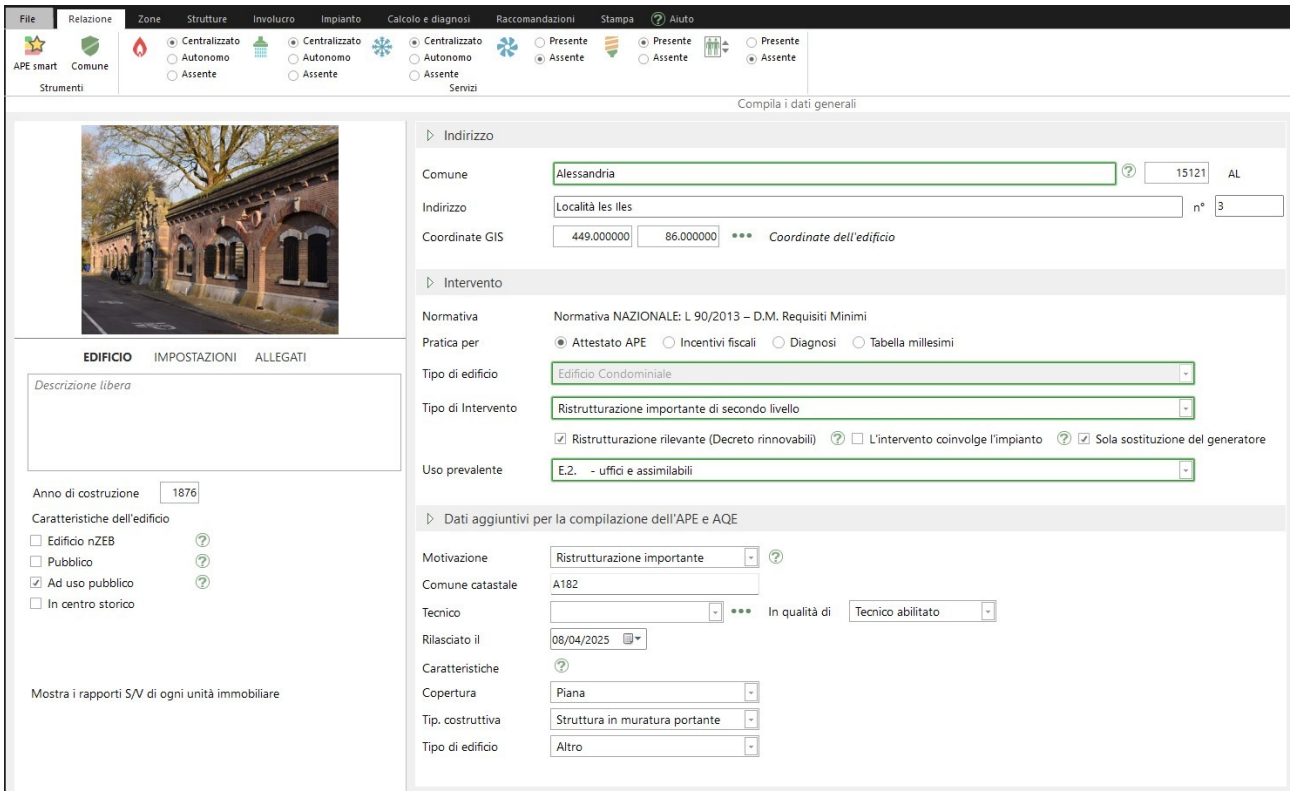


*Fig. 163. Scheda generale della pratica energetica in Termolog, con dati identificativi dell'edificio.*

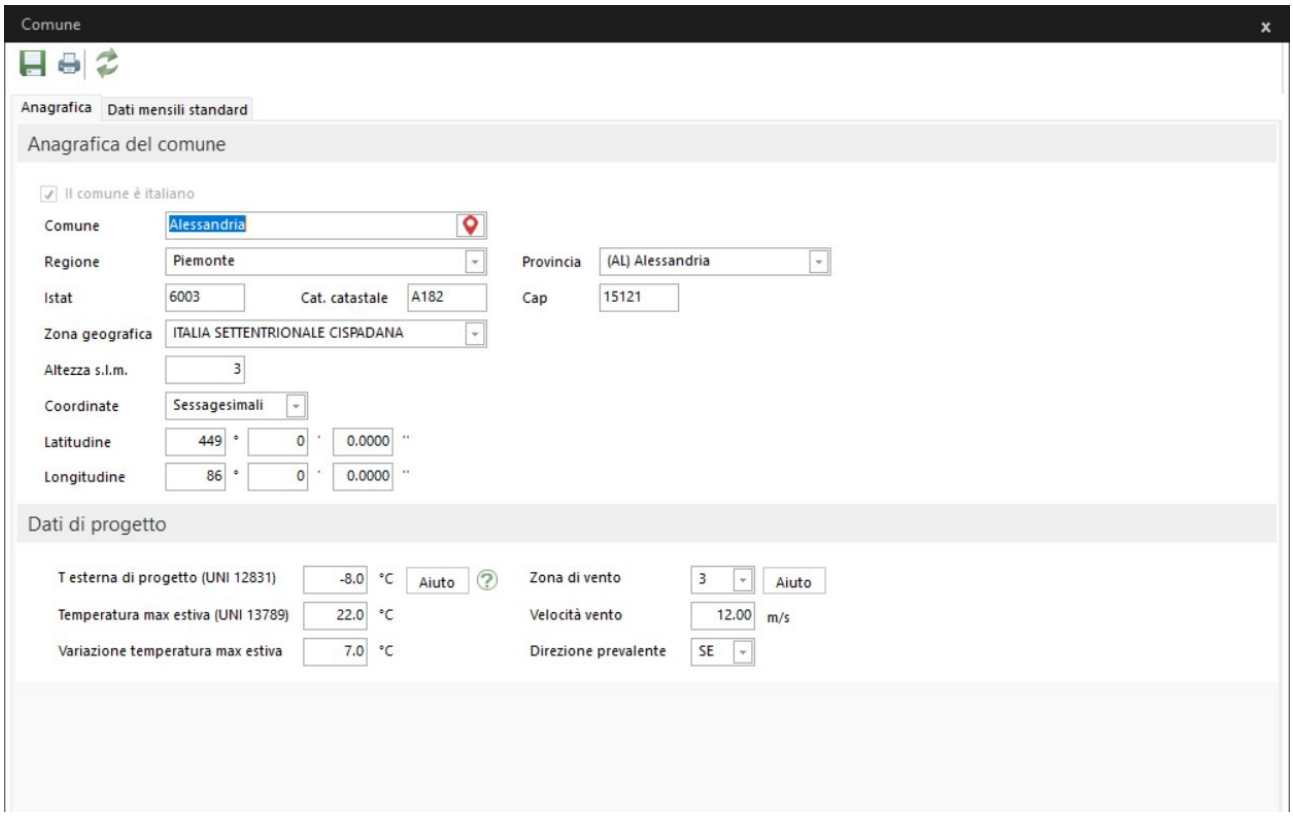



*Fig. 164. Scheda climatica del comune di Alessandria in Termolog, con i parametri di progetto invernali ed estivi.*

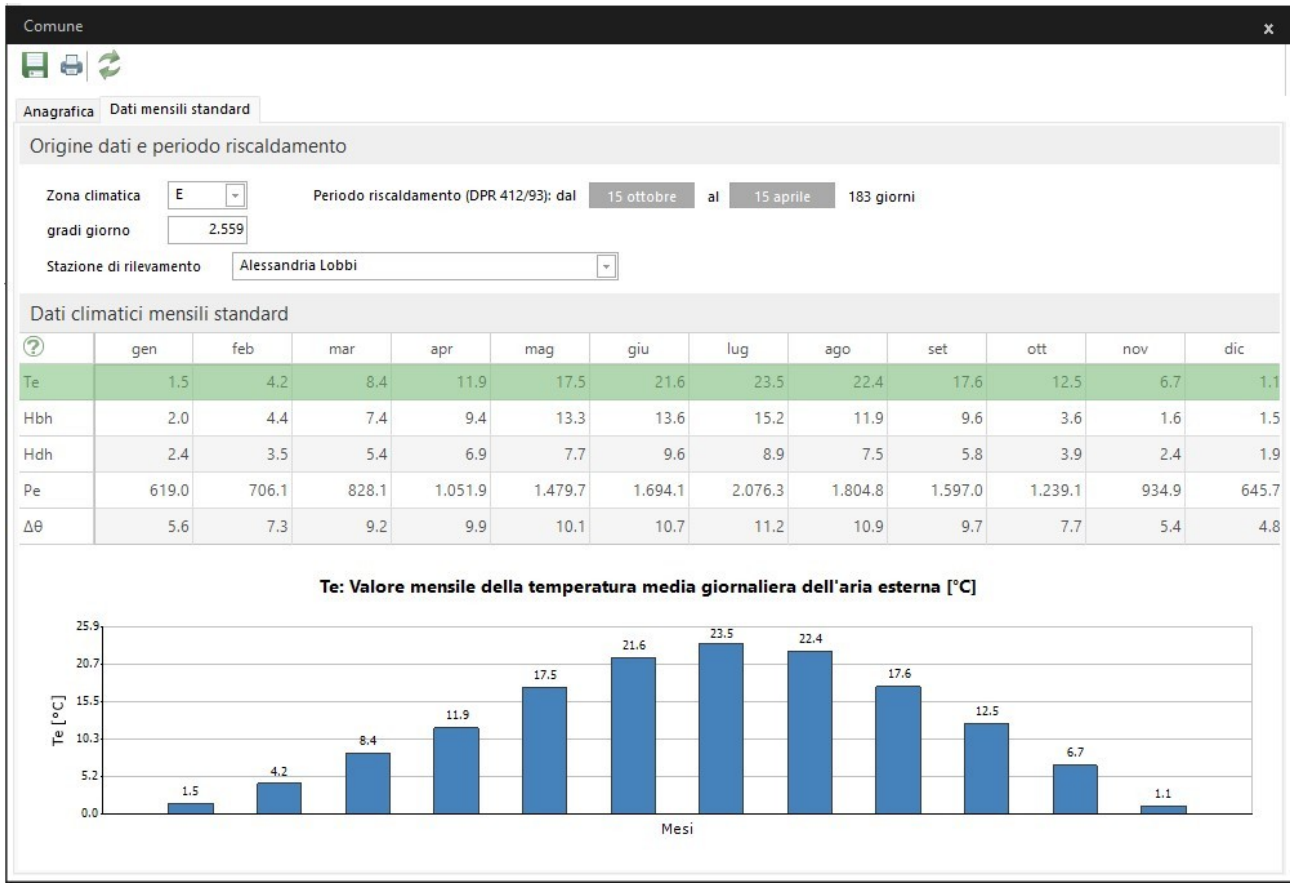



*Fig. 165. Dati climatici mensili standard della stazione di Alessandria-Lobbi, con andamento delle temperature medie esterne e parametri di soleggiamento e precipitazioni.*

L'applicazione dei descrittori tecnico-prestazionali e impiantistici al caso di studio della caserma di Naarden consente di tradurre le caratteristiche specifiche del manufatto in un sistema di parametri confrontabili e coerenti con i criteri metodologici precedentemente definiti. Tali descrittori costituiscono infatti il ponte tra la fase di analisi preliminare e la successiva modellazione energetica, permettendo di inquadrare l'edificio sia rispetto al contesto climatico sia rispetto alle sue peculiarità costruttive e funzionali.

Per la località di Alessandria, assunta come riferimento climatico per il caso studio di Naarden, sono stati compilati i principali descrittori climatici e localizzativi, che permettono di inquadrare il contesto ambientale in cui si colloca il manufatto. Essi comprendono parametri come la zona climatica, i gradi-giorno, le temperature e l'umidità di progetto, l'escursione termica, la velocità del vento e l'altitudine del sito (Tabella 140).

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CLIMATICI DELLA LOCALITA' | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Zona climatica: | E | - |
| Regione | Piemonte | - |
| Comune di riferimento | Alessandria | - |
| Coordinate geografiche: | Lat. 44,9 – Long. 8,6 | ° |
| Edificio situato in centro storico | Si | - |
| Gradi Giorno invernali (GG): | 2.559 | GG |
| Temperatura esterna di progetto invernale: | -8,0 | °C |
| Umidità relativa esterna invernale: | - | - |
| Temperatura max estiva: | 22,0 | °C |
| Umidità relativa esterna estiva: | - | - |
| Escursione termica giornaliera estiva: | 7 | K |
| Velocità del vento di progetto: | 12 | m/s |
| Altitudine del sito: | 3 | m s.l.m. |

*Tabella 140. Descrittori climatici e localizzativi del manufatto.*

A questi dati si affiancano i descrittori identificativi dell'edificio, che ne restituiscono le caratteristiche essenziali: anno di costruzione, destinazione d'uso, tipologia costruttiva, eventuali interventi eseguiti e classificazione energetica, fornendo così una base conoscitiva utile per le successive fasi di analisi energetica e prestazionale (Tabella 141).

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI IDENTIFICATIVI DELL'EDIFICIO | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Oggetto | Caserma Promers | - |
| Nuova costruzione | No | - |
| Destinazione d'uso | Uffici (E2 – edifici adibiti a uffici e assimilabili) | - |
| Riqualificazione energetica | No | - |

| | | |
|---|---|---|
| Classe energetica globale dell'edificio | Da definire | - |
| Codice certificato di prestazione energetica | Non disponibile | - |
| Data di emissione | Non disponibile | - |
| Validità | Non disponibile | - |
| Zone termiche | 2 | - |
| Nessun intervento eseguito sulla struttura dopo la costruzione | Sì | - |
| Tipo di intervento eseguito | - | - |

*Tabella 141. Descrittori identificativi dell'edificio.*

### 2.1.3 Descrizione dell'edificio e definizione delle zone termiche

Oggi, la Caserma Promers ha cambiato radicalmente funzione rispetto al suo passato militare. Dopo decenni di utilizzo da parte dell'esercito locale, l'edificio è stato riconvertito e riadattato per accogliere nuove attività compatibili con il contesto storico e architettonico. Attualmente, la caserma ospita un ristorante e diversi uffici. Il ristorante si affaccia nella zona più retrostante del manufatto, mentre gli uffici sono distribuiti nei restanti ambienti.

Nella sezione "Zone" del software, è stata definita l'unità immobiliare oggetto dell'Attestato di Prestazione Energetica. Nel caso specifico, l'edificio è costituito da un'unica unità immobiliare. Tale unità si sviluppa interamente al piano terra di un edificio composto da un solo livello fuori terra.
Sempre nella sezione "Zone" del software, sono state create le zone termiche presenti all'interno dell'edificio, la cui individuazione è indispensabile per la corretta modellazione degli impianti. La Caserma Promers è stata suddivisa, a fini impiantistici, in due zone termiche principali: quella relativa al ristorante, ai disimpegni e agli uffici situati nell'ala destra e quella relativa agli uffici collocati nell'ala sinistra. La distinzione tra queste aree è evidenziata dalla presenza di un corridoio longitudinale centrale, che svolge la funzione distributiva.
Va però chiarito che, dal punto di vista tecnico, questa distinzione non rappresenta una vera differenza tra zone termiche, poiché l'intero edificio è climatizzato alla stessa temperatura, con le medesime modalità di regolazione e negli stessi orari. Anche se le due ali sono servite da impianti distinti, entrambi utilizzano caldaie della stessa tipologia e sono gestiti in modo identico. In base alla definizione corretta di "zona termica" – cioè una porzione di edificio riscaldata con le stesse logiche di regolazione – l'edificio dovrebbe quindi essere considerato come un'unica zona termica.

La suddivisione adottata, tuttavia, segue la logica impiantistica con cui l'edificio è stato organizzato, che prevede un certo grado di autonomia tra le due aree. In dettaglio:

#### Zona termica 1

La prima macro area è stata denominata "Uffici SX e corridoi" e classificata come E.2 – Uffici e assimilabili (Fig. 166-167). Le caratteristiche geometriche della zona, comprese le superfici utili, non sono state inserite manualmente, ma generate automaticamente dal software sulla base degli ambienti precedentemente ridisegnati in pianta.
All'interno della prima zona termica sono stati individuati i seguenti servizi: impianto per la produzione di acqua calda sanitaria e impianto di illuminazione. Non è invece presente alcun sistema per la climatizzazione estiva, in quanto l'edificio non è dotato di impianti di raffrescamento.

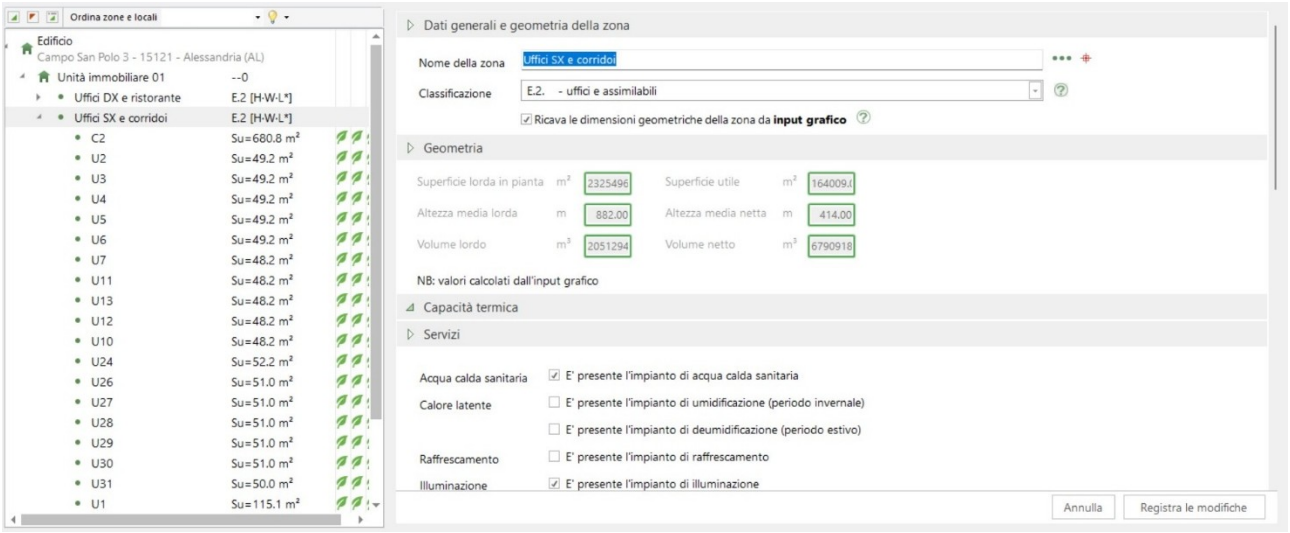



*Fig. 166. Zona termica " Uffici SX e corridoi", ala sinistra dell'edificio.*




*Fig. 167. In giallo, gli ambienti appartenenti alla zona termica "Uffici SX e corridoi".*

## Zona termica 2

La seconda macro area è stata denominata "Uffici DX e ristorante" e classificata come *E.2 – Uffici e assimilabili* (Fig. 168-169). Le caratteristiche geometriche della zona, comprese le superfici utili, non sono state inserite manualmente, ma generate automaticamente dal software sulla base degli ambienti ridisegnati in pianta. L'input grafico è stato infatti costruito all'interno dell'interfaccia del software e successivamente associato a questa specifica zona termica.

All'interno della terza zona termica, analogamente alla prima, sono stati individuati i seguenti servizi presenti: impianto per la produzione di acqua calda sanitaria e impianto di illuminazione. Non è invece presente alcun sistema per la climatizzazione estiva, in quanto l'edificio non è dotato di impianti di raffrescamento.

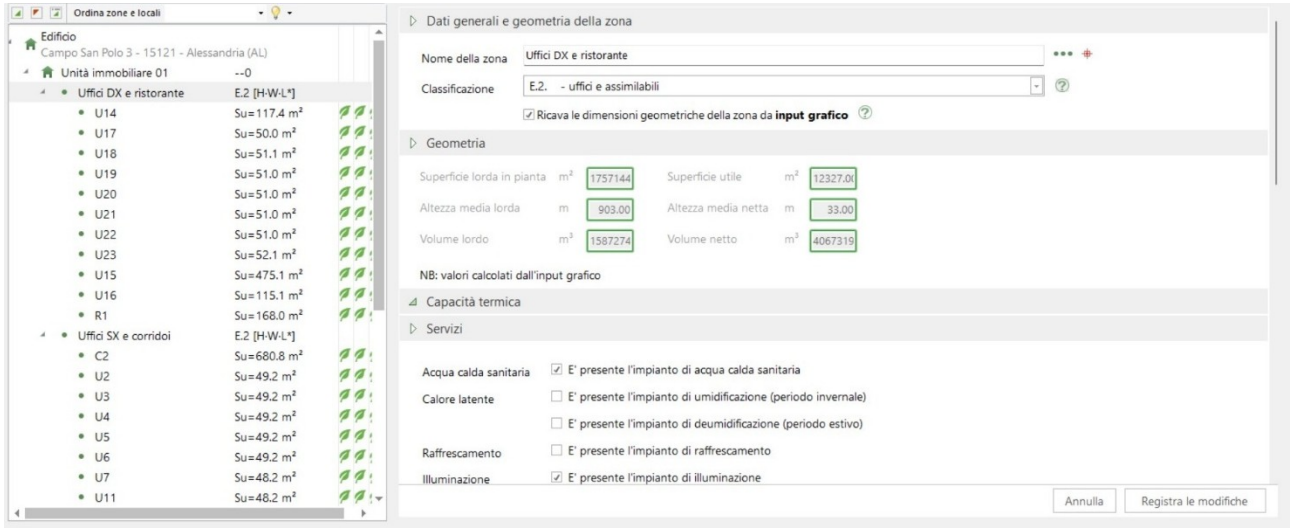



*Fig. 168. Zona termica "Uffici DX e ristorante", ala destra dell'edificio.*

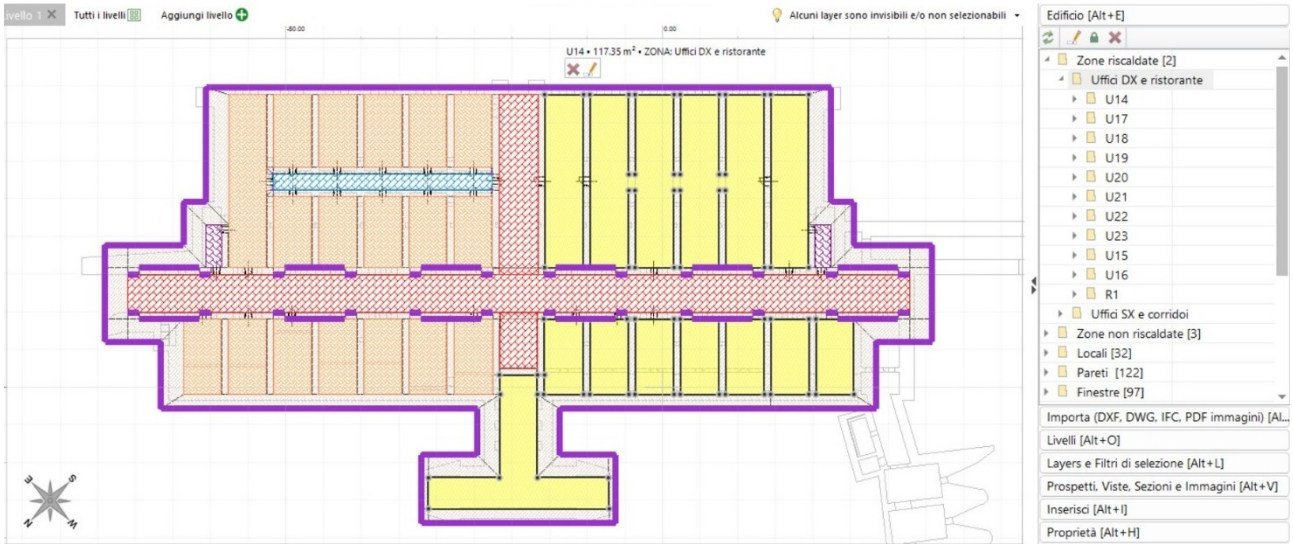



*Fig. 169. In giallo, gli ambienti appartenenti alla zona termica "Uffici DX e ristorante".*

All'interno di ciascuna zona termica sono stati poi definiti i relativi locali. Questa operazione ha permesso al software di calcolare in modo più accurato la superficie utile calpestabile, escludendo correttamente i tramezzi interni. In questo modo, il valore ottenuto risulta maggiormente rappresentativo rispetto a un inserimento manuale, garantendo una maggiore precisione nelle successive elaborazioni energetiche.
Oltre alle tre zone termiche riscaldate, è stata individuata anche una zona non riscaldata, corrispondente a un disimpegno localizzato nella parte retrostante dell'edificio, sul lato sinistro (Fig. 171). Questo ambiente, privo di finestre e quindi completamente cieco, non è servito da alcun impianto di climatizzazione e non presenta apporti energetici significativi. La sua funzione è esclusivamente distributiva o di passaggio, ed è stato quindi opportunamente escluso dal calcolo del fabbisogno termico per la climatizzazione invernale. Per tale ragione, come fattore di correzione è stata inserita l'opzione "piano interrato o seminterrato – senza finestre o serramenti esterni".

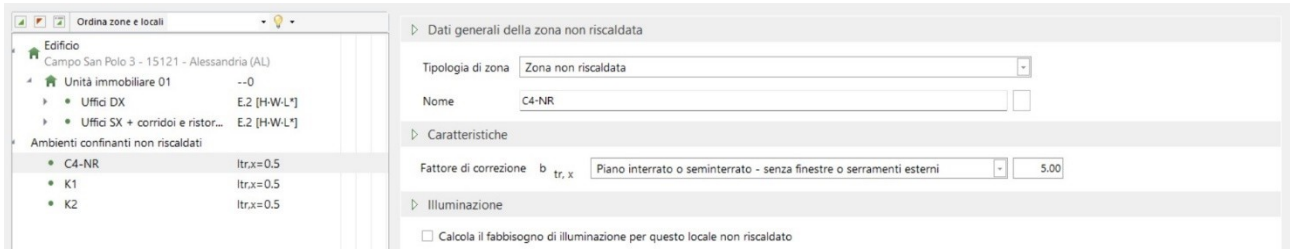



*Fig. 170. Zona con ambiente non riscaldato localizzato nell'ala sinistra dell'edificio.*

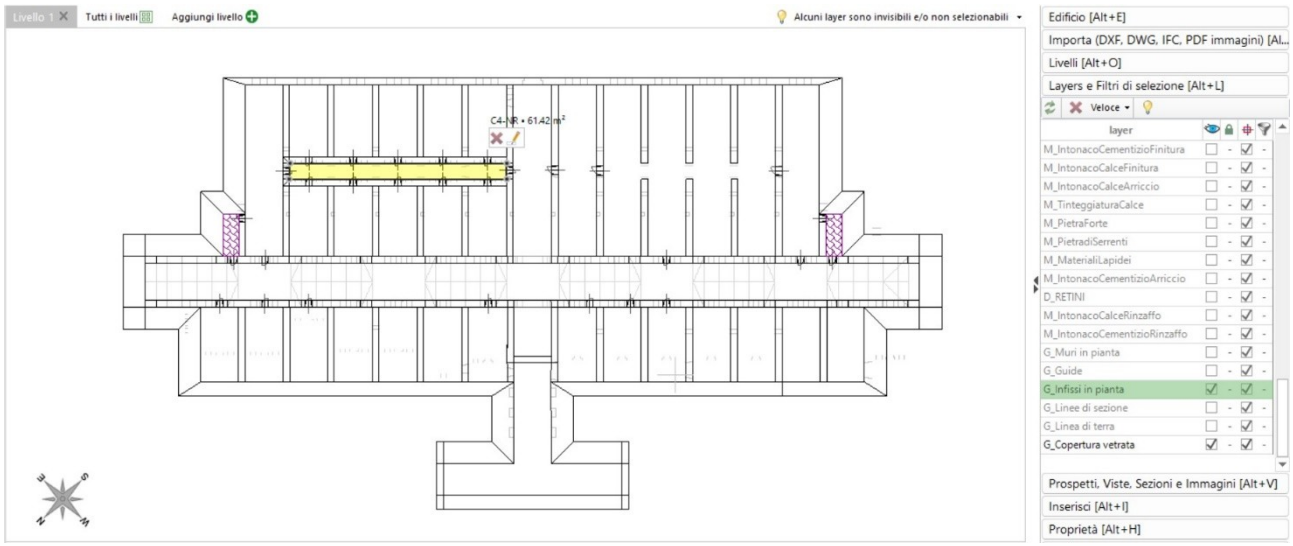



*Fig. 171. Ambiente non riscaldato localizzato nell'ala sinistra dell'edificio.*

### 2.1.4 L'inserimento degli impianti

*Zona termica 1 (Uffici SX e corridoi)*

Il sistema impiantistico a servizio della zona termica identificata con la sigla SIH1 + SIW1 è progettato per coprire sia il riscaldamento invernale, con un sistema di tipo idronico che utilizza acqua come fluido termovettore, sia la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) (Fig. 172).
La centrale termica è costituita da due generatori a gas metano, modello Bosch Nefit Condens 9000i W HR50, installati all'interno di ambienti riscaldati (Fig. 173). I generatori sono configurati per il funzionamento in cascata: uno opera in condizioni di carico ordinario, mentre il secondo si attiva automaticamente in presenza di un fabbisogno termico elevato, ad esempio durante i picchi stagionali. Entrambi sono installati all'interno di ambienti riscaldati, condizione che contribuisce a ridurre le dispersioni e a migliorare le prestazioni complessive del sistema.
La distribuzione del calore all'interno della zona termica in questione avviene tramite radiatori installati su pareti interne, alimentati ad acqua calda. I terminali di emissione operano con una temperatura di mandata pari a 80 °C e una temperatura di ritorno di 65 °C, corrispondenti a una temperatura media del fluido di 72,5 °C e a un salto termico di circa 52,5 °C rispetto all'ambiente (Fig. 174).
La potenza termica di progetto emessa dal sistema di radiatori risulta pari a 58.986 W, distribuita attraverso un totale di 50 elementi collegati in parallelo. Questa configurazione consente di garantire il comfort termico interno e la copertura del fabbisogno di riscaldamento, in coerenza con le temperature di esercizio impostate a livello di centrale termica.

Le principali caratteristiche dell'impianto sono sintetizzate nella Tabella 142 relativa ai descrittori del comportamento tecnico prestazionale del manufatto, con focus sui gruppi termici presenti nella zona termica 1.

| **DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO** | |
|---|---|
| GRUPPI TERMICI | |
| CODICE COMPENDIO | NRD |
| CODICE MANUFATTO | CPRS |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| GENERATORE | |
| Codice elemento | GEN_SX_01<br>GEN_SX_02 |
| Tipologia generatore | Caldaia a condensazione<br>Bosch Nefit Condens 9000i W HR50 |
| Alimentazione | Gas metano |
| Anno di installazione | 2018 |
| Potenza termica | 4,8–48 kW |
| Temperatura mandata | 80 °C |
| Temperatura ritorno | 65 °C |
| Zona di apparenza | Zona Termica 1 – Uffici SX e corridoi |
| Sistema di distribuzione | Radiatori a parete |
| Isolamento tubazioni | - |
| RETI DI DISTRIBUZIONE E TERMINALI | |
| Codice elemento | TER_SX_01 |
| Tipologia | Radiatori a parete |
| Materiale | - |
| Dimensioni | - |
| Numero dei terminali per tipologia | 50 elementi complessivi |

| | |
|---|---|
| Locali di appartenenza | Ambienti U1, U2, U3, U4, U5, U6, U7, U11, U13, U12, U10, U24, U26, U27, U28, U29, U30, U31, C1, C2, C3 |

*Tabella 142. Descrittori identificativi dei gruppi termici del manufatto, applicati alla zona termica 1.*

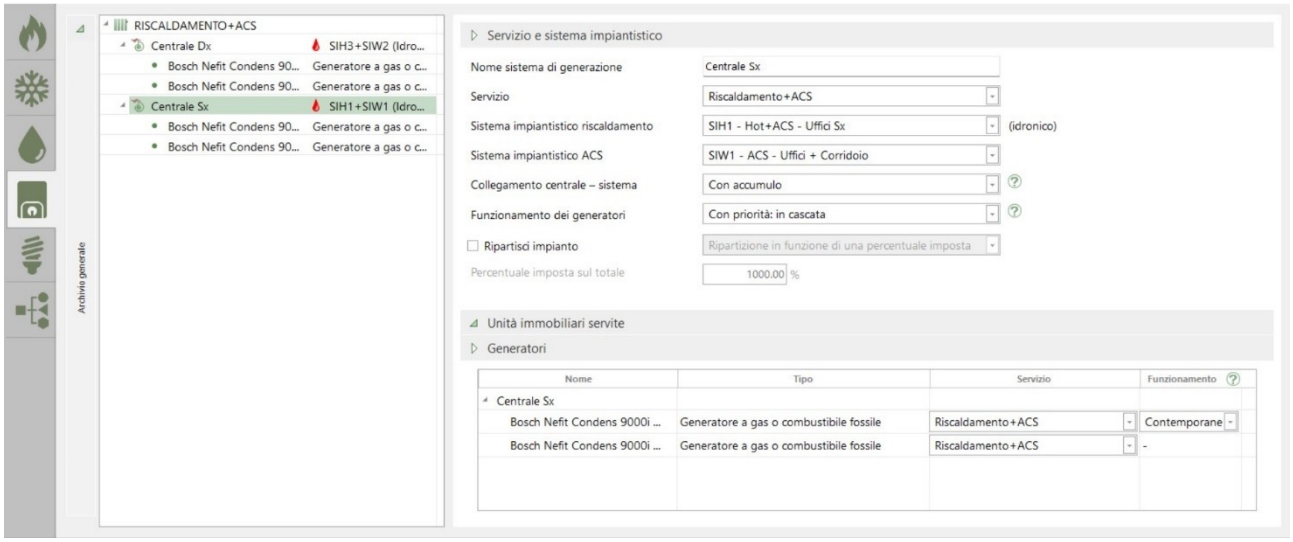



*Fig. 172. Configurazione del sistema impiantistico SIH1 + SIW1 (Centrale Sx) per riscaldamento e produzione di ACS, con due caldaie a condensazione Bosch Nefit Condens 9000i in cascata.*

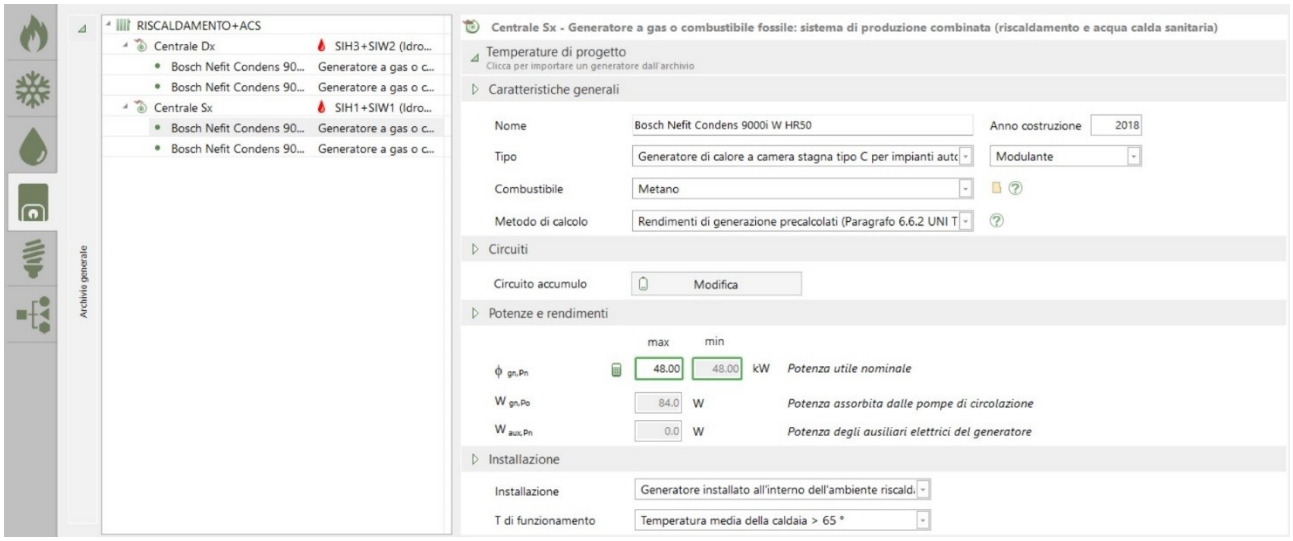



*Fig. 173. Scheda tecnica di una delle caldaie a condensazione Bosch Nefit Condens 9000i W HR50, alimentata a metano, con potenza utile nominale modulante fino a 48 kW.*

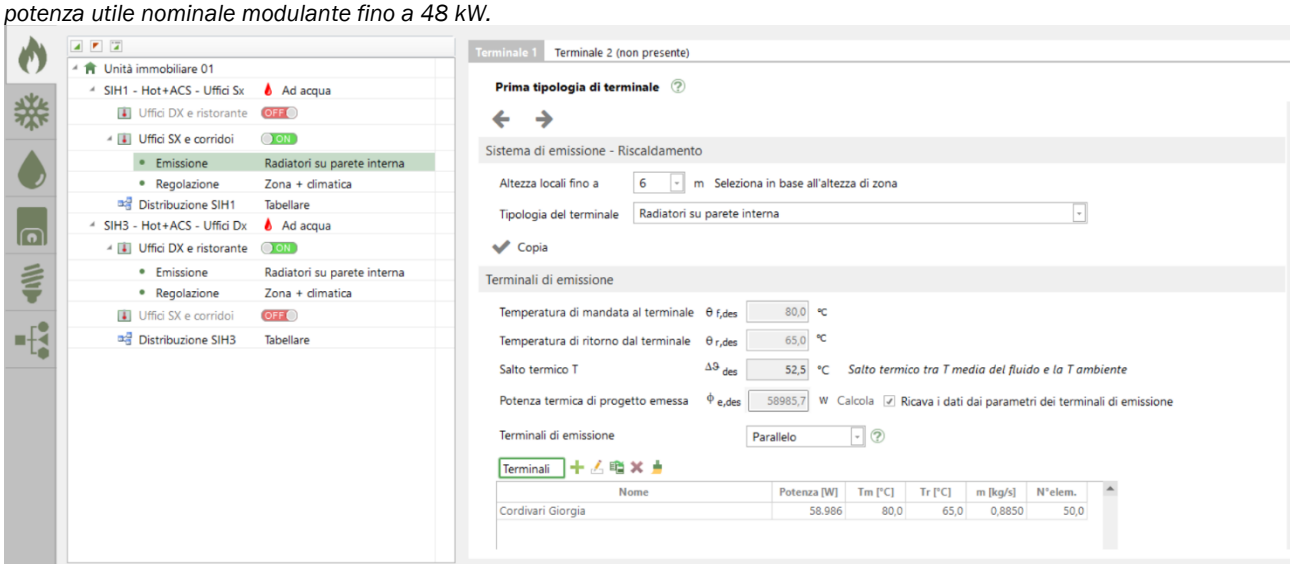



*Fig. 174. Configurazione dei terminali di emissione: radiatori a parete interna dimensionati per una temperatura di mandata di 80 °C e ritorno di 65 °C.*

*Zona termica 2 (Uffici DX e ristorante)*

Il sistema impiantistico a servizio della zona termica identificata con la sigla SIH3 + SIW2 è progettato per coprire sia il riscaldamento invernale, con un sistema di tipo idronico che utilizza acqua come fluido termovettore, sia la produzione di acqua calda sanitaria (ACS) (Fig. 175).
La centrale termica è costituita da due caldaie a condensazione, modello Bosch Nefit Condens 9000i W HR50 (anno di installazione 2019), alimentate a metano (Fig. 176). I generatori presentano un campo di modulazione compreso tra 4,8 e 48 kW e sono configurati per il funzionamento in cascata: una caldaia copre il fabbisogno ordinario, mentre la seconda entra in funzione automaticamente nei momenti di carico più elevato, ad esempio durante i picchi stagionali. La potenza complessiva disponibile in centrale risulta pertanto pari a circa 96 kW.
Entrambi i generatori sono installati all'interno di ambienti riscaldati, condizione che contribuisce a ridurre le dispersioni e a migliorare le prestazioni complessive del sistema. L'impianto è realizzato con collegamento ad accumulo per la produzione di ACS, al fine di garantire continuità di servizio e un miglior rendimento globale.
Anche in questo caso, la distribuzione del calore all'interno della zona termica in questione avviene tramite radiatori installati su pareti interne, alimentati ad acqua calda. I terminali di emissione operano con una temperatura di mandata pari a 80 °C e una temperatura di ritorno di 65 °C, corrispondenti a una temperatura media del fluido di 72,5 °C e a un salto termico di circa 52,5 °C rispetto all'ambiente (Fig. 177).
La potenza termica di progetto emessa dal sistema di radiatori risulta pari a 20.055 W, distribuita attraverso un totale di 17 elementi collegati in parallelo. Questa configurazione consente di garantire il comfort termico interno e la copertura del fabbisogno di riscaldamento, in coerenza con le temperature di esercizio impostate a livello di centrale termica.

Le principali caratteristiche dell'impianto sono sintetizzate nella Tabella 143 relativa ai descrittori del comportamento tecnico prestazionale del manufatto, con focus sui gruppi termici presenti nella zona termica 2.

| **DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO** | |
|---|---|
| GRUPPI TERMICI | |
| CODICE COMPENDIO | NRD |
| CODICE MANUFATTO | CPRS |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| GENERATORE | |
| Codice elemento | GEN_DX_01<br>GEN_DX_02 |
| Tipologia generatore | Caldaia a condensazione<br>Bosch Nefit Condens 9000i W HR50 |
| Alimentazione | Gas metano |
| Anno di installazione | 2018 |
| Potenza termica | 4,8–48 kW |
| Temperatura mandata | 80 °C |
| Temperatura ritorno | 65 °C |
| Zona di apparenza | Zona Termica 2 – Uffici DX e ristorante |
| Sistema di distribuzione | Radiatori a parete |
| Isolamento tubazioni | - |
| RETI DI DISTRIBUZIONE E TERMINALI | |
| Codice elemento | TER_DX_01 |
| Tipologia | Radiatori a parete |
| Materiale | - |

| | |
|---|---|
| Dimensioni | - |
| Numero dei terminali per tipologia | 17 elementi complessivi |
| Locali di appartenenza | Ambienti U14, U15, U16, U17, U18, U19, U20, U21, U22, U23, R1 |

*Tabella 143. Descrittori identificativi dei gruppi termici del manufatto, applicati alla zona termica 2.*

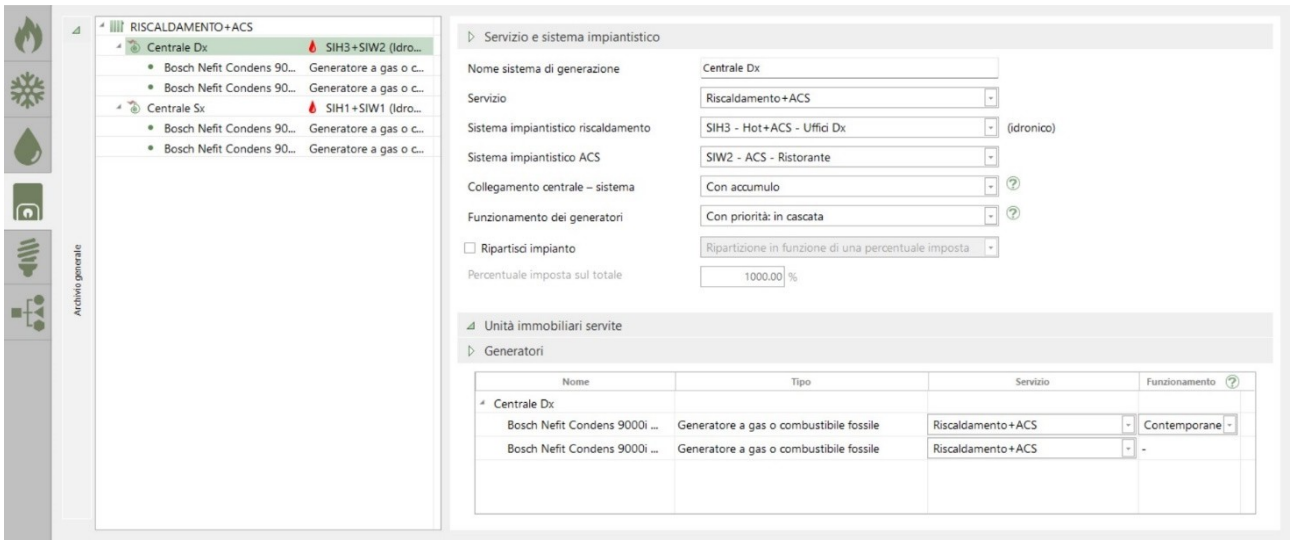



*Fig. 175. Configurazione del sistema impiantistico SIH3 + SIW2 (Centrale Dx) per riscaldamento e produzione di ACS, con due caldaie a condensazione Bosch Nefit Condens 9000i in cascata.*

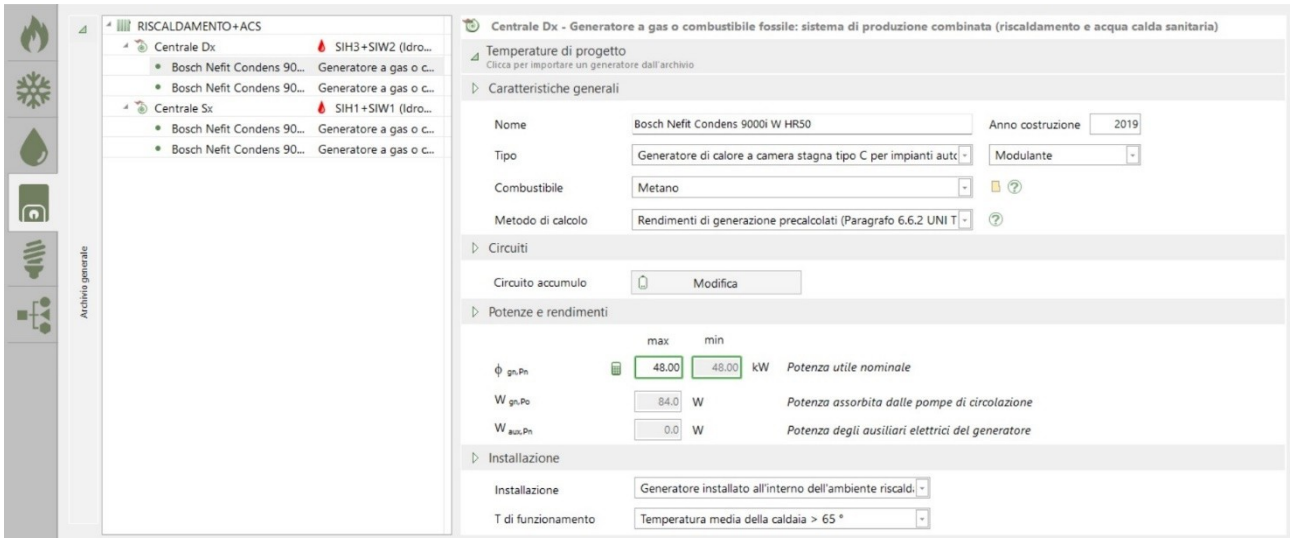



*Fig. 176. Scheda tecnica di una delle caldaie a condensazione Bosch Nefit Condens 9000i W HR50, alimentata a metano, con potenza utile nominale modulante fino a 48 kW.*

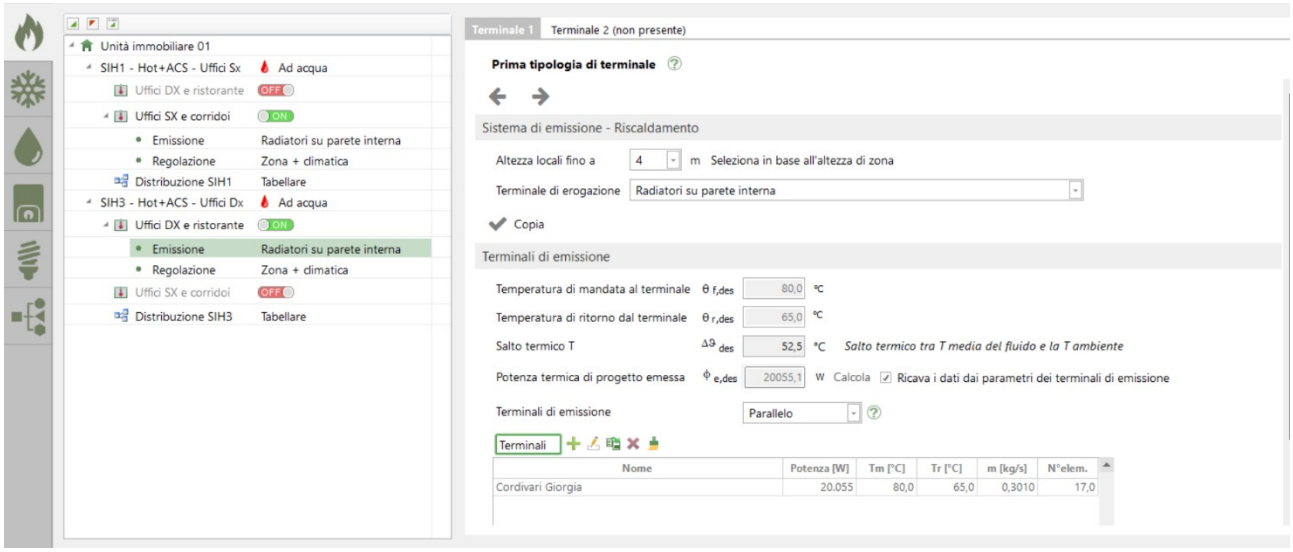



*Fig. 177. Configurazione dei terminali di emissione: radiatori a parete interna dimensionati per una temperatura di mandata di 80 °C e ritorno di 65 °C.*

### 2.1.5 La definizione dell'involucro

L'involucro edilizio della Caserma Promers si caratterizza per un'elevata complessità, legata soprattutto alla conformazione semi-interrata dell'edificio, che determina condizioni termiche differenti tra le varie porzioni della struttura. Ai fini della modellazione energetica, l'analisi si è concentrata sulla definizione delle stratigrafie degli elementi opachi – comprendenti muri perimetrali, solai e coperture – e di quelle relative agli elementi trasparenti, con particolare riferimento agli infissi.

#### *2.1.5.1 Chiusure opache verticali*

Per una corretta valutazione delle dispersioni termiche e delle interazioni tra l'edificio e l'ambiente circostante, le strutture verticali opache sono state suddivise in cinque categorie principali. Si distinguono innanzitutto le pareti esterne a vista, corrispondenti alla facciata principale, e le pareti esterne controterra, che si differenziano in laterali e retrostanti in relazione alla loro esposizione. A queste si aggiungono le pareti interne verso ambienti non riscaldati, che contribuiscono a definire le dispersioni verso volumi non climatizzati, e le pareti interne verso ambienti riscaldati, rilevanti per la valutazione dei flussi di calore tra zone con condizioni termoigrometriche differenti.

**PAR007 – Parete esterna a vista (facciata principale)**

Questa è l'unica parete dell'edificio completamente esposta all'esterno e non a contatto con il terreno; corrisponde alla facciata principale della Caserma Promers (Fig. 178). Si tratta di una struttura massiccia realizzata interamente in mattoni pieni faccia a vista, con uno spessore complessivo di 90 cm (Fig. 179).
Dal punto di vista termico, presenta una trasmittanza termica pari a 0,704 W/m²K, valore che riflette le caratteristiche del materiale e l'assenza di isolamento aggiuntivo. La resistenza termica totale risulta pari a 1,420 m²K/W, mentre la massa superficiale è pari a 1.620 kg/m², confermando l'elevata inerzia termica della parete.

Per la parete PAR007 è stata effettuata la compilazione dei descrittori relativi alle chiusure opache verticali, al fine di caratterizzarne le proprietà geometriche, materiche e prestazionali. I dati riportati (Tabella 144) descrivono la stratigrafia, lo spessore, le caratteristiche termiche e la massa superficiale della muratura in laterizio pieno, oltre ai parametri di scambio termico con l'ambiente interno ed esterno, fornendo un quadro completo del comportamento energetico dell'elemento analizzato.

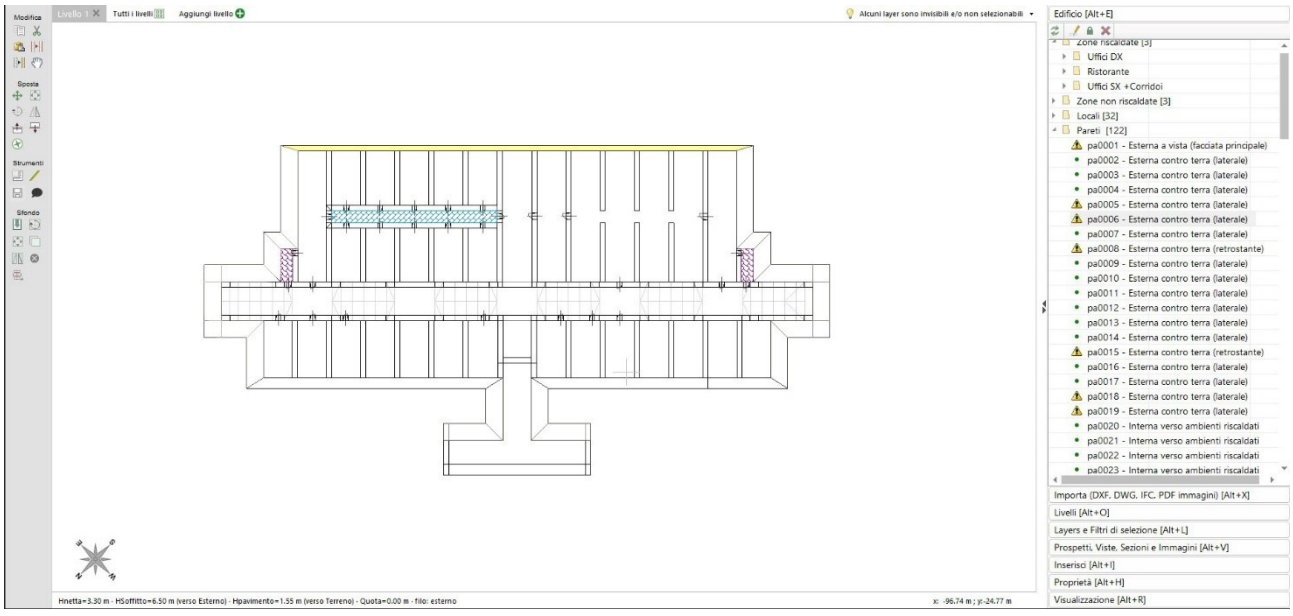


*Fig. 178. Evidenziazione grafica della tipologia di PAR007 all'interno del modello realizzato su Termolog.*

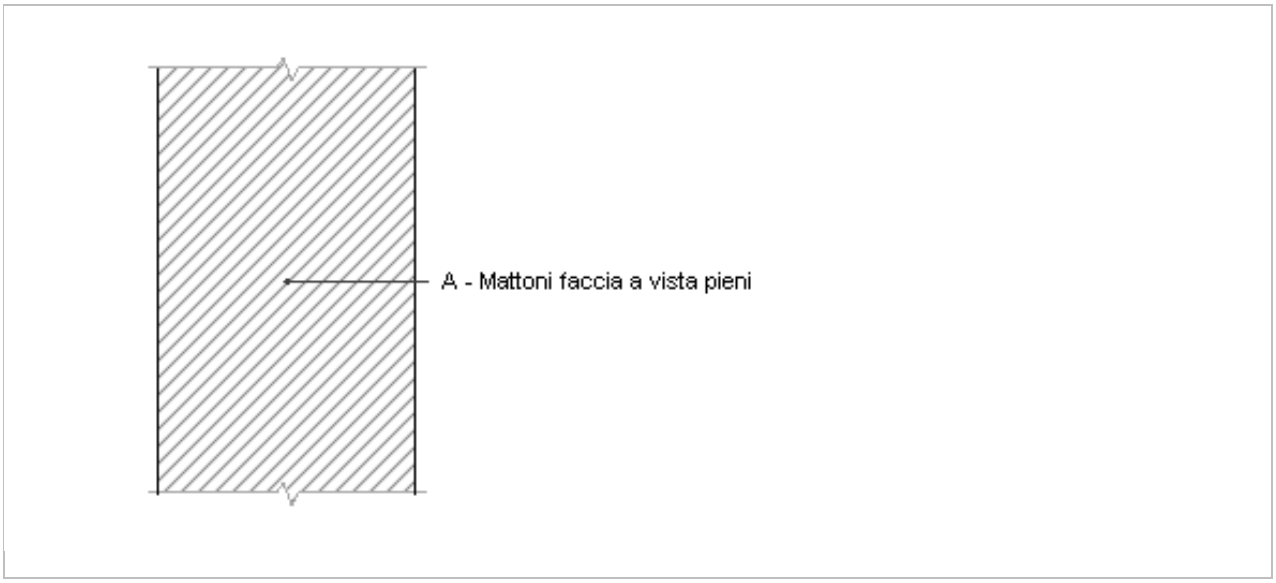



*Fig. 179. Sezione schematica della parete esterna PAR007 in mattoni faccia a vista pieni.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Codice elemento* | *PAR007* | *-* |
| *Stratigrafia* | *Mattoni faccia a vista pieni* | *-* |
| *Numero di strati* | *1* | *-* |
| *Materiale strutturale principale* | *Laterizio* | *-* |
| *Spessore totale parete* | *90* | *cm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *0,704* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *-* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *1.620* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *1.620* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno riscaldato ↔ Esterno* | *-* |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,69* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *25,00* | *W/m²K* |

*Tabella 144. Applicazione dei descrittori sulle strutture opache verticali alla muratura PAR007.*

### PAR008 – Pareti esterne contro terra (laterali)

Si tratta delle pareti laterali dell'edificio, formalmente classificate come pareti esterne, ma che in realtà risultano completamente non visibili poiché ricoperte e in diretto contatto con il terreno (Fig. 180). Non vi è alcuno scambio termico con l'aria esterna: le dispersioni avvengono esclusivamente verso il terreno, condizione che influisce sulle dinamiche di trasmissione del calore e sulla valutazione energetica complessiva dell'involucro.
Queste pareti sono realizzate in muratura piena, con un notevole spessore totale pari a 3metri (Fig. 181), a cui corrisponde una massa superficiale molto elevata, pari a 5400 kg/m², che conferisce all'elemento un'elevatissima inerzia termica.
Dal punto di vista prestazionale, la parete presenta una trasmittanza termica pari a 0,273 W/m²K e una resistenza termica complessiva di 3,662 m²K/W, valori che derivano dalla composizione multistrato del pacchetto murario.

Per la parete PAR008 è stata effettuata la compilazione dei descrittori relativi alle chiusure opache verticali, al fine di caratterizzarne le proprietà geometriche, materiche e prestazionali. I dati riportati (Tabella 145) descrivono la stratigrafia, lo spessore, le caratteristiche termiche e la massa superficiale della muratura in laterizio pieno, oltre ai parametri di scambio termico con l'ambiente interno ed esterno, fornendo un quadro completo del comportamento energetico dell'elemento analizzato.

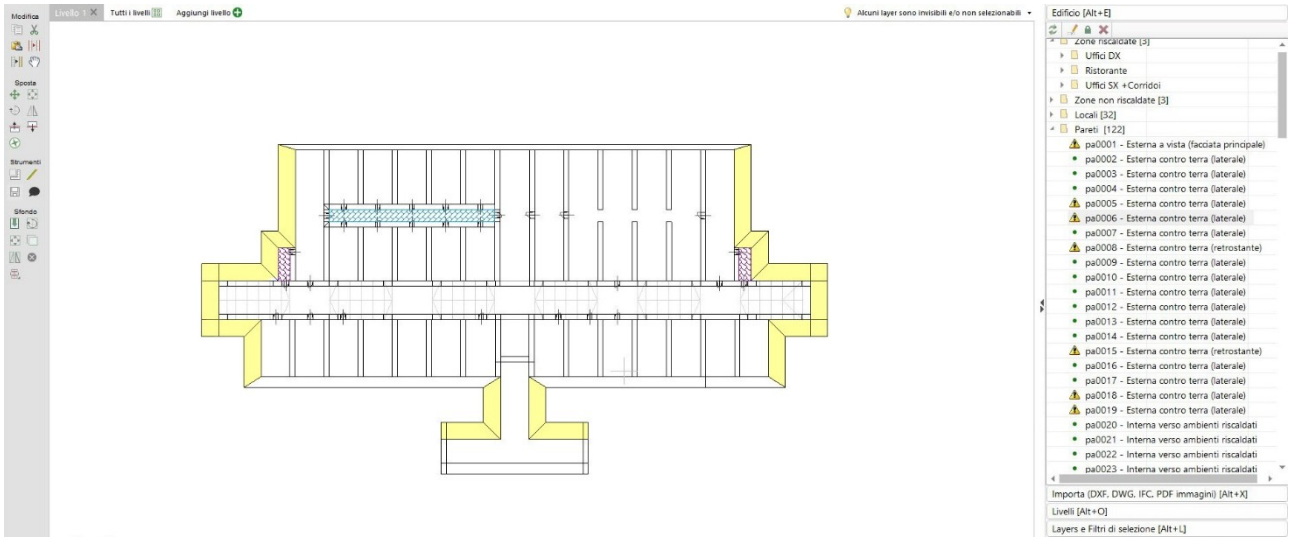


*Fig. 180. Evidenziazione grafica della tipologia di pareti esterne laterali PAR008, all'interno del modello realizzato su Termolog.*

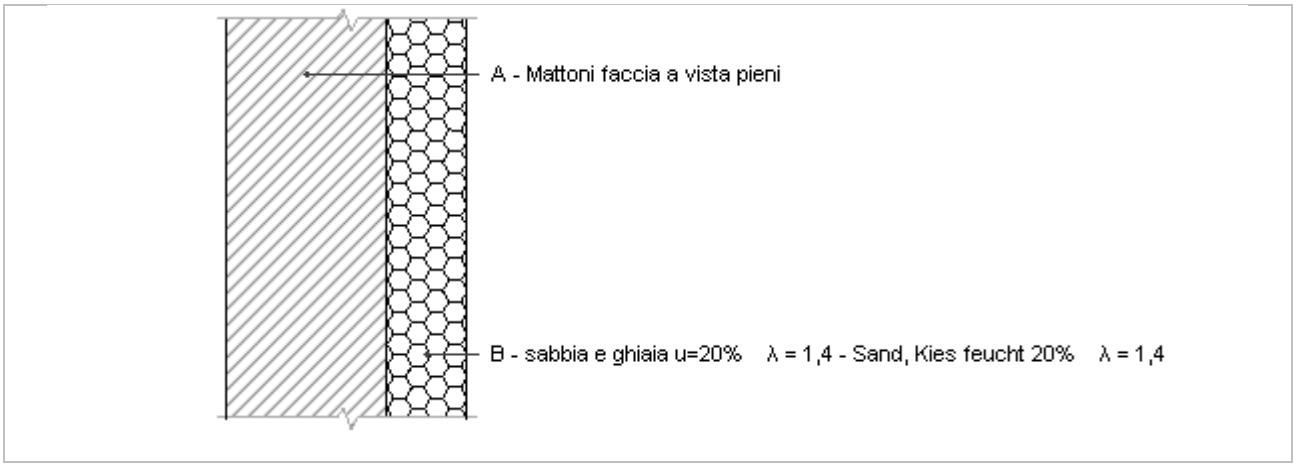


*Fig. 181. Sezione schematica della tipologia di parete esterna PAR008, in mattoni faccia a vista pieni, confinante verso il terreno.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Codice elemento* | *PAR008* | *-* |
| *Stratigrafia* | *Mattoni faccia a vista pieni* | *-* |
| *Numero di strati* | *1* | *-* |
| *Materiale strutturale principale* | *Laterizio pieno* | *-* |
| *Spessore totale parete* | *200* | *cm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *0,273* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *-* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *5.400* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *5.400* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno riscaldato ↔ Terreno* | *-* |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,69* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *Non applicabile: scambio con terreno* | *W/m²K* |

*Tabella 145. Applicazione dei descrittori sulle strutture opache verticali alla muratura PAR008.*

### PAR009 – Parete esterna posteriore

Anche in questo caso, la parete esterna posteriore dell'edificio è formalmente classificata come parete esterna, ma di fatto non è visibile in quanto completamente ricoperta e a diretto contatto con il terreno (Fig. *182*). Come nel caso delle pareti laterali, non vi è scambio termico con l'aria esterna, ma esclusivamente con il terreno circostante (Fig. 184), condizione che ne influenza le prestazioni energetiche.
La struttura muraria presenta uno spessore complessivo di 190cm e una massa superficiale di 3.420 kg/m², a testimonianza di una notevole inerzia termica. Dal punto di vista prestazionale, la parete ha una trasmittanza termica pari a 0,469 W/m²K, mentre la resistenza termica totale risulta pari a 2,134 m²K/W.

Per la parete PAR009 è stata effettuata la compilazione dei descrittori relativi alle chiusure opache verticali, al fine di caratterizzarne le proprietà geometriche, materiche e prestazionali. I dati riportati in Tabella 147 descrivono la stratigrafia, lo spessore, le caratteristiche termiche e la massa superficiale della muratura in laterizio pieno, oltre ai parametri di scambio termico con l'ambiente interno ed esterno, fornendo un quadro completo del comportamento energetico dell'elemento analizzato.

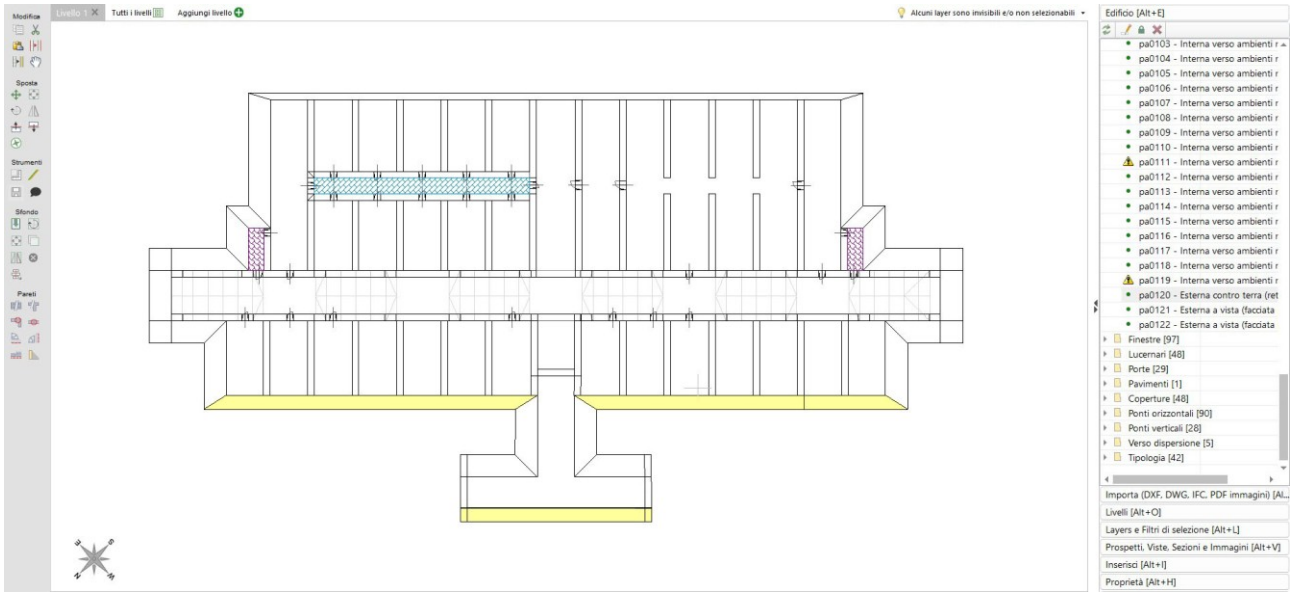


*Fig. 182. Evidenziazione grafica della tipologia di parete PAR009 all'interno del modello realizzato su Termolog.*

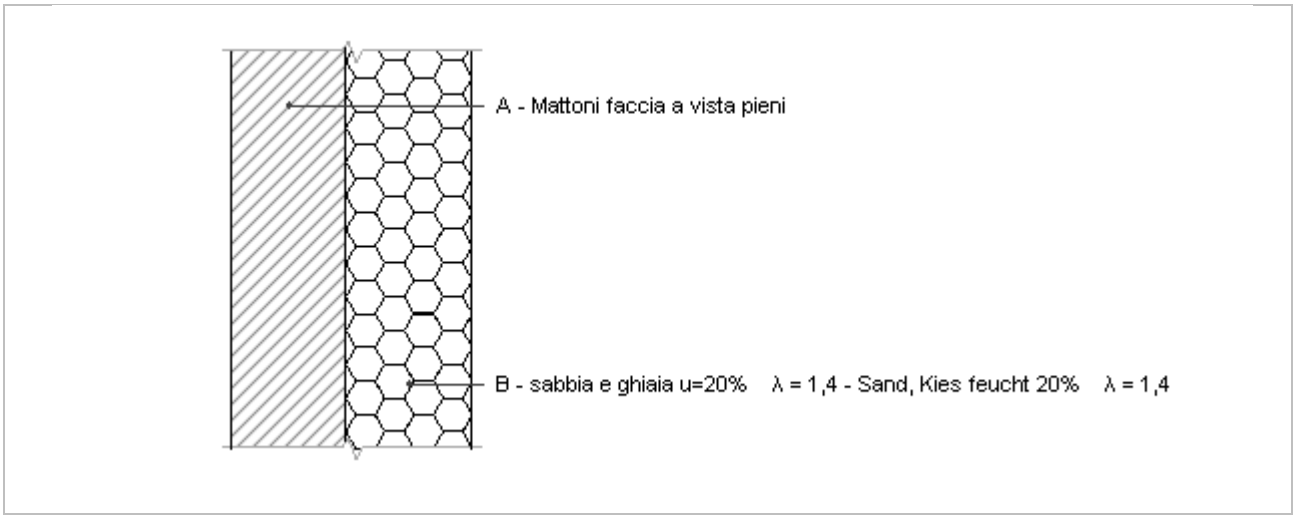


*Fig. 183. Sezione schematica della tipologia di parete esterna PAR009, in mattoni faccia a vista pieni, confinante verso il terreno.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Codice elemento* | *PAR009* | *-* |
| *Stratigrafia* | *Mattoni faccia a vista pieni* | *-* |
| *Numero di strati* | *1* | *-* |
| *Materiale strutturale principale* | *Laterizio pieno* | *-* |
| *Spessore totale parete* | *90* | *cm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *0,469* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *-* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *3.420* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *3.420* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno riscaldato ↔ Terreno* | *-* |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,69* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *Non applicabile: scambio con terreno* | *W/m²K* |

*Tabella 146. Applicazione dei descrittori sulle strutture opache verticali alla muratura PAR009.*

### PAR010 – Parete interna verso ambienti non riscaldati

La parete interna verso ambienti non riscaldati costituisce l'elemento di separazione tra le zone climatizzate dell'edificio e gli ambienti interni privi di impianto di riscaldamento o raffrescamento. Sebbene non esposta all'esterno (Fig. 184), questa tipologia di parete riveste un ruolo importante nel bilancio energetico complessivo dell'edificio, poiché delimita volumi con diverse condizioni termoigrometriche.
La parete è realizzata in muratura piena in mattoni faccia a vista (Fig. 185), con spessore pari a 90cm, che conferisce alla struttura un'elevata massa superficiale (1.620 kg/m²) e quindi un'ottima capacità di attenuazione delle variazioni termiche. Dal punto di vista prestazionale, la parete ha una trasmittanza termica pari a 0,662 W/m²K, mentre la resistenza termica totale risulta pari a 1,510 m²K/W.

Per la parete PAR010 è stata effettuata la compilazione dei descrittori relativi alle chiusure opache verticali, al fine di caratterizzarne le proprietà geometriche, materiche e prestazionali. I dati riportati (Tabella 147) descrivono la stratigrafia, lo spessore, le caratteristiche termiche e la massa superficiale della muratura in laterizio pieno, oltre ai parametri di scambio termico con l'ambiente interno ed esterno, fornendo un quadro completo del comportamento energetico dell'elemento analizzato.

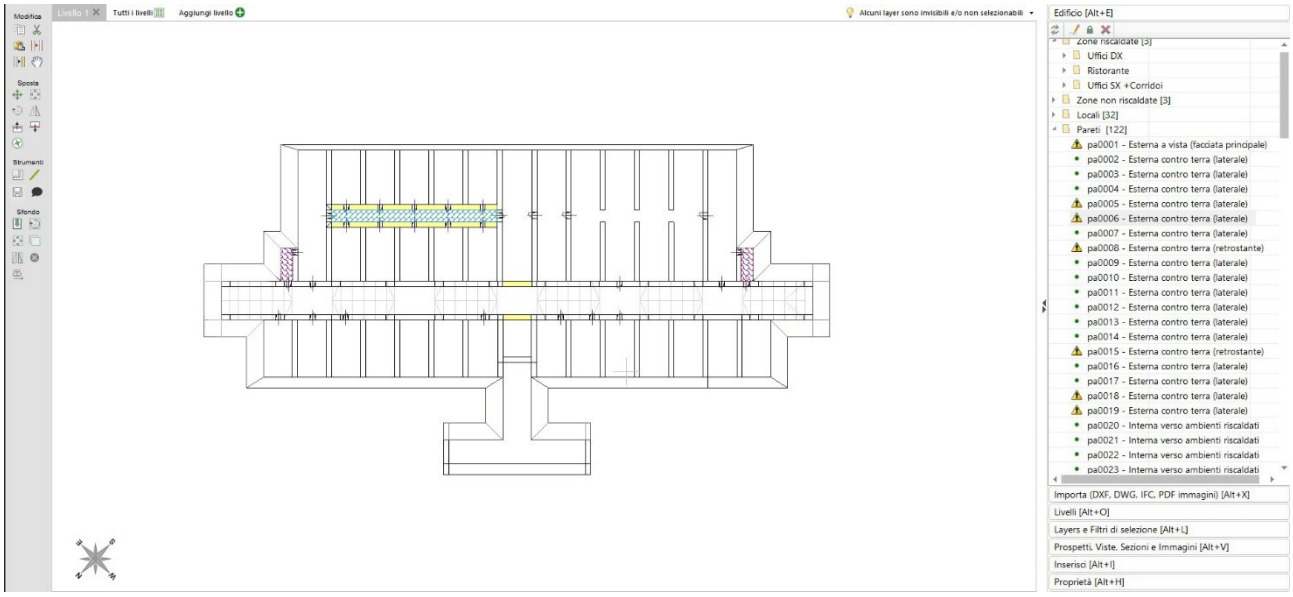


*Fig. 184. Evidenziazione grafica della tipologia di parete interna PAR010 all'interno del modello realizzato su Termolog.*

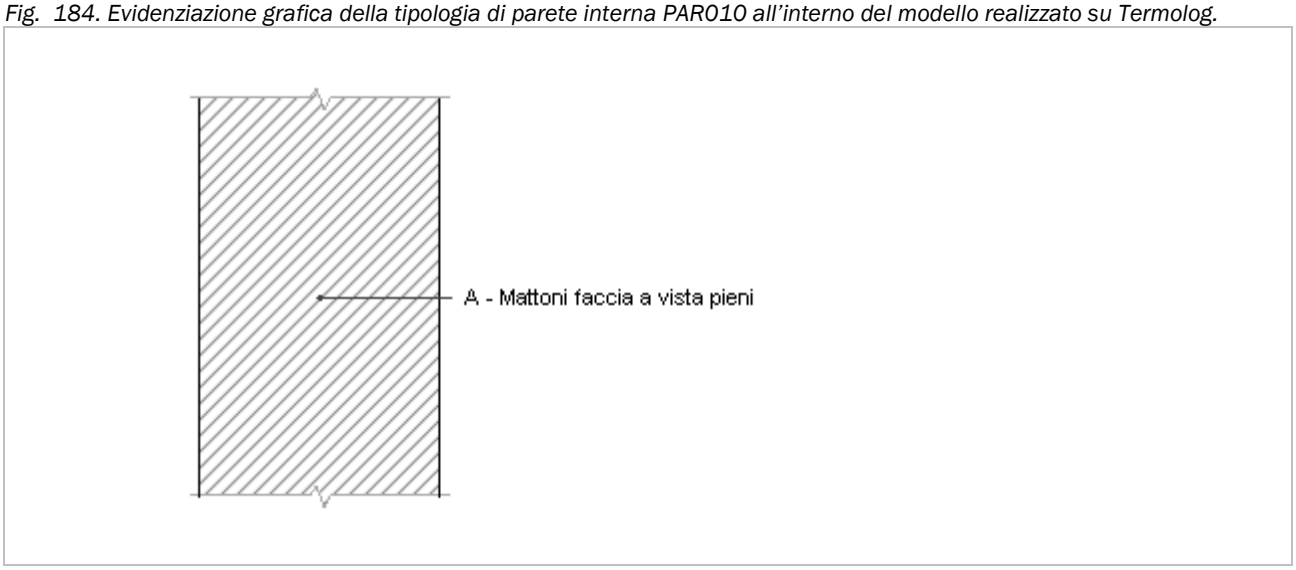


*Fig. 185. Sezione schematica della parete interna PAR010 in mattoni faccia a vista pieni.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Codice elemento* | *PAR010* | *-* |
| *Stratigrafia* | *Mattoni faccia a vista pieni* | *-* |
| *Numero di strati* | *1* | *-* |
| *Materiale strutturale principale* | *Laterizio pieno* | *-* |
| *Spessore totale parete* | *90* | *cm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *0,662* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *-* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *1.620* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *1.620* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno riscaldato ↔ Interno non riscaldato* | *-* |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,69* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *7,69* | *W/m²K* |

*Tabella 147. Applicazione dei descrittori sulle strutture opache verticali alla muratura PAR010.*

### PAR011 – Parete interna verso ambienti riscaldati

La parete interna verso ambienti riscaldati rappresenta le partizioni che separano differenti zone dell'edificio ugualmente climatizzate, come ad esempio tra uffici o locali con funzione analoga. Pur non essendo coinvolta in scambi termici con ambienti a diversa temperatura in quanto circoscrive gli uffici e il corridoio principale (Fig. 186), la sua descrizione è utile per una completa caratterizzazione dell'involucro edilizio e dei materiali impiegati.
La parete è realizzata in muratura piena di mattoni faccia a vista (

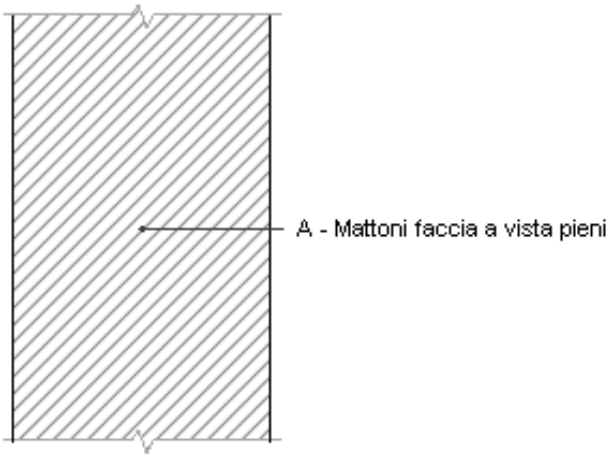



Fig. 187), con spessore pari a 90cm e una massa superficiale pari a 1.800 kg/m². Dal punto di vista prestazionale, la parete ha una trasmittanza termica pari a 0,662 W/m²K, mentre la resistenza termica totale risulta pari a 1,510 m²K/W.

Per la parete PAR011 è stata effettuata la compilazione dei descrittori relativi alle chiusure opache verticali, al fine di caratterizzarne le proprietà geometriche, materiche e prestazionali. I dati riportati (Tabella 148) descrivono la stratigrafia, lo spessore, le caratteristiche termiche e la massa superficiale della muratura in laterizio pieno, oltre ai parametri di scambio termico con l'ambiente interno ed esterno, fornendo un quadro completo del comportamento energetico dell'elemento analizzato.

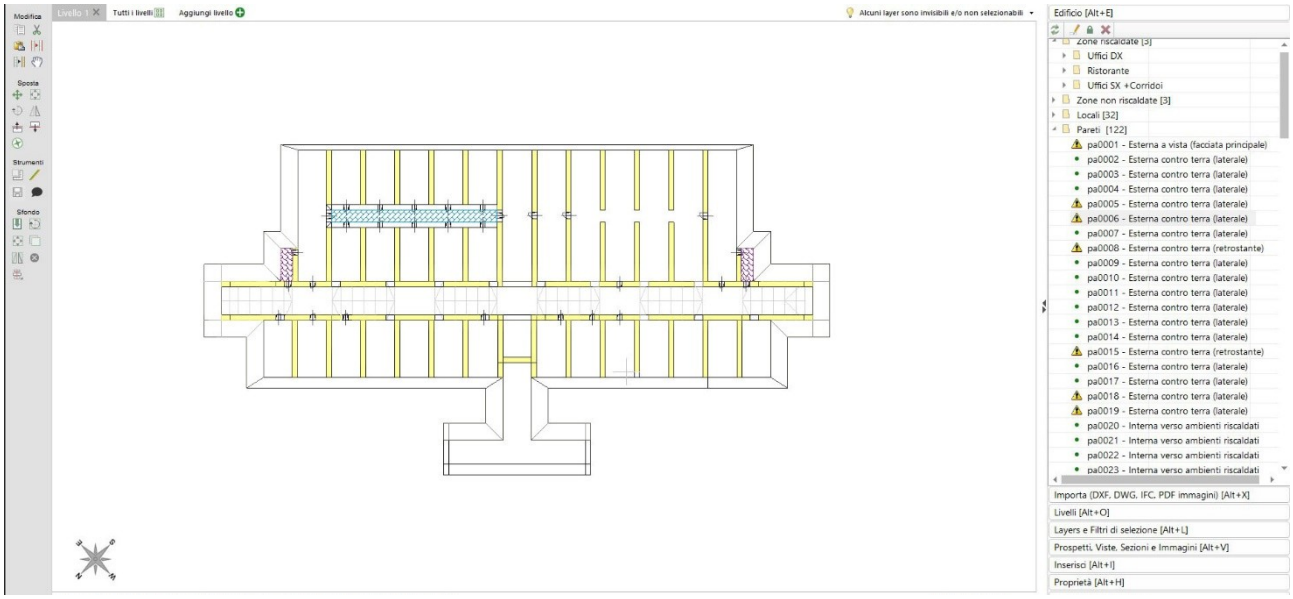



*Fig. 186. Evidenziazione grafica della tipologia di parete interna PAR011 all'interno del modello realizzato su Termolog.*

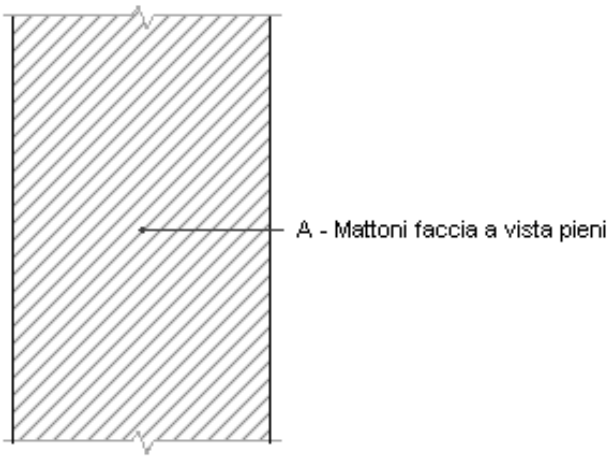



*Fig. 187. Sezione schematica della parete interna PAR011 in mattoni faccia a vista pieni.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE VERTICALI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Codice elemento* | *PAR011* | *-* |
| *Stratigrafia* | *Mattoni faccia a vista pieni* | *-* |
| *Numero di strati* | *1* | *-* |
| *Materiale strutturale principale* | *Laterizio pieno faccia* | *-* |
| *Spessore totale parete* | *90* | *cm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *0,662* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *-* | *W/m²K* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *1.620* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *1.620* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno riscaldato ↔ Interno riscaldato* | *-* |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *7,69* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *7,69* | *W/m²K* |

*Tabella 148. Applicazione dei descrittori sulle strutture opache verticali alla muratura PAR011.*

### *2.1.5.2 Chiusure opache orizzontali*

*La copertura*

La copertura della Caserma Promers si configura come una superficie quasi interamente ricoperta da terreno, coerente con la morfologia semi-interrata dell'edificio e con la sua funzione storica difensiva. Questa conformazione garantisce un'elevata inerzia termica e un marcato smorzamento delle oscillazioni termiche giornaliere e stagionali, contribuendo significativamente alla stabilità termoigrometrica interna. Tuttavia, comporta una non convenzionale configurazione di scambio termico, rendendo necessaria un'attenta modellazione nel calcolo del fabbisogno energetico.
Per l'analisi energetica, la copertura è stata modellata come una struttura composta da due strati principali: uno strato inferiore in muratura, costituito da mattoni pieni faccia a vista disposti a volta, con spessore pari a 90 cm; uno strato superiore di terreno naturale, costituito da sabbia e ghiaia, con spessore variabile tra i 3,6 m e i 5,6 m, secondo le sezioni architettoniche.
Le superfici di copertura sono state classificate in quattro tipologie, in funzione dell'altezza del terreno sovrastante e della natura degli ambienti sottostanti (riscaldati o non riscaldati).

**PAV228 – Solaio a volta su terreno alto (ambienti riscaldati)**

La copertura è costituita da un solaio con conformazione a volta a botte, posto a copertura di ambienti riscaldati. La struttura è realizzata con mattoni pieni faccia a vista per uno spessore di 90 cm, al di sopra dei quali si trovano circa 5.6 metri di sabbia, per uno spessore stratigrafico complessivo di 6.5 metri. Si tratta di una configurazione tipica di strutture storiche, caratterizzata da un'elevata massa superficiale e da una buona resistenza termica, nonostante l'assenza di isolanti convenzionali. L'elevato spessore e la composizione materica conferiscono al solaio una notevole inerzia termica, contribuendo alla stabilità del clima interno.

Per il solaio PAV228 è stata effettuata la compilazione dei descrittori delle chiusure opache orizzontali, con l'obiettivo di caratterizzarne le proprietà costruttive e prestazionali. I valori riportati in Tabella 149 descrivono la stratigrafia e il materiale strutturale principale, lo spessore complessivo, i parametri termo-fisici (trasmittanza, conducibilità, massa superficiale) e le condizioni di scambio termico con il terreno soprastante e gli ambienti adiacenti, consentendo una valutazione accurata del comportamento energetico dell'elemento.

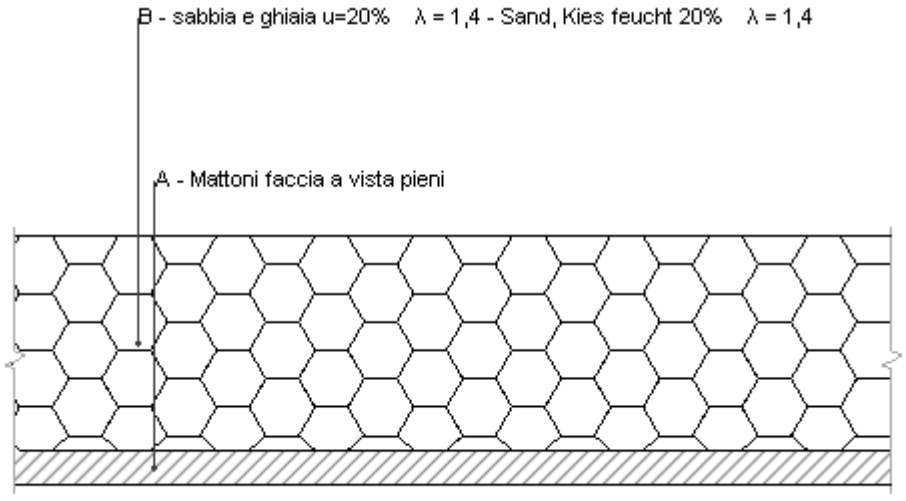



*Fig. 188. Sezione schematica del solaio PAV228 realizzato in mattoni faccia a vista pieni.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Codice elemento* | *PAV228* | *-* |
| *Stratigrafia* | *Mattoni faccia a vista pieni* | *-* |
| *Numero di strati* | *1* | *-* |
| *Materiale strutturale principale* | *Laterizio pieno* | *-* |
| *Spessore totale* | *650* | *cm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *0,186* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *-* | *W/m²K* |
| *Conducibilità termica (λ)* | *0,720* | *W/mK* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *11.700* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *11.700* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno riscaldato ↔ Terreno* | *-* |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *10,00* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *Non applicabile: scambio con terreno* | *W/m²K* |

*Tabella 149. Applicazione dei descrittori sulla struttura opaca orizzontale del solaio PAV228.*

PAV230 – Solaio a volta su terreno alto (ambienti non riscaldati - NR)

I La stratigrafia del solaio PAV230 è identica a quella del PAV228, ma in questo caso è riferita a locali non climatizzati. Si tratta di un solaio voltato con conformazione a volta a botte, realizzato in mattoni pieni faccia a vista con uno spessore strutturale di 90 cm, sormontato da circa 5,6 metri di sabbia e ghiaia. La stratigrafia complessiva considerata ha uno spessore di 6.500 mm.

Per il solaio PAV228 è stata effettuata la compilazione dei descrittori delle chiusure opache orizzontali, con l'obiettivo di caratterizzarne le proprietà costruttive e prestazionali. I valori riportati in Tabella 150. Applicazione dei descrittori sulla struttura opaca orizzontale del solaio PAV230. descrivono la stratigrafia e il materiale strutturale principale, lo spessore complessivo, i parametri termo-fisici (trasmittanza, conducibilità, massa superficiale) e le condizioni di scambio termico con il terreno soprastante e gli ambienti adiacenti, consentendo una valutazione accurata del comportamento energetico dell'elemento.

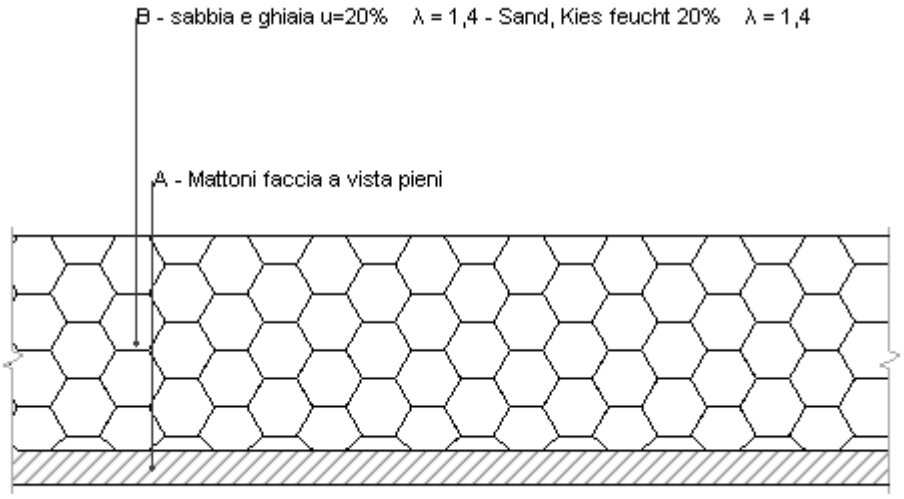



*Fig. 189. Sezione schematica del solaio PAV230 realizzato in mattoni faccia a vista pieni.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Codice elemento* | *PAV230* | *-* |
| *Stratigrafia* | *Mattoni faccia a vista pieni* | *-* |
| *Numero di strati* | *1* | *-* |
| *Materiale strutturale principale* | *Laterizio pieno* | *-* |
| *Spessore totale* | *650* | *cm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *0,186* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *-* | *W/m²K* |
| *Conducibilità termica (λ)* | *0,720* | *W/mK* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *11.700* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *11.700* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno riscaldato ↔ Terreno* | *-* |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *10,00* | *W/m²K* |

| | | |
|---|---|---|
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *Non applicabile: scambio con terreno* | *W/m²K* |

*Tabella 150. Applicazione dei descrittori sulla struttura opaca orizzontale del solaio PAV230.*

PAV229 – Solaio a volta su terreno basso (ambienti riscaldati)

Il solaio PAV229 è una copertura costituita da un solaio con conformazione a volta a botte, posto a copertura di ambienti riscaldati. La struttura è costituita da mattoni pieni faccia a vista per uno spessore di 90 cm, sovrastati da circa 3,6 metri di sabbia e ghiaia, per uno spessore complessivo di 4.500 mm (4,5 m). Rispetto alla variante su terreno alto (PAV228), presenta uno spessore e una massa ridotti, con conseguente trasmittanza più elevata e inerzia termica inferiore.

Per il solaio PAV229 è stata effettuata la compilazione dei descrittori delle chiusure opache orizzontali, con l'obiettivo di caratterizzarne le proprietà costruttive e prestazionali. I valori riportati in Tabella 151 descrivono la stratigrafia e il materiale principale, lo spessore complessivo, i parametri termo-fisici (trasmittanza, conducibilità, massa superficiale) e le condizioni di scambio termico con il terreno soprastante e gli ambienti adiacenti, consentendo una valutazione accurata del comportamento energetico dell'elemento.

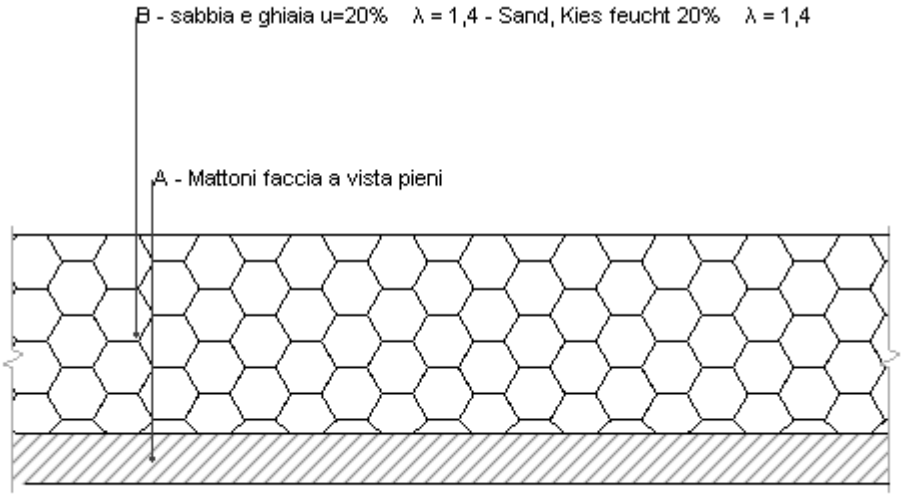



*Fig. 190. Sezione schematica del solaio PAV229 realizzato in mattoni faccia a vista pieni.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Codice elemento* | *PAV229* | - |
| *Stratigrafia* | *Mattoni faccia a vista pieni* | - |
| *Numero di strati* | *1* | - |
| *Materiale strutturale principale* | *Laterizio pieno* | - |
| *Spessore totale* | *450* | *cm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *0,252* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | - | *W/m²K* |
| *Conducibilità termica (λ)* | *0,720* | *W/mK* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *8.820* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *8.820* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno riscaldato ↔ Terreno* | - |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *10,00* | *W/m²K* |

| | | |
|---|---|---|
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *Non applicabile: scambio con terreno* | *W/m²K* |

*Tabella 151. Applicazione dei descrittori sulla struttura opaca orizzontale del solaio PAV229.*

PAV231 – Solaio a volta su terreno basso (ambienti non riscaldati - NR)

Il solaio PAV231 presenta la stessa stratigrafia del PAV229, ma si è posto a copertura di locali non climatizzati. Si tratta di una copertura voltata, costituita da una struttura in mattoni pieni faccia a vista (90 cm), sovrastata da uno strato di sabbia e ghiaia spesso 3.6 m. Lo spessore totale della stratigrafia considerata è quindi pari a 4,5 m. Rispetto alla variante su terreno alto (PAV230), presenta uno spessore e una massa ridotti, con conseguente trasmittanza più elevata e inerzia termica inferiore.

Per il solaio PAV231 è stata effettuata la compilazione dei descrittori delle chiusure opache orizzontali, con l'obiettivo di caratterizzarne le proprietà costruttive e prestazionali. I valori riportati in Tabella 152 descrivono la stratigrafia e il materiale principale, lo spessore complessivo, i parametri termo-fisici (trasmittanza, conducibilità, massa superficiale) e le condizioni di scambio termico con il terreno soprastante e gli ambienti adiacenti, consentendo una valutazione accurata del comportamento energetico dell'elemento.

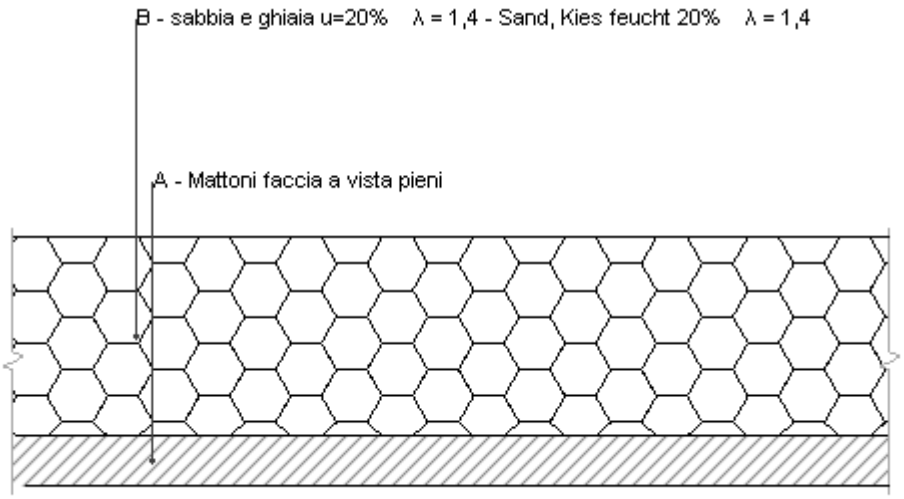



*Fig. 191. Sezione schematica del solaio PAV231 realizzato in mattoni faccia a vista pieni.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Codice elemento* | *PAV231* | - |
| *Stratigrafia* | *Mattoni pieni faccia a vista* | - |
| *Numero di strati* | *1* | - |
| *Materiale strutturale principale* | *Laterizio pieno* | - |
| *Spessore totale* | *450* | *cm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *0,252* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | - | *W/m²K* |
| *Conducibilità termica (λ)* | *0,720* | *W/mK* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *8.100* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *8.100* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno riscaldato ↔ Terreno* | - |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *10,00* | *W/m²K* |

| | | |
|---|---|---|
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *Non applicabile: scambio con terreno* | *W/m²K* |

*Tabella 152. Applicazione dei descrittori sulla struttura opaca orizzontale del solaio PAV231.*

*Il solaio di base*

### PAV227 – Solaio a volta su terreno basso (ambienti riscaldati)

Il solaio PAV227 è una copertura voltata con andamento a botte, posta a separazione di ambienti riscaldati. La stratigrafia complessiva ha uno spessore pari a 1,55 m, sensibilmente ridotto rispetto ai solai su terreno alto (PAV228 e PAV230). La struttura è composta da mattoni pieni faccia a vista (60 cm), un'intercapedine debolmente ventilata di 75 cm e uno strato di ghiaia grossa priva di argilla di 20 cm.
Dal punto di vista prestazionale, il solaio presenta una trasmittanza termica U = 0,565 W/m²K, un valore più elevato rispetto agli altri solai voltati, a causa dello spessore ridotto e della minore massa superficiale. La resistenza termica totale è pari a 1,770 m²K/W, mentre la massa superficiale complessiva è di 1.421 kg/m², valori che confermano un'inerzia termica limitata rispetto ai solai più spessi della stessa tipologia.

Per il solaio PAV227 è stata effettuata la compilazione dei descrittori delle chiusure opache orizzontali, con l'obiettivo di caratterizzarne le proprietà costruttive e prestazionali. I valori riportati in Tabella 153 descrivono la stratigrafia e il materiale principale, lo spessore complessivo, i parametri termo-fisici (trasmittanza, conducibilità, massa superficiale) e le condizioni di scambio termico con il terreno soprastante e gli ambienti adiacenti, consentendo una valutazione accurata del comportamento energetico dell'elemento.

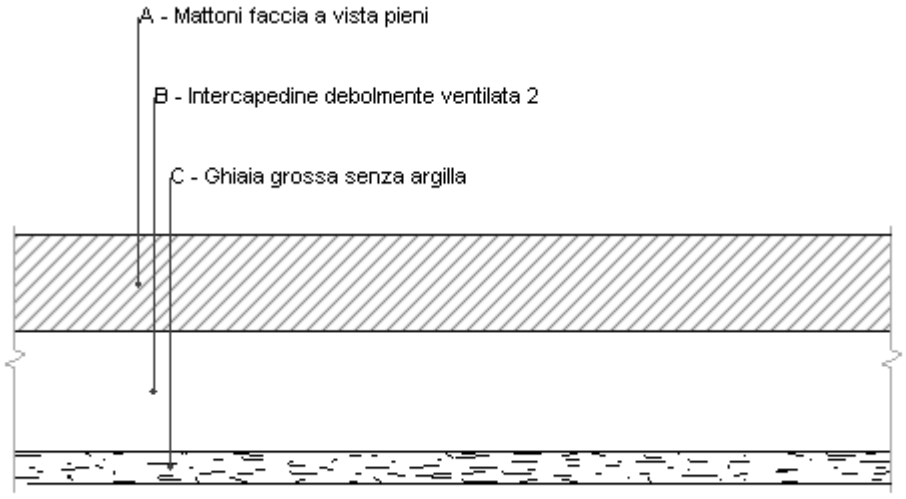



*Fig. 192. Sezione schematica del solaio PAV227 realizzato in mattoni faccia a vista pieni, intercapedine debolmente ventilata e strato di ghiaia grossa senza argilla.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE OPACHE ORIZZONTALI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| *Codice elemento* | *PAV227* | *-* |
| *Stratigrafia* | *Mattoni faccia a vista pieni + Intercapedine debolmente ventilata + Ghiaia grossa senza argilla* | *-* |
| *Numero di strati* | *3* | *-* |
| *Materiale strutturale principale* | *Mattoni pieni faccia a vista* | *-* |
| *Spessore totale* | *155* | *cm* |
| *Trasmittanza termica (U)* | *0,565* | *W/m²K* |
| *Trasmittanza termica periodica (Yie)* | *-* | *W/m²K* |

| | | |
|---|---|---|
| *Conducibilità termica (λ)* | *0,720 (laterizio), 1,250 (intercapedine)* | *W/mK* |
| *Massa superficiale (Ms)* | *1.800* | *kg/m²* |
| *Massa superficiale totale (Mst)* | *1.800* | *kg/m²* |
| *Ambiente di scambio* | *Interno riscaldato ↔ Terreno* | *-* |
| *Adduttanza interna ($h_i$)* | *5,88* | *W/m²K* |
| *Adduttanza esterna ($h_e$)* | *Non applicabile: scambio con terreno* | *W/m²K* |

*Tabella 153. Applicazione dei descrittori sulla struttura opaca orizzontale del solaio PAV227.*

### *2.1.5.3 Chiusure trasparenti verticali*

L'edificio presenta una limitata superficie finestrata, coerente con la sua funzione originaria e con la conformazione semi-interrata. Gli unici serramenti esterni sono infatti localizzati sulla facciata principale rivolta verso l'esterno e parzialmente fuori terra e in una porzione della facciata retrostante; tutti gli altri prospetti risultano interrati e privi di aperture verso l'esterno. Oltre a questi, è presente una porzione vetrata integrata nella copertura, che consente l'ingresso di luce naturale anche dall'alto.
Per una corretta catalogazione, i serramenti sono stati suddivisi in "infissi esterni" ed "infissi interni". Questi ultimi rivolti verso ambienti non riscaldati o corridoi interni.

#### *Infissi esterni*

**SER001 – Finestre facciata principale**

L'infisso SER001 è una finestra ad arco a tutto sesto, serramento singolo con due traversi orizzontali e un montante verticale (sei specchi), di dimensioni 98 × 145 cm (Fig. 193). Il telaio è in legno duro con spessore trasversale 70 mm e trasmittanza Uf ≈ 2,10 W/m²K. L'elemento vetrato è un doppio vetro 14–12–12 con Argon (dall'interno verso l'esterno), con Ug ≈ 2,55 W/m²K; il distanziatore è metallico (Ψg ≈ 0,06 W/m·K). L'infisso è dotato di persiane esterne in legno (sp. 25–30 mm), opache, colore nero. La trasmittanza complessiva risulta Uw = 2,84 W/m²K (Uw,corr = 2,185 W/m²K).

I principali descrittori termo-fisici degli infissi in questione sono riportati in Tabella 154, dove sono sintetizzati la stratigrafia, le dimensioni (lunghezza, altezza, area e perimetro vetrato, superficie complessiva), le caratteristiche dei sistemi di schermatura e oscuramento, nonché i parametri prestazionali (trasmittanza termica dell'intero infisso Uw, trasmittanza del vetro Ug, trasmittanza del telaio Uf, fattore solare g e tipologia di distanziatori).

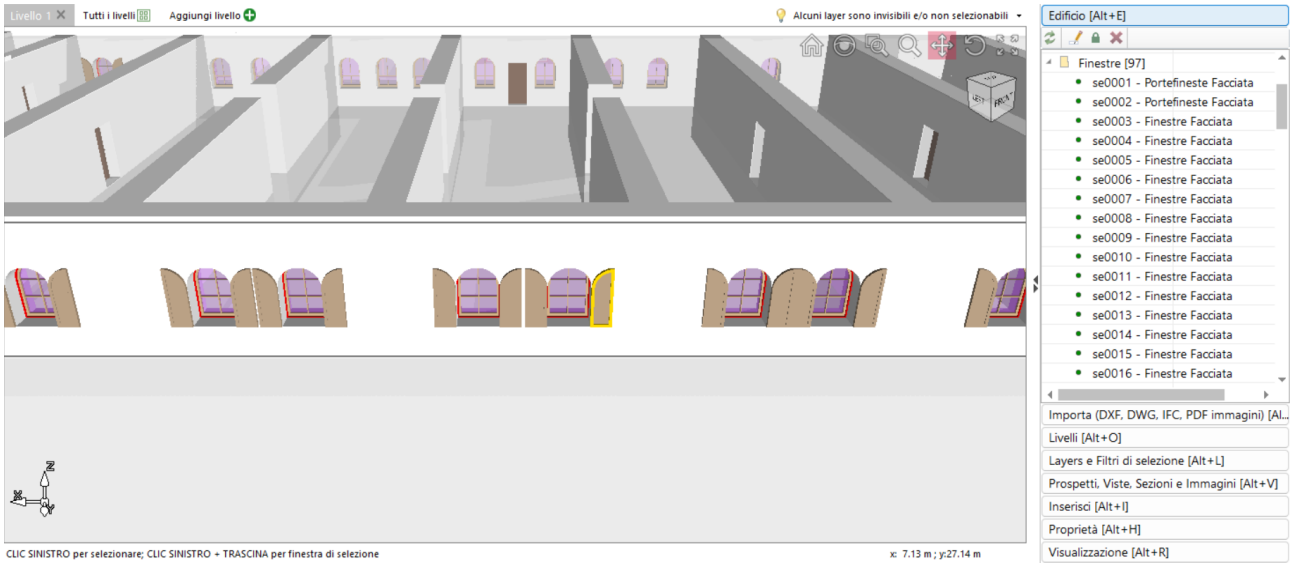


*Fig. 193. Finestra del tipo SER001, collocata sulla facciata principale.*

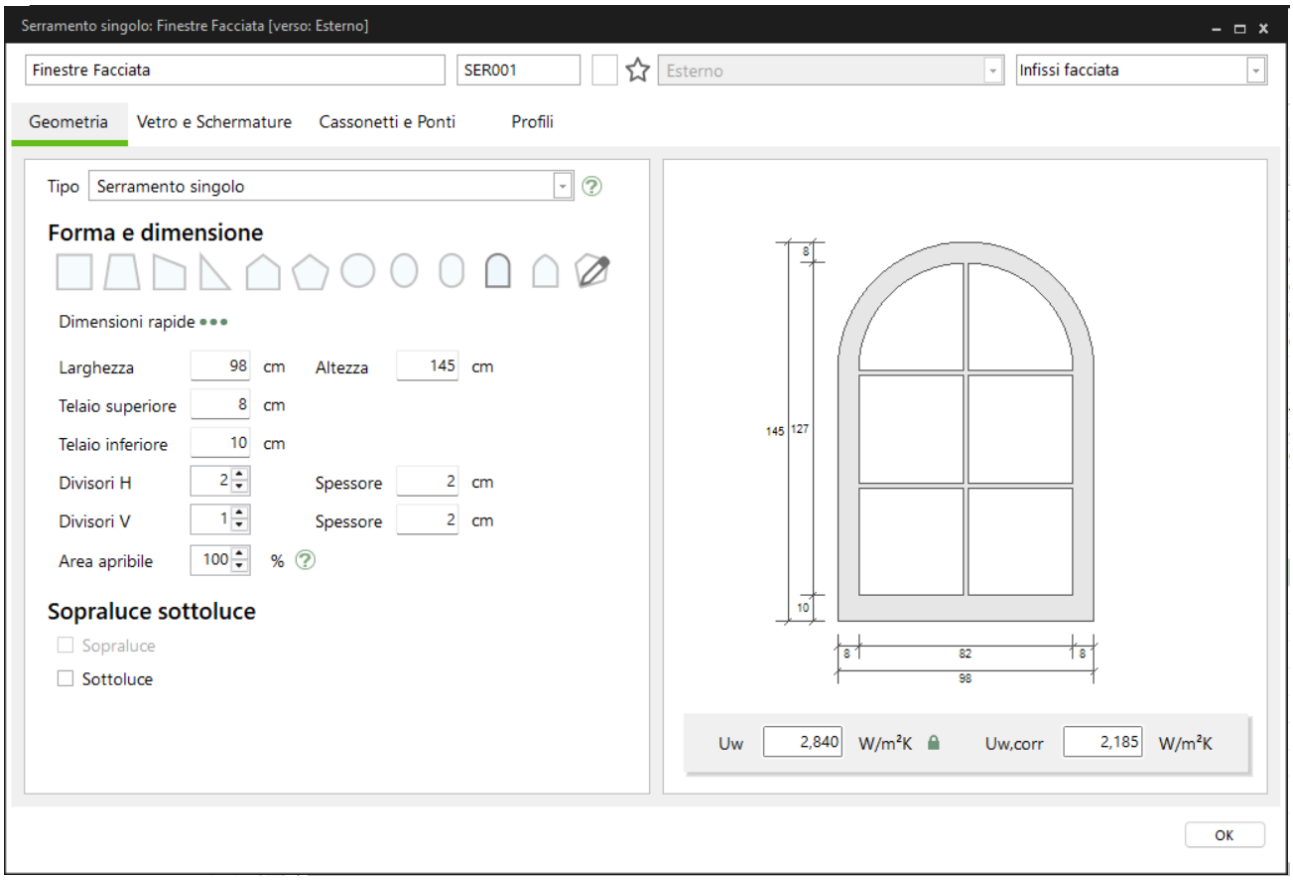



*Fig. 194. Geometria dell'infisso SER001.*

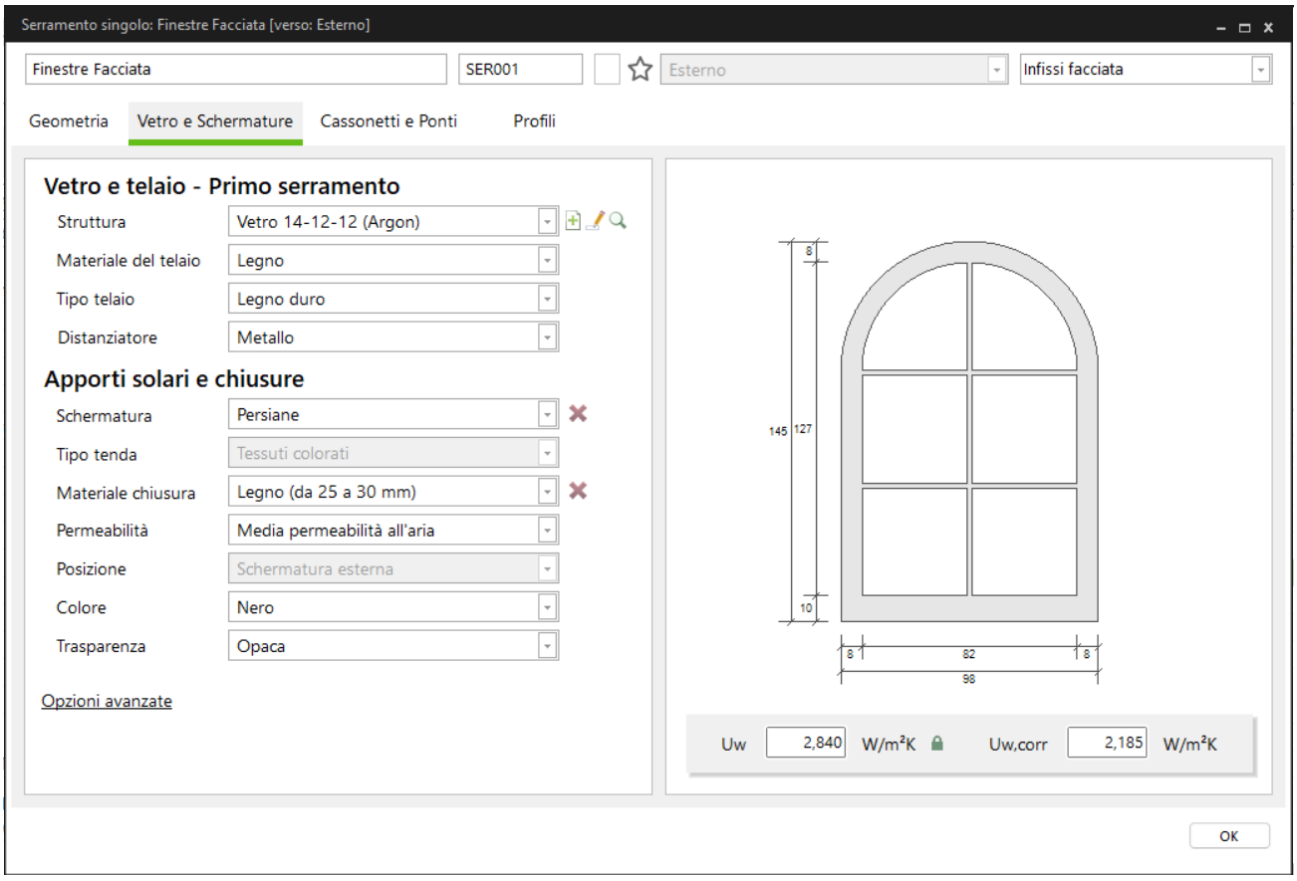



*Fig. 195. Vetro e schermature dell'infisso SER001.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | SER001 | - |
| Tipologia infisso | Finestra ad arco ad anta singola | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 98 | cm |
| Altezza | 145 | cm |
| Perimetro vetro | ≈ 4,90 | m |
| Area vetro | ≈ 1,19 | $m^2$ |
| Area telaio | ≈ 0,23 | $m^2$ |
| Superficie infisso | 1,42 | $m^2$ |
| Chiusure oscuranti interne | Assenti | - |
| Schermature solari esterne | Persiane in legno (25–30 mm), opache, colore nero | - |
| Dimensioni sottofinestra | - | - |
| Dimensioni cassonetto | - | - |
| Stratigrafia cassonetto | - | - |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 2,840 | $W/m^2K$ |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 2,185 | $W/m^2K$ |
| VETRO | | |
| Tipo | Doppio vetro normale – struttura 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14–12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | $W/m^2K$ |
| TELAIO | | |
| Materiale telaio | Legno | - |
| Taglio termico | No | - |
| Spessore telaio | 70 | mm |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 2,09 | $W/m^2K$ |
| Tipologia distanziatori | Metallo | |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | W/m·K |

*Tabella 154. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente SER001.*

### SER002 – Portefinestre facciata principale

L'infisso identificato con la sigla SER002 corrisponde ad una tipologia di portafinestra collocata sulla facciata principale dell'edificio (Fig. 196.). L'infisso presenta dimensioni 98 × 255 cm, è un serramento singolo con parte superiore ad arco e porzione inferiore cieca. Il telaio è in legno duro (spessore trasversale 70 mm, Uf ≈ 2,10 W/m²K) con distanziatore metallico. La vetrata è un doppio vetro 14-12-12 con Argon (spessore complessivo ≈ 38 mm, Ug ≈ 2,55 W/m²K). L'infisso è dotato di persiane esterne in legno. La trasmittanza complessiva risulta Uw = 2,507 W/m²K (Uw,corr = 1,972 W/m²K).

I principali descrittori termo-fisici degli infissi in questione sono riportati in Tabella 155, dove sono sintetizzati la stratigrafia, le dimensioni (lunghezza, altezza, area e perimetro vetrato, superficie complessiva), le caratteristiche dei sistemi di schermatura e oscuramento, nonché i parametri prestazionali (trasmittanza termica dell'intero infisso Uw, trasmittanza del vetro Ug, trasmittanza del telaio Uf, fattore solare g e tipologia di distanziatori).

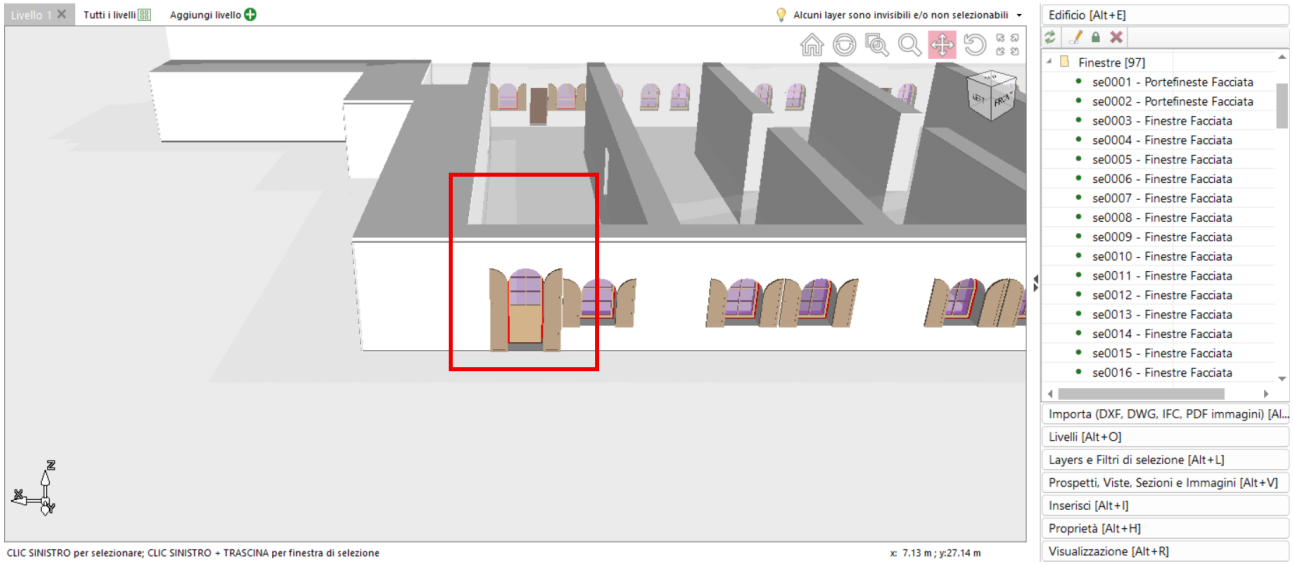



*Fig. 196. Portafinestra del tipo SER002, collocata sulla facciata principale.*

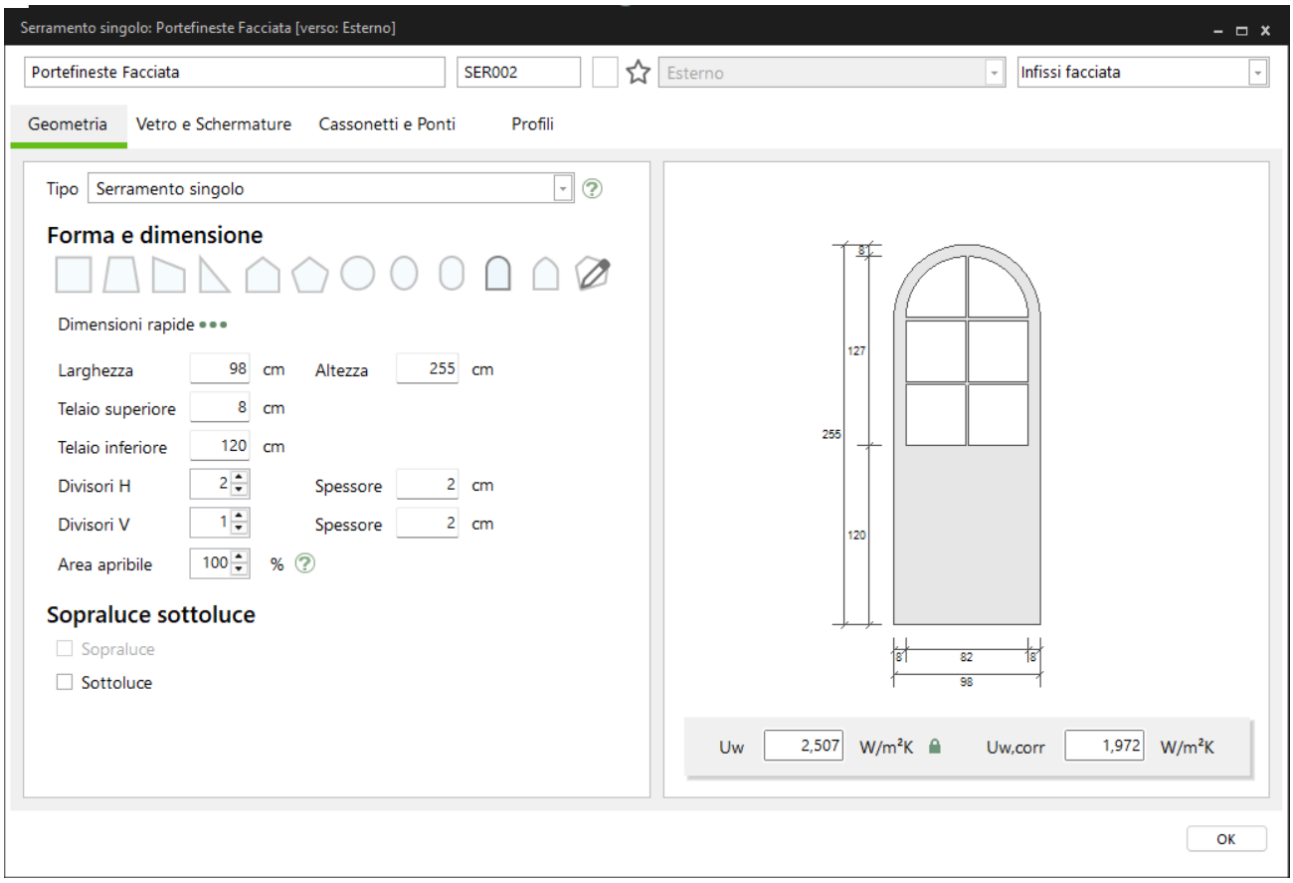



*Fig. 197. Geometria dell'infisso SER002.*

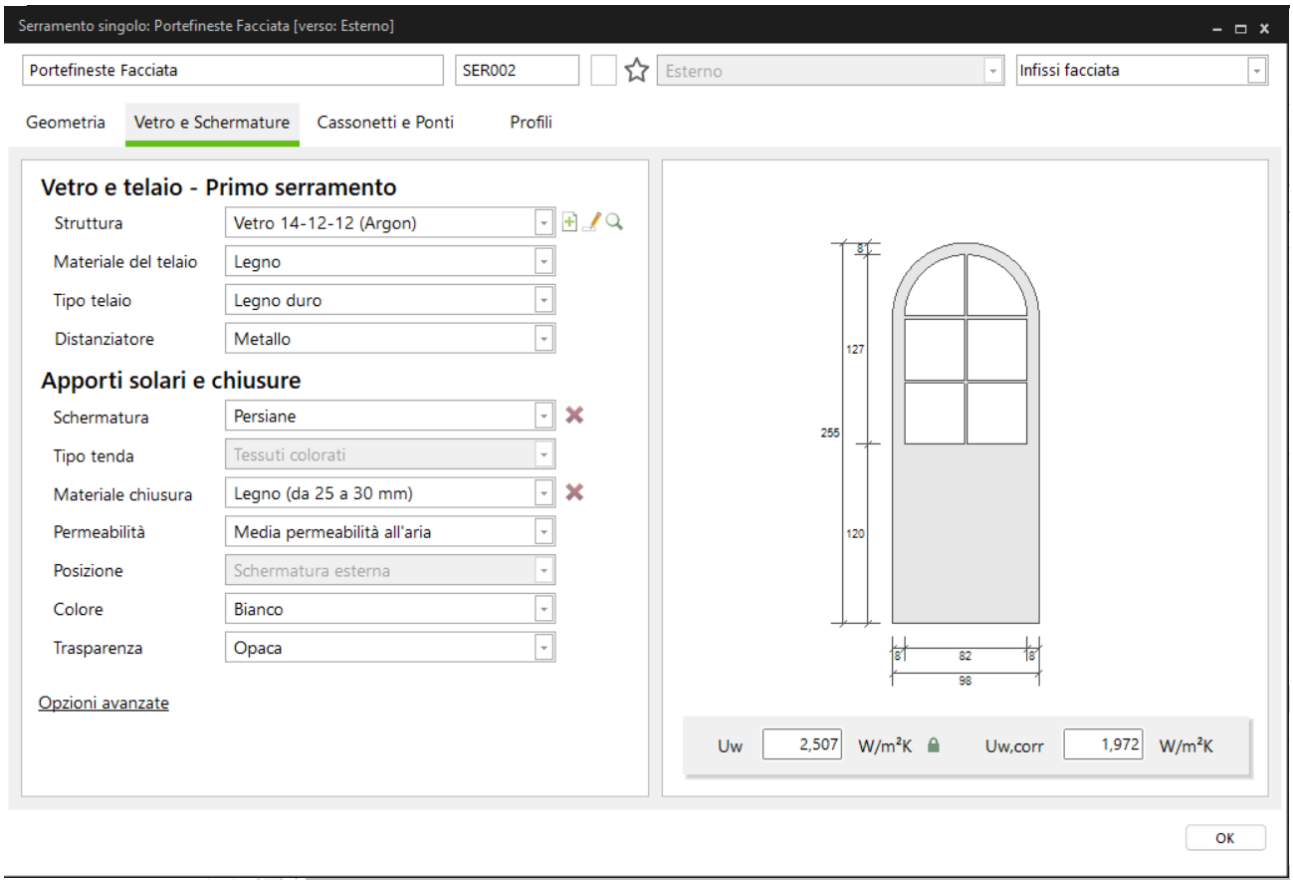



*Fig. 198. Vetro e schermature dell'infisso SER002.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | SER002 | - |
| Tipologia infisso | Portafinestra ad arco ad anta singola | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 98 | cm |
| Altezza | 255 | cm |
| Perimetro vetro | ≈ 3,83 (senza contare i divisori) | m |
| Area vetro | ≈ 0,91 (al netto dei divisori) | $m^2$ |
| Area telaio | ≈ 0,50 (telai + montanti + archi; escluso pannello) | $m^2$ |
| Superficie infisso | 2,39 | $m^2$ |
| Chiusure oscuranti interne | Assenti | - |
| Schermature solari esterne | Persiane in legno (25–30 mm), opache, colore nero | - |
| Dimensioni sottofinestra | Assente | - |
| Dimensioni cassonetto | - | - |
| Stratigrafia cassonetto | - | - |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 2,507 | $W/m^2K$ |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 1,972 | $W/m^2K$ |
| VETRO | | |
| Tipo | Doppio vetro normale – struttura 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14–12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |

| | | |
|---|---|---|
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | W/m²K |
| TELAIO | | |
| Materiale telaio | Legno | - |
| Taglio termico | No | - |
| Spessore telaio | 70 | mm |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 2,09 | W/m²K |
| Tipologia distanziatori | Metallo | |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | W/m·K |

*Tabella 155. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente SER002.*

**SER003 – Vetrata facciata principale**

L'infisso identificato con la sigla SER003 corrisponde ad una tipologia di portafinestra vetrata collocata in corrispondenza dell'ingresso principale sulla facciata dell'edificio (Fig. 199.). L'elemento presenta dimensioni 300 × 330 cm ed è un serramento singolo interamente vetrato, con parte superiore ad arco a tutto sesto e suddivisione mediante 1 traverso orizzontale e 3 montanti verticali (divisori 14 cm). Il telaio è in legno duro (spessore trasversale 70 mm; Uf ≈ 2,10 W/m²K se identico al profilo degli altri infissi) con distanziatore metallico. La vetrata è un doppio vetro 14-12-12 con Argon (spessore complessivo ≈ 38 mm, Ug ≈ 2,55 W/m²K). L'infisso è dotato di persiane esterne in legno. La trasmittanza complessiva risulta Uw = 2,635 W/m²K (Uw,corr = 2,055 W/m²K).

I principali descrittori termo-fisici degli infissi in questione sono riportati in Tabella 156, dove sono sintetizzati la stratigrafia, le dimensioni (lunghezza, altezza, area e perimetro vetrato, superficie complessiva), le caratteristiche dei sistemi di schermatura e oscuramento, nonché i parametri prestazionali (trasmittanza termica dell'intero infisso Uw, trasmittanza del vetro Ug, trasmittanza del telaio Uf, fattore solare g e tipologia di distanziatori).

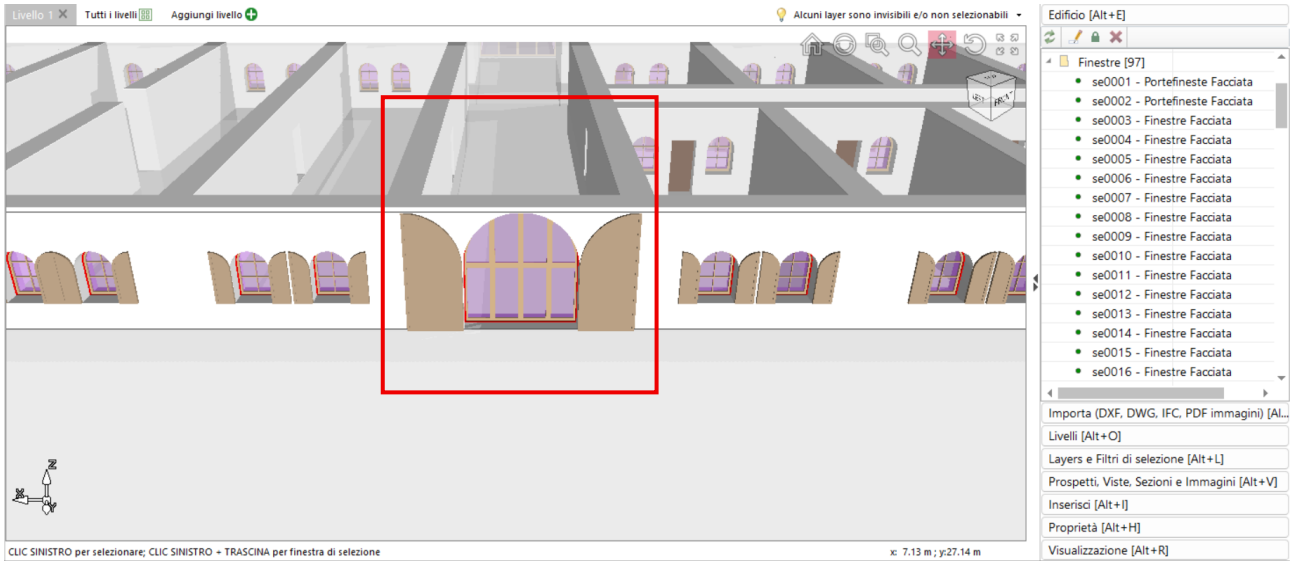



*Fig. 199. Portafinestra del tipo SER003, collocata sull'ingresso principale della facciata.*

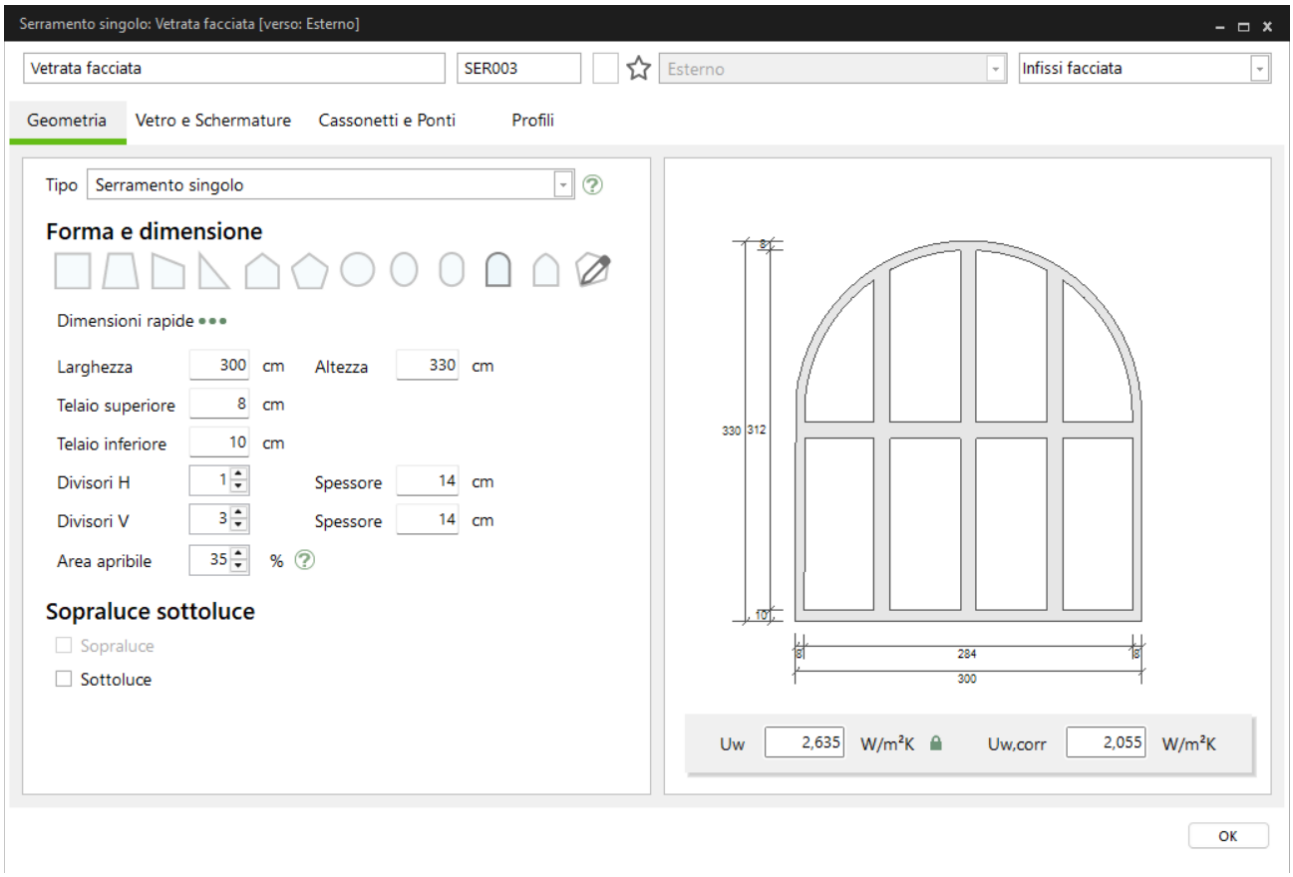



*Fig. 200. Geometria dell'infisso SER003.*

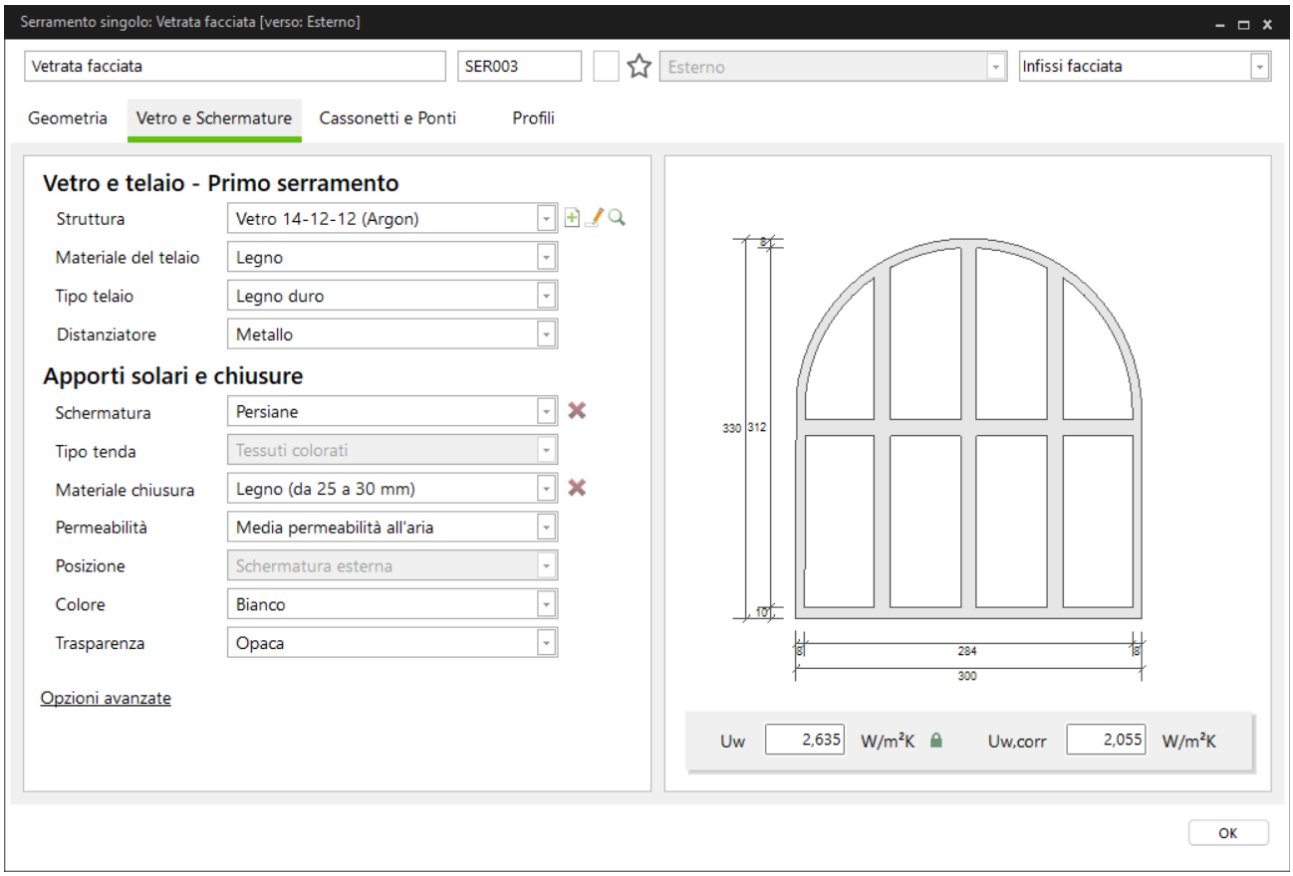



*Fig. 201. Vetro e schermature dell'infisso SER003.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | SER003 | - |
| Tipologia infisso | Vetrata ad arco | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 300 | cm |
| Altezza | 330 | cm |
| Perimetro vetro | - | m |
| Area vetro | - | $m^2$ |
| Area telaio | - | $m^2$ |
| Superficie infisso | - | $m^2$ |
| Chiusure oscuranti interne | Assenti | - |
| Schermature solari esterne | Persiane in legno (25–30 mm), opache, colore nero | - |
| Dimensioni sottofinestra | Assente | - |
| Dimensioni cassonetto | - | - |
| Stratigrafia cassonetto | - | - |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 2,635 | $W/m^2K$ |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 2,055 | $W/m^2K$ |
| VETRO | | |
| Tipo | Doppio vetro normale – struttura 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14–12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | $W/m^2K$ |
| TELAIO | | |
| Materiale telaio | Legno | - |
| Taglio termico | No | - |
| Spessore telaio | 80 | mm |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 2,09 | $W/m^2K$ |
| Tipologia distanziatori | Metallo | |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | W/m·K |

*Tabella 156. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente SER003.*

SER009 – Vetrata facciata retrostante

L'infisso identificato con la sigla SER009 corrisponde ad una tipologia di portafinestra collocata sulla facciata retrostante dell'edificio, in corrispondenza dell'area destinata al ristorante (Fig. 202). La portafinestra, interamente vetrata, di dimensioni 420 × 330 cm, ed è un serramento singolo suddiviso da 1 traverso orizzontale e 3 montanti verticali (divisori da 14 cm). La parte superiore è ad arco a tutto sesto.
Il telaio è in legno duro (spessore trasversale 70 mm) con Uf ≈ 2,1 W/m²K. La vetrata è un doppio vetro 14–12–12 con Argon (spessore complessivo ≈ 38 mm, Ug ≈ 2,55 W/m²K) con distanziatore metallico. L'infisso è dotato di persiane esterne in legno (opache, colore bianco). La trasmittanza complessiva del serramento è Uw = 2,621 W/m²K (Uw,corr = 2,046 W/m²K).

I principali descrittori termo-fisici degli infissi in questione sono riportati in Tabella 157

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | SER009 | - |
| Tipologia infisso | Vetrata ad arco | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 420 | cm |
| Altezza | 330 | cm |
| Perimetro vetro | - | m |
| Area vetro | - | m² |
| Area telaio | - | m² |
| Superficie infisso | - | m² |
| Chiusure oscuranti interne | Assenti | - |
| Schermature solari esterne | Persiane in legno (25–30 mm), opache, colore nero | - |
| Dimensioni sottofinestra | Assente | - |
| Dimensioni cassonetto | - | - |
| Stratigrafia cassonetto | - | - |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 2,621 | W/m²K |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 2,046 | W/m²K |
| VETRO | | |
| Tipo | Doppio vetro normale – struttura 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14–12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | W/m²K |
| TELAIO | | |
| Materiale telaio | Legno | - |
| Taglio termico | No | - |

| | | |
|---|---|---|
| Spessore telaio | 80 | mm |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 2,09 | W/m²K |
| Tipologia distanziatori | Metallo | |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | W/m·K |

*Tabella 157, dove sono sintetizzati la stratigrafia, le dimensioni (lunghezza, altezza, area e perimetro vetrato, superficie complessiva), le caratteristiche dei sistemi di schermatura e oscuramento, nonché i parametri prestazionali (trasmittanza termica dell'intero infisso Uw, trasmittanza del vetro Ug, trasmittanza del telaio Uf, fattore solare g e tipologia di distanziatori).*




*Fig. 202. Portafinestra del tipo SER009, collocata sulla facciata retrostante dell'edificio, in corrispondenza dell'area ristorante.*

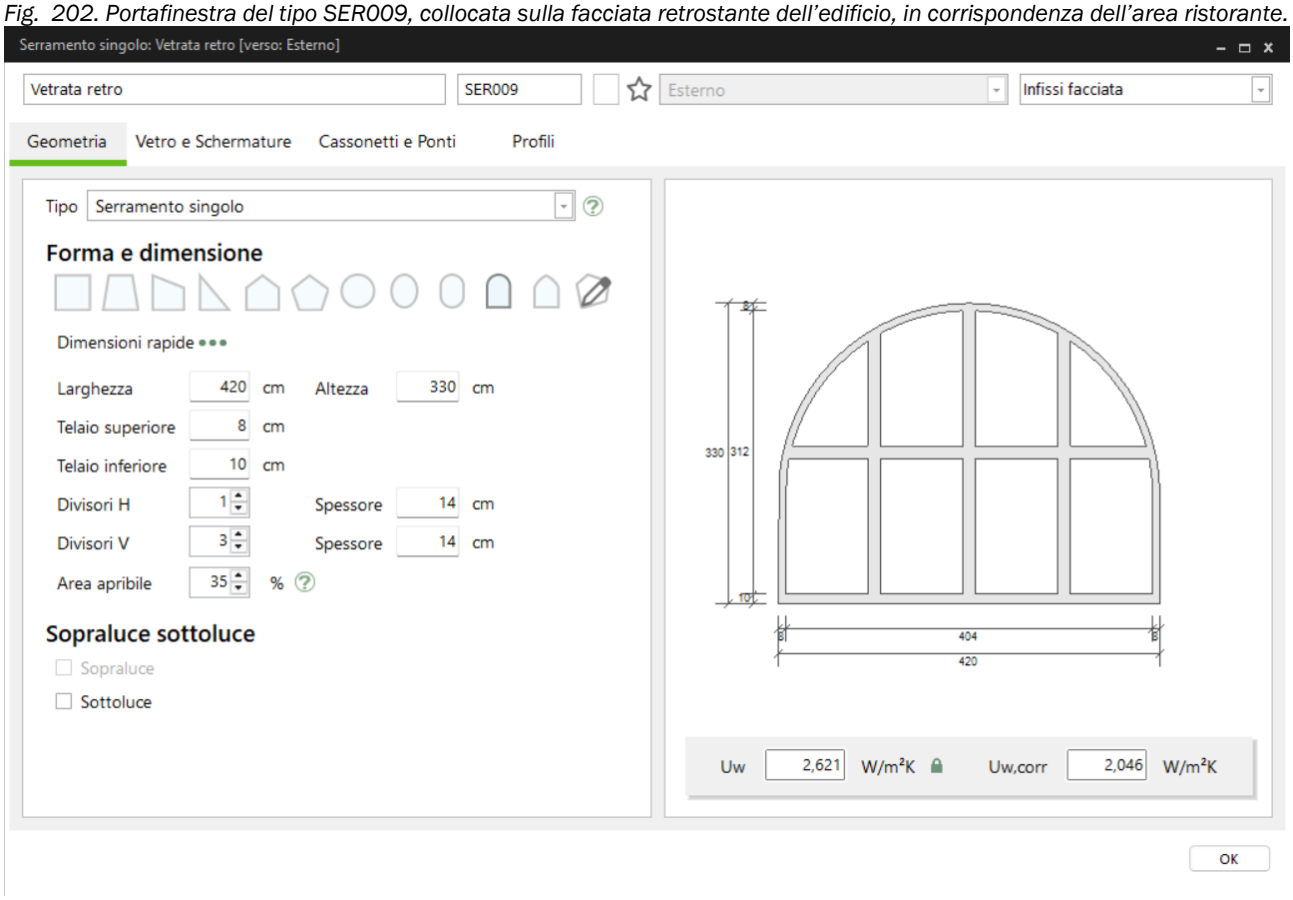



*Fig. 203. Geometria dell'infisso SER009.*

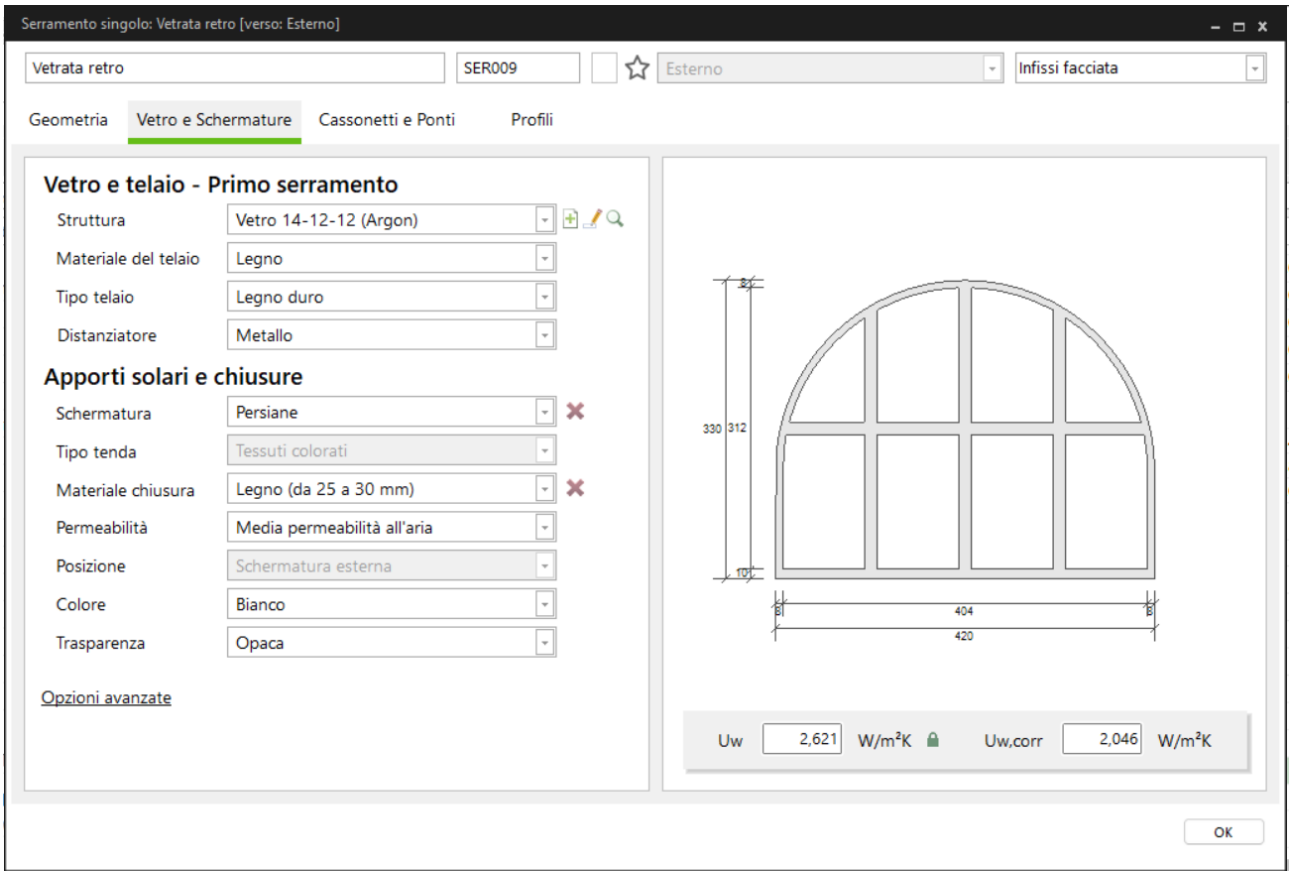



*Fig. 204. Vetro e schermature dell'infisso SER009.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | SER009 | - |
| Tipologia infisso | Vetrata ad arco | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 420 | cm |
| Altezza | 330 | cm |
| Perimetro vetro | - | m |
| Area vetro | - | $m^2$ |
| Area telaio | - | $m^2$ |
| Superficie infisso | - | $m^2$ |
| Chiusure oscuranti interne | Assenti | - |
| Schermature solari esterne | Persiane in legno (25–30 mm), opache, colore nero | - |
| Dimensioni sottofinestra | Assente | - |
| Dimensioni cassonetto | - | - |
| Stratigrafia cassonetto | - | - |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 2,621 | $W/m^2K$ |

| | | |
|---|---|---|
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 2,046 | W/m²K |
| VETRO | | |
| Tipo | Doppio vetro normale – struttura 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14–12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | W/m²K |
| TELAIO | | |
| Materiale telaio | Legno | - |
| Taglio termico | No | - |
| Spessore telaio | 80 | mm |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 2,09 | W/m²K |
| Tipologia distanziatori | Metallo | |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | W/m·K |

*Tabella 157. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente SER009.*

## Infissi interni

Gli infissi interni, pur non contribuendo direttamente alla dispersione verso l'esterno, sono stati considerati nel modello energetico.

### SER007 – Finestre interne

L'infisso identificato con la sigla SER007 corrisponde a una tipologia di finestra collocata nei muri interni che separano i disimpegni dagli uffici (Fig. 205). La finestra presenta dimensioni 98 × 145 cm; è un serramento singolo, suddiviso da 2 traversi orizzontali e 1 montante verticale (sei specchi), area apribile 100%. Il telaio è in legno duro con spessore trasversale 70 mm e Uf ≈ 2,10 W/m²K. La vetrata è un doppio vetro 14–12–12 con Argon (spessore complessivo ≈ 38 mm, Ug ≈ 2,55 W/m²K) con distanziatore metallico. Trattandosi di un infisso interno, non sono presenti schermature/persiane esterne. La trasmittanza complessiva del serramento è Uw = 2,84 W/m²K (Uw,corr = 2,185 W/m²K).

I principali descrittori termo-fisici degli infissi in questione sono riportati in Tabella 158 dove sono sintetizzati la stratigrafia, le dimensioni (lunghezza, altezza, area e perimetro vetrato, superficie complessiva), le caratteristiche dei sistemi di schermatura e oscuramento, nonché i parametri prestazionali (trasmittanza termica dell'intero infisso Uw, trasmittanza del vetro Ug, trasmittanza del telaio Uf, fattore solare g e tipologia di distanziatori).




*Fig. 205. Finestra del tipo SER007, collocata nei muri interni tra disimpegni e uffici.*

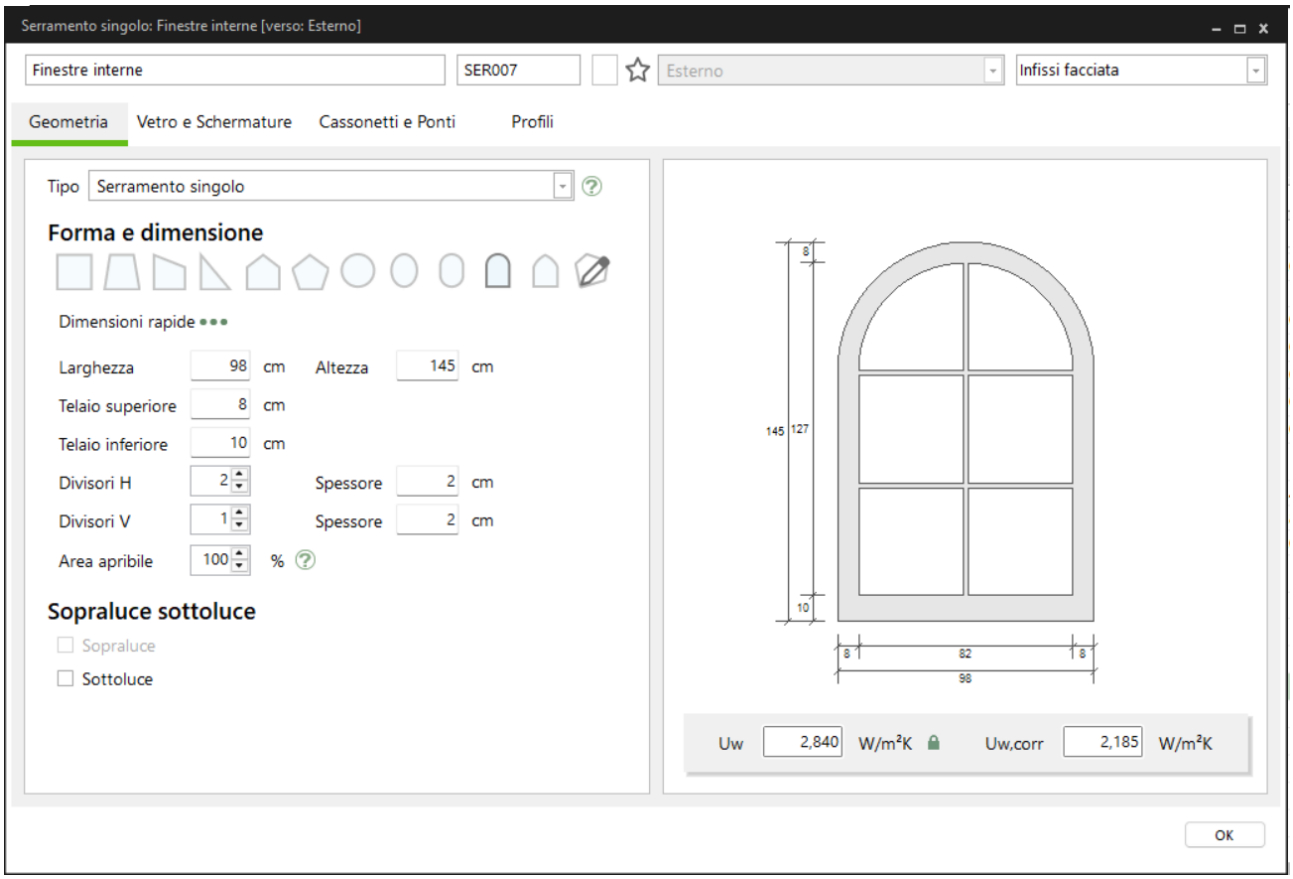



*Fig. 206. Geometria dell'infisso SER007.*

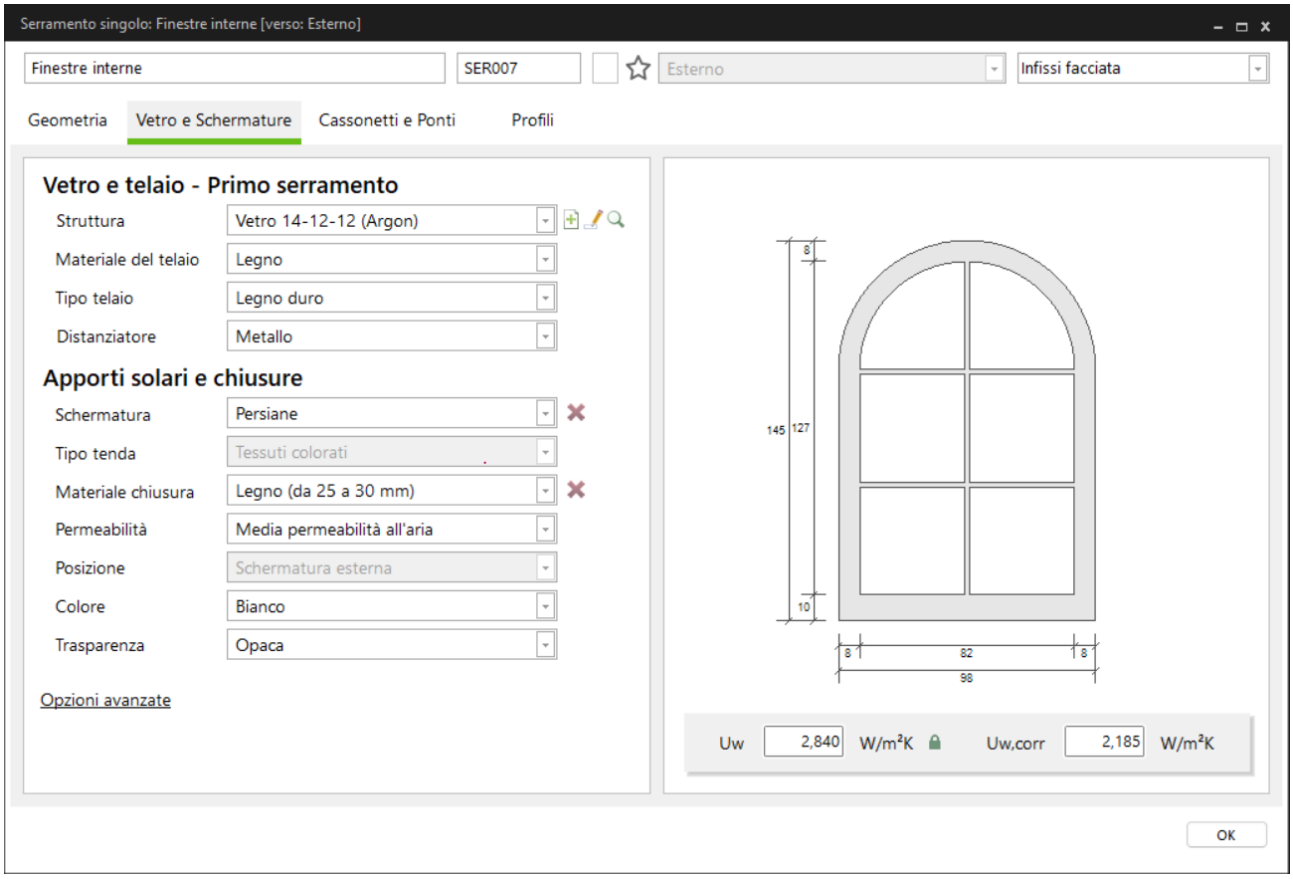



*Fig. 207. Vetro e schermature dell'infisso SER007.*

| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
|---|---|---|
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | SER007 | - |
| Tipologia infisso | Finestra ad arco | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 98 | cm |
| Altezza | 145 | cm |
| Perimetro vetro | - | m |
| Area vetro | - | $m^2$ |
| Area telaio | - | $m^2$ |
| Superficie infisso | - | $m^2$ |
| Chiusure oscuranti interne | Assenti | - |
| Schermature solari esterne | Persiane in legno (25–30 mm), opache, colore nero | - |
| Dimensioni sottofinestra | Assente | - |
| Dimensioni cassonetto | - | - |
| Stratigrafia cassonetto | - | - |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 2,840 | $W/m^2K$ |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 2,185 | $W/m^2K$ |
| VETRO | | |
| Tipo | Doppio vetro normale – struttura 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14–12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | $W/m^2K$ |
| TELAIO | | |
| Materiale telaio | Legno | - |
| Taglio termico | No | - |
| Spessore telaio | 80 | mm |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 2,09 | $W/m^2K$ |
| Tipologia distanziatori | Metallo | |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | W/m·K |

*Tabella 158. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente SER007.*

**SER008 – Vetrata interna verso corridoio**

L'infisso identificato con la sigla SER008 è una portafinestra vetrata interna, collocata nei muri interni che separano i disimpegni dagli uffici (Fig. 208). La portafinestra è interamente vetrata, con dimensioni 500 × 330 cm (L × H), ed è un serramento singolo suddiviso da 1 traverso orizzontale e 3 montanti verticali (divisori 14 cm). La parte superiore è ad arco a tutto sesto. L'area apribile impostata è 35%. Il telaio è in legno duro (spessore trasversale 70 mm, Uf ≈ 2,10 W/m²K). La vetrata è un doppio vetro 14–12–12 con Argon (spessore complessivo ≈ 38 mm, Ug ≈ 2,55 W/m²K), con distanziatore metallico. Trattandosi di un infisso interno verso zona non riscaldata, non sono presenti persiane esterne. La trasmittanza complessiva del serramento risulta Uw = 2,616 W/m²K (Uw,corr = 2,042 W/m²K).

I principali descrittori termo-fisici degli infissi in questione sono riportati in Tabella 159, dove sono sintetizzati la stratigrafia, le dimensioni (lunghezza, altezza, area e perimetro vetrato, superficie complessiva), le caratteristiche dei sistemi di schermatura e oscuramento, nonché i parametri prestazionali (trasmittanza termica dell'intero infisso Uw, trasmittanza del vetro Ug, trasmittanza del telaio Uf, fattore solare g e tipologia di distanziatori).




*Fig. 208. Portafinestra del tipo SER008, collocata nei muri interni tra disimpegni e uffici.*

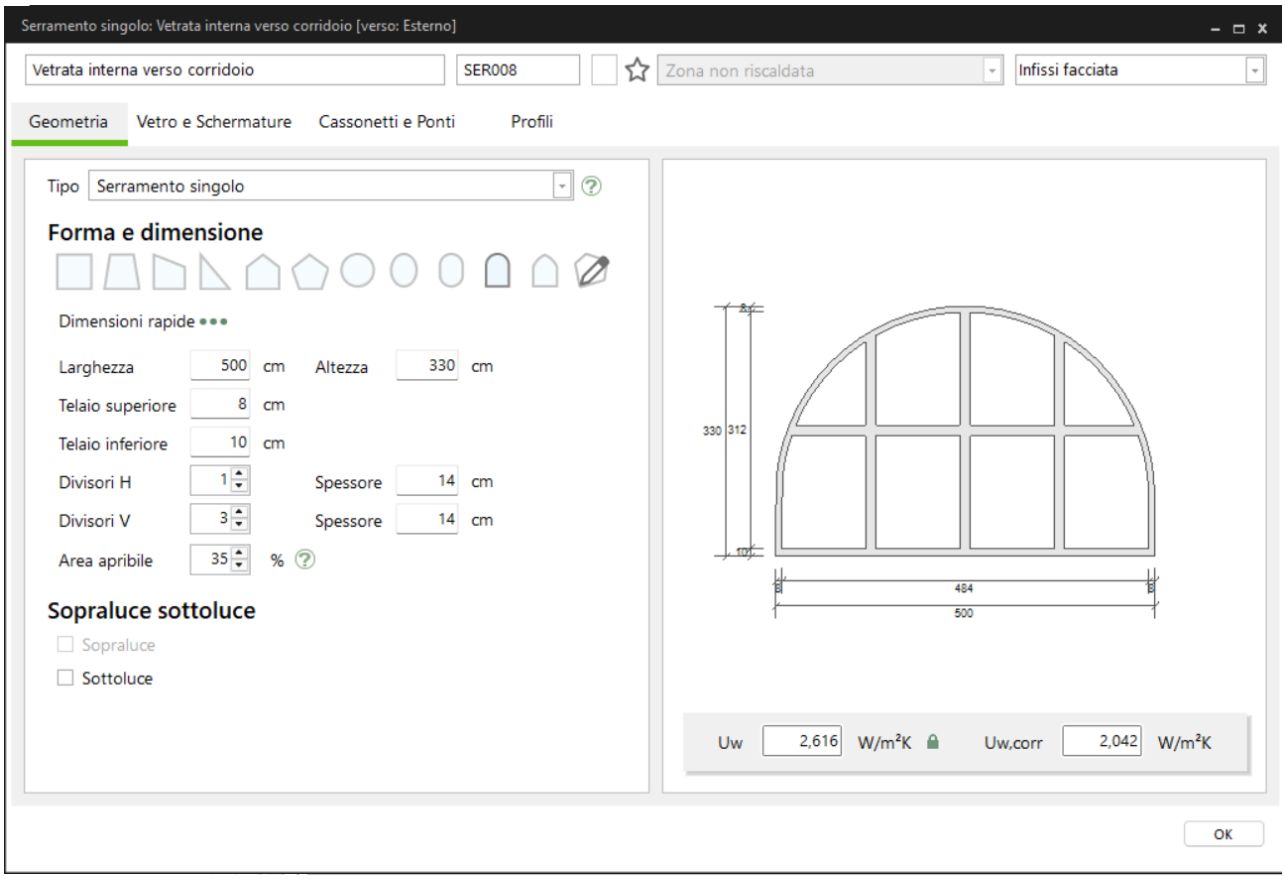



*Fig. 209. Geometria dell'infisso SER008.*

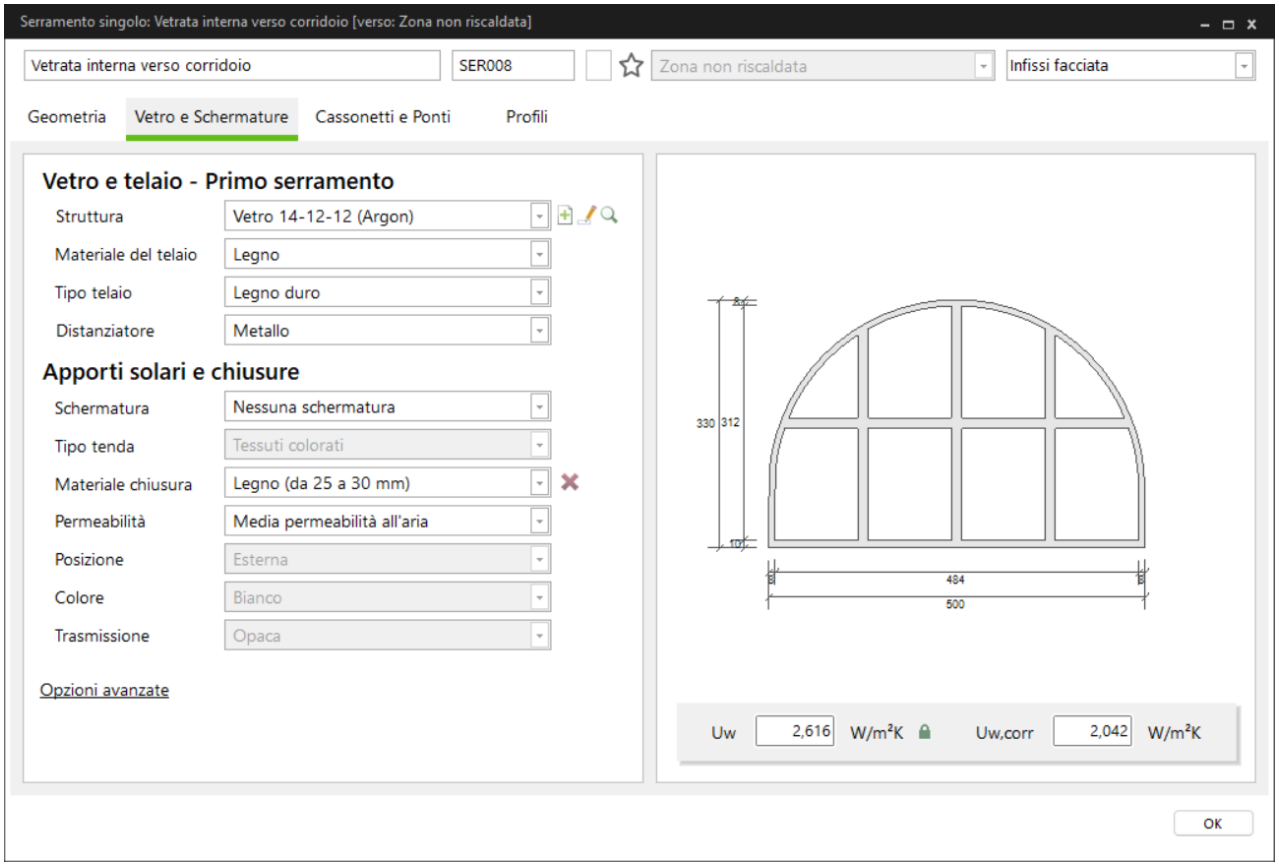



*Fig. 210. Vetro e schermature dell'infisso SER008.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | SER008 | - |
| Tipologia infisso | Vetrata ad arco | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 500 | cm |
| Altezza | 330 | cm |
| Perimetro vetro | - | m |
| Area vetro | - | $m^2$ |
| Area telaio | - | $m^2$ |
| Superficie infisso | - | $m^2$ |
| Chiusure oscuranti interne | Assenti | - |
| Schermature solari esterne | Persiane in legno (25–30 mm), opache, colore nero | - |
| Dimensioni sottofinestra | Assente | - |
| Dimensioni cassonetto | - | - |
| Stratigrafia cassonetto | - | - |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 2,616 | $W/m^2K$ |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 2,042 | $W/m^2K$ |
| VETRO | | |
| Tipo | Doppio vetro normale – struttura 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14–12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | $W/m^2K$ |
| TELAIO | | |
| Materiale telaio | Legno | - |
| Taglio termico | No | - |
| Spessore telaio | 80 | mm |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 2,09 | $W/m^2K$ |
| Tipologia distanziatori | Metallo | |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | $W/m{\cdot}K$ |

*Tabella 159. Applicazione dei descrittori sulla chiusura trasparente SER008.*

### 2.1.5.4 Chiusure trasparenti orizzontali

#### Lucernario rettangolare

Il lucernario rettangolare è un serramento rettangolare installato in copertura (verso esterno), in corrispondenza del corridoio centrale, di dimensioni 500 × 210 cm. Il telaio è metallico con taglio termico (bordature da 10 cm su tutti i lati) e suddivide la superficie in 16 specchi mediante 1 traverso orizzontale e 7 montanti verticali (larghezza elementi 10 cm). L'elemento vetrato è un doppio vetro 14–12–12 con Argon con distanziatore metallico; non sono previste schermature o chiusure aggiuntive e l'area apribile è 100%. La trasmittanza dell'infisso risulta Uw = 3,097 W/m²K (Uw,corr = 3,097 W/m²K), valore in linea con i serramenti orizzontali/di copertura dove l'elevata percentuale di telaio e la posa in orizzontale incrementano gli scambi termici rispetto ai serramenti verticali.

*I principali descrittori termo-fisici degli infissi in questione sono riportati in Tabella 160*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | SER008 | - |
| Tipologia infisso | Vetrata ad arco | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 355 | cm |
| Altezza | 290 | cm |
| Perimetro vetro | 9,85 | m |
| Area vetro | 4,10 | m² |
| Area telaio | - | m² |
| Superficie infisso | 5,15 | m² |
| Chiusure oscuranti interne | Assenti | - |
| Schermature solari esterne | Persiane in legno (25–30 mm), opache, colore nero | - |
| Dimensioni sottofinestra | Assente | - |
| Dimensioni cassonetto | - | - |
| Stratigrafia cassonetto | - | - |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 3,055 | W/m²K |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 3,055 | W/m²K |
| VETRO | | |
| Tipo | Doppio vetro normale – struttura 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14–12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | W/m²K |
| TELAIO | | |

| | | |
|---|---|---|
| Materiale telaio | Legno | - |
| Taglio termico | No | - |
| Spessore telaio | 80 | mm |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 2,09 | W/m²K |
| Tipologia distanziatori | Metallo | |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | W/m·K |

Tabella 163*Tabella 161, dove sono sintetizzati la stratigrafia, le dimensioni (lunghezza, altezza, area e perimetro vetrato, superficie complessiva), le caratteristiche dei sistemi di schermatura e oscuramento, nonché i parametri prestazionali (trasmittanza termica dell'intero infisso Uw, trasmittanza del vetro Ug, trasmittanza del telaio Uf, fattore solare g e tipologia di distanziatori).*

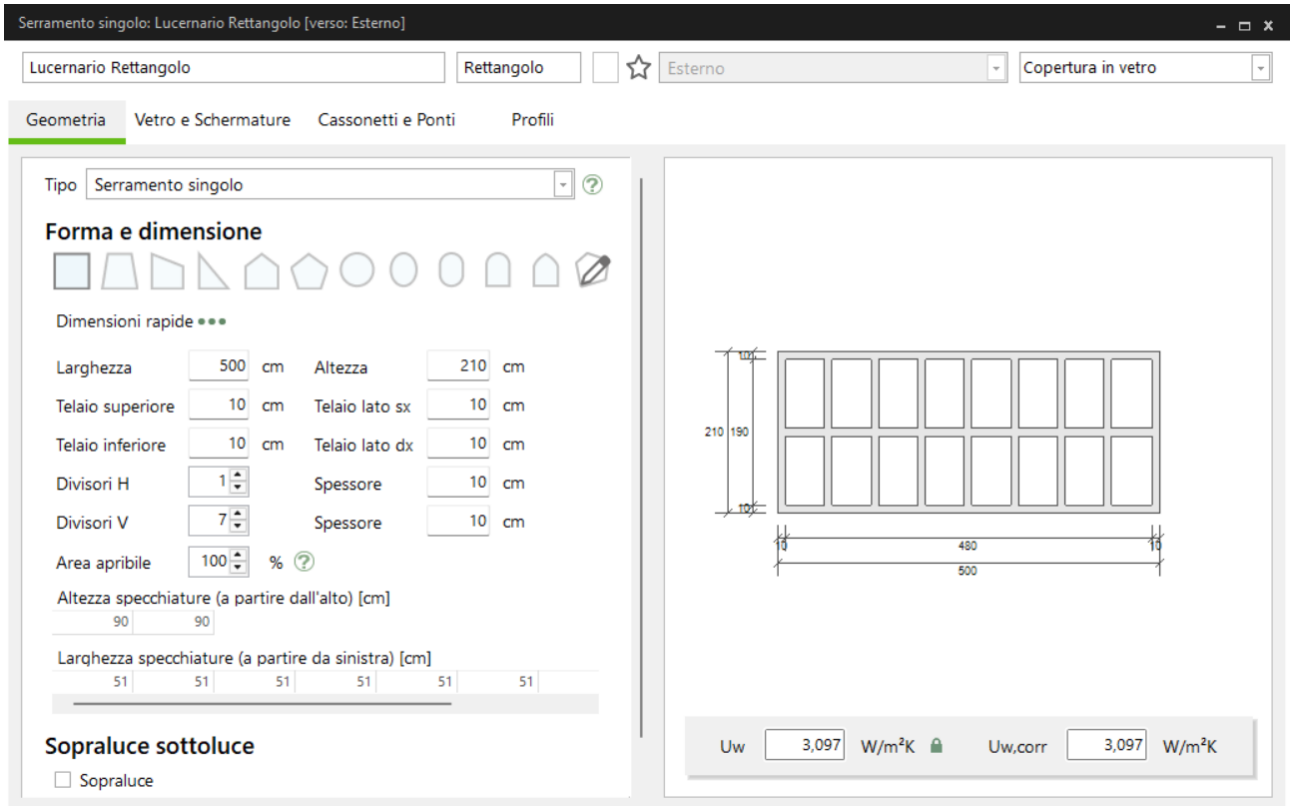



*Fig. 211. Geometria del lucernario rettangolare.*

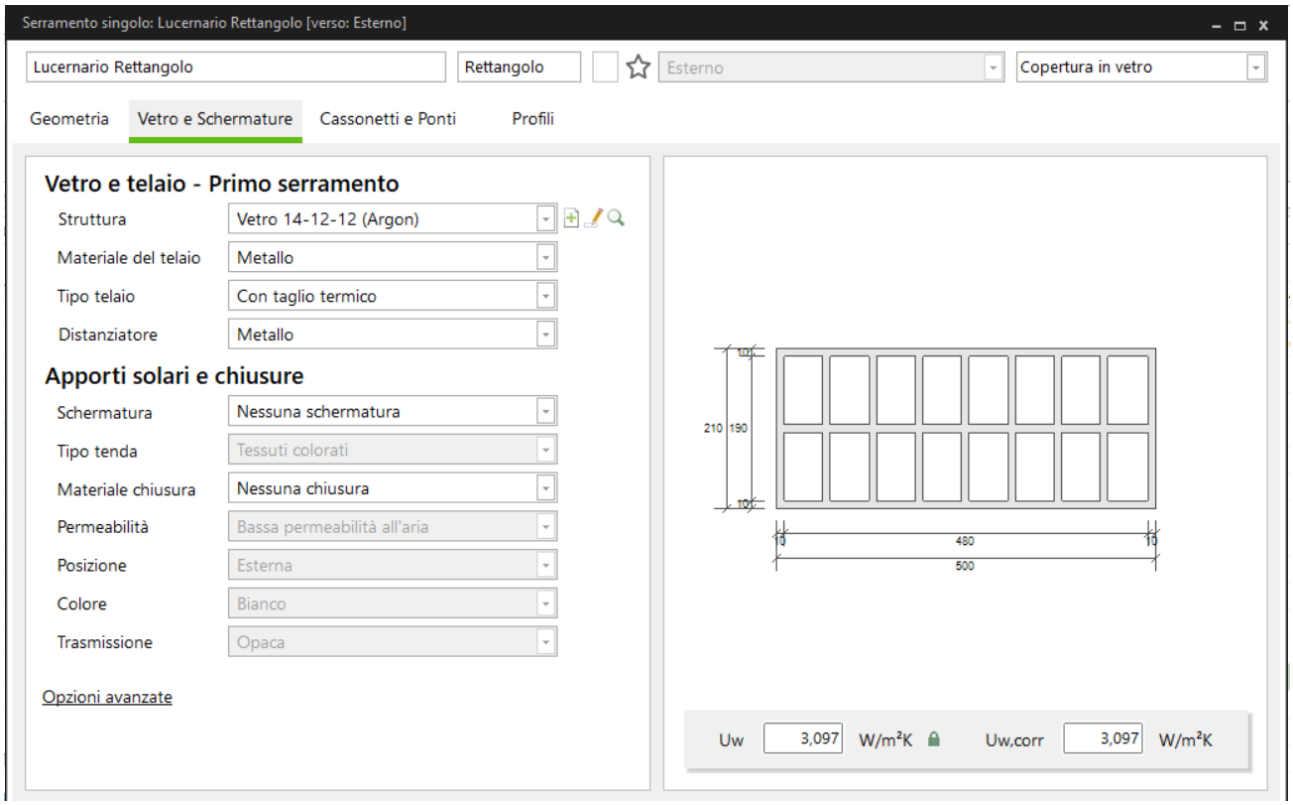



*Fig. 212. Vetro e schermature del lucernario rettangolare.*

DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO

| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
|---|---|---|
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | Lucernario rettangolare | - |
| Tipologia infisso | Serramento orizzontale rettangolare | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 500 | cm |
| Altezza | 210 | cm |
| Perimetro vetro | ≈ 13,40 (solo contorno luce) | m |
| Area vetro | 7,38 (netta) | $m^2$ |
| Area telaio | 3,12 (inclusi divisori) | $m^2$ |
| Superficie infisso | 10,50 | $m^2$ |
| Chiusure oscuranti interne | Nessuna | - |
| Schermature solari esterne | Nessuna | - |
| Dimensioni sottofinestra | Assente | - |
| Dimensioni cassonetto | Assente | - |
| Stratigrafia cassonetto | Assente | - |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 3,097 | $W/m^2K$ |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 3,097 | $W/m^2K$ |
| VETRO | | |
| Tipo | 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14-12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | $W/m^2K$ |
| TELAIO | | |
| Materiale telaio | Metallo | - |
| Taglio termico | Si | - |
| Spessore telaio | 10 | cm |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 3,22 | $W/m^2K$ |
| Tipologia distanziatori | Metallo | - |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | W/m·K |

*Tabella 160. Applicazione dei descrittori sul lucernario rettangolare.*

### Lucernario trapezoidale

Il lucernario trapezoidale è un serramento singolo installato in copertura, con dimensioni L base inferiore 800 cm, L base superiore 400 cm, altezza 400 cm. Il telaio è metallico senza taglio termico (bordature 14 cm in testa e in base, 10 cm sui lati) e suddivide la superficie con 1 traverso orizzontale e 11 montanti verticali; i divisori hanno larghezza 6 cm.
Il pacchetto vetrato è doppio 14–12–12 con gas Argon, con distanziatore metallico; non sono previste schermature o chiusure aggiuntive. La trasmittanza dell'infisso è Uw = 3,295 W/m²K (Uw,corr = 3,295 W/m²K), valore coerente con un lucernario in metallo senza taglio termico e con elevata percentuale di telaio.

*I principali descrittori termo-fisici degli infissi in questione sono riportati in Tabella 161.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | SER008 | - |
| Tipologia infisso | Vetrata ad arco | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 355 | cm |
| Altezza | 290 | cm |
| Perimetro vetro | 9,85 | m |
| Area vetro | 4,10 | m² |
| Area telaio | - | m² |
| Superficie infisso | 5,15 | m² |
| Chiusure oscuranti interne | Assenti | - |
| Schermature solari esterne | Persiane in legno (25–30 mm), opache, colore nero | - |
| Dimensioni sottofinestra | Assente | - |
| Dimensioni cassonetto | - | - |
| Stratigrafia cassonetto | - | - |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 3,055 | W/m²K |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 3,055 | W/m²K |
| VETRO | | |
| Tipo | Doppio vetro normale – struttura 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14–12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | W/m²K |
| TELAIO | | |
| Materiale telaio | Legno | - |
| Taglio termico | No | - |

| | | |
|---|---|---|
| Spessore telaio | 80 | mm |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 2,09 | $W/m^2K$ |
| Tipologia distanziatori | Metallo | |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | W/m·K |

*Tabella 16362, dove sono sintetizzati la stratigrafia, le dimensioni (lunghezza, altezza, area e perimetro vetrato, superficie complessiva), le caratteristiche dei sistemi di schermatura e oscuramento, nonché i parametri prestazionali (trasmittanza termica dell'intero infisso Uw, trasmittanza del vetro Ug, trasmittanza del telaio Uf, fattore solare g e tipologia di distanziatori).*

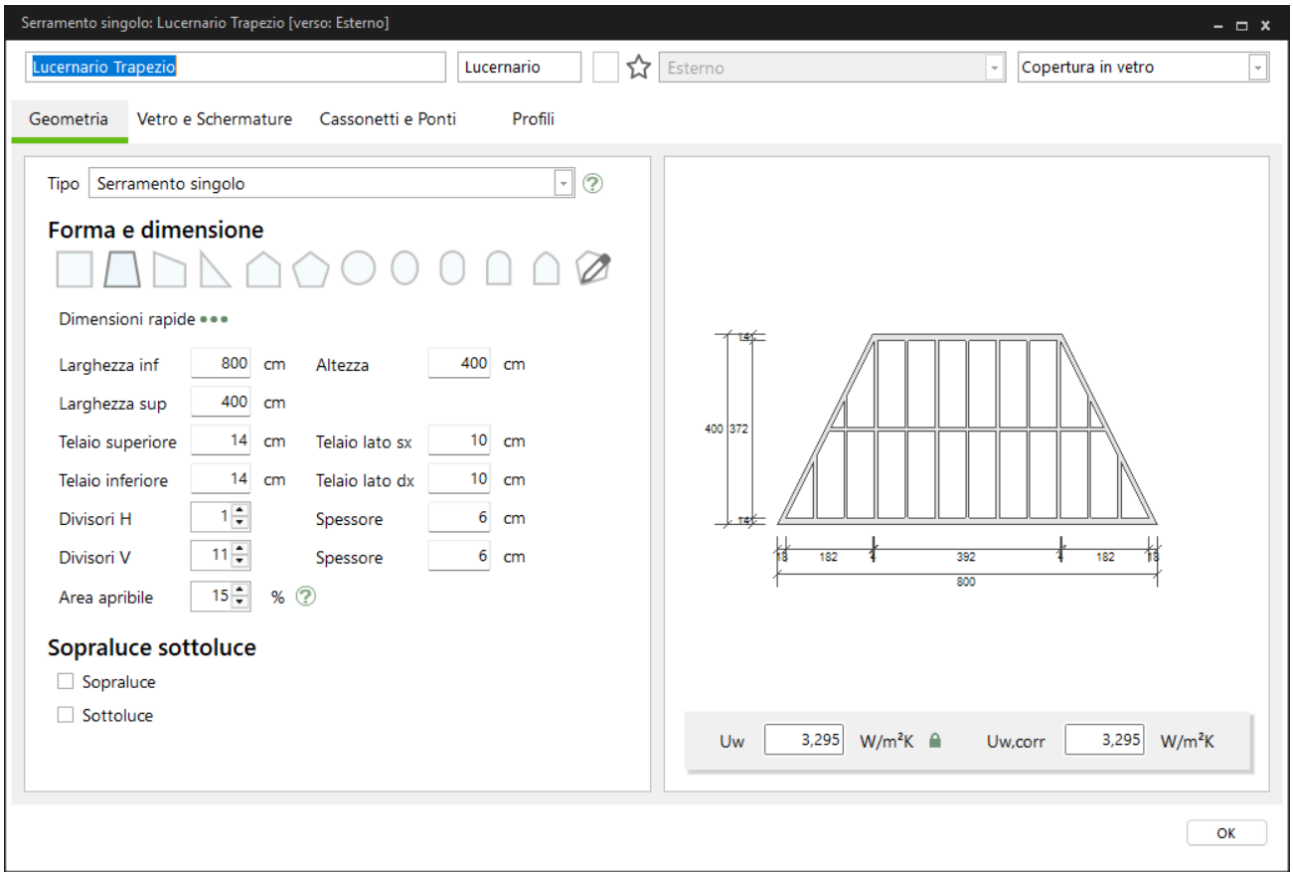



*Fig. 213. Geometria del lucernario rettangolare.*

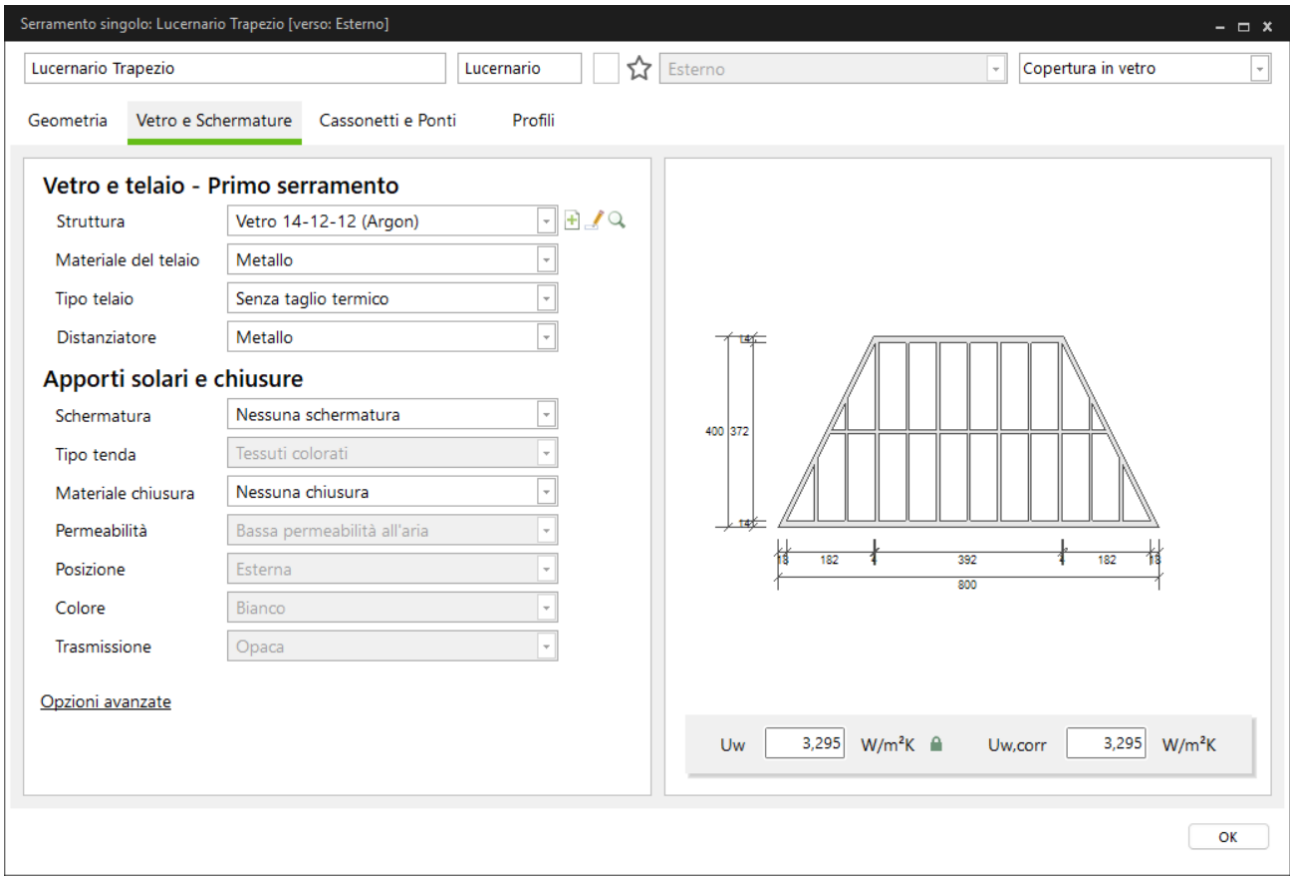



*Fig. 214. Vetro e schermature del lucernario rettangolare.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | Lucernario trapezoidale | - |
| Tipologia infisso | Serramento orizzontale trapezoidale | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 800 | cm |
| Altezza | 400 | cm |
| Perimetro vetro | | m |
| Area vetro | | $m^2$ |
| Area telaio | | $m^2$ |
| Superficie infisso | | $m^2$ |
| Chiusure oscuranti interne | Nessuna | - |
| Schermature solari esterne | Nessuna | - |
| Dimensioni sottofinestra | Assente | - |
| Dimensioni cassonetto | Assente | - |
| Stratigrafia cassonetto | Assente | - |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 3,295 | $W/m^2K$ |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 3,295 | $W/m^2K$ |
| VETRO | | |
| Tipo | 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14-12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | $W/m^2K$ |
| TELAIO | | |
| Materiale telaio | Metallo | - |
| Taglio termico | Si | - |
| Spessore telaio | 10 | cm |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 3,22 | $W/m^2K$ |
| Tipologia distanziatori | Metallo | - |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | W/m·K |

*Tabella 161. Applicazione dei descrittori sul lucernario trapezioidale.*

### Lucernario triangolare 1

Il lucernario trapezoidale 1 è un erramento singolo in copertura, a geometria triangolare (serramento orizzontale). Le dimensioni utili sono base 290 cm e altezza 355 cm, per una superficie dell'infisso di 5,15 m². Il contorno luce del vetro sviluppa un perimetro di 9,85 m e l'area vetrata è 4,11 m². Il telaio è metallico con taglio termico, spessore 10 cm su tutti i lati (Uf = 3,22 W/m²K). Il pacchetto vetrato è un doppio 14–12–12 con gas Argon (Ug = 2,55 W/m²K, g = 0,75), con distanziatore metallico (ψ = 0,06 W/mK). Nessuna schermatura o chiusura aggiuntiva; assenti sottofinestra e cassonetto. Prestazioni: Uw = 3,055 W/m²K (Uws = 3,055 W/m²K).

*I principali descrittori termo-fisici degli infissi in questione sono riportati in Tabella 162.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | SER008 | - |
| Tipologia infisso | Vetrata ad arco | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 355 | cm |
| Altezza | 290 | cm |
| Perimetro vetro | 9,85 | m |
| Area vetro | 4,10 | m² |
| Area telaio | - | m² |
| Superficie infisso | 5,15 | m² |
| Chiusure oscuranti interne | Assenti | - |
| Schermature solari esterne | Persiane in legno (25–30 mm), opache, colore nero | - |
| Dimensioni sottofinestra | Assente | - |
| Dimensioni cassonetto | - | - |
| Stratigrafia cassonetto | - | - |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 3,055 | W/m²K |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 3,055 | W/m²K |
| VETRO | | |
| Tipo | Doppio vetro normale – struttura 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14–12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | W/m²K |
| TELAIO | | |
| Materiale telaio | Legno | - |
| Taglio termico | No | - |
| Spessore telaio | 80 | mm |

| | | |
|---|---|---|
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 2,09 | W/m²K |
| Tipologia distanziatori | Metallo | |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | W/m·K |

Tabella 163*Tabella 163, dove sono sintetizzati la stratigrafia, le dimensioni (lunghezza, altezza, area e perimetro vetrato, superficie complessiva), le caratteristiche dei sistemi di schermatura e oscuramento, nonché i parametri prestazionali (trasmittanza termica dell'intero infisso Uw, trasmittanza del vetro Ug, trasmittanza del telaio Uf, fattore solare g e tipologia di distanziatori).*

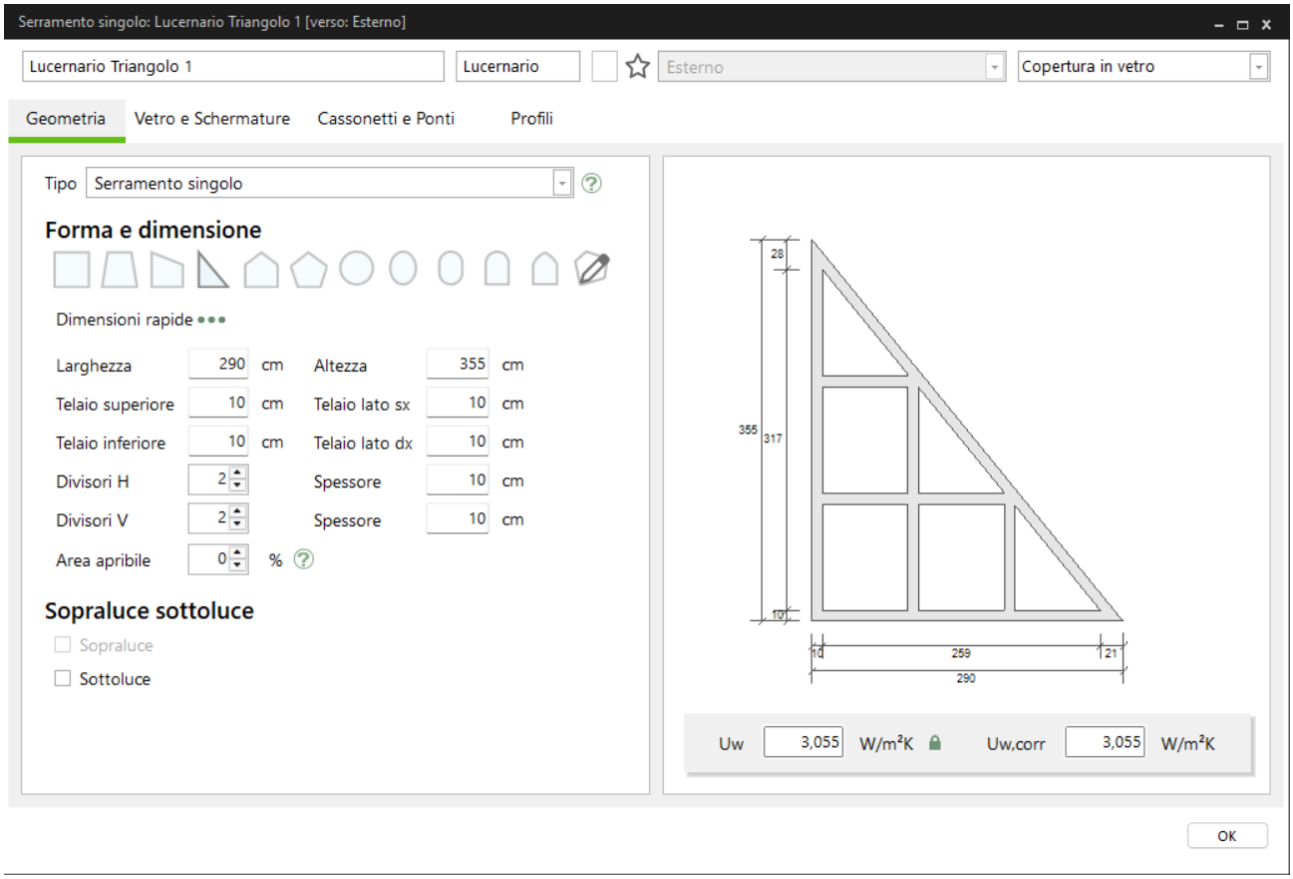



*Fig. 215. Geometria del lucernario triangolare 1.*

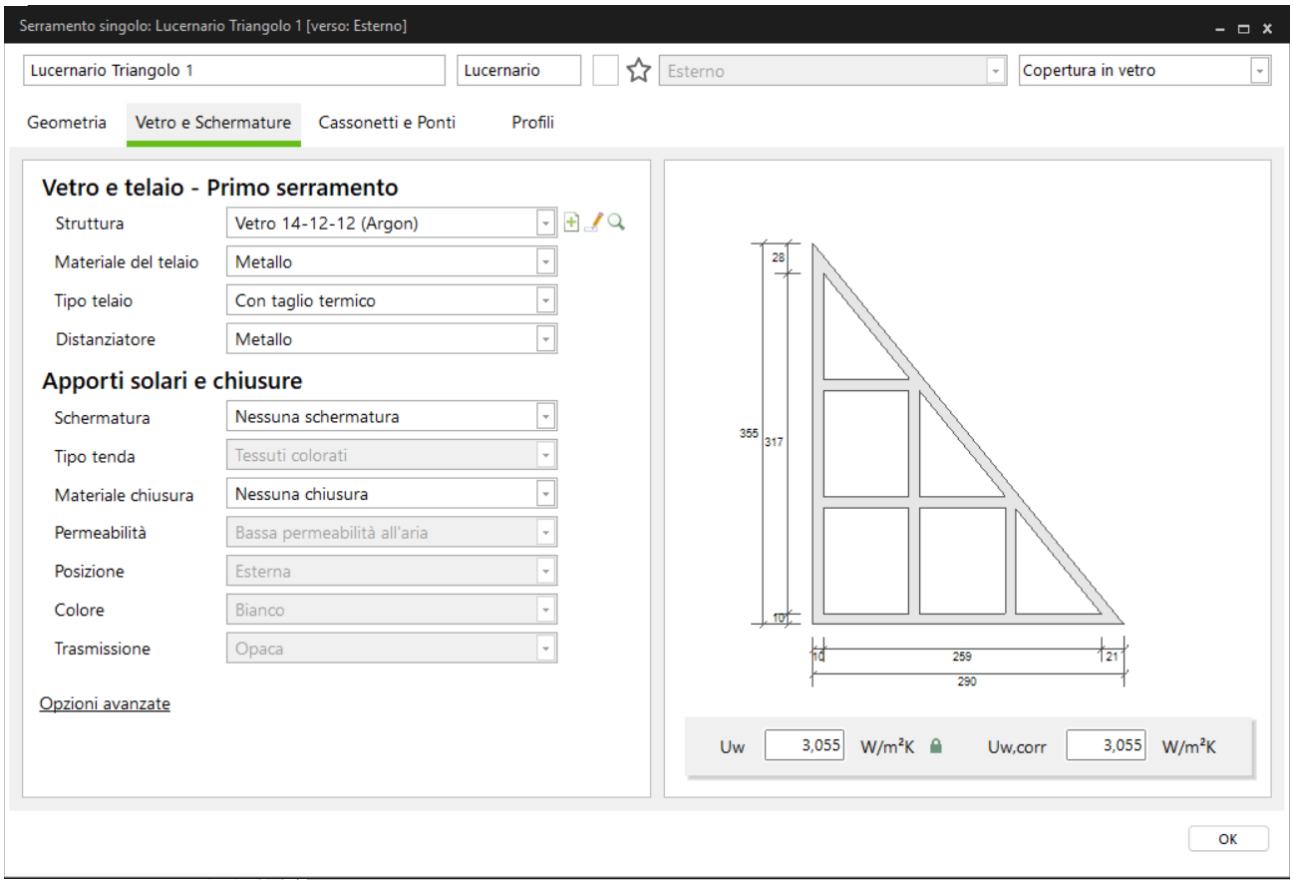



*Fig. 216. Vetro e schermature del lucernario triangolare 1.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | Lucernario triangolare 1 | - |
| Tipologia infisso | Serramento orizzontale trapezoidale | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 290 | cm |
| Altezza | 355 | cm |
| Perimetro vetro | 9,85 | m |
| Area vetro | 4,11 | $m^2$ |
| Area telaio | - | $m^2$ |
| Superficie infisso | 5,15 | $m^2$ |
| Chiusure oscuranti interne | Nessuna | - |
| Schermature solari esterne | Nessuna | - |
| Dimensioni sottofinestra | Assente | - |
| Dimensioni cassonetto | Assente | - |
| Stratigrafia cassonetto | Assente | - |

| | | |
|---|---|---|
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 3,055 | W/m²K |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 3,055 | W/m²K |
| VETRO | | |
| Tipo | 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14-12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | W/m²K |
| TELAIO | | |
| Materiale telaio | Metallo | - |
| Taglio termico | Si | - |
| Spessore telaio | 10 | cm |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 3,22 | W/m²K |
| Tipologia distanziatori | Metallo | - |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | W/m·K |

*Tabella 162. Applicazione dei descrittori sul lucernario rettangolare 1.*

### Lucernario triangolare 2

Il lucernario trapezoidale 2 è un serramento singolo di forma trapezoidale con base inferiore 800 cm, base superiore 400 cm e altezza 400 cm. Il telaio metallico senza taglio termico presenta bordature di 14 cm in sommità e alla base e 10 cm sui lati; la superficie è suddivisa da 1 traverso orizzontale e 11 montanti verticali (larghezza divisori 6 cm). Vetrata doppia 14–12–12 con gas Argon, distanziatore metallico; assenza di schermature e chiusure aggiuntive. Prestazioni: Uw = 3,295 W/m²K (Uw,corr = 3,295 W/m²K).
*I principali descrittori termo-fisici degli infissi in questione sono riportati in Tabella 163.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | SER008 | - |
| Tipologia infisso | Vetrata ad arco | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 355 | cm |
| Altezza | 290 | cm |
| Perimetro vetro | 9,85 | m |
| Area vetro | 4,10 | m² |
| Area telaio | - | m² |
| Superficie infisso | 5,15 | m² |
| Chiusure oscuranti interne | Assenti | - |
| Schermature solari esterne | Persiane in legno (25–30 mm), opache, colore nero | - |
| Dimensioni sottofinestra | Assente | - |
| Dimensioni cassonetto | - | - |
| Stratigrafia cassonetto | - | - |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 3,055 | W/m²K |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 3,055 | W/m²K |
| VETRO | | |
| Tipo | Doppio vetro normale – struttura 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14–12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | W/m²K |
| TELAIO | | |
| Materiale telaio | Legno | - |
| Taglio termico | No | - |
| Spessore telaio | 80 | mm |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 2,09 | W/m²K |

| | | |
|---|---|---|
| Tipologia distanziatori | Metallo | |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | W/m·K |

Tabella 163, *dove sono sintetizzati la stratigrafia, le dimensioni (lunghezza, altezza, area e perimetro vetrato, superficie complessiva), le caratteristiche dei sistemi di schermatura e* oscuramento, nonché i parametri prestazionali (trasmittanza termica dell'intero infisso Uw, trasmittanza del vetro Ug, trasmittanza del telaio Uf, fattore solare g e tipologia di distanziatori).

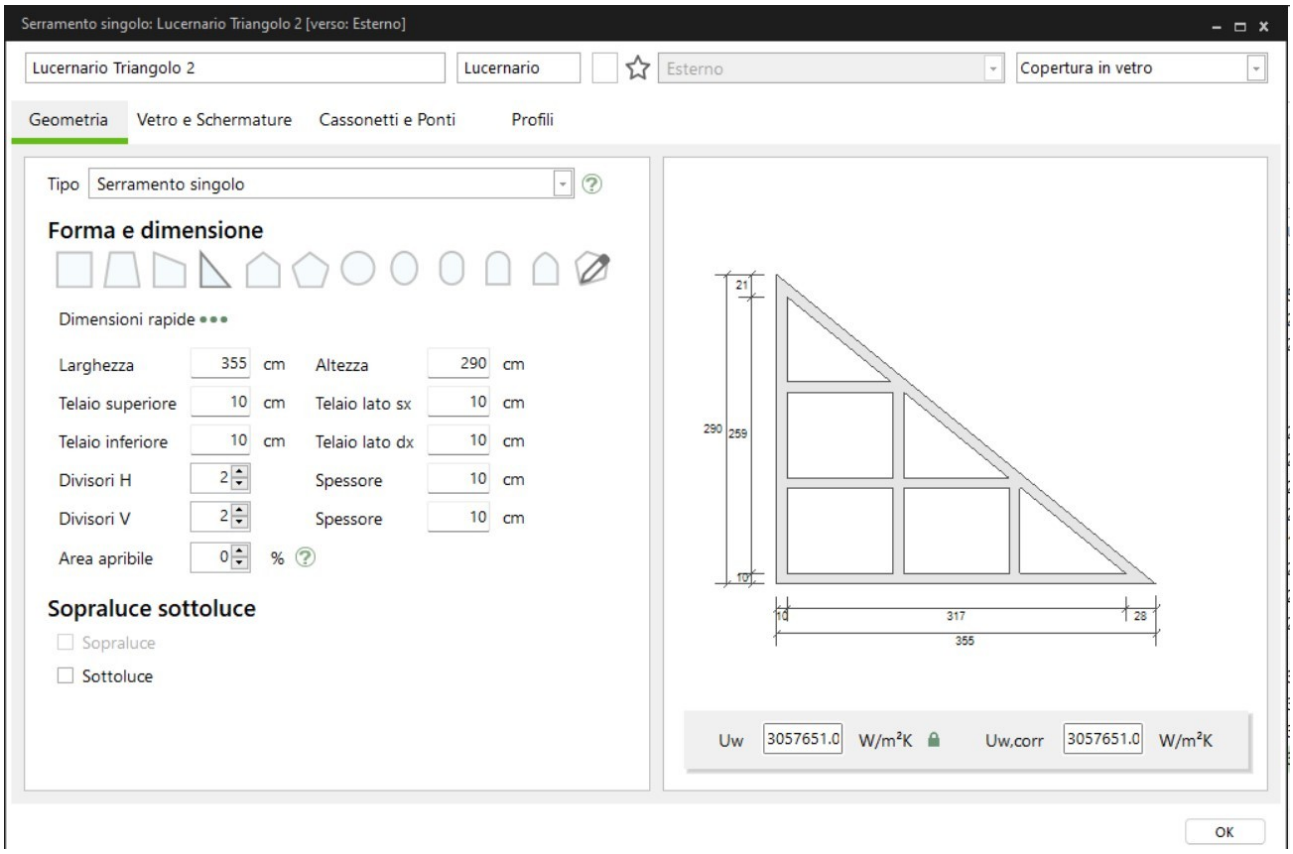



*Fig. 217. Geometria del lucernario triangolare 2.*

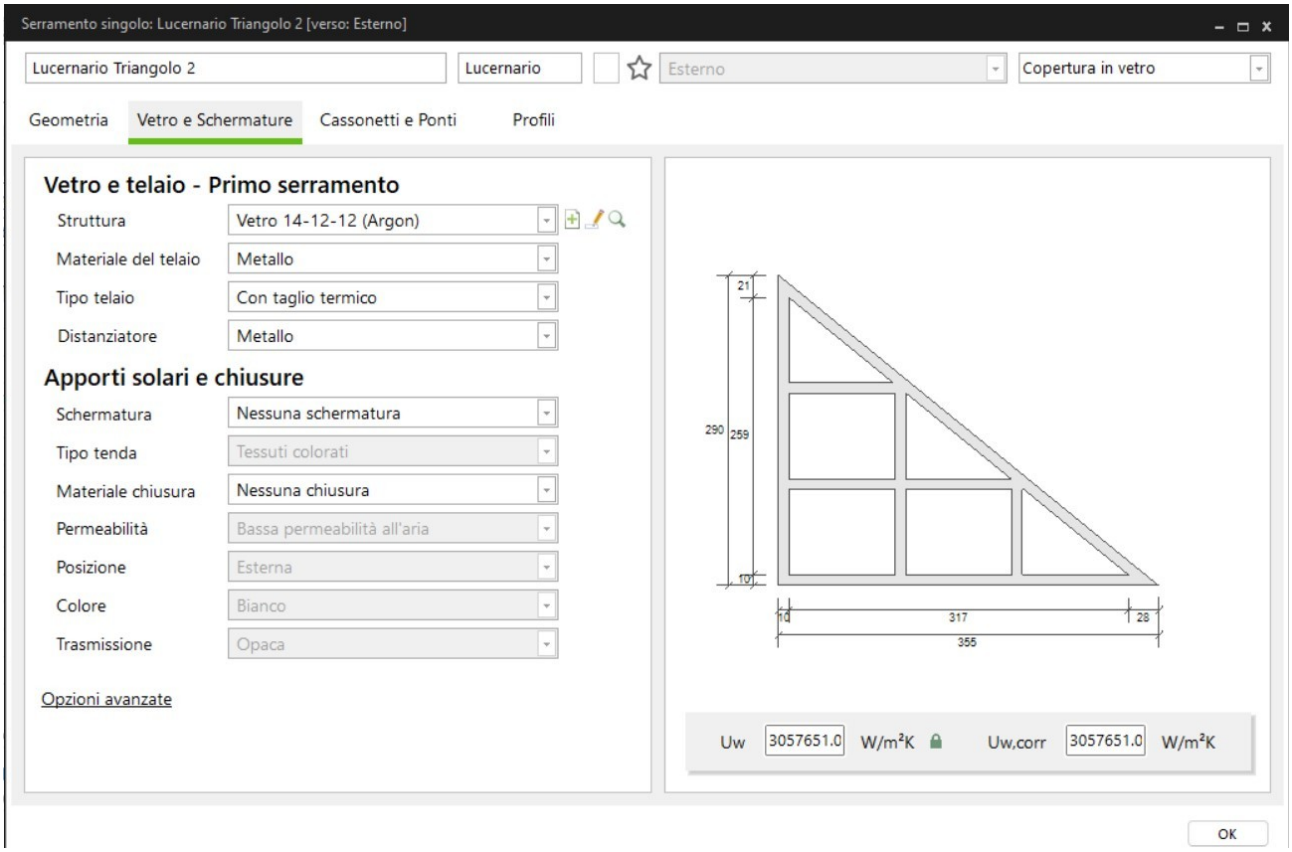



*Fig. 218. Vetro e schermature del lucernario triangolare 2.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO |
|---|

| DESCRITTORI CHIUSURE TRASPARENTI | | |
|---|---|---|
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Codice elemento | SER008 | - |
| Tipologia infisso | Vetrata ad arco | - |
| Esposizione | - | - |
| Lunghezza | 355 | cm |
| Altezza | 290 | cm |
| Perimetro vetro | 9,85 | m |
| Area vetro | 4,10 | $m^2$ |
| Area telaio | - | $m^2$ |
| Superficie infisso | 5,15 | $m^2$ |
| Chiusure oscuranti interne | Assenti | - |
| Schermature solari esterne | Persiane in legno (25–30 mm), opache, colore nero | - |
| Dimensioni sottofinestra | Assente | - |
| Dimensioni cassonetto | - | - |
| Stratigrafia cassonetto | - | - |
| Trasmittanza termica intero infisso (Uw) | 3,055 | $W/m^2K$ |
| Trasmittanza termica globale infisso (Uws) | 3,055 | $W/m^2K$ |
| VETRO | | |
| Tipo | Doppio vetro normale – struttura 14–12–12 (Argon) | - |
| Spessore del vetro | 14–12 | mm |
| Spessore intercapedine | 12 | mm |
| Gas intercapedine | Argon | - |
| Fattore solare (g) | 0,75 | - |
| Trasmittanza termica vetro (Ug) | 2,55 | $W/m^2K$ |
| TELAIO | | |
| Materiale telaio | Legno | - |
| Taglio termico | No | - |
| Spessore telaio | 80 | mm |
| Trasmittanza termica telaio (Uf) | 2,09 | $W/m^2K$ |
| Tipologia distanziatori | Metallo | |
| Trasmittanza distanziatori | 0,06 | W/m·K |

*Tabella 163. Applicazione dei descrittori sul lucernario triangolare 2.*

### 2.1.6 I ponti termici

I ponti termici individuati nell'edificio fanno riferimento a una serie di elementi costruttivi critici, tra cui: le finestre collocate lungo i corridoi, le aperture presenti sulle facciate, gli angoli dell'involucro edilizio, i giunti tra pavimenti e pareti, le coperture, nonché i lucernari che illuminano i corridoi. Tali punti rappresentano aree di discontinuità dell'involucro termico, in cui si registrano dispersioni energetiche significative.

#### Ponti termici parete/serramento

#### Ponti termici SER007 – Finestre interne

Per il serramento identificato con la sigla SER007 (Fig. 219.) sono stati analizzati i principali ponti termici che si verificano in corrispondenza del nodo parete/serramento. In particolare, si è approfondita la connessione con le mazzette laterali, con la soglia in marmo e con l'architrave, punti in cui la discontinuità materica e geometrica può generare significative dispersioni termiche.

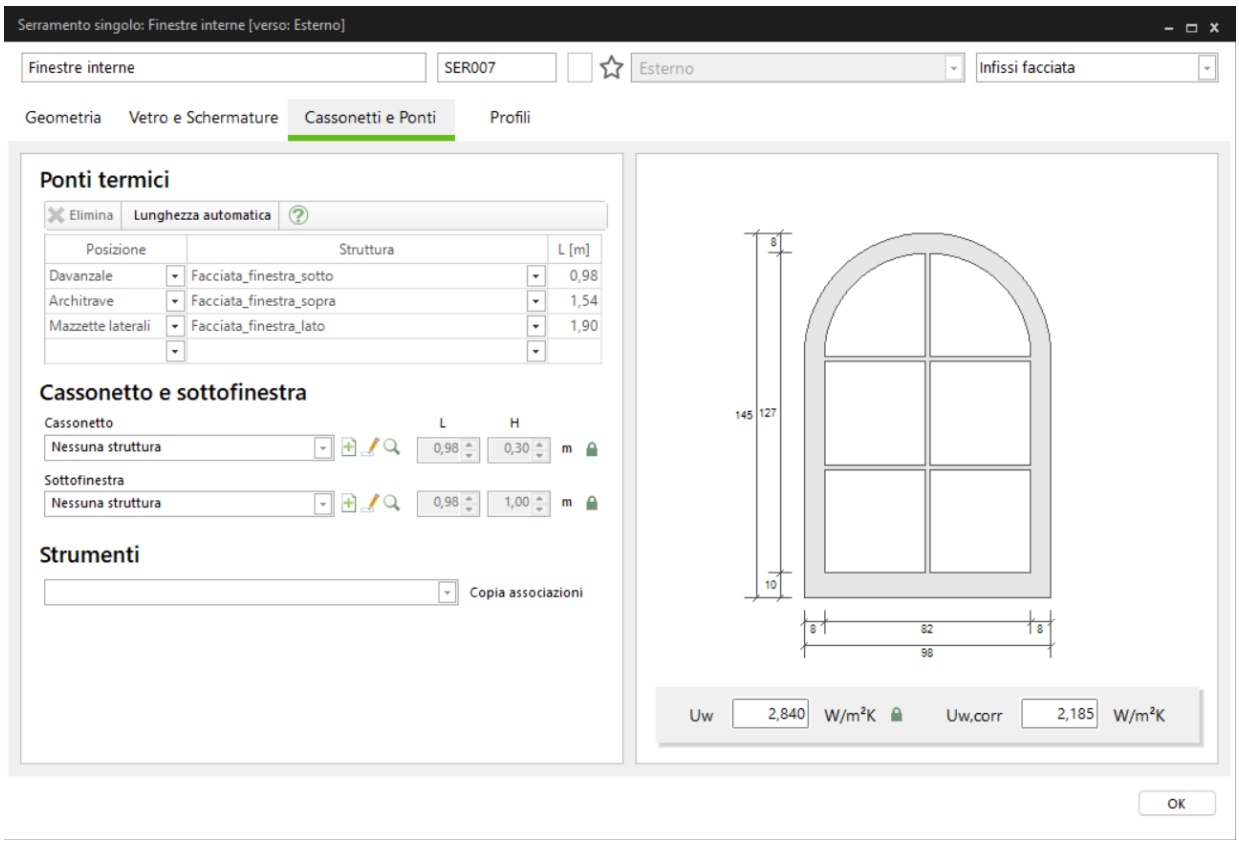



*Fig. 219. Definizione dei ponti termici e valori di trasmittanza dell'infisso SER007 in Termolog.*

**SER007 - Connessione parete/serramento con mazzette laterali**

Il primo ponte termico analizzato, relativo al serramento identificato con la sigla SER007, è generato dal contatto tra il serramento e la parete in corrispondenza della mazzetta laterale, dove si verificano discontinuità geometriche e materiche.
Il calcolo restituisce i valori riportati in Fig. 220. Nel mese critico (dicembre) è stato determinato il fattore di temperatura superficiale interna fRsi = 0,692, inferiore al valore limite ammesso (fRsi,amm = 0,767) previsto dalla UNI EN ISO 13788: ciò indica che il nodo non soddisfa i requisiti minimi di sicurezza igrotermica, risultando potenzialmente critico per rischio muffa.

Per la valutazione sono stati predisposti descrittori tecnico-prestazionali, validi in generale per tutti i ponti termici dell'edificio e applicati, in questo caso, al nodo di connessione analizzato. La Tabella 164 riporta i valori calcolati, mettendo in evidenza sia le dispersioni energetiche sia gli indicatori di rischio igrotermico, con alcuni descrittori aggiuntivi utili ad approfondire la prestazione del nodo.

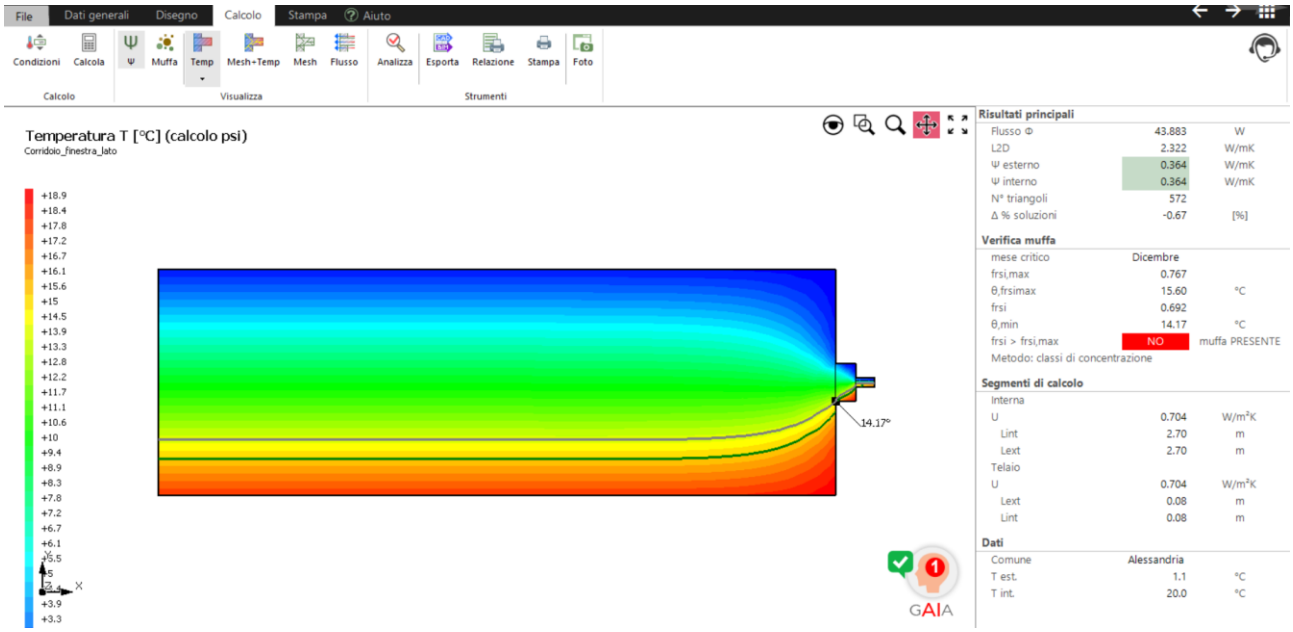



*Fig. 220. Distribuzione della temperatura superficiale e verifica del ponte termico nelle aree laterali dell'apertura finestrata SER007 (mazzette).*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| PONTI TERMICI DELL'ELEMENTO | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| CODICE ELEMENTO | SER007 | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Dispersione totale (flusso) | 43,88 | W/m |
| Peso relativo sull'edificio | - | - |
| Trasmittanza termica lineica | 0,3641 | W/mK |
| Coefficiente di accoppiamento termico L2D | 2,32 | W/mK |
| Temperatura superficiale minima (Tsi) | 14,2 | °C |
| fRsi critico | 0,767 (dicembre) | - |
| fRsi calcolato | 0,692 | - |
| Rischio muffa | Si | - |

*Tabella 164. Applicazione dei descrittori sui ponti termici al nodo connessione parete/serramento con mazzette laterali della finestra SER007.*

**SER007 - Connessione parete/serramento con soglia (davanzale in marmo)**

Il secondo ponte termico analizzato, relativo al serramento identificato con la sigla SER007, si sviluppa nella parte inferiore dell'apertura finestrata, in corrispondenza del contatto tra serramento e parete, dove è presente una soglia in marmo.
Il calcolo restituisce i valori riportati in Fig. 221. Nel mese critico (dicembre) è stato determinato il fattore di temperatura superficiale interna fRsi = 0,552, inferiore al valore limite ammesso (fRsi,amm = 0,767) previsto dalla UNI EN ISO 13788: ciò indica che il nodo non soddisfa i requisiti minimi di sicurezza igrotermica, risultando potenzialmente critico per rischio muffa.

Per la valutazione sono stati predisposti descrittori tecnico-prestazionali, validi in generale per tutti i ponti termici dell'edificio e applicati, in questo caso, al nodo di connessione con soglia. La Tabella 165 riporta i valori calcolati, evidenziando sia le dispersioni energetiche sia gli indicatori di rischio igrotermico, con alcuni descrittori aggiuntivi utili ad approfondire la prestazione del nodo.

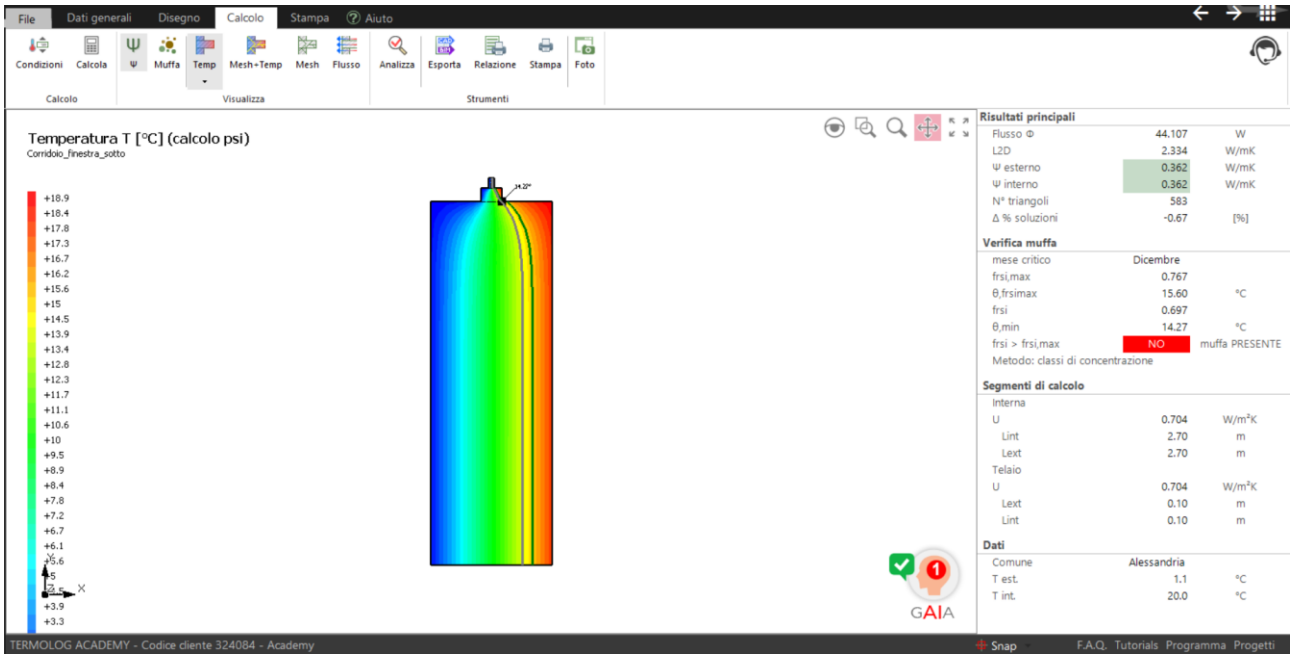


*Fig. 221. Distribuzione della temperatura superficiale e verifica del ponte termico nell'area inferiore dell'apertura finestrata SER007 (soglia).*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| PONTI TERMICI DELL'ELEMENTO | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| CODICE ELEMENTO | SER007 | |
| **DESCRITTORE** | **UNITA' DI MISURA** | **UNITA' DI MISURA** |
| Dispersione totale | 56,55 | W/m |
| Peso relativo sull'edificio | - | - |
| Trasmittanza termica lineica | 0,9006 | W/mK |
| Coefficiente di accoppiamento termico L2D | 2,99 | W/mK |
| Temperatura superficiale minima (Tsi) | 11,5 | °C |
| fRsi critico | 0,767 (dicembre) | - |
| fRsi calcolato | 0,552 | - |

| | | |
|---|---|---|
| Rischio muffa | Si | - |

*Tabella 165. Applicazione dei descrittori sui ponti termici al nodo parete/serramento con davanzale in marmo della finestra SER007.*

**SER007 - Connessione parete/serramento con architrave**

Il terzo ponte termico analizzato, relativo al serramento identificato con la sigla SER007, si sviluppa nella parte superiore dell'apertura finestrata, in corrispondenza del contatto tra serramento e parete a livello dell'architrave. Questo nodo costruttivo rappresenta una discontinuità significativa a causa della diversa composizione materica e della geometria dell'attacco, che interrompono la regolarità della stratigrafia muraria.
Il calcolo restituisce i valori riportati in Fig. 222. Nel mese critico (dicembre) è stato determinato il fattore di temperatura superficiale interna fRsi = 0,682, inferiore al valore limite ammesso (fRsi,amm = 0,767) stabilito dalla UNI EN ISO 13788. L'esito della verifica è pertanto negativo: il nodo risulta potenzialmente critico per rischio muffa, poiché la temperatura superficiale interna può scendere sotto la soglia di sicurezza durante il periodo invernale, favorendo fenomeni di condensazione e compromettendo la salubrità interna.

Per la valutazione sono stati predisposti descrittori tecnico-prestazionali, validi in generale per tutti i ponti termici dell'edificio e applicati, in questo caso, al nodo di connessione con architrave. La Tabella 166. *Applicazione dei descrittori sui ponti termici al nodo parete/serramento con architrave della finestra SER007.* riporta i valori calcolati, evidenziando sia le dispersioni energetiche sia gli indicatori di rischio igrotermico, con alcuni descrittori aggiuntivi utili ad approfondire la prestazione del nodo.

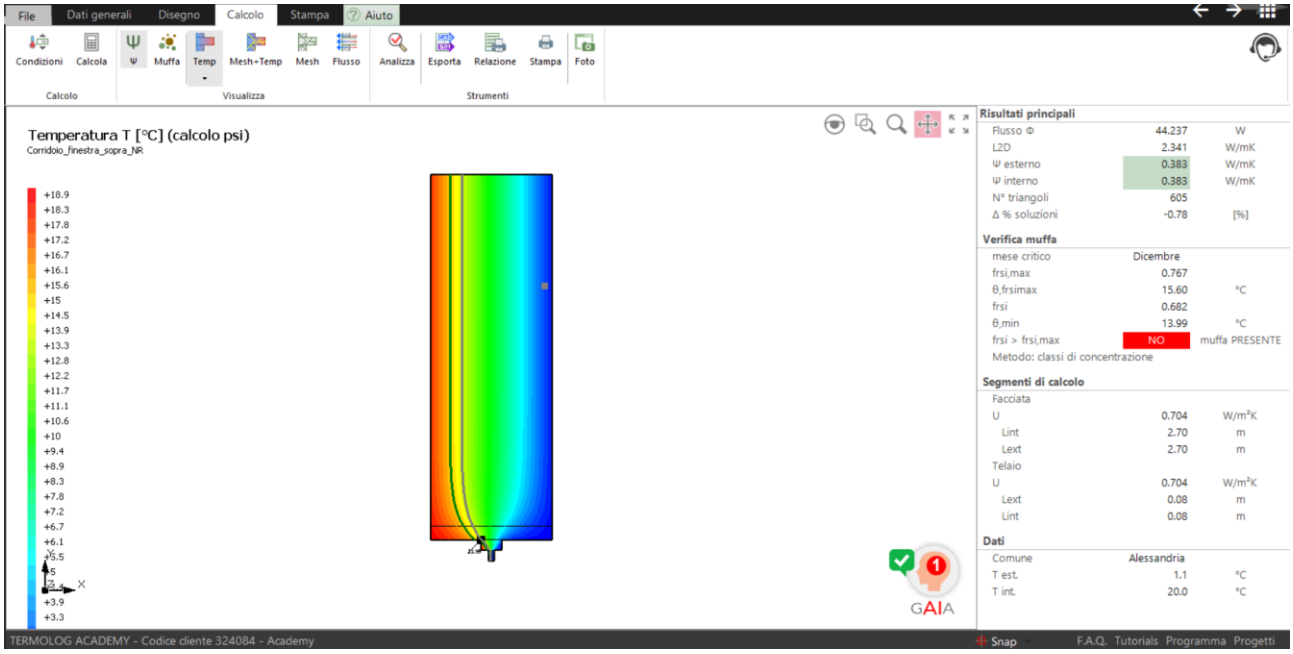



*Fig. 222. Distribuzione della temperatura superficiale e verifica del ponte termico nell'area superiore dell'apertura finestrata SER007 (architrave).*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| PONTI TERMICI DELL'ELEMENTO | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| CODICE ELEMENTO | SER007 | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Dispersione totale | 44,24 | W/m |
| Peso relativo sull'edificio | - | - |
| Trasmittanza termica lineica | 0,3828 | W/mK |
| Coefficiente di accoppiamento termico L2D | 2,34 | W/mK |
| Temperatura superficiale minima (Tsi) | 14,0 | °C |

| | | |
|---|---|---|
| fRsi critico | 0,767 (dicembre) | - |
| fRsi calcolato | 0,682 | - |
| Rischio muffa | Si | - |

*Tabella 166. Applicazione dei descrittori sui ponti termici al nodo parete/serramento con architrave della finestra SER007.*

### Ponti termici SER001 – Finestra esterna, facciata principale

Per il serramento identificato con la sigla SER001 (Fig. 223) sono stati analizzati i principali ponti termici che si verificano in corrispondenza del nodo parete/serramento. In particolare, si è approfondita la connessione con le mazzette laterali, con la soglia in marmo e con l'architrave, punti in cui la discontinuità materica e geometrica può generare significative dispersioni termiche.

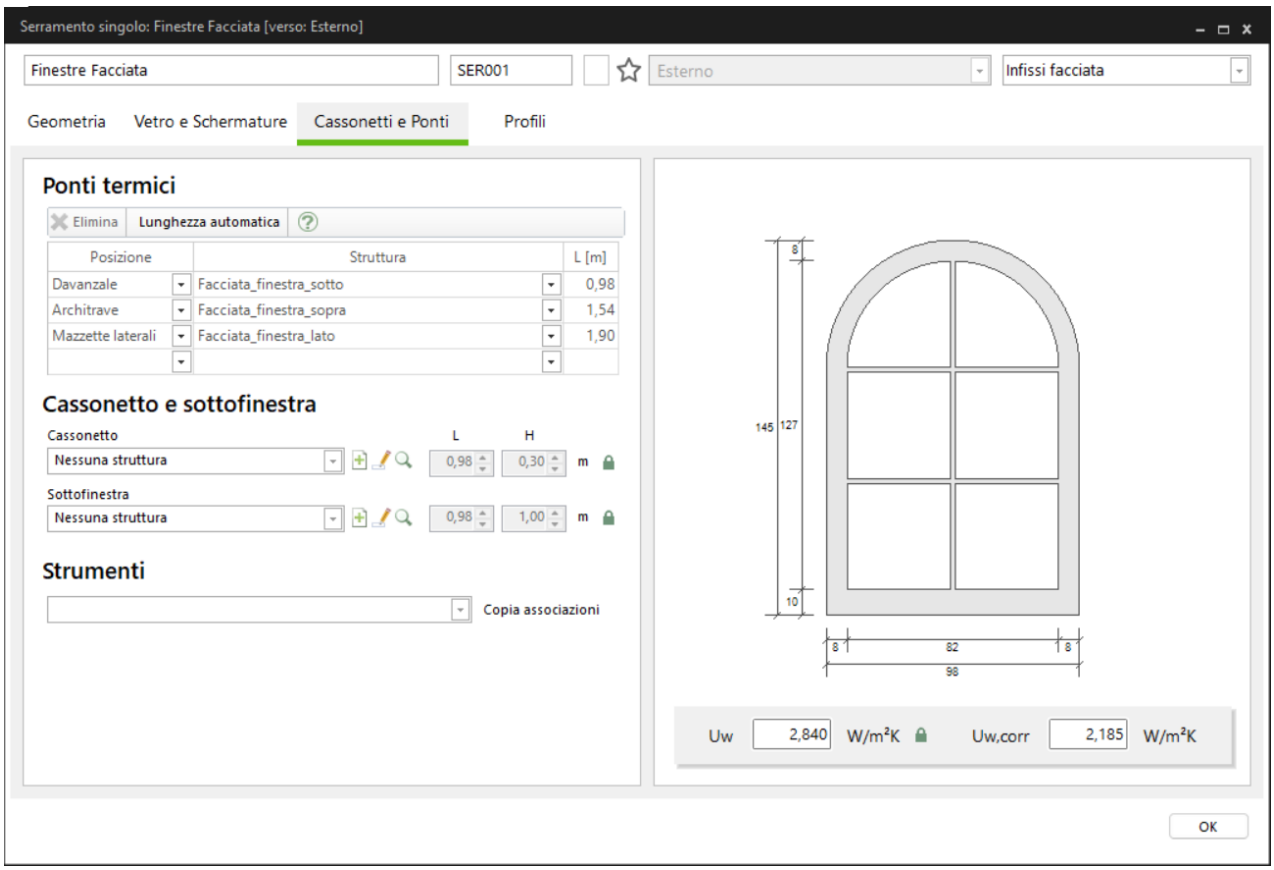



*Fig. 223. Definizione dei ponti termici e valori di trasmittanza dell'infisso SER001 in Termolog.*

**SER001 - Connessione parete/serramento con mazzette laterali**

Il primo ponte termico analizzato, relativo al serramento identificato con la sigla SER001, è generato dal contatto tra il serramento e la parete in corrispondenza della mazzetta laterale, dove si verificano discontinuità geometriche e materiche.
Il calcolo restituisce i valori riportati in Fig. 224. Nel mese critico (dicembre) è stato determinato il fattore di temperatura superficiale interna fRsi = 0,692, inferiore al valore limite ammesso (fRsi,amm = 0,767) previsto dalla UNI EN ISO 13788: ciò indica che il nodo non soddisfa i requisiti minimi di sicurezza igrotermica, risultando potenzialmente critico per rischio muffa.

Per la valutazione sono stati predisposti descrittori tecnico-prestazionali, validi in generale per tutti i ponti termici dell'edificio e applicati, in questo caso, al nodo di connessione analizzato. La Tabella 167 riporta i valori calcolati, mettendo in evidenza sia le dispersioni energetiche sia gli indicatori di rischio igrotermico, con alcuni descrittori aggiuntivi utili ad approfondire la prestazione del nodo.

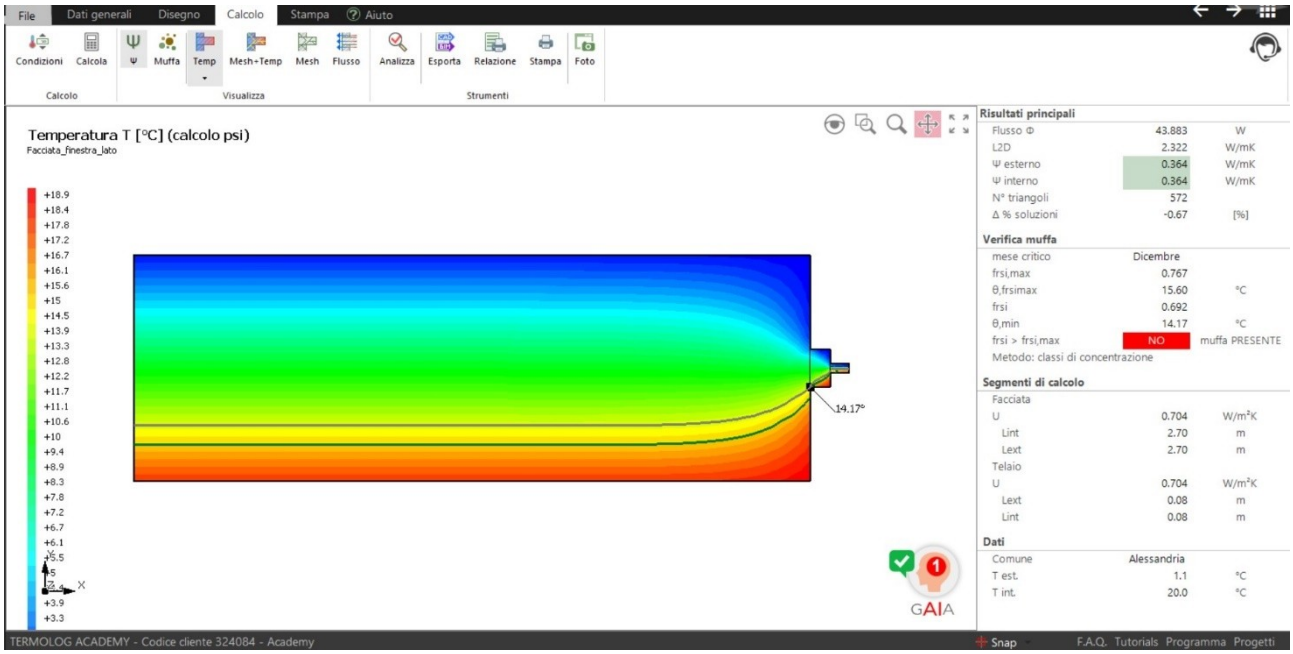



*Fig. 224. Distribuzione della temperatura superficiale e verifica del ponte termico nelle aree laterali dell'apertura finestrata SER001 (mazzette).*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| PONTI TERMICI DELL'ELEMENTO | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| CODICE ELEMENTO | SER001 | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Dispersione totale | 43,883 | W/m |
| Peso relativo sull'edificio | - | - |
| Trasmittanza termica lineica | 0,364 | W/mK |
| Coefficiente di accoppiamento termico L2D | 2,322 | W/mK |
| Temperatura superficiale minima (Tsi) | 14,17 | °C |
| fRsi critico (dicembre) | 0,767 | - |
| fRsi calcolato | 0,692 | - |

| | | |
|---|---|---|
| Rischio muffa | Si | - |

*Tabella 167. Applicazione dei descrittori sui ponti termici al nodo connessione parete/serramento con mazzette laterali della finestra SER001.*

**SER001 - Connessione parete/serramento con soglia (davanzale in marmo)**

Il secondo ponte termico analizzato, relativo al serramento identificato con la sigla SER001, si sviluppa nella parte inferiore dell'apertura finestrata, in corrispondenza del contatto tra serramento e parete, dove è presente una soglia in marmo.
Il calcolo restituisce i valori riportati in Fig. 225. Nel mese critico (dicembre) è stato determinato il fattore di temperatura superficiale interna fRsi = 0,552, inferiore al valore limite ammesso (fRsi,amm = 0,767) previsto dalla UNI EN ISO 13788: ciò indica che il nodo non soddisfa i requisiti minimi di sicurezza igrotermica, risultando potenzialmente critico per rischio muffa.

Per la valutazione sono stati predisposti descrittori tecnico-prestazionali, validi in generale per tutti i ponti termici dell'edificio e applicati, in questo caso, al nodo di connessione con soglia. La Tabella 168 riporta i valori calcolati, evidenziando sia le dispersioni energetiche sia gli indicatori di rischio igrotermico, con alcuni descrittori aggiuntivi utili ad approfondire la prestazione del nodo.

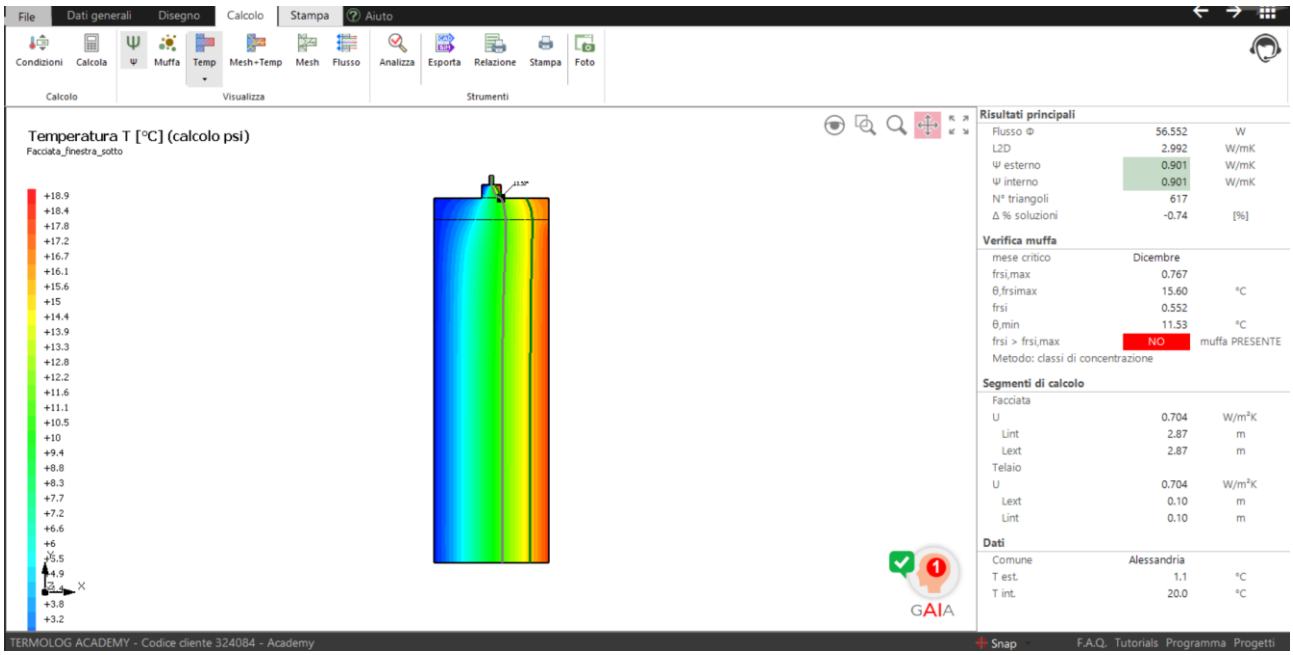



*Fig. 225. Distribuzione della temperatura superficiale e verifica del ponte termico nell'area inferiore dell'apertura finestrata SER001 (soglia).*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| PONTI TERMICI DELL'ELEMENTO | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| CODICE ELEMENTO | SER001 | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Dispersione totale | 56,552 | W/m |
| Peso relativo sull'edificio | - | - |
| Trasmittanza termica lineica | 0,901 | W/mK |
| Coefficiente di accoppiamento termico L2D | 2,992 | W/mK |
| Temperatura superficiale minima (Tsi) | 11,53 | °C |
| fRsi critico | 0,767 (dicembre) | - |
| fRsi calcolato | 0,552 | - |

| | | |
|---|---|---|
| Rischio muffa | Si | - |

*Tabella 168. Applicazione dei descrittori sui ponti termici al nodo parete/serramento con davanzale in marmo della finestra SER001.*

**SER001 - Connessione parete/serramento con architrave**

Il terzo ponte termico analizzato, relativo al serramento identificato con la sigla SER001, si sviluppa nella parte superiore dell'apertura finestrata, in corrispondenza del contatto tra serramento e parete a livello dell'architrave. Questo nodo costruttivo rappresenta una discontinuità significativa a causa della diversa composizione materica e della geometria dell'attacco, che interrompono la regolarità della stratigrafia muraria.
Il calcolo restituisce i valori riportati in Fig. 226. Nel mese critico (dicembre) è stato determinato il fattore di temperatura superficiale interna fRsi = 0,682, inferiore al valore limite ammesso (fRsi,amm = 0,767) stabilito dalla UNI EN ISO 13788. L'esito della verifica è pertanto negativo: il nodo risulta potenzialmente critico per rischio muffa, poiché la temperatura superficiale interna può scendere sotto la soglia di sicurezza durante il periodo invernale, favorendo fenomeni di condensazione e compromettendo la salubrità interna.

Per la valutazione sono stati predisposti descrittori tecnico-prestazionali, validi in generale per tutti i ponti termici dell'edificio e applicati, in questo caso, al nodo di connessione con architrave. La Tabella 169 *Tabella 166. Applicazione dei descrittori sui ponti termici al nodo parete/serramento con architrave della finestra SER007.*riporta i valori calcolati, evidenziando sia le dispersioni energetiche sia gli indicatori di rischio igrotermico, con alcuni descrittori aggiuntivi utili ad approfondire la prestazione del nodo.

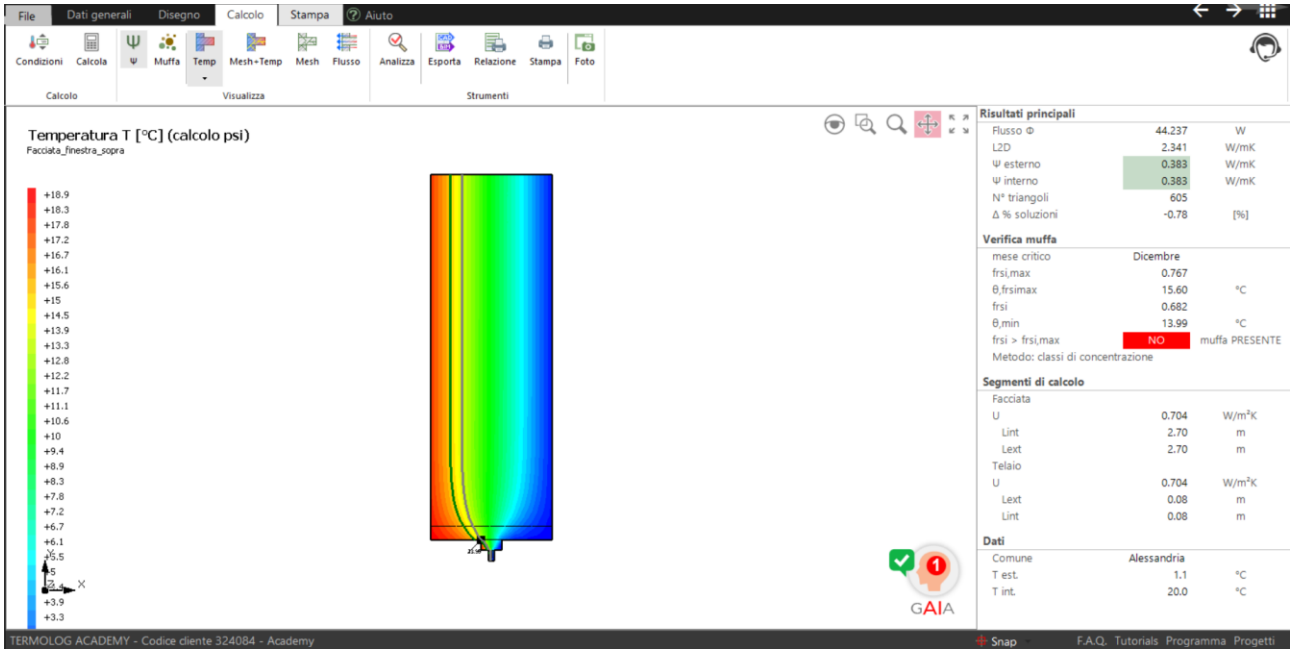



*Fig. 226. Distribuzione della temperatura superficiale e verifica del ponte termico nell'area superiore dell'apertura finestrata SER001 (architrave).*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| PONTI TERMICI DELL'ELEMENTO | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| CODICE ELEMENTO | SER001 | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Dispersione totale | 44,237 | W/m |
| Peso relativo sull'edificio | - | - |
| Trasmittanza termica lineica | 0,383 | W/mK |
| Coefficiente di accoppiamento termico L2D | 2,341 | W/mK |
| Temperatura superficiale minima (Tsi) | 13,99 | °C |

| | | |
|---|---|---|
| fRsi critico (dicembre) | 0,767 | - |
| fRsi calcolato | 0,682 | - |
| Rischio muffa | Si | - |

*Tabella 169. Applicazione dei descrittori sui ponti termici al nodo parete/serramento con architrave della finestra SER001.*

### Ponti termici SER002 – Portafinestra esterna, facciata principale

Per il serramento identificato con la sigla SER002 (Fig. 227) sono stati analizzati i principali ponti termici che si verificano in corrispondenza del nodo parete/serramento. In particolare, si è approfondita la connessione con la soglia in marmo, punto in cui la discontinuità materica e geometrica può generare significative dispersioni termiche.

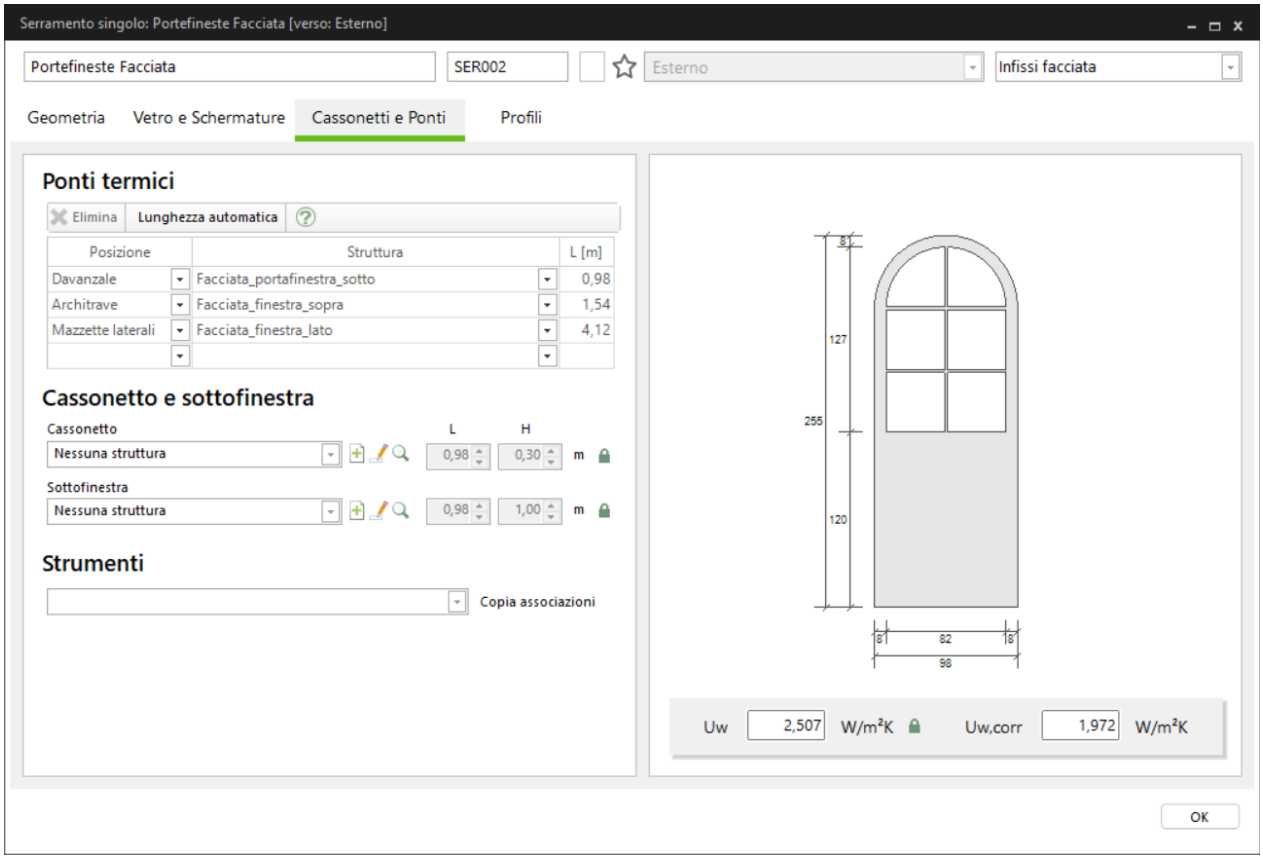



*Fig. 227. Definizione dei ponti termici e valori di trasmittanza dell'infisso SER002 in Termolog.*

SER002 - Connessione parete/serramento con soglia (davanzale in marmo)

Il ponte termico analizzato, relativo al serramento identificato con la sigla SER002, si forma nella zona inferiore dell'apertura finestrata, in corrispondenza del contatto tra il serramento e la parete, dove è presente una soglia in marmo.
Il calcolo restituisce i valori riportati in Fig. *228*. Nel mese critico (dicembre) è stato determinato il fattore di temperatura superficiale interna fRsi = 0,701, inferiore al valore limite ammesso (fRsi,amm = 0,767) previsto dalla UNI EN ISO 13788. L'esito della verifica è pertanto negativo: il nodo risulta potenzialmente critico per rischio muffa, poiché la temperatura superficiale interna può scendere sotto la soglia di sicurezza, favorendo fenomeni di condensazione e compromettendo la salubrità interna.

Per la valutazione sono stati predisposti descrittori tecnico-prestazionali, validi in generale per tutti i ponti termici dell'edificio e applicati, in questo caso, al nodo di connessione analizzato. La Tabella 170 riporta i valori calcolati, mettendo in evidenza sia le dispersioni energetiche sia gli indicatori di rischio igrotermico, con alcuni descrittori aggiuntivi utili ad approfondire la prestazione del nodo.

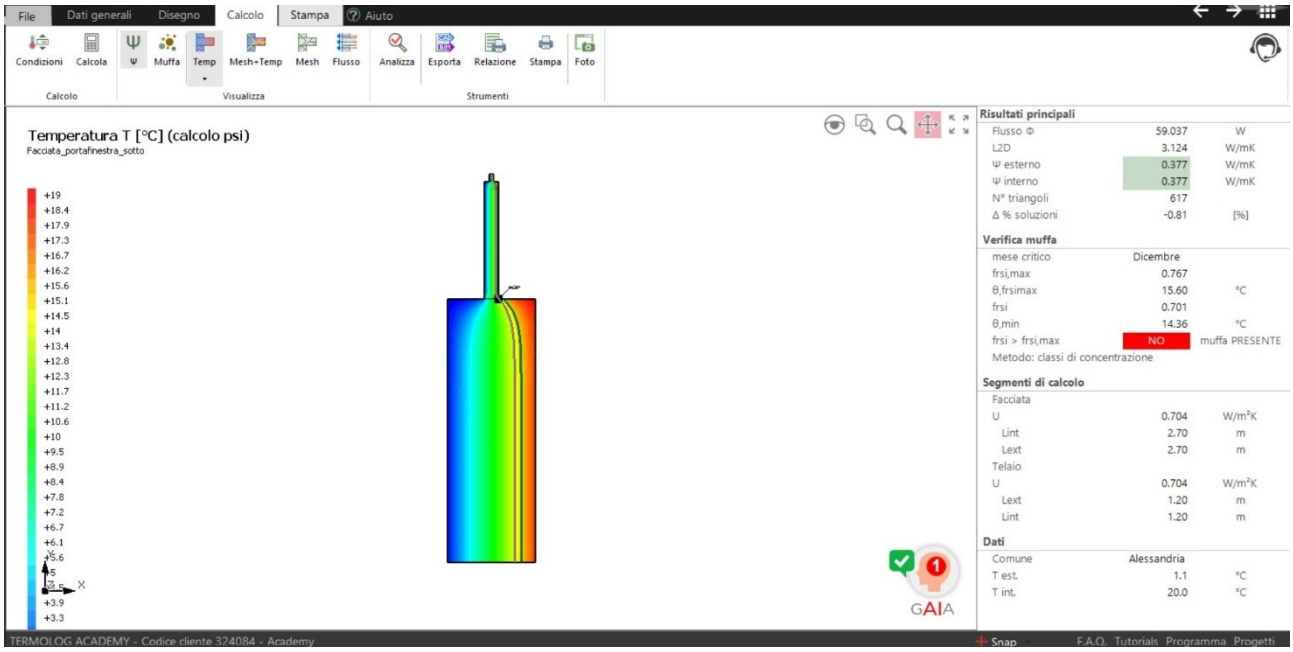


*Fig. 228. Distribuzione della temperatura superficiale e verifica del ponte termico nell'area inferiore dell'apertura finestrata SER002 (soglia).*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| PONTI TERMICI DELL'ELEMENTO | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| CODICE ELEMENTO | SER001 | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Dispersione totale | 59,04 | W/m |
| Peso relativo sull'edificio | - | - |
| Trasmittanza termica lineica | 0,3772 | W/m |
| Coefficiente di accoppiamento termico L2D | 3,12 | W/mK |
| Temperatura superficiale minima (Tsi) | 14,4 | °C |

| | | |
|---|---|---|
| fRsi critico (dicembre) | 0,767 | - |
| fRsi calcolato | 0,701 | - |
| Rischio muffa | Si | - |

*Tabella 170. Applicazione dei descrittori sui ponti termici al nodo parete/serramento con davanzale in marmo della finestra SER002.*

### 2.1.7 I risultati ottenuti dalla simulazione dello stato di fatto in condizioni standard

In questo capitolo vengono presentati e analizzati i risultati più significativi ottenuti dalla simulazione energetica della Caserma Promers, sviluppata dopo aver definito in dettaglio sia le caratteristiche geometriche e materiche dell'involucro, sia i sistemi impiantistici rilevati in sito e successivamente modellati in Termus.
L'edificio si colloca in classe energetica B, con un indice di prestazione energetica globale non rinnovabile (EPgl,nren) pari a 122,19 kWh/m²anno (Fig. 229). La collocazione in questa classe evidenzia prestazioni discrete, pur mostrando alcune criticità legate alla gestione dei fabbisogni termici.
L'analisi di dettaglio mostra che l'indice di prestazione termica utile per il riscaldamento (EPH,nd) è pari a 56,39 kWh/m²anno, mentre quello relativo al raffrescamento (EPC,nd) si attesta a 15,55 kWh/m²anno. I consumi per la produzione di acqua calda sanitaria risultano invece più contenuti (EPW,nd = 2,34 kWh/m²anno), confermando il peso limitato di questo servizio rispetto al bilancio energetico complessivo.

Anche in questo caso, al fine di restituire in maniera sintetica e comparabile i risultati della simulazione energetica effettuata, sono stati utilizzati i descrittori tecnico-prestazionali precedentemente predisposti. Tali descrittori, validi in generale per la caratterizzazione energetica degli edifici, consentono di evidenziare i fabbisogni di energia termica ed elettrica, il contributo da fonti rinnovabili, le prestazioni degli impianti e le principali grandezze di riferimento per la classificazione energetica. La Tabella 171 riporta i valori calcolati per l'edificio in esame, distinguendo i diversi servizi energetici (riscaldamento, raffrescamento, produzione di ACS) e mettendo in evidenza le coperture da FER e la corrispondente classe energetica globale.

Complessivamente, i risultati confermano che il fabbisogno principale è legato al riscaldamento, con un peso nettamente superiore a raffrescamento e ACS; la quota di fonti rinnovabili risulta molto limitata (circa 7,9% sul totale), con valori trascurabili per il riscaldamento e per la produzione di ACS; l'illuminazione incide in modo significativo sui consumi elettrici, evidenziando margini di miglioramento attraverso sistemi più efficienti; l'edificio, pur mantenendosi in classe B, mostra valori leggermente peggiori rispetto all'edificio di riferimento normativo, evidenziando quindi margini di ottimizzazione sia sull'involucro che sugli impianti.

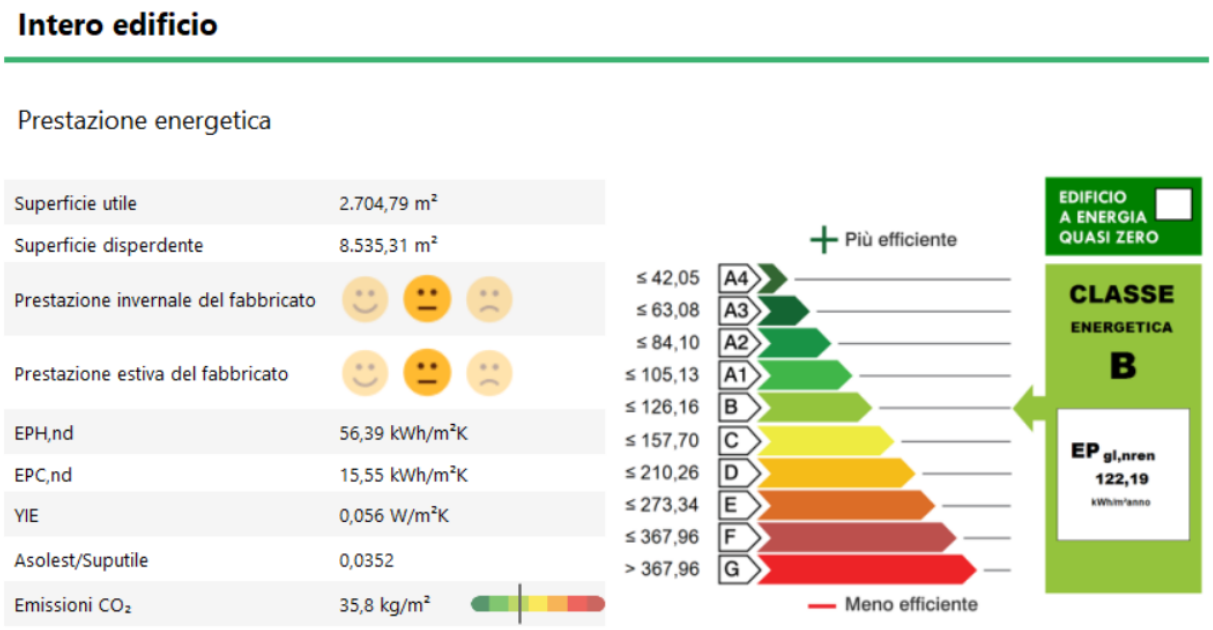



*Fig. 229. Certificazione energetica della Caserma Promers. Il risultato dell'analisi colloca l'edificio in classe energetica B con indice EPgl,nren pari a 122,19 kWh/m²anno.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | | |
|---|---|---|
| DESCRITTORI ENERGETICI GLOBALI – STATO DI FATTO | | |
| CODICE COMPENDIO | NRD | |
| CODICE MANUFATTO | CPRS | |
| **DESCRITTORE** | **VALORE** | **UNITA' DI MISURA** |
| Classe energetica globale dell'edificio | B (EPgl,nren = 122,19 kWh/m²anno) | - |
| Fabbisogno annuale di energia termica | Riscaldamento: 152.533,7<br>Raffrescamento: 42.048,5<br>ACS: 6.330,5 | kWh |
| Fabbisogno di energia elettrica | 60.463,8 | kWh |
| Fabbisogno di EP | EPgl,nren = 330.511,0<br>EPgl,tot = 359.081,7 | kWh |
| Copertura da FER | 28.570,7 | kWh |
| Percentuale FER complessiva | 7,9 | % |
| Generatore acqua calda sanitaria | Caldaia Bosch Nefit Condens 9000i W HR50 | - |
| Accumulo acqua calda sanitaria | Assente | - |
| Flusso d'aria della ventilazione | | |
| Ricambio d'aria orario nelle ore diurne (n) | | |
| Portata d'aria di rinnovo nelle ore diurne | | |
| Tipologia illuminazione | | |
| Potenza luminosa | | |
| Tipologia piattaforme elevatrici | Assente | - |
| Potenza forza motrice | - | - |

*Tabella 171. Applicazione dei descrittori energetici globali allo stato attuale della Caserma Promers.*

## 2.2 L'INTERVENTO DI RIQUALIFICAZIONE

Alla luce delle criticità emerse dall'analisi dello stato di fatto e considerando il contesto energetico olandese, fortemente orientato al superamento della dipendenza dal gas naturale, gli interventi di riqualificazione proposti si concentrano principalmente sugli impianti. In particolare, l'attenzione è rivolta alla possibilità di sfruttare fonti energetiche rinnovabili locali, in linea con le strategie nazionali che promuovono reti di teleriscaldamento sostenibili e l'uso della geotermia come alternativa al gas.
La specifica localizzazione dell'edificio analizzato, situato nei pressi di Naarden, consente di ipotizzare l'adozione di un impianto geotermico a bassa entalpia che sfrutti le risorse idriche presenti nel sottosuolo e nei corsi d'acqua circostanti. L'utilizzo di pompe di calore geotermiche, integrate in una rete di distribuzione del calore, rappresenta una soluzione coerente sia con le politiche energetiche nazionali, sia con gli obiettivi di riduzione delle emissioni e incremento della quota FER.
In linea con l'approccio seguito per la valutazione dello stato di fatto, anche per gli scenari di riqualificazione verranno applicati i descrittori tecnico-prestazionali. Questi consentono di misurare in modo sistematico i benefici attesi in termini di riduzione dei fabbisogni termici ed elettrici, incremento della quota da fonti rinnovabili, miglioramento delle prestazioni impiantistiche e avanzamento di classe energetica. L'uso dei descrittori, già validato nei casi precedenti, garantisce inoltre la possibilità di confronto diretto tra la situazione attuale e lo scenario post-intervento, restituendo un quadro chiaro e comparabile dell'efficacia della soluzione proposta.

### 2.2.1 L'inserimento degli impianti

Nelle ipotesi di intervento l'edificio è stato dotato di due sottosistemi di riscaldamento idronico, ciascuno dedicato a una diversa porzione della caserma (uffici DX + ristorante e uffici SX + corridoi), entrambi basati su ventilconvettori come terminali e regolati da sistemi climatici. La produzione è centralizzata con pompa di calore, coerente con lo scenario di riqualificazione che punta sulla geotermia.

*Zona termica destra (Uffici DX e ristorante)*

Per la zona termica destra dell'edificio, comprendente gli uffici dell'ala orientale, è stato previsto un sistema impiantistico dedicato, composto da una pompa di calore reversibile a compressione di vapore (BAXI – BHP2 i 2017), associata al circuito SIH1–SIC1–SIW1.
Il generatore garantisce i servizi di riscaldamento invernale, raffrescamento estivo e produzione di acqua calda sanitaria, con collegamento diretto alla rete di distribuzione per ridurre le perdite e ottimizzare l'efficienza. Tale configurazione risulta coerente con l'ipotesi di alimentazione da geotermia superficiale come sorgente energetica locale (Fig. 230).

Il sistema di emissione (SIH1) dedicato agli uffici situati nell'ala destra ed è dimensionato per una potenza termica complessiva pari a 89,5 kW (Fig. 231). La configurazione prevede un funzionamento a basse temperature, con mandata a 50 °C e ritorno a 45 °C, coerente con l'ipotesi di alimentazione tramite pompa di calore o sistema geotermico. Il calcolo ha restituito un numero pari a 2.503 elementi equivalenti di ventilconvettori, valore puramente numerico utilizzato dal software per la discretizzazione della potenza: in termini pratici, tale corrispondenza equivale a circa 30–35 ventilconvettori reali di taglia media (2,5–3,0 kW ciascuno). Il consumo ausiliario elettrico stimato per il funzionamento dei ventilatori è pari a 240 W.
Per quanto riguarda il raffrescamento estivo (SIC1), la distribuzione è anch'essa ad acqua con terminali di emissione rappresentati da ventilconvettori idronici, dotati di regolazione ON–OFF. I terminali lavorano con acqua fredda in mandata a 7 °C e ritorno a 12 °C, garantendo una potenza di progetto pari a circa 26,4 kW (Fig. 232). Il rendimento di emissione si attesta a 0,98, mentre quello di regolazione a 0,84, valori che riflettono l'efficienza complessiva del sistema. Anche in questo caso, il consumo ausiliario elettrico dei ventilatori è stimato in 240 W, in linea con il funzionamento intermittente con controllo automatico.

Per la valutazione tecnico-prestazionale, sono stati applicati i descrittori di impianto definiti nella metodologia, così da garantire una lettura sintetica e comparabile delle caratteristiche funzionali e delle potenzialità di efficientamento (Tabella 172).

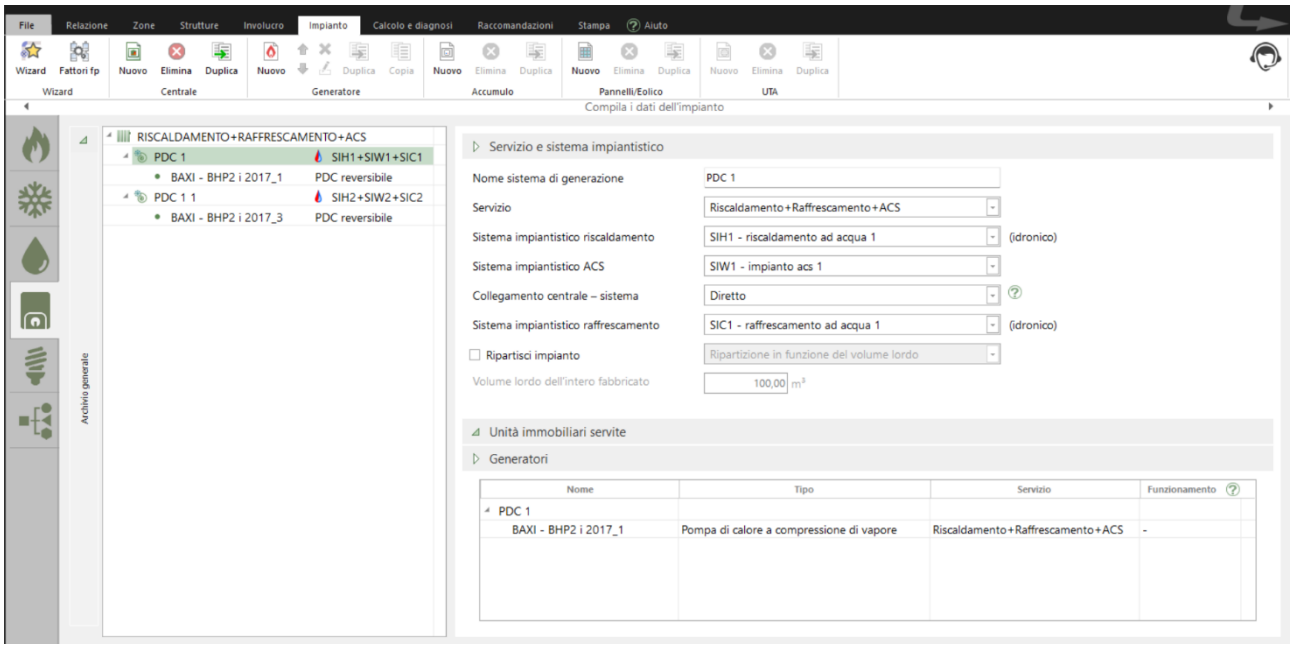



*Fig. 230. Configurazione del primo generatore, pompa di calore reversibile a compressione di vapore (BAXI – BHP2 i 2017_1), a servizio dei sistemi SIH1–SIC1–SIW1 per l'ala destra dell'edificio.*

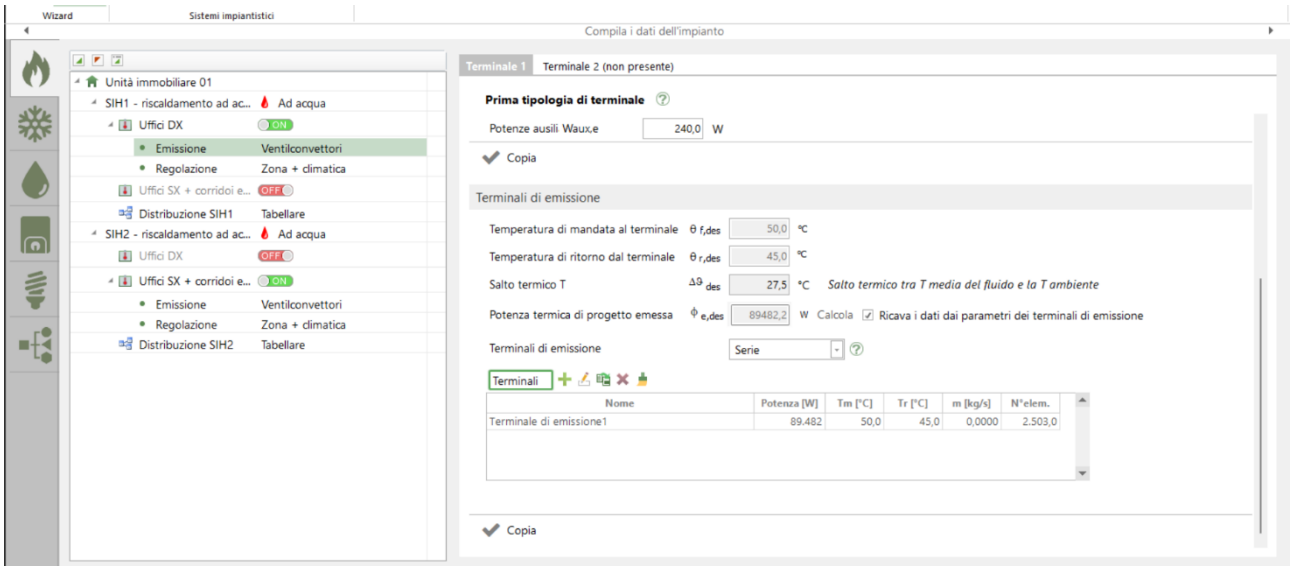



*Fig. 231. Configurazione del sistema SIH1: terminali di emissione a ventilconvettori per l'ala destra e il ristorante dell'edificio, con potenza termica complessiva di progetto pari a 89,5 kW.*

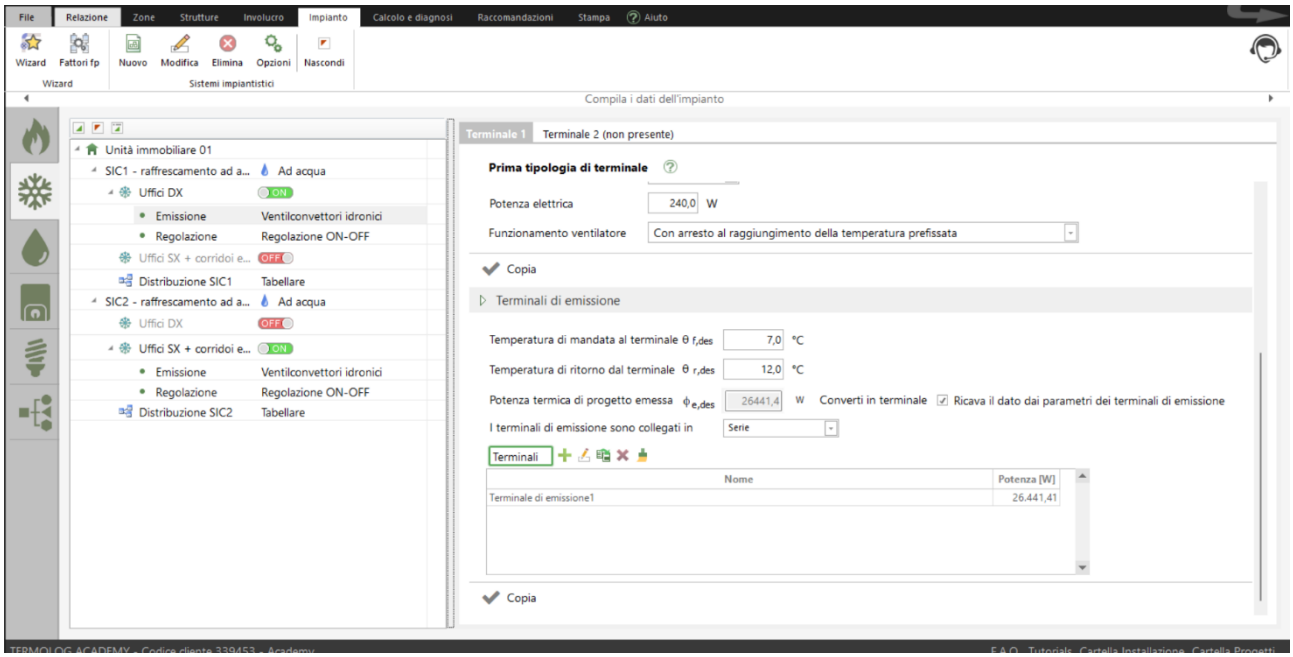



*Fig. 232. Parametri di progetto per il sistema di raffrescamento SIC1 a servizio della zona termica destra (uffici DX).*

| **DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO** | |
|---|---|
| GRUPPI TERMICI | |
| CODICE COMPENDIO | NRD |
| CODICE MANUFATTO | CPRS |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| GENERATORE | |
| Codice elemento | GEN_DX_01 |
| Tipologia generatore | Pompa di calore reversibile a compressione di vapore (BAXI – BHP2 i 2017) |
| Alimentazione | Energia elettrica |
| Anno di installazione | - |
| Potenza termica | 89,5 kW (riscaldamento)<br>26,4 kW (raffrescamento) |
| Temperatura mandata | 50 °C (riscaldamento)<br>7 °C (raffrescamento) |
| Temperatura ritorno | 45 °C (riscaldamento)<br>12 °C (raffrescamento) |
| Zona di apparenza | Zona Termica 2 - Uffici DX e ristorante |
| Sistema di distribuzione | Ventilconvettori ad acqua |
| Isolamento tubazioni | - |
| RETI DI DISTRIBUZIONE E TERMINALI | |
| Codice elemento | SIH1_TER001<br>SIC1_TER_DX |
| Tipologia | Ventilconvettore ad acqua |
| Materiale | Struttura metallica |
| Dimensioni | - |
| Numero dei terminali per tipologia | ≈ 30–35 unità |

| | |
|---|---|
| Locali di appartenenza | Uffici DX e ristorante |

*Tabella 172. Descrittori identificativi dei gruppi termici del manufatto, applicati alla zona termica 2 - Uffici DX e ristorante.*

*Zona termica sinistra (Uffici SX e corridoio)*

Per la zona termica sinistra dell'edificio, comprendente gli uffici dell'ala occidentale, i corridoi e l'area ristorante, è stato previsto un sistema impiantistico dedicato, composto anch'esso da una pompa di calore reversibile a compressione di vapore (BAXI – BHP2 i 2017), associata al circuito SIH2–SIC2–SIW2. Il generatore garantisce i servizi di riscaldamento invernale, raffrescamento estivo e produzione di acqua calda sanitaria, con collegamento diretto alla rete di distribuzione per ridurre le perdite e ottimizzare l'efficienza. Tale configurazione risulta coerente con l'ipotesi di alimentazione da geotermia superficiale come sorgente energetica locale (Fig. 233).

Il sistema di emissione (SIH2) dedicato all'ala sinistra è dimensionato per una potenza termica complessiva pari a 149,4 kW (Fig. 234). Anche in questo caso la configurazione prevede un funzionamento a basse temperature, con mandata a 50 °C e ritorno a 45 °C, e un salto termico medio di 27,5 °C. La modellazione ha restituito un numero pari a 4.179 elementi equivalenti di ventilconvettori, valore numerico utilizzato dal software per la discretizzazione della potenza: in termini pratici, ciò corrisponde a circa 50–60 ventilconvettori reali, distribuiti nei locali serviti. La potenza ausiliaria elettrica associata al funzionamento dei ventilatori risulta pari a 300 W, coerente con il maggior numero di terminali installati.
Per quanto riguarda il raffrescamento estivo (SIC2), la distribuzione è anch'essa ad acqua con terminali di emissione rappresentati da ventilconvettori idronici, dotati di regolazione ON–OFF centralizzata. I terminali operano con acqua refrigerata in mandata a 7 °C e ritorno a 12 °C, garantendo una potenza di progetto pari a circa 35,2 kW (Fig. 235). L'efficienza di emissione risulta pari a 0,98, mentre l'efficienza di regolazione è pari a 0,84, valori che riflettono un comportamento energetico complessivamente buono del sistema. Anche in questo caso, la potenza elettrica ausiliaria dei ventilatori è stimata in 300 W, in linea con il maggior numero di unità rispetto alla zona destra.

Per la valutazione tecnico-prestazionale, sono stati applicati i descrittori di impianto definiti nella metodologia, così da garantire una lettura sintetica e comparabile delle caratteristiche funzionali e delle potenzialità di efficientamento (Tabella 173).

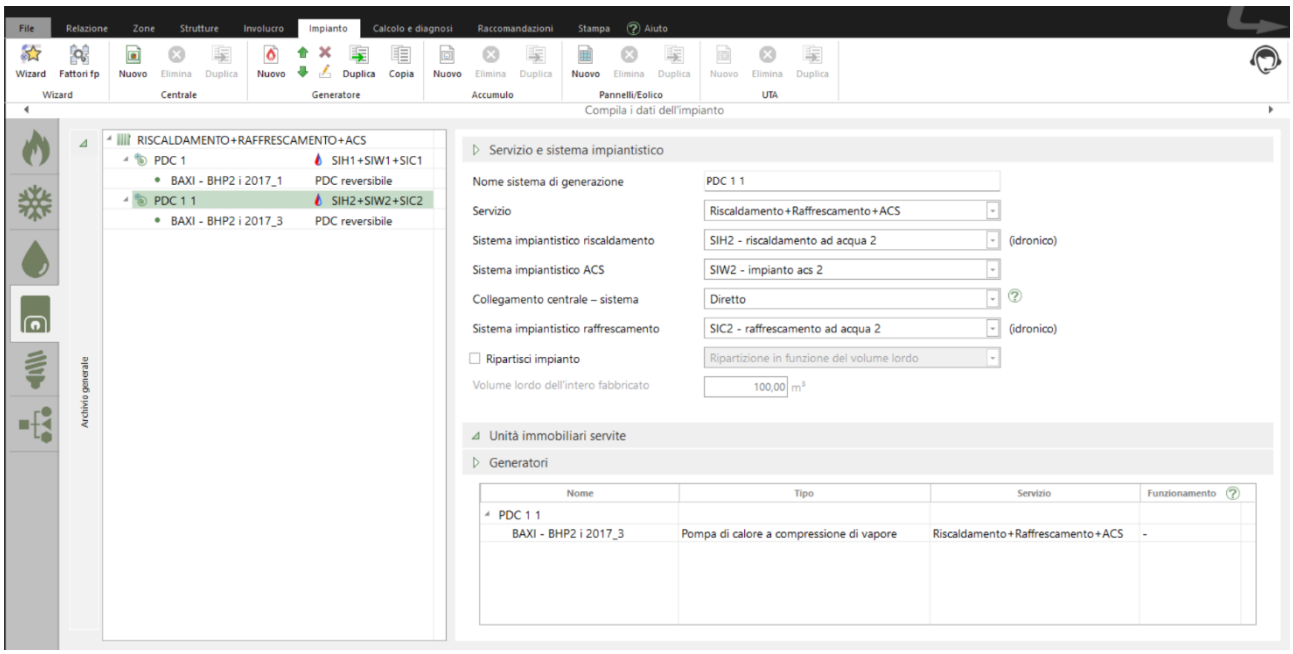


*Fig. 233. Configurazione del secondo generatore, pompa di calore reversibile a compressione di vapore (BAXI – BHP2 i 2017_3), a servizio dei sistemi SIH2–SIC2–SIW2 per l'ala sinistra dell'edificio.*

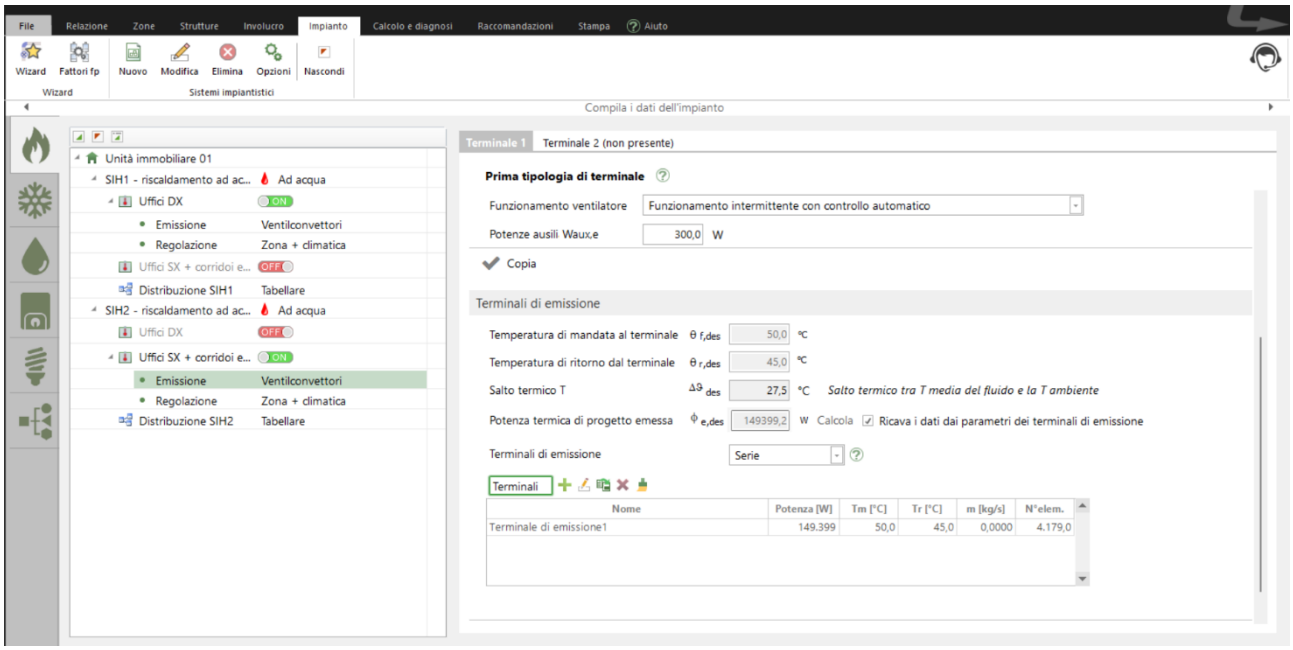



*Fig. 234. Configurazione del sistema SIH2: terminali di emissione a ventilconvettori per l'ala sinistra e il ristorante dell'edificio, con potenza termica complessiva di progetto pari a 149,4 kW.*

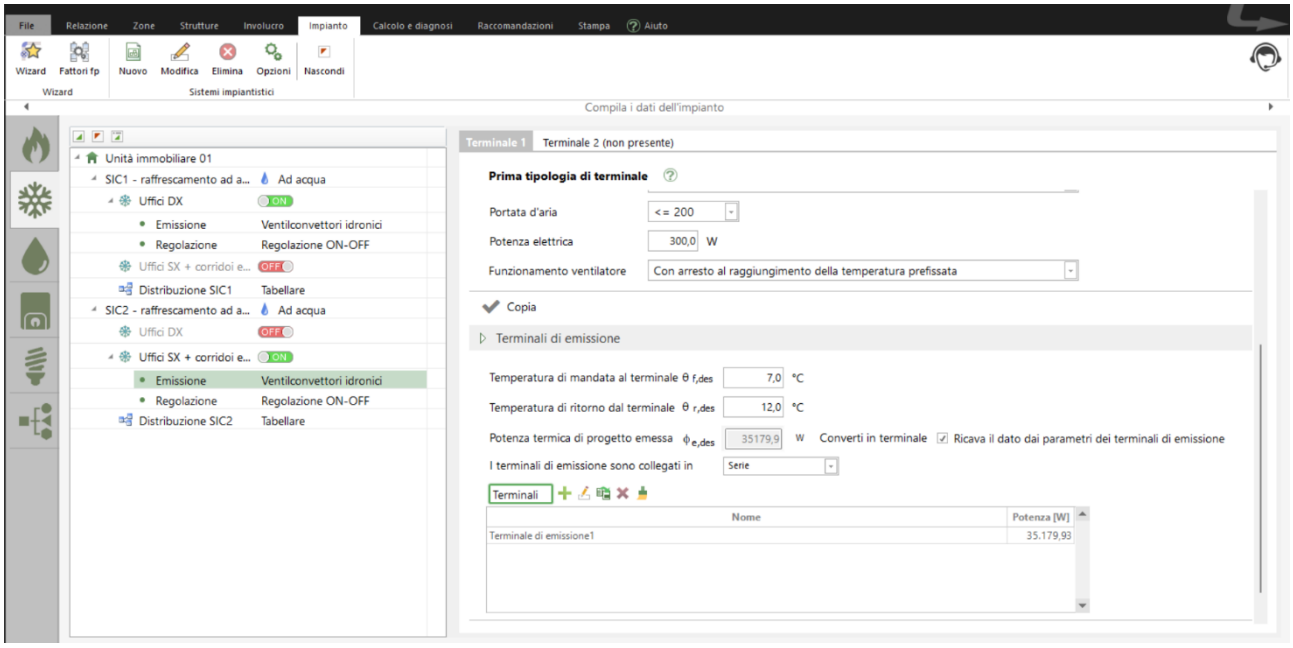



*Fig. 235. Parametri di progetto per il sistema di raffrescamento SIC2 a servizio della zona termica sinistra (uffici SX).*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| GRUPPI TERMICI | |
| CODICE COMPENDIO | NRD |
| CODICE MANUFATTO | CPRS |
| **DESCRITTORE** | **DESCRIZIONE** |
| GENERATORE | |
| Codice elemento | GEN_SX_01 |
| Tipologia generatore | Pompa di calore reversibile a compressione di vapore (BAXI – BHP2 i 2017) |
| Alimentazione | Energia elettrica |

| | |
|---|---|
| Anno di installazione | - |
| Potenza termica | 149,4 kW (riscaldamento)<br>35,2 kW (raffrescamento) |
| Temperatura mandata | 50 °C (riscaldamento)<br>7 °C (raffrescamento) |
| Temperatura ritorno | 45 °C (riscaldamento)<br>12 °C (raffrescamento) |
| Zona di apparenza | Zona Termica 1 - Uffici SX e corridoi |
| Sistema di distribuzione | Ventilconvettori ad acqua |
| Isolamento tubazioni | - |
| RETI DI DISTRIBUZIONE E TERMINALI | |
| Codice elemento | SIH2_TER001 (riscaldamento)<br>SIC2_TER001 (raffrescamento) |
| Tipologia | Ventilconvettore ad acqua |
| Materiale | Struttura metallica |
| Dimensioni | - |
| Numero dei terminali per tipologia | ≈ 50–60 unità |
| Locali di appartenenza | Uffici SX e corridoi |

*Tabella 173. Descrittori identificativi dei gruppi termici del manufatto, applicati alla zona termica 1 - uffici sx e corridoi.*

### 2.2.2 I risultati ottenuti dalla simulazione post interventi

A seguito della definizione degli interventi di efficientamento, la simulazione energetica della Caserma Promers evidenzia un significativo salto di qualità nelle prestazioni complessive dell'edificio. L'immobile si colloca infatti in classe energetica A2, con un indice di prestazione energetica globale non rinnovabile (EPgl,nren) pari a 95,64 kWh/m²anno (Fig. 236), in netto miglioramento rispetto al valore iniziale di 122,19 kWh/m²anno.
L'analisi di dettaglio mostra come i fabbisogni energetici siano stati ridotti in maniera sostanziale. L'indice di prestazione termica utile per il riscaldamento (EPH,nd) passa a 59,58 kWh/m²anno, mentre quello per il raffrescamento (EPC,nd) si riduce a 14,47 kWh/m²anno. La produzione di acqua calda sanitaria (EPW,nd) resta contenuta con un valore di 2,34 kWh/m²anno, confermandosi come voce marginale nel bilancio energetico complessivo.
Un aspetto rilevante è la riduzione delle emissioni specifiche di $CO_2$, che scendono a 35,4 kg/m²anno, in coerenza con l'incremento dell'apporto da fonti rinnovabili. La quota di copertura da FER, seppur ancora non dominante, risulta in crescita e contribuisce al miglioramento della prestazione ambientale.
Complessivamente, i risultati mettono in evidenza come i fabbisogni energetici dell'edificio rimangano maggiormente legati al riscaldamento, ma con un peso più equilibrato rispetto allo stato di fatto grazie al miglioramento delle prestazioni dell'involucro e all'ottimizzazione dei sistemi impiantistici.
Nel complesso, l'edificio passa da una condizione di discreta efficienza (classe B) a una di elevata prestazione energetica (classe A2), con un margine di miglioramento ancora presente soprattutto in relazione all'incremento della quota rinnovabile e all'ulteriore efficientamento dei sistemi di illuminazione e ventilazione. I risultati dimostrano l'efficacia degli interventi proposti, sia sul piano energetico sia su quello ambientale, con una riduzione sensibile dei consumi e delle emissioni e un conseguente incremento del valore prestazionale dell'edificio.

La Tabella 174 sintetizza i principali descrittori tecnico–prestazionali calcolati per lo scenario post interventi, distinguendo i diversi servizi energetici e riportando i contributi delle fonti rinnovabili.

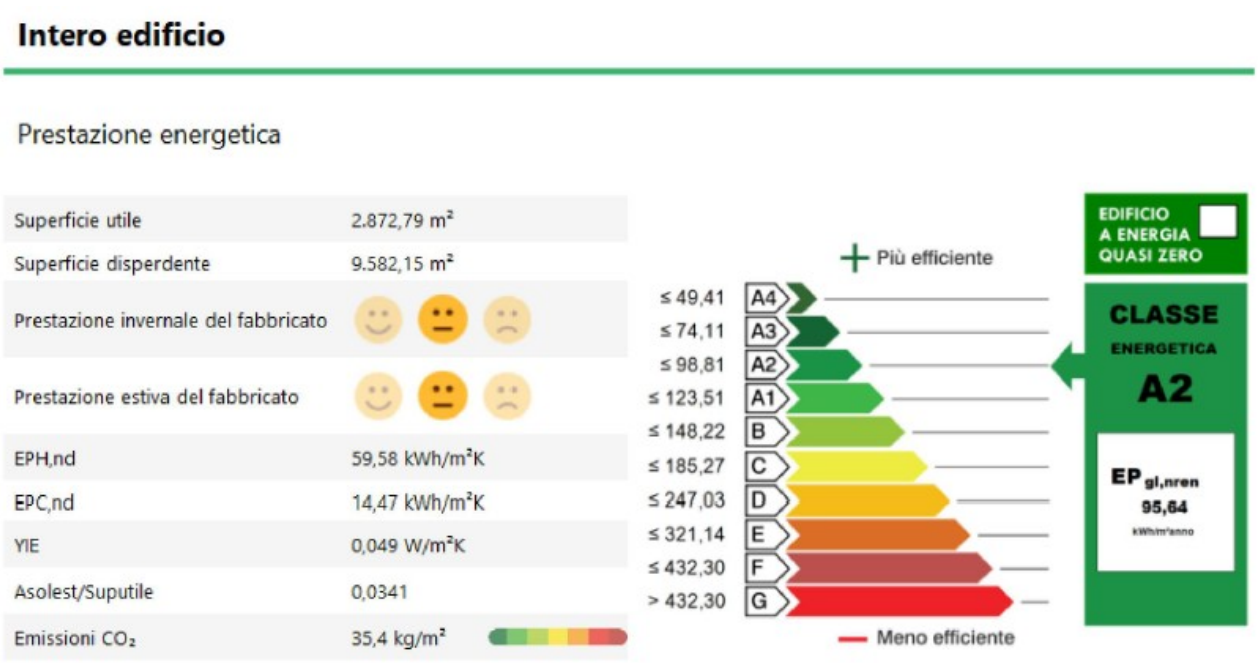



*Fig. 236. Certificazione energetica della Caserma Promers. Il risultato dell'analisi post interventi colloca l'edificio in classe energetica A2 con indice EPgl,nren pari a 95,64 kWh/m²anno.*

| DESCRITTORI DEL COMPORTAMENTO TECNICO PRESTAZIONALE DEL MANUFATTO | |
|---|---|
| DESCRITTORI ENERGETICI GLOBALI – STATO DI FATTO | |
| CODICE COMPENDIO | NRD |
| CODICE MANUFATTO | CPRS |

| DESCRITTORE | VALORE | UNITA' DI MISURA |
|---|---|---|
| Classe energetica globale dell'edificio | A2 (EPgl,nren = 95,64 kWh/m²a) | - |
| Fabbisogno annuale di energia termica | Riscaldamento: 117.168,82<br>Raffrescamento: 41.573,29<br>ACS: 10.158,91 | kWh |
| Fabbisogno di energia elettrica | 69.095,6 | kWh |
| Fabbisogno di EP | Totale: 485.491 (di cui rinnovabile: 80.093 – non rinnovabile: 405.398) | kWh |
| Copertura da FER | Riscaldamento: 24,0<br>Raffrescamento: 22,0<br>ACS: 37,5 | % |
| Percentuale FER complessiva | 16,5 | % |
| Generatore acqua calda sanitaria | Pompa di calore ad alta efficienza (BAXI BHP2i) | - |
| Accumulo acqua calda sanitaria | Assente | - |
| Flusso d'aria della ventilazione | - | - |
| Ricambio d'aria orario nelle ore diurne (n) | - | - |
| Portata d'aria di rinnovo nelle ore diurne | - | - |
| Tipologia illuminazione | - | - |
| Potenza luminosa | - | - |
| Tipologia piattaforme elevatrici | - | - |
| Potenza forza motrice | - | - |

*Tabella 174. Applicazione dei descrittori energetici globali allo stato post interventi della Caserma Promers.*

## 3. CONCLUSIONI

Il lavoro di ricerca ha avuto come obiettivo principale lo sviluppo di un metodo integrato per la riqualificazione energetica del patrimonio architettonico militare, capace di coniugare la tutela dei valori storici e culturali con le esigenze contemporanee di efficienza energetica e sicurezza. Tale obiettivo si inserisce in un quadro particolarmente complesso, segnato dalla difficoltà di applicare in maniera diretta le normative tecniche agli edifici storici. Le prescrizioni, infatti, sono concepite per costruzioni contemporanee e standardizzate, mentre i manufatti storici si caratterizzano per unicità architettonica e materica. Ne deriva una tensione costante tra il rispetto formale delle norme – in materia antincendio, antisismica o energetica – e la salvaguardia dell'integrità culturale ed estetica del bene.

In questo contesto, intervenire per migliorare l'efficienza energetica del patrimonio storico significa adottare un approccio di miglioramento più che di adeguamento: anche un incremento limitato delle prestazioni rappresenta infatti un vantaggio significativo, sia sul piano ambientale che su quello conservativo. Tale prospettiva richiede sempre un'analisi approfondita dell'involucro edilizio e delle sue specificità, così da individuare soluzioni calibrate e realmente compatibili con le caratteristiche del manufatto.

Proprio da questa consapevolezza è stata messa a fuoco la **prassi metodologica** che guida la ricerca, fondata su un insieme di metodi e strumenti mirati all'acquisizione, sistematizzazione e interpretazione dei dati. In particolare, l'adozione della metodologia **Raumbuch** ha consentito di strutturare in maniera organica le informazioni raccolte: attraverso la scomposizione progressiva dell'edificio nei suoi elementi costitutivi, Ogni componente è stato codificato, descritto e correlato a dati storici, qualitativi, tecnici e prestazionali; a tali parametri è stata inoltre associata una valutazione dal punto di vista della tutela, ottenuta mediante la classificazione del livello di interesse storico–artistico, costruttivo, tipologico o testimoniale e l'attribuzione di un grado di trasformabilità. Quest'ultimo, espresso secondo una scala numerica predefinita, permette di stabilire il margine di intervento consentito su ciascun elemento: più elevato è il valore storico, minore è la possibilità di modifica. Tale approccio ha consentito di integrare la lettura tecnico-prestazionale con criteri di conservazione e protezione, fornendo una base oggettiva per l'orientamento delle strategie di progetto.

In coerenza con tali finalità, il percorso metodologico si è articolato in più ambiti di indagine tra loro complementari: lo studio storico-archivistico e documentale, l'analisi cronotipologica delle fasi costruttive e delle trasformazioni, l'esame morfologico e dimensionale dell'edificio e la caratterizzazione degli elementi costruttivi, con attenzione alla consistenza materica, allo stato di conservazione e ai livelli prestazionali raggiunti. A questi si sono aggiunti approfondimenti tecnico-prestazionali, comprendenti l'analisi delle componenti impiantistiche e una lettura compositiva e distributiva degli spazi.

A valle della fase di acquisizione e sistematizzazione dei dati il metodo è proseguito con l'impiego strutturato dei **descrittori tematici**, concepiti come strumento di riferimento per restituire in forma ordinata le diverse dimensioni di conoscenza del patrimonio edilizio analizzato.
I descrittori cronotipologici hanno permesso di documentare le fasi costruttive e le trasformazioni subite dai manufatti, offrendo una lettura scalare che va dal compendio al singolo elemento architettonico e consentendo di collegare le informazioni storiche con le valutazioni di tutela e trasformabilità.
Accanto a essi, i descrittori morfologici e dimensionali hanno fornito i parametri quantitativi e qualitativi necessari per descrivere la configurazione spaziale, la consistenza geometrica e la distribuzione interna degli edifici, elementi indispensabili per comprenderne proporzioni, articolazioni e logiche tipologiche.
Un ruolo centrale è stato assunto dai descrittori costruttivi, che hanno consentito di schedare sistematicamente i singoli componenti edilizi, associando codici univoci (Raumbuch), classificazioni tipologiche, dati geometrici, stato di conservazione, efficienza tecnica e valutazioni di interesse storico. Tali strumenti hanno reso possibile una lettura integrata delle caratteristiche materiali e prestazionali, fornendo al tempo stesso indicazioni operative sulle priorità di intervento.

Infine, i descrittori tecnico-prestazionali e impiantistici hanno completato il quadro con l'analisi dell'involucro (chiusure opache e trasparenti, ponti termici) e dei sistemi tecnologici (riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione, produzione ACS, fonti rinnovabili), permettendo di valutare lo stato energetico-funzionale complessivo dell'edificio e di individuarne le principali criticità.

Nel loro insieme, questi strumenti hanno reso possibile la costruzione di una base conoscitiva sistematica, multilivello e dinamica, capace di supportare in modo consapevole la definizione delle strategie di conservazione, manutenzione e riqualificazione energetica dei casi studio.

La compilazione del Raumbuch e dei descrittori ha fornito una base solida per l'indagine, restituendo una descrizione accurata e sistematica dell'intero complesso edilizio. L'adozione del **Building Information Modeling (BIM)** ha poi permesso di tradurre questo patrimonio informativo in una rappresentazione digitale tridimensionale e interattiva, contenente dati dettagliati su ciascun componente.
Per garantire la continuità metodologica tra rilievo, schedatura e digitalizzazione, la codifica del Raumbuch è stata allineata a quella adottata nel modello HBIM.
Il vasto insieme di dati raccolti e organizzati nelle tabelle descrittive è stato così integrato nel modello digitale, sviluppato con Autodesk Revit, che collega codici, proprietà parametriche e informazioni storico-prestazionali in un unico sistema. Ne risulta un contenitore informativo dinamico, aggiornabile nel tempo e funzionale non solo alla rappresentazione grafica, ma anche alla gestione e al supporto decisionale.

Dopo la definizione del modello virtuale, è stata avviata la **simulazione energetica**, passaggio chiave per valutare le prestazioni degli edifici, individuare inefficienze e orientare possibili interventi di miglioramento. L'esportazione del modello HBIM in software specifici ha reso possibile calcolare fabbisogni e prestazioni, con particolare attenzione a strutture opache e trasparenti, impianti e ponti termici. Tale processo ha consentito di classificare gli edifici dal punto di vista energetico e di predisporre scenari di intervento.
Per la definizione degli interventi migliorativi si è scelto di operare seguendo un criterio di coerenza tra le valutazioni di tutela e i risultati delle analisi energetiche. In particolare, la classificazione derivante dal Raumbuch e dai descrittori ha costituito la base per individuare le priorità di intervento: da un lato, gli elementi caratterizzati da un basso livello di interesse storico-artistico e quindi maggiormente trasformabili; dall'altro, quelli che, dal punto di vista prestazionale, risultavano più inefficienti o responsabili di significative dispersioni energetiche.
Questa doppia chiave di lettura ha consentito di orientare le scelte progettuali verso soluzioni calibrate, evitando trasformazioni invasive sugli elementi di maggior valore e concentrando gli interventi su componenti sostituibili o facilmente migliorabili, come serramenti incongrui, impianti obsoleti o stratigrafie prive di isolamento. In tal modo, il metodo ha permesso di coniugare in maniera operativa la logica della tutela con quella dell'efficienza energetica, riducendo i consumi e le emissioni senza compromettere l'integrità storica e culturale degli edifici.

L'applicazione operativa del metodo nei casi studio della **Caserma Riva Villasanta a Cagliari** e della **Caserma Promers a Naarden** ha permesso di verificarne l'efficacia e l'adattabilità in contesti differenti.

Nel caso della Palazzina Comando della Caserma Riva Villasanta, l'applicazione del metodo ha dimostrato l'efficacia di un approccio calibrato, capace di coniugare le esigenze di tutela con quelle di efficientamento energetico. Nonostante le condizioni iniziali fortemente critiche e le elevate dispersioni attraverso involucro e infissi, la definizione degli interventi ha dovuto necessariamente tener conto dei vincoli storico–artistici, escludendo le soluzioni più invasive.
La scelta di operare su serramenti incongrui, sulla coibentazione delle coperture e sulla sostituzione degli impianti obsoleti con sistemi più performanti ha permesso di intervenire in modo selettivo sugli elementi meno vincolati ma più energivori. I risultati conseguiti, verificati mediante la riapplicazione dei descrittori, hanno evidenziato un salto di più classi energetiche e una significativa riduzione delle dispersioni, a fronte di un impatto minimo sul valore storico–architettonico del manufatto.

Nel caso della caserma Promers a Naarden, la sfida era di natura diversa rispetto alla Villasanta: l'edificio, in gran parte interrato, non presentava consumi energetici elevati, ma risultava scarsamente abitabile e con evidenti limiti funzionali, legati sia alla tipologia ipogea sia alle caratteristiche termo–igrometriche della copertura erbosa e della ventilazione naturale.
Alla luce delle criticità emerse dallo stato di fatto e considerando il contesto energetico olandese, fortemente orientato al superamento del gas naturale, gli interventi proposti si sono concentrati sugli impianti, con particolare attenzione allo sfruttamento delle fonti rinnovabili locali. La posizione della caserma, immersa in un sistema di corsi d'acqua e falde superficiali, ha reso ipotizzabile l'adozione di un impianto geotermico a bassa entalpia, con pompe di calore collegate a una rete idronica interna a ventilconvettori, in linea con le strategie nazionali di diffusione del teleriscaldamento sostenibile.

Anche in questo caso i descrittori tecnico–prestazionali sono stati applicati non solo alla fase di rilievo, ma anche allo scenario di progetto, consentendo di misurare con coerenza metodologica i benefici attesi: riduzione dei fabbisogni termici ed elettrici, incremento della quota da FER, miglioramento delle prestazioni impiantistiche e avanzamento di classe energetica.

Il confronto tra i casi studio affrontati dimostra come il sistema dei descrittori, integrato al Raumbuch e al modello HBIM, si configuri come uno strumento robusto e adattabile, capace di guidare processi conoscitivi e decisionali anche in contesti molto diversi tra loro. Le applicazioni su edifici militari di natura profondamente eterogenea – dalla caserma a padiglioni della Villasanta alla struttura ipogea e fortificata di Naarden – hanno messo in evidenza le potenzialità del metodo, nel fornire criteri oggettivi e comparabili per l'analisi e la progettazione.
In definitiva, il percorso di ricerca ha mostrato che la combinazione di strumenti di catalogazione, descrittori tematici e modellazione digitale consente di sviluppare strategie di riqualificazione energetica mirate, sostenibili e rispettose della tutela, favorendo un equilibrio tra conservazione e innovazione. Tale approccio si propone quindi come una base metodologica replicabile, in grado di accompagnare le future pratiche di gestione e valorizzazione del patrimonio architettonico militare e, più in generale, del costruito storico.

## Bibliografia


(EU), European Union. «Draft Integrated National Energy and Climate Plan 2021-2030. The Netherlands.» 2018.

Aboulnaga, M., et al. «Climate Change and Cultural Heritage: A Global Mapping of the UNESCO Thematic Indicators in Conjunction with Advanced Technologies for Cultural Sustainability .» 2024.

Agus, A. «La dimensione gestionale dell'inventario militare. Un protocollo sperimentale per la Caserma De Murtas a Cagliari.» In *Roma, Capitale d'Italia 150 anni dopo*, di C. Bellanca e S. Mora, 335-346. Roma: Artemide, 2021.

Almeida, M., F. Ascione, A. Iaccheo, T. Iovane, e M. Mastellone. «Towards the Necessary Decarbonization of Historic Buildings: A Review.» 2025.

Amsterdam, Project Office for the Defence Line of. «Dutch wather defence lines UNESCO. Significant boundary modification management plan 2018-2020.» 2018.

Ariño, X., Llop, E., Gomez-Bolea, A., & Saiz-Jimenez, C. «Effects of climatic change on microorganisms colonizing cultural heritage stone materials.» 2010.

ASSOBIM. *BIM Report 2021.* 2021.

Barbero, S., M. Dutto, C. Ferrua, e A. Pereno. «nalysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: Evaluation methodology for a real cost-performance comparison.» 2014.

Bartolomucci, C. *Conoscenza e conservazione dei serramenti storici nel restauro Una prima verifica in Abruzzo.* 2020.

Beerepoot, M., e N. Beerepoot. «Government regulation as an impetus for innovation: Evidence from energy performance regulation in the Dutch residential building sector.» 2007.

Bernsen, S. «Implications of emission reduction target interaction on the conversion strategies of existing buildings to NZEB.» 2022.

Bertolin, C. *Preservation of Cultural Heritage and Resources Threatened by Climate Change.* 2019.

Bianco, L., V. Serra, S. Fantucci, e M. Dutto. «Thermal insulating plasters as a solution to refurbish historic building envelope: first experimental results - Intonaci termoisolanti come soluzione per il retrofit energetico di edifici storici: primi risultati sperimentali.» 2014.

Blavier, C. L. S., H. E. Huerto-Cardenas, N. Aste, C. Del Pero, F. Leonforte, e S. Della Torre. «Adaptive measures for preserving heritage buildings in the face of climate change: A review.» 2023.

Boarin, P., e P. Davoli. *A Systemic Approach for Preliminary Proposals of Sustainable Retrofit in Historic Settlements. The Case Study of Villages Hit by Earthquake.* Brighton,: IAFOR, 2013.

Bommer, J. J., M. D. Zoback, e J. V. Elk. «Estimating the Maximum Magnitude of Induced Earthquakes in the Groningen Gas Field, the Netherlands.» 2024.

Bonazza, A., C. Sabbioni, C. Messina, e P. Guaraldi. «Climate change impact: Mapping thermal stress on Carrara marble in Europe.» 2009.

Bonazza, A., M. Palmira, C. Sabbioni, C., M. Grossi, e P. Brimblecombe. «Mapping the impact of climate change on surface recession of carbonate buildings in Europe.» 2009.

Boriani, M., M. Giambruno, e A. Garzulino. «Studio, sviluppo e definizione di schede tecniche di intervento per l'efficienza energetica negli edifici di pregio.» 2021.

Boriani, M., M. Giambruno, e A. Garzulino. «Studio, sviluppo e definizione di schede tecniche di intervento per l'efficienza energetica negli edifici di pregio. ENEA.» 2011.

Botti, F. «La caserma italiana nei primi anni dell 'esercito unitario (1861-1870): infrastrutture, disciplina, benessere, rapporti con l 'esterno.» In *Esercito e città. Dall'unità agli anni trenta. Tomo I*. Roma, 1988.

Brikou, C., D. Zavraka, e A. Vitopoulou. «The reuse of military campgrounds following the interventions of environmental design and the grant of their use to the contemporary city. The case study of “the Velissario military campground in Ioannina”.» *Iopscience*, 2021: 7.

Brimblecombe, P. «Temporal humidity variations in the heritage climate of south east England.» 2013.

Brimblecombe, P., C. M. Grossi, e I. Harris. «Climate change critical to cultural heritage.» In *Survival and sustainability: environmental concerns in the 21st century* , di U. Türker, & J. W. LaMoreaux H. Gökçekus, pp. 195–205. Springer, 2011.

Brimblecombe, P., e C. M. Grossi. *Damage to buildings from future climate and pollution.* 2007.

Brimblecombe, P., e C. M. Grossi. «Millennium-long damage to building materials in London.» 2009.

Buda, A., et al. «Conservation-Compatible Retrofit Solutions in Historic Buildings: An Integrated Approach .» 2021.

Camerin, F., N. Camatti, e F. Gastaldi. «Military Barracks as Cultural Heritage in Italy: A Comparison between before-1900- and 1900-to-1950-Built Barracks.» 2021.

Camuffo, D. «Climate change, human factor, and risk assessment.» 2019.

Cecchini, C., A. Magrini, e M. Morandotti. «The Energy-Oriented Management of Public Historic Buildings: An Integrated Approach and Methodology Applications .» 2020.

Cheng, J. C. P. «A review of the efforts and roles of the public sector for BIM adoption worldwide.» 2015.

CISM, Commissione Italiana di Storia Militare. *Archivi, biblioteche, musei militari. Lo stato attuale, le funzioni sociali, gli sviluppi.* Roma, 2006.

Clini, P., R. Amadei, D. Quattrini, e R. Nespeca. «Geometrie ideali nell’architettura militare di Francesco di Giorgio Martini. Il caso del sistema difensivo Rocca-Torrione di Cagli.» 2015.

Commission, European. *Updates on the Energy Performance of Buildings Directive implementation in the EU Member States. 2023 assessment.* 2025.

Concas, D. «GOOD PRACTICES PER IL MIGLIORAMENTO DELLE DOTAZIONI TECNOLOGICHE NEGLII EDIFICI STORICI.» 2014.

Cotana, F. «Il Campo di Marte nel Piano di Ampliamento di Firenze di Giuseppe Poggi. Analisi grafica dei disegni d’archivio.» 2024.

Davies, R., et al. «BIM in Europe: innovation networks in the construction sector of Sweden, France and the UK.» 2015.

Davoli, P. *Architettura senza impianti: aspetti bioclimatici per l'architettura preindustriale.* Firenze: Alinea, 1993.

De Bruijn, C. A., e W. H. Schukking. «Naarden 1350-1950. De Geschiedenis van een Nederlandse Vesting.» 1950.

De Carli, M., G. Villi, V. De Giuli, e C. Peretti. «Field measurements and simulation of energy, lighting and comfort performance of retrofit of windows by means of film coatings.» 2014.

De Jong, M. D. T., R. Pieterse, e S. R. Jansma. *Are Dutch homeowners willing to invest in sustainable heating systems? Comparing intentions and determinants in four scenarios.* 2024.

De Medici, S. «Italian Architectural Heritage and Photovoltaic Systems. Matching Style with Sustainability.» 2021.

De Santoli, L. «Efficienza energetica negli edifici storici.» Milano: Editoriale Delfino, 2014.

—. «Guidelines on energy efficiency of cultural heritage.» 2015.

De Vrankrijker, A. C. J. «De historie van de Vesting Naarden.» 1965.

Del Curto, D. «Dalla Trostburg a Mantova. Applicazione del Raumbuch per lo studio di complessi architettonici.» 79-90. 2007.

Del Curto, D., e A. Grimoldi. «Modelli informativi “predigitali” e loro recenti sviluppi. Dal Raumbuch al BIM.» 2011.

Del Negro, P. «Caserma e città nel discorso militare dell'Italia liberale.» In *Esercito e città. Dall'unità agli anni trenta. Tomo I*, di Spoleto 11-14 maggio 1988 Atti del convegnodi studi. Roma, 1988.

Della Torre, S. «Conservation of built cultural heritage laws enabling preventive approach: the case of Italy.» 2010.

DGBC, Dutch Green Building Council. «Paris Proof: Aantoonbaar voldoen aan het Klimaatakkoord.» 2019.

DGBC, Dutch Green Building Council. «Paris Proof: Hoeveel energie mogen gebouwen gebruiken in 2050? .» 2017.

DGBC, Dutch Green Building Council. «WEii - Werkelijke Energie Intensiteit Indicator. Retrieved from .» 2021.

Dukhan, T., e L. Sushama. «Understanding and modelling future wind-driven rain loads on building envelopes for Canada.» 2021.

Durante, A., E. Lucchi, e L. Maturi. «Building integrated photovoltaic in heritage contexts award: an overview of best practices in Italy and Switzerland.» 2018.

Eastman, C. M. «The use of computers instead of drawings in building design.» 1975.

Environment, Ministry of Infrastructure and the. «The Netherlands First Biennial Report under the United Nations Framework Convention on Climate Change. .» 2014.

Erkal, A., D. D’Ayala, e L. Sequeira. «Assessment of wind-driven rain impact, related surface erosion and surface strength reduction of historic building materials, build.» 2012.

Espinosa, R. M., L. Franke, e G. Deckelmann. «Phase changes of salts in porous materials: Crystallization, hydration and deliquescence.» 2008.

Europea, Commissione. *Piano di efficienza energetica 2011. Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo, al Consiglio, al Comitato Economico e Sociale Europeo e al Comitato delle Regioni.* Bruxelles, 2011.

Exner, Dagmar, Jørgen Rose, Élodie Héberlé, e Sara Mauri. «Conservation compatible energy retrofit technologies. Part II: Documentation and assessment of conventional and innovative solutions for conservation and thermal enhancement of window systems in historic buildings.» In *Conservation compatible energy retrofit technologies. Part II Documentation of solutions for window systems in historic buildings*, di Dagmar Exner, Jørgen Rose, Élodie Héberlé e Sara Mauri. Alexander Rieser (UIBK), 2021.

Fabbri, K., M. Zuppiroli, e K. Ambrogio. «Heritage buildings and energy performance: Mapping with GIS tools .» 2012.

Filippidoou, F., e J. P. Jimenez Navarro. *Achieving the cost-effective energy transformation of Europe's buildings.* 2019.

Filippidou, F. «Energy performance progress of the Dutch non-profit housing stock:a longitudinal assessment.» 2018.

Filippidou, F., N. Nieboer, e H. Visscher. «Energy efficiency measures implemented in the Dutch non-profit housing sector.» 2016.

Fiore, F. P. «Città e macchine del '400 nei disegni di Francesco di Giorgio Martini.» 1978.

Fiorino, D. R. «Gli inventari e il raumbuch.» In *Sinergie. Percorsi interistituzionali per la riqualificazione delle aree militari.*, di D. R. Fiorino, 219-223. 2022.

Fiorino, D. R. «Il Restauro incontra altre discipline: dalla conservazione dell’architettura un modello per la tutela del paesaggio.» In *RICerca. RESTauro.*, di D. Fiorani, 668-677. SIRA, 2017.

—. *Sinergie. Percorsi interistituzionali per la riqualificazione delle aree militari.* Cagliari: UNICApress, 2021.

Fiorino, D. R., S. M. Grillo, E. Pilia, e E. Quaquero. «Metodi e processi di valutazione critica del patrimonio militare storico: l'uso integrato di Raumbuch e HBIM per la rifunzionalizzazione della Caserma Cascino in Cagliari.» In *Military Landscapes. Scenari per il futuro del patrimonio militare.*, di D. R. Fiorino. Cagliari: Skira, 2017.

Fontana, N., e A. Pisetti. *Archivi militari tra Ottocento e Novecento. Ricognizioni e acquisizioni.* 2019.

Franco, G. «Solar powered energy and eco-efficiency in a UNESCO site. Criteria and recommendations for the National Park of Cinque Terre, Italy.» 2018.

Galatioto, A., G. Ciulla, e R. Ricciu. «An overview of energy retrofit actions feasibility on Italian historical buildings.» 2017.

Gandini, A., R. Garmendia, e R. San Mateos. «Towards sustainable historic cities: adaptation to climate change risk.» 2016.

Gargallo di Castel Lentini, F. «Evoluzione storica e giuridica della tutela dei beni culturali dall'unità d'Italia al Codice Urbani. Cenni sulla tutela paesistica.» 2000.

Gatti, M. P., e G. Cacciaguerra. «Military buildings: from being abandoned to reuse.» 2016.

Gawyluk, D., e M. Zagroba. «Protection of Landscape Values of Historical Post Military Objects - Complexes in Spatial, Urban and Architectural Planning of Polish Cities.» 2017. 8.

Gevorgian, A., et al. *European Building Stock Analysis.* 2021.

Gómez-Heras, M., B. J. Smith, e R. Fort. «Surface temperature differences between minerals in crystalline rocks: implications for granular disaggregation of granites for thermal fatigue.» 2006.

Government of the Netherlands. «Klimaatakkoord (Climate Agreement). Den Haag: Rijksoverheid.» 2019.

Granara, D. «L'origine della tutela del patrimonio culturale in Europa.» 2020.

Grøntoft, T. «Climate change impact on building surfaces and facades.» 2011.

Grøntoft, T. «Observed recent change in climate and potential for decay of Norwegian Wood structures.» 2019.

Grossi, C. M., e P. Brimblecombe. «Effect of long-term changes in air pollution and climate on the decay and blackening of European stone buildings. .» 2007.

GSA. «BIM guide for facility management.» 2011.

Guerra-Santin, O., e L. Itard. «The effect of energy performance regulations on energy consumption.» 2012.

Hao, Lingjun, D Herrera-Avellanosa, C Del Pero, e A Troi. «What are the implications of climate change for retrofitted historic buildings? A literature review.» 2020.

Haugen, A., e J. & Mattsson. « Preparations for climate change's influences on cultural heritage. International Journal of Climate Change Strategies and Management.» 2011.

Haugen, A., e J. Mattsson. *Preparations for climate change's influences on cultural heritage. International Journal of Climate Change.* 2011.

Hegyi, D., M. Armuth, B. Halmos, e K. Marotzy. «The effect of wind on historical timber towers analyzed by plastic limit analysis in the focus of a collapse.» 2022.

Herrera-Avellanosa, D., et al. «Evaluating the Implementation of Energy Retrofits in Historic Buildings: A Demonstration of the Energy Conservation Potential and Lessons Learned for Upscaling.» 2024.

Hoppe, T., S. Bellekom, e K. Lulofs. «Energy Efficiency in the Dutch Residential Sector: reflections on policy implementation.» 2013.

Huang, R., e Q. H. Ma. «Preliminary report on water resistance tests on wood.» 2003.

Hughes, W., Q. Lu, Z. Ding, e W. Zhang. «Modeling Tree Damages and Infrastructure Disruptions under Strong Winds for Community Resilience Assessment.» 2023.

ICOMOS. «The future of our pasts: Engaging cultural heritage in climate action. .» 2019.

IEA. «Global Energy Review 2025.» 2024.

IEA. «The breakthrough agenda report 2024. Accelerating Sector Transitions Through Stronger International Collaboration.» 2024.

IEA, Agency International Energy. «Energy policy review. The Netherlands 2024.» 2024.

Ignoto. «Costruzioni in cemento armato.» In *Rivista di artiglieria e genio V. 4*. 1899.

IPCC. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Geneva, Switzerland, 2023.

Jelle, B. P. *Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions - Properties, requirements and possibilities.* 2011.

Jibril, U. S. Musa-Haddary, Y. G., B. A. Kolo, e A. Muhammad. «BIM adoption in the architectural, engineering and construction industry: a review of literature.» 2024.

Kamphuis, J. *Vesting Naarden, Promerskazerne.* 1994.

Kips, D. *Gids voor de vestingwerken van Naarden.* 2007.

Koppert, H. «nvironmental protection expenditures of households home improvement, Statistics Neth-erlands Report, February 2012.» 2012.

Kouider, T., G. Paterson, e C. Thomson. «Bim as a viable collaborative working tool: a case study .» 2007.

Lafrenz Samuels, K., e E. Platts. «Global Climate Change and UNESCO World Heritage.» In *International Journal of cultural property, vol.29, issue 4*, pp. 409 - 432. Cambridge University Press, 2023.

Leonardi, E. et all. «Conservation compatible energy retrofit technologies. Part III: Documentation and assessment of materials and solutions for wall insulation in historic buildings.» Rainer Pfluger (UIBK); Alexander Rieser (UIBK), 2021.

Lidelow, S., T. Orn, A. Luciani, e A. Rizzo. «Energy-efficiency measures for heritage buildings: A literature review.» 2019.

Lidelöw, S., T. Örn, A. Luciani, e A. Rizzo. «Energy-e□ciency measures for heritage buildings: A literature review.» 2018.

Litti, G., A. Audenaert, e J. Braet. «Energy Retrofitting in Architectural Heritage, Possible Risks Due to the Missing of a Specific Legislative and Methodological Protocol.» 2013.

Lucchi, E. «Energy Efficiency of Historic Buildings .» 2022.

Lucchi, E. «Integration between photovoltaic systems and cultural heritage: A socio-technical comparison of international policies, design criteria, applications, and innovation developments.» 2022.

Lucchi, E. «Renewable Energies and Architectural Heritage: Advanced Solutions and Future Perspectives .» 2023.

—. *Riqualificazione energetica dell'involucro edilizio.* Dario Flaccovio Editore, 2014.

Lucchi, E., e V. Pracchi. *Efficienza energetica e patrimonio costruito. La sfida del miglioramento delle prestazioni energetiche nell'edilizia storica.* Milano: Maggioli Editore, 2013.

Lucchi, E., S. Baiani, e P. Altamura. «Design criteria for the integration of active solar technologies in the historic built environment: Taxonomy of international recommendation.» 2023.

Lucchi, Elena, e Valeria Pracchi. «Interventi per il miglioramento dell'efficienza energetica.» In *Efficienza energetica e patrimonio costruito. La sfida del miglioramento delle prestazioni nell'edilizia storica.*, di Elena Lucchi e Valeria Pracchi, 167-199. Milano: Maggioli Editore, 2013.

Maida, R., M. Trimarchi, e G. Neri. «La tutela del patrimonio culturale in tempo di pace e nei conflitti armati.» 2020.

Majcen, D., L.C.M. Itard, e H. Visscher. «Theoretical vs. actual energy consumption of labelled dwellings in the Netherlands: Discrepancies and policy implications.» 2013.

Marrullier, E. *Guida pratica alla costruzione degli edifizicon speciale riguardo al cemento armato.* Torino, 1918.

Martínez-Medina, A., e A. Pirinu. «Segni e tracce nel paesaggio delle guerre moderne. Un appello in difesa delle architetture militari.» 2017.

Martinez-Molina, A., I. Tort-Ausina, S. Cho, e J. L. Vivancos. «Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review.» 2016.

Martorano, F. «L'architettura militare tra quattrocento e cinquecento.» 2006.

Mazzarella, L. «Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view.» 2015.

McGraw, H. «The business valueof building information modeling. Getting building information modeling to the bottom line.» 2009.

MiBACT. «Linee guida di indirizzo per il miglioramento dell'efficienza energetica nel patrimonio culturale.» 41-108. 2015.

Ministry of Economic Affairs and Climate Policy. «Natural resources and geothermal energy in the Netherlands. Annual review 2018.» 2018.

Moschella, A., A. Salemi, A. Lo Faro, G. Sanfilippo, M. Detommaso, e A. Privitera. «Historic Buildings in Mediterranean Area and Solar Thermal Technologies: Architectural Integration vs Preservation Criteria.» 2013.

Mulder, M., e P. Perey. *Gas production and earthquakes in Groningen reflection on economic and social consequences.* 2018.

Murphy, L., F. Meijer, e H. Visscher. «A qualitative evaluation of policy instruments used to improve energy performance of existing private dwellings in the Netherlands.» 2012.

Nair, G., L. Verde, e T. Olofsson. «A Review on Technical Challenges and Possibilities on Energy Efficient Retrofit Measures in Heritage Buildings.» 2022.

Netherlands, Government of the. «Climate Agreement. The Hague 28 June 2019.» 2019.

NIBS, National Institute of Building Sciences. «National BIM Standard - United States.» 2014.

Nigllio, A. *Le carte del restauro. Documenti e norme per la conservazione dei beni architettonici e ambientali.* Aracne Editrice, 2012.

OECD. *Decarbonising Homes in Cities in the Netherlands: A Neighbourhood Approach.* 2023.

OICE. *8° Report OICE sulla digitalizzazione e sulle gare BIM 2024.* 2025.

Orr, S. A., J. Richards, e S. Fatorić. «Climate Change and Cultural Heritage: A systematic literature Review (2016-2020).» 2021.

P., Brimblecombe., e C. M. Grossi. «. Climate change critical to cultural heritag.» In *Survival and sustainability: environmental concerns in the 21st century*, di H. Gökçekus, U. Türker e J. W. LaMoreaux, 195–205. Springer, 2011.

Pachauri, R.K., et al. «A. Climate Change 2014 Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).» 2014.

Panakaduwa, C., P. Caates, e M. Munir. «Identifying sustainable retrofit challenges of historical Buildings: A systematic review.» 2024.

Paolini, C. «La sperimentazione del calcestruzzo di cemento armato nella realizzazione delle caserme unitarie.» In *International Conference Military Landscapes. A future for Military Heritage.* 2017.

Paolini, C. «Le caserme unitarie: progetto e costruzione.» In *Le caserme e la città. I beni immobili della difesa tra abbandoni, dismissioni e riusi.*, di F. Storelli e F. Turri, 87-115. Palombi editori, 2007.

Pasetti, F. «Costruzioni in cemento armato.» In *Rivista di artiglieria e genio, vol. IV*, 241-277. 1899.

Pereira, L. D., V. Tavares, e N. Soares. «Up-To-Date Challenges for the Conservation, Rehabilitation and Energy Retrofitting of Higher Education Cultural Heritage Buildings .» 2021.

Pezzutto, S., F. Haas, D. Exner, e S. Zambotti. «Europe's Building Stock and Its Energy Demand: A Comparison Between Austria and Italy.» 2018.

Pickles, D., I. Brocklebank, e C. Wood. «Energy efficiency in historic buildings.» 2010.

Pirinu, A., G. Sanna, e M. Utzeri. «Rappresentare l'architettura militare tra "antichi" linguaggi e nuove frontiere. Le mura di Cagliari in Età Moderna.» In *Linguaggi Grafici. ILLUSTRAZIONE.* , di E. Cicalò e I. Trizio. Alghero, 2020.

Poli, S. A. «Sette caserme e un Palazzo di giustizia. Ragione militare e politica a Milano durante il fascismo 1926-1931.» 2016.

Polo Lopez, C. S., e E. Lucchi. «Acceptance of Building Integrated Photovoltaic (BIPV) in Heritage Buildings and Landscapes: Potentials, Barriers, and Assessment Criteria.» 2020.

Polo Lòpez, C. S., E. Lucchi, e G. Franco. «Acceptance of Building Integrated Photovoltaic (BIPV) in Heritage Buildings and Landscapes: Potentials, Barriers, and Assessment Criteria.» 2020.

Polo Lopez, C. S., E. Lucchi, E. Leonardi, A. Durante, A. Schmidt, e R. Curtis. «Risk-Benefit Assessment Scheme for Renewable Solar Solutions in Traditional and Historic Buildings .» 2021.

Polo Lopez, C. S., F. Troia, e F. Nocera. «Photovoltaic BIPV Systems and Architectural Heritage: New Balance between Conservation and Transformation. An Assessment Method for Heritage Values Compatibility and Energy Benefits of Interventions .» 2021.

Polo Lopez, C., S., Lucchi, E., Leonardi, E., Durante, A., Scmidt, A., Curtis, R. «Risk-Benefit Assessment Scheme for Renewable Solar Solutions in Traditional and Historic Buildings.» 2021.

Race, S. «BIM Demystified. An architect's guide to Building Information Modelling/Management (BIM).» 2013.

Rajcic, V., A. Skender, e D. Damjanovic. «An innovative methodology of assessing the climate change impact on cultural heritage.» 2018.

Reichel, A., A. Hochberg, e C. Köpke. «Intonaci stucchi e pitture.» Torino: UTET, 2007.

Richards, J., R. Bailey, J. Mayaud, H. Viles, Q. Guo, e X. Wang. «Deterioration risk of dryland earthen heritage sites facing future climatic uncertainty.» 2020.

Rodwell, D. «The Unesco World Heritage Convention, 1972–2012: Reflections and Directions .» 2013.

Ruggeri, A. G., L. Gabrielli, e M. Scarpa. «Energy retrofit in European Building Portfolios: a Review of five key aspects.» 2020.

Russo, F. *L'attività edilizia a Roma e nelle città dell'Impero Romano.* Roma : Edizioni Quasar , 2021.

Sabbioni, C., A. Bonazza, P. Messina, e M. Cassar. *The Atlas of Climate Change Impact on European Cultural Heritage: Scientific Analysis and Management Strategies.* 2010.

Sabbioni, C., M. Cassar, P. Brimblecombe, e R. A. Lefèvre. *Vulnerability of cultural heritage to climate change.* 2019.

Sabbioni, C., M. Cassar, P. Brimblecombe, J. Tidblad, R. Kozlowski, e M. Drdácký. «Global climate change impact on built heritage and cultural landscapes.» 2006.

Sesana, E., A. S. Gagnon, C. Ciantelli, J. Cassar, e J. Hughes. *Climate change impacts on cultural heritage: A literature review.* 2021.

Sonnemans, E., e B. Poel. «Why the Energy Index (EI) is not the same as the Energy Performance Coefficient (EPC). Explanation of different energy performance notions; Waarom de EI niet gelijk is aan de EPC. .» 2004.

Spyridaki, N. A., A. Ioannou, A. Flamos, e V. Oikonomou. «An ex-post assessment of the regulation on the energy performance of buildings in Greece and the Netherlands—a cross-country comparison.» 2015.

Stefanutti, L., e B. Bedendo. «DESIGN OF AIR DISTRIBUTION SYSTEMS FOR HISTORIC BUILDINGS.» 2014.

Thorson, E. J. «The World Heritage Convention & Climate Change: the case for a climate-change mitigation strategy beyond the Kyoto Protocol.» 2007.

Tidblad, J. «Atmospheric corrosion of heritage metallic artefacts: Processes and preventio.» In *Experimental investigation on surface monitoring of materials in environmental conditions. Proceedings of SPIE*, di P. Dillmann, E. Watkinson, E. Angelini e A. Adriaens. 2013.

Trani, S. *Guida agli archivi dell'ufficio storico dell'Aeronautica Militare.* 2018.

Troi, A., e Z. Bastian. «Energy efficiency solutions for historic buildings: A Handbook.» 2014.

Turri, F. «La casa del soldato. Per una tipologia delle caserme.» In *Le caserme e la città. I beni immobili della difesa tra abbandoni, dismissioni e riusi.*, di F. Storelli e F. Turri. Palombi Editore, 2014.

Turri, F., e E. Zamperini. «Caserme e beni militari dismessi: riconversione a uso universitario.» In *Le caserme e le città*. 2017.

Turri, F., E. Zamperini, e V. Cappelletti. «The Evolution of Construction Techniques in Italian Barracks after National Unification.» 2009.

Turri, F., V. Cappelletti, e E. Zamperini. «Italy. Restoration of serial buildings: The Barracks.» 2008.

Ullah, K., I. Lill, e E. Witt. «An Overview of BIM Adoption in the Construction Industry: Benefits and Barriers Open Access.» 2019.

UNESCO. « World Heritage Committee, decision 29 COM 7B.a.» 2005.

UNESCO. «24th session of the General Assembly of States Parties to the convention concerning the protection of the world cultural and natural heritage.» 2023.

UNESCO. «Decisions adopted during the 43rd session of the World Heritage Committee (Baku, 2019).» 320. 2019.

UNESCO. «Issues Related to the State of Conservation of World Heritage Properties: the Impacts of Climate Change on World Heritage Properites.» 2006.

UNESCO. «Policy document on the Impact of climate change on world heritage propperties.» 2007: 11.

UNESCO, World Heritage Centre. «Climate Change and World Heritage. Report on predicting and managing the impacts of climate change on World Heritage and Strategy to assist States Parties to implement appropriate management responses.» 2007.

UNIENISO16757. «Strutture dati per i cataloghi elettronici di prodotto per i servizi in edilizia.» 2019.

UNIENISO19650. «Organizzazione e digitalizzazione delle informazioni relative all'edilizia e alle opere di ingegneria civile, incluso il Building Information Modelling (BIM) - Gestione informativa mediante il Building Information Modelling.» 2019.

Vacca, L. «La nozione del bene culturale: alcune riflessioni.» 2017.

Valli, L. «Vecchie abitudini e nuovi strumenti. Un sistema informativo per lo studio delle vicende architettoniche del Palazzo Ducale di Mantova.» 2012.

van der Voort, N., & Vanclay, F. «Social impacts of earthquakes caused by gas extraction in the Province of Groningen, The Netherlands. Environmental Impact Assessment Review.» 2015.

Van der Werf, J. «De gele loods, de gymnastiekloods en andere loodsen in Naarden.» 2021.

Van der Werf, J. «The New Dutch Waterline.» 2021.

Van der Werf, J. «The restoration work in Naarden.» In *Fort, Vol. 47*. 2019.

—. *Vesting Naarden.* 2021.

Van der Werf, Jeroen. «The New Dutch Waterline.» s.d.

Van Engen, Hildo, Anton Kos, e Reinout Rutte. «Tussen Vecht en Eem. Tijdschrift voor regionale geschiedenis. Naarden 650 jaar. .» 2000.

Van Osta, M., e W. Maassen. «Evaluation☐Dutch☐final☐nZEB☐requirements☐for☐University☐buildings.» 2022.

Van Veen, L. «The 'new' zero energy office building. The impact of Dutch regulatory changes on the development of energy efficient office buildings. .» 2020.

Van Wees, J. D., et al. «Accelerating geothermal development with a play-based portfolio approach.» 2020.

Verschuure-Stuip, G. «Hold the Line: The transformation of the New Dutch Waterline and the Future Possibilities of Heritage.» In *Adaptive Strategies for Water Heritage*, di C. Hein, 250-269. Cham: Springer, 2020.

Vieites, E., I. Vassileva, e J. E. Arias. *European initiatives towards improving the energy efficiency in existing and historic buildings.* 2015.

Viglino Davico, M., e E. Lusso. «L'ingegneria delle difese militari.» 2013.

Viles, H. A., e N. A. Cutler. « Global environmental change and the biology of heritage structures. Global Change Biology.» 2012.

Villa, G. «Rocche, città e territorio nei Trattati martiniani.» 2004.

Visconti, A. «Legislazione e prassi italiane in materia di beni culturali tra protezionismo e universalismo.» 2024.

Visscher, H. J., E. N. M. Van der Werf, e D. J. M. Van der Voordt. «Energy efficiency of the Dutch housing stock.» 2013.

Vlek, C. «Rise and reduction of induced earthquakes in the Groningen gas field, 1991–2018: statistical trends, social impacts, and policy change.» 2019.

Wang, X., H. Li, Y. Wang, e X. Zhao. «Assessing climate risk related to precipitation on cultural heritage at the provincial level in China.» 2022.

Webb, A. L. *Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods.* 2017.

Webb, A. L. «Energy retrofits in historic and traditional buildings: A review of problems and methods.» 2017.

Wong, A., F. K. W. Wong, e A. Nadeem. «Attributes of Building Information Modelling Implementations in Various Countries.» 2010.

Xinchen, P., A. M. Khan, S. M. Eldin, F. Aslam, S. K. U. Rehman, e M. Jameel. «BIM adoption in sustainability, energy modelling and implementing using ISO 19650: A review.» 2024.

Yaldiz, E. «Climate effects on monumental buildings. Paper presented at the Balwois, Ohrid, Republic of Macedonia.» 2010.

Yidan, H., C. Qing, X. Xuemin, T. Qicheng, D. Yabo, e L. Yijie. «Wind effects on Chinese traditional timber buildings in complex terrain: The case of Baoguo Temple.» 2022.

Zahedi, F., e M. J. Sardroud. «Global BIM Adoption Movements and Challenges: An Extensive Literature Review.» 2022.

Zahedi, F., J. M. Sardroud, e S. Kazemi. «Global BIM adoption movements and challenges: an extensive litearture review.» 2022.

Zamperini, E., F. Turri, e V. Cappelletti. «Sperimentazione e diffusione del calcestruzzo armato in italia: il contributo del genio militare.» 2009.

Zamperini, F. «At the origins of modern construction: early applications of reinforced concrete in floors designed by Italian corps of engineers.» 2013.

Zamperini, F. «L'evoluzione delle tecniche costruttive e dei metodi di veriica statica.» In *Le caserme e la città*, di F. Storelli e F. Turri. 2014.