

Dottorato in Valutazione e Mitigazione
dei Rischi Urbani e Territoriali - XXXIII ciclo

SLICE - Solar Lightweight Intelligent Component for Envelopes
INTEGRAZIONE DI CELLE FOTOVOLTAICHE SU SUBSTRATO FLESSIBILE IN FOGLI DI MATERIALE
COMPOSITO, PER LA REALIZZAZIONE DI INVOLUCRI ARCHITETTONICI SMART

Angelo Monteleone

Dipartimento Ingegneria Civile e Architettura
Università degli Studi di Catania

Supervisore:

Prof. Ing. Vincenzo Sapienza
Università di Catania

Componenti del Gruppo tesi:

Prof. Arch. Marius Voica

"Ion Mincu" University of Architecture and Urban Planning UAUIM (Bucharest, Romania)

Ing. Giuseppe Platania

Meridionale Impianti SpA (Caponago, Italia)



La borsa di dottorato è stata cofinanziata con risorse del
Programma Operativo Nazionale Ricerca e Innovazione 2014-2020 (CCI 2014IT16M2OP005),
Fondo Sociale Europeo, Azione I.1 "Dottorati Innovativi con caratterizzazione Industriale"



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo



RINGRAZIAMENTI

Le sperimentazioni sui materiali e le loro caratterizzazioni sono state svolte presso i laboratori della sede di Belpasso (CT) dell'azienda partner MERIDIONALE IMPIANTI S.p.A.

La caratterizzazione meccanica è stata completata presso il Laboratorio Prove Materiali dell'Università degli Studi di Catania.

Le sperimentazioni per la termoformatura del materiale sono state condotte all'interno dell'azienda NTET S.p.A.

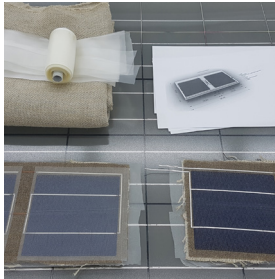
L'ottimizzazione parametrica è stata svolta in parte presso l'Università di Architettura e Urbanistica "Ion Mincu" di Bucarest (Romania).

I prototipi sono stati realizzati con il supporto dell' ETALab (Enabling Technology for Architecture Laboratory) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura - DICAR.

Un ringraziamento va al dott. ing. Gianluca Rodonò dell'Università di Catania, agli ingg. Antonio Astuti e Fabio Giusa della Meridionale Impianti S.p.A. per la collaborazione durante le fasi di sperimentazione e caratterizzazione del materiale.

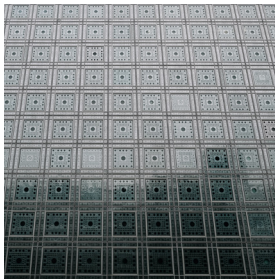
Si ringraziano anche gli ingg. Noemi D'Amico, Ivan Attardo e Serafino Risigione che hanno svolto degli studi complementari al progetto SLICE all'interno delle loro tesi di laurea.

INDICE



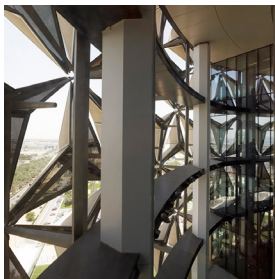
ABSTRACT

8



1. INTRODUZIONE

10



2. STATO DELL'ARTE

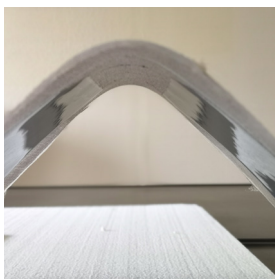
20

Involucri adattivi

23

Facciate adattive fotovoltaiche

37



3. CONOSCENZE PROPEDEUTICHE

42

Materiali compositi

45

Tecnologia fotovoltaica

48

Geometria di piega

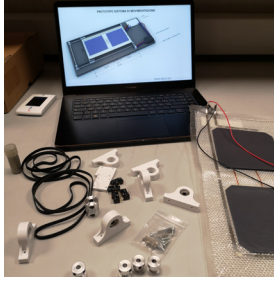
55

Prototipazione rapida

57

Sistema di controllo

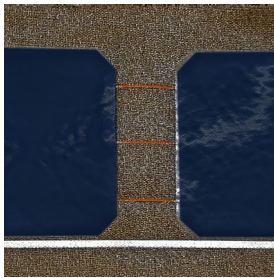
58



4. METODI E STRUMENTI

60

| | |
|---|----|
| Materiale base | 63 |
| Tecnologia fotovoltaica | 68 |
| Piega del materiale | 70 |
| Prototipazione | 74 |
| SLICE 1.0 | 74 |
| SLICE 2.0 | 77 |
| SLICE4ICARO | 78 |
| Progettazione parametrica del caso studio | 82 |
| Brevetto | 86 |



5. DESCRIZIONE E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

88

| | |
|--|-----|
| Materiale e tecnologia | 91 |
| Caratterizzazione meccanica del materiale base | 96 |
| Verifica decadimento di tensione del pannello | 96 |
| Processo di piegatura | 101 |
| SLICE 1.0 | 104 |
| SLICE 2.0 | 106 |
| SLICE4ICARO | 121 |
| Progettazione parametrica su caso studio | 134 |
| Brevetto | 152 |



6. CONCLUSIONI

154

BIBLIOGRAFIA

160

INDICE DELLE FIGURE

166

INDICE DELLE TABELLE

172

ABSTRACT

The research concerns the development of a lightweight and stand-alone component for dynamic envelopes, characterized by a flexible composite material integrated with high-efficiency photovoltaic cells, called SLICE, which is the acronym for Solar Lightweight Intelligent Component for Envelopes.

The research work was developed by a multidisciplinary research group lead by the University of Catania (UNICT), with the partnership of the “Ion Mincu” University of Architecture and Urban Planning (UAUIM) and the Meridionale Impianti Group (MI), a leading local company operating in markets with a high technological content.

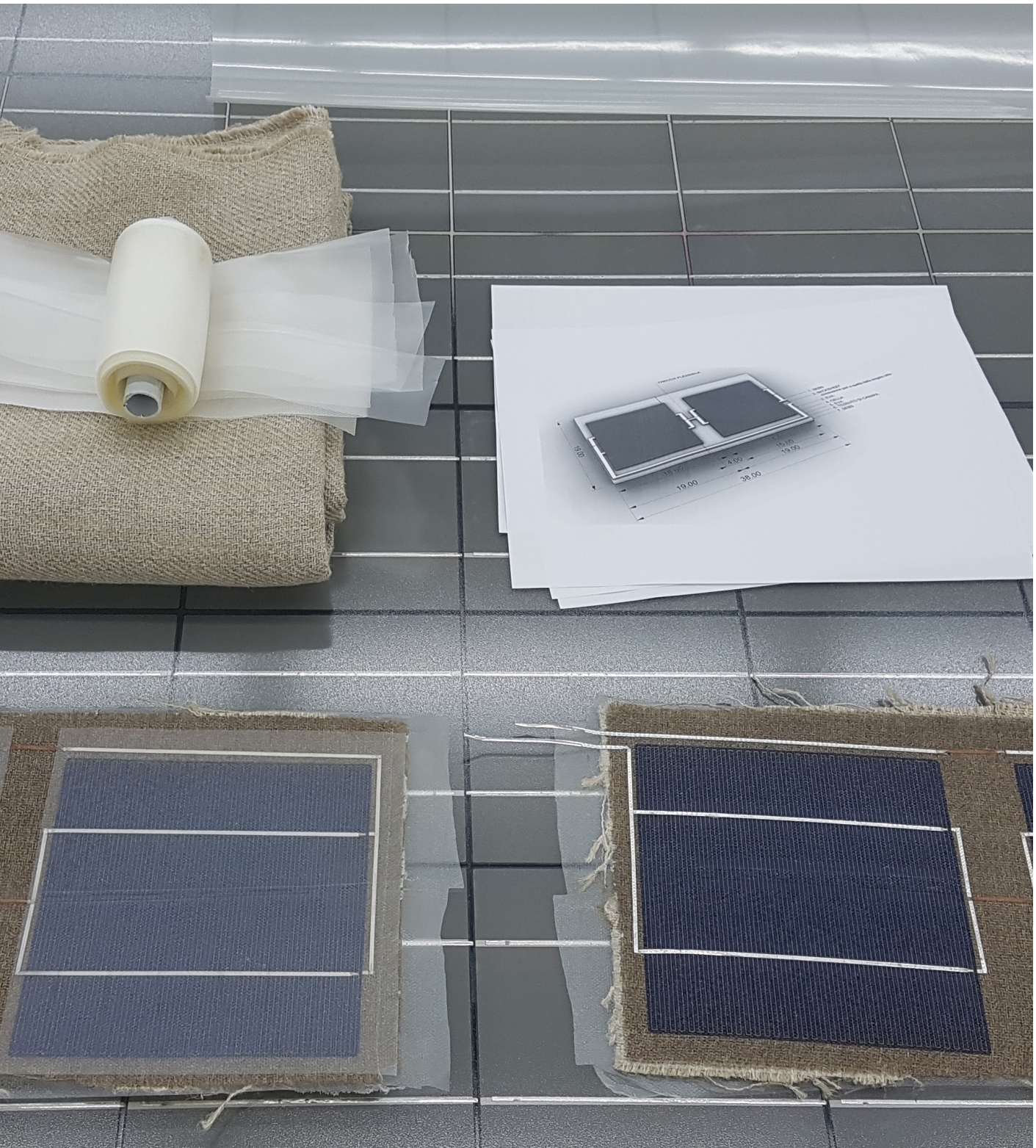
The definition of the production method of the composite material and the experiments on the integration of a high efficiency photovoltaic system, were carried out.

The composite material was made of a thermoplastic matrix and a reinforcement in natural or glass fiber fabric. Its mechanical characterization and the improvement of a secondary production process to generate the tessellation geometry were carried out.

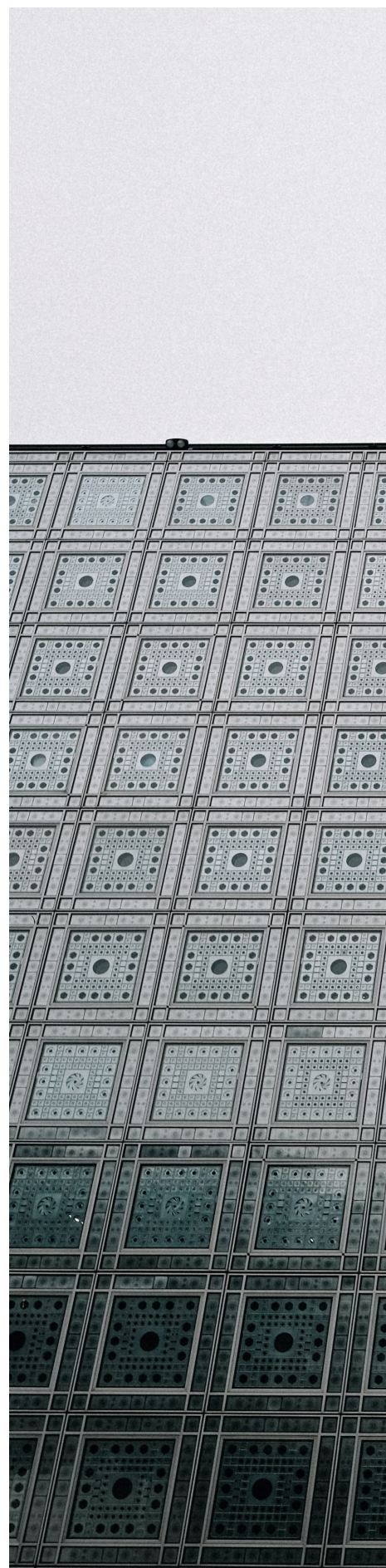
The multidisciplinary design process led to the realization of a first prototype of this energy self-sufficient kinetic component called SLICE for testing the movement system and defining the control system. Its management system is based on the Arduino platform. In order to check the effectiveness of the control code developed for the component, the realization of the second prototype, the laboratory simulations, as well as the tests of the preliminary experiments under real environmental conditions were carried out. The rapid prototyping process involved the analysis of the efficiency of the changing system to evaluate the use of the system as an element of BIPV, allowing to exploit the surplus of energy produced to power the technological components of the environment served by the component itself.

A workflow in a parametric environment has been defined for the implementation of the component on existing buildings, investigating different geometric configuration on virtual models.





1. INTRODUZIONE





La crisi ambientale mondiale chiede una nuova spinta innovativa nel settore delle costruzioni, mirata principalmente all'abbattimento dei consumi energetici e allo sfruttamento delle risorse da fonte rinnovabile. Questa esigenza era emersa già con direttiva europea 2002/91 sul rendimento energetico in edilizia, che invitava guardare ad una nuova generazione di edifici a energia quasi zero, e parallelamente lavorare sulla riduzione delle emissioni inquinanti, verso lo studio di facciate multifunzionali in grado di interagire con l'ambiente e l'utente. Questi nuovi sistemi offrono l'opportunità di fornire una risposta immediata al miglioramento della qualità dell'aria e contemporaneamente nell'ottimizzazione dello sfruttamento delle risorse (Gallo and Romano, 2017). I risultati degli studi del C2ES (Center for Climate and Energy Solutions) dimostrano che l'ottimizzazione degli infissi negli edifici residenziali comporterebbe un risparmio energetico del 10-50% e una riduzione dei costi del 10-40% negli edifici commerciali attraverso una riduzione dell'illuminazione e HVAC. All'interno di questo quadro le facciate adattive assumono un ruolo fondamentale, ponendo le basi per nuove soluzioni capaci di raggiungere migliori risultati (Velasco, Brakke and Chavarro, 2015).

Questo processo è stato accelerato dall'entrata in vigore della direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica. Le tecnologie adattive inoltre assumono maggiore rilevanza alle latitudini dei climi temperati, dove il rapido cambiamento delle condizioni ambientali richiede una risposta repentina dei parametri dell'involucro per il mantenimento delle condizioni di comfort degli ambienti interni (Gallo and Romano, 2017). Al giorno d'oggi, nelle facciate adattive può essere rintracciata una delle strategie più efficaci per gestire in modo efficiente le interazioni tra ambienti esterni e interni per massimizzare il riscaldamento invernale, l'ombreggiamento estivo e la ventilazione naturale, l'isolamento acustico, il trasferimento della

luce diurna priva di abbagliamento e il comfort interno per gli occupanti (Tabadkani et al., 2019)

La nuova generazione di involucri high-tech di recente sviluppo è frutto della notevole diffusione di prodotti innovativi che integrano una risposta ambientale in tempo reale, materiali con performance superiori, automazione dinamica con microprocessori integrati, sensori e attuatori wireless, ottenute con nuove tecniche di produzione. Questo tipo di approccio ha sostanzialmente modificato il modo di concepire gli edifici sin dalle prime fasi della progettazione.

I dispositivi tradizionali presentano spesso degli inconvenienti legati alla complessità dei sistemi di movimentazione utilizzati, costosi e di difficile manutenzione.

Tecnologie per la movimentazione degli elementi meccanici, sistema di controllo e sensoristica richiedono inoltre erogazione di energia. Nel progetto di involucri adattivi risulta quindi necessario ottenere componenti autosufficienti dal punto di vista energetico.

Da qui lo spunto per la realizzazione di un nuovo componente che possa assolvere la funzione stessa di involucro adattivo, capace di produrre l'energia di cui ha bisogno ed essere movimentabile in maniera semplice.

La richiesta di sistemi adattivi per l'architettura, caratterizzati talvolta da materiali tali da migliorarne la sostenibilità nei cicli di produzione e nelle successive fasi di utilizzo, negli ultimi anni ha registrato un notevole sviluppo. L'importanza di ridurre il dispendio energetico e l'impatto della presenza umana sull'ambiente circostante, infatti, passa attraverso la progressiva sottrazione di peso e l'alleggerimento delle componenti meccaniche per l'attuazione del moto.

Lontano dall'essere un semplice confinamento esterno, l'involucro architettonico è un elemento di fabbrica complesso che interagisce continuamente con l'ambiente circostante. Gli involucri solitamente assolvono

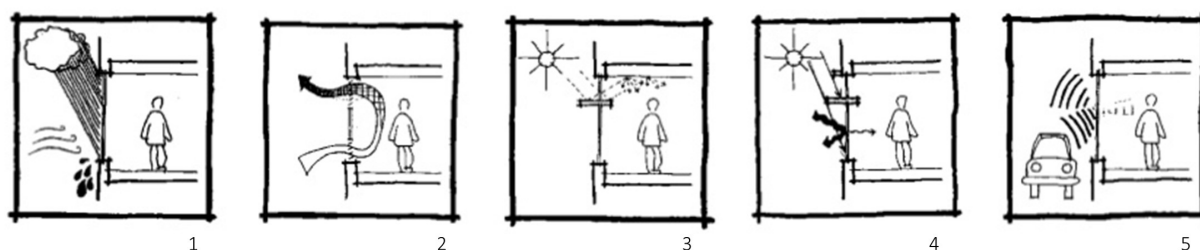


Fig. 1.1. Funzioni dell'involucro architettonico (Mohd., 2017)

le seguenti funzioni (Fig. 1.1):

1. impedire il passaggio di aria e umidità
2. consentire una corretta ventilazione naturale al fine di migliorare la temperatura e la qualità dell'aria interna
3. permettere la diffusione della luce naturale all'interno
4. impedire il surriscaldamento dovuto all'eccesso di radiazione solare
5. isolare acusticamente gli ambienti

Queste prestazioni sono fortemente condizionate dal clima, dalla destinazione d'uso dell'edificio, dal suo orientamento e dal carico energetico delle attrezzature, oltre naturalmente dalla tipologia di facciata. Per una prima distinzione, possono essere identificati due grandi gruppi di facciate (Shahin, 2019):

- *Facciate opache*, costituite prevalentemente da materiali opachi, quali murature, pietra, pannelli prefabbricati, rivestimenti metallici, pacchetti di isolamento, solitamente queste facciate sono dotate di aperture per l'ingresso di luce e/o aria;
- *Facciate vetrate*, altrimenti dette facciate continue, costituite solitamente da elementi in vetro trasparente o traslucido e struttura metallica.

Gli ultimi decenni sono stati caratterizzati da un trend crescente nella realizzazione di facciate trasparenti per edifici, parzialmente o totalmente aperte all'ambiente circostante. La conseguenza di questo tipo di scelta è il raggiungimento di innegabili benefici per la salute fisica e psicologica degli occupanti, grazie alla maggiore esposizione alla luce solare e alla vista verso l'esterno. Di contro, l'eccesso di luce diurna può comportare notevoli disagi sia sul fronte energetico, per via del surriscaldamento degli ambienti, sia dal punto di vista del comfort visivo degli occupanti, a causa di abbagliamento e riflessi indesiderati (Tabadkani, Banihashemi and Hosseini, 2018; Tabadkani et al., 2019).

Da qui la necessità di concepire sistemi di ombreggiamento fissi o dinamici che consentono di controllare il guadagno solare e le condizioni di comfort degli ambienti.

In letteratura viene proposta una categorizzazione delle facciate in base alla tipologia di schermatura che li caratterizzano (Fakourian and Asefi, 2019). Possono essere distinte facciate con:

- pannelli fissi
- pannelli regolabili
- pannelli mobili
- sistemi smart
- involucri ibridi

La scelta della tipologia di un sistema di schermatura

è influenzata da diversi fattori: la geometria della facciata, la concezione del design, l'efficienza in termini ambientali, la tipologia di occupanti, le prestazioni tecnologiche e altro (Tabadkani et al., 2019).

Al primo gruppo appartengono facciate caratterizzate da componenti fissi, che non subiscono alcuna alterazione o movimentazione. I pannelli possono essere verticali, orizzontali o combinati, la cui forma e posizione è stata studiata al fine di fornire un'adeguata schermatura agli ambienti in base alla direzione della luce. La seconda categoria comprende dispositivi di facciata che possono essere regolati mediante torsione o rotazione sia meccanicamente che elettricamente per rispondere alle situazioni richieste, attraverso input degli utenti e senza alcun automatismo. Le facciate con pannelli mobili invece sono conosciute anche come facciate cinetiche, capaci di rispondere in maniera attiva alle condizioni ambientali e alle mutevoli esigenze degli utenti. Esse sono solitamente costituite da due parti: una fissa e strutturale, una mobile capace di muoversi spazialmente per regolare l'afflusso di luce solare da qualsiasi angolazione. Le facciate con pannelli smart sono costituite da pannelli con materiali capaci di reagire adattandosi fisicamente in maniera ottimale sulla base di determinate condizioni al contorno, modificando la propria forma per esempio. I sistemi ibridi possono essere costituiti sia da materiali smart che strutture dotate di cinematismo, e possono integrare più funzioni. Il vantaggio di questi sistemi è quello di comprendere una più ampia classe di sistemi, consentendo un maggiore flessibilità nella modellazione dell'involucro stesso.

Gli edifici convenzionali vengono spesso concepiti come strutture statiche progettate seguendo modelli matematici, come quelli basati sullo studio della radiazione solare e del vento. Questo tipo di approccio però dissocia l'edificio dalle imprevedibili variazioni delle condizioni dell'ambiente circostante. Risulta allora necessario creare strutture in grado di relazionarsi con il contesto, assimilando informazioni e imparando da esso. All'interno di questo quadro, un involucro ad elevate performance che integra sistemi di gestione per l'illuminazione diurna, ombreggiatura e ventilazione naturale, offre l'opportunità di ridurre notevolmente i consumi di un edificio (Sadineni, Madala and Boehm, 2011). Questo tipo di comportamento viene comunemente definito adattivo.

Il termine *adattività* si riferisce alla capacità di un oggetto di recepire qualsiasi alterazione dell'ambiente circostante e rispondere ad esso dinamicamente (Shahin, 2019). Un'architettura basata su un insieme statico di elementi non ha capacità di adattarsi alle variazioni dell'ambiente circostante. La ricerca sui



Fig. 1.2. Jean Nouvel. Institut du Monde Arabe. Paris (www.archdaily.com)

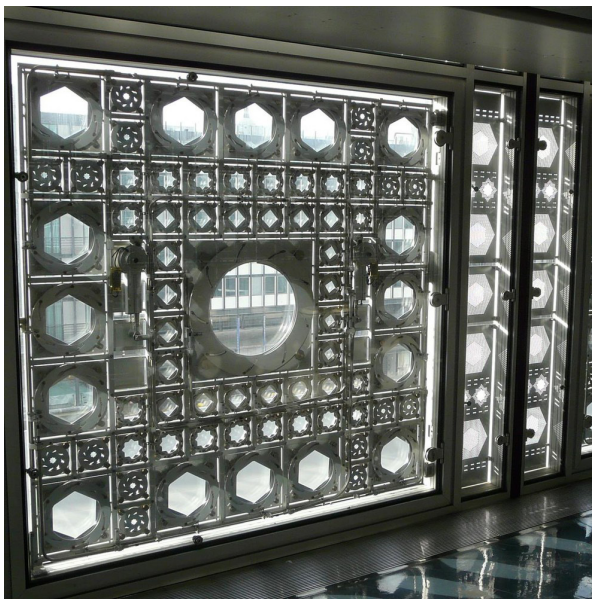




Fig. 1.3. Stadtwerke. Aachen (Sick and Erge, 1996)

sistemi adattivi si è sviluppata nel corso degli ultimi 40 anni, sebbene l'attenzione agli involucri adattabili o dotati di cinematisma risalga ad epoche precedenti (Moloney, 2011).

Architetti e ricercatori hanno guardato alla possibilità di realizzare edifici dotati di intelligenza e capaci di reagire agli stimoli esterni, complessi architettonici la cui "pelle" come in un essere vivente riuscisse a fornire una risposta alle mutevoli condizioni ambientali (Wigginton and Harris, 2013). L'uso di sistemi di facciata adattivi consente di ridurre il fabbisogno energetico degli edifici principalmente per due ragioni: l'isolamento termico supplementare fornito dagli elementi che lo costituiscono e la movimentazione delle sue parti per regolare il guadagno solare (Barozzi et al., 2016). Questo fa dell'involucro architettonico una barriera mutevole e dinamica, capace di regolare autonomamente il flusso di energia tra l'interno e l'ambiente esterno, al fine di raggiungere in maniera controllata migliori condizioni di comfort e la riduzione nei consumi di energia. In questa tipologia di involucri è stata individuata la strategia più performante per una gestione efficiente dell'interazione tra ambiente esterno ed interno al fine di massimizzare il riscaldamento invernale, l'ombreggiamento nel periodo estivo e la ventilazione naturale, l'isolamento acustico, il tra-

sferimento della luce diurna priva di abbagliamento e il comfort interno per gli occupanti (Tabadkani et al., 2019). Sistemi adattivi semplici, ossia basati sul controllo di una singola a singola variabile (ad es. l'isolamento termico, il controllo dell'illuminazione, controllo della ventilazione, ecc.) hanno dimostrato di fornire risparmi energetici e un miglior comfort sia da soli che in combinazione con altre soluzioni (Gallo and Romano, 2017).

L'Istitut du Monde Arabe di Jean Nouvel (Fig. 1.2), realizzato nel 1987, rappresenta uno dei primi esempi di involucro adattivo. La facciata meridionale dell'edificio è composta da 30.000 diaframmi in acciaio simili al meccanismo dell'otturatore di un obiettivo fotografico, con una struttura fisica che a causa del sistema a due strati adottato limita il rapporto di apertura a circa il 50%. Questi compongono una griglia 24x10 di baie quadrate. Ogni vano è costituito da un otturatore circolare centrale incastonato in una griglia di persiane più piccole per modulare la luce diurna e il guadagno solare verso l'interno, gestibile singolarmente attraverso motori collegati a un sistema informatico centrale (Barozzi et al., 2016). Questo tipo di meccanismo simile ad un diaframma è stato concepito come proposta contemporanea del *mashrabiyya*, l'elemento archetipo della cultura araba che è stato usato per secoli sia per la protezione solare e la ventilazione naturale ambienti interni. L'eccessiva complessità dei dispositivi meccanici che lo costituiscono è stato soggetto nel corso degli anni a frequenti interventi di manutenzione e attualmente risulta inattivo (Velasco, Brakke and Toccipà, 2013).

L'avvento della progettazione parametrica e la diffusione degli strumenti computazionali hanno determinato crescita non solo nella ricerca scientifica, ma anche nella progettazione e realizzazione di facciate adattive. Nell'ambito dell'informatica pervasiva, ovvero l'applicazione di questa disciplina agli oggetti quotidiani che diventano sempre più smart, il progettista riesce ad avere un completo controllo sul processo, alla pianificazione al controllo, mentre la disponibilità di strumentazioni quali microprocessori e sensori a basso prezzo, rende il raggiungimento di questo scopo più agevole (Velasco, Brakke and Chavarro, 2015).

Un'ulteriore tendenza degli ultimi decenni prevede l'integrazione di nuove soluzioni per il risparmio energetico o meglio ancora la produzione di energia da fonti rinnovabili (Velikov and Geoffrey, 2012). Così le facciate si sono trasformate in sistemi molto complessi, superando il concetto stesso di involucro.

Il primo esempio su questo tema è la facciata sudest della Stadtwerke di Aachen del 1991 (Fig. 1.3), costituita

da moduli fotovoltaici in silicio vetro-vetro semitrasparenti, alla quale era stata demandata la duplice funzione di produrre energia elettrica e contribuire all'isolamento termico (Sick and Erge, 1996). Essa segna anche l'inizio del Building Integrated Photovoltaics (BIPV), di cui si dirà oltre più diffusamente nel capitolo successivo. Il fotovoltaico quindi si aggiunge come componente attivo e rilevante dal punto di vista architettonico (Heinstein, Ballif and Perret-Aebi, 2013).

Nella progettazione di facciate adattive un ruolo importante è svolto dal cinematismo delle componenti. Proprio per questo motivo molti studi di progettazione e di ricerca investono varie risorse nello sviluppo di sistemi meccanici caratterizzati da performance e robustezza sempre maggiori, orientati verso l'uso di materiali leggeri.

L'intenso lavoro verso un alleggerimento dei componenti a cui è affidato il cinematismo ha portato ad un dialogo continuo tra i diversi campi dell'ingegneria, divenendo oggetto di sperimentazione continua all'interno di due Istituti di ricerca quali l'ILEK di Stoccarda, diretto da Werner Sobek, e il Kinetic Design Group presso il M.I.T. di Boston, diretto da Michael Fox (Muscchio, 2009).

La ricerca scientifica nell'ambito dei sistemi di involucri adattivi innovativi basati su moduli schermanti a gestione decentralizzata (Tabadkani et al., 2021) ha dimostrato come l'autonomia dei componenti dell'involucro presenti potenziali vantaggi. Uno di questi deriva dalla possibilità di rispondere in maniera puntuale alle mutevoli condizioni esterne e interne nelle diverse parti della facciata, indipendentemente dalla gestione dei restanti componenti del sistema facciata, consentendo quindi di aumentare in maniera significativa le prestazioni dell'involucro dell'edificio (Yekutieli and Grobman, 2014). Per questa ragione, il componente oggetto della presente trattazione è stato pensato come sistema autosufficiente energeticamente per applicazioni stand-alone.

Nella sezione dello stato dell'arte dedicata alle soluzioni per involucri, alcuni degli esempi analizzati riguardano l'adozione di pannelli rigidi connessi ad un perno o attuatore che ne consentisse il cinematismo.

La mobilità e la deformazione delle facciate adattive richiede la soluzione di specifiche problematiche di controllo dei vari input e delle soluzioni tecnico/meccaniche adottate, ma anche inconvenienti legati alla manutenzione, specialmente negli attuatori meccanici, che li rendono soggetti a frequenti interventi di manutenzione (Fiorito et al., 2016). Nel quadro di componenti adattivi per l'involucro edilizio, risulta necessario concentrare l'attenzione sull'integrazione

del fotovoltaico su elementi leggeri flessibili o pieghevoli, al fine di raggiungere l'autosufficienza energetica e la semplificazione dell'apparecchiatura meccanica.

Per il componente oggetto della trattazione si è guardato alla definizione di una stratigrafia che potesse consentire di ottenere un elemento in composito leggero, flessibile e pieghevole con sistema fotovoltaico inglobato.

Per la validazione delle performance del materiale è risultato indispensabile provvedere alla caratterizzazione meccanica del substrato flessibile e alla verifica sul decadimento delle prestazioni del sistema fotovoltaico quando sottoposto a cicli di invecchiamento precoce.

Ai fini di poter testare il funzionamento del componente in laboratorio, terzo step della ricerca è stato rivolto alla progettazione di un primo prototipo in scala, su cui sono stati principalmente studiati i cicli di funzionamento del complesso meccanico messa a punto. In questa fase della ricerca è stata coinvolta l'azienda partner Meridionale Impianti SpA, che da anni opera nel mercato delle rinnovabili e della building automation.

Le prove sugli automatismi di base e sul sistema di ricarica hanno agevolato la realizzazione di un secondo modello attraverso il quale sarà possibile effettuare test in condizioni ambientali simulate. In questo caso un'ampia parte dello studio è stata dedicata all'automazione. Nello specifico l'attenzione è stata focalizzata sui sistemi di controllo basati su Arduino per l'ottenimento di un sistema di gestione intelligente. Questo ha consentito di effettuare verifiche sui componenti cinetici, testare il materiale sottoposto agli stress meccanici e verificarne l'integrazione con il sistema di controllo e gestione adattiva.

In collaborazione con l'Università di Architettura e Urbanistica "Ion Mincu" di Bucarest è stato portato avanti lo studio di design sul componente, ovvero il progetto di inserimento del sistema di schermatura sperimentato su due edifici esistenti a Bucarest. In questa sede è stato definito un workflow di progettazione parametrica utile a l'applicazione del componente su edifici esistenti utilizzando il plug-in Grasshopper per Rhinoceros e Grasshopper-Archicad Live Connection.

Gli studi hanno consentito di effettuare opportune valutazioni sulla fattibilità reale del componente e definire un eventuale sistema modulare adattabile alle diverse applicazioni.

Nella fase finale della ricerca è stata portata avanti l'implementazione del sistema di produzione e immagazzinamento di energia, mediante il progetto di installazione del componente su un padiglione off-grid.

Il lavoro è frutto di un gruppo di ricerca multidisciplinare guidato dall'Università degli Studi di Catania (UNICT), con la partnership dell'Università di Architettura e Urbanistica "Ion Mincu" (UAUIM) e del Gruppo Meridionale Impianti (MI). La parte della ricerca presso l'Università di Catania è stata svolta all'interno dell'ETA lab, Enabling Technology for Architecture, laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura rivolto ad attività di ricerca e di didattica, che si occupa dello sviluppo e della diffusione delle tecnologie innovative per l'architettura, dove i prototipi del componente sono stati realizzati e testati.

L'obiettivo generale della ricerca è stato quindi lo sviluppo di un componente innovativo di schermatura adattivo che include la produzione di energia attraverso l'integrazione di celle fotovoltaiche flessibili, denominato SLICE, acronimo di Solar Lightweight Component for Envelopes. Questo dispositivo è capace di assumere diverse configurazioni grazie ad un sistema computerizzato di attuatori e sensori. Questa peculiarità lo rende adatto a svariate applicazioni, come sistemi di involucri responsivi, padiglioni con involucro globale, coperture leggere di spazi aperti in aree sensibili.

Il contesto in cui la ricerca va ad inserirsi ha permesso di definire un preciso stato di avanzamento tecnologico rispetto allo stato dell'arte, che ha previsto lo sviluppo di un materiale base con resistenza meccanica accresciuta dall'irrigidimento dato dalla piega, che fosse esso stesso involucro. Al componente tecnologico

è demandata la produzione dell'energia necessaria al funzionamento. La piega consente anche di attuare il cinematismo, rendendo l'involucro *foldable*. La possibilità di implementarne la funzionalità con l'integrazione della tecnologia fotovoltaica risolve i problemi intrinseci al fabbisogno energetico del cinematismo, ampliandone le condizioni di impiego in numerose applicazioni.



Fig. 1.4. Programma di ricerca

2. STATO DELL'ARTE





Il settore delle costruzioni e della gestione degli edifici è responsabile del consumo di oltre 40% di energia primaria totale in Europa (Barozzi et al., 2016) e del 34% su scala mondiale, superando la domanda del settore dell'industria e dei trasporti (Shi, Abel and Wang, 2020). Quasi la metà dei consumi degli edifici sono addebitabili alle perdite di calore in inverno e al surriscaldamento estivo, rendendo necessario l'utilizzo di sistemi di condizionamento per il mantenimento di adeguati livelli di comfort interno (Barozzi et al., 2016). L'involucro dell'edificio rappresenta il primo livello di comunicazione tra costruzione, uomo e ambiente. In un organismo edilizio viene definito "involucro" l'elemento architettonico finalizzato alla delimitazione e classificazione tra spazio esterno e spazio interno. Esso può essere distinto, in base alla geometria, in "globale" o "scatolare". Nel primo caso l'elemento di fabbrica funge da chiusura e da copertura senza soluzione di continuità, come nel caso di padiglioni e organismi costituiti da superfici curve, mentre nel secondo caso ha una forma squadrata e sono distinguibili le chiusure verticali e le chiusure orizzontali. (Mandolesi, 1978). Oggi l'involucro ha assunto funzioni sempre più complesse (Premier, 2016). Inoltre, nel passato era prevalente la funzione fisica, oggi l'involucro viene inteso come un filtro attivo per lo scambio di flussi con l'ambiente esterno.

Nasce così un rapporto di comunicazione uomo-edificio-ambiente, applicabile sia al campo architettonico in relazione alla forma, sia alla sfera percettiva e comunicativa, finalizzata alla trasmissione di messaggi o addirittura all'interazione dell'involucro architettonico con l'utente e l'ambiente (Di Salvo, 2018). Di fronte alle sfide della decarbonizzazione per il settore edilizio nell'UE (obiettivo dell'80% per il 2050), l'involucro edilizio dovrebbe integrare funzioni attive relative alla produzione di energia (raccogliere, convertire, immagazzinare, distribuire) (Loonen et al., 2015). A questo proposito, le facciate degli edifici sono spesso la più grande superficie potenziale per l'integrazione di componenti di generazione di energia rinnovabile (fotovoltaico, solare termico, ecc.) nelle aree urbane.

Parallelamente, come riferito in letteratura (Musacchio, 2009) le ibridizzazioni meccaniche negli involucri stanno conducendo ad una duplice flessibilità: da un lato estrinseca, perché inerente al rapporto tra edificio e ambiente, dall'altro intrinseca, riguardante il complesso uomo/architettura. L'adozione di un'intelligenza computerizzata permette di supportare operazioni e funzionalità dinamiche automatizzate, come la regolazione della luce interna, tenuta all'aria e del rumore, il trasferimento di calore e il miglioramento della qualità dell'aria interna. La gestione adattiva

degli involucri negli edifici consentirebbe in Europa di ridurre annualmente del 10% il consumo di petrolio (circa 41 milioni di tonnellate) e di circa 111 milioni di tonnellate la produzione di CO₂ (Barozzi et al., 2016).

Gli involucri di tipo statico presentano notevoli limiti in merito al risparmio energetico, in quanto non consentono di avere un controllo climatico coerente con la variabilità delle condizioni climatiche nel tempo (Gallo and Romano, 2017). La nuova generazione di involucri ad alte prestazioni potrebbe contribuire in maniera importante alla riduzione di consumi energetici, per la realizzazione di edifici estremamente performanti, capaci di rispondere dinamicamente ai mutamenti atmosferici, grazie all'adozione di materiali più avanzati, sistemi di gestione sempre più efficienti ed intelligenti, e l'integrazione di microcontrollori, sensori e attuatori. Di seguito verranno analizzati quelli che vengono definiti come involucri adattivi, termine spesso riferibile a complessi capaci di rispondere in modo dinamico ai cambiamenti che avvengono nelle condizioni climatiche, offrendo quindi una migliore efficienza rispetto ai sistemi statici (Attia, 2019; Shahin, 2019).

I sistemi di facciata *adattivi* hanno un'importanza rilevante sulla riduzione del guadagno solare, ma assumono un potenziale ancora maggiore quando la loro funzione viene legata alla produzione di energia elettrica mediante l'integrazione della tecnologia fotovoltaica (Tablada and Zhao, 2016). La caratteristica adattativa di queste facciate mira ad aumentare le prestazioni dell'edificio e a soddisfare una più ampia gamma di necessità combinandole, in quanto mirano a mettere a punto le diverse funzioni, generare elettricità, migliorare l'utilizzo della luce diurna e migliorare le prestazioni energetiche della facciata ottenendo riduzioni dei carichi di riscaldamento/raffreddamento (A. Orhon, 2016). Sarà presentata una rassegna di questa tipologia di sistemi di facciata, per discutere le attuali strategie e le ultime soluzioni proposte in letteratura.

INVOLUCRI ADATTIVI

Gli sviluppi nell'ingegneria informatica, nella cibernetica e nell'intelligenza artificiale hanno dato l'impulso all'adozione di nuovi modelli biologici per comprendere e potenziare il comportamento e la progettazione dei sistemi di facciata e il loro controllo. È emerso un lessico descrittivo che impiega una terminologia decisamente biologica nella concettualizzazione del progetto architettonico (Velikov and Geoffrey, 2012). Tra i primi gli autori Michael Wigginton e Jude Harris, nel loro libro "Intelligent Skins", guardano all'involucro come a una pelle, una membrana complessa in grado di scambiare energia, materiali e informazioni. Può essere progettato per funzionare "come parte di un meta-

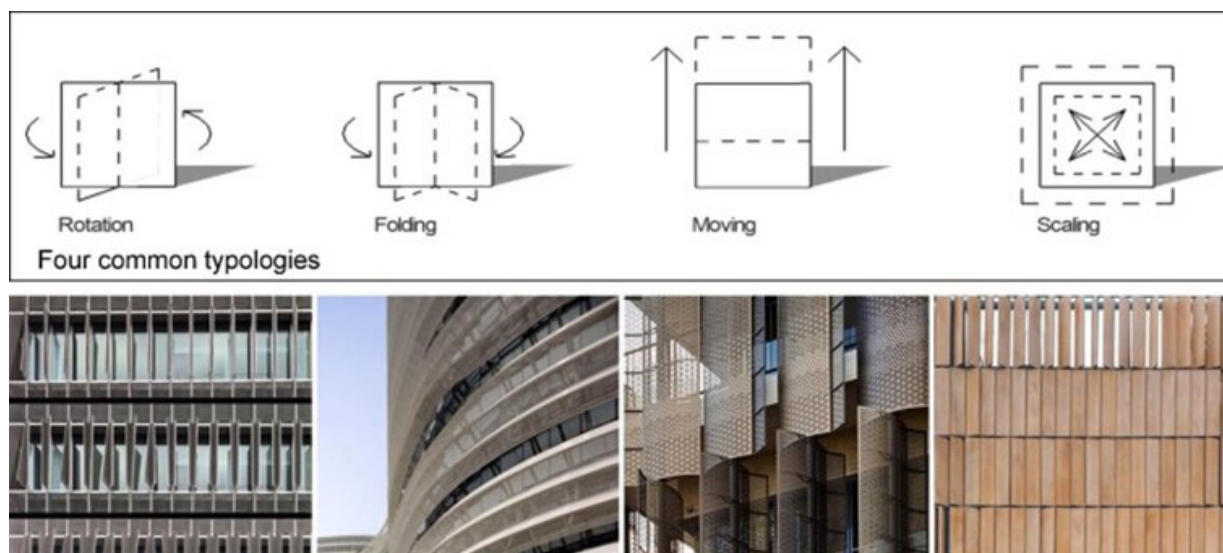


Fig. 2.1. Esempi di facciate adattive (Shi, Abel and Wang, 2020)

bolismo e morfologia dell'edilizia globale e sarà spesso collegato ad altre parti dell'edificio, inclusi sensori, attuatori e cavi di comando del sistema di gestione dell'edificio" (Wigginton and Harris, 2013). È possibile indicare molti esempi sull'integrazione dell'intelligenza artificiale e con la robotica dell'architettura già negli anni '60' del Novecento. Molte di queste idee infatti videro la luce per mano dei progettisti Gordon Pask, Warren Brody, Charles Eastman, Andrew Rabe-neck, Cedric Price, Nicholas Negroponte e John Frazer (Fox and Kemp, 2016).

Il termine *Intelligent* è in uso per gli edifici già a partire dagli anni '60 e '70, quando l'automazione applicata a sistemi di riscaldamento e condizionamento ha permesso di poter progettare zone programmabili con set-up differenti. Negli anni '90 l'evoluzione del calcolo computazionale ha tracciato la strada per nuovi progetti basati su componenti robotici.

L'affermazione di piattaforme open source su larga scala, come Arduino, ha fornito un ulteriore impulso nell'ultimo periodo (Rossi, Nagy and Schlueter, 2012) alla diffusione di progetti di *architettura cinetica*, architetture "caratterizzate da un elevato grado di flessibilità, intendendo per essa sia la flessibilità d'uso, afferente cioè al rapporto uomo/architettura, sia quella temporale, che invece insiste nell'interazione architettura/ambiente" (Musacchio, 2009). Contemporaneamente è stato avviato lo sviluppo di ambienti intelligenti, quale quello installato nella Neutral Network House dell'Università del Colorado. Questo immobile a destinazione edilizia scolastica, originariamente realizzato nel 1905, è stato oggetto di un profondo rinnovamento nel corso del 1992, durante il quale venne incorporata nell'edificio un'infrastruttura di gestione intelligente dell'energia denominata

ACHE, acronimo di *Adaptive Control of Home Environments*. Il sistema lavora sul monitoraggio continuo dell'ambiente, osservando le azioni degli occupanti (regolazione del termostato, accensione luci) e cerca di tradurre questi input in schemi di programmazione per gli ambienti interessati, con il duplice obiettivo di anticipare i bisogni degli abitanti e ottimizzare le risorse energetiche regolando, al momento dell'effettivo bisogno, illuminazione, riscaldamento e ombreggiatura (Mozer, 1998).

Successivamente, legato al termine *Skin*, il sostantivo *Intelligent* ha acquisito nuovi significati, in riferimento alle capacità dell'involucro di avere un ruolo attivo nel miglioramento delle condizioni di comfort e di consumo energetico, per mezzo di azioni prestabilite basate su un metodo predittivo (Velikov and Geoffrey, 2012). Questa definizione viene spesso utilizzata per una gamma variegata di prodotti, in cui la parte "intelligente" è costituita da un complesso gruppo automatizzato di lamelle, feritoie, attuatori, sensori, microcontrollori, etc. Il sistema deve avere la capacità di reagire alle condizioni ambientali o alle reazioni degli occupanti interpretandole. Sono quindi involucri capaci di conoscere le condizioni ambientali e interne per offrire una risposta immediata in termini di comfort (Shahin, 2019).

La progettazione delle *Intelligent Skin* si fonda peraltro sul concetto di *Interactive*, sebbene esso sia usato meno frequentemente per l'architettura e più spesso orientato alle installazioni artistiche che incoraggiano la partecipazione del pubblico. Un sistema di questo tipo è caratterizzato proprio dalla capacità di interagire con l'utente, ovvero esegue delle funzioni automatizzate a seguito di un comando impartito dall'uomo. Questa sottile differenza ha condotto alla classificazione di

progetti identificabili come “interattivi” nel gruppo di sistemi “intelligenti” (Velikov and Geoffrey, 2012).

L’adattività, l’interazione e i concetti collegati fanno affidamento sul cinematismo dei componenti del sistema di facciata per ottenere le regolazioni e il controllo dei flussi. Le tipologie di movimento in un sistema di facciata adattivo possono essere distinte in movimento semplice o complesso (Tabadkani et al., 2021). Il primo corrisponde a sistemi convenzionali con geometrie semplici come tende a rullo o veneziane, la cui adattabilità è limitata ai movimenti di traslazione o rotazione. Il movimento complesso consente l’adattabilità differenziata in diverse parti della facciata dispositivo ovvero la replica a griglia di corpi rigidi, unità di schermatura, attraverso un movimento controllato individuale che consentono di raggiungere configurazioni geometriche esteticamente attraenti, distinguibili a loro volta tre tipologie di adattamento: movimenti di base, strutture pieghevoli e pelli biomimetiche. I movimenti di base sono riferibili a sistemi di schermatura di tipo tradizionale, solitamente configurabili in componenti con moto rotatorio, di traslazione o combinazione di entrambi (Fig. 2.1).

I componenti pieghevoli hanno aperto la strada ad una nuova generazione di involucri adattivi innovativi, caratterizzati da trasformazioni tridimensionali, geometrie complesse e deformazioni reversibili. I dispositivi pieghevoli possono essere distinti in origami rigidi e piegatura a linee curve. I primi fanno uso di linee rette, denominate pieghe (di monte o di valle), che rappresentano le direzioni predefinite di movimento e agiscono quindi come cerniere, consentendo la contrazione o l’estensione del componente fino all’ottenimento di una configurazione predefinita senza allungare il materiale. A partire dalle tecniche di piegatura, sono

stati concepiti elementi con meccanismo di “piegatura a linee curve” o strutture flettenti, basate su deformazioni plastiche ed elastiche (Fig. 2.2). In questo caso la superficie dell’elemento viene flessa elasticamente per comportare un movimento di deformazione a cascata delle superficie adiacenti o per innestare la trasmissione di forze e momenti agenti (Schleicher et al., 2011).

I sistemi adattivi basati su movimento complesso possono in taluni casi essere caratterizzati da elementi meccanici particolarmente articolati che richiedono manutenzioni frequenti e possono spesso risultare soggetti a guasti, come dimostrato proprio nel caso del già citato Istitut du Monde Arabe di Jean Nouvel a Parigi (Velasco, Brakke and Tocancipà, 2013). A tal fine, molti gruppi di ricerca hanno lavorato sullo sviluppo di nuovi sistemi di attuazione basati sulle proprietà intrinseche dei materiali di ispirazione biologica, rispondendo in maniera dinamica agli stimoli esterni anche in taluni casi senza l’utilizzo di energia. Da questo tipo di studi sono stati sviluppati gli *Smart Materials*, materiali le cui proprietà possono essere notevolmente modificate attraverso stimoli esterni, quali cambi di temperatura, campi elettrici o magnetici e, possono subire mutamenti di forma e di dimensione, in genere reversibili. Sono quindi considerati intelligenti perché capaci reagire in maniera attiva conseguentemente ad una variazione di stato. All’interno di questa categoria rientrano i materiali igromorfici (HMs, *Hygromorphic Materials*), termo-bimetallici (TBs, *Thermo-Bimetals*), le leghe a memoria di forma (SMAs, *Shape Memory Alloys*) e i polimeri a memoria di forma (SMPs, *Shape Memory Polymers*).

I primi sono sensibili alla variazione del tasso di umidità e mutano comportamento e proprietà dipendentemente alla loro struttura e configurazione, ovvero

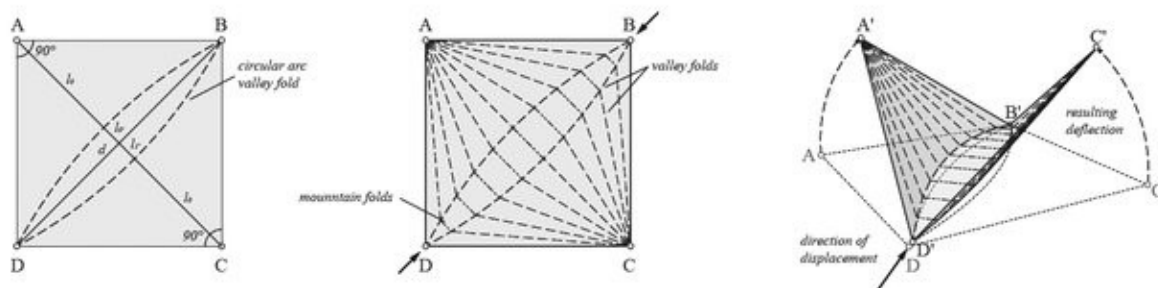


Fig. 2.2. Concept di configurazione cinematica per la piegatura su linee curve di un quadrato attraverso la suddivisione della superficie in due porzioni distinte: un centro a forma di lente e due lobi simmetrici con un bordo a forma di falce (Schleicher et al., 2011)

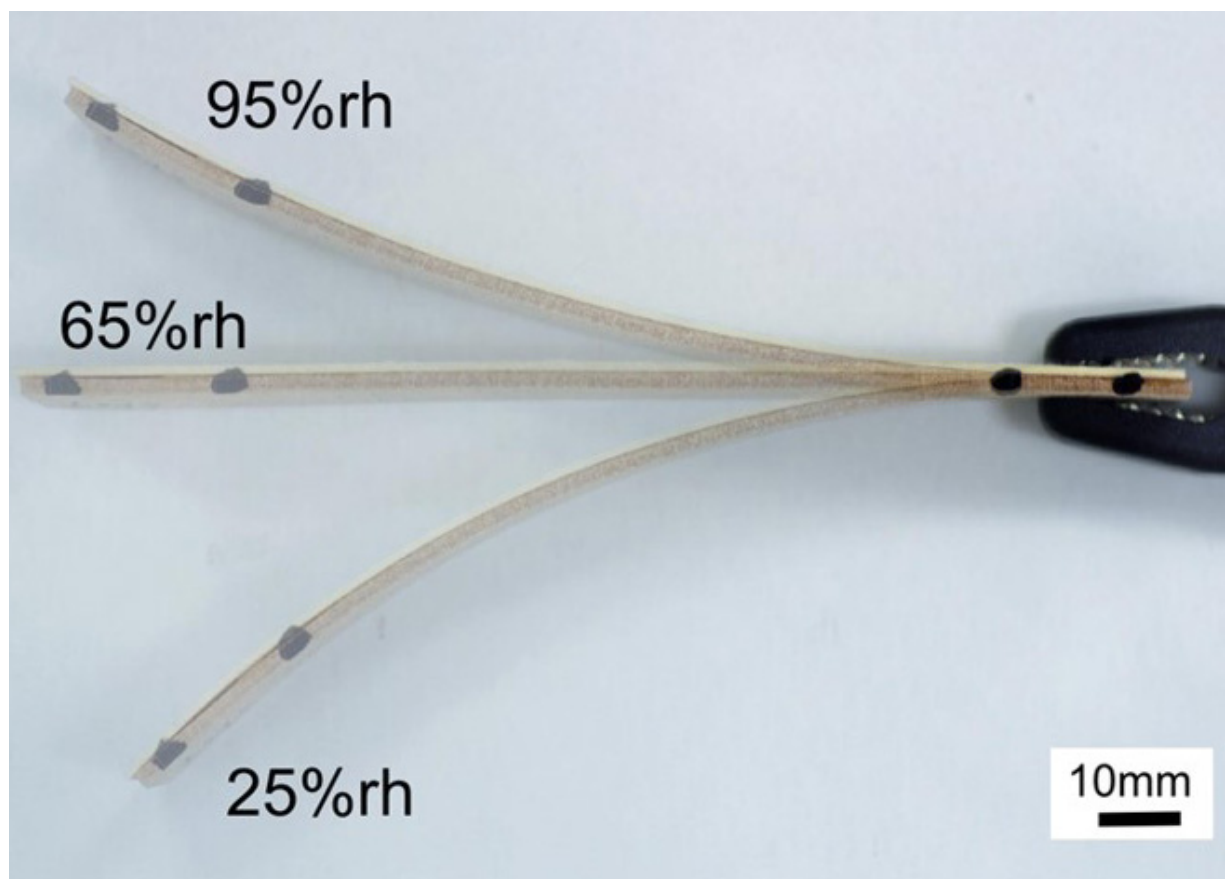


Fig. 2.3. Wooden solar trackers. ETH House of Natural Resources - Zurich (A. Orhon, 2016)

tipo di stratigrafia, numero di layer, orientamento delle fibre, oltre che dalle condizioni di produzione. I TBS nascono dall'accoppiamento di due metalli con differenti proprietà, condizione questa che consente al componente una variazione di inflessione e quindi di forma quando sottoposto ad un carico termico. Gli SMAs sono solitamente leghe ottenute da due metalli che se surriscaldati, acquisiscono una determinata forma, proprietà spesso legata al loro effetto superelastico. Gli SMPs invece assumono differenti configurazioni, passando da uno stato deformato ad uno stato a riposo, se sottoposti a carico termico o di tipo elettrico (Mazzucchelli et al., 2018).

Tra questi hanno assunto una notevole importanza quei compositi che riescono a variare la loro forma e struttura conseguentemente a stimoli di tipo termico (Harper Meng, 2013). Nonostante gli aspetti tecnologici delle facciate adattive, l'adattabilità degli organismi biologici è vista come la principale fonte di ispirazione tra le tipologie di adattamento esistenti (Tabadkani et al., 2021). Frei Otto fece di questo obiettivo la matrice delle sue sperimentazioni, ricercando continuamente principi costruttivi della natura che si potessero mutuare in architettura. La poetica della leggerezza che egli professava nasceva dalla convinzione che il progresso evolutivistico fosse conaturato negli organismi e come tale doveva essere nelle prospettive tec-

nologiche, idea che lo condusse all'analisi degli aspetti funzionali delle forme organiche (Drew, 1976).

Il potenziale dell'adattabilità degli elementi naturali è ampiamente utilizzato all'interno di un approccio biomimetico per tradurre concetti come la rotazione e la crescita delle piante dovute a specifici fattori ambientali nel contesto dell'edificio. Anche la trasformazione della pelle di un organo vivente derivanti dalla sua interazione con l'ambiente circostante sono spesso fonte d'ispirazione (Tabadkani et al., 2021). L'Institute for Building Material dell'ETH di Zurigo ha lavorato ad un innovativo sistema di tracciamento solare basato sull'uso di materiali igromorfici. Il Wooden Solar Tracker (Fig. 2.3) riesce a seguire il sole variando la propria forma, gonfiandosi e restringendosi con le variazioni di umidità dell'ambiente circostante (A. Orhon, 2016). L'azionamento del dispositivo è ottenuto quindi dalla differente igroscopicità dei due strati di legno che lo costituiscono, perché il legno si gonfia e si sgonfia quando l'umidità relativa varia, rendendolo autonomo in maniera semplice: l'umidità relativa è molto alta al mattino all'alba, diminuisce durante il giorno, raggiungendo di solito il minimo nel tardo pomeriggio e aumenta di nuovo durante la notte, e questo permette al sistema di tracciamento di assumere un'adeguata curvatura durante la giornata.

La tipologia di materiale legata al cinematismo comporta ulteriori distinzioni sulle strategie per concepire l'attivazione del sistema adattivo di facciata. Nel caso di componenti con tipo di movimento di base, per esempio rotatorio o traslatorio, si parla di strategie *passive*, in quanto il loro cinematismo è basato su attuatori meccanici che richiedono oltre all'input anche l'uso di energia per potersi attivare. Nel caso degli *smart materials* invece si può parlare di strategie attive, poichè i componenti caratterizzanti l'involucro non richiedono alimentazione elettrica iniziale per reagire dinamicamente, in quanto la capacità di modificarsi autonomamente è intrinseca.

I *Responsive Façade System* rappresentano il connubio e l'evoluzione dei casi finora presentati, in quanto al rilevamento in tempo reale per adattarsi alle condizioni atmosferiche o adeguarsi predefiniti valori di comfort indoor, aggiungono la capacità di poter interagire con gli occupanti e apprendere dai comandi degli stessi nel tempo. Infatti, gli algoritmi di cui sono dotati permettono al sistema di assimilare il comportamento tipico degli utenti e imparare attraverso gli input forniti. Quindi il sistema in breve sarà in grado di fornire dati e adeguare le componenti dell'edificio a nuove configurazioni dettati dalla interazione con gli utenti e con l'ambiente (Shahin, 2019).

Secondo quanto affermava Nicholas Negroponte già nel '76, in riferimento all'architettura responsiva:

“The manipulative environment is a passive one, one that is moved as opposed to one that moves. In contrast, responsive ... means the environment is taking an active role, initiating to a greater or lesser degree changes as a result and function of complex or simple computations ... maybe a house is not a home until it can learn to laugh at your jokes.” (Nicholas, 1976)

In questo nuovo approccio progettuale le azioni del sistema quindi più che essere esclusivamente pre-determinate dal progettista, variano continuamente misurando le reazioni dell'utente alle proprie risposte. Come chiarito da (Velikov and Geoffrey, 2012), un involucro responsivo può includere parallelamente funzionalità e prestazioni di un complesso “intelligente” con rilevamento in tempo reale, elementi cinetici adattivi al clima, materiali intelligenti, automazione e capacità di esclusione dell'utente, ma anche caratteristiche interattive, cioè la possibilità per gli occupanti di manipolare fisicamente elementi dell'involucro edilizio per controllare le condizioni ambientali, oltre ad algoritmi computazionali che consentono al sistema edilizio di autoregolarsi e apprendere nel tempo.

L'analisi del quadro evolutivo delle soluzioni progettuali proposte in letteratura, basate spesso su con-

figurazioni ibride e sperimentazioni progettuali non facilmente identificabili in modo univoco, dimostra però come le facciate si siano via via sviluppate in tipologie sempre più complesse, condizione che richiede una categorizzazione più dettagliata rispetto a quanto presentato fino ad adesso. Spesso i termini *smart, intelligent, interactive, responsive*, vengono talvolta usati come sinonimi, con conseguente difetto di chiarezza nel significato e nell'individuazione delle soluzioni (Velikov and Geoffrey, 2012). Lo stato dell'arte è ricco di esempi di architettura adattiva, tale da permettere l'individuazione di numerose realizzazioni che riguardano il campo di ricerca descritto.

Per questo motivo, partendo dalla natura del sistema adattivo e dai criteri di controllo tecnologico che le definiscono, possono essere individuate dieci diverse tipologie di facciate adattive (Tabadkani et al., 2021). La classificazione consente al tempo stesso di delineare una linea evolutiva dai sistemi di ombreggiamento statici tradizionali a sistemi di facciata hi-tech estremamente performanti (Tab. 3.1).

1. *Facciate attive* – Prevedono l'integrazione di sistemi tecnologici attivi senza apporto dell'elettronica che consentono all'involucro di autoregolarsi utilizzando parametri interni ed esterni per migliorare il risparmio energetico senza interazioni dell'utente, senza necessariamente lo scopo di controllare le condizioni di comfort interne. Un esempio in tal senso è fornito dalla facciata del ICT-MEDIA Building a Barcelona (Fig. 2.4), progettata da Enric Ruiz Geli e Cloud 9. L'involucro dell'edificio è composto da un sistema di cuscini in ETFE polimerico che funzionano come camere d'aria attivate da sensori di luminosità. Questa struttura permette ai singoli moduli di regolare la penetrazione della luce solare e del calore attraverso il loro gonfiaggio o sgonfiaggio. La configurazione, denominata “ETFE Diagramm”, consta dell'adozione di tre strati di ETFE, di cui il primo trasparente, mentre il secondo e il terzo dotati di trama inversa che in base al livello di gonfiaggio regola il flusso solare che li attraversa e di conseguenza la trasmissione di luce negli ambienti interni.

2. *Facciate passive* – Si basano su soluzioni progettuali architettoniche passive per rispondere alle variazioni climatiche, quali ad esempio protezioni dagli agenti atmosferici per migliorare le condizioni generali di comfort interno. Rientrano in questo gruppo le doppie pelli, i muri di trombe e facciate ventilate opache. Essendo frutto di un “design passivo”, le loro proprietà termofisiche sono funzione di meccanismi operativi manuali, come l'orario di apertura delle finestre.

3. *Facciate biomimetiche* – Sono per lo più applicabili utilizzando specifiche intrinseche dei materiali, in



Fig. 2.4. Media-ICT building, Barcelona. (Shahin, 2019)

quali sono limitati a rispondere alle condizioni ambientali entro determinate soglie piuttosto che alle condizioni dell'ambiente interno o alle interazioni dell'utente. Imitano il comportamento delle piante o della pelle dell'uomo. In contrasto quindi con la sovrapposizione di apparecchiature ad alta tecnologia su materiale altrimenti inerte, l'Hygro-Skin Pavilion (Fig. 2.5) realizzato a Parigi da Achim Menges Architect + Oliver David Krieg + Steffen Reichert impiega strategie di progettazione ispirate ai sistemi dinamici della

natura per programmare fisicamente un sistema materiale reattivo che non richiede né controlli meccanici o elettronici estranei, né la fornitura di energia esterna. La capacità di risposta è legata al comportamento igroscopico del materiale e alle sue caratteristiche anisotrope. L'involucro del padiglione, che è allo stesso tempo struttura portante e pelle metereosensibile, è derivato computazionalmente dal comportamento elastico a flessione di sottili fogli di compensato. Le aperture rispondono quindi alle variazioni di umidità

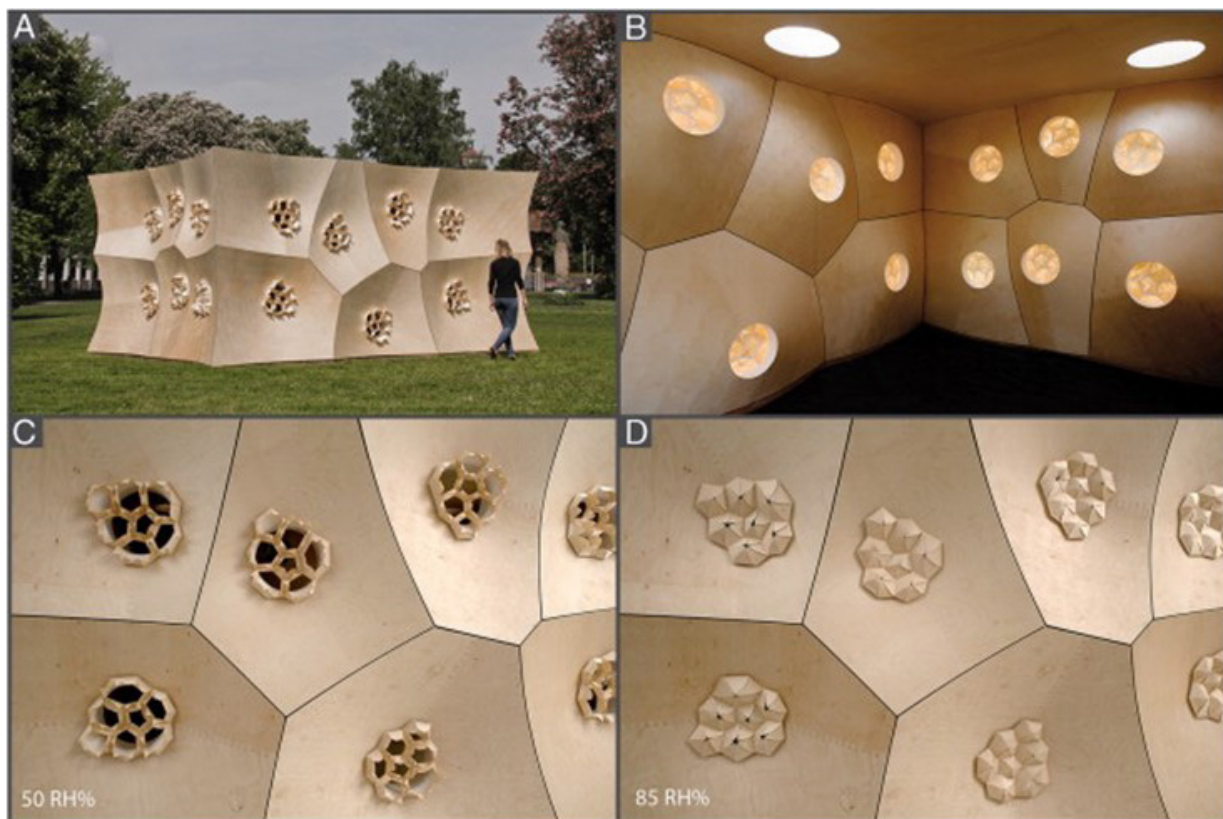
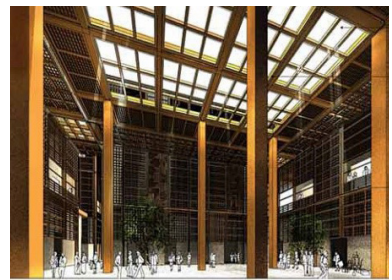
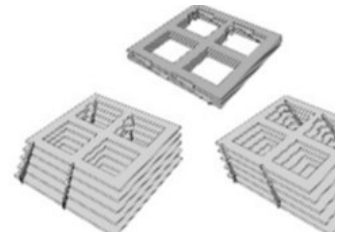
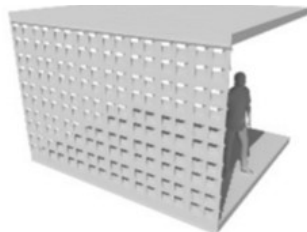


Fig. 2.5. Hygro-Skin Pavilion, Parigi. (Reichert, Menges and Correa Zuluaga, 2014)



Fig. 2.6. Aldar Central Market, Abu Dhabi (Velasco, Brakke and Chavarro, 2015)



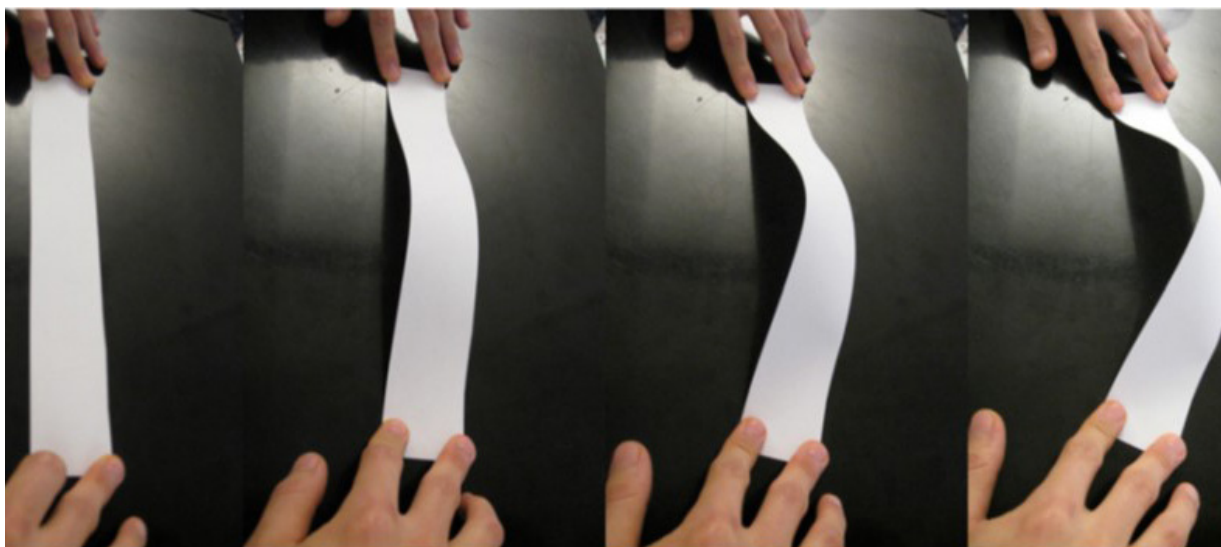


Fig. 2.7. Cinematismo delle lamelle della facciata Thematic Pavilion EXPO 2012 (Velasco, Brakke and Chavarro, 2015)

relativa in un intervallo dal 30% al 90%, equivalente all'intervallo di umidità che va da clima soleggiato e secco a piovoso e umido in zone temperate. In diretto riscontro con il microclima locale il padiglione regola costantemente il proprio grado di apertura e porosità, modulando la trasmissione luminosa e la permeabilità visiva dell'involucro (Reichert, Menges and Correa Zuluaga, 2014).

4. *Facciate cinetiche* – Sono definibili come complessi sistemi meccanici la cui variabilità e mobilità è garantita da un determinato movimento come lo spostamento, lo scorrimento, l'espansione, la piegatura o la trasformazione. Solitamente in letteratura sono riconosciute come complessi retrattili, dinamici e trasformabili, legati ad un'efficiente adattabilità alle condizioni di contorno piuttosto che a quelle indoor. Il Chuck Hoberman Associates per l'Aldar Central Market (Fig. 2.6) nel 2014 ha ideato e brevettato un particolare sistema di schermatura cinetica denominato Sistema Permea™, che può essere classificato tra le soluzioni "In Plane Translation" (pannelli scorrevoli). La novità rispetto a sistemi simili sta nell'elevato rapporto di apertura, ottenuto grazie alla sovrapposizione di sette moduli interconnessi meccanicamente, condizione che influisce però nell'elevato spessore del gruppo di moduli e limita in parte la flessibilità. Questo sistema adattivo che caratterizza la copertura è stato ottenuto integrando unità quadrate di estrusioni in alluminio anodizzato utilizzabili che possono espandersi all'interno di una struttura a griglia per limitare la luce solare e il vento. In alternativa, quando gli elementi si ritraggono, scompaiono all'interno della struttura, aprendo il tetto alla luce solare e alle brezze. Quando si trovano in varie fasi di chiuso o aperto, le casse creano un gioco di ombre e luci simile a una matrice a

motivi islamici (Velasco, Brakke and Chavarro, 2015). Per il padiglione Thematic Pavilion EXPO 2012, lo studio Soma Architects ha progettato una facciata cinetica con 108 alette controllabili individualmente. La tecnologia del sistema di ombreggiamento chiamato Flecto-fin, si ispira alla ricerca di movimento delle piante e si basa sull'uso di lamelle in plastica rinforzata con fibra di vetro, che offre un'elevata resistenza alla trazione unita a una bassa rigidità alla flessione, consentendo grandi deformazioni elastiche leggermente curve (Knippers and Speck, 2012). Queste sono supportate da due angoli a cerniera nella parte superiore e inferiore, mentre negli altri due angoli, una piccola forza di compressione viene applicata sul piano della pinna, il che porta a una deformazione controllata (Fig. 2.7). Questo tipo di cinematismo, essendo caratterizzato da una meccanica abbastanza semplice, per lo stesso motivo sembra offrire robustezza dal lato dell'attuatore e può offrire vantaggi per lo sviluppo di componenti di grandi dimensioni.

5. *Facciate intelligenti* – Sono dotate di funzioni iniziali di percezione, logica e azione, hanno la capacità di apprendere e rispondere in tempo. Esse combinano il controllo automatico e l'interazione degli occupanti come strategie di controllo per reagire dinamicamente a partire dalle condizioni outdoor sulla base di modelli predittivi con un intervento minimo da parte dell'utente. Ciò è possibile solitamente incorporando l'automazione negli edifici, compresi i protocolli di calcolo per il sistema HVAC e l'involucro, attuatori e dispositivi adattivi fisici come schermature, tende o materiali intelligenti che forniscono variabilità nell'involucro dell'edificio per mantenere il comfort interno desiderato. L'involucro schermante delle Al Bahar Towers di Abu Dhabi, per esempio, è stato concepito come una



Fig. 2.8. Al Bahar Towers, Abu Dhabi (Shahin, 2019)

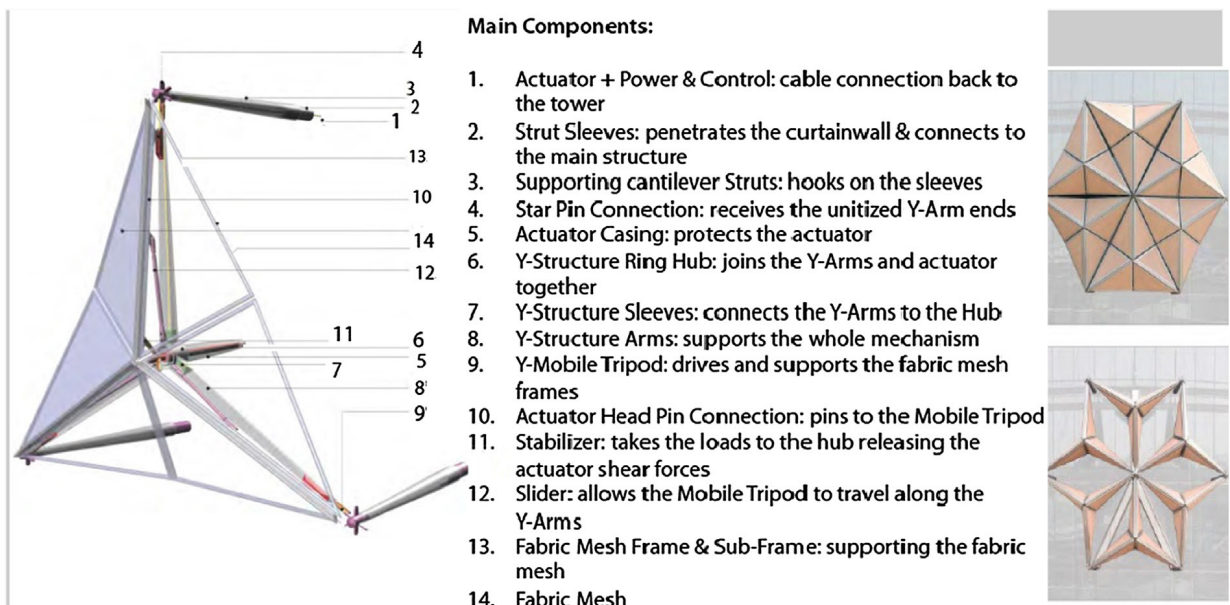




Fig. 2.9. Adaptive Cellular Automata Facade. (Skavara, 2009)

doppia pelle continua installata a 2 metri dalla facciata vetrata con un proprio telaio aggiuntivo (Fig. 2.8). I componenti che la caratterizzano sono moduli composti da triangoli comandati da un sistema di gestione centrale al fine di ottimizzare il guadagno solare e limitare il bagliore nel corso della giornata. In ciascuna torre sono installati oltre 1000 dispositivi ombreggianti, unità in pannelli in PTFE apribili con un movimento di piegatura ad ombrello, secondo una sequenza programmata e controllata attraverso i segnali di sensori che modificano le configurazioni in base alle variazioni climatiche, esempio in presenza di nuvole o venti forti. È interessante analizzare inoltre il concept Adaptive Cellular Automata Facade Trained by Artificial Neural Networks, un sistema di facciata adattiva basato su un complesso di automi cellulari (Fig. 2.9). Il sistema, concepito come una facciata intelligente, è costituito da pannelli indipendenti romboidali e cerca di risolvere il problema della risposta alla continua variazione del sole durante l'anno attraverso la generazione per algoritmi di modelli nuovi ottenuti dalle medie dei dati acquisiti nel tempo. I pannelli sono collegati ad un sistema di controllo centrale che acquisisce continuamente i stati di sensori di luminosità installati sulla copertura dell'edificio e traduce in nuove configurazioni di apertura (Skavara, 2009).

6. *Facciate interattive* - Integrano elementi tecnologici come sensori, microprocessori o sistemi di gestione automatizzata dell'edificio in combinazione con l'in-

put umano per avviare una risposta; tuttavia, questi tipi di facciata presentano aspetti adattivi dell'edificio, ma non contengono capacità di influenzare il comfort interno.

7. *Facciate mobili* - Includono sistemi tecnologici con la capacità di adattarsi rapidamente alle condizioni ambientali e alla posizione attraverso componenti dinamici, come il rilevamento della posizione del sole per generare energia da fonti rinnovabili. Pertanto, il controllo dell'ambiente interno o il comfort dell'utente non possono essere annoverati come obiettivi di questa tipologia. Esistono diversi esempi basati sull'integrazione del fotovoltaico sulla facciata. Uno delle prime sperimentazioni in questa direzione è stata il sistema adattivo della copertura della Riverhouse al One Rockefeller Park di New York (Fig. 2.10). La terrazza di questo edificio residenziale rappresenta anche uno dei primi esempi di fotovoltaico adattivo applicato agli edifici. Il sistema ad inseguimento solare passivo che incorona l'edificio è costituito da pannelli fotovoltaici disposti come lamelle verticali od orizzontali, in base all'orientamento del prospetto. Ogni pannello è capace di ruotare attorno ad un asse entro un intervallo di 90° , grazie ad attuatori collegati al sistema controllo motorizzato, che consente nel complesso di ottenere un aumento stimato del 20% dell'efficienza rispetto a una soluzione equivalente con fotovoltaico fisso. Anche per la Seine Musicale di Parigi, progettata da Shigeru Ban Architects Europe + Jean de Gastines Architectes (Fig. 2.11), è stata pensata una facciata di tipo mobile per ottimizzare la produzione di energia proveniente dai pannelli fotovoltaici che la caratterizzano (Al-Qaryouti, Baber and Gattas, 2019; Di Salvo, 2020). L'edificio si presenta come un guscio di vetro e legno avvolto da una grande vela ricoperta di pannelli fotovoltaici sostenuta da una struttura reticolata in legno, che riesce a creare un microclima protetto pieno di luce e permette di regolare l'accumulo termico. Per massimizzare il guadagno di luce solare, la rotazione della vela fotovoltaica è automatizzata per funzionare con la rotazione del sole, effettuando brevi spostamenti ogni 15 minuti.

8. *Facciate responsive* - Sono in grado di interagire e di adattarsi alle esigenze degli utenti. Una facciata responsiva ha funzioni e caratteristiche prestazionali simili ad una "facciata intelligente", compresa la percezione in tempo reale, i materiali intelligenti, componenti cinetici, automazione degli edifici e operazioni orientate all'utente, ma è anche una facciata interattiva in quanto è in grado di apprendere e adeguarsi progressivamente attraverso una fase di autoapprendimento che coinvolge pure gli occupanti. Solitamente

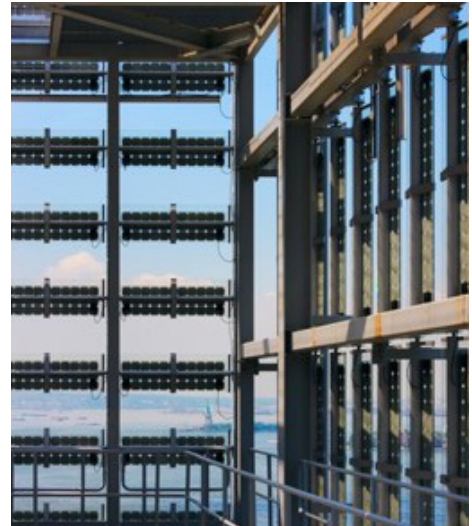


Fig. 2.10. Riverhouse, New York (A. Orhon, 2016)



Fig. 2.11. Seine Musicale, Parigi (Di Salvo, 2020)



Fig. 2.12. Kiefer Technic Showroom, Bad Gleichenberg (Fouad, 2012)



Fig. 2.13. Soft House, Amburgo (Kuipers and Engineering, 2015)

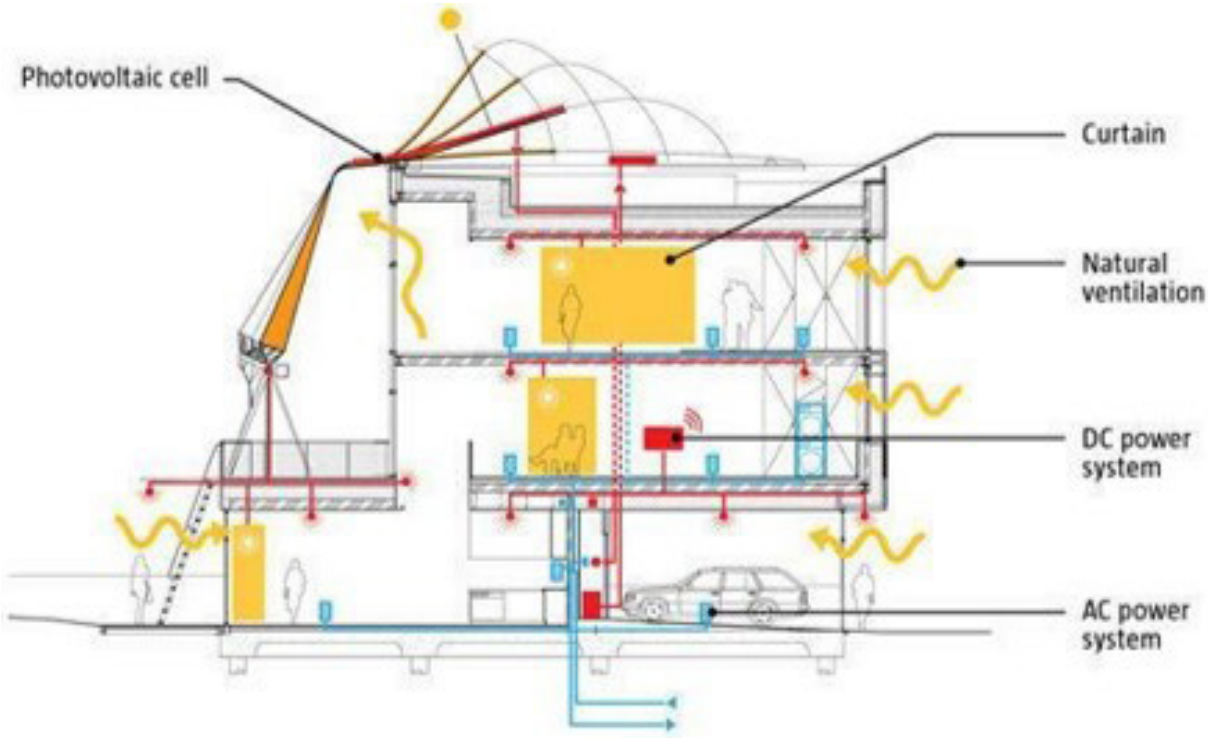




Fig. 2.14. Smart Thermobimetal Self-Ventilating Skin. Deformazioni dei fogli laminati all'aumentare della temperatura, con espansioni differenti (Velikov and Geoffrey, 2012)

sono caratterizzate da sensori, attuatori e dispositivi di controllo che consentono modifiche alla configurazione della facciata in base alle prestazioni programmate, mentre la differenza principale è la capacità di prendere le interazioni dell'utente. Nel caso dello "Kiefer Technic Showroom" progettato da Ernst Giselbrecht e partner, la cinetica è eseguita da traslazioni verticali con un effetto di scala risultante da un giunto pieghevole (Fouad, 2012; Pesenti et al., 2015). L'edificio a conchiglia è caratterizzato da un involucro schermante in montanti e traversi in alluminio che reggono pannelli di alluminio traforato richiudibili a libro orizzontalmente. Il cinematismo di questo sistema è totalmente automatizzato e permette di poter regolare il flusso luminoso all'interno per l'ottimizzazione del clima interno o, attraverso il comando degli utenti, di controllare il livello di illuminazione (Fig. 2.12). Il "sistema solare tessile" della Soft House ad Amburgo, progettata dallo studio Kennedy & Violich Ar-

chitecture, è caratterizzato da un innovativo gruppo di tende intelligenti e dinamiche, realizzate in fasce di tessuto semi-trasparente e altamente riflettente in PTFE, con sovrapposte otto strisce di fotovoltaico in film sottile (Fig. 2.13). La facciata dinamica capace di seguire il percorso solare, grazie al sistema cinetico integrato nei due attacchi strutturali di cui è dotata ogni tenda, che ne permette la rotazione rispetto ad un asse centrale. I singoli teli di facciata, si comportano come elementi schermanti, tali da regolare il flusso luminoso negli ambienti interni durante l'anno (Premier and Brustolon, 2014; Nagy et al., 2016). La configurazione delle strisce viene gestita da un sistema di Building Management System (BMS) secondo l'angolo di incidenza del sole. Il livello di ombreggiamento può inoltre essere controllato manualmente dagli utenti. La parte del sistema installata in copertura è stata progettata per potersi piegare in condizioni di forte pioggia, in modo da limitare danni al tessuto.

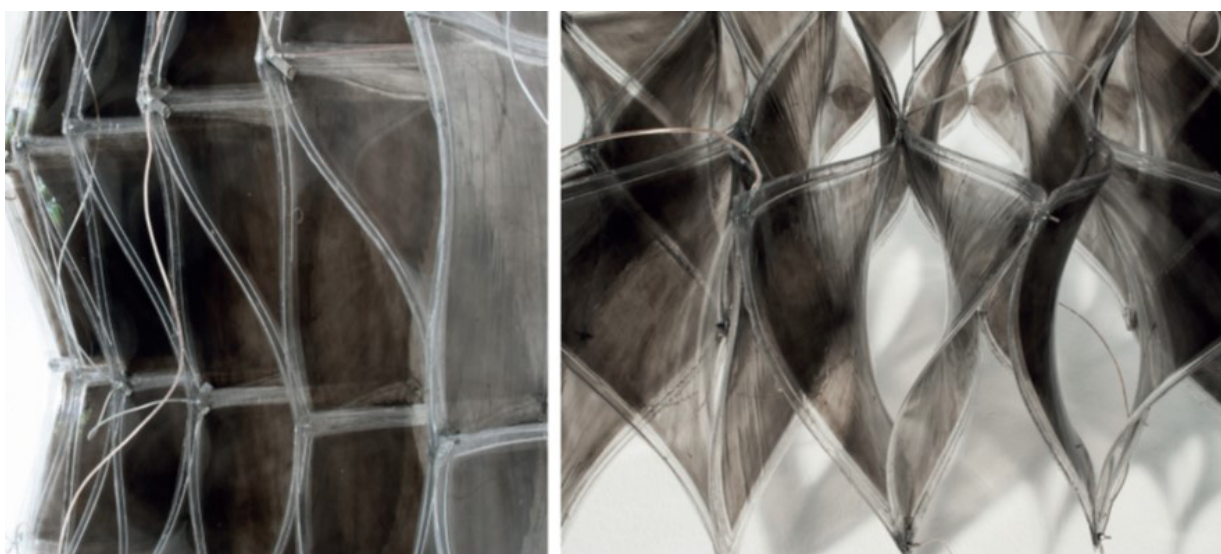


Fig. 2.15. Spaceshift Electroactive Polymer Façade. Deformazioni dei pannelli caricati elettricamente (Velikov and Geoffrey, 2012)

| FAÇADE TYPE | REQUIREMENT(S) | LIMITATION | POTENTIAL | USER INTE- RACTION | UPGRADED VERSION |
|--------------------------|---|---|---|-----------------------|--|
| ACTIVE | active technologies without sophisticated electronics | controlling indoor environment is not the aim | self-adjustment of façade that can be controlled by internal and external environment | No | - |
| PASSIVE | passive design | a passive design makes it an adaptive façade | weather-protective layer that can improve indoor comfort condition | No | Intelligent façade |
| BIOMIMETIC | mimicking natural inspirations | only responds to outdoor environmental condition and certain thresholds | uses biomimetic principles of nature with least energy involvement | No | - |
| KINETIC | complex mechanical or electro-mechanical mechanisms | corresponds only to outdoor environment requires | allows a wide range of possible motions | No | Responsive façade |
| INTELLIGENT | Integrating automated and manual controlling through intelligent components | requires sensors, actuators and controllers to control indoor environment and computational technology to predict | has the ability to learn and respond over time either by learning facilities or real-time controllers | Yes | Responsive façade |
| INTERACTIVE/MEDIA | sensors, actuators and controllers in combination with direct human interventions | do not influence indoor comfort | responds in real-time by human-based signals | Yes | - |
| MOVABLE | mobile systems in façade scale to quickly respond to climatic changes | user comfort is not the aim | has the ability to produce energy | No | Kinetic façade |
| RESPONSIVE | sensors, actuators and controllers to control indoor environment | need an act to response | allows real-time environmental perception and user-oriented operations | Yes | - |
| SMART | smart materials for intrinsic control | limited to materials with specific physical properties that are time-dependent | no need for external energy to generate movements | No | Intelligent façade Responsive façade Switchable façade |
| SWITCHABLE | adaptive materials for intrinsic control | limited to transparent components with specific physical properties | can be controllable either actively by users or passively by outdoor environmental condition | Yes | - |

Tab. 2.1. Quadro riassuntivo delle caratteristiche delle principali tipologie di facciate adattive (Tabadkani et al., 2021)

9. *Facciate smart* - Sono costituite da sistemi contenente funzioni tecnologiche incorporate che coinvolgono determinate variazioni ambientali e operano sia modificando le proprietà fisiche interne che gli scambi esterni. Possono svolgere un ruolo significativo nella combinazione con altri tipi di facciate come le facciate responsive o intelligenti a causa delle loro impostazioni intrinseche. Queste risposte possono essere classificate in diverse caratteristiche: immediatezza (risposta a breve termine), transitorietà (reattiva a diversi stati ambientali), auto-attivazione (controllo intrinseco), selettività (risposta prevedibile, istantaneità (risposta locale), assenza di alimentazione eterna come Phase Change Materials (PCM), Building Integrated Photovoltaics (BIPV), aerogel o polimeri termocromici. Doris Kim Sung e il suo gruppo di ricerca della University of Southern California lavorano all'uso di termo-bimetalli per creare pelli di edifici autoportanti in grado di aprire i pori per autoventilarsi senza l'uso di fonti di energia esterne. La Smart Thermobimetal Self-Ventilating Skin (Fig. 2.14) è stata sviluppata attraverso l'adozione di un bimetallo ideale denominato TM2, costituito da un materiale a bassa espansione. Si tratta di una lega di ferro al 64% e nichel al 36% con carbonio e cromo e un materiale ad alta espansione ottenuto da una lega di nichel manganese composta al 72% da manganese, 18% rame e 10% nichel. Reso resistente alla corrosione mediante placcatura con cromo e rame, questo componente possiede di deflessione variabile a seconda delle dimensioni del foglio, della temperatura dell'aria, della posizione di serraggio e dello spessore del materiale (Sung, 2011). L'uso di polimeri elettroattivi (EAP) per le pelli cinetiche ha interessato l'ETH di Zurigo per lo sviluppo di un prototipo di facciata adattiva chiamata Spaceshift Electroactive Polymer Façade, un'unità stratificata autoportante in film elastomerico che si deforma quando caricata elettricamente (Fig. 2.15). I componenti di ciascun pannello sono costituiti da tre strati, di cui uno al centro ad elevata deformabilità in film acrilico precompresso verniciato con polvere conduttiva su entrambi i lati. Lo stimolo elettrico fa sì che l'energia venga trasmessa in tutto lo strato precompresso interno, il materiale tende ad espandersi per trovare una forma piatta, altrimenti rimane nella sua forma precompressa a doppia curvatura. Rispetto ad altre soluzioni basate su Smart Materials, questa soluzione è caratterizzata da un'elevata capacità di risposta unita ad un'elevata capacità di controllo sul componente (Velasco, Brakke and Chavarro, 2015).

10. *Facciate commutabili* - Sono limitate all'integrazione di componenti trasparenti in grado di regolare i flussi di energia e luce sfruttando i vantaggi dei materiali adattivi. Questa regolazione può essere controllabile (attiva) in risposta all'automazione degli edifici e

agli ingressi degli occupanti, oppure non controllabile (passiva) in risposta agli ingressi dell'ambiente locale. Un tipico esempio di tali facciate sono i sistemi di vetratura elettrocromica o termocromica che possono essere commutabili avanti e indietro tra stati trasparenti e opachi utilizzando materiali intelligenti come il PCM.

FACCIADE ADATTIVE FOTOVOLTAICHE

Le facciate adattive solitamente per il proprio funzionamento necessitano di energia, risulta quindi vantaggioso incorporare in uno degli elementi che le compongono celle fotovoltaiche o altre fonti di energia rinnovabile per coprire il fabbisogno. I dispositivi di schermatura sono uno dei componenti dell'involucro edilizio adatti all'integrazione di sistemi di energia rinnovabile (Fiorito et al., 2016). L'utilizzo di sistemi fotovoltaici adattivi per l'ombreggiamento può migliorare le prestazioni energetiche dell'edificio controllando i guadagni di calore solare e l'illuminazione naturale, generando contemporaneamente elettricità in loco (Jayathissa et al., 2017). La moderna tecnologia fotovoltaica trasforma gli edifici da utilizzatori di energia a produttori di energia, poiché si è fusa con la scienza e la tecnologia del fotovoltaico dando vita al cosiddetto Building Integrated Photovoltaics (BIPV) (Pagliaro, Ciriminna and Palmisano, 2010). Con questo termine viene definito il sistema architettonico, strutturale ed estetico integrazione del fotovoltaico negli edifici, che consente l'incorporazione della generazione di energia nelle strutture quotidiane come case, scuole, uffici, ospedali e tutti i tipi di edifici. I moduli fotovoltaici vengono concepiti come veri e propri elementi costruttivi che fungono strutturalmente da esterni di edifici, come parte dell'involucro, fornendo allo stesso tempo protezione, valorizzazione estetica e generazione di energia elettrica.

Contrariamente al tradizionale sistema fotovoltaico negli edifici, che consiste nell'installazione additiva di un impianto fotovoltaico su un involucro edilizio già finito, dal nome Building Adopted Photovoltaics (BAPV), il BIPV è inteso come un componente integrale dell'edificio: i moduli che producono elettricità sono sia un'unità funzionale dell'edificio finito, ma anche un elemento costruttivo della pelle dell'edificio, poiché sostituiscono i materiali convenzionali. Questo approccio definisce il fotovoltaico come un componente architettonicamente rilevante, come un'unità attiva di produzione di energia che conferisce inoltre un valore estetico all'intera costruzione. Ciò riguarda le nuove costruzioni, così come il segmento del retrofit economicamente significativo o della ristrutturazione (Heinstein, Ballif and Perret-Aebi, 2013).

Oggi le tecniche di BIPV sono sempre più utilizzate, malgrado la presenza del sistema fotovoltaico in facciata rappresenti l'alternativa meno efficace rispetto ad altre parti dell'involucro come il tetto, dovuta alla differenza di irraggiamento tra superfici orizzontali e verticali. Al fine di migliorare le prestazioni di questi sistemi ritorna utile l'adozione di approcci adattivi e quindi legati ad un "intelligenza" dei componenti dell'involucro. Questo connubio permette infatti di poter adattare il fotovoltaico alle condizioni solari attraverso meccanismi di localizzazione solare, combinando i vantaggi del monitoraggio solare integrato finalizzato alla produzione di energia con l'ombreggiatura adattiva, ottenendo così considerevoli riduzioni dei carichi termici (A. Orhon, 2016). Il conseguimento di questo obiettivo ha condotto allo sviluppo di interessanti soluzioni nella letteratura scientifica che hanno segnato l'inizio di un percorso interessante. Un esempio è la casa sperimentale della Technische Universität Darmstadt realizzata per il Concorso Solar Decathlon degli Stati Uniti del 2007 (Fig. 2.16) che incorpora un rivestimento esterno costituito da feritoie di legno con pannelli fotovoltaici integrati controllate da un sistema intelligente, permettendo la produzione di energia al contempo la protezione dell'interno della casa da eccessivo soleggiamento (Velikov and Geoffrey, 2012).

Il sistema Adaptive Solar Skin nasce invece come un sistema di facciata autoportante per edifici esistenti, una doppia pelle costituita da file di pannelli fotovoltaici orientabili e collegati ad un singolo driver meccanico programmato per l'inseguimento della luce solare diurna. Il cinematismo delle singole file di pannelli consente di raggiungere un tasso di efficienza maggiore del 40% rispetto a soluzioni fisse (Fig. 2.17) (A. Orhon, 2016).

L'ETH di Zurigo nella costante ricerca di soluzioni per involucri adattivi, ha messo a punto un sistema denominato ASF, Adaptive Solar Facade, una facciata modulare con sistema fotovoltaico integrato realizzata con moduli indirizzabili individualmente (Fig. 2.18). In questo caso, modulo base consiste in un pannello di schermatura dinamico e multifunzionale con due gradi di libertà, costituito da un substrato di alluminio spesso 0,8 mm per il modulo fotovoltaico a film sottile, a cui è installato un gruppo attuatore soft-pneumatico che lo connette al telaio di supporto dell'intera facciata e la rete dei cavi. Ciascun modulo ha un peso totale di 800 g (Nagy et al., 2016). Il gruppo di elementi granulari di facciata così concepito fornisce ombreggiatura, produzione di elettricità e distribuzione della luce diurna. Ogni modulo può agire in modo autonomo grazie a sensori di luce, ma può anche essere raggruppato

in piccoli gruppi e comandato da un sistema di gestione centrale (Fig. 2.19).

Presso il Center for Architecture Science and Ecology, struttura di ricerca interna al Rensselaer Polytechnic Institute di New York, è stato studiato un sistema di facciata responsiva basata su collettori a concentrazione solare denominata Integrated Concentrating Solar Facade (ICSF). I singoli moduli sospesi in vetro a forma di piramide sono in grado di catturare l'85% della luce solare muovendosi attorno ad un perno, con rotazione attorno all'asse orizzontale e verticale, al fine proprio di rispondere al percorso del sole e massimizzare guadagno di luce (Novelli, Shultz and Dyson, 2015). La struttura del vetro piramidale è particolarmente complessa, perché caratterizzata da un elemento ottico primario (POE) un elemento ottico secondario (SOE), una cella fotovoltaica concentratore ad alta efficienza (CPV) e uno scambiatore di calore a blocchi d'acqua (HX). Grazie alla sua flessibilità, il sistema non si presta solo alla costruzione di facciate ma anche alla realizzazione di sistemi di schermatura orizzontale (Fig. 2.20).

I casi precedenti consentono di individuare nel cinematismo di elementi modulari il vero punto debole di soluzioni di facciata adattive e responsive. Infatti l'esigenza di demandare ai singoli componenti più movimenti e/o funzioni spesso comporta l'adozione di sistemi di attuazione particolarmente complessi, dai quali possono derivare problematiche legate alla manutenzione e all'affidabilità degli stessi (Attia et al., 2018). Per questo motivo alcuni gruppi di ricerca si sono mossi in una direzione opposta, guardando all'adozione di smart materials, ovvero materiali dotati di una o più proprietà che possono essere modificate attraverso degli stimoli esterni. L'Adaptive BIPV Facade (Fig. 2.21) adotta particolari lamelle in grado di cambiare la propria curvatura in relazione alle condizioni ambientali esterne. Nello specifico la facciata risulta caratterizzata da celle solari a film sottile accoppiate ad un sottile strato di materiale igromorfo, prodotto con due doghe di legno ottenute da diversi tipi di legno e unite insieme. Il differente coefficiente di espansione dei due legni consente di modificare la forma della lamella in funzione della temperatura e dell'umidità relativa esterna (Mazzucchelli et al., 2018).



Fig. 2.16. Technische Universität Darmstadt's TU Darmstadt's 2007 Solar Decathlon House (Velikov and Geoffrey, 2012)

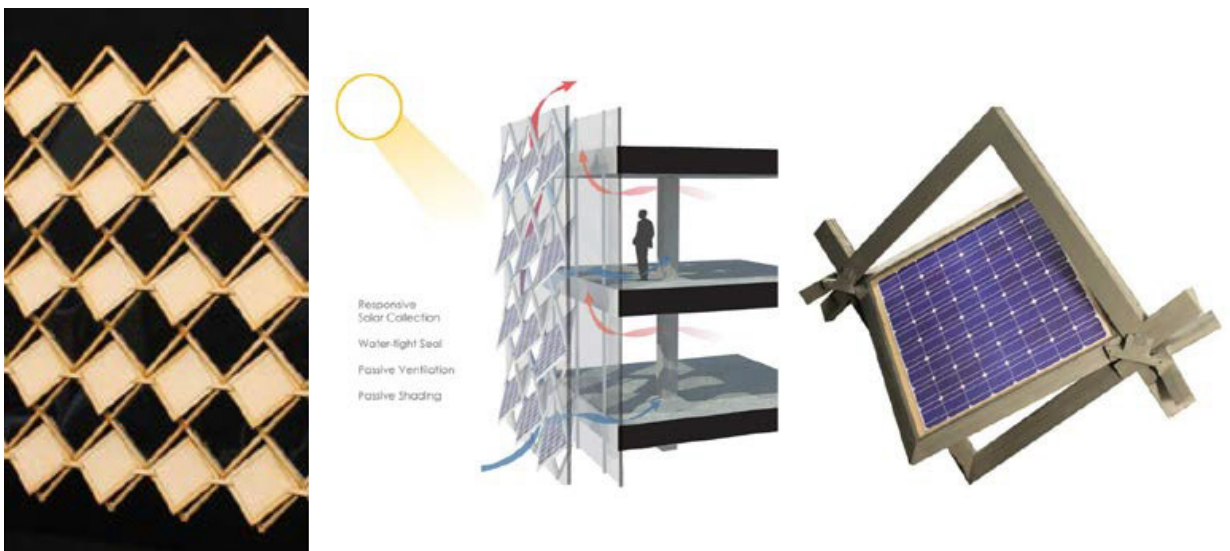


Fig. 2.17. Adaptive Solar Skin (A. Orhon, 2016)

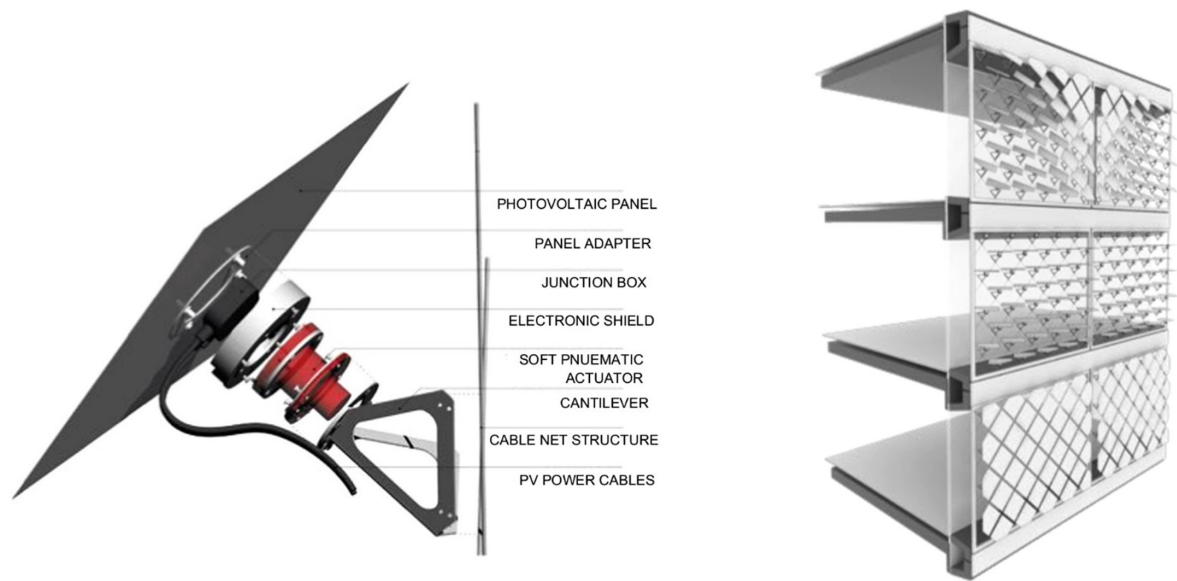


Fig. 2.18. ASF Adaptive Solar Façade. Modulo singolo (a sinistra) - Moduli su una facciata di un edificio, montati in cornici su una struttura di rete di cavi all'interno dello strato ombreggiante della facciata (a destra) (Nagy et al., 2016)



Fig. 2.19. ASF – Adaptive Solar Façade. Fotomontaggio per simulazione di un intervento di retrofit sull'edificio HIL dell'ETH di Zurigo. In alto a sinistra: fotografia dell'edificio. In alto a destra: fotomontaggio dell'edificio con l'ASF. In basso a sinistra: vista ravvicinata. In basso a destra: vista dall'interno (Nagy et al., 2016)

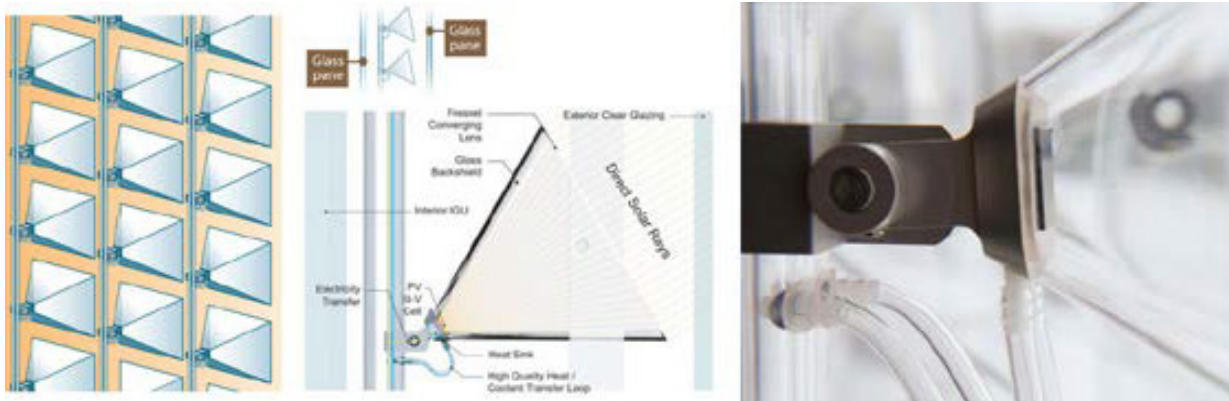


Fig. 2.20. Integrated Concentrating Solar Facade (ICSF) (A. Orhon, 2016)

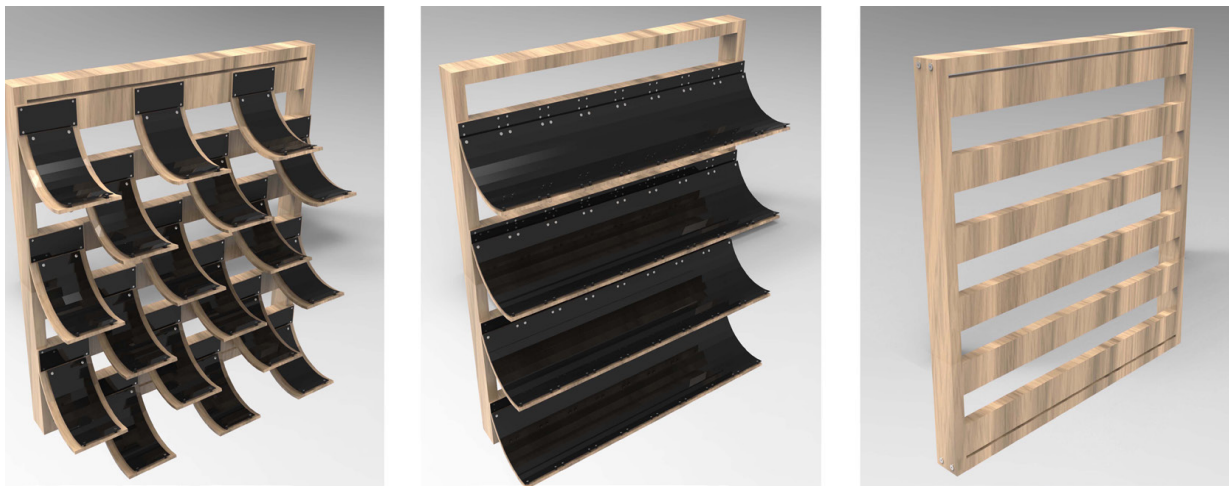
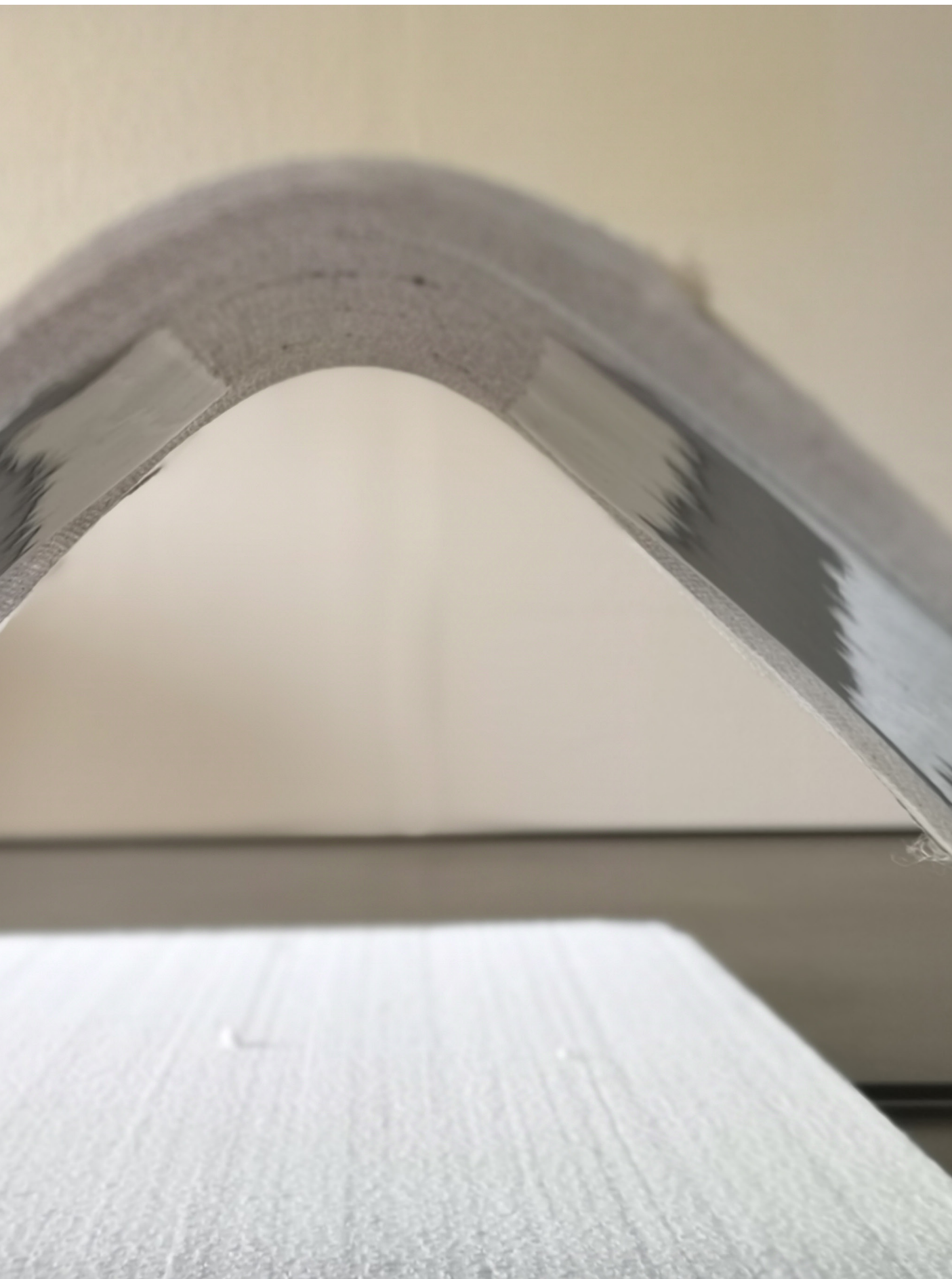


Fig. 2.21. Adaptive BIPV Facade (Mazzucchelli et al., 2018)

3. CONOSCENZE PROPEDEUTICHE





MATERIALI COMPOSITI

Nello studio di strutture leggere assume un'importanza fondamentale la scelta del materiale. Le membrane rappresentano la metafora per concezione di uno spazio morbido e di superfici facilmente modellabili. In architettura, infatti, i materiali tessili vengono utilizzati per la materializzazione di spazi altamente flessibili, per la realizzazione di componenti dotati di movimento e quindi adattivi. L'interesse verso i tessuti è cresciuto negli ultimi anni grazie alle potenzialità offerte dalla ricerca scientifica attraverso l'implementazione delle sue proprietà in combinazione con altri materiali, fino allo sviluppo dei compositi. La combinazione di materiali diversi consente di ottenere proprietà via via diverse e specifiche allo scopo per cui sono stati adottati. Per esempio, alcune architetture utilizzano i materiali tessili per una ragione di basso costo, altri per involucri innovativi e molto costosi, altri ancora per esigenze di temporaneità o portabilità, ma anche per sistemi di facciata estremamente performanti e fissi. La scelta del materiale è influenzata anche da altri requisiti, come la trasparenza, l'isolamento termico o acustico. L'evoluzione tecnologica consente di ottenere membrane adatte ad una serie di funzioni molto articolata nell'ambito dell'involucro edilizio. La principale funzione delle membrane è la "funzione barriera", termi-

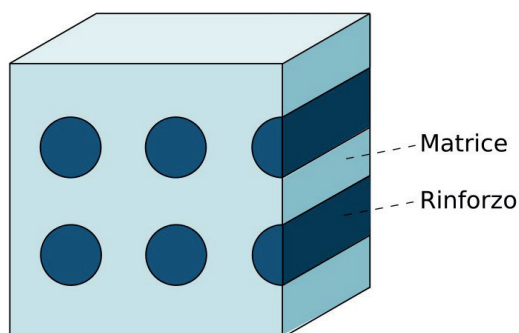


Fig. 3.1. Struttura base di un materiale composito

ne generico che racchiude la combinazione di diverse proprietà. È possibile fare una distinzione iniziale tra i tessili impiegati come rivestimento di facciata (e anche schermatura) e quelli adottati quali unico elemento di delimitazione fra interno ed esterno. Inoltre, possono variare le loro prestazioni a secondo della loro funzione nell'involucro, se applicati davanti ad elementi trasparenti o integrati su superficie opache. In taluni casi possono assolvere la funzione di strato di sacrificio o più esterno di un involucro, una soluzione molto valida anche nell'ambito della riqualificazione, rigenerazione e valorizzazione dell'ambiente costruito (Premier, 2016). Le membrane possono essere definite come

materiali fibrosi o laminati flessibili sottili che sono stabilizzati solamente da forze di tensione ed hanno un tasso di sollecitazione costante su tutto il loro spessore (Milwich, 2010). A differenza di altri materiali, quali ad esempio il vetro, il legno, i metalli, la pietra o il calcestruzzo, le membrane sono caratterizzate da un'elevata leggerezza e alti valori di resistenza a trazione rapportata al peso stesso. Queste proprietà fanno sì che il peso della struttura portante possa essere ridotto notevolmente.

Al giorno d'oggi le membrane più utilizzate sono ottenute da fibre di poliestere rivestite in PVC e fibre di vetro rivestite in PTFE, mentre i nuovi tessuti più resistenti e leggeri in poliestere ad alta resistenza (LCP) o PTFE possono essere combinati con nuovi tipi di rivestimenti come siliconi per una maggiore trasparenza. Per i cuscini pressurizzati sono state sviluppate pellicole traslucide ad alta resistenza. Negli ultimi anni sono state sviluppate nuove fibre, filati, costruzioni e rivestimenti per il mercato tessile buildtech. Oltre ai materiali più conosciuti, le microfibre realizzate con diversi polimeri offrono l'opportunità di concepire nuovi tessuti funzionali innovativi.

Il materiale composito è generalmente costituito da due o più fasi distinte, quali matrice, fibre e additivi o cariche, le cui proprietà sono superiori a quelle delle fasi che lo costituiscono. Sono caratterizzati da struttura non omogenea, ottenuti disperdendo all'interno di una fase continua detta matrice una fase discontinua detta rinforzo (o carica) separati da un'interfaccia, sede di particolari interazioni chimico-fisiche, fondamentali per il trasferimento di carico tra matrice e rinforzo (Fig. 3.1).

Il concetto di materiale composito ha origine molto remota; mescolare paglia e fango per ottenere un materiale da costruzione rappresentava uno dei primi tentativi di combinare più componenti per costituire un nuovo materiale. Materiali compositi complessi sono largamente presenti in natura: per esempio nel legno delle piante, un polimero di natura fibrosa, la cellulosa, è tenuta assieme da sostanze cementanti, come la lignina (Cristaldi, 2011).

L'unione dei due elementi consente di definire un nuovo materiale dalle proprietà meccaniche superiori rispetto ai materiali di partenza. In genere le proprietà finali dipendono dalla qualità dell'interfaccia, dalle proprietà delle fasi costituenti e dalla quantità e geometria delle fasi disperse.

Nel caso di materiali compositi ottenuti da tessili spesso la loro integrazione con polimeri o elastomeri permette di migliorarne l'impermeabilità, la resistenza agli agenti atmosferici o, talvolta, la possibilità di po-

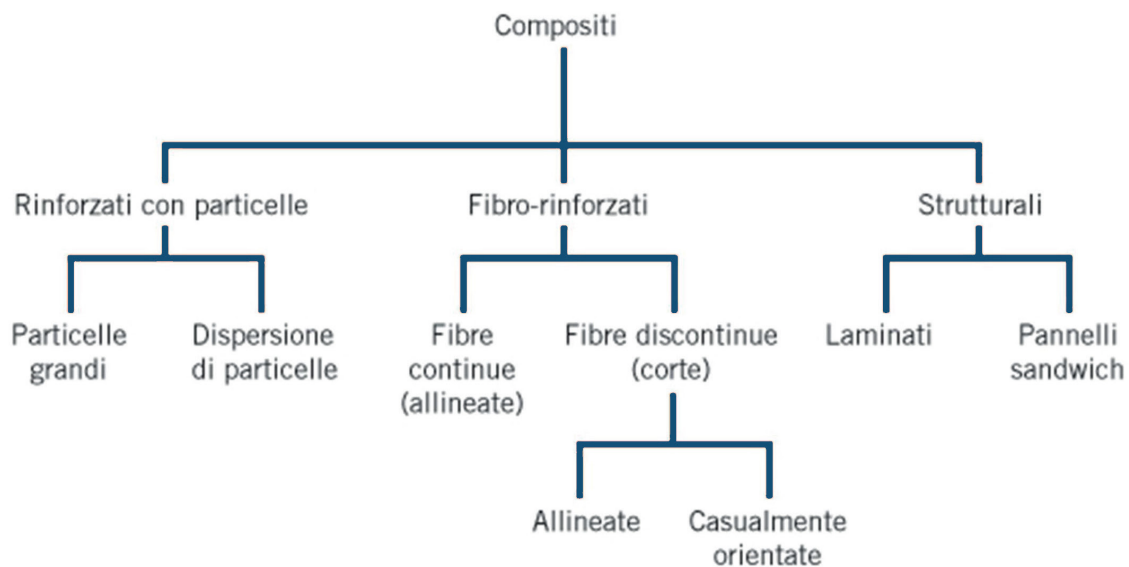


Fig. 3.2. Categorie di materiali compositi

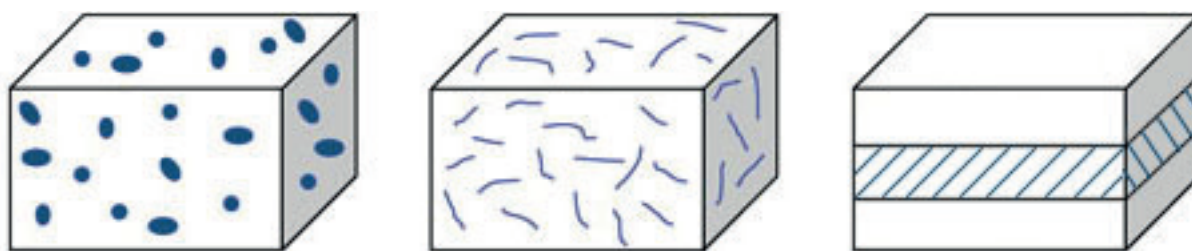


Fig. 3.3. Struttura di compositi rinforzati con particelle (a sinistra), compositi fibro-rinforzati (al centro) e compositi strutturali (a destra)



Fig. 3.4. Distribuzione delle fibre in compositi fibrosi. Fibre fibre continue (a sinistra), discontinue (al centro) o disperse in modo casuale (a destra)

tere ottenere forme o prepiegature definite.

Il processo di produzione che caratterizza questa tipologia di materiali si basa principalmente su tre diverse tecnologie:

- sottovuoto, attraverso la quale la polimerizzazione della matrice avviene in uno stampo con vacuum bag, che permette di comprimere il pacchetto a pressione atmosferica;
- RTM (Resin Transfer Moulding), in cui il rinforzo è messo a secco in uno stampo e successivamente la matrice viene iniettata a pressione;
- stampaggio, processo in pressa a caldo dove vengono alternati film sottili di matrice e tessuto di rinforzo.

Matrice

La matrice è costituita da una fase continua omogenea il cui compito è di proteggere il rinforzo dagli agenti esterni, di incapsularlo e assicurarne la coesione, la giusta dispersione e l'assenza di segregazione. La matrice inoltre evita la propagazione di cricche fragili tra i rinforzi, poiché solitamente discontinui tra loro, che potrebbero portare alla rottura del composito (Misnon et al., 2015).

Tra le matrici leganti più note nel campo dei compositi vi sono i materiali polimerici, perché data la loro bassa densità conferiscono leggerezza al materiale, o le matrici metalliche e ceramiche. In relazione alle caratteristiche molecolari specifiche del materiale, si possono distinguere due tipologie di matrici polimeriche: le termoindurenti e le termoplastiche. Le matrici termoindurenti sono le più diffuse ma caratterizzate da struttura molecolare che, al superamento di una certa temperatura, le fa degradare in maniera irreversibile. Le più comuni tra queste sono le epossidiche e i poliesteri insaturi. Questo tipo di matrici sono materiali fragili in quanto hanno una deformabilità limitata. Le matrici termoplastiche risultano invece più deformabili e meno fragili rispetto alle matrici termoindurenti. La loro struttura molecolare all'aumentare della temperatura gli permette di raggiungere una fase fluida e, una volta raffreddate, di riacquisire le proprietà originarie. Possono essere fuse e riformate un numero elevato di volte (Raji et al., 2019).

Rinforzo

La fase dispersa, che prende il nome di rinforzo o carica, ha proprietà meccaniche nettamente migliori, sia in termini di resistenza che di rigidità, del materiale massivo (matrice).

I rinforzi possono essere di tipo particellare o fibroso (Fig. 3.3). Le polveri ceramiche quali mica, talco, bios-

sido di titanio, o poveri metalliche, sfere espanse e nanotubi di carbonio appartengono alla prima categoria; questi sono dispersi in maniera casuale nella matrice, hanno pressoché stesse dimensioni in ogni direzione e conseguentemente conferiscono un comportamento isotropo al composito (Misnon et al., 2015). Specie nel campo delle materie plastiche, e in particolare quelle termoplastiche, l'aggiunta di rinforzi di tipo particellare può variare dall'ordine del millimetro a quella del micron fino al nano ed è in grado di portare considerevoli variazioni delle proprietà. Malgrado ciò, non sempre consentono di ottenere notevoli miglioramenti nelle caratteristiche meccaniche del materiale e per questo motivo solitamente vengono additivati con fillers aggiuntivi (Raji et al., 2019).

I rinforzi fibrosi hanno una dimensione prevalente rispetto alle altre e incrementano resistenza, modulo elastico e proprietà elettriche e termiche del materiale. In questo caso viene conferito al prodotto finale un comportamento anisotropo, con proprietà nettamente migliorate nella direzione delle fibre. Le prestazioni dei compositi fibro-rinforzati dipendono sia dalla qualità dei costituenti, ma soprattutto dalla disposizione e dalla geometria delle fibre. Le fibre possono essere continue (lunghe), discontinue (corte) allineate o disperse in modo casuale, con prestazioni decrescenti dalla prima tipologia all'ultima (Fig. 3.4).

Tra i rinforzi maggiormente impiegati per i compositi fibro-rinforzati è possibile individuare la fibra di carbonio, la fibra di vetro, fibra di aramide (kevlar) e le fibre naturali.

Il comportamento anisotropo può essere utile in certi casi, ma molte volte il materiale non è sollecitato in una sola direzione: per garantire resistenza in due o più direzioni è possibile ricorrere al rinforzo in tessuto. Le fibre, infatti, possono essere trasformate in tessuti realizzati per mezzo di telai analoghi a quelli utilizzati nella realizzazione dei prodotti tessili tradizionali, ottenuti disponendo più fasci di fibre, dello stesso materiale o diverso, in più direzioni. Si distinguono 3 configurazioni geometriche dei tessuti:

- tessuti monoassiali: un fascio di fibre disposte parallelamente (ordito) tenute assieme da una trama di filamenti;
- tessuti biassiali: due fasci di fibre disposti secondo due direzioni ortogonali;
- tessuti triassiali: più fasci di fibre disposti secondo più direzioni inclinate tra loro.

I compositi denominati strutturali vengono ottenuti sovrapponendo e incollando, con diverse metodologie, più strati di laminari (cioè strati singoli di materiali con un'unica direzione delle fibre di rinforzo) in modo che

le fibre siano disposte secondo due o più direzioni per garantire, in quelle direzioni, una resistenza ottimale. Questi materiali nascono anche con lo scopo di migliorare le caratteristiche meccaniche e le proprietà superficiali (corrosione, usura, estetica) (Cristaldi, 2011).

TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

La tecnologia fotovoltaica permette di produrre energia elettrica utilizzando energia solare, riducendo drasticamente l'uso di energia da fonti non rinnovabili. Negli ultimi anni la ricerca si è concentrata nello sviluppo dello sfruttamento di energia solare, cercando di implementare la struttura delle celle solari attuali e ricercarne di nuove al fine di aumentarne l'efficienza, oltre ad inseguire l'uso di materiali e tecnologie per abbattere i costi di produzione. Di fronte a forniture limitate di combustibili fossili e uranio, la svolta verso le energie rinnovabili è inevitabile ed ha assunto grande importanza. I decenni di transizione verso la neutralità climatica sono stati caratterizzati da un'attività mondiale di ricerca e sviluppo, un incessante trasferimento di tecnologia e un mercato altamente competitivo in tutti i settori della commercializzazione delle energie rinnovabili (Heinstein, Ballif and Perret-Aebi, 2013). In realtà l'uso dell'energia solare ha origini molto remote. I primi tentativi sullo sfruttamento del sole come fonte di energia gratuita risalgono già all'epoca dei Greci e dei Romani, quando intorno al 600 a.C. iniziò ad essere focalizzata l'attenzione sull'incendiarsi del legno grazie ai raggi solari tramite l'uso di concentratori (lenti o specchi). Nel diciannovesimo secolo una nuova grande scoperta ha aperto le porte per altri innumerevoli finalità (Lamont, 2012). Nel 1839 il fisico Alexandre-Edmond Becquerel, all'età di soli diciannove anni, mentre svolgeva esperimenti di elettrolisi con una batteria a celle umide, osservò che quando la luce colpiva delle lastre di argento, la tensione di uscita della batteria aumentava. Negli anni a seguire altre ricerche vennero

intraprese, senza particolari sviluppi sulla materia, per via dello scarso interesse su fonti di energia alternative ai combustibili fossili. Un leggero avanzamento sul tema si ebbe per mano di un elettricista di New York, Charles Edgar Fritts, autore di un prototipo di cella fotovoltaica molto inefficiente (1-2%) (Lamont, 2012). L'efficienza delle celle viene calcolata misurando l'elettricità prodotta dal totale dell'energia solare che colpisce la superficie fotovoltaica (PV). Il prototipo di Fritts conteneva molte delle caratteristiche delle celle solari odierne, ovvero una copertura di vetro sopra un layer di sottili fili d'oro e un sottile strato di selenio. Ci sarebbero voluti molti decenni prima che si raggiungesse una vera comprensione delle ragioni della precedente bassa produzione e si ottenesse una maggiore efficienza.

Nel 1888 Augusto Righi, ingegnere civile e senatore del Regno d'Italia, fu tra i primi ad analizzare l'effetto fotoelettrico, ossia il fenomeno di interazione tra una lastra metallica e la radiazione solare, caratterizzato da un'emissione di elettroni (ossia energia elettrica) da parte della superficie quando investita da una radiazione elettromagnetica, ovvero da fotoni aventi una certa lunghezza d'onda.

Nel 1905 Albert Einstein, diede una completa interpretazione del fenomeno fotoelettrico intuendo che l'estrazione di elettroni dal metallo si poteva spiegare ipotizzando che la radiazione elettromagnetica fosse costituita da pacchetti di energia o quanti, denominati fotoni. Fu proprio grazie a questi studi che nel 1921 egli ricevette il premio Nobel per la fisica. Nel corso della seconda metà del secolo si è potuto assistere ad una progressione più rapida, che ha contribuito ad un'accelerata crescita nell'interesse e adozione di questa tecnologia.

L'effetto fotovoltaico consiste nella produzione di energia elettrica, attraverso la trasformazione diretta ed istantanea dell'energia solare.

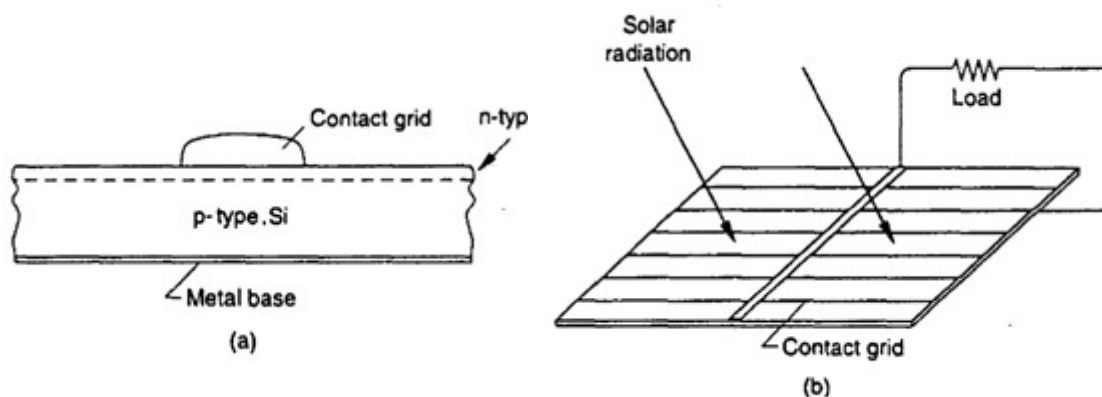


Fig. 3.5. (a) Sezione di una cella fotovoltaica in silicio – (b) Schema di una cella fotovoltaica in silicio (Sick and Erge, 1996)

La cella solare è costituita da un sottile layer di materiale semiconduttore, solitamente silicio, le cui proprietà elettriche si collocano tra quelle dei conduttori e degli isolanti, rendendolo solo marginalmente conduttivo per l'elettricità (Fig. 3.5). Mediante un processo denominato "drogaggio" una piccolissima quantità di impurità viene aggiunta al semiconduttore, creando così due diversi strati chiamati strati di tipo n e di tipo p. Un materiale di tipo n ha un numero maggiore di elettroni nella banda di conduzione (n=negativo) mentre il materiale di tipo p ha vacanze di elettroni (p=positivo). Tipicamente, il fosforo viene utilizzato per creare lo strato di tipo n e il silicio drogato con boro crea lo strato di tipo p. Tra i due strati si crea una giunzione p-n di grande importanza per il funzionamento della cella solare. Una volta applicata infatti una tensione dall'esterno, tale giunzione funziona da diodo, permettendo il passaggio di corrente in un solo senso (Sick and Erge, 1996).

La luce quando colpisce la cella passa attraverso uno "strato finestra" che è sottile e quindi ne assorbe solo una piccola frazione. La maggior parte della luce viene assorbita nello strato assorbente dove, grazie all'effetto fotovoltaico, vengono a crearsi coppie di elettrone-lacuna sia in N che in P che possono fluire in entrambi i lati della cella attraverso il campo elettrico formatesi lungo la zona di giunzione dei due strati. Connettendo la giunzione con un conduttore esterno si ottiene un circuito nel quale la corrente scorre dallo strato P allo strato N fino a quando la cella resta esposta alla radiazione luminosa. La corrente prodotta dalla cella è proporzionale alla quantità di luce incidente (il numero di fotoni che entrano nella cella). Pertanto, la corrente aumenta con l'area della cella e con l'intensità della luce, in quanto l'unica zona che contribuisce a fornire corrente è quella intorno alla giunzione P-N. Nelle zone distanti alla giunzione P-N si formeranno cariche elettriche, ma esse, in assenza di campo elettrico che le mette in movimento, non contribuiranno alla produzione di corrente. La tensione della cella dipende dal materiale utilizzato. Una cella di silicio produce circa 0,5 V indipendentemente dall'area della cella. Il funzionamento rimane pressoché il medesimo indipendentemente dal materiale impiegato.

Presso i centri di ricerca Bell Labs in America sono state avviate le sperimentazioni che hanno trasformato l'industria del fotovoltaico in quella attuale, il cui lavoro sui semiconduttori ha effettivamente supportato lo sviluppo delle celle solari via via sempre più efficienti. I semiconduttori sono materiali appartenenti alla categoria dei semimetalli, con proprietà intermedie tra quelle dei conduttori e degli isolanti. Nel caso delle celle fotovoltaiche il semiconduttore adottato è il si-

licio, il cui comportamento elettrico viene modificato mediante un processo denominato drogaggio, ovvero l'aggiunta di piccole impurità, dette proprio droganti, con lo scopo di creare eccesso di portatori di carica elettrica (elettroni) da un lato e carenza di essi (lacune) dall'altro (Sick and Erge, 1996). I ricercatori dei Bell Labs avevano visto il silicio raggiungere risultati migliori rispetto al selenio precedentemente testato. Grazie a questa scoperta, per la prima volta, loro prevedero la possibilità di realizzare celle solari con efficienze superiori al 20% rispetto ai livelli dell'1-2% del tempo. Il gruppo di ricerca si rese conto che non avrebbe potuto fare questo passo significativo solo con il passaggio ad un materiale diverso e continuò a intraprendere ricerche per trovare una giunzione p-n ottimale. Nelle prime fasi di sviluppo, mescolando l'arsenico con il silicio e applicando un sottile strato di boro sulla cella, fu possibile raggiungere un'efficienza della cella del 6%. Malgrado tale risultato, il costo delle materie prime e della tecnologia era troppo alto per applicazioni su larga scala; restava invece utile alle missioni spaziali, in quanto non c'erano altre alternative. La prima cella solare per alimentare attrezzature spaziali fu collocata sul satellite Vanguard I nel 1958 e funzionò fino alla sua disattivazione nel 1964. Il successo delle celle fotovoltaiche come fonte di energia infinita e non inquinante fece sì che diventasse parte integrante di ogni progetto aerospaziale, e grazie ad esso la ricerca sul fotovoltaico ricevette un forte impulso, portando una flessione dei costi e un miglioramento nella solidità e nell'affidabilità della tecnologia.

Un'ulteriore comprensione dei limiti e delle prestazioni dei pannelli fotovoltaici si ebbe nel 1961 grazie a William Shockley e Hans Queisser, che con il loro teorema determinarono la massima efficienza teorica del 32% raggiungibile da una cella solare in silicio a singola giunzione.

I continui miglioramenti nei livelli massimi di efficienza, per esempio pari al 14% nel caso delle celle fotovoltaiche prodotte da Hoffman Electronics nel 1960, ha avviato la fase di transizione per le applicazioni terrestri. Il 1963 fu l'anno nel quale avvennero le prime commercializzazioni di moduli fotovoltaici. Negli anni '70, grazie ancora alle applicazioni spaziali, si cominciarono ad usare celle in arseniuro di gallio e vennero sviluppate le celle al silicio policristallino, molto più economiche rispetto a quelle usate in precedenza che erano al silicio monocristallino. Malgrado ciò la diffusione della tecnologia per applicazioni terrestri rimase abbastanza limitata a causa della grande disponibilità dei combustibili fossili.

Solo con le crisi petrolifere del 1973 e del 1979 e il conseguente aumento dei prezzi del petrolio, il governo

degli Stati Uniti si rese conto dell'incredibile importanza delle fonti rinnovabili, quali appunto il sole. Vennero quindi avviate compagnie di ricerca e vennero introdotti incentivi governativi per lo sviluppo e la diffusione di sistemi basati sulle rinnovabili. Proprio in questi anni il "DOE PV Research and Development Programme" sperimentò pellicole sottili al silicio cristallino. Inoltre, vennero avviati gli studi su nuovi materiali che avrebbero caratterizzato una nuova generazione di fotovoltaico, come il telluro di cadmio (CdTe), o semiconduttori fatti di rame, indio, gallio e selenio (CIS o CIGS).

Nel corso del decennio successivo venne registrata un'enorme crescita nel settore culminata in una svolta nel prezzo delle celle fotovoltaiche per watt a meno di un decimo del loro costo in soli 15 anni, (1970 - \$ 100 per watt a 1985 - \$7 per watt). Questo fenomeno ha subito un rallentamento per l'abbassarsi del prezzo del petrolio, limitando l'interesse di consumatori e governi, dando l'avvio a un nuovo periodo di lenti progressi. In quel periodo gli Stati Uniti hanno assunto un ruolo guida nello sviluppo delle celle solari e fino al 1990 sono stati i leader nel mercato, nella ricerca e sviluppo e nell'implementazione. Alla fine del ventesimo secolo furono Europa e Giappone a contendersi la leadership nella produzione e sviluppo della tecnologia. Nei due continenti i governi hanno introdotto sussidi governativi, aumentato la consapevolezza pubblica e investito in ricerca e sviluppo. Negli anni '90, il Giappone aveva visto il suo mercato aumentare di 10 volte; l'introduzione di sussidi e incentivi in Germania comportarono un aumento della sua produzione di 40 volte, superando persino il successo del Giappone. Altri paesi europei come la Spagna hanno seguito questo esempio raggiungendo più o meno lo stesso livello di crescita. Il mercato del fotovoltaico ha completato una parte entusiasmante della sua storia con la ricerca e lo sviluppo mediante l'integrazione di piccoli moduli ad accessori e componenti di uso quotidiano, come sistemi di illuminazione per esterni o alimentatori portatili. L'energia solare ora non è solo una tecnologia più accessibile per soddisfare le richieste sempre crescenti, ma ha anche costi inferiori, ha una maggiore efficienza e rappresenta un'alternativa pulita ai combustibili fossili.

Probabilmente l'efficienza e il costo dei pannelli saranno ancora negli anni a venire i due principali problemi nello sviluppo della tecnologia FV.

Generalmente tra l'aumento dell'efficienza e il costo esiste un'interconnessione, poiché normalmente entrambi aumentano e diminuiscono insieme. Ad esempio, l'aumento del costo dovuto a materiali più costosi potrebbe portare a \$/W identici quando l'efficienza viene aumentata allo stesso tasso; o gli effetti di scala

nella produzione generalmente portano a riduzioni dei costi a condizione che l'efficienza rimanga almeno la stessa. Attualmente i produttori stanno lavorando sullo sviluppo di celle dotate di un'elevata efficienza e un basso costo. La ricerca in quest'ambito si muove in due direzioni: tipo di materiale utilizzato e tecnologia di costruzione delle celle. Sulla base di ciò è possibile così definire tre generazioni di tecnologie fotovoltaiche.

Le celle fotovoltaiche di prima generazione, basate su wafer, sono caratterizzate da un'alta efficienza raggiunta tramite la purezza del materiale (silicio monocristallino). Esse si suddividono a loro volta in celle di silicio policristallino (caratterizzate da un'efficienza media tra il 14% e il 17%) e celle di silicio monocristallino (con valori di efficienza media compresi tra il 21% e il 23%). Lo spessore standard di un wafer di silicio cristallino è di circa 180 micronmetro, ma i recenti tentativi hanno permesso di raggiungere spessori pari a 100 micronmetro, in quanto nella tipologia Wafer-based PV il maggior costo delle celle è dovuto proprio alla componente in silicio. Infatti, nella produzione di pannelli fotovoltaici cristallini, il silicio rappresenta circa il 20-25% del costo.

I prodotti di seconda generazione sono costituiti da celle a film sottile, tecnologia che si basa sull'utilizzo di materiali di assorbimento alternativi e/o complementari al silicio, quale il silicio amorfo (a-Si) o una combinazione di silicio amorfo e microcristallino, il semiconduttore composto telluro di cadmio (CdTe), o semiconduttori costituiti da rame, indio, gallio e selenio (CIS o CIGS), depositati su substrato conduttivo trasparente, sia flessibile che rigido, estendendo rispetto alle celle di prima generazione le possibilità di utilizzo e applicazione su differenti tipologie di supporti. Con questa tecnologia è stato possibile produrre diverse tipologie di moduli fotovoltaici, dai pannelli flessibili alle tegole solari per una perfetta integrazione negli involucri di edifici esistenti. La loro denominazione thin film (film sottile) deriva infatti dall'uso di assorbitori dallo spessore molto ridotto, si contraddistinguono per costi di produzione molto più bassi rispetto alle celle cristalline ma contano su un'efficienza molto minore, oltre che una degradabilità elevata.

Il gruppo delle celle fotovoltaiche di terza generazione comprende vari sottotipi:

- *Celle solari multigiunzione*, fabbricate con strutture multilayer, consentono di superare il limite di Shockley-Queisser, legato alla massima efficienza teorica di una cella solare utilizzando una singola giunzione p-n per raccogliere energia dalla cella. I prodotti multigiunzione possono essere classificati tenendo conto del numero di layer sottili depositati, solitamente 2 o 3, della tipologia di semiconduttori,

o della tecnologia di deposizione. Le tecnologie più studiate sono sistemi multigiunzione con strutture epitassiali GaAs/InP/Ge.

- *Eterogiunzioni bulk*, costituiti da polimeri o materiali organici-inorganici e strutture ibride, in modo da combinare i vantaggi dei semiconduttori organici e del semiconduttore inorganico, possedendo quindi proprietà complementari. Queste caratteristiche permettono il raggiungimento di alte efficienze di conversione (fino a circa il 20%), ottenuto con un processo di fabbricazione a basso consumo di energia in quanto caratterizzato da una temperatura relativamente bassa, oltre che da tempi di produzione brevi e buona durabilità.

- *Dye-sensitized solar cells o celle di Gratzel*, composte da un livello poroso di nanoparticelle di biossido di titanio (TiO_2), impregnato di colorante, il quale assorbe la luce solare, come la clorofilla nelle piante; il biossido di titanio è immerso in una soluzione elettrolitica, sopra la quale vi è un catalizzatore (in genere a base di grafite o platino); il tutto è, in genere, racchiuso dentro una struttura a "sandwich" formata da due vetri conduttori che fungono da fotoanodo (vetro conduttore+ TiO_2) e catodo (vetro conduttore + strato di catalizzatore).

- *Celle fotovoltaiche perovskitiche*, in cui il materiale assorbente è con struttura perovskitica, ovvero simile a quella dell'ossido naturale perovskite. La tipica configurazione usata per queste celle è chiamata struttura mesoscopica o mesoporosa, costituita da un substrato di vetro reso conduttivo da un TCO (Ossido Trasparente Conduttivo), sul quale viene depositato uno strato compatto denominato ETL (Electron Transport Layer) che si occupa del trasporto selettivo degli elettroni e del blocco delle lacune, che verranno invece raccolte all'elettrodo opposto, mentre lo strato finale è formato da un TiO_2 mesoporoso, che consente di migliorare la raccolta di elettroni che percolano attraverso la struttura mesoporosa, tramite l'aumento della superficie di contatto tra il materiale attivo che si occupa dell'assorbimento della radiazione solare (in questo caso la perovskite) e l'ETL.

La tecnologia più diffusa nel settore si basa sulle celle di prima generazione, occupando il 90% del mercato del fotovoltaico: pannelli fotovoltaici basati su moduli di celle di silicio monocristallino e policristallino dominano il mercato dai primi anni di avvio dell'industrializzazione del sistema. Il silicio, infatti, è il materiale più utilizzabile per applicazioni riguardanti la produzione di energia, grazie alla sua grande abbondanza nella crosta terrestre e alla sua alta densità energetica. Tuttavia, i moduli in silicio con le attuali tecnologie hanno quasi raggiunto il limite teorico di efficienza (PCE), essendo oramai molto vicina al valore

del 29,43% del dispositivo ideale, calcolato in base alle limitazioni intrinseche per questo materiale. Oggigiorno le celle solari a base di perovskite rimangono attualmente la tecnologia di terza generazione più attraente per la loro capacità di coniugare costi di produzione relativamente bassi con un'elevata efficienza di conversione energetica. La ricerca si è quindi concentrata negli ultimi anni su queste ultime, che hanno registrato sempre maggiori valori di efficienza grazie all'utilizzo nuovi materiali assorbitori di luce, registrando nel ciclo di solo otto anni crescite di efficienza dal 4% del 2012 agli attuali valori teorici maggiori del 23%.

Le sperimentazioni atte ad offrire soluzioni innovative per l'integrazione della tecnologia solare su supporti flessibili hanno avuto inizio con l'introduzione negli anni '90 delle celle in silicio amorfo flessibile. Risale al 1998 la prima struttura tessile fotovoltaica denominata "Under the Sun" e realizzata per il Cooper-Hewitt National Design Museum in New York (Fig. 3.6), costituita da un involucro alto 9,7 m dotato di celle solari in silicio amorfo flessibile di 120 μm di spessore, incapsulate e laminate su pannelli sagomati di tessuto (A. V. Orhon, 2016).

Una delle prime applicazioni in grande scala della tecnologia fotovoltaica su membrane è un progetto del 2011 dello studio Ackermann & Partner Architects, una copertura per il magazzino di smaltimento rifiuti AWM Carport (Fig. 3.7), costituita da 220 cuscini a tre strati in ETFE dotati di celle fotovoltaiche per coprire una superficie totale di 9600 metri quadrati. I moduli fotovoltaici in film sottile inseriti nello strato centrale sono stati predisposti con dispositivi di fissaggio meccanici, al fine di mantenere una certa flessibilità e ridurre il rischio di deformazione dovuta alla flessione o allo stiramento del cuscino. La membrana esterna del cuscino permette di proteggere i moduli e consentire, con la sua elevata trasparenza, il corretto irraggiamento solare. Essa può essere aperta per agevolare la manutenzione e la sostituzione di celle difettose (Zanelli, 2011).

Tra le soluzioni pieghevoli può invece essere annoverato il concept dello studio di design Prevalent (Australia), che riguarda l'originale prototipo di un dispositivo di schermatura fotovoltaico tale da garantire produzione di energia elettrica senza forti riduzioni di luminosità per gli ambienti interni (Fig. 3.8). Finalista del Lexus Design Award 2019, l'idea si basa su un concept di studio costituito da celle solari in film sottile depositate mediante serigrafia su un supporto in plastica. Il dispositivo, grazie alla struttura tridimensionale dettata dalla piegatura, permette di ottimizzare l'utilizzo della luce, perché grazie alle feritoie ottenute i raggi solari rimbalzano più volte tra i piccoli elementi fotovoltaici, permettendo allo stesso tempo di control-

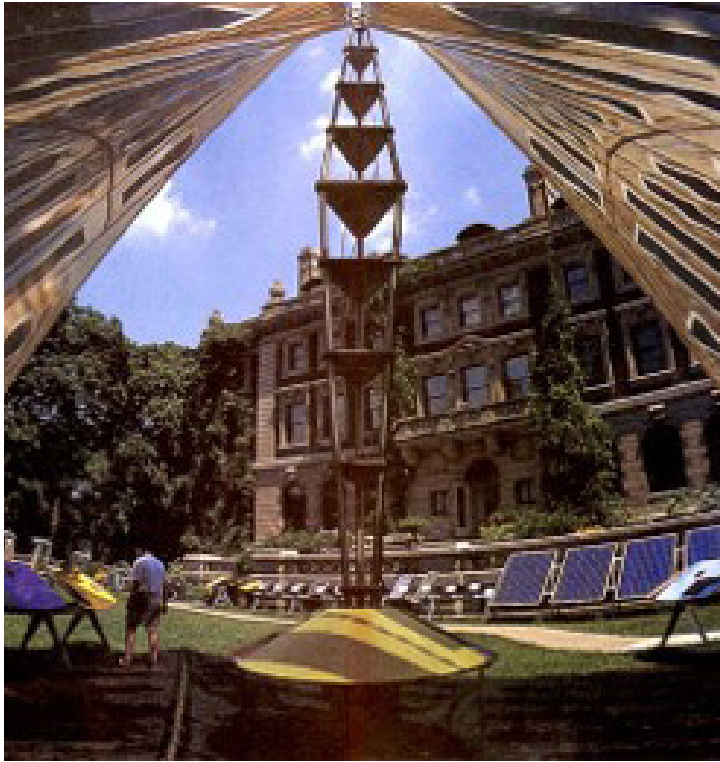


Fig. 3.6. Under the Sun Pavilion. Cooper-Hewitt National Design Museum, New York (1998) (A. V. Orhon, 2016)



Fig. 3.7. Ackermann & Partner Architects. AWM Carport. Monaco (Zanelli, 2011)

lare le condizioni di illuminazione dall'esterno tramite il suo cinematismo.

La ricerca di nuove ha dato vita a sperimentazioni, talvolta di grande effetto, dove l'esperienza mutuata dall'antica arte degli origami, è diventata il punto di partenza per la realizzazione di superfici fotovoltaiche pieghevoli, responsive ma soprattutto semplici da trasportare. Il Jet Propulsion Laboratory della NASA in Pasadena (California), in partenariato con la Brigham Young University in Provo (Utah), ha pensato allo sviluppo di un dispositivo fotovoltaico denominato B-roll Origami Solar Array Prototype per veicoli spaziali sfruttando le pieghe degli origami.

I ricercatori hanno infatti ideare un prototipo in scala 1/20 di un dispositivo innovativo in cui il particolare tipo di piega permette al modulo fotovoltaico di avere diametro di 2,7 metri da chiuso ed estendersi all'apertura fino 27 metri (Figg. 3.9 - 3.10). Il materiale denominato 'hannaflex' dona al componente grande flessibilità, permettendogli di seguire il cinematismo con il minimo sforzo, con il vantaggio di avere una struttura meccanica notevolmente semplificata in quanto per la sua distribuzione è richiesto un solo input. La piega adottata prende nome dell'astrofisico giapponese Koryo Miura che l'aveva in origine creata proprio per la realizzazione di pannelli solari. Infatti, già nel 1995 un pannello solare con questo disegno era stato spiegato sul satellite giapponese Space Flyer Unit. L'intento dei

ricercatori è riuscire ad ottenere dispositivi fotovoltaici orbitanti capaci di utilizzare l'energia solare spaziale per scopi terrestri, come ad esempio la realizzazione di centrali orbitanti wireless per la trasmissione via microonde dell'energia elettrica prodotta. Molti dei pannelli già utilizzati in orbita presentano pieghe molto semplici, come quelle di un ventilatore o a fisarmonica (Zirbel et al., 2013).

Preliminarmente alla fase di progetto riguardante il sistema di produzione e accumulo di energia elettrica derivante dalle celle fotovoltaiche integrate nel componente, risulta essenziale fare un'analisi dei componenti principali di un intero impianto fotovoltaico, al fine di avere una panoramica generale sull'obiettivo di questa fase della ricerca. Una prima distinzione riguarda la tipologia di impianto:

- Impianti Fotovoltaici connessi in rete (grid connected): sistema costituito da pannelli solari connessi alla rete di distribuzione elettrica nazionale. Con questa scelta l'impianto fornirà il surplus di energia elettrica prodotta alla rete nazionale, mentre in caso di deficit di produzione sarà il sistema elettrico nazionale ad alimentare l'impianto.
- Impianti Fotovoltaici ad isola (off-grid): sistema costituito da pannelli solari non collegati alla rete di distribuzione elettrica nazionale. L'energia viene accumulata in apposite batterie e l'impianto garantisce energia elettrica anche in assenza di radiazione solare.



Fig. 3.8. Solgami prototype (www.solgami.com)

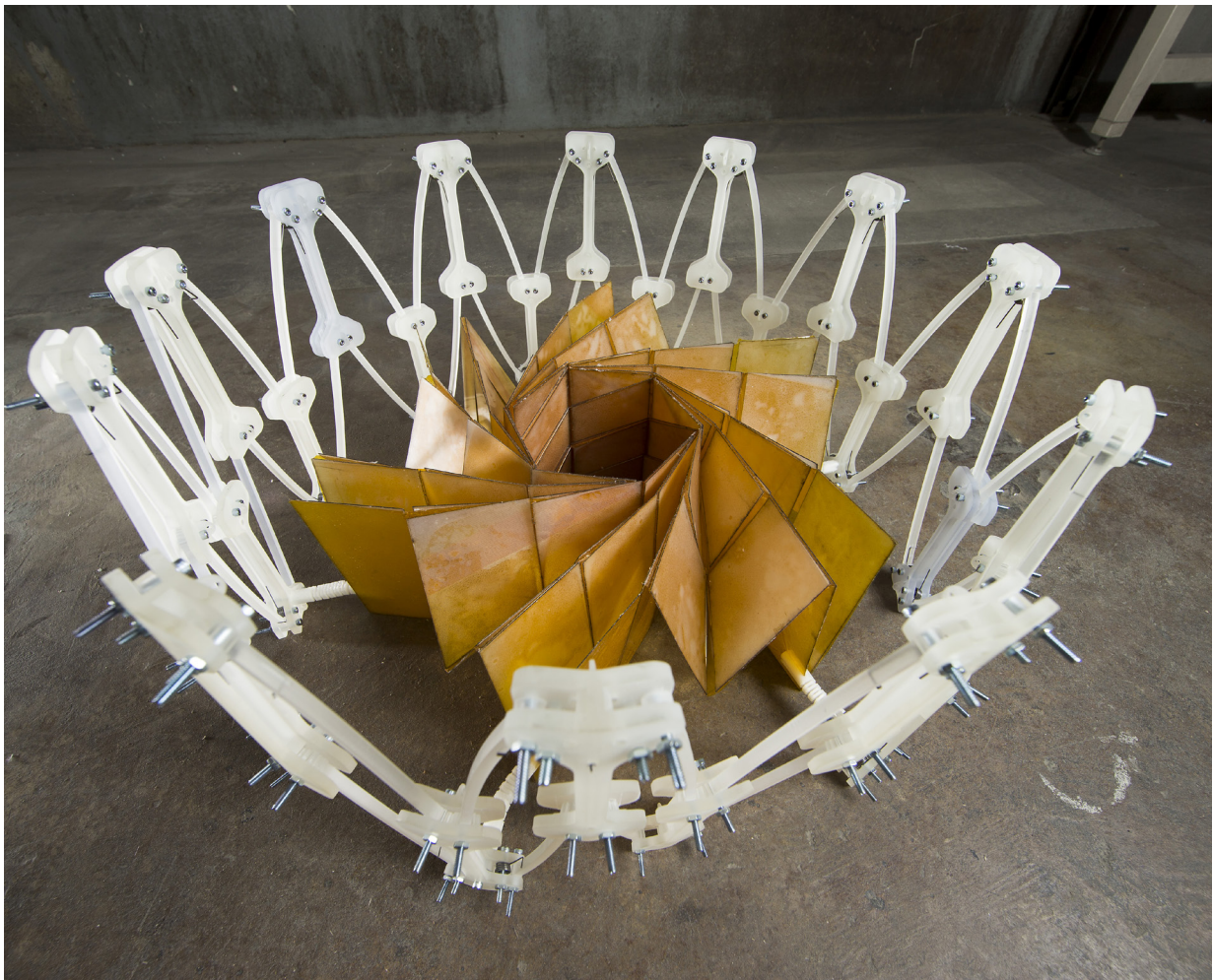


Fig. 3.9. NASA. B-roll Solar Array Origami (nasa.gov)

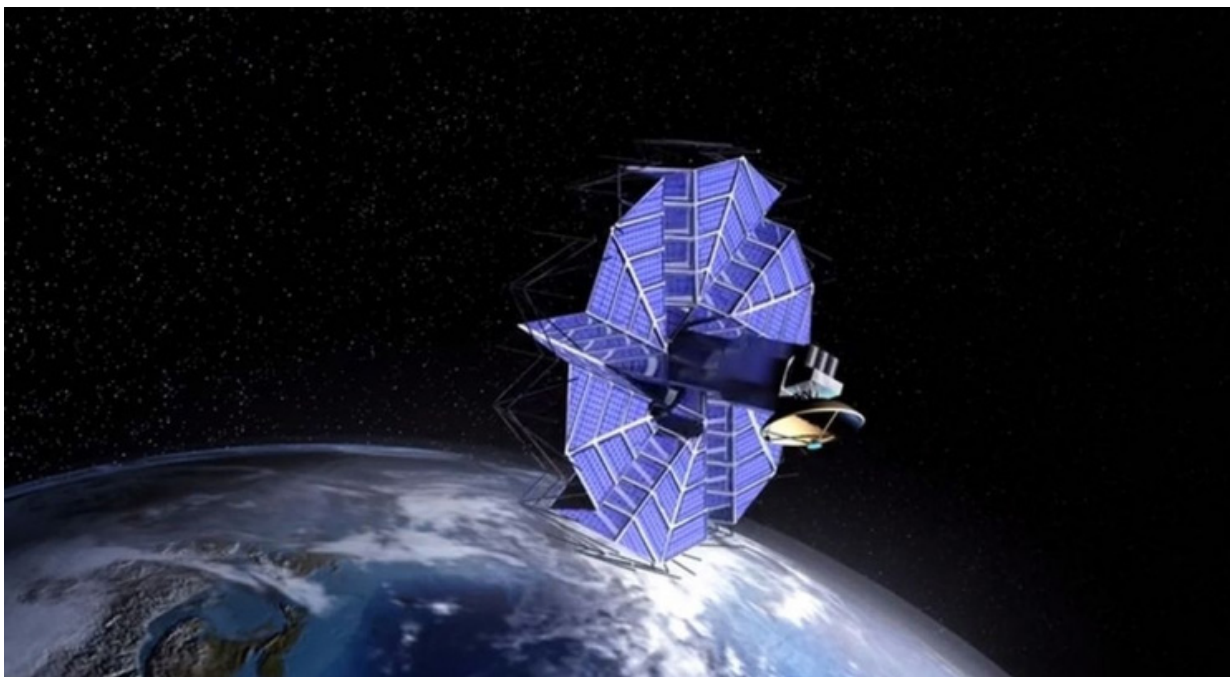


Fig. 3.10. NASA. B-roll Solar Array Origami (nasa.gov)

Nel caso del componente oggetto della trattazione, il sistema di ricarica è strutturato come un impianto fotovoltaico ad isola e risulta principalmente costituito da quattro componenti:

- pannello fotovoltaico
- batterie
- regolatore di carica
- inverter.

Le celle rappresentano l'elemento unitario pannello fotovoltaico. La potenza totale del modulo fotovoltaico, misurata in watt (W) o watt di picco (Wp), dipende dal numero di celle e dalla potenza delle stesse. Più pannelli possono essere collegati in serie, formando una stringa, e più stringhe possono essere collegate in parallelo per formare uno o più array in modo da ottimizzare la produzione. Il pannello fotovoltaico nel caso in esame è costituito sistema di schermatura messo a punto.

La scelta del tipo di batteria dipende principalmente da tre parametri fondamentali: capacità, potenza e resistenza (numero di cicli).

La capacità è la quantità di energia elettrica che è in grado di accumulare ed erogare la batteria, si misura in kWh. La potenza è l'energia trasferita nell'unità di tempo considerata. Il numero di cicli infine rappresenta la quantità di cicli di carica e scarica per la quale la batteria mantiene le condizioni specificate dal produttore.

Attualmente sono disponibili in commercio diversi tipi di batterie:

- batterie al piombo acido (gel);
- batterie agli ioni di litio;
- batterie al piombo acido (chiuso);
- batterie al Nichel;
- batterie piombo acido (sigillato AGM);
- batterie ai sali di sodio.

Le più diffuse sul mercato sono le batterie al piombo e quelle agli ioni di litio.

La prima tipologia è già presente nel mercato da diversi anni, deve la sua diffusione ai costi contenuti. Il grosso limite è dato dall'impossibilità di essere scaricate oltre al 50% della capacità di accumulo nominale. Ciò comporta un "sovradimensionamento" delle batterie e conseguentemente un maggiore ingombro. La loro vita media è di circa 3 - 5 anni.

Tecnologia più recente è invece quella agli ioni di litio, che permette di avere una capacità di scarica maggiore, fino al 90%, e di ottimizzare l'autoconsumo e gli ingombri. Hanno inoltre una vita media più lunga, che può arrivare a 10 - 12 anni.

La carica e scarica delle batterie nell'impianto viene

effettuata tramite un regolatore di carica. È possibile distinguere le tecnologie che seguono:

- PWM (Pulse Width Modulation): sono regolatori a commutazione elettronica che permettono un graduale distacco del generatore all'avvicinarsi della tensione di fine carica delle batterie.
- MPPT (Maximum Power Point Tracker): consentono di conseguire le massime prestazioni nel punto di massima potenza della curva tensione - corrente.
- LVD (Low Voltage Disconnect): impediscono la scarica completa della batteria.

L'inverter è il dispositivo che permette la conversione della corrente continua generata dall'impianto in corrente alternata, alle condizioni di tensione e frequenza della monofase, 230V e 50Hz, e della trifase, 400V e 50Hz. Ciò si rende necessario, oltre che negli impianti domestici per il comune uso dell'elettricità nelle abitazioni civili, anche nei grandi impianti, poiché permette l'uso di cavi di sezione ridotta per il trasposto dell'energia elettrica.

GEOMETRIA DI PIEGA

Il crescente interesse per le strutture cinetiche in architettura risale agli anni Settanta. La cinetica di questi componenti, come mostrato nell'ampia trattazione di Fox e Kemp (Fox and Kemp, 2016), può basarsi su diverse tipologie di movimento, che vanno dal semplice scorrimento alla piegatura fino alla trasformazione fisica, ottenibili attraverso un'apposita apparecchiatura meccanica o sfruttando proprietà fisico-chimiche del materiale caratterizzante il sistema adattivo. Molti sistemi adattivi di nuova generazione sono caratterizzati da strutture pieghevoli. La piegatura rappresenta un metodo semplice ed economico per trasformare la materia in forme tridimensionali facili e veloci, mentre le proprietà cinetiche della piega rendono questa tipologia di sistemi estremamente versatili suggerendo un ampio campo di applicazione (Curletto, 2016). Il principale vantaggio di questo tipo di cinematismo consiste nell'elevato grado di trasformabilità del componente conferitegli dalla piega stessa, pur mantenendo adeguate prestazioni meccaniche (Sapienza, Rodonò and Versaci, 2015). La trasformazione che interessa il componente comporta l'ottenimento di geometrie complesse tridimensionali e deformazioni reversibili (Tabadkani et al., 2021). I dispositivi foldable che si basano su origami rigidi fanno uso di linee di piega rette che rappresentano le direzioni predefinite di movimento e agiscono come cerniere, consentendo la contrazione o il dispiegamento del componente per l'ottenimento di una configurazione predefinita senza lo stiramento del materiale. Uno dei vantaggi degli origami come punto di partenza per lo sviluppo di sistemi schermanti in-

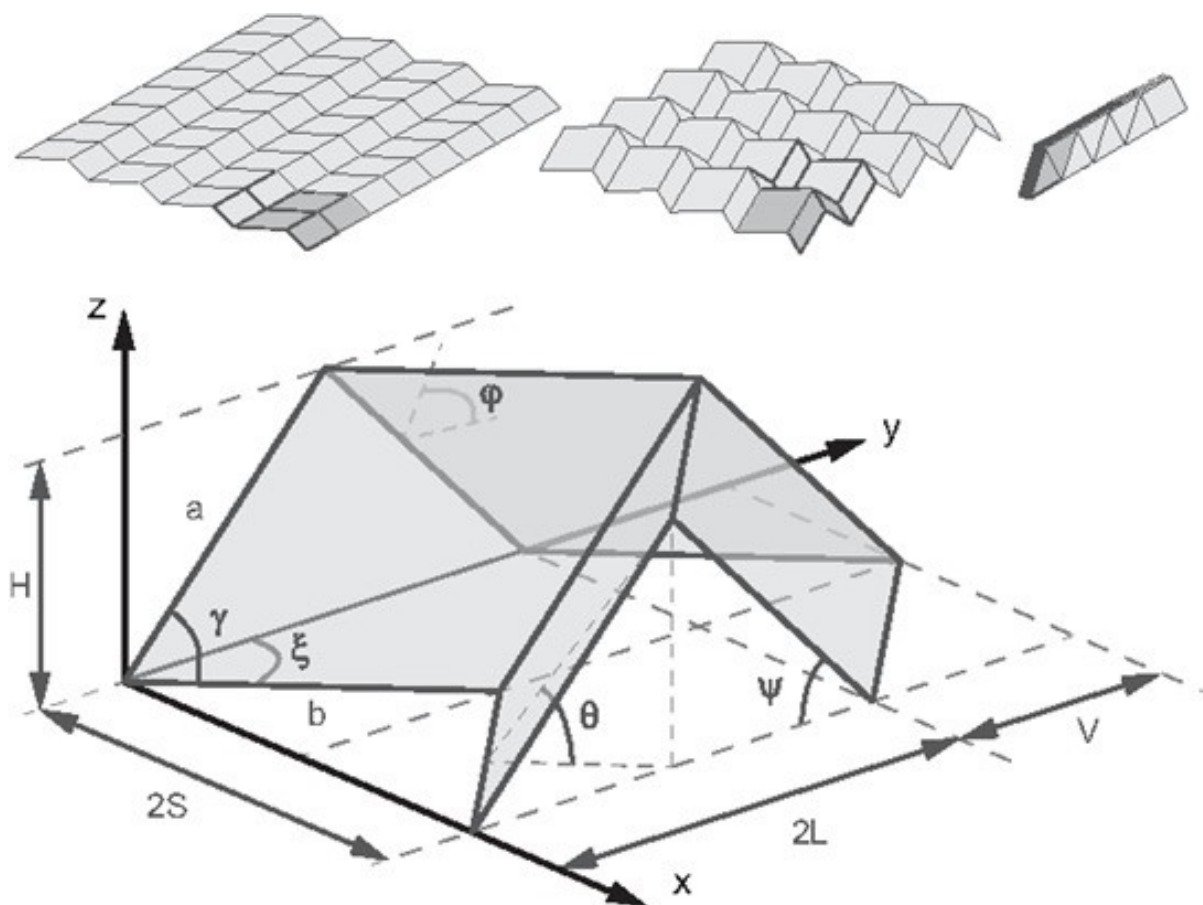


Fig. 3.11. Un foglio Miura-Ori piegato è costituito da tassellazioni di una cella unitaria. La geometria della cella unitaria può essere descritta utilizzando i parametri che definiscono una sfaccettatura del parallelogramma, a , b , γ e l'angolo di piega $\theta \in [0, \pi/2]$ (Schenk and Guest, 2013)

novativi è rappresentato dall'auto-organizzazione spontanea di queste particolari geometrie, adattabili in maniera intuitiva. Infatti, grazie alle pieghe della tassellatura, i modelli di piegatura origami consentono al componente di deformarsi facilmente in una direzione di deformazione preimpostata, pur rimanendo rigido nelle altre direzioni (Pesenti et al., 2015). Questo miglioramento delle proprietà meccaniche lungo le linee di piega, acquisita dalla superficie stessa, prende il nome "resistenza per forma" (Rodonò et al., 2019). Grazie a questa proprietà risulta possibile ottimizzare l'uso del materiale in quanto risulta capace di coprire luci più ampie rispetto a superfici piane o curve realizzati con pari materiali e di uguale spessore. Alla complessità della superficie, resa articolata dalla tassellatura che la caratterizza, ovvero la geometria dei poligoni che costituiscono la piega del materiale, si alterna la semplicità del sistema cinetico che può essere alleggerito rispetto alle soluzioni tradizionali, poiché questo tipo di geometrie il materiale non necessita di essere tenuto in tensione. I modelli ad origami sono quindi generalmente creati per materiali con spessore prossimo allo zero. Lo spessore del pannello è quindi

una delle principali sfide della progettazione ingegneristica ispirata agli origami (Zirbel et al., 2013). L'origami è l'antica arte di piegare un foglio di carta con l'ottenimento di varie forme spaziali senza dover ricorrere all'allungamento, al taglio o all'incollaggio di altri pezzi di carta. proprio per questi motivi, il concetto di origami può essere applicato alla produzione di varie forme complesse tridimensionali mediante deformazione fuori dal piano, ovvero piegatura e dispiegatura, di un foglio di materiale anche differente dalla carta, come tessuti, plastiche e metalli. Per sua definizione, l'origami è una superficie sviluppabile che consente di ottenere forme complesse a partire da una o più parti sviluppabili tridimensionali, rendendola molto più versatile rispetto all'approccio papercraft, che prevede l'approssimazione di una superficie desiderata segmentandola in più pezzi a curvatura singola che è possibile smontare e rimontare (Tachi, 2013).

Negli origami quindi la piega rappresenta la generatrice della sua morfologia, essendo cerniera per il movimento e al contempo irrigidimento della superficie lungo la propria direzione. Fissato un sistema di riferimento XY sul piano della superficie, è possibile

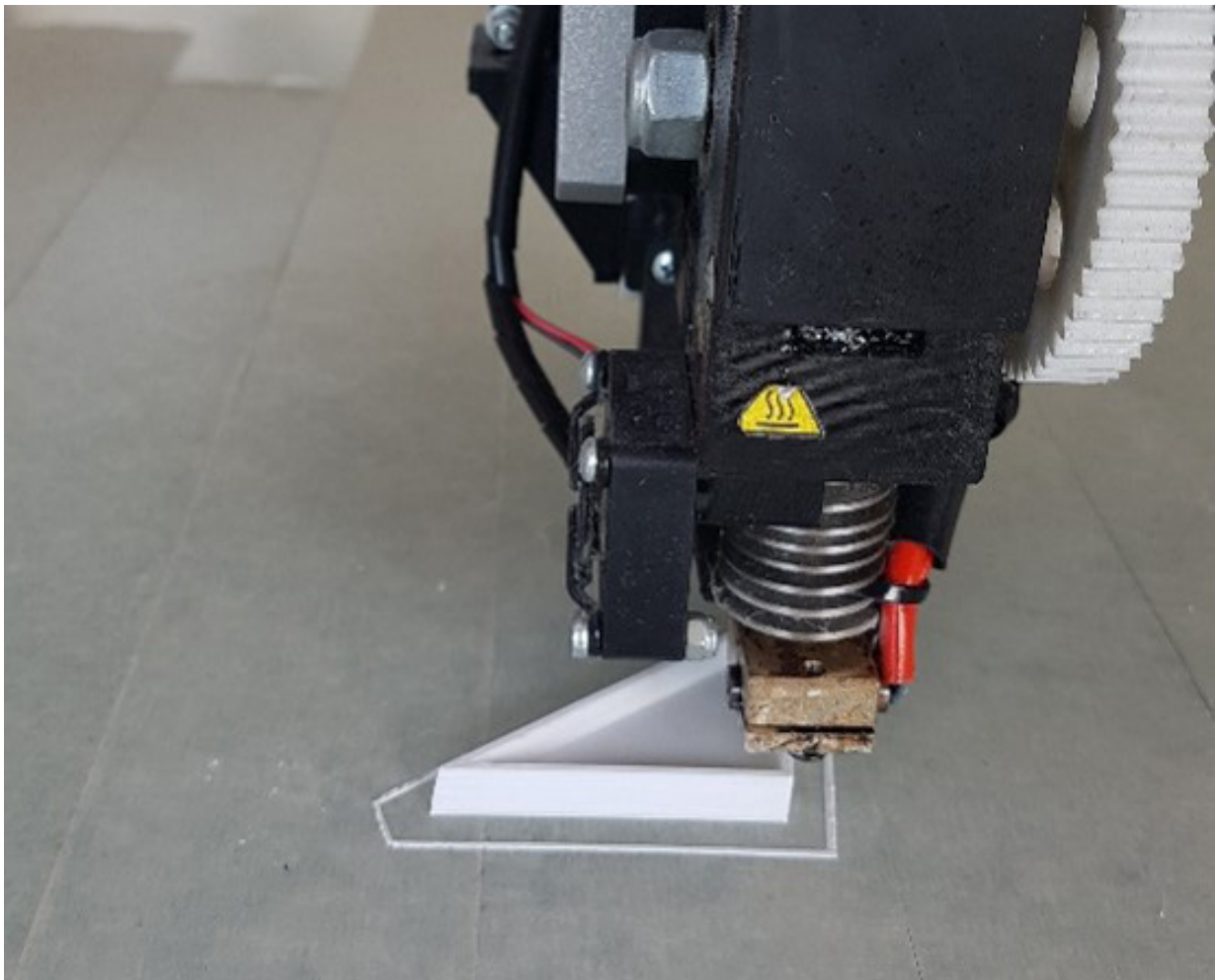


Fig. 3.12. Stampa 3D di uno dei supporti del Prototipo SLICE 1.0

fare una distinzione tra pieghe di monte (mountain fold) e pieghe di valle (valley fold), a seconda che esse tendano a spostarsi, chiudendosi, nella direzione positiva o negativa lungo l'asse z. Si definisce pattern di piegatura (crease pattern) lo schema che mostra tutte le pieghe che sono richieste su di un foglio per piegarlo secondo una precisa sequenza. In genere le pieghe di valle sono indicate con linea continua mentre quelle di monte con linea tratteggiata. Ogni pattern è caratterizzato da una tassellazione diversa (cioè una suddivisione di base) e in relazione a questo possiede diverse proprietà meccaniche e statiche. In particolare, sono tre i pattern maggiormente oggetto di interesse e studio in ambito architettonico: il Miura Ori pattern (Fig. 3.11), lo Yoshimura pattern e il Diagonal pattern. Sono dati dalla combinazione di pieghe e pieghe inverse: una serie di pieghe di valle e pieghe di monte sono piegate da quelle inverse per formare semplici superfici curve. La ricerca quindi si baserà sullo studio delle superficie foldable, con chiaro riferimento all'arte degli Origami.

PROTOTIPAZIONE RAPIDA

La combinazione di sistemi meccanici ed elettronici complessi per la movimentazione dei componenti responsivi necessita di un metodo di progettazione basato su strumenti e metodi di valutazione molto rapidi, per ridurre al minimo i tempi di sviluppo. Questo processo, che prende il nome di fabbricazione digitale, consiste processo manifatturiero sviluppato in primo luogo nei settori industriali come l'industria automobilistica e aerospaziale dove è richiesta precisione e produzione diretta, e oggi sempre più utilizzato nel settore delle costruzioni. È legato all'evoluzione delle tecnologie digitali che consentono un'interfaccia più diretta dalla progettazione, grazie a software parametrici e modalità di produzione, oggi realizzate da macchine CNC flessibili (Naboni and Paoletti, 2015). L'attuale approccio alla progettazione architettonica e alla fabbricazione digitale consente di concepire sistemi articolati e lavorare su elevato livello di personalizzazione dei componenti. Risulta importante valutare l'effettiva fattibilità costruttiva degli stessi, testare la loro funzionalità, e in questo scenario entra in gioco

appunto la prototipazione, che consente al progettista di dialogare, in tempi ridotti, con l'oggetto architettonico da lui realizzato. Solitamente nella realizzazione di un prototipo, si fa affidamento alla tradizionale concezione industriale di metodologia produttiva meccanica: la lavorazione del materiale di partenza per asportazione di truciolo (metodi sottrattivi). Anche la produzione tramite formatura (applicando forze meccaniche o termiche al materiale di partenza per produrre l'oggetto per deformazione) fa uso di stampi che a loro volta vengono generati per metodologie sottrattive. In questi ultimi anni in realtà sta prendendo sempre più piede l'approccio completamente opposto: cioè la realizzazione di un prototipo utilizzando l'apporto graduale di materiale, proprio come avviene nel processo di costruzione tradizionale, in cui ogni oggetto è dato dalla somma e sovrapposizione di diversi strati o componenti. Questo è il metodo additivo e in genere ci si riferisce a questa concezione e alle tecnologie che la rendono possibile come prototipazione rapida (Paoletti, 2017). La prototipazione rapida, quindi, permette in tre dimensioni utilizzando un file CAD tridimensionale. L'oggetto viene costruito per stratificazione, ogni nuovo strato viene incollato o fuso al precedente (Naboni and Paoletti, 2015).

SISTEMA DI CONTROLLO

Una facciata adattiva prevede l'integrazione elementi tecnologici quali sensori, microprocessori, sistemi di gestione automatici che in combinazione interpretano un input per rispondere dinamicamente. Gli elementi modulari caratterizzanti la facciata possono essere gestiti da un sistema centrale oppure ad componente di gestione dedicato per i singoli moduli di una facciata (Attia et al., 2018). La gestione può essere combinata a sistemi avanzati di riscaldamento, ventilazione e condizionamento dell'aria (HVAC) (Novelli, Shultz and Dyson, 2015): la logica alla base di questa tipologia è quella di raggruppare le variabili che riguardano il controllo attivo dei servizi dell'edificio in relazione alle esigenze di facciata e di comfort interno (Attia et al., 2018). Per il caso in esame la ricerca è stata orientata su sistemi basati su un sistema di gestione decentralizzato, che consentisse di ampliare la flessibilità d'uso della soluzione proposta e parallelamente fornire una migliore distribuzione della luce diurna all'interno dello spazio (Yekutieli and Grobman, 2014). Il controllo automatizzato delle facciate adattive con uno schema decentralizzato richiede la localizzazione di un sistema di gestione e controllo individuale per ogni singolo componente di facciata. In alcuni casi, attività automatizzate derivate da pacchetti di istruzioni molto semplici non richiedono schede o microcontrollori

molto costosi. Ad esempio, per la realizzazione di sistemi intelligenti capaci di reagire istantaneamente quando un evento viene rilevato tramite alcuni sensori. In effetti, schede a microcontrollore semplici ed economiche possono risolvere molti di questi compiti di I/O di laboratorio. Tali schede sono piattaforme di elaborazione fisica basate su un semplice microcontrollore e un ambiente di sviluppo per la scrittura di software. Questi dispositivi possono essere utilizzati per sviluppare oggetti interattivi, prendendo input da una varietà di interruttori o sensori e controllando una varietà di luci, motori e altre uscite fisiche (Banzi and Shiloh, 2014). I sistemi di questo tipo di solito possono essere autonomi o possono comunicare con software in esecuzione su un computer.

Nel caso in esame si è fatto affidamento su una soluzione molto diffusa e a basso costo, la scheda Arduino prodotta dalla Atmel. Arduino è una piattaforma elettronica open source basata su un circuito stampato che integra un microcontrollore con dei pin connessi alle porte I/O (input/output), un regolatore di tensione e un'interfaccia USB che permette la comunicazione con un computer (Fig. 3.13) per la sua programmazione (D'Ausilio, 2012). Il software per il controllo e la programmazione del dispositivo elettronico è un ambiente di lavoro integrato multipiattaforma chiamato Arduino IDE (Fig. 3.14) basato su codice Java che, utilizzando un linguaggio di programmazione semplice ed intuitivo derivante da C e C++, permette agevolmente la scrittura di programmi anche ad utenti poco esperti. Prima dell'avvento di piattaforme hardware come Arduino, le fasi di prototipazione hardware e software di sistemi automatizzati risultavano essere dispendiose e molto complesse (Candelas et al., 2015).

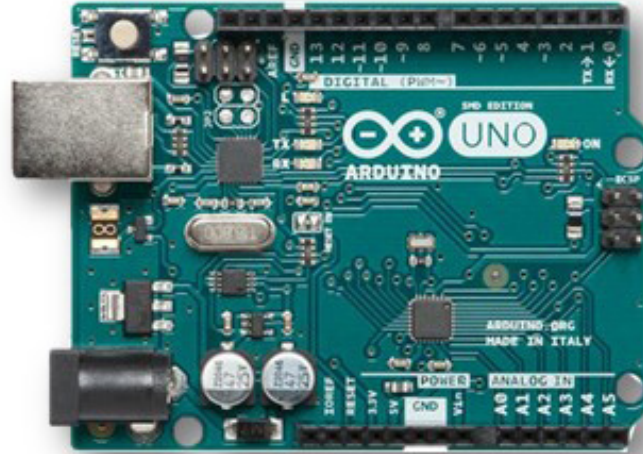


Fig. 3.13. Scheda Arduino UNO V3

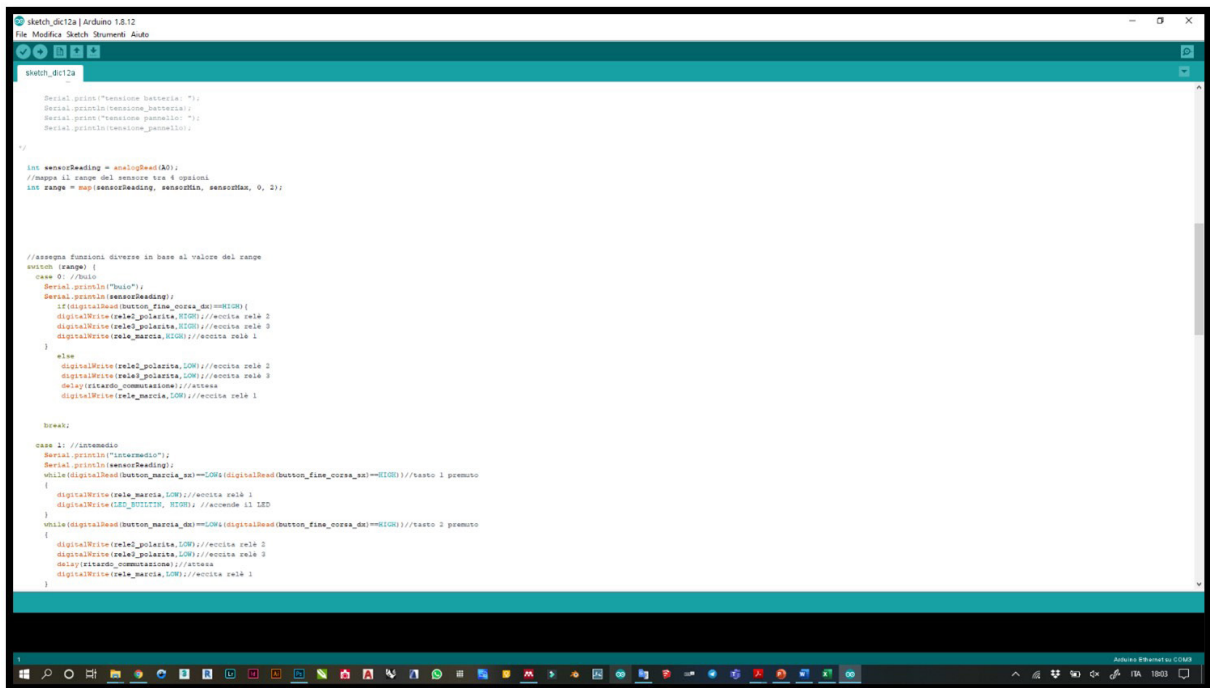
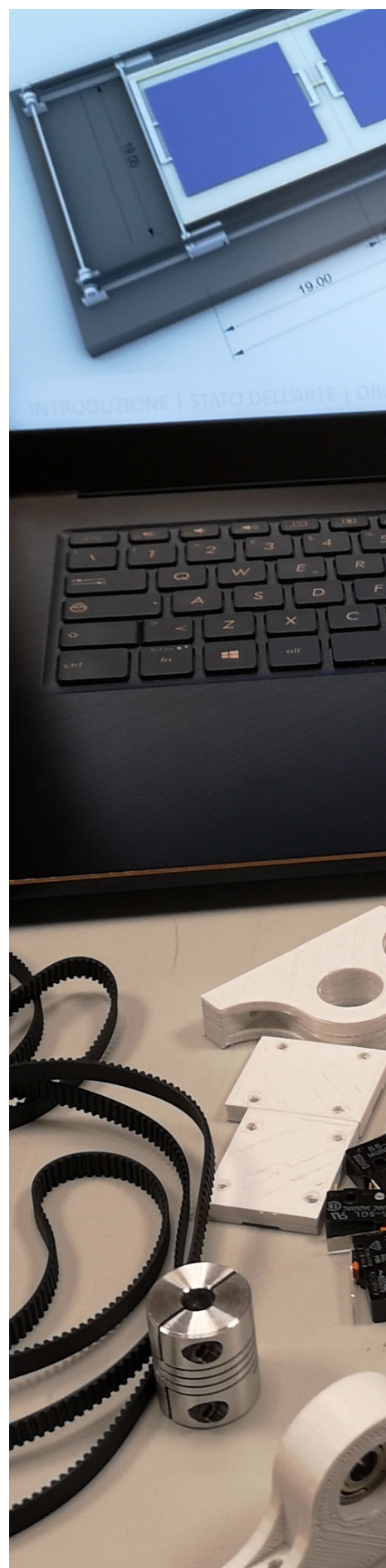
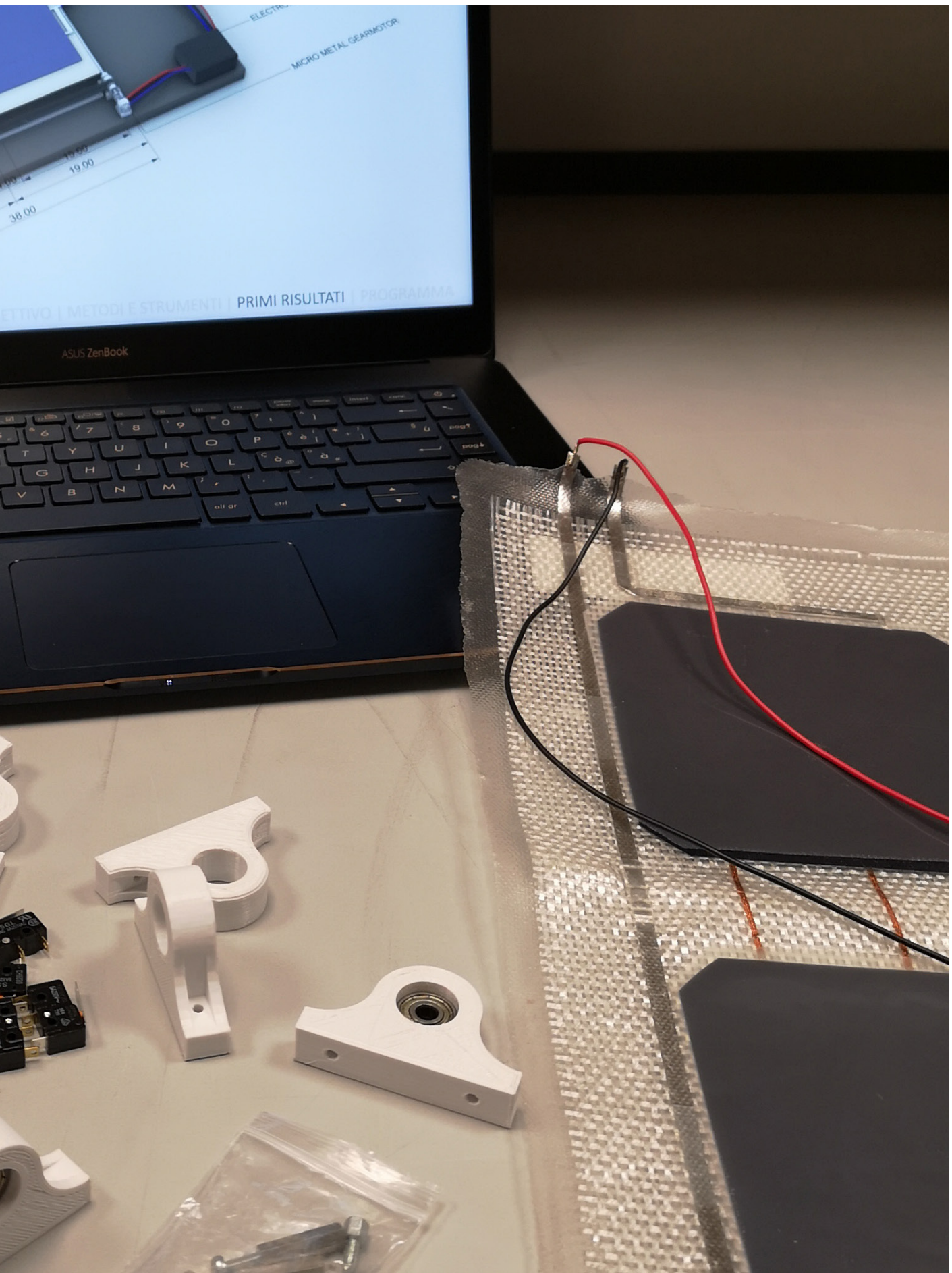


Fig. 3.14. Ambiente di sviluppo Arduino IDE

4. METODI E STRUMENTI





La ricerca SLICE mira allo sviluppo di un componente innovativo per involucri adattivi, con l'integrazione di tecnologia fotovoltaica, dotato di cinematiso basato sulla piega dello stesso. Questa caratteristica rappresenta un parametro importante nella definizione del materiale e del sistema di produzione dell'energia tramite tecnologia fotovoltaica. Infatti, il supporto dovrà essere leggero, flessibile e pre-piegabile tramite termoformatura, mentre la tecnologia andrà selezionata tenendo conto dell'articolata geometria dei tasselli e delle criticità legate proprio alle linee di piega. Dopo la caratterizzazione del materiale base, è stata condotta un'analisi attenta sulle geometrie ad origami partendo dallo studio di modelli fisici realizzati con materiali alternativi per la scelta di sistema di piega e di cinematiso.

Questo ha permesso di focalizzare l'attenzione sulla realizzazione di prototipi che, mediante un processo di prototipazione rapida, hanno consentito di definire la componentistica del sistema di cinematiso e testare le funzionalità del componente in condizioni ambientali reali. Per ultimo è stato portato avanti lo studio di integrazione del componente su casi studio, per valutare l'efficacia della soluzione anche dal punto di vista del design e testarne l'adattabilità.

MATERIALE BASE

Per ottenere il materiale con le opportune caratteristiche sono state testate due alternative: nel primo caso si è pensato di utilizzare un tessuto di lino Biotex Flax 400 g/m² 2x2 Twill prodotto dalla Composite Evolution; nel secondo caso un tessuto in fibra di vetro, in modo da poter testare confrontare due diversi livelli di resistenza meccanica (Tab. 4.1).

L'uso di un elastomero termoplastico come matrice consente di garantire la piegabilità del composito, permettendo di perfezionare un processo secondario di piegatura basato su modellazione a caldo senza degradare il prodotto stesso. Grazie alla reticolazione della sua struttura, sarà possibile sfruttare la deformazione elastica del materiale per garantire il cinematiso del componente.

Ai fini delle sperimentazioni sono stati selezionati due copolimeri termoplastici, il SEBS e l'EVA, dotati di buona resistenza agli agenti atmosferici e facilità di lavorazione tramite termoformatura.

Il SEBS (Stirene-Etilene-Butilene-Stirene) è utilizzato generalmente in profili per oggetti casalinghi e di ferramenta, cavi e custodie. È caratterizzato da una buona resistenza UV, da diversi gradi di trasparenza ed è 100% riciclabile. L'elastomero viene fornito in pellets e per ottenere un film sottile da sottoporre poi a ter-



Fig. 4.1. Campioni di Biotex Flax 400 g/m² 2x2 Twill e di SEBS prima della laminazione

moformatura o laminazione sottovuoto con il rinforzo, i pellets sono stati estrusi con CollinTeach-line con estrusore a testa piana tipo E16T e rulli di raffreddamento tipo CR72T, in dotazione presso il CNR (IPCB) di Catania, che ha gentilmente fornito un quantitativo di materiale utile alle sperimentazioni iniziali.

L'EVA (Etil-vinil-acetato) è un polimero largamente utilizzato nella produzione di pannelli fotovoltaici come strato saldante per la sua elevata adesività e impermeabilità. È dotato di grande elasticità, ottima resistenza alla luce, buone capacità antivibranti, ottima memoria elastica e buona resistenza alla lacerazione. È caratterizzato da una struttura polimerica satura, che lo rendono un polimero particolarmente stabile, quindi soggetto a degradazione solo a temperature molto elevate e resistente all'ozono e ai raggi UV, motivo per il quale è spesso impiegato nel settore fotovoltaico. Il film di EVA utilizzato è prodotto dalla SKC films, tipologia EF2N dallo spessore di 450 micron. (Tab. 4.2).

Al fine di ottimizzare il materiale composito finale e provvedere ad un'ulteriore protezione della superficie dedicata all'integrazione delle celle fotovoltaiche, è stato testato il PET (polietilene tereftalato), un pannello laminato multilayer in pilestere (polimero termoindurente), utilizzato anch'esso nella produzione di pannelli fotovoltaici come strato di rivestimento, che è estremamente impermeabile, dotato di eccellente resistenza agli agenti atmosferici e allo sporco, oltre che alla maggioranza dei composti chimici (Tab. 4.3).

Definizione della stratigrafia

In primo luogo, sono stati realizzati campioni di dimensione 20 cm x 40 cm in diverse stratigrafie, con l'alternanza di strati di EVA, SEBS e PPE+ per caratterizzare flessibilità e resistenza. È stato usato un processo di produzione a sottovuoto in Laminatore singolo PANAMAC S.r.l. SL-DM 231 in dotazione presso l'azienda partner Meridionale Impianti S.p.A (Tab. 4.4).

| COMPOSITE EVOLUTION Biotex Flax 400 g/m² 2x2 Twill | | | |
|---|--------------------------------------|-------------------------------|-----------|
| Specifications | | | |
| Weave Style | 2x2 Twill | | |
| Fabric Weight | 400 g/m ² | | |
| Width | 1250 mm (Others on request) | | |
| Typical Ply Thickness | 0.6-0.8 mm, depending on process | | |
| Processing | | | |
| Biotex reinforcements are suitable for standard processes including vacuum bagging, infusion, RTM and press moulding. Also available as prepregs as part of the Evopreg range. | | | |
| | | | |
| Example Mechanical Properties | | | |
| | Vacuum infused unsaturated polyester | Autoclave cured epoxy prepreg | |
| Fibre Volume Fraction | 31% | 45% | |
| Density | 1.29 g/cm ³ | 1.33 g/cm ³ | |
| Tensile Modulus | 8.5 GPa | 11.2 GPa | ISO 527-4 |
| Tensile Strength | 72 MPa | 101 MPa | ISO 527-4 |
| Elongation | 2.3% | 1.8% | ISO 527-4 |
| Flexural Modulus | 7 GPa | 8.2 GPa | ISO 14125 |
| Flexural Strength | 115 MPa | 156 MPa | ISO 14125 |
| Typical mechanical properties of moulded laminates tested at ambient temperature. | | | |
| | | | |
| Safety | | | |
| Biotex Flax reinforcements are based on renewable biomass and have fewer health and safety concerns than many conventional alternative materials. However, typical precautions should be taken when handling the material including using appropriate PPE and adequate ventilation. | | | |

Tab. 4.1. Datasheet Biotex Flax 400 g/m² 2x2 Twill

| SKC – EVA Sheets | | | | | | | |
|---|------------------|---------------------|-----------|------|----------|------|-------------|
| Property | | Unit | Value | | | | Test Method |
| | | | ES2N | EF2N | ES3N | EF3N | |
| Type | | - | Standard | Fast | Standard | Fast | |
| Typical Thickness | | µm | 200~1,000 | | | | - |
| Melting Temperature | Before cross ing | °C | 71 | 71 | 60 | 60 | ASTM D-3418 |
| | After cross ing | g/cm ³ | 0.95 | 0.95 | 0.96 | 0.96 | ASTM D-792 |
| Specific Heat | After cross ing | cal/°C·g | 0.58 | 0.58 | 0.55 | 0.55 | JIS K-7123 |
| Thermal Conductivity | After cross ing | Kcal/m·h·°C | 0.2 | 0.2 | 0.18 | 0.18 | ASTM E-1530 |
| Tensile Strength | Before cross ing | Kgf/mm ² | 0.5 | 0.5 | 0.4 | 0.4 | ASTM D-882 |
| | After cross ing | Kgf/mm ² | 2.1 | 2.1 | 2 | 1.8 | ASTM D-882 |
| Elongation | Before cross ing | % | 600 | 600 | 600 | 600 | ASTM D-882 |
| | After cross ing | % | 600 | 600 | 600 | 600 | ASTM D-882 |
| Tensile Modulus | After cross ing | Kgf/mm ² | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 0.7 | ASTM D-882 |
| Light Transmittance | Before cross ing | % | 91 | 91 | 92 | 92 | ASTM D-1003 |
| | After cross ing | % | 91 | 91 | 92 | 92 | ASTM D-1003 |
| Adhesive Strength | to Glass | N/cm | 60 | 60 | 60 | 60 | ASTM D-903 |
| | To TPT | N/cm | 60 | 60 | 60 | 60 | ASTM D-903 |
| Cross ing rate (150 °C) (Standard 20 min, Fast 10 min) | | Gel% | >85 | >85 | >85 | >85 | SKC method |
| Water Absorption (20 °C, 20 min) | | % | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | JIS K-7209 |

Tab. 4.2. Specifiche delle proprietà tipiche dei prodotti in fogli EVA prodotti da SKC. In evidenza le proprietà del prodotto utilizzato per la sperimentazione sui campioni

| ITEM NO.: DS069 | | | |
|---|---------------------|---------------|-------------------------------|
| DESCRIPTION: 1360 DUN-SOLAR™ PPE | | | |
| | | | |
| Construction | Unit | value | Method |
| PET | µm | 50 | internal |
| PET | µm | 190 | |
| Adhesion promoting film (PE/EVA) | µm | 100 | |
| Total Product | µm | 360 +/- 5 % | |
| Properties of laminate | | | |
| Tensile strength at break MD/CD | N/mm ² | 125/150 | ASTM D 882A |
| Elongation at break MD/CD | % | 150/105 | ASTM D 882A |
| Peel strength PET/PET | N/10 mm | > 8.0 | Internal method, 90° angle |
| Peel strength PET/PE | N/10 mm | destruct | |
| Peel strength PE/ EVA | N/10 mm | destruct | |
| Shrinkage MD/CD | % | < 1.2 / < 0.6 | Internal method/30 min @150°C |
| Water Vapour Permeability | g/m ² .d | < 2.0 | DIN 53122; 38 °C / 100 % RH |
| Partial discharge test | VDC | > 1000 | IEC 60664-1 |
| UV- Stability: No visible changes after a high performance UV- Stress testing (IEC 61215) | | | |
| SHELF LIFE: 6 month maintained in original packaging at 20 +/- 5oC and 50 +/- 20 % RH | | | |

Tab. 4.3. Datasheet DUN-SOLAR™ PPE 1360

| | |
|--------------------------|--------------------------------|
| Temperatura di lavoro | 160° (200° optional) |
| Area | 2 m ² (2000 x 1000) |
| Pressione vuoto | < 1 millibar |
| Spessore modulo | 20 mm (30 mm optional) |
| Alimentazione elettrica | 380V 50/60Hz |
| Alimentazione pneumatico | 6-7 bar |
| Controllo operatore | Touch-screen |

Tab. 4.4. Scheda tecnica del laminatore PANAMAC S.r.l. SL-DM 231 Laminatore progettato per laminare n. 1 modulo, i moduli fotovoltaici laminati con SL-DM231 rispettano le normative IEC 61215 – IEC 61646 – IEC 61730



Fig. 4.2. Laminatore PANAMAC S.r.l. SL-DM 231

I parametri di produzione da variare per l'ottimizzazione del materiale attraverso il processo di laminazione sottovuoto sono:

- rapporto matrice-rinforzo
- tempo di ciclo
- temperatura di ciclo
- agenti per il distacco dalla macchina.

La scelta dei parametri è stata definita a seguito di prime prove per la produzione del materiale. Per il processo di laminazione a sottovuoto sono stati adottati due diversi parametri di tempo e temperatura al fine di ottimizzare la compenetrazione tra la matrice e il tessuto di rinforzo nel composito. La temperatura minima di processo è stata fissata a 145°, temperatura in cui sia l'EVA che il SEBS hanno permesso di raggiungere una buona compenetrazione con il tessuto di rinforzo.

Per una prima valutazione del materiale prodotto i campioni verranno sottoposti ad analisi visiva, analisi del tatto e per i campioni che avranno superato queste prove un'analisi più specifica attraverso il metodo cross section.

Analisi visiva

Con questa analisi si cerca di rilevare attraverso l'osservazione la presenza di difetti o imperfezioni derivanti dal processo di produzione, caratteristiche che potrebbero eventualmente compromettere le prestazioni o la funzionalità del materiale. Nello specifico si rilevano la presenza di bolle d'aria, la delocalizzazione delle fibre di rinforzo, la bruciatura del rinforzo o della matrice.

Analisi al tatto

Si basa su un controllo sensoriale al tatto del campione, che per via dello sfregamento con il palmo della mano o della punta delle dita per verificare la presenza di disomogeneità di materiale nello spessore e nella consistenza, punti di non perfetta compenetrazione con il tessuto di rinforzo o distacchi.

Analisi dello spessore

I campioni al termine del processo di produzione vengono sottoposti a misurazioni e registrate almeno 5 misure per verificare la costanza dello spessore, indice di corretta fusione tra matrice e rinforzo.

Analisi cross section

Il campione viene tagliato per essere sottoposto ad un'analisi al microscopio della sua sezione trasversale, in modo da osservare attraverso gli ingrandimenti il livello di compenetrazione tra matrice e tessuto di rinforzo.

Prova di trazione monoassiale

I campioni selezionati per la caratterizzazione finale, vengono sottoposti sotto forma di provette di dimensioni standard a prova di trazione monoassiale. I test sono stati effettuati seguendo le direttive delle norme UNI EN ISO 527-4. La norma descrive i tipi di provette e le particolari condizioni di prova per determinare, seguendo i criteri generali dati dalla UNI EN ISO 527-1, le caratteristiche a trazione di materie plastiche composite rinforzate con fibre lunghe disposte in strati non unidirezionali. I test sono stati eseguiti con una macchina Macchina di Trazione monoassiale INSTRON 5980 Series - 5982 in dotazione al Laboratorio Ufficiali Prove Materiali e Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura DICAR (Fig. 4.3).

TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA

Sono stati realizzati vari campioni di materiale composito con celle fotovoltaiche di diversa tipologia per testarne la compatibilità con i materiali e la destinazione finale.

Tenendo conto della geometria scelta per la tipologia di involucro e considerata la recente evoluzione in termini di produzione e flessibilità, la scelta della tecnologia fotovoltaica è stata orientata verso due opzioni (Fig. 4.4):

- celle solari in silicio policristallino
- celle solari monocristallino flessibile.

Queste sono state posizionate in corrispondenza delle falde evitando di attraversare le pieghe. In entrambi i casi si è voluto testare il livello di resistenza flessibilità offerto del prodotto nell'ottica di ottimizzare la stratigrafia del materiale composito di substrato. Nello specifico, sono state utilizzate celle in silicio policristallino della MAIN Isotex fornite dall'azienda partner Meridionale Impianti S.p.A. e celle in silicio



Fig. 4.3. Macchina di Trazione monoassiale INSTRON 5980 Series - 5982

monocristallino SunPower Maxeon C60 (Tab. 4.5). Le ultime vantano un livello di efficienza tra i più alti sul mercato (pari a circa il 23%) e sono dotate di tecnologia back-contact, ovvero layer inferiore del wafer della cella totalmente in rame e completamente conduttivo. Grazie a questa particolare struttura, sono caratterizzate da valori di flessibilità e resistenza superiori alle tradizionali celle cristalline, senza perdite di potenza in caso di danneggiamento. Inoltre, la loro struttura permette di ottenere celle sagomate ad hoc, in maniera da poter coprire uniformemente i tasselli generati dalla distribuzione di piega prescelta, e ottimizzare il sistema di collegamento delle celle, attraverso l'uso di appositi elementi connettori, denominati "dog bone".

Partendo dall'adozione delle celle in policristallino, è stato progettato un campione per l'ottimizzazione del sistema di collegamento elettrico tra le stesse celle. A seguito dei test di verifica sui primi due campioni realizzati, sono state studiate nuove stratigrafie parallelamente all'adozione delle celle monocristalline, al fine di confrontare il rapporto dimensioni/produzione e la resistenza del materiale.

Al termine del processo di laminazione, i campioni sono stati testati con una lampada specifica che funge da simulatore solare per misurare la tensione del modulo fotovoltaico installato e la costanza di questi valori per un periodo di tempo di cinque minuti.

Ispezione visiva

Attraverso un'osservazione del campione illuminato da una sorgente luminosa e disposto su un piano di sostegno, si cerca di rilevare eventuali anomalie o imperfezioni, con attenzione sui collegamenti tra celle e l'eventuale presenza di bolle d'aria o punti di distacco sulle stesse.

Misurazione di isolamento in ambiente umido

Con questa prova si cerca di valutare l'isolamento del modulo in condizioni ambientali umide e verificare che l'umidità dovuta a pioggia, nebbia, rugiada o neve disciolta non penetri nelle parti attive del circuito del modulo, dove potrebbe provocare corrosione, un guasto a terra o un rischio per la sicurezza.

Prove di corrosione in camera salina

| Modello | MAIN Isotex | SUNPOWER Maxeon |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| Tipologia | Silicio policristallino | Silicio monocristallino |
| Dimensioni | 156 mm x 156 mm | 125 mm x 125 mm |
| Potenza nominale | 4W | 3,3W |
| Tensione nominale | 0,6 V | 0,57 V |
| Corrente massima | 6,6 A | 5,8 A |

Tab. 4.5. Schede tecniche delle celle utilizzate. Valori in condizioni standard (STC): Irradiazione solare 1000 W/m² con spettro AM 1,5 ad una temperatura cella di 25 °C

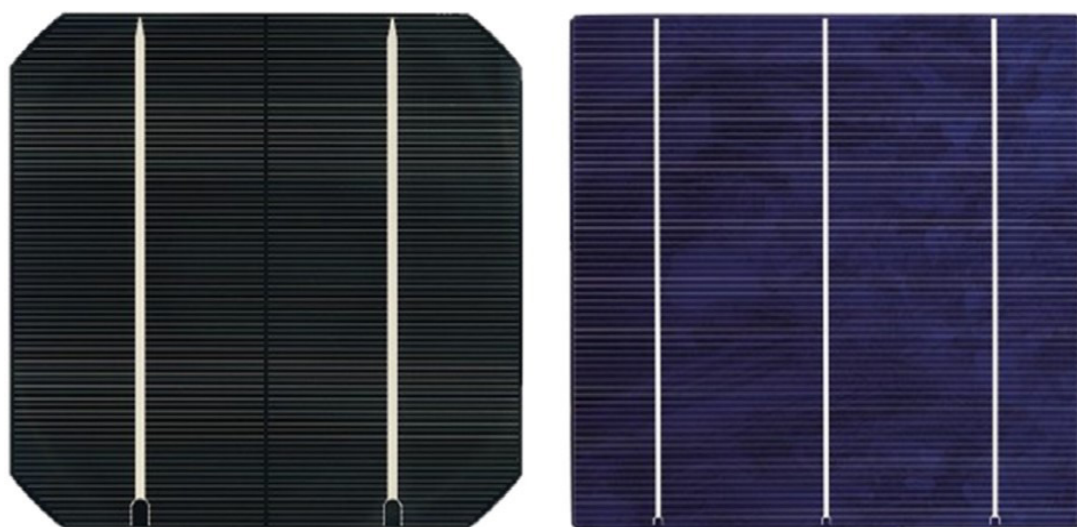


Fig. 4.4. Cella fotovoltaica in silicio monocristallino (a sinistra) – Cella fotovoltaica in silicio policristallino (a destra)

Le prove mirano a testare la resistenza del campione contro la corrosione. Il campione viene disposto in una camera apposita dove all'interno viene nebulizzata una soluzione salina per ricreare un ambiente fortemente corrosivo. Al termine del test viene valutato il livello di corrosione del campione.

Prove in camera climatica

Le prove consistono nel sottoporre il campione ai raggi solari in combinazione con la variazione della temperatura e dell'umidità, simulando cicli di vita accelerati per valutare la sua degradazione e verificare la diminuzione delle prestazioni. Le prove sono state effettuate presso l'azienda partner Meridionale Impianti S.p.A. attraverso l'utilizzo di una camera climatica SAI s.r.l. P017000, in dotazione presso gli impianti di produzione di pannelli fotovoltaici. (Fig. 4.5).

PIEGA DEL MATERIALE

La piegatura del composito avviene mediante il processo di termoformatura, una tecnica consolidata per lo stampaggio a caldo di materie plastiche, che avviene sotto pressione. Il processo consta di due fasi: il riscaldamento del materiale polimerico fino alla temperatura di transizione vetrosa T_g e la deformazione del materiale fino al raggiungimento della forma desiderata, dovuta al contatto forzato con uno stampo. La sperimentazione è stata mirata alla determinazione dell'esatta temperatura di formatura atta a garantire il raggiungimento dello stato termoelastico, che consente un'adesione ottimale del materiale alla sagoma dello stampo. Il composito si termoforma una volta raggiunto lo stato termoelastico identificato dalla suddetta T_g e, dopo una fase di graduale raffreddamento, riacquista rigidità nella nuova configurazione mantenendo così la forma voluta. Questa dipende dal tipo di materiale, dal suo spessore e dalle modalità di riscal-

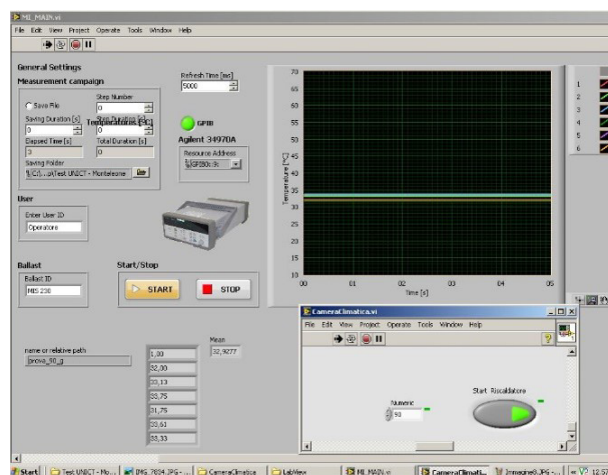


Fig. 4.5. Prove in camera climatica

damento impiegate (che si distinguono in conduzione, convezione o irraggiamento).

L'adozione di differenti pattern di piegatura rende necessaria la realizzazione di stampi differenti per la sagomatura e termoformatura del materiale nella configurazione scelta. Per questo motivo, sono stati progettati due differenti tipologie di stampi metallici riscaldati al fine poter definire il processo di post-produzione per il componente.

Stampo in lamiera sagomata

Nell'ipotesi di poter perfezionare una metodologia utile alla termoformatura del materiale per pattern di piega complessi, quali ad esempio il MiuraOri origami, in una prima fase è stato ritenuto utile realizzare uno stampo riscaldato in lamiera piegata per conduzione per la termoformatura ad una singola piega dei campioni realizzati di dimensioni 20 cm x 4,0 cm (Fig. 4.6). Lo stampo deve sicuramente garantire:

- diffusione ottimale del calore;
- perfetta aderenza tra le parti per imprimere al meglio la forma;
- resistenza della sezione per evitare che il pezzo si deformi a temperature elevate;
- dimensioni e peso contenuti per consentirne l'uso in forni e facilitarne la trasportabilità.

Prendendo come riferimento le dimensioni del campione base, è stato quindi progettato uno stampo costituito da due parti sagomate a V a 90°, perfettamente combacianti e tenute in ulteriore pressione da bulloni a farfalla posizionati sui margini inferiori e sulle falde laterali (Fig. 4.7). Esso è stato ottenuto per presso piegatura di 2 fogli di lamiera di spessore 0.8 mm, mentre per il riscaldamento dei campioni e le prove per la definizione dei parametri di termoformatura sono state impiegate n.4 di piastre riscaldate, poste in corrispondenza della parte inferiore e superiore dello stampo (Fig. 4.9). Al fine di monitorare la temperatura raggiunta dallo stampo sono state installate n. 4 termocoppie, ciascuna in corrispondenza di ogni singola piastra riscaldata.

Questa metodologia è stata preferita al riscaldamento in forno per monitorare in maniera più precisa l'andamento delle temperature sulle singole facce dello stampo. Le quattro piastre riscaldanti sono state posizionate sulle falde dello stampo in modo da coprirle per intero, in particolar modo vicine allo spigolo della piega in cui deve essere impressa la forma. L'uso degli stringenti ha permesso di incrementare la rigidità dello stampo, evitare quindi deformazioni dello stesso per via dell'alta temperatura, e aumentare l'aderenza di questo con il composito.

Conformatore multiplo

Nella seconda fase della ricerca è stato progettato un conformatore dotato di piastre in lamiera un acciaio inossidabile (tipologia Inox 304b) per il conferimento della forma, messe direttamente a contatto con resistenze in corrispondenza dei punti di piega di monte e di valle (Fig. 4.10). Per poter adattare lo stampo a campioni di tessuto di lunghezze differenti, è stato previsto un sistema di installazione semplificata delle lamiere attraverso il fissaggio con bulloni e dadi che consente l'estendibilità del conformatore con più elementi (Fig. 4.11).

Nel caso in esame, è stato considerato un campione di materiale avente la stessa larghezza del campione singolo iniziale, ma una lunghezza pari a tre volte la precedente, per ottenere un totale di tre pieghe di monte e due pieghe di valle, per un totale di 6 falde. Questo procedimento consente di ridurre sensibilmente i tempi di lavorazione del materiale, soprattutto se perfezionato per essere applicato su parti ancora più estese di tessuto.

Sono state predisposte due tipologie di piastre con spessore differente. È ottenuta così una piastra di tipo a, dallo spessore di 4 mm per le pieghe di monte e una piastra di tipo b, spessa 8 mm nelle pieghe di valle, per assicurare un lembo di tessuto non piegato di circa 10 mm per poter consentire il fissaggio di pinze con cuscinetti per lo scorrimento su due binari in corrispondenza delle pieghe di valle (Fig. 4.12).

Alle estremità delle piastre sono stati realizzati quattro fori, all'interno dei quali far passare altrettante barre filettate, necessarie per mantenere l'allineamento degli elementi durante l'assemblaggio e per consentire l'avvitamento di dadi e rondelle, deputati al serraggio finale dello stampo. Per scongiurare eventuali fenomeni deformativi nella mezzeria delle piastre durante la fase di riscaldamento sono stati impiegati degli stringenti, morsetti a vite che attraverso il loro fissaggio hanno consentito di incrementare ulteriormente la compressione tra le stesse piastre (Fig. 4.14).

La preparazione dello stampo inizia con la disposizione della prima piastra con le quattro barre filettate già inserite e del primo lembo di tessuto, che viene avvolto intorno la seconda piastra applicando una certa pressione per garantire la massima aderenza nel bordo di piega. Il procedimento si ripete fino all'ultima piastra (Fig. 4.13). Dopo aver realizzato il serraggio e fissato gli stringenti, lo stampo ed è introdotto in un forno industriale ed è stato testato a temperature e tempi di processo differenti per poter individuare i parametri definitivi.



Fig. 4.6. Disegno per la pre-piegatura del composito a piega singola

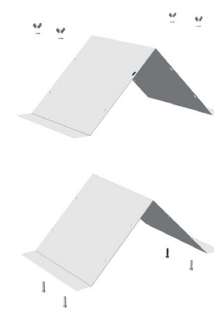


Fig. 4.7. Dettagli costruttivi dello stampo per la termoformatura singola

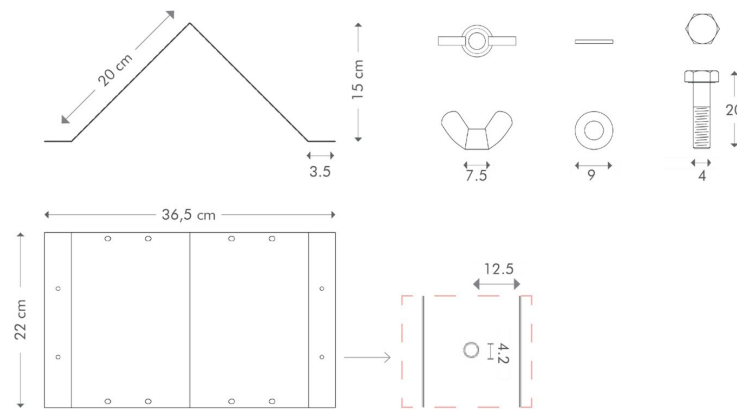


Fig. 4.8. Esploso assometrico dello stampo per la termoformatura singola



Fig. 4.9. A sinistra, stampo in lamiera per i campioni di dimensioni 20x40 cm durante le prove di termoformatura. A destra, risultato della piega ottenuta su un campione di composito

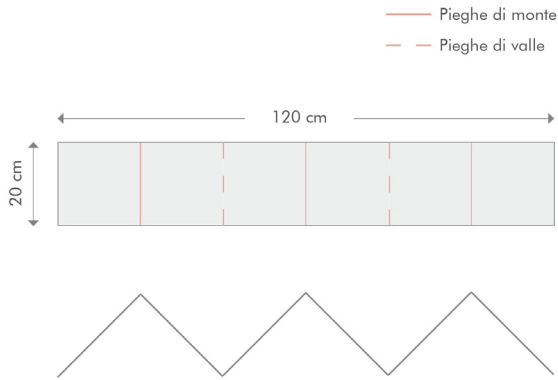


Fig. 4.10. Disegno per la pre-piegatura del composito a piega multipla

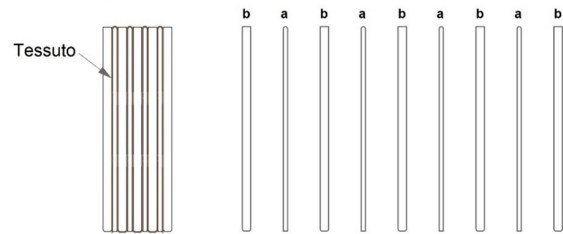
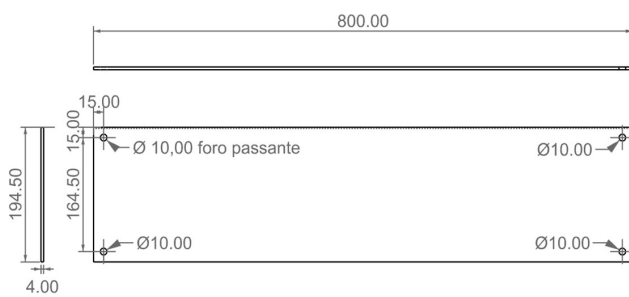


Fig. 4.11. Le piastre di differente spessore del conformatore

Piastra tipo a



Piastra tipo b

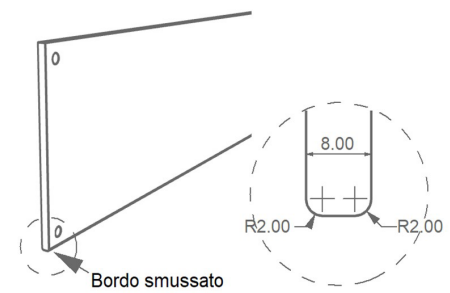
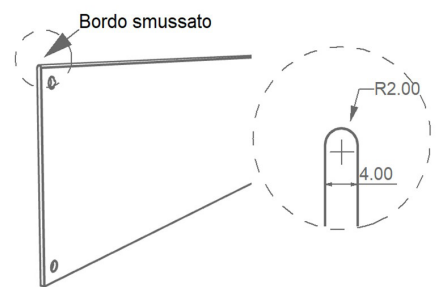
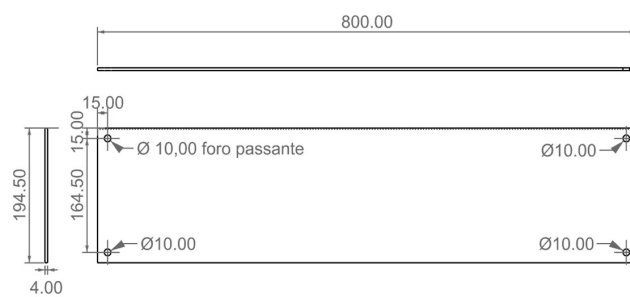


Fig. 4.12. Caratteristiche geometriche e dimensionali delle piastre costituenti il conformatore

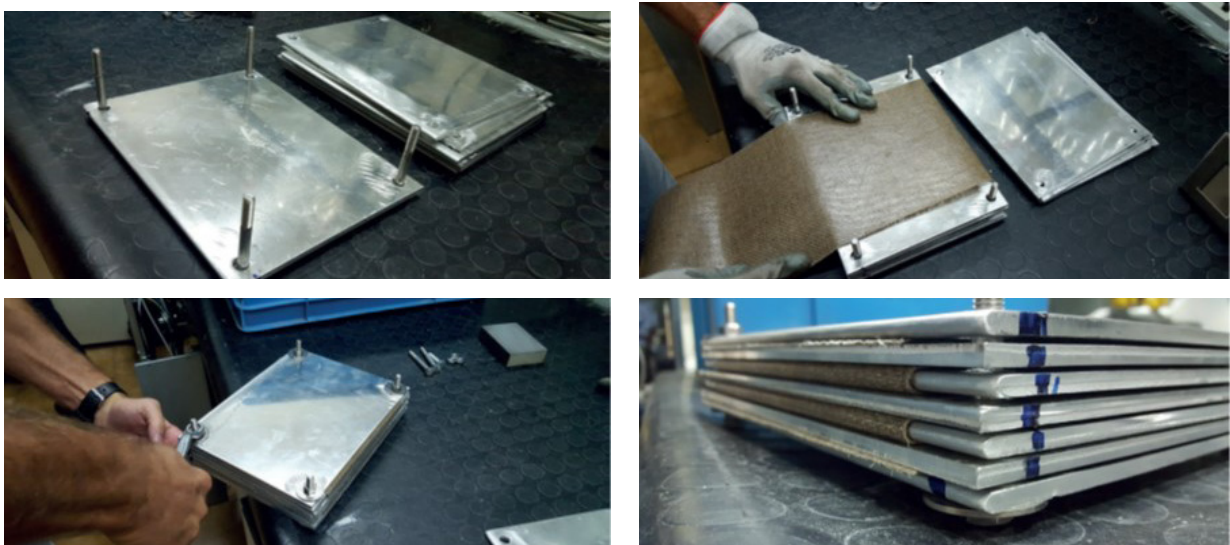


Fig. 4.13. Fasi di preparazione del conformatore delle piastre costituenti lo stampo

PROTOTIPAZIONE

L'attività di prototipazione rapida riguardante il modello in scala del componente ideato è stata supportata dalla tecnologia di stampa di stampa 3D e di taglio laser. Questa metodologia ha consentito di realizzare e testare in maniera speditiva elementi appositamente progettati con software di modellazione parametrica.

Il lavoro è stato sviluppato mediante il supporto delle attrezzature in dotazione al laboratorio ETA Lab Enabling Technologies for Architecture del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura DICAR.

In collaborazione con l'azienda Meridionale Impianti S.p.A. partner del progetto è stato messo a punto il sistema di produzione e accumulo dell'energia elettrica generata dalle celle fotovoltaiche oltre che la realizzazione dei campioni. Sono stati sviluppati tre prototipi differenti finalizzati a tre successive fasi di fenizione del componente.

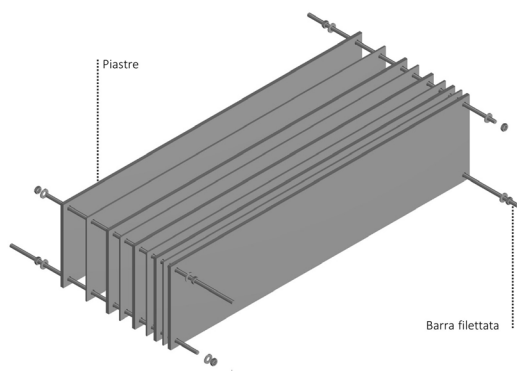


Fig. 4.14. Vista assonometrica del conformatore

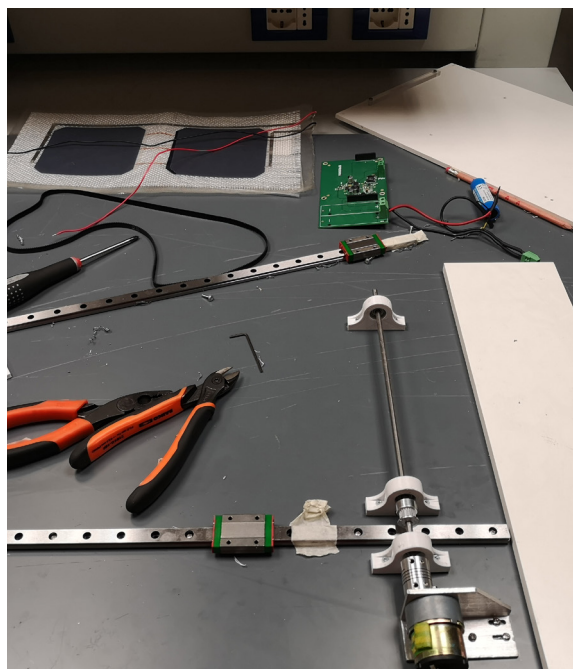


Fig. 4.15. Preparazione dei componenti del Prototipo SLICE 1.0 prima dell'assemblaggio.

Nello specifico con il nome SLICE 1.0 è stato identificato un prototipo base progettato e realizzato per i primi test di laboratorio riguardanti la definizione del sistema di movimentazione e di controllo automatizzato basato su istruzioni intelligenti semplici e caratterizzato da un pannello di piccole dimensioni. Il prototipo SLICE 2.0 è stato costruito per l'avvio di una campagna di test del componente in condizioni ambientali. In questo caso il sistema di automazione è stato oggetto di un profondo upgrade per l'aggiunta del pacchetto completo di funzioni adattive, mentre come elemento schermante è stato adottato un pannello di dimensioni paragonabili a quelle dell'anta di una finestra standard per ambienti. Infine con il prototipo SLICE4ICARO è stato possibile lavorare su un potenziamento del sistema di produzione e accumulo dell'energia elettrica generata. Nel proseguo verranno descritte le caratteristiche dei singoli prototipi messi a punto.

SLICE 1.0

La prima fase del progetto di prototipazione ha previsto la realizzazione del prototipo di piccole dimensioni SLICE 1.0, in grado di simulare il funzionamento base di un sistema di schermatura intelligente.

Il prototipo è costituito essenzialmente da quattro macroelementi:

- elemento schermante
- componentistica per il cinematismo
- sistema di ricarica della batteria
- apparato per il controllo automatizzato

Per l'elemento schermante è stato utilizzato uno dei campioni realizzati durante la fase di perfezionamento del processo di produzione del materiale di dimensioni 20 cm x 40 cm con una sola piega di monte, denominato SLICE 1.0.6. I connettori della parte elettrica del campione usato sono stati connessi ad una scheda di ricarica e ad una batteria per l'alimentazione del sistema di gestione automatizzata.

Per il progetto della componentistica meccanica sono stati adottati alcuni componenti derivati dal settore della robotica, mentre ulteriori elementi personalizzati, come supporti, carrelli, ecc, sono stati progettati con software di modellazione parametrica (Fig. 4.16) e successivamente realizzati mediante il supporto dalla tecnologia di stampa di stampa 3D e di taglio laser. Nello specifico il prototipo è stato dotato di comando mediante un motoriduttore connesso direttamente a due pulegge per il comando di una coppia di cinghie dentante da 5 mm, collegate direttamente ai carrelli guida per lo scorrimento dell'elemento schermante per le fasi di apertura e chiusura (Figg. 4.15 - 4.17). La gestione dell'attuazione del motoriduttore è stata de-

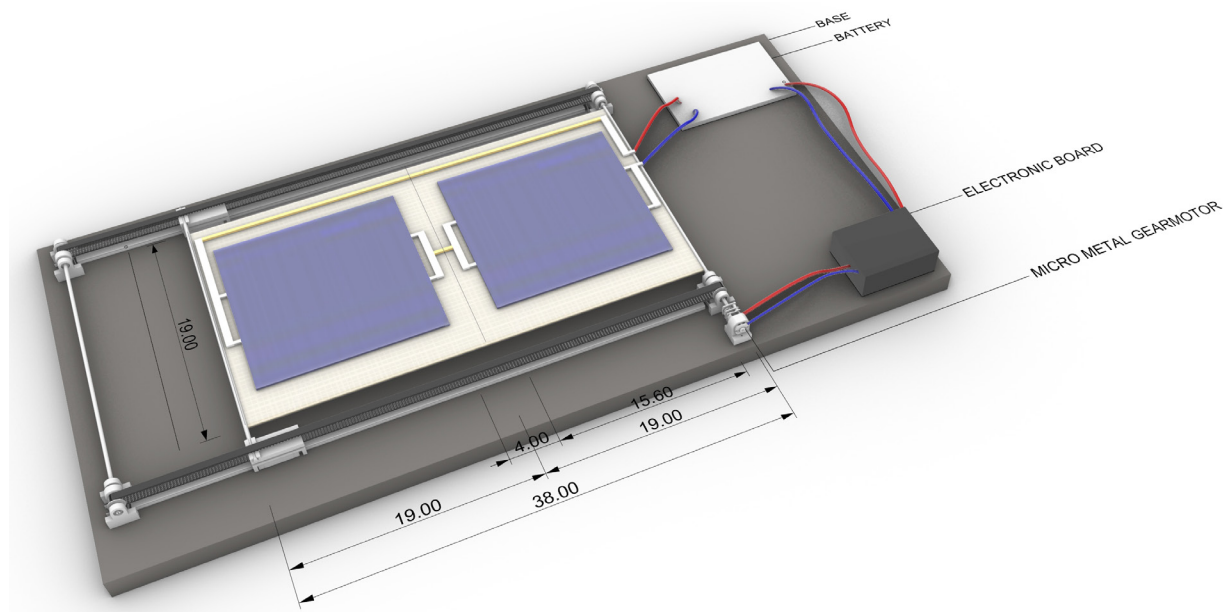


Fig. 4.16. Modello 3D del Prototipo SLICE 1.0.

mandata ad un microcontrollore di tipo Arduino, prodotto dalla Atmel, i cui pin sono stati connessi ai sensori oggetto dei test, ad un regolatore di tensione e ad una scheda relay per il comando del verso di rotazione dell'albero del motoriduttore (per consentire il piegamento o dispiegamento del componente).

Il campione SLICE 1.0.6 è stato collegato ad un circuito di ricarica e una batteria al litio di accumulo (Fig. 4.18). Il circuito di ricarica lavora come un convertitore step-up monolitico a bassa potenza e bassa tensione in grado di massimizzare l'energia generata da celle solari (o celle a combustibile), dove la capacità di gestione della bassa tensione di ingresso è estremamente importante. Il dispositivo utilizza inoltre un circuito di regolazione della tensione, che fissa la tensione di carica della batteria tramite un divisore di resistenza (Fig. 4.19).

ST SPV1040T - Caratteristiche

- Tensione di ingresso operativa da 0,3 V a 5,5 V
- Raddrizzatore sincrono interno da 140 mΩ
- Interruttore attivo di alimentazione interna da 120 mΩ
- Frequenza PWM fissa di 100 kHz
- Ciclo di funzionamento controllato dall'algoritmo MPPT
- Regolazione della tensione di uscita, protezione da sovracorrente e sovratemperatura
- Protezione della polarità inversa della sorgente di ingresso
- Avvio graduale incorporato
- Fino al 95% di efficienza
- Pacchetto TSSOP8 3x4,4 mm

Per l'assemblaggio del prototipo è stato effettuato uno shield con scheda Arduino Mega 2560, a cui sono sta-

ti due interruttori di marcia (per il controllo manuale) e due interruttori di fine corsa, una fotoresistenza per il monitoraggio dei valori di illuminamento. Sono stati connessi durante le prove inoltre un chip I2C di sensing per il monitoraggio di tensione e corrente di carica/scarica sulla batteria, tensione e corrente del carico (motoriduttore) e corrente delle due celle fotovoltaiche. Il cinematismo del componente è stato demandato ad un sistema meccanico composto da una coppia di Guide Lineari Mini MGN12H da 550mm, dotate di Cuscinetto Lineare Guida per Stampanti 3D, i cui carrelli sono stati fissati ad una coppia di cinghie Tiptiper a ciclo chiuso di lunghezza 852mm per la sincronizzazione 2GT-6, mosse da 4 pulegge 20 Teeth Bore 5mm GT2 SIENOC in alluminio, collegate ad un motoriduttore HSINEN 150:1 Micro Metal Gearmotor 3,6V. Il movimento del motoriduttore è comandato da una scheda Relè Elegoo IT-EL-SM-0064 Channel DC 5V Modulo Relè con Accoppiatore Ottico per Arduino, tramite la quale è possibile gestire l'avvio e il verso del suo moto. Lo schema di funzionamento del circuito prevede l'azionamento di un relè di marcia che comanda elettricamente il motoriduttore, mentre la polarità degli altri due ne determina il verso del moto proprio perché l'apertura contemporanea consente l'inversione di polarità (Figg. 4.20 - 4.21).

I pin di scrittura abilitati su Arduino sono:

- 4 per la polarità del relè 3
- 5 per la polarità del relè 2
- 6 per la marcia del relè 1

La parte hardware e software sviluppata per il prototipo SLICE 1.0, ha permesso le prime simulazioni in laboratorio ed il perfezionamento della componenti-

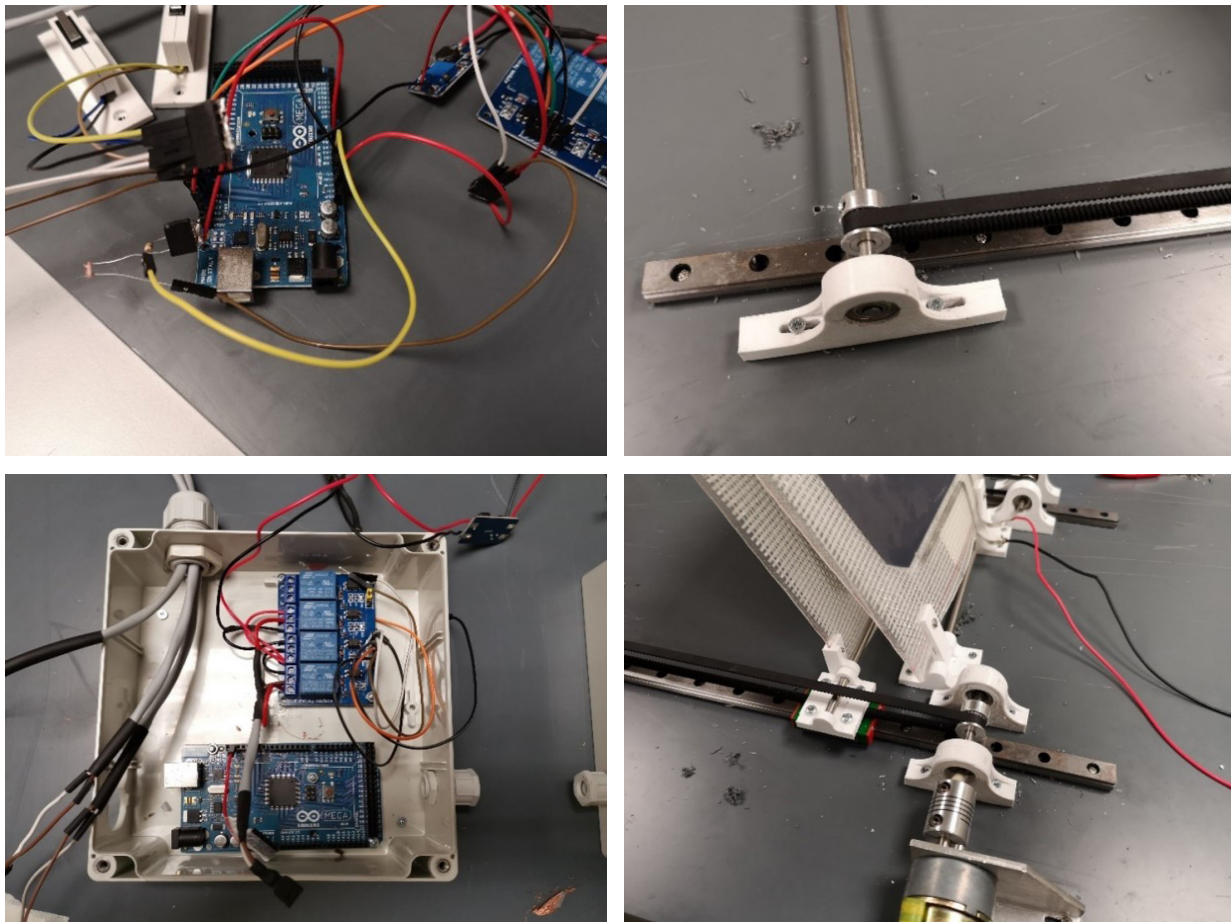


Fig. 4.17. Alcune parti del Prototipo SLICE 1.0.

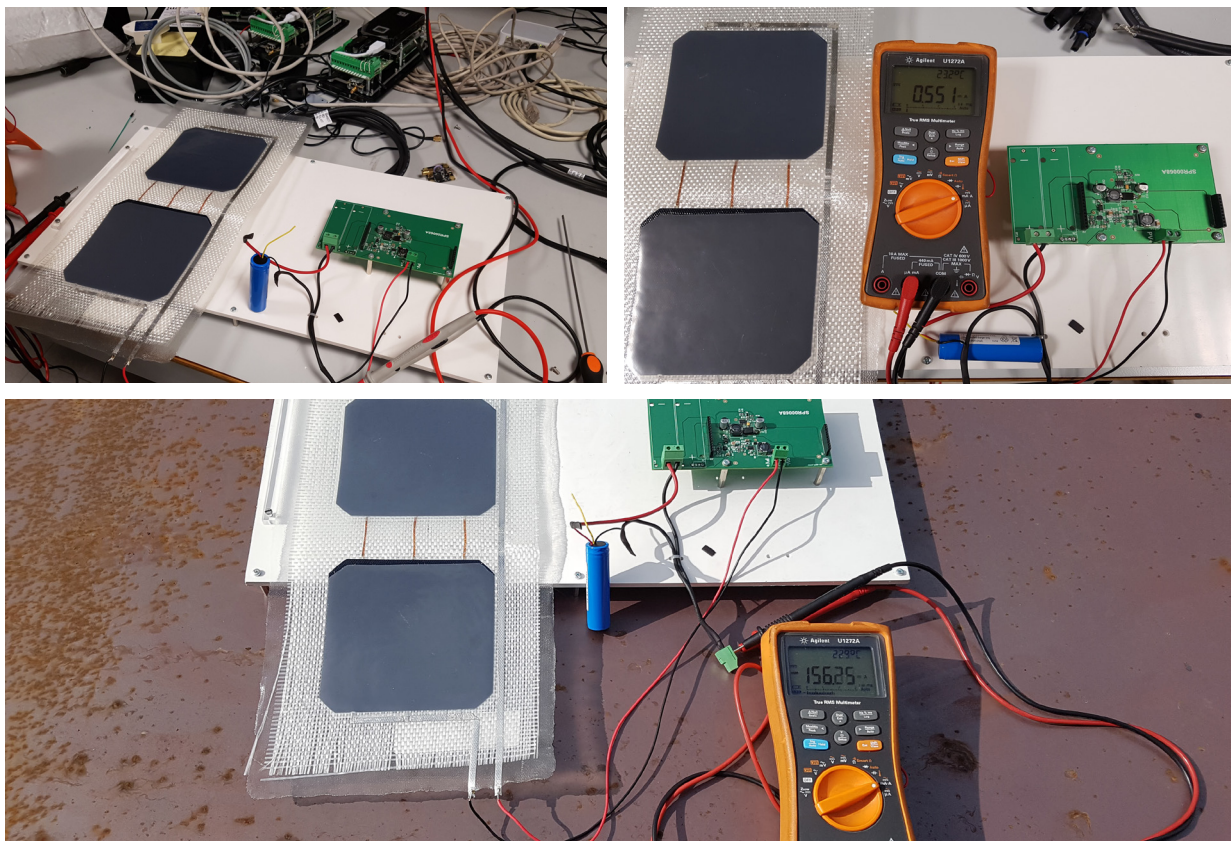


Fig. 4.18. Collegamento del campione al circuito di ricarica e test di funzionamento in condizioni outdoor

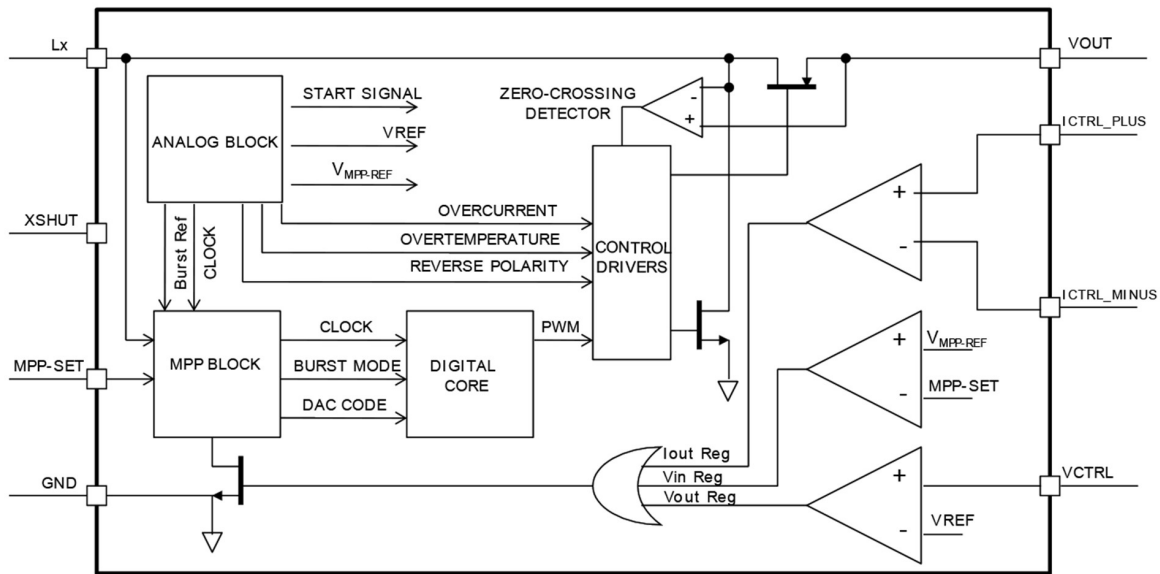


Fig. 4.19. Diagramma a blocchi del circuito della scheda di ricarica

stica e del sistema di movimentazione. Il codice è stato messo a punto tenendo conto di alcune istruzioni a pacchetto che vengono impartite dal microcontrollore al gruppo di movimentazione per interpretazione di specifici input esterni. Il sistema di controllo attraverso i sensori raccogliere i dati provenienti dai sensori, sulla base dei valori di lettura individua la casistica di riferimento a cui corrisponderanno precisi comandi. Il perfezionamento del codice è stato possibile tramite una campagna di simulazioni di funzionamento del componente preliminare in condizioni di laboratorio, riguardante la mappatura dei valori letti dai sensori per l'individuazione dei valori soglia ai test sui cicli di apertura-chiusura, e verifiche sul sistema di alimentazione e ricarica progettato.

Nello specifico il codice è stato sviluppato al fine di ottimizzare il livello di dispiegamento del componente nel rispetto di un determinato valore di illuminazione ambientale prestabilito. In questo caso il prototipo, successivamente alla lettura dei valori registrati da un sensore di luminosità, è capace di regolare il livello di apertura al fine di assicurare il rispetto di un valore di illuminamento, ottenuto per interpolazione dei dati analogici del sensore.

SLICE 2.0

Per il secondo prototipo è stato predisposto un nuovo supporto e sono state apportate una serie di modifiche hardware e software al fine di configurare una nuova versione del prototipo completa di tutte le funziona-

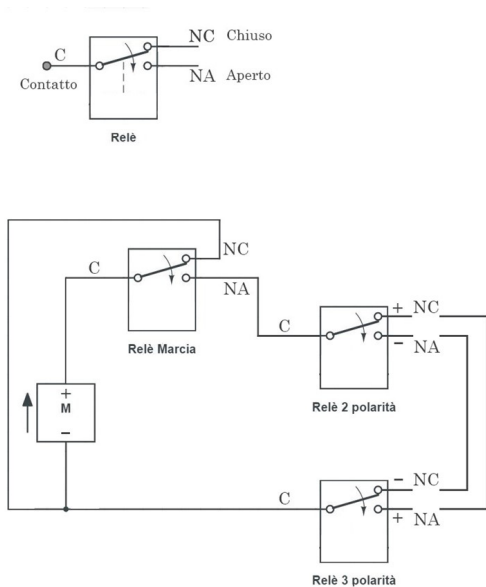


Fig. 4.20. Schema elettrico del funzionamento dei relè

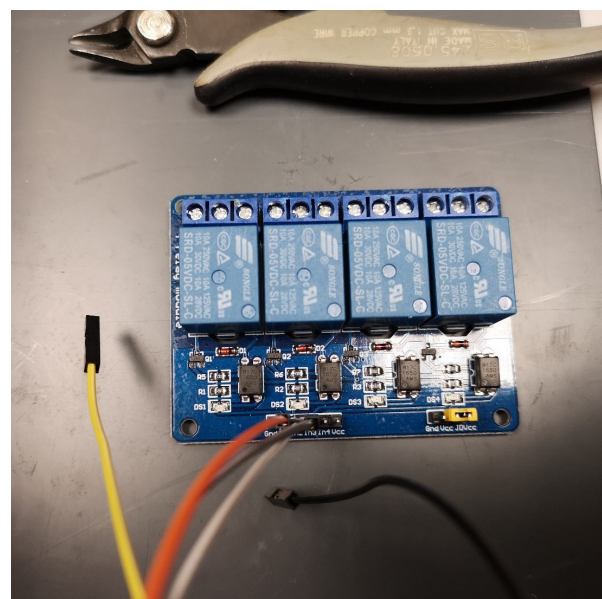


Fig. 4.21. Scheda Relè Elegoo IT-EL-SM-0064 Channel DC 5V

lità per l'avvio della campagna di test in condizioni ambientali. Prendendo in esame un infisso tipo con avvolgibile, si è provveduto alla realizzazione di un telaio ligneo in multistrato fenolico di pioppo. Questo è stato assemblato in maniera tale da essere facilmente montato e applicato ad un altro serramento semplicemente disponendolo contro il telaio fisso dello stesso. La predisposizione di ganci mobili in ottone permette al supporto di non ribaltarsi. Le componenti del cinematismo di SLICE 2.0 sono state derivate dal prototipo precedente ed hanno subito modifiche e/o integrazioni per essere adattate al nuovo supporto (Fig. 4.22).

Per la costruzione dei nuovi elementi è stata utilizzata la Laser Cutter CO2, modello 6030 WorkLine s.r.l., in dotazione presso il Laboratorio ETALab. Tale strumento acquisisce, attraverso il software dedicato, il disegno dell'oggetto da realizzare in formato vettoriale DXF. Impostati i parametri in base al tipo di supporto, quali velocità di taglio ed intensità del laser, la Laser Cutter in pochi secondi effettua la lavorazione.

Il codice di programmazione e la parte hardware sono stati oggetto di un profondo upgrade. Nello specifico, al fine di implementare la funzionalità intelligente del componente per involucri adattivi, su Arduino IDE il codice è stato riscritto con l'aggiunta di nuove istruzioni distribuite in maniera gerarchica per ottenere una macchina a stati finiti, solitamente conosciuta come macchina multitasking (Lee et al., 2018). Il prototipo ha la capacità di riconoscere scenari differenti e reagire adattivamente sulla base di casistiche pre-determinate, strettamente connesse all'esigenza di

assicurare un adeguato livello di comfort indoor o di ottimizzare la produzione di energia dalle celle fotovoltaiche inglobate.

SLICE4ICARO

I risultati dei test in condizioni ambientali reali e l'analisi dei dati di targa del componente ideato ha suggerito l'opportunità di valutare l'impiego del sistema come elemento di BIPV, consentendo di sfruttare il surplus di energia prodotta per l'alimentazione dei componenti tecnologici di dotazione dell'ambiente servito dal componente stesso.

In particolare, sono stati progettati e realizzati due moduli in materiale composito aventi analoghe caratteristiche stratigrafiche al materiale base definito nel corso delle sperimentazioni SLICE 1.0.5, completi di celle fotovoltaiche inglobate (Fig. 4.23). Nello specifico, a partire dalle considerazioni fatte con il prototipo SLICE 2.0, è stata prevista la laminazione di due moduli di dimensioni 105 cm x 60 cm dotati di 15 celle fotovoltaiche in serie concepiti come elementi di rivestimento piani non pre-piegati, dove le distanze tra una cella e le attigue sono stati ridotti al minimo per ottimizzare la superficie a disposizione.

La tecnologia messa a punto, rispondendo a requisiti di flessibilità, leggerezza, costi contenuti, alta efficienza e durabilità, si presta infatti all'applicazione su architetture temporanee energeticamente autosufficienti.

Per queste motivazioni la soluzione proposta sarà utilizzata all'interno di una delle attività previste per il



Fig. 4.22. A sinistra, preparazione del telaio in legno. In alta a destra, un dettaglio dei nuovi supporti per cuscinetti in plexiglass. In basso a destra, le nuove guide a scorrimento laterali con ganci a forchetta in plexiglass

progetto di ricerca PNR 2015- 2020 eWAS – An early WArning System for Cultural Heritage (www.ewas.eu), con cui è stata stabilita una sinergia. I moduli caratterizzeranno il rivestimento esterno dell'involucro (Fig. 4.23) di un padiglione per l'accoglienza dei visitatori responsivo ed off-grid denominato ICARO – Innovative Cardboard ARchitectural Object, che verrà collocato presso il test-site di Megara Hyblaea. Esso sarà costituito da una struttura in box di cartone compressi in un'intelaiatura lignea (Figg. 4.25 - 4.26).

Megara Hyblaea è una delle più antiche colonie greche

della Sicilia, situata nei pressi di Augusta. Da un punto di vista planimetrico è possibile dividere il sito di Megara secondo un sistema di elementi lineari, assi che in passato erano le strade della città e che oggi si presentano come segni nel terreno.

Il padiglione ICARO rappresenta una microarchitettura capace di dare risposte al visitatore in termini sensoriali, evocando, attraverso l'ausilio di adeguati sistemi tecnologici, richiami a sensazioni visive e uditive che permettono di immedesimarsi in ciò che un tempo era Megara. Poggiato sul percorso principale nord-sud,

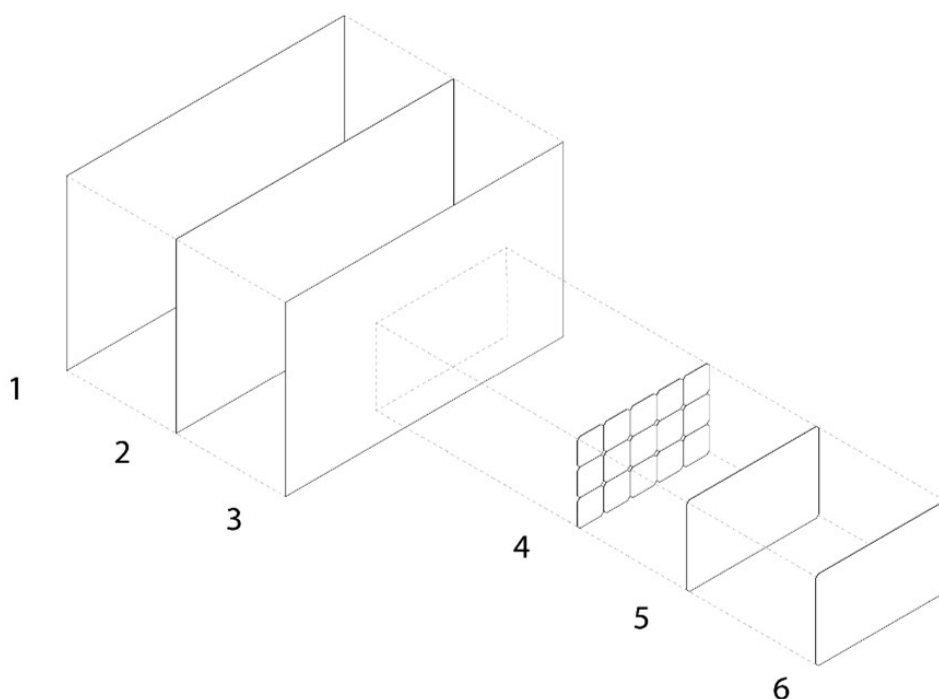


Fig. 4.23. Esploso assometrico del pannello SLICE4ICARO.

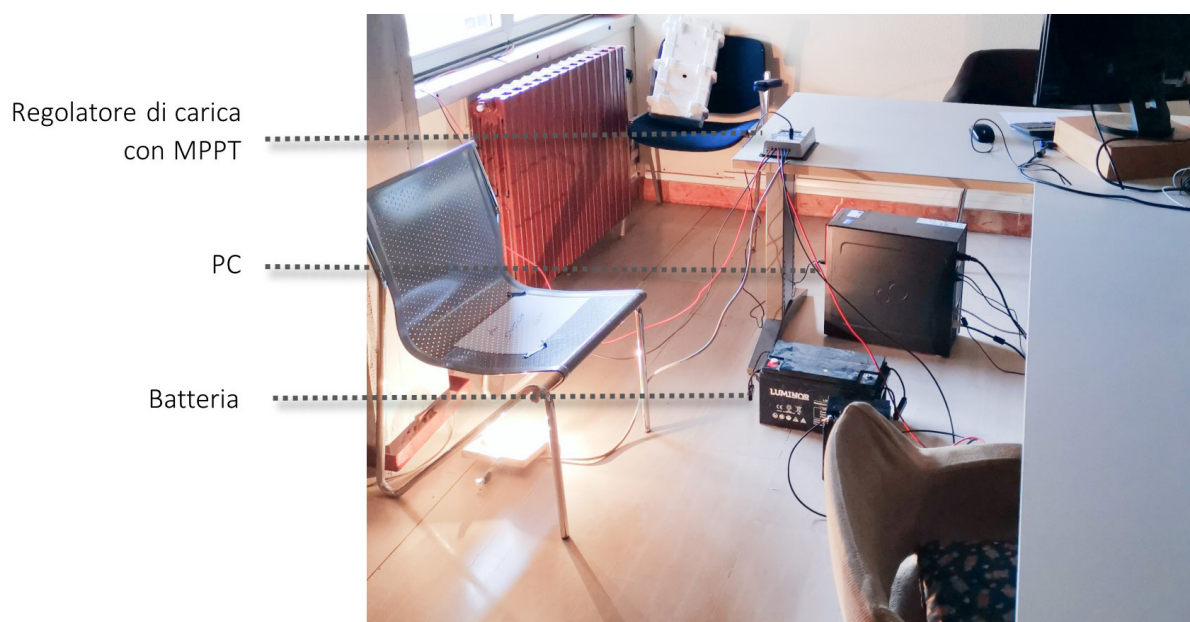


Fig. 4.24. Sistema di ricarica e componentistica per il monitoraggio dei dati dei test SLICE4ICARO

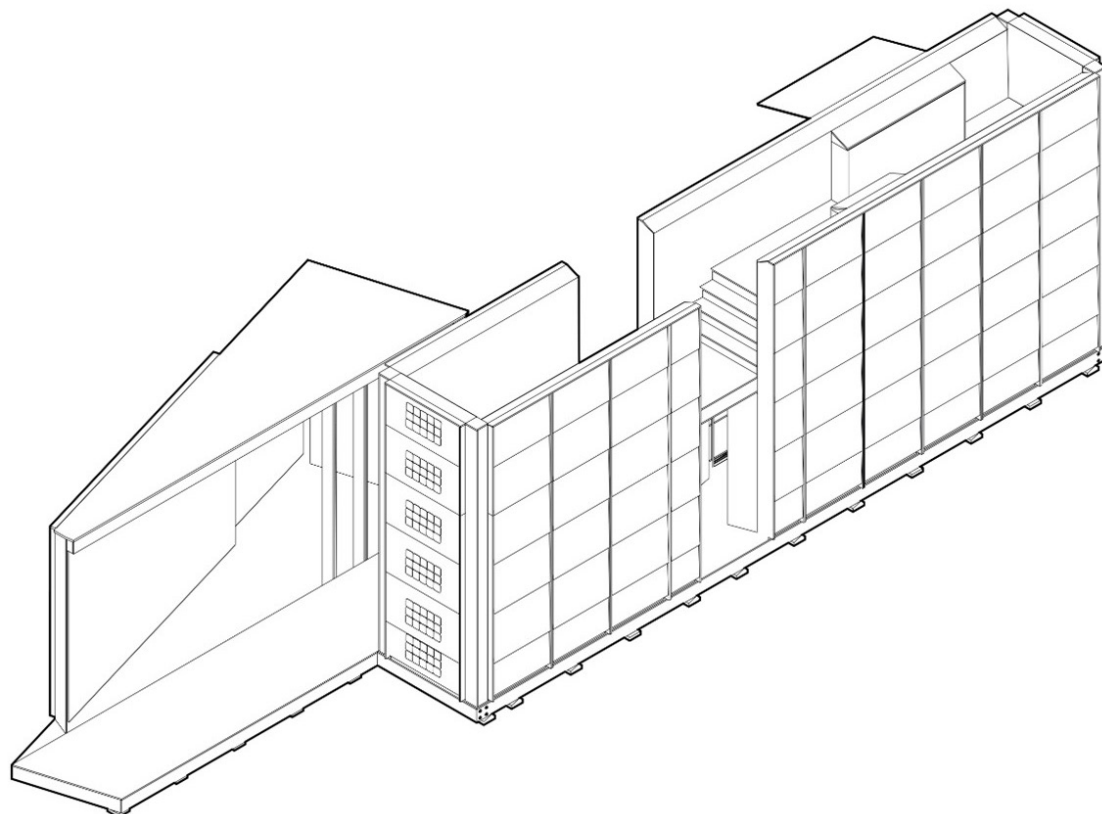


Fig. 4.25. Assonometria del padiglione ICARO

- 1. Telaio ligneo: composto da montanti con fori asolati e traversi forati per il passaggio del tirante
- 2. Tiranti Metallici
- 3. Box in cartone ondulato
- 4. Angolari in acciaio
- 5. Pannelli: realizzati con connrce in legno e piano in OSB

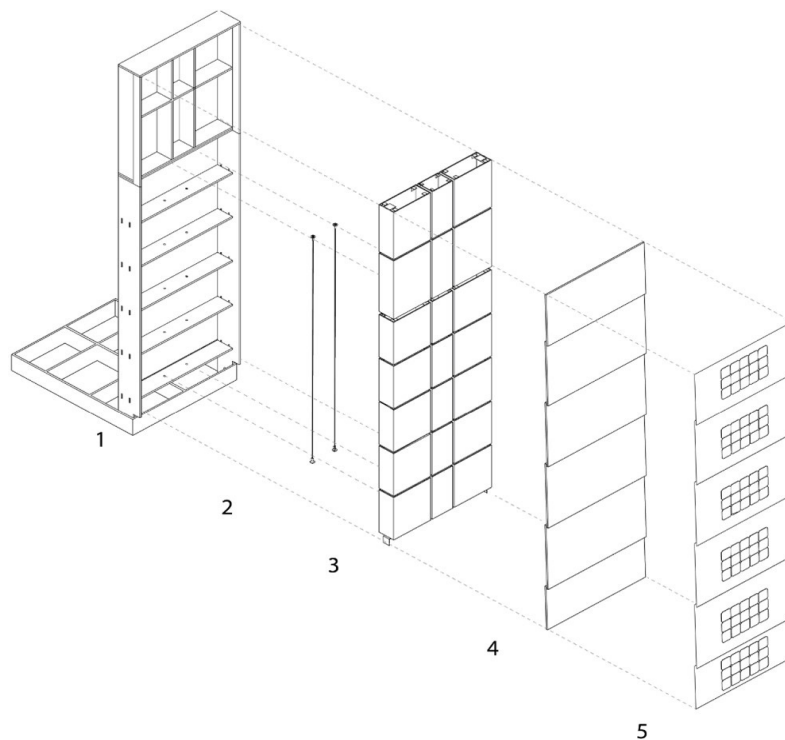


Fig. 4.26. Esploso assometrico del modulo ZERO

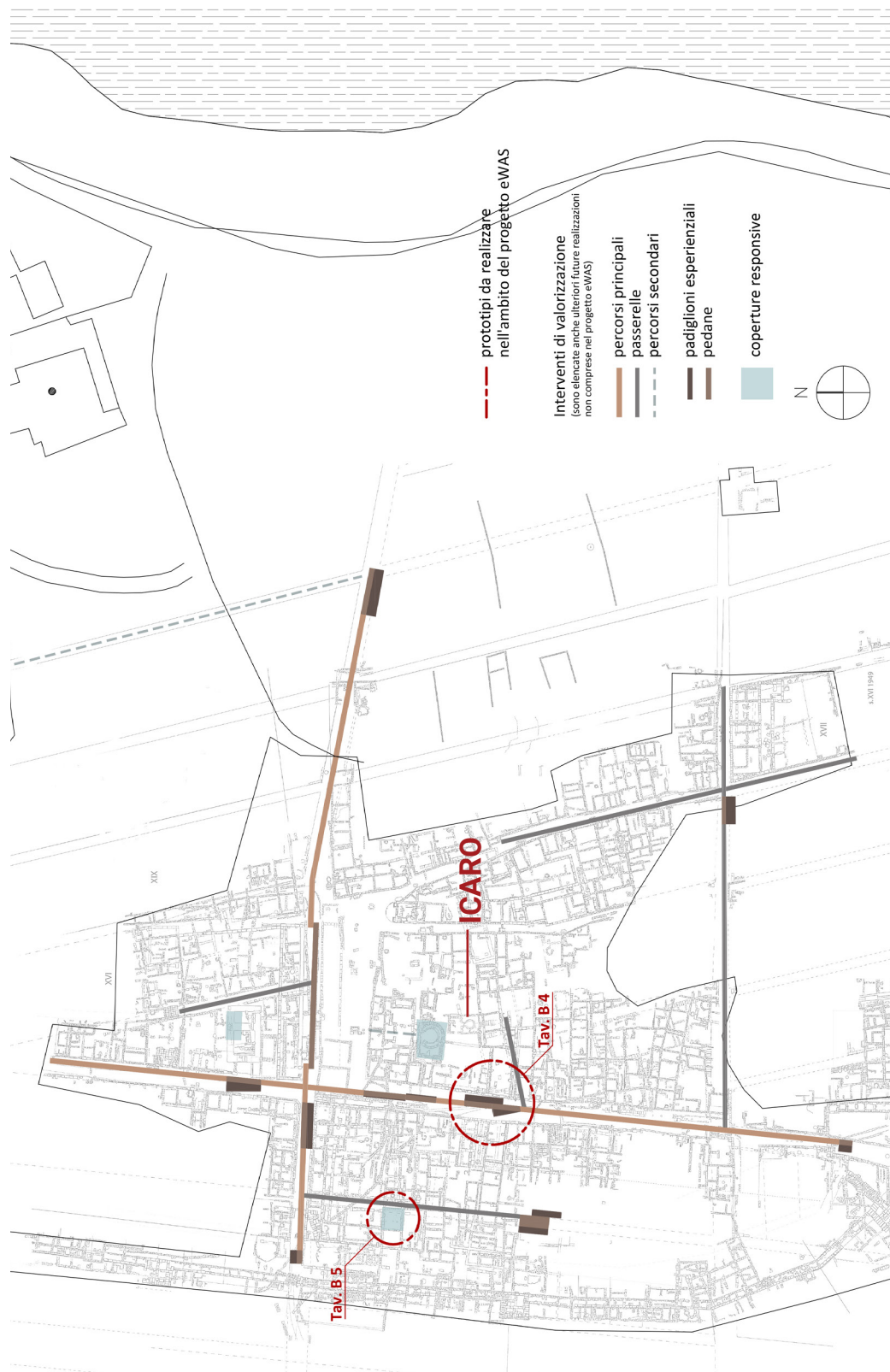


Fig. 4.27. Masterplan Megara Hyblaea. etria del padiglione ICARO

divide due importanti monumenti del sito: il tempio sud, databile intorno al VII secolo a.C., e il pritaneo, del VI secolo a.C., luogo destinato ai magistrati di città (Fig. 4.25).

Test in condizioni ambientali

Nel caso specifico è stato progettato un impianto fotovoltaico di tipo off-grid o ad isola, basato sull'installazione di un inverter con MPPT e la connessione di un pacco batterie per consentire il funzionamento del padiglione durante gli orari di apertura per parco archeologico ai visitatori. La potenza delle batterie e il numero dei moduli da installare sulla facciata del padiglione sono stati progettati confrontando diversi scenari di utilizzo in rapporto ai carichi previsti per l'alimentazione dei servizi tecnologici e di fruizione dei contenuti multimediali.

Il progetto dell'impianto ha rappresentato il punto di avvio per una campagna di test finalizzata all'acquisizione di dati utili a validare l'efficacia della soluzione proposta nel lungo periodo in condizioni ambientali.

I test sono stati effettuati all'Università degli studi di Catania, nei locali del DICAR (Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura). I due campioni realizzati sono stati collocati nella terrazza dell'Edificio 4, mentre il regolatore di carica e il pc, usato per il monitoraggio, sono stati disposti all'interno di una stanza adiacente (Fig. 4.24). Ai fini dei test, sono state monitorate due differenti configurazioni: pannelli posizionati in

verticale e pannelli posizioni in orizzontale.

Il regolatore di carica usato per i test è un MPPT Epever Triron 1206N, il quale presenta un modulo che include una porta RS485, che attraverso un apposito cavo USB to RS485 (CC-USB-RS485-150U) può essere connesso a un pc e monitorato in tempo reale tramite il software proprietario. Si riportano le caratteristiche tecniche principali:

Dimensioni: 180.8 x 135 x 47.3 [mm]

Peso: 0.56 [kg]

Potenza massima ingresso pannello solare: 130W/12V - 260W/24V

Tensione nominale del sistema: 12 / 24 VDC

Corrente nominale di carica/scarica: 10 A

Efficienza di conversione di picco: 98 %

Dimensioni cavi verso batteria e carichi: 4 mm²

Il pc è stato controllato attraverso un software di gestione remota ed è stata posta anche una webcam per consentire di monitorare l'installazione. Il regolatore di carica è stato collegato a una batteria "Prime AGM VRLA" da 12V 24AH/10h. Come carico è stato utilizzato una lampadina da 100W per simulare l'assorbimento dovuto ai servizi interni del padiglione.

PROGETTAZIONE PARAMETRICA DEL CASO STUDIO

La scelta di un caso studio è servita a validare le ipotesi fatte sulla possibilità di integrare il componente SLICE in edifici esistenti. Sono stati individuati due edifici

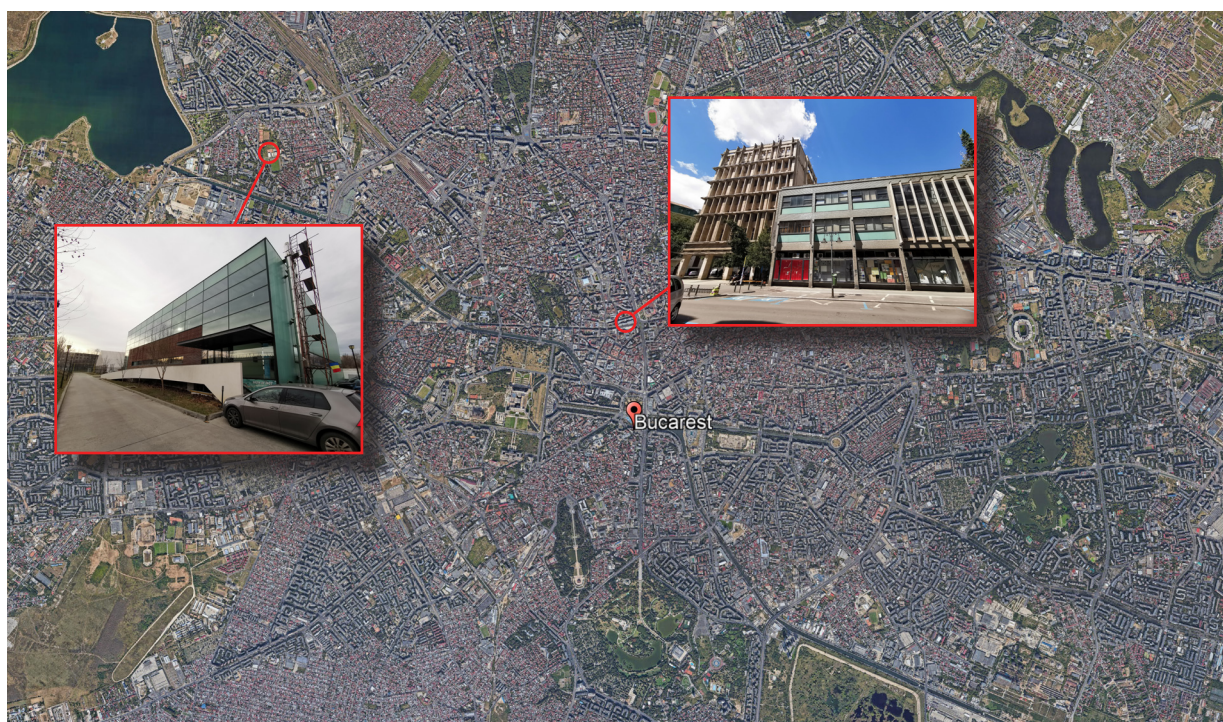


Fig. 4.28. Vista Satellitare di Bucarest e localizzazione dei casi studio. Piscina del Campus Universitario (a sinistra) e Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" (a destra)



Fig. 4.29. Edificio Piscina del Campus Universitario - Vista sud-ovest

con destinazioni d'uso diverse situati a Bucarest (Fig. 4.28), realizzati in epoche differenti. L'uso di un componente adattivo per involucri di facciata visto come soluzione di retrofit appare particolarmente adatto al miglioramento delle condizioni di comfort di ambienti in cui l'interazione dell'utente è meno presente, come appunto gli uffici o le strutture per lo sport. Infatti, gli utenti soggiornano in questi luoghi solo alcune ore della giornata e spesso non agiscono sulla regolazioni dei sistemi di protezione solare e di condizionamento.

Il primo edificio individuato è il fabbricato che ospita i locali della piscina dell'Università (Fig. 4.29). È stato realizzato in epoca recente ed è caratterizzato da una volumetria piuttosto semplice, presentandosi come un grande parallelepipedo di vetro immerso nel campus Universitario, nel Settore 6 di Bucarest.

Il secondo caso studio selezionato è uno dei corpi di fabbrica dell'Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" di Bucarest (Fig. 4.30). Situada nel Settore 1, pieno centro storico della città, essa è una delle più antiche università della Romania e l'unica istituzione indipendente del paese dedicata all'istruzione nel settore dell'architettura e dell'urbanistica.

Con l'utilizzo di SLICE è stata individuata una soluzione economica, poco invasiva e molto versatile per la correzione del comfort indoor. È stato ideato un componente modulare e flessibile, adattabile a differenti configurazioni perché costituito da moduli stand-a-

lone. Un punto migliorativo rispetto alle soluzioni proposte in letteratura è la sua leggerezza e il ridotto ingombro delle componenti meccaniche grazie alla piega. La varietà dei livelli di apertura/piegatura offre notevoli possibilità per la gestione del comportamento del componente schermante. Utilizzando gli origami come superficie sviluppabile è stato possibile creare una forma desiderata da un numero di parti piegate. La forma 3D risultante è definita dal suo motivo di piega 2D, seguendo le linee di piegatura. Due tipi di pieghe descrivono modelli piatti: le pieghe a valle, che sviluppano un angolo negativo quando vengono dispiegate, e le pieghe a monte, che si presentano in un angolo positivo quando vengono piegate.

Il lavoro è stato concentrato sull'ottimizzazione delle divisioni e del numero di pieghe, delle dimensioni delle falde e dei livelli di dispiegamento del componente, in modo da poter valutare l'integrazione del componente, definire punti di forza e di debolezza. Questo ha permesso anche di poter esaminare il sistema meccanico di supporto al cinematismo. Per perseguire questo obiettivo, la sperimentazione è stata condotta con il supporto della progettazione parametrica.

Con questo termine viene inteso un processo di progettazione basato su una logica algoritmica che consente l'implementazione di parametri e regole che definiscono, codificano e chiariscono la relazione tra intento progettuale e risposta progettuale. I software parame-



Fig. 4.30. Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" di Bucarest, prospetto su Strada Edgar Quinet

trici offrono all'utente l'opportunità di creare connessioni associative tra le geometrie generate, ottenendo così un livello più elevato di intelligenza e flessibilità del processo (Naboni and Paoletti, 2015). Per collegare la progettazione parametrica al modello dell'edificio, l'approccio progettuale è stato basato su algoritmi sviluppati nello strumento di modellazione parametrica Rhino/Grasshopper, e sincronizzati su modello BIM dell'edificio individuato come caso studio.

Grasshopper è un plug-in per il software di modellazione 3D Rhinoceros, si presenta come un editor grafico di algoritmi che consente ai progettisti di generare forme parametriche, che vanno dai moduli semplici a quelli complessi senza esperienze di scripting (Pesenti et al., 2015). Questo plug-in prevede la combinazione di diverse dimensioni e proporzioni per simulare ad esempio la cinetica della forma o l'analisi della luce considerando le variazioni del modello osservando le differenti fasi della giornata.

La prima parte del lavoro ruota attorno alla realizzazione dell'algoritmo dell'origami, rappresentato dal suo singolo modulo parametrizzabile sul piano xy , ruotato di un angolo variabile attorno ad un asse passante per uno dei lati del tassello, che rappresenta la linea stessa di piega. Ciò si traduce in un movimento rigido di rotazione. La flessibilità di questo strumento è data proprio

dalla possibilità di regolare la dimensione delle falde e quindi le linee di piega agendo su cursori dinamici denominati Number Slider. Mediante la variazione del valore all'interno dei Number Slider è possibile seguire un'animazione interattiva fluida e comprensibile della piegatura tra differenti angoli di apertura, che consente di analizzare la struttura del modello origami, ovvero l'impronta sulla facciata del componente totale aperto e il suo ingombro quando totalmente chiuso. Il primo passo ha riguardato l'identificazione dei parametri che descrivono una specifica geometria. Le dimensioni del modulo base - la lunghezza e la larghezza - sono parametri indipendenti che possono essere parametrizzati. Mentre l'angolo e la direzione di rotazione tra le facce adiacenti devono essere valutati per ogni origami.

Un'ulteriore fase della ricerca è consistita nella realizzazione di un modello BIM (Building Information Modeling), che consente di gestire le informazioni del progetto architettonico nell'ambiente digitale attraverso la costituzione di un database numerico di progetto in cui vengono conservati tutti i dati di costruzione.

A differenza dei tradizionali sistemi CAAD (Computer Aided Architectural Design) bidimensionali, il BIM si basa su elementi di costruzione e modellazione delle loro relazioni reciproche. Una serie di inadeguatezze

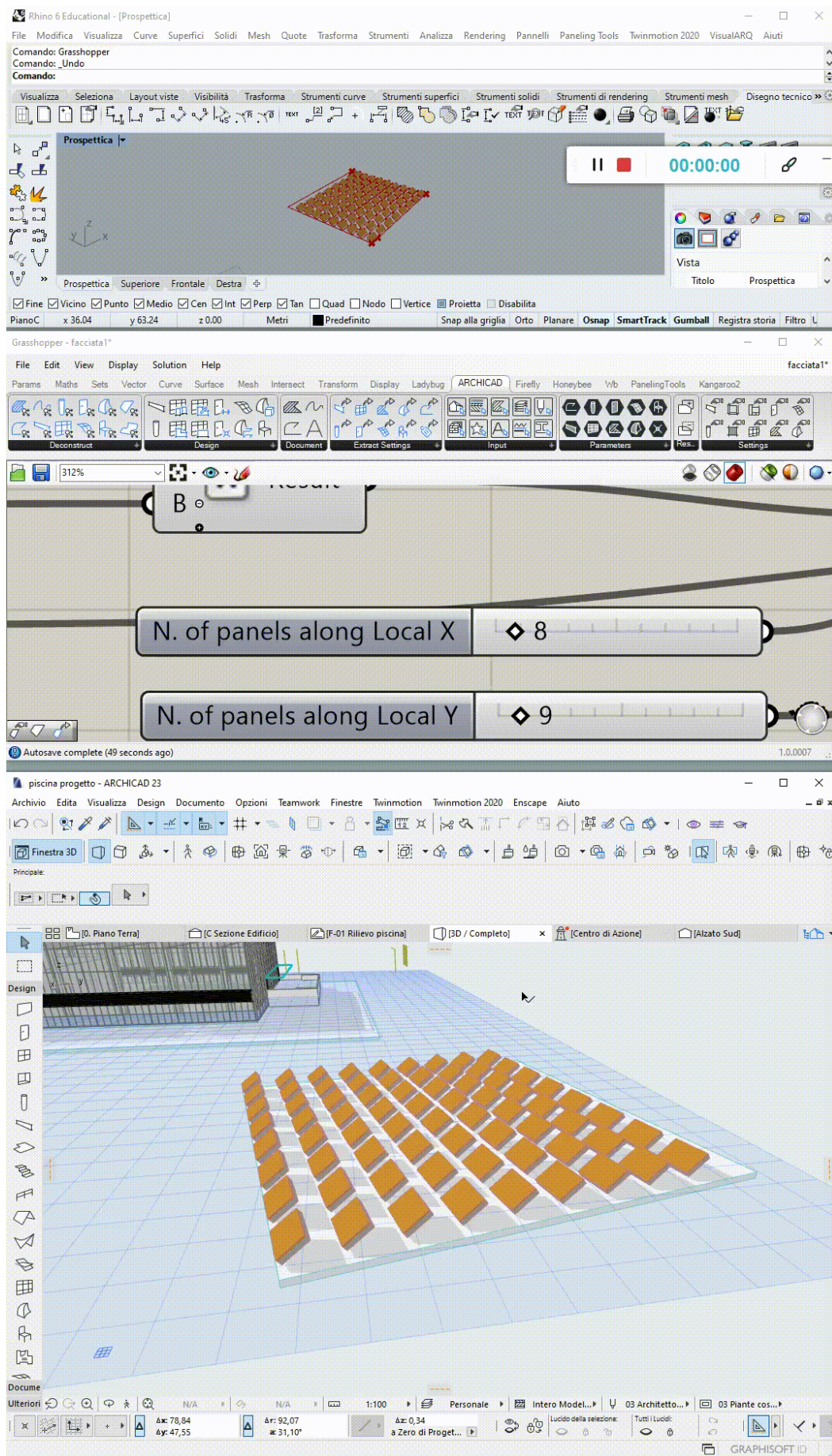


Fig. 4.31. Esempio del workflow Rhinoceros - Grasshopper e ArchiCAD

nel software CAAD, utilizzato solo per preparare i disegni di costruzione, sono state una delle ragioni per l'emergere del software BIM (Aydn and Yaman, 2017). Nel caso in esame il modello BIM è stato realizzato facendo uso del software ArchiCAD, prodotto dalla Graphisoft.

Grasshopper è caratterizzato da un linguaggio di programmazione visuale che funziona in Rhinoceros, dove i componenti vengono disposti su un canvas e attivati. Una linea di output del componente è collegata a una linea di input di un componente successivo per formare un albero. Si basa fondamentalmente su algoritmi produttivi. ArchiCAD è capace di importare le geometrie create in Grasshopper e salvate secondo l'estensione dei file 3D realizzati con Rhinoceros. Il flusso di lavoro basato sulla continua esportazione e importazione delle geometrie però non consente di lavorare su una modellazione continua, presentando anche inconvenienti legati alla perdita di dati, crescita delle dimensioni del file importato e rallentamenti durante la fase di progettazione (Aydn and Yaman, 2017).

Pertanto, il flusso di lavoro è stato quindi ottimizzato mediante l'utilizzo del tool Grasshopper-ArchiCAD Live Connection (Fig. 4.31), la cui peculiarità è quella di elaborare parametricamente il modello tridimensionale sfruttando contemporaneamente le funzionalità dei due software attraverso una connessione bidirezionale ed in tempo reale. Questo strumento consente di impostare un flusso di lavoro di progettazione unico per testare repentinamente le variazioni del modello parametrico e definire precise impostazioni per gli algoritmi e strutture senza scambi di file. In questo modo sono presenti i vantaggi dell'utilizzo del BIM nella fase di progettazione iniziale con l'approccio di progettazione parametrica dinamicamente connessa.

Questo lavoro ha consentito di verificare l'efficacia del cinematismo del pattern di piega adottato e nel contempo raggiungere il miglior livello di integrazione formale dell'elemento dell'involucro dell'edificio, verificando il risultato sia nelle posizioni apertura che di chiusura. Inoltre, il modello parametrico può essere ulteriormente implementato per l'impiego con plugin aggiuntivi per valutazioni riguardanti, ad esempio, analisi di resistenza meccanica o il miglioramento del comfort degli ambienti derivante dal suo impiego. L'interoperabilità dei due software permette infine di produrre real-time degli elaborati user friendly users, per mostrare i risultati dell'intervento anche ad utenti "non esperti", quali committenti, commercianti, operatori, ecc.

BREVETTO

La tecnologia SLICE presenta un elevato livello di innovazione e originalità, per cui è stata avanzata una richiesta di protezione brevettuale dell'invenzione a livello nazionale che verrà probabilmente estesa a livello europeo.

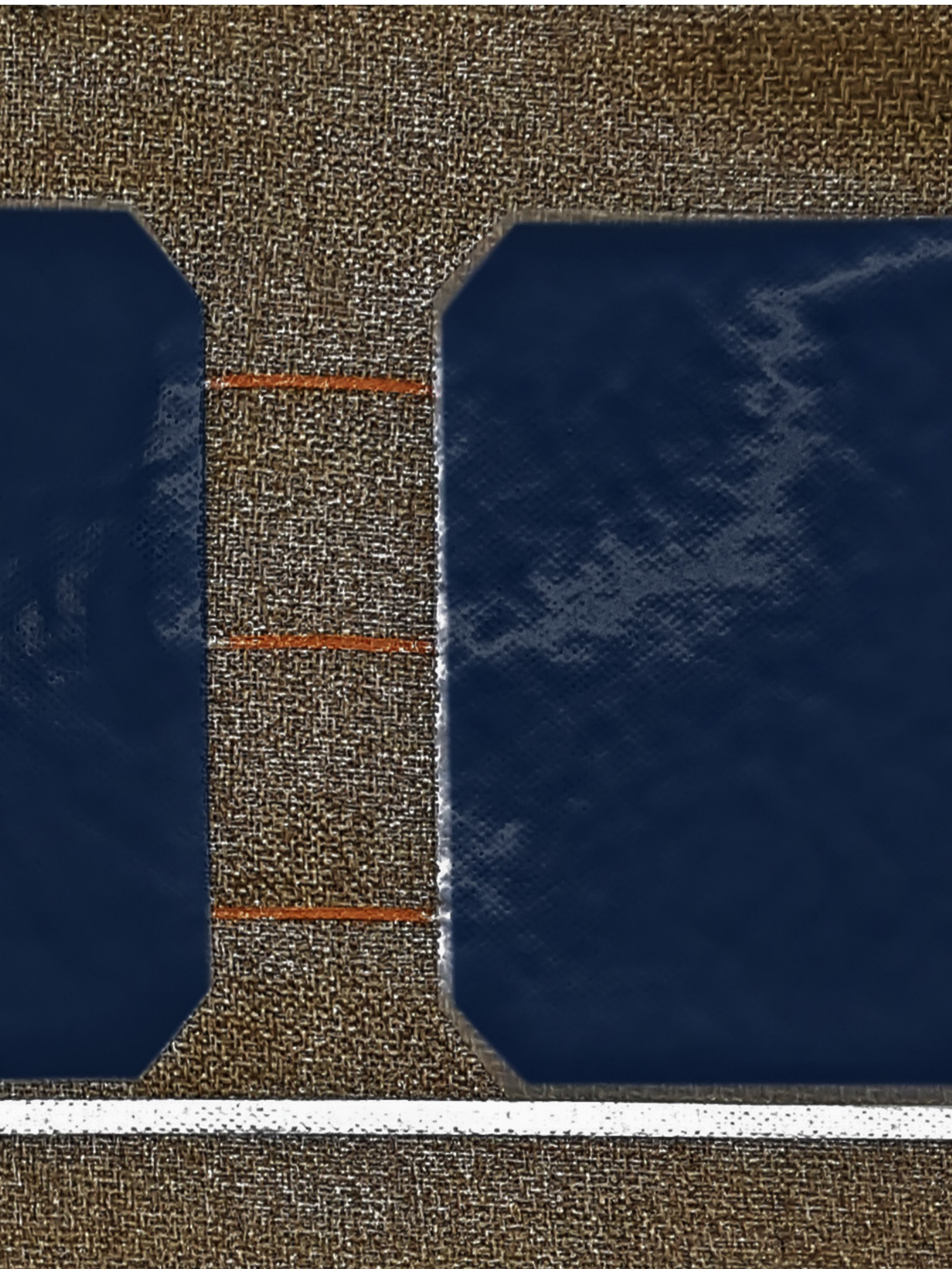
L'analisi delle priorità e la rilevanza del tema in ambito scientifico hanno permesso di definire i caratteri di innovazione dell'idea. In particolare è stata condotta un'approfondita ricerca preliminare tra documenti brevettuali finalizzata a esplorare lo stato dell'arte relativo al campo tecnico dei componenti cinetici adattivi utilizzabili nel settore delle costruzioni. Ciò ha consentito di individuare le caratteristiche innovative che distinguono il componente da quelli già esistenti (SAPIENZA et al., 2019).

A partire dai risultati di tale ricerca di anteriorità, gli aspetti innovativi dell'idea sono stati documentati al fine di mettere in risalto il problema tecnico che SLICE si propone di risolvere. La domanda di brevetto è stata redatta descrivendo passo-passo tutti le principali caratteristiche tecnico-costruttive della soluzione con l'ausilio di elaborati grafici per illustrare funzionamento, campi di applicazione e aspetti tecnologici. Nel paragrafo dedicato alle rivendicazioni, che costituisce la parte più importante delle proposte di brevetto, è stato messo a punto un elenco dettagliato delle caratteristiche del componente, in quanto rappresentano il reale oggetto di protezione dell'idea.

L'intero iter che ha portato al deposito della domanda di brevetto ha permesso di poter indagare con maggiore attenzione tutti quegli aspetti del componente possono rappresentare un reale stato di avanzamento tecnologico rispetto alle soluzioni analoghe già presenti sul mercato.

5. DESCRIZIONE E DISCUSSIONE DEI RISULTATI





MATERIALE E TECNOLOGIA

I test sul processo di produzione condotti sono stati finalizzati all'ottimizzazione del rapporto matrice-rinforzo, riducendo al minimo la quantità di elastomero. Per i diversi campioni è stato definito un codice alfanumerico per una univoca identificazione.

La definizione del pannello per la realizzazione del componente architettonico è stata basata sul processo di laminazione a caldo alternando i materiali scelti per la matrice e il tessuto di rinforzo.

Sono stati realizzati un totale di sei campioni (Tab. 5.1) di dimensioni 20 cm x 40 cm per testare 6 differenti stratigrafie alternando due tipologie di celle fotovoltaiche, al fine di valutare l'adesione tra i layer che caratterizzeranno il componente, il livello di flessibilità dello stesso, la compenetrazione della matrice con il tessuto di rinforzo e quindi registrare i parametri i parametri definitivi. Per la realizzazione dei primi due campioni di prova sono state impiegate due celle fotovoltaiche in silicio policristallino, matrice del composito in SEBS e tessuto di rinforzo in Biotex Flax.

Il primo campione, denominato SLICE 1.0.1, è costituito da membrana inferiore in SEBS, seguita da tessuto di rinforzo, a cui sono stati sovrapposti un layer in EVA, cella in silicio policristallino e membrana superiore in SEBS.

Per il secondo campione SLICE 1.0.2 si è lavorato sull'irrigidimento delle zone più fragili del campione, rendendo più rigidi i tasselli tra le pieghe da effettuarsi (area delle celle fotovoltaiche) dotandolo di 2 layer aggiuntivi di EVA e un ulteriore film multistrato in polietilene tereftalato trasparente progettato per essere impiegato come backsheet per pannelli solari fotovoltaici, prodotto dalla DUNMORE con il nome di

DUN-SOLAR PPE, lasciando flessibili e costituite dai soli layer di elastomeri termoplastici (EVA e SEBS) solo le zone da sottoporre successivamente a piega. Le celle in silicio policristallino MAIN Isotex di dimensione 156 mm x 156 mm, sono state collegate in serie utilizzando piste in treccia di rame flessibile in corrispondenza dei punti di piegatura, distanziate tra loro 3 cm e connesse ai poli attraverso l'adozione di piste in rigide in rame stagnato saldate alle "bus bar" in lega di argento e alluminio delle celle (Fig. 5.2).

Il SEBS utilizzato è di spessore 200.22 micron, l'EVA invece di spessore 450 micron. Per fissare la posizione delle celle durante la preparazione del campione da sottoporre a laminazione è stato utilizzato uno speciale nastro adesivo a base di EVA, capace di fondersi completamente con il layer in EVA durante la sua polimerizzazione. Per agevolare il distacco del campione dalla macchina al termine del processo di laminazione, il pacchetto è stato posizionato tra due strati di teflon. Grazie a questo la superficie della matrice ha mantenuto l'originaria trasparenza lasciando leggibile la trama del tessuto sottostante.

Dall'analisi visiva e al tatto del campione SLICE 1.0.1 sono emerse alcune criticità: il campione è risultato troppo flessibile nelle zone d'interesse delle celle (coerentemente ai risultati che ci si attendeva), il layer inferiore di SEBS a contatto con il tessuto di rinforzo in canapa non è compenetrato perfettamente nel rinforzo presentando diverse zone di non contatto, ovvero sul retro del provino risulta avere una trama e una colorazione non uniforme. Nella parte frontale (dotata di celle) l'interposizione di EVA ha migliorato l'adesione rendendo la stessa colorazione e aspetto della faccia più uniforme. Per entrambi i campioni sono stati adottati gli stessi parametri di produzione.

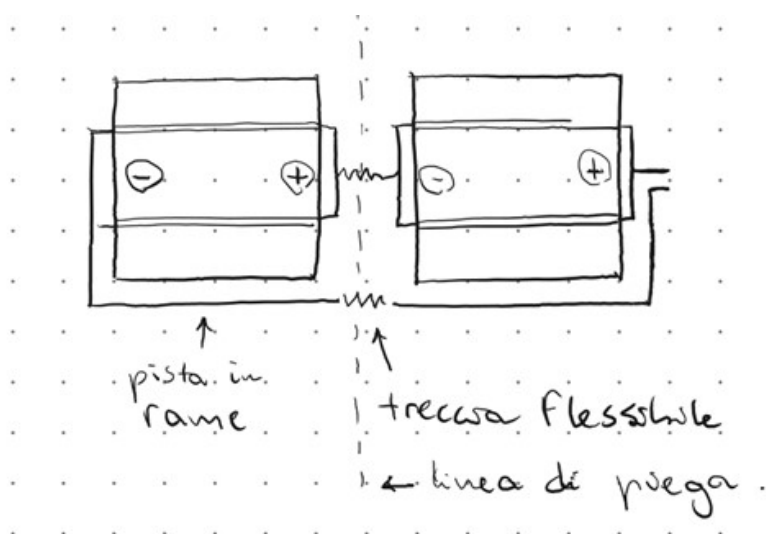


Fig. 5.1. Ipotesi di collegamento elettrico delle celle nel pannello

| | | SLICE 1.0.1 | SLICE 1.0.2 | SLICE 1.0.3 | SLICE 1.0.4 | SLICE 1.0.5 | SLICE 1.0.6 |
|-------------------------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| MATRICE MEBRANA ESTERNA | SEBS | | | | | | |
| | PET | | | | | | |
| | SEBS | | | | | | |
| | EVA | | | | | | |
| TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA | SILICIO POLICRISTALLINO | | | | | | |
| | SILICIO MONOCRISTALLINO | | | | | | |
| ADESIONE AL RINFORZO | EVA | | | | | | |
| RINFORZO | TESSUTO DI CANAPA | | | | | | |
| | FIBRA DI VETRO | | | | | | |
| MATRICE MEBRANA INTERNA | EVA | | | | | | |
| | SEBS | | | | | | |
| N° DI LAYER | | 5 | 8 | 6 | 6 | 6 | 6 |

Tab. 5.1. Stratigrafia campioni realizzati

DATI DI LAMINAZIONE

Laminatore: Marca PANAMAC - Modello DM 231
 Pressione massima di esercizio: 1000 mBar
 Pressione minima di esercizio: 0 mBar

- PET
- SEBS

Parametri di produzione
 - temperatura 145 °C
 - tempo 20 min

Dati relativi ai pannelli

SLICE 1.0.1

Stratigrafia:
 - SEBS
 - Biotex
 - EVA
 - cella fotovoltaica MAIN ISOTEX in silicio policristallino
 - SEBS

Parametri di produzione
 - temperatura 145 °C
 - tempo 20 min

Caratteristiche tecniche
 - Tensione di uscita misurata: 1,027 Volt
 - Corrente in uscita STC: 8W
 - Spessore: 1,65 mm

SLICE 1.0.2

Stratigrafia:
 - SEBS
 - EVA
 - Biotex
 - EVA
 - cella fotovoltaica MAIN ISOTEX in silicio policristallino
 - EVA

Caratteristiche tecniche
 - Tensione di uscita misurata: 1,012 Volt
 - Corrente in uscita STC: 8W
 - Spessore: 2,68 mm

Una prima ispezione su suddetti pannelli ha suggerito la realizzazione di nuovi campioni con stratigrafie molto diverse per successive fasi di test. Sulla base delle considerazioni precedenti infatti sono stati realizzati due nuovi campioni dalla stratigrafia di matrice alleggerita: in questo caso il primo con tessuto di rinforzo in tessuto Biotex (SLICE 1.0.3) e uno con tessuto di rinforzo in fibra di vetro (SLICE 1.0.4) (Fig. 5.3).

SLICE 1.0.3

Stratigrafia:
 - SEBS
 - Biotex
 - EVA
 - cella fotovoltaica MAIN ISOTEX in silicio policristallino
 - EVA
 - PET (intorno alle singole celle)
 Parametri di produzione
 - Temperatura 180°C
 - tempo 20 min

Durante il 4° step (vuoto sotto) del processo di laminazione di SLICE 1.0.3 a macchina è andata in protezione e il ciclo di laminazione è stato interrotto a 2035 secon-

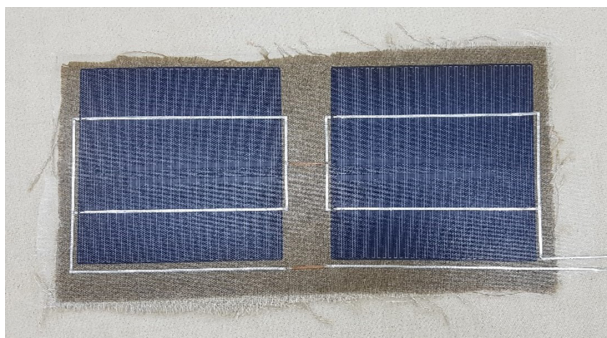


Fig. 5.2. A sinistra SLICE 1.0.1 – A destra SLICE 1.0.2

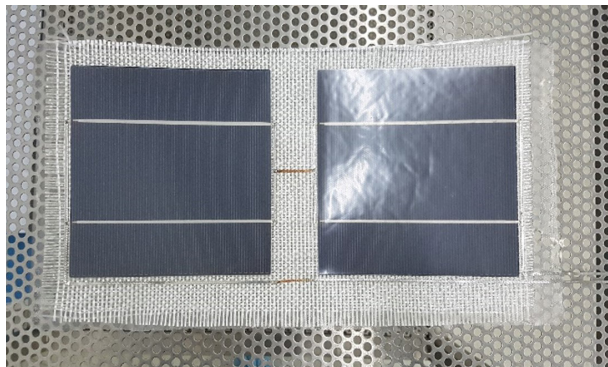
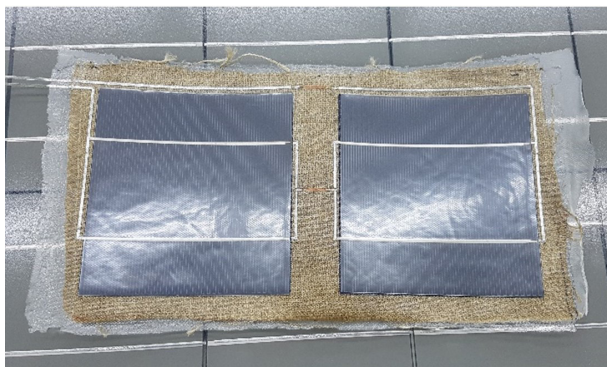


Fig. 5.3. A sinistra SLICE 1.0.3 – A destra SLICE 1.0.4

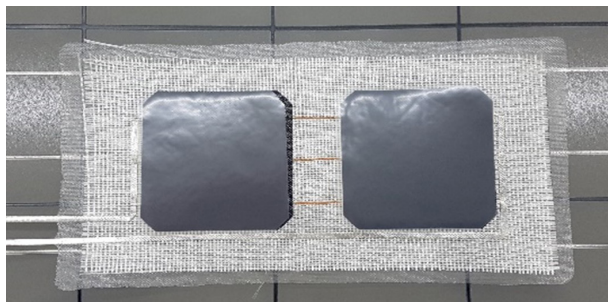
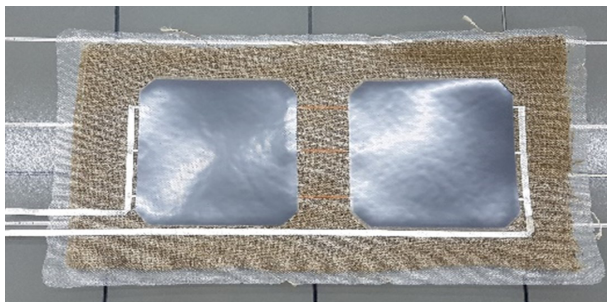


Fig. 5.4. A sinistra SLICE 1.0.5 – A destra SLICE 1.0.6

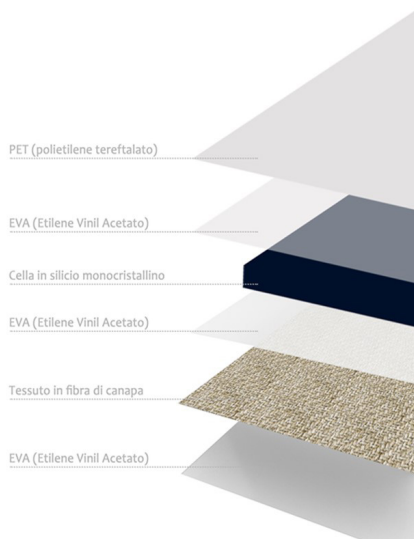


Fig. 5.5. Stratigrafia SLICE 1.0.5



Fig. 5.6. Pannello SLICE 1.0.5

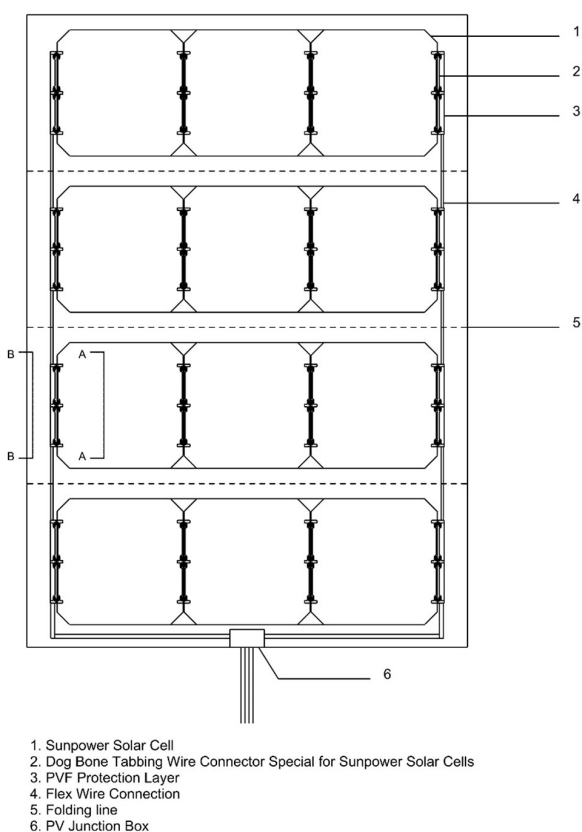


Fig. 5.7. Schema di collegamento del pannello SLICE 2.0.1

di. L'errore riportato dalla macchina è "Temperatura troppo alta". A seguito di questo segnale la macchina ha automaticamente riportato la temperatura a 160 °C. questo fenomeno ha permesso di definire una temperatura massima per il processo compatibilmente alla stratigrafia e ai materiali impiegati. Le analisi visiva e al tatto del campione ottenuto hanno lasciato dedurre che l'aumento di temperatura non ha influenza rilevante nel processo di compenetrazione tra matrice in SEBS e il tessuto di rinforzo. La membrana inferiore del campione realizzato anche in questo caso, infatti, presentava dei punti di distacco apparendo al tatto poco liscia e uniforme.

Per al campione successivo SLICE 1.0.4 si è scelto il tessuto di rinforzo in fibra di vetro, mentre il layer inferiore in SEBS è stato sostituito con uno strato di EVA, per la laminazione sono stati impiegati valore di temperatura 145°C e tempo di 20 min (1227 sec esatti).

SLICE 1.0.4

Stratigrafia:

- EVA
- Fibra di vetro
- EVA
- cella fotovoltaica MAIN ISOTEX in silicio policristallino

- EVA
- PET

Parametri di produzione

- temperatura 145 °C
- tempo 20 min

Nella fase finale, al fine di migliorare la flessibilità dei tasselli compresi tra i punti di piega, si è scelto di adottare delle più efficienti celle in monocristallino flessibile SunPower Maxeon 125 mm x 125 mm (Fig. 5.4).

SLICE 1.0.5

Stratigrafia:

- EVA
- Biotex
- EVA
- cella fotovoltaica SunPower Maxeon C60 in silicio monocristallino
- EVA
- PET

Parametri di produzione

- temperatura 145 °C
- tempo 20 min

SLICE 1.0.6

Stratigrafia:

- EVA
- Fibra di vetro
- EVA
- cella fotovoltaica SunPower Maxeon C60 in silicio monocristallino
- EVA
- PET

Parametri di produzione

- temperatura 145 °C
- tempo 20 min

I risultati ottenuti dalle ispezioni sugli ultimi due campioni, denominati SLICE 1.0.5 e SLICE 1.0.6, hanno consentito di identificare la stratigrafia finale.

Nello specifico quella di SLICE 1.0.5 è stata assunta come stratificazione definitiva (Fig. 5.5), per realizzare un ulteriore campione di dimensioni maggiori per effettuare test in condizioni di laboratorio e in condizioni ambientali reali, denominato SLICE 2.0.1.

SLICE 2.0.1

- 1360 DUN-SOLAR™ PPE (superficie celle fotovoltaiche)
- EVA SKC EF2N
- Celle in silicio monocristallino SUNPOWER Maxeon 125 mm x 125 mm 3,3W
- EVA SKC EF2N
- Tessuto di rinforzo Biotex Flax 400 g/m2 2x2 Twill

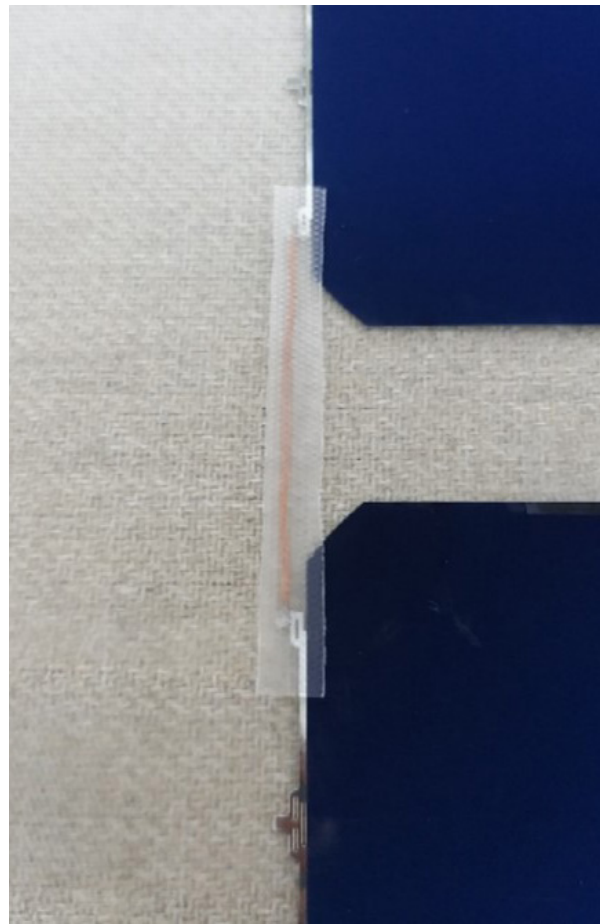


Fig. 5.8. Preparazione e processo di laminazione del pannello SLICE 2.0.1

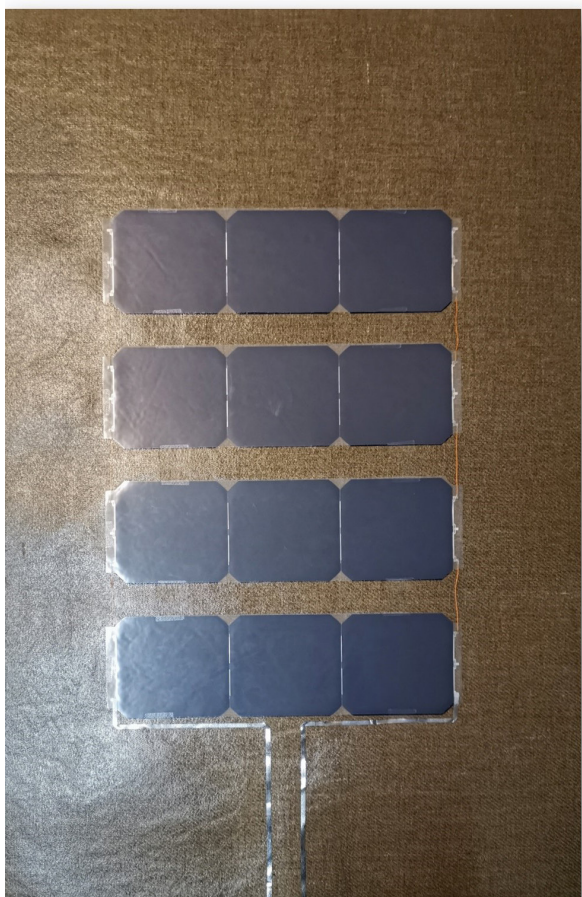
- EVA SKC EF2N
- temperatura 145 °C, tempo 20 min

La modalità di connessione elettrica delle stesse in questo caso è mutata in modo tale da garantire un valore di tensione in uscita adeguato ai valori in cui opera la scheda di ricarica con chip ST Microelettronics SPV1040 adottata per i prototipi. Nello specifico è stato realizzato un circuito di 4 rami in parallelo, ciascuno dei quali è composto da 3 celle collegate in serie (Fig. 5.7).

Una volta terminata la fase di laminazione si è proceduto al ritaglio delle porzioni di materiale di scarto, definendo le dimensioni effettive di 68 cm x 99 cm. Per poter essere applicato al prototipo, il tessuto composito ha subito un processo di modellazione mediante termoformatura, descritto nel prosieguo.

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEL MATERIALE BASE

È stata condotta una campagna di test sperimentali per la caratterizzazione meccanica della stratigrafia assunta come definitiva. Tenendo conto delle caratteristiche del materiale base del campione SLICE 1.0.5, costituita da tessuto di rinforzo in Biotex e matrice in EVA (uno strato inferiore e uno superiore), sono stati laminati dieci campioni privi di celle fotovoltaiche. I



test sono stati condotti secondo la procedura definita nella norma UNI EN ISO 527-4. Questa prevede l'uso di provette di materiale di forma rettangolare del tipo 2 o 3 per materiali rinforzati con fibre continue multidirezionali (Fig. 5.11) e rimanda alle prescrizioni riportate nella norma UNI EN ISO 527-1 per la scelta della tipologia di prova da eseguirsi. Sulla base di tali indicazioni, i campioni realizzati sono stati sagomati secondo le caratteristiche di tipo 2, ovvero dimensione 250x50 mm e distanza L₀ pari a 150 mm. I test sono stati eseguiti con cella di carico da 10 kN, la velocità è stata impostata a 2 mm/min. Sono state eseguite cinque cicli di prova (Tab 5.2).

VERIFICA DECADIMENTO DI TENSIONE DEL PANNELLO

Successivamente, sono stati avviati i primi test di fatica in camera climatica per poter testare il decadimento di tensione del componente sottoposto a cicli di invecchiamento accelerati. In questa prova è stato possibile testare anche la durabilità del materiale composito del substrato, soprattutto il comportamento dei materiali plastici costituenti la matrice

Al tal fine sono stati sottoposti alla prova solo gli ultimi quattro campioni dei sei realizzati. I primi due campioni realizzati, con sigla SLICE 1.0.1 e SLICE 1.0.2, non avendo superato le analisi visiva e al tatto, sono stati immediatamente scartati per questa fase.

Preliminarmente i quattro campioni sono stati posizionati frontalmente ad una lampada per registrare mediante un tester i valori di tensione di partenza. Sono stati registrati i seguenti valori di tensione per i singoli campioni:

SLICE 1.0.3 = 1,050 V

SLICE 1.0.4 = 1,041 V

I campioni sono stati dotati di tre termocoppie, una per ogni cella fotovoltaica e la terza posizionata sul retro del campione), in modo da poter monitorare l'andamento della temperatura nelle tre diverse zone al variare delle condizioni di temperatura e umidità in camera (Fig. 5.12).

Per ogni ciclo sono stati testati due campioni in contemporanea. Le termocoppie sono state installate con

| | |
|------------------------|---------|
| Altezza (mm) | 990 mm |
| Larghezza (mm) | 680 mm |
| Corrente in uscita (W) | 39,6 WP |
| Tensione in uscita (V) | 1,71 V |

Fig. 5.9. Il pannello SLICE 2.0.1 al termine del processo di laminazione

la seguente sequenza:

- Termocoppia 1 – retro SLICE 1.0.3
- Termocoppia 2 – anteriore SLICE 1.0.3
- Termocoppia 3 – anteriore SLICE 1.0.3
- Termocoppia 4 – retro SLICE 1.0.4
- Termocoppia 5 – anteriore SLICE 1.0.4
- Termocoppia 6 – anteriore SLICE 1.0.4

Test 1:

- Temperatura 20 °C
- Tempo 15 min (programmato)
- Tempo di registrazione 910 secondi

- SLICE 1.0.3: 1.040 V
- SLICE 1.0.4: 1.034 V

Test 2:

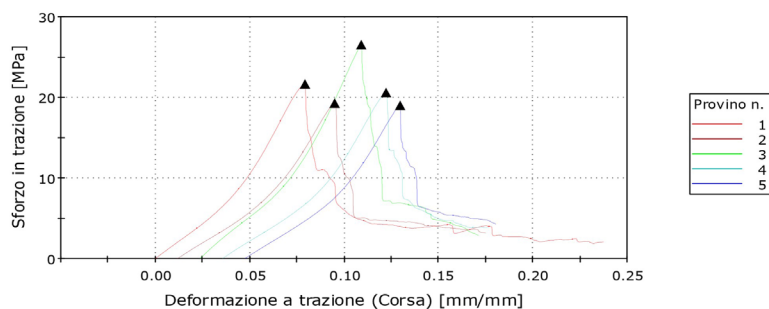
- Temperatura 30 °C
- Tempo 15 min (programmato)
- Tempo di registrazione 910 secondi
- SLICE 1.0.3: 1.015 V
- SLICE 1.0.4: 1.011 V

Test 3:

- Temperatura 45 °C
- Tempo 15 min (programmato)



Fig. 5.10. Fasi della prova a trazione monoassiale



| | Modulo di Young [GPa] | Sforzo allo Snervamento [MPa] | Deformazione allo Snervamento [%] |
|---------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 0,441 | 21,710 | 7,915 |
| 2 | 0,388 | 19,326 | 8,302 |
| 3 | 0,506 | 26,571 | 8,517 |
| 4 | 0,411 | 20,642 | 8,645 |
| 5 | 0,392 | 19,071 | 8,205 |
| Media | 0,428 | 21,464 | 8,317 |
| Deviazione standard | 0,04875 | 3,04591 | 0,28377 |

| | Sforzo a Rottura [MPa] | Deformazione a Rottura [%] | Energia a Rottura [J] |
|---------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 1 | 2,185 | 23,709 | 16,021 |
| 2 | 3,303 | 16,283 | 12,020 |
| 3 | 2,998 | 14,719 | 15,408 |
| 4 | 3,935 | 14,100 | 11,984 |
| 5 | 4,372 | 13,262 | 10,856 |
| Media | 3,358 | 16,415 | 13,258 |
| Deviazione standard | 0,84718 | 4,22471 | 2,301 |

| | Modulo (Corda 0,05 mm - 0,25 mm) [GPa] |
|---------------------|--|
| 1 | ----- |
| 2 | ----- |
| 3 | ----- |
| 4 | ----- |
| 5 | ----- |
| Media | ----- |
| Deviazione standard | ----- |

Tab. 5.2. Risultati delle prove a trazione monoassiale

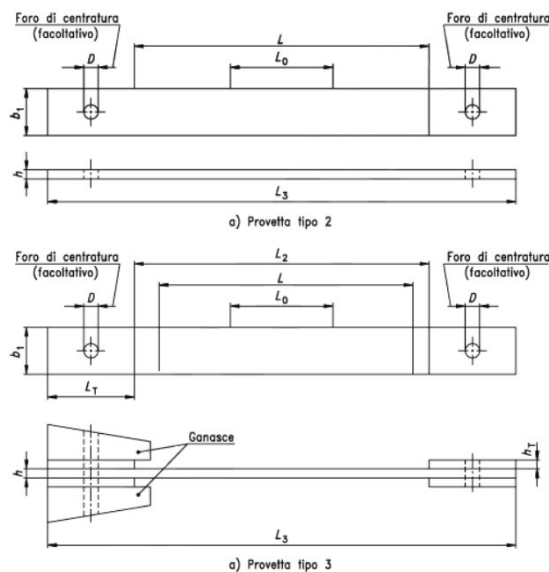


Fig. 5.11. Geometria dei campioni da sottoporre a test di trazione secondo la norma UNI EN ISO 527-4

- Tempo di registrazione 914 secondi
- SLICE 1.0.3: 0.992 V
- SLICE 1.0.4: 0.991 V

Test 4:

- Temperatura 60 °C
- Tempo 15 min (programmato)
- Tempo di registrazione 915 secondi
- SLICE 1.0.3: 0.965 V
- SLICE 1.0.4: 0.963 V

Test 5:

- Temperatura 90 °C
- Tempo 15 min (programmato)
- Tempo di registrazione 916 secondi
- SLICE 1.0.3: 0.927 V
- SLICE 1.0.4: 0.938 V

Per i campioni in silicio monocristallino si è scelto di eseguire solo i test a 3 temperature differenti:

SLICE 1.0.5 = 1.150 V

SLICE 1.0.6 = 1,155 V

Test 1:

- Temperatura 20 °C
- Tempo 15 min (programmato)
- Tempo di registrazione 910 secondi
- SLICE 1.0.3: 1.040 V
- SLICE 1.0.4: 1.034 V

Test 2:

- Temperatura 30 °C
- Tempo 15 min (programmato)
- Tempo di registrazione 910 secondi
- SLICE 1.0.3: 1.015 V
- SLICE 1.0.4: 1.011 V

Test 3:

- Temperatura 45 °C
- Tempo 15 min (programmato)
- Tempo di registrazione 914 secondi
- SLICE 1.0.3: 0.992 V
- SLICE 1.0.4: 0.991 V

Test 4:

- Temperatura 60 °C
- Tempo 15 min (programmato)
- Tempo di registrazione 915 secondi
- SLICE 1.0.3: 0.965 V
- SLICE 1.0.4: 0.963 V

Test 5:

- Temperatura 90 °C
- Tempo 15 min (programmato)
- Tempo di registrazione 916 secondi
- SLICE 1.0.3: 0.927 V
- SLICE 1.0.4: 0.938 V

I grafici successivi (Tab. 5.3), riportanti lungo l'asse delle ordinate i gradi centigradi e sull'asse delle ascisse il tempo in secondi, mostrano l'andamento delle tem-

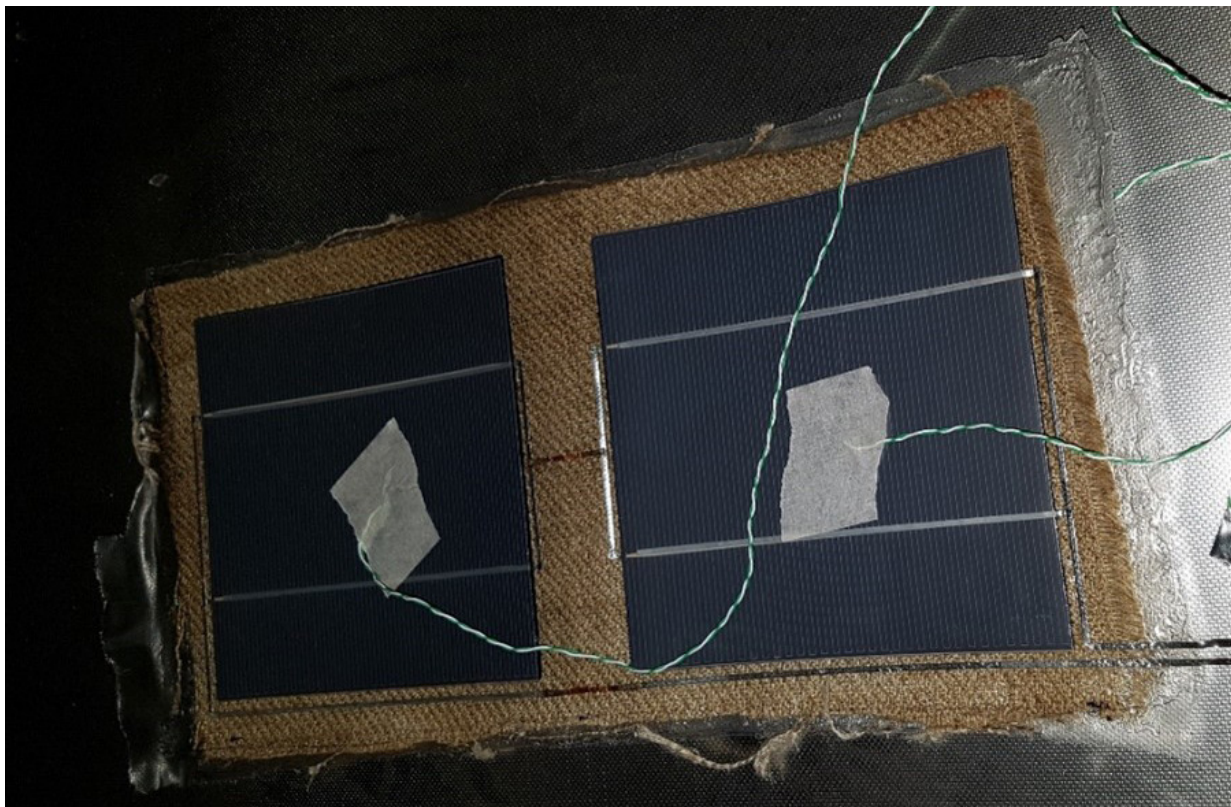
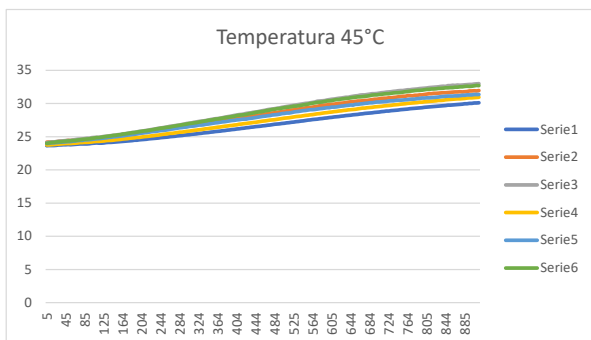


Fig. 5.12. Preparazione dei campioni per i test in camera climatica

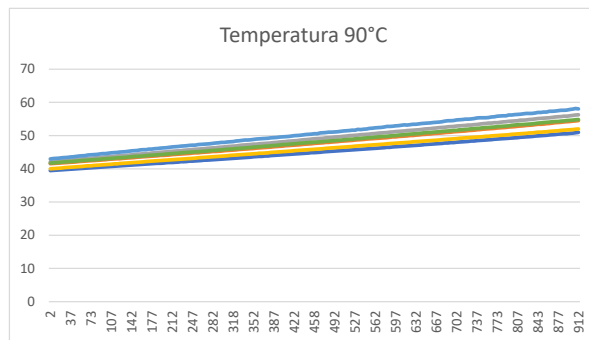
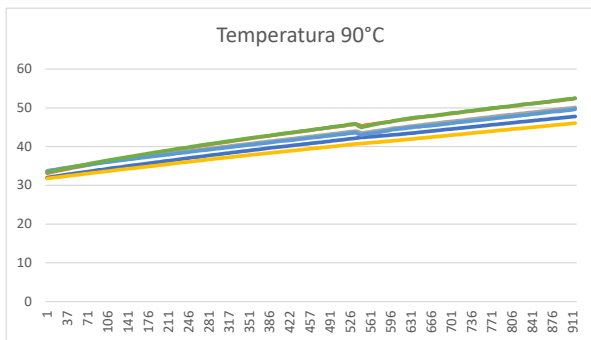
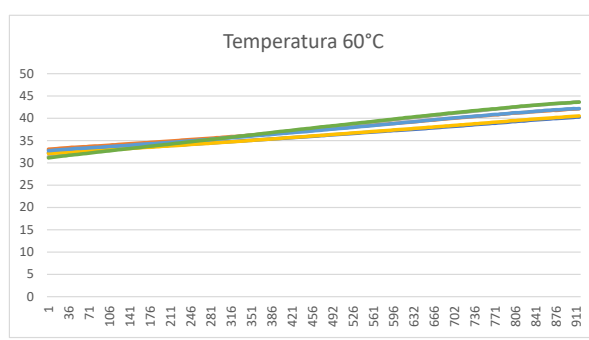
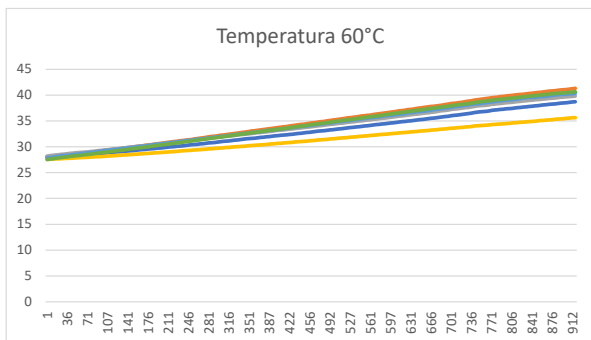
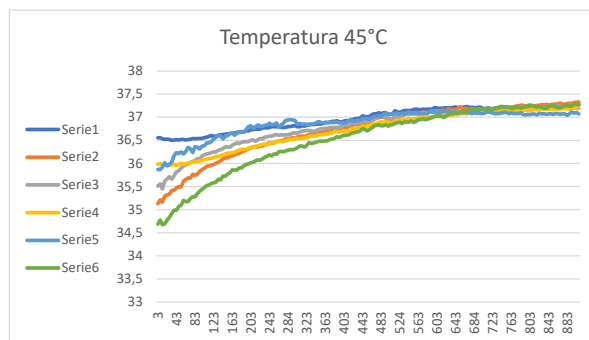
Test pannelli SLICE 1.0.3 - SLICE 1.0.4

- Serie 1 - termocoppia retro SLICE 1.0.3
- Serie 2 - termocoppia anteriore SLICE 1.0.3
- Serie 3 - termocoppia anteriore SLICE 1.0.3
- Serie 4 - termocoppia retro SLICE 1.0.4
- Serie 5 - termocoppia anteriore SLICE 1.0.4
- Serie 6 - termocoppia anteriore SLICE 1.0.4

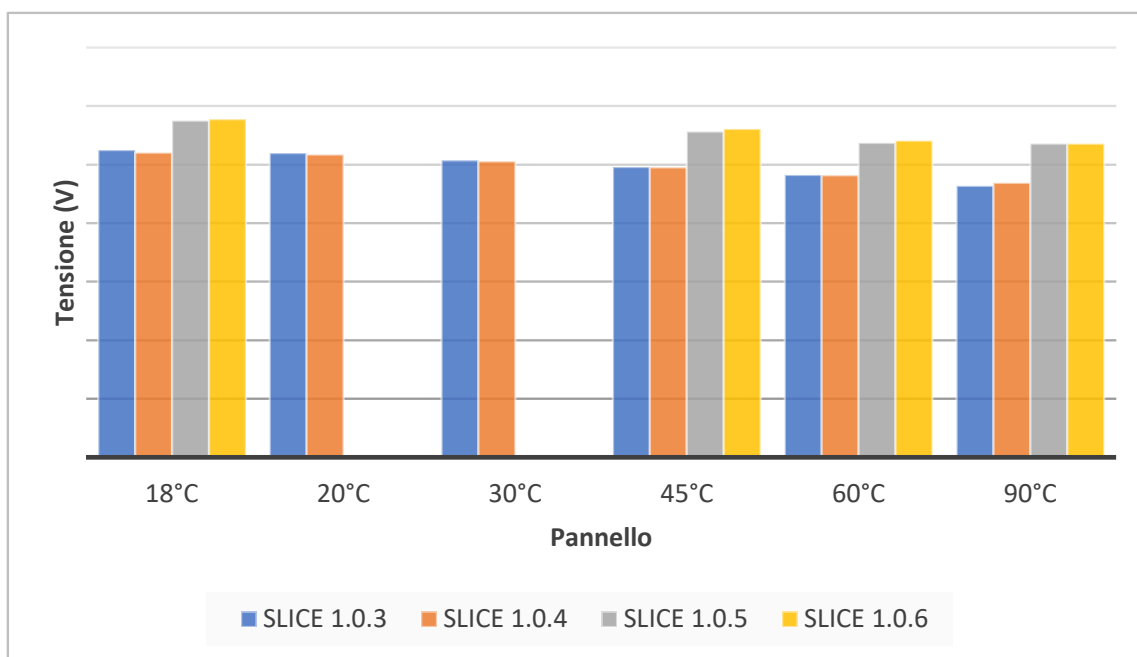


Test pannelli SLICE 1.0.5 - SLICE 1.0.6

- Serie 1 - termocoppia retro SLICE 1.0.5
- Serie 2 - termocoppia anteriore SLICE 1.0.5
- Serie 3 - termocoppia anteriore SLICE 1.0.5
- Serie 4 - termocoppia retro SLICE 1.0.6
- Serie 5 - termocoppia anteriore SLICE 1.0.6
- Serie 6 - termocoppia anteriore SLICE 1.0.6



Tab. 5.3. Risultati delle prove in camera climatica



Tab. 5.4. Grafico di confronto del decadimento della tensione dei pannelli

perature nei singoli punti dei pannelli, all'innalzarsi della temperatura all'interna della camera climatica. Le curve evidenziano un comportamento regolare nei vari punti dei pannelli e in linea con i risultati sperati: sia nella zona posteriore che in corrispondenza delle celle, non vengono registrati surriscaldamenti anomali e i valori delle temperature seguono in maniera congrua il progressivo surriscaldamento all'interno della camera climatica. Il grafico successivo (Tab. 5.4) invece riporta i dati di tensione in uscita dei singoli pannelli al termine di ogni singolo riscaldamento: anche in questo caso non vengono registrate anomalie e il decadimento della tensione maggiore tra quelli registrati, seppur irrisorio, è riscontrabile solo in condizioni di forte stress termico, alla temperatura in camera di 90°C, che ha portato ad una temperatura superficiale dei pannelli compresa tra i 50° e 60°C (Tab 7.3).

PROCESSO DI PIEGATURA

Stampo in lamiera sagomata

Lo stampo metallico in lamiera ad una sola piega semplice è stato adottato per definire i parametri di termoformatura del materiale base per pattern di piegatura complessi. Esso è costituito da due fogli di lamiera in acciaio Inox dello spessore 0.8 mm sagomati a V di 90°, tenuti in posizione mediante bulloni a farfalla posizionati lungo il perimetro.

La fase di riscaldamento è stata eseguita impiegando piastre riscaldanti dotate di termocoppie per il monitoraggio della temperatura, fissate con stringenti sullo

stampo stesso. Dopo aver posizionato il campione e assemblato lo stampo, è stata avviata la fase di riscaldamento. I parametri di tempo e temperatura sono stati ripresi da altre sperimentazioni analoghe (Rodonò, 2018) e modificati nel corso dei test effettuati per adattarli alle specificità del campione realizzato.

Preliminarmente, la metodologia è stata testata su campioni di materiale base.

Prova 1 - Termoformatura piega singola del materiale base SLICE 1.0.5 senza strato protettivo

- Temperatura impostata: 120°C
- Tempo di produzione: 10 minuti (7 minuti piastre a temperatura 160°C + 3 minuti piastre a temperatura 150°C)

Al primo tentativo è stata settata una temperatura molto più bassa di quella di produzione del composito, al fine di prevenire l'eventuale distacco dello stesso da porzioni di tessuto. Per raggiungere i 120°C il macchinario ha portato inizialmente le piastre ad una temperatura molto alta, circa 160°C: queste, infatti, essendo generalmente usate nei processi di riscaldamento dei macchinari per la pultrusione, subiscono inizialmente un riscaldamento elevato per poi stabilizzarsi dopo una decina di minuti. Per tale motivo dopo 7 minuti la temperatura è stata ridotta a 90°C, ma nelle piastre la temperatura si è comunque stabilizzata a 150°C. Lo stampo è stato disassemblato successivamente al suo raffreddamento. La rimozione del composito è risultata difficoltosa, in quanto la temperatura di processo, mantenutesi più elevata rispetto a quella impostata, ha comportato la parziale fusione della matrice in EVA.

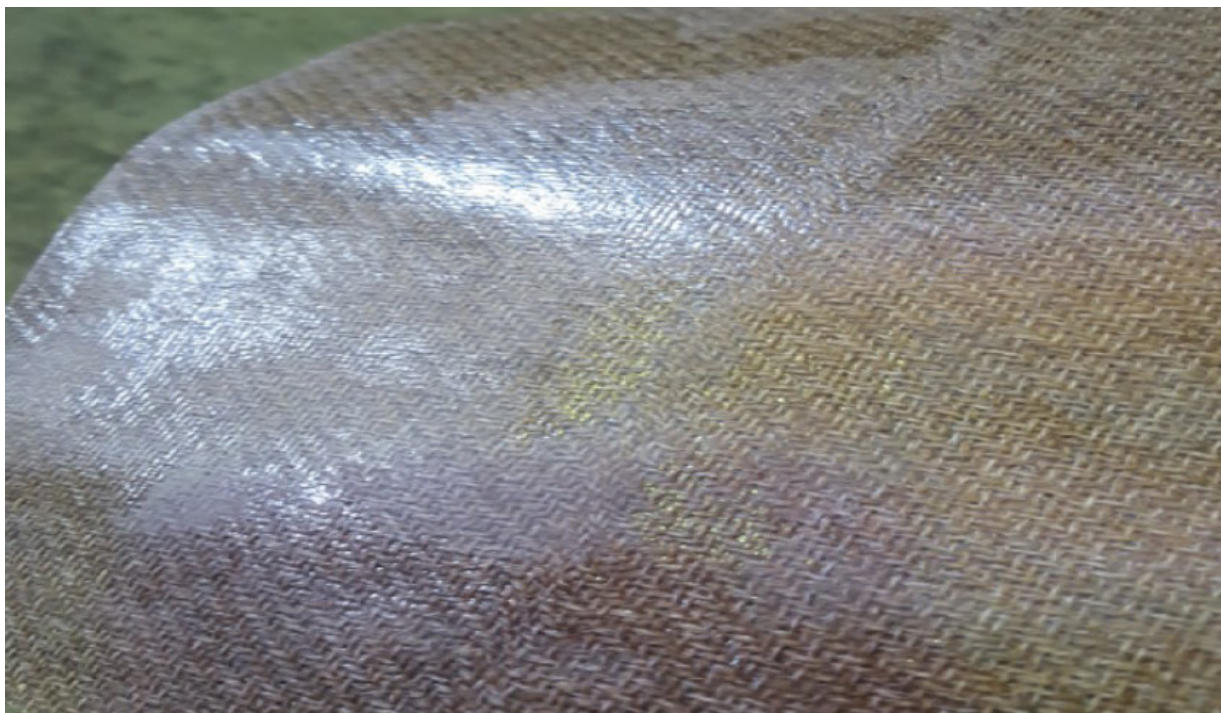


Fig. 5.13. Lo strato superficiale del tessuto risulta degradato dal contatto diretto con le pareti dello stampo

L'elevato riscaldamento è stato testimoniato tra l'altro dal danneggiamento dello strato superficiale in EVA, con evidente opacizzazione di alcuni punti, segni di un principio di ripolimerizzazione (Fig. 5.13). Il campione ha mantenuto la forma a 90° voluta, presentando però in prossimità della piega un raggio di curvatura maggiore del previsto, dovuto alla non perfetta aderenza delle parti dello stampo, caratterizzate anch'esse da uno spigolo non perfettamente vivo. Con molta probabilità la mancanza di uno strato protettivo interposto tra composito e stampo ha amplificato le alterazioni superficiali riscontrate sul materiale.

Prova 2 - Termoformatura piega singola del materiale base SLICE 1.0.5 con strato protettivo (carta impermeabile antiaderente)

- Temperatura impostata: 70°C
- Tempo: 10 minuti (8 minuti a 125°C + 2 minuti a 118°C)

Al fine di facilitare il distacco del campione al termine del processo di termoformatura ed evitare alterazioni sulla superficie del composito, è stata prevista l'interposizione di uno strato di carta impermeabile antiaderente tra ogni faccia dello stampo e il composito. Nei primi 8 minuti le piastre sono state portate ad una temperatura di 125°C, ma dopo questo lasso di tempo la temperatura è iniziata a scendere raggiungendo i 117°C. La temperatura è stata successivamente innalzata a 75°C ma non è stato riscontrato comunque nessun incremento consistente della stessa, che si è attestata a circa 118°C. La presenza dello strato protettivo

ha facilitato la rimozione del composito come atteso, tuttavia il materiale presenta imperfezioni sullo strato superficiale dovute in questo caso ad una non uniforme diffusione del calore. Anche la deformazione nella zona dello spigolo risulta meno precisa rispetto a quella ottenuta nella prima prova.

Conformatore multiplo

Nella definizione del processo di piegatura lo step successivo è rappresentato dalla sperimentazione con un conformatore multiplo. In questo caso la termoformatura è consistita nella piegatura di un campione di tessuto di lunghezza maggiore per la realizzazione di più pieghe consecutive. Anche per questa metodologia è stato adottato un campione di privo di celle fotovoltaiche, avente la stessa larghezza del campione precedente ma lunghezza pari 120 cm, per ottenere un totale di tre pieghe, denominato SLICE 1.0.7.

Nel corso dei primi test effettuati con la metodologia precedente, riferita all'uso dello stampo in lamiera piegata, è stato possibile definire in prima istanza una temperatura di processo per garantire la buona riuscita del processo deformativo che in questo caso ha rappresentato il punto di partenza per la sperimentazione.

Nell'assemblaggio del conformatore le piastre vengono interposte dal composito e orientate in modo alternato, così che il bordo possa conformare i punti di monte e di valle della forma a soffietto desiderata. Le piastre sono tenute in posizione e fissate mediante n. 4

barre filettate sui due lati corti, bloccate con i dadi alle estremità funzionano da stringenti per il fissaggio del tessuto (Fig. 5.14).

Al termine dell'assemblaggio, bloccate le estremità delle barre filettate con dadi, lo stampo è stato inserito all'interno di un forno per procedere alla termoformatura.

Prova 1 – Termoformatura multipla mediante conformatore

Temperatura: 150°C

Tempo: 30 minuti (15 min +15 min)

Per la prima prova in forno la temperatura è stata impostata a 150°C, maggiore rispetto a quella impiegata per la termoformatura singola con le piastre, che si attestava sui 120°C. La scelta è stata dettata dalla differente modalità di riscaldamento: nel caso delle piastre la trasmissione del calore avviene per conduzione, mentre all'interno di un forno il calore viene trasmesso per convezione e irraggiamento. Inoltre, il maggiore spessore del metallo impiegato per le piastre che compongono il conformatore rende più lento il raggiungimento della temperatura prestabilita nelle porzioni di composito più interne. Inizialmente la durata della prova è stata impostata in 15 minuti. Al termine di questa prima parte, è stato effettuato un controllo della temperatura dello stampo attraverso un termometro ad infrarossi, che ha rilevato nelle piastre esterne una temperatura di 120°C e nelle piastre interne una temperatura di 80°C. Dal momento che, in linea teorica, per il raggiungimento delle condizioni deformative il tessuto avrebbe dovuto raggiungere almeno i 120°C, la prova è stata prolungata di ulteriori 15 minuti. Difformemente a quanto previsto, al termine di questa

seconda fase le piastre interne avevano solo raggiunto i 90°C di temperatura. La prova è stata interrotta per evitare la fusione delle parti di compositi più esterne.

Malgrado non tutte le parti di composito avessero raggiunto la temperatura preimpostata, la formatura del campione è avvenuta con successo. La deformazione negli spigoli è marcata e permane anche dopo aver applicato modesti carichi. La parte superficiale del composito presenta dei difetti, soprattutto ai bordi, dove è stata raggiunta la temperatura maggiore.

Prova 2 – Termoformatura multipla mediante conformatore

Temperatura: 120°C

Tempo: 15 minuti

Dalle analisi ispettive condotte sul campione della precedente prova è emersa la necessità di effettuare la nuova prova impostando in forno una temperatura più bassa. In questo senso i parametri definitivi di ciclo sono stati imposti a 120°C di temperatura e 15 min di durata. Questa seconda scelta è una diretta conseguenza dai dati di monitoraggio intermedi e finali della prima prova, in cui è stata rilevata una lenta crescita della temperatura (intorno ai 10°C) nelle piastre interne dopo 15 minuti aggiuntivi di ciclo. Al termine di questa seconda prova è stato ottenuto un livello di termoformatura accettabile. I risultati più interessanti sono rappresentati dal mantenimento dell'integrità del composito, stavolta provo di zone opacizzate o danneggiate, e la mancata deformazione delle falde, che risultano perfettamente rette e lisce. Ciò dimostra che il tessuto non necessita di un riscaldamento a 120°C per raggiungere le corrette condizioni deformative. La prova ha quindi raggiunto i risultati attesi.

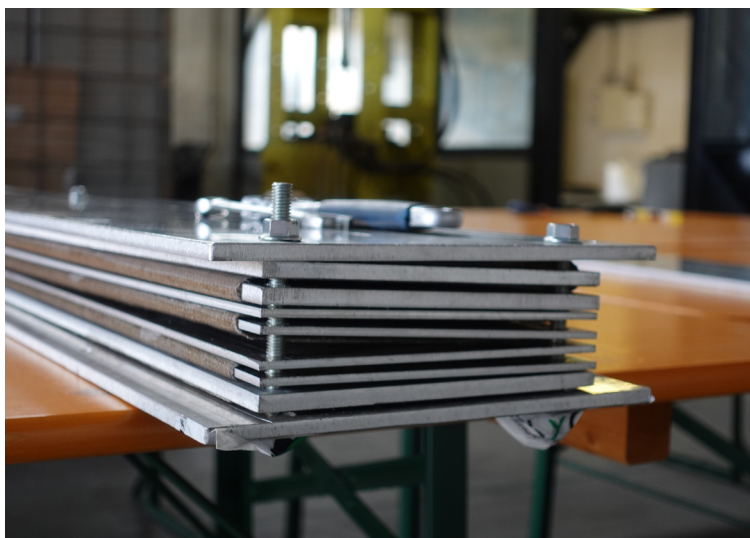


Fig. 5.14. Il conformatore assemblato e prima della termoformatura

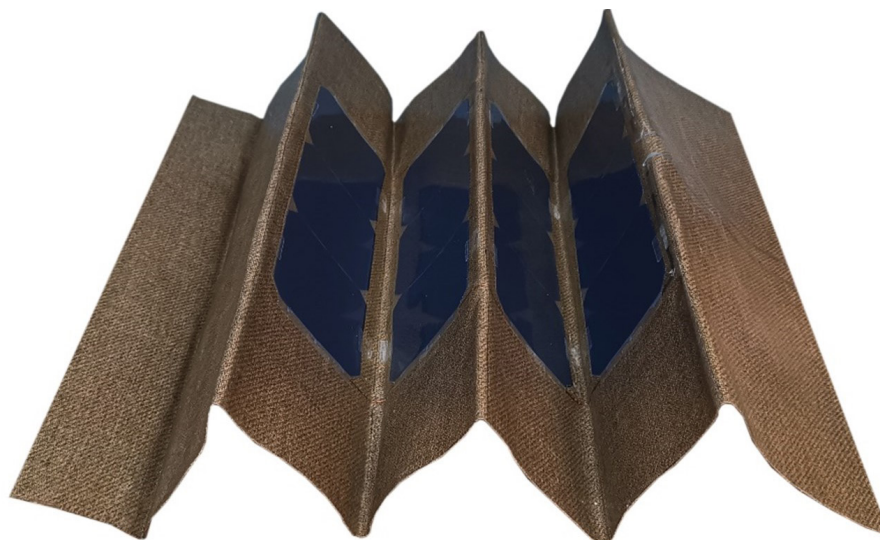


Fig. 5.15. Pannello Slice 2.0.1 dopo il processo di piegatura per termoformatura con conformatore

I parametri della prova 2 sono stati adottati per la termoformatura del campione SLICE 2.0.1. In questo caso è stato preliminarmente realizzato un campione di tessuto completo di celle fotovoltaiche, la cui fase di produzione è stata compiutamente descritta nel paragrafo precedente. Il campione, utilizzato per il prototipo di dimensioni pari a 120 cm x 70 cm, è stato ridimensionato tramite il taglio dei lembi in eccesso alla nuova misura misura 68 cm x 99 cm. Anche in questo caso è stato scelto come pattern di piegatura il soffietto, costituito da 3 pieghe aventi falde larghe 16,5 cm (Fig. 5.15).

SLICE 1.0

La prima fase di test ha riguardato il prototipo SLICE 1.0 ed è stata finalizzata alla verifica del funzionamento dell'insieme sensori-attuatori. In prima istanza è stata realizzata la prima versione del codice di programmazione su piattaforma Arduino e sulla base delle possibili funzioni da attribuire al componente, è stata effettuata una ricerca sulla sensoristica adottabile. Successivamente è stato verificato il range di funzionamento del sistema elettromeccanico del prototipo in funzione del valore di tensione della batteria installata.

Il codice sorgente del prototipo SLICE 1.0 si basa su una serie di istruzioni semplici, in cui viene richiesto al microcontrollore di attivare alternativamente i pin dei rispettivi relè per l'avvio del moto nell'uno o nell'altro verso fino al blocco, quando vengono attivati gli interruttori di fine corsa. Il movimento del componente è completamente automatico ma consente anche il controllo manuale (Fig. 5.16). La modalità manuale permette di aprire e chiudere il componente attraverso i rispettivi tasti di apertura e chiusura. La modalità automatica invece tiene conto della lettura valori di una

fotoresistenza tramite il pin analogico A0. Attraverso il riconoscimento di alcuni valori soglia impostati nel codice, il microcontrollore comanda l'apertura o la chiusura del componente fino al raggiungimento del valore analogico impostato (corrispondente, successivamente ad una fase di taratura, ad un previsto valore di illuminamento in lux).

Il circuito è costituito dal microcontrollore Arduino Mega 2560, interruttori, fotoresistenza per il monitoraggio dei valori di illuminamento e scheda relè per il comando del moto del motoriduttore, come illustrato in Fig. 5.17. L'intero circuito è alimentato attraverso una batteria al litio da 3,7V che alimenta il motoriduttore direttamente tramite la scheda relè e parallelamente la scheda Arduino.

Presso il laboratorio dell'azienda partner Meridionale Impianti sono stati effettuati i primi test sul corretto funzionamento del codice. Preliminarmente la scheda Arduino è stata collegata via USB ad un PC da impiegare come monitor seriale per monitoraggio dei dati dai sensori e la lettura delle parti di codice attivate. Il primo step è consistito nell'avvio del prototipo. Attivati gli interruttori di alimentazione e di accensione della scheda Arduino, il prototipo SLICE 1.0 ha modificato la sua conformazione cambiando istantaneamente la sua posizione di piegatura compatibilmente al valore di illuminamento dell'ambiente. Per simulare la variazione della luminosità interna, il sensore di luminosità è stato ombreggiato per alcuni minuti, con conseguente ripiegamento del componente in modo da raggiungere il livello di illuminazione interna preimpostato. Allo stesso tempo è stata testata la possibilità di poter agire sui controlli manuali: agendo sui comandi di apertura e chiusura sono stati avviati cicli di piegatura e dispiegamento manuali. Al termine del test, è stato illuminato il fotoresistore da vicino con una fonte di luce artificiale

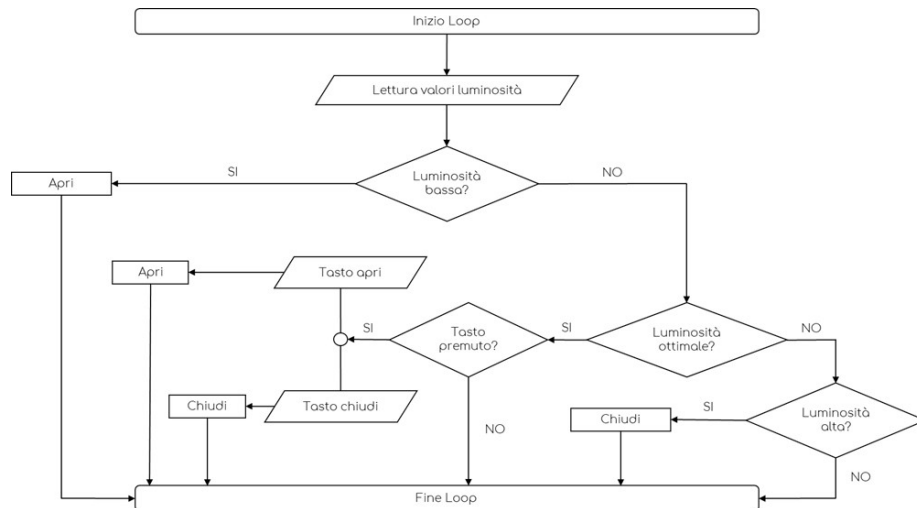


Fig. 5.16. Diagramma di flusso per la codifica del programma del prototipo SLICE 1.0

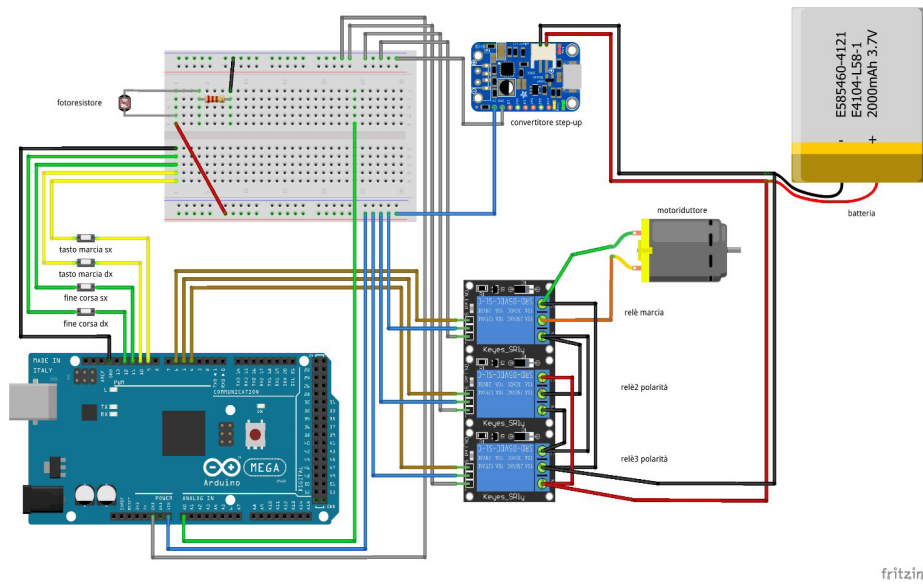


Fig. 5.17. Circuito del sistema di controllo del prototipo SLICE 1.0

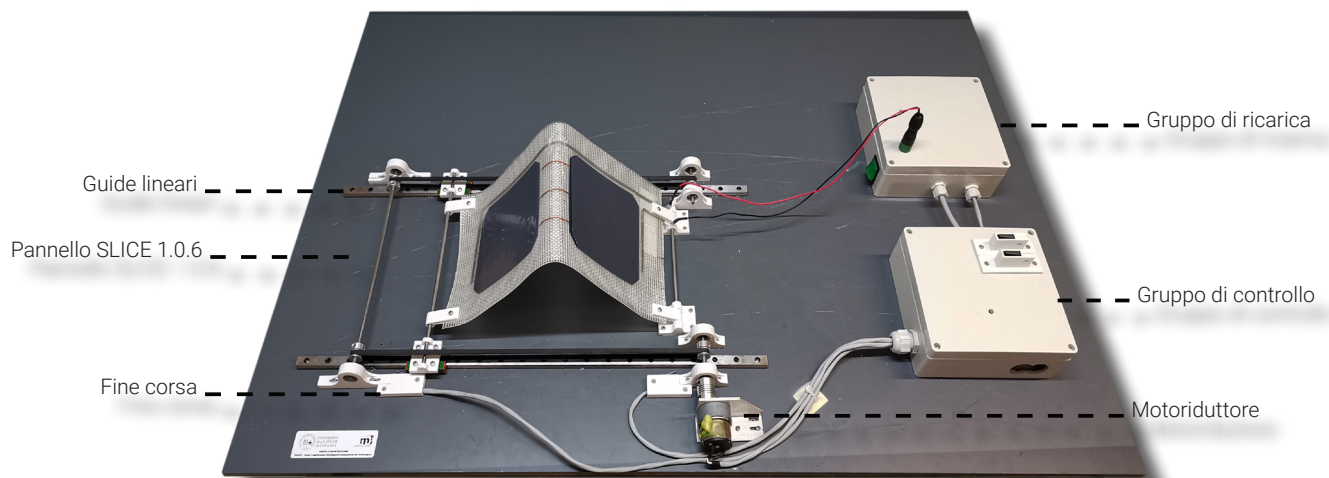


Fig. 5.18. Prototipo SLICE 1.0

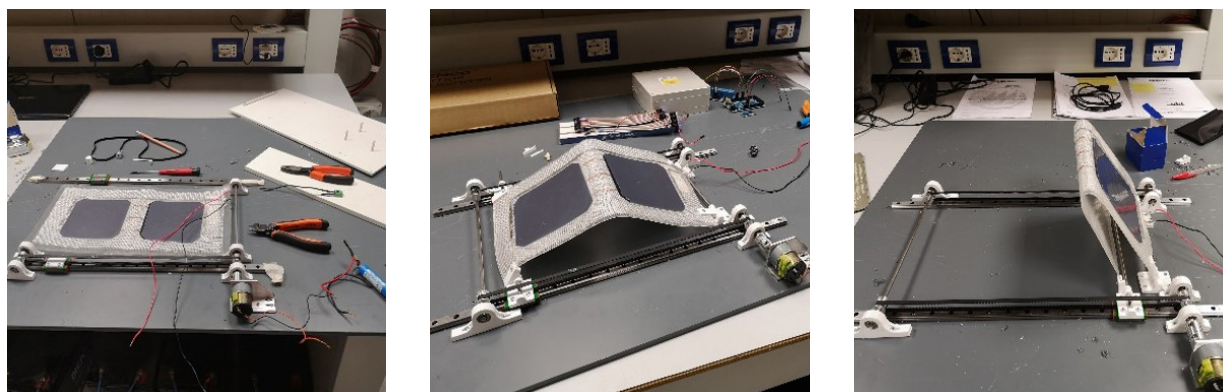


Fig. 5.19. Test di apertura e chiusura sul prototipo SLICE 1.0.

per simulare una condizione di abbagliamento che ha comportato il dispiegamento automatico del componente. Allontanando gradualmente la fonte di luce dal fotoresistore, quando è stato raggiunto il valore limite di 500 lux (valore leggibile dal monitor seriale del PC), il componente ha interrotto il suo movimento.

Durante i test sono stati monitorati i consumi del circuito e del motoriduttore al fine di poter fare un bilancio energetico e valutare l'effettiva autonomia del prototipo tra una ricarica e la successiva.

Il motoriduttore impiegato è da 3,8 V e 360 mA. Ogni ciclo di apertura o di chiusura ha una durata di 4 secondi. Considerata la capacità della batteria di 2250 mAh, essa fino a completo scaricamento potrebbe (teoricamente) assicurare 6250 cicli di apertura/chiusura. Dalle simulazioni in laboratorio è emerso che buona parte dell'energia disponibile viene assorbita dal circuito, che a 3,8V e 170 mA di corrente, presenta un assorbimento costante di 170 mAh, in grado di scaricare completamente la batteria in 13 h. tenuto conto di un minimo di carica residua necessaria per non danneggiare la batteria, il prototipo così configurato è in grado di operare tra un ciclo di ricarica e il successivo per circa 10 ore continuative.

| | |
|----------------------|---------------------------------|
| Dimensioni e peso | 20 x 40 cm; 139 g |
| Matrice | EVA SKC Films EF2N |
| Rinforzo | Fibra di vetro |
| Celle fotovoltaiche | SunPower Maxeon® Gen I |
| Circuito di ricarica | ST Microelectronics ST SPV1040T |
| Batteria | 3.7V 2250 mAh 8.33Wh litio |
| Microcontrollore | Arduino Mega 2560 |

Tab. 5.5. Scheda tecnica prototipo SLICE 1.0

SLICE 2.0

Sistema schermante

L'elemento schermante è la componente del prototipo che ha subito l'evoluzione più significativa. Per la sperimentazione è stato adottato il pannello SLICE 2.0.1. La modalità di connessione elettrica delle celle è mutata in modo tale da garantire un voltaggio ai poli idoneo al funzionamento della componentistica di ricarica. Nello specifico il circuito è costituito da quattro rami di celle in silicio monocristallino in parallelo, ciascuno dei quali è composto da tre celle collegate in serie (Fig. 5.20).

È stata progettata una nuova apparecchiatura di supporto con una nuova struttura installabile su un infisso e capace di ospitare le dovute modifiche hardware il nuovo prototipo SLICE 2.0. Eseguito il rilievo di una finestra tipo dell'Edificio n.4 del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, è stato progettato un telaio smontabile da poter installare e adattare alternativamente in più finestre posizionate nei diversi prospetti dello stesso. La realizzazione della struttura di base e delle parti opache è stata effettuata mediante l'uso di legno multistrato fenolico di pioppo spessore 18 mm. Questo è stato assemblato in maniera tale da essere facilmente smontato e piegato a libro.

Sistema di movimentazione

Per il cinematismo e il controllo di SLICE 2.0 sono state riutilizzate in buona parte i componenti del prototipo SLICE 1.0; le altre parti sono state realizzate ex-novo o integrate per essere adattare l'installazione al nuovo supporto e adeguare le funzionalità dello stesso al cinematismo del campione in composito di dimensioni reali.

Allo stesso scopo sono stati stampati in 3D nuovi ganci in PLA per poter fissare il tessuto ai punti fissi e ai carrelli di trascinarsi. L'aumento dell'escursione dei

carrelli ha reso necessario l'uso di una nuova cinghia GT2 da 5 mm su misura. Nell'ottica di ottimizzare la resistenza dei componenti con le nuove sollecitazioni si è scelto di utilizzare materiali alternativi e dalle performance superiori al PLA. Nello specifico sono stati progettati e realizzati dei nuovi supporti impiegando come supporto il PMMA (Polimetilmetacrilato) da 5mm, comunemente conosciuto col nome "plexiglass". Per agevolare la corretta piegatura delle falde nelle fasi di apertura e chiusura sono state aggiunte due guide laterali a scorrimento di supporto realizzate tondini in acciaio \varnothing 5mm, a cui sono state ancorate le falde di valle del tessuto tramite ganci a forchetta in PMMA accoppiate a cuscinetti lineari LM5UU. Per ottenere un'apertura con angoli di ampiezza regolare tra le falde sono stati installati dei cavi di lunghezza fissa tra i suddetti ganci.

Una volta assemblata la parte meccanica del modello sono stati avviati i primi test sul cinematismo del componente (Fig. 5.21).

Sistema di ricarica della batteria

SLICE 2.0 è equipaggiato con una batteria da 4500 mA da 3.7V, ritenuta più idonea per l'impiego nel nuovo prototipo, collegata alla scheda di ricarica ST SPV1040 per l'accumulo dell'energia prodotta dalle celle. Al fine di velocizzare le fasi di ricarica nel corso dei primi ripetuti test sul cinematismo, la batteria è stata collegata ad una scheda di carica per batteria al litio TC4056 IZOKEE 1A 5V micro-USB con protezione e led indicatore di carica (Fig. 5.22). In tal modo con un semplice caricabatteria da smartphone è possibile riportare agevolmente la batteria alle condizioni idonee per l'esecuzione di test anche in laboratorio.

Sistema di gestione e controllo

Il sistema di controllo di SLICE 2.0 raccoglie i dati provenienti dai sensori, sulla base dei valori di lettura individua la casistica di riferimento a cui corrispondono precisi comandi. Il codice è stato messo a punto tenendo conto di alcune istruzioni a pacchetto che vengono impartite dal microcontrollore al gruppo di movimentazione per interpretazione di specifici input esterni. Questo ha richiesto un preliminare studio di nuovi sensori, al fine di individuare quali fossero i più adatti agli scopi del progetto. Il sistema di controllo Arduino dedicato alla gestione della schermatura adattiva, nella fase di sviluppo di SLICE 2.0, è stato implementato con le componenti seguenti:

- fotodiodo, installato sul telaio esterno del prototipo. Registra le variazioni delle condizioni di luminosità dell'ambiente esterno e il valore analogico restituito viene indirizzato al pin A1;
- sensore di luminosità Adafruit GA1A12S202 analogico in scala logaritmica. Permette di registrare le condizioni di illuminamento all'interno e il valore analogico restituito viene indirizzato al pin A0;
- sensore di umidità e temperatura, per il monitoraggio delle condizioni di umidità e temperatura indoor;
- modulo di rilevazione del movimento a infrarossi HC-SR501 PIR, installato all'interno rileva la presenza di occupanti;
- sensore pioggia/neve Raindrops Module MH-RD, applicato sulla faccia esterna del telaio ligneo della schermatura, rileva la presenza di acqua;
- sensore di pioggia, per il rilevamento di gocce d'acqua sulla schermatura permettendone la chiusura (implementazione per installazioni orizzontali). Il valore analogico in questo caso viene indirizzato al pin A5;

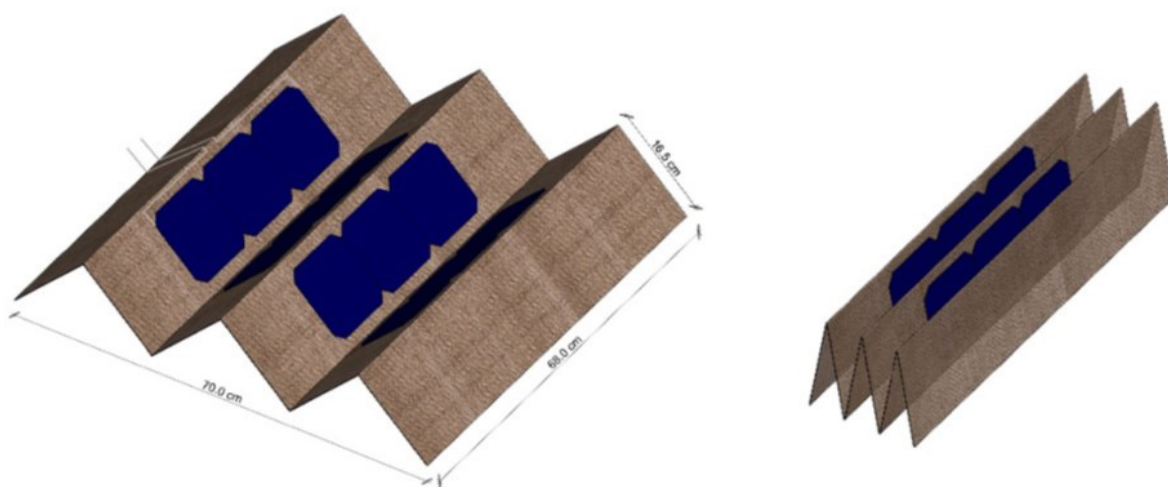


Fig. 5.20. Rappresentazione del tessuto piegato nelle configurazioni disteso e raccolto



Fig. 5.21. Test di funzionamento del prototipo SLICE 2.0

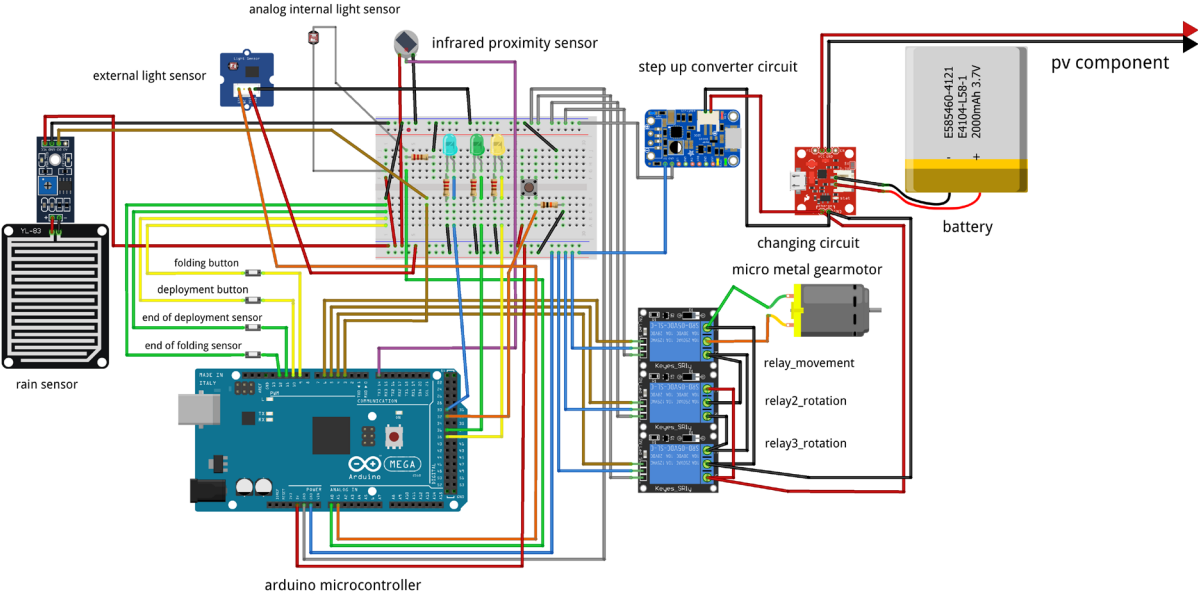


Fig. 5.22. Circuito del sistema del controllo del prototipo SLICE 2.0

- accelerometro, installato direttamente sul tessuto, per rilevare eventuali vibrazioni dovute a forti raffiche di vento o al contatto con oggetti terzi, in modo da prevedere il blocco del moto istantaneo e la chiusura immediata del componente, con valore analogico in lettura ai pin A2 e A4;
- sensore di corrente AZDelivery ACS712 20°, per il monitoraggio dell'efficienza del sistema di ricarica attraverso la lettura dei valori di intensità di corrente delle celle fotovoltaiche sulla porta A6;
- display LCD HD44780 2 righe x 16 caratteri, installato sul supporto di ricarica, per la visualizzazione delle informazioni relative alla tensione della batteria e di intensità di corrente delle celle fotovoltaiche, il valore analogico dei sensori e lo stato di funzionamento del prototipo.

L'insieme dei sistemi di controllo e di ricarica, a differenza dalla prima versione del prototipo, è stato separato dal supporto che ospita la componente schermante. In tal modo è possibile applicare il telaio ligneo ad un infisso e monitorare la parte elettronica dall'interno dell'edificio mediante un pannello comandi dedicato munito di cavo a 8 fili da 2 metri. Per l'installazione del sensore di movimento ad infrarossi è stata collocata una breadboard sulla quale, inoltre, sono stati disposti tre led ed un pulsante. L'accensione dei led indicano le modalità di funzionamento attive, mentre il pulsante permette l'interazione dell'utente col sistema.

| | |
|-----------------------|--|
| Dimensioni e peso | 100 cm x 68 cm; 1.5 kg |
| Matrice | EVA SKC Films EF2N |
| Rinforzo | Biotex Flax, 400 g/m2 Composites Evolution Ltd |
| Layer aggiuntivo | DUN-SOLAR PPE |
| Celle fotovoltaiche | SunPower Maxeon® Gen I |
| Circuiti di ricarica | ST Microelectronics ST SPV1040T TC4056 IZOKEE 1A 5V micro-USB |
| Batteria | 3.7V 2250 mAh 8.33Wh litio |
| Microcontrollore | Arduino Mega 2560 |
| Guide | 550 mm Mini MGN12H |
| Cinghie | Tiptiper 2GT-6 |
| Motoriduttore | POLOLU-2205 150:1 Micro Metal Gearmotor LP 6V |
| Sensore di luminosità | Adafruit GA1A12S202 |
| Sensore di prossimità | PIR HC-SR501 |
| Sensore di corrente | ACS712 - 20 A |
| Display LCD | HD44780 |



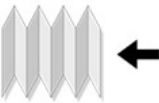
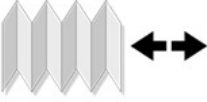
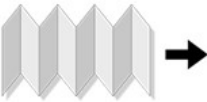





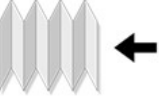
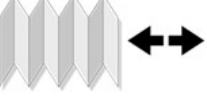






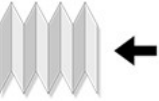
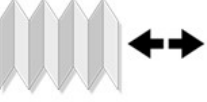
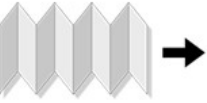



Tab. 5.6. Scheda tecnica prototipo SLICE 2.0

Per prototipo SLICE 2.0 gli aggiornamenti hanno riguardato la parte hardware ma soprattutto il software. Il codice del programma è stato modificato ed implementato in modo da migliorare la funzionalità del sistema e prevedere settaggi differenti in base a differenti variabili, es. condizioni climatiche nelle diverse stagioni, modalità d'uso mirate all'ottimizzazione del sistema di produzione dell'energia per la ricarica delle batterie o orientate a privilegiare il comfort termico e/o luminoso degli ambienti interni per gli occupanti. Il collegamento dei nuovi sensori e del display LCD permette inoltre all'utente di poter monitorare il livello di carica delle batterie o l'energia risparmiata (Attardo, 2020).

Per questo motivo il programma è stato strutturato in modo da portare avanti N processi in parallelo in tempo reale, una macchina multitasking, scomponendo la logica del codice di SLICE 1.0 in piccoli processi più semplici che possono anche collaborare, ampliando man mano il bacino di funzioni previste del sistema senza interferire con le scritture preesistenti. Questo tipo di struttura prende il nome di macchina a stati finiti, ovvero istruzioni con cui il sistema può agire in un determinato modo al verificarsi di precisi eventi (Lee et al., 2018). Le azioni che seguono in risposta agli eventi preimpostati vengono a rappresentare perciò il comportamento del sistema. L'informazione che definisce lo stato può anche essere identificata da un singolo valore o range di valori contenuto nella memoria del microcontrollore e che se riconosciuto, rappresenta l'identificazione da parte del sistema di una determinata situazione. All'interno di uno stato, con la contemporanea lettura dei valori digitali e/o analogici provenienti da altri ingressi, la macchina si comporta in maniera intelligente nell'ordine temporale degli eventi, compiendo determinate azioni oppure cambiando stato.

Il codice ha visto l'introduzione di tre diverse modalità di funzionamento, denominate rispettivamente *Comfort Mode*, *Energy Mode* e *Manual Mode*.

L'aggiunta di un sensore di movimento consente di rilevare la presenza o l'assenza di occupanti nella stanza e, di conseguenza, il sistema può funzionare in *Comfort Mode* o *Energy Mode* (Fig. 5.23). La *Comfort Mode* mira a gestire le condizioni di comfort visivo all'interno dell'ambiente interno. Nello specifico è stato possibile ottenere un automatismo tale da muovere e regolare il livello di dispiegamento del componente considerando valori di illuminamento soglia prestabiliti in funzione del diverso utilizzo dell'ambiente. In questa configurazione è prevista la produzione di energia in caso di batteria scarica o addirittura il ripiegarsi e il riposizionamento in sede del componente in caso di condizioni

| SEASON | OCCUPANTS AND CONTROL METHODS | | FUNCTIONALITY |
|--|---|--|--|
|  Summer |  | working hours: <i>Comfort mode</i> | low indoor brightness  |
| | | | intermediate indoor brightness  |
| | | | high indoor brightness  |
| |  | office closing hours: <i>Energy mode</i> | sunny  |
| cloudy  | | | |
|  Winter |  | working hours: <i>Comfort mode</i> | low indoor brightness  |
| | | | intermediate indoor brightness  |
| | | | high indoor brightness  |
| |  | office closing hours: <i>Energy mode</i> | sunny  |
| cloudy  | | | |
|  Spring Autumn |  | working hours: <i>Comfort mode</i> | low indoor brightness  |
| | | | intermediate indoor brightness  |
| | | | high indoor brightness  |
| |  | office closing hours: <i>Energy mode</i> | sunny  |
| cloudy  | | | |

Tab. 5.7. SLICE 2.0 – Modalità operative del Sistema adattivo di SLICE 2.0

atmosferiche avverse che potrebbero causare danni.

Quando il sensore non rileva la presenza di utenti, il sistema di controllo Arduino attiva l'*Energy Mode*, finalizzata all'ottimizzazione della produzione di energia attraverso il completo dispiegamento della schermatura, garantendo la completa estensione della superficie fotovoltaica.

La *Manual Mode*, attivabile da pulsante dedicato, permette di disattivare la modalità automazione, per effettuare attività di manutenzione o pulizia del serramento.

L'interfaccia di Arduino IDE è caratterizzata da librerie, ossia un insieme di codici base precompilati, che consentono sia di eseguire operazioni complesse sia di gestire dispositivi esterni. È stata utilizzata la libreria *LiquidCrystal* (Fig. 5.24.a), che consente la comunicazione con il display a cristalli liquidi Hitachi HD44780 installato (o altri compatibili). La modalità di trasmissione dati è a 4 bit per gestire un display a 2 righe e 16 colonne con le informazioni necessarie per il monitoraggio di SLICE 2.0. Lo schema di funzionamento del codice sviluppato è mostrato in Tab. 5.5.

La prima parte del codice dichiara le variabili, cioè una sorta di contenitori di istruzioni in cui i dati vengono memorizzati per un uso successivo da parte del codice. Alcuni di questi definiscono i pin di input/output di Arduino per la gestione dei componenti, altri mantengono valori numerici o binari. In questo codice assumono particolare importanza le variabili *state* e *statePushbutton*. Il valore assunto dalla prima variabile determina la condizione di presenza/assenza dell'utente nell'ambiente. La seconda, invece, identifica l'eventuale attivazione del pulsante di azionamento manuale del prototipo (Fig. 5.24.b).

La parte attiva del codice è rappresentata dai blocchi *setup* e *loop*, che sono gruppi complessi di variabili legate alle librerie tramite istruzioni. Il paragrafo *setup* contiene l'insieme delle operazioni che vengono eseguite all'inizio del programma e una volta sola. In questa fase vengono definite le modalità di funzionamento; vengono richiamate l'inizializzazione dei pin analogico e digitale, la velocità di comunicazione del monitor seriale e la funzione che attiva il display LCD (Fig. 5.24.c).

Il paragrafo *loop* rappresenta il corpo principale del codice. All'interno di questo vengono eseguite a ciclo continuo tutte le operazioni per l'intera fase di esecuzione del programma. I valori corrispondenti alla tensione della batteria e delle celle fotovoltaiche vengono acquisiti, convertiti e successivamente memorizzati nelle rispettive variabili. Vengono registrati anche i valori dei sensori di luminosità e di prossimità (Fig.

5.24.d).

Nella successiva porzione di blocco vengono letti i valori analogici dei pin ai quali sono connessi i poli positivi della batteria e delle celle fotovoltaiche. Vengono, inoltre, eseguite le operazioni matematiche di conversione dal valore analogico al corrispondente valore in volt per essere immagazzinate nelle corrispondenti variabili, acquisiti e conservati i valori dei sensori di luminosità e di movimento (Fig. 5.24.e).

Una parte del codice in questa sezione è dedicata alla configurazione della prima riga del display lcd, nella quale vengono riportate le informazioni energetiche provenienti dalla batteria e dalle celle fotovoltaiche. La connessione del dispositivo di controllo ad un pc permette di sfruttare la comunicazione attraverso il comando *Serial.print*. In tal modo è possibile monitorare in tempo reale le operazioni effettuate dal programma.

Ogni ciclo del programma inizia controllando lo stato di un pulsante di selezione della modalità *ModeSelectionButton* sul pannello di controllo. La pressione di questo pulsante, per 1 secondo, determina il passaggio della variabile *ModeButton* al valore *HIGH*. Il LED blu si accende, i LED giallo e verde si spengono, il valore 4 viene quindi assegnato alla variabile *case*. Quest'ultima operazione richiama la porzione di codice denominata *Case_4* corrispondente alla gestione manuale del componente. In caso contrario, il valore *LOW* della variabile *ModeButton* abilita il ramo di codice che interroga il sensore di movimento. Ciò che viene percepito da questo sensore determina il valore *HIGH/LOW* della variabile *pinVal*, ovvero l'esecuzione della parte di codice relativa alle configurazioni automatiche *Comfort Mode* ed *Energy Mode*. (Fig. 5.24.f-g).

L'istruzione *switchCase*, nota anche come funzione di istruzione multipla, consente al programma di controllare il flusso del componente specificando diverse porzioni di codice da eseguire in base a una serie di condizioni impostate (ovvero, lettura iniziale dei valori del sensore) (Fig. 5.24.h).

Per la sezione codice *Comfort Mode*, l'analisi del valore restituito dal sensore di luminosità viene confrontata con il valore soglia di illuminamento impostato (es. 500 lux).

Per valori di illuminamento inferiori al set-point, il sistema richiama il codice definito nel *Case_0*, ripiegando la schermatura per aumentare l'afflusso di luce diurna nell'ambiente, fino al raggiungimento del valore di luminosità di riferimento. Corrispondentemente, per valori compresi tra 501 lux e 1000 lux, il sistema richiamerà il codice definito nel *Case_1* attivando all'interno di questo range operativo anche la gestione manuale, oppure richiamerà il *Case_2* per valori su-

periori a 1000 lux. Quest'ultimo scenario corrisponde all'insorgere del rischio di abbagliamento, quindi determina il completo dispiegamento del componente fino al raggiungimento della condizione ideale e del valore di luminosità di riferimento (Fig. 5.24.i).

Il sensore di movimento, dopo 45 secondi dall'ultima rilevazione di presenza umana nell'ambiente, imposta la sua uscita digitale su *LOW*, che determina l'attivazione della sezione codice *Energy Mode*, richiamando la parte di codice *Case_3*. Questo paragrafo di istruzioni prevede il completo dispiegamento dell'elemento schermante per garantire la massima esposizione della superficie fotovoltaica (Fig. 5.24.m).

Per quanto riguarda la sintassi il *Case_3* prevede l'apertura totale della schermatura per permettere la

ricarica della batteria ma include la verifica del valore digitale restituito dal Raindrops Module MH-RD, che potrebbe richiedere la chiusura della schermatura in caso di pioggia, al fine di preservare il componente. Il *Case_4* attivato con la modalità di funzionamento manuale, si differenzia dal *Case_1* (intermedio) soltanto per il messaggio restituito all'utente dal monitor seriale e dal display lcd.

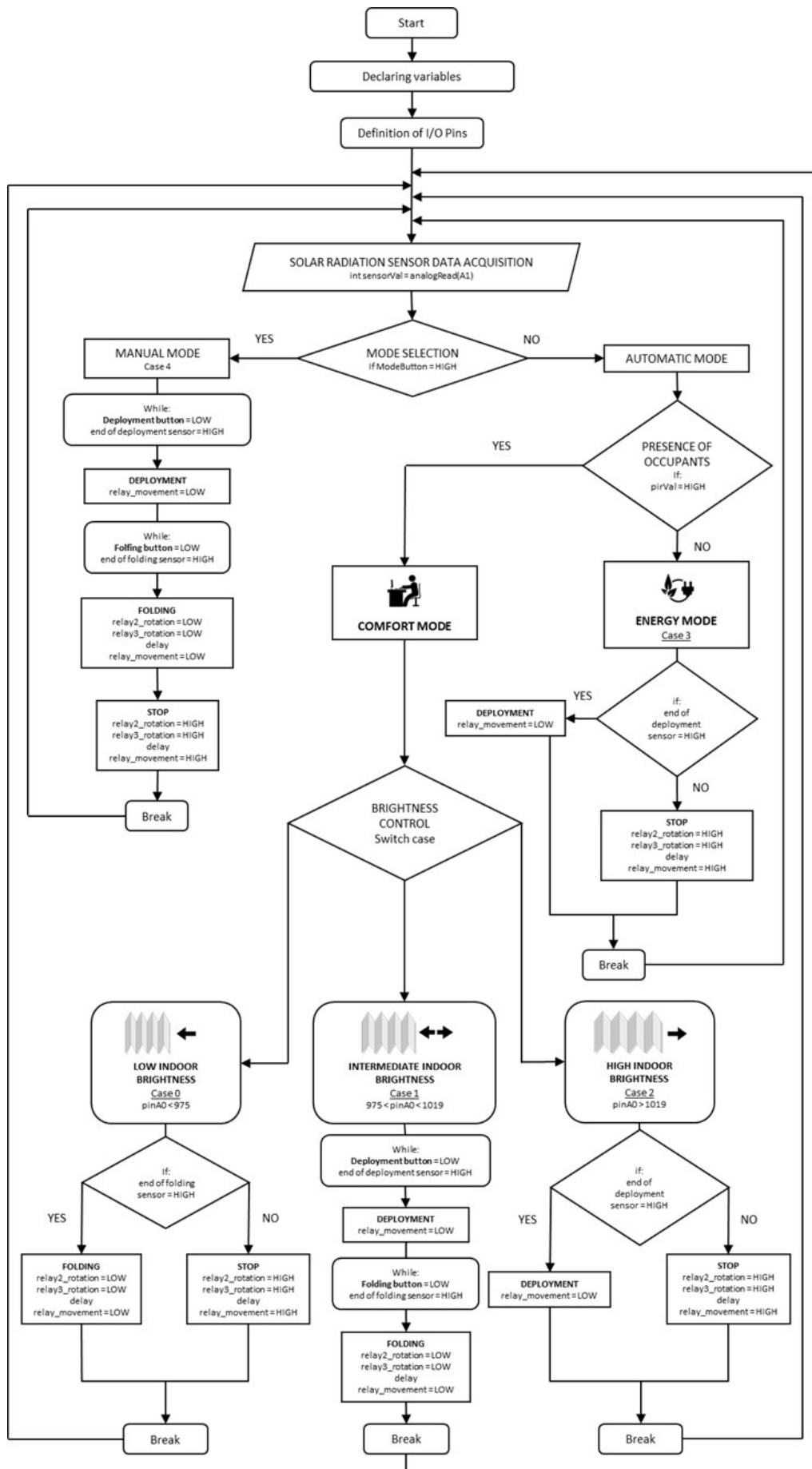


Fig. 5.23. Management adaptive procedure of SLICE 2.0

```

a sketch_SLICE_2_0
  // LIBRERIA GESTIONE DISPLAY LCD
  #include <LiquidCrystal.h>
  LiquidCrystal lcd(22,24,38,40,42,44);

b // VARIABILI INTERRUITORI
  int button_marcia_sx = 9;
  int button_marcia_dx = 10;
  int button_fine_corsa_sx = 11;
  int button_fine_corsa_dx = 8;

  // VARIABILI GESTIONE RELE'
  int ritardo_commutazione = 200;
  int attesa = 100;
  int rele_marcia = 6;
  int rele2_polarita = 5;
  int rele3_polarita = 4;

  // VARIABILI GESTIONE SENSORI
  int luminosita_sensore = A1;
  int pir = 14; // porta digitale sensore di prossimità
  int pioggia_sensore = 3; // porta digitale sensore pioggia
  int baseVal = 415; // valore limite inferiore 500 lux
  int tensione_batteria=A4;
  int tensione_pannello=A3;
  int caso = 0;
  int state = LOW; // valore di default, nessuna presenza
  int pirVal = 0; // variabile dove conservare lo stato del sensore pir
  int statoPulsante = LOW; // variabile che registra lo stato del pulsante man/auto

c void setup()
  {
    pinMode(button_marcia_sx,INPUT);
    pinMode(button_marcia_dx,INPUT);
    pinMode(button_fine_corsa_sx,INPUT);
    pinMode(button_fine_corsa_dx,INPUT);
    pinMode(rele_marcia,OUTPUT);
    pinMode(rele2_polarita,OUTPUT);
    pinMode(rele3_polarita,OUTPUT);
    pinMode(9, INPUT_PULLUP);
    pinMode(10, INPUT_PULLUP);
    pinMode(11, INPUT_PULLUP);
    pinMode(8, INPUT_PULLUP);
    digitalWrite(rele_marcia,HIGH);
    digitalWrite(rele2_polarita,HIGH);
    digitalWrite(rele3_polarita,HIGH);
    pinMode(luminosita_sensore,INPUT);
    pinMode(tensione_batteria,INPUT);
    pinMode(tensione_pannello,INPUT);
    pinMode(pir, INPUT);
    pinMode(32,INPUT);
    pinMode(30,OUTPUT); //led azzurro "manual"
    pinMode(34,OUTPUT); //led verde "energy"
    pinMode(36,OUTPUT); //led giallo "comfort"

    Serial.begin(9600);
    lcd.begin(16,2);
  }

```

Fig. 5.24. Codice sorgente per la gestione del prototipo SLICE 2.0

```

d void loop()
{ // ASSEGNAZIONE VALORI ANALOGICI
  tensione_batteria = analogRead(A4); // Assegna il valore analogico della tensione della
                                        // batteria alla variabile tensione_batteria
  tensione_pannello = analogRead(A3); // Assegna il valore analogico della tensione delle
                                        // celle alla variabile tensione_pannello
  float valore_batteria= tensione_batteria * (5.1/1024.0); // Converte il valore analogico in volt
  float valore_pannello= tensione_pannello * (5.1/1024.0); // Converte il valore analogico in volt
  int sensorVal = analogRead(A1); // Assegna il valore analogico del sensore di
                                        // luminosità alla variabile sensorVal
  pirVal = digitalRead(pir); // Legge il valore del sensore di prossimità

e //CODICE DISPLAY LCD
  lcd.setCursor (0,0);
  lcd.print("B: ");
  lcd.print(valore_batteria);
  lcd.print(" C: ");
  lcd.print(valore_pannello);

  //CODICE MONITOR SERIALE
  Serial.println("-----");
  Serial.print("Tensione Batteria: ");
  Serial.println(valore_batteria);
  Serial.print("Tensione Celle: ");
  Serial.println(valore_pannello);
  Serial.print("Sensore Luminosità: ");
  Serial.println(sensorVal);

f // VERIFICA STATO MODALITA' AUTOMATICA/MANUALE
  if (digitalRead(32) == HIGH)
  {
    statoPulsante=!statoPulsante;
    delay(200);
  }
  if (statoPulsante == HIGH)
  {
    // MODALITA' MANUALE
    digitalWrite(30,HIGH);
    digitalWrite(34,LOW);
    digitalWrite(36,LOW);
    lcd.setCursor (0,1);
    lcd.print("Manual Mode");
    Serial.println("MANUAL MODE");
    //la schermatura è comandata manualmente
    caso = 4;
  }
}

```

Fig. 5.24. Codice sorgente per la gestione del prototipo SLICE 2.0

```

g
else
{
  // MODALITA' AUTOMATICA
  digitalWrite(30,LOW);
  Serial.println("AUTOMATIC MODE");
  // INTERROGAZIONE SENSORE DI PROSSIMITA'
h
  if (pirVal == HIGH)
  {
    //UTENZA PRESENTE
    lcd.setCursor (0,1);
    lcd.print("ComFortMode");
    Serial.println("COMFORT MODE");
    digitalWrite(36,HIGH);
    digitalWrite(34,LOW);
    delay(200);
    //ANALISI CONDIZIONE DI ILLUMINAMENTO INTERNO
    if (sensorVal < baseVal)
    {
      caso = 0;
    }
    if (sensorVal >= baseVal && sensorVal < baseVal + 80)
    {
      // Serial.println("la schermatura è gestibile dall'utente");
      // codice CASE 1 intermedio
      // schermatura gestibile dell'utente
      // nell'intervallo 501-1000 lux
      caso = 1;
    }

    if (sensorVal >= baseVal + 100)
    {
      // condizione di abbagliamento
      // codice CASE 2 luce
      caso = 2;
    }
    ,
    delay (200);
  }
  else
  {
    // UTENZA ASSENTE
    lcd.setCursor (0,1);
    lcd.print("Energy Mode");
    Serial.println("ENERGY MODE");
    digitalWrite(34,HIGH);
    digitalWrite(36,LOW);
    //la schermatura si abbassa completamente per
    //favorire la ricarica della batteria
    caso = 3;
    delay(200);
  }
  delay(2000);
}
i

```

Fig. 5.24. Codice sorgente per la gestione del prototipo SLICE 2.0

```

switch (caso) {
  case 0: //buio
    Serial.println("Buio");
    lcd.setCursor (12,1);
    lcd.print("OPEN" );
    if(digitalRead(button_fine_corsa_dx)==HIGH){
      digitalWrite(rele_marcia,LOW);//eccita relè 1
    }
    else
      digitalWrite(rele_marcia,HIGH);//eccita relè 1
      digitalWrite(rele2_polarita,LOW);//eccita relè 2
      digitalWrite(rele3_polarita,LOW);//eccita relè 3
      delay(ritardo_commutazione);//attesa
    break;

  case 1: //intemedio
    Serial.println("Intermedio");
    lcd.setCursor (12,1);
    lcd.print("INT" );
    while(digitalRead(button_marcia_sx)==LOW&(digitalRead(button_fine_corsa_sx)==HIGH))//tasto 1 premuto
    {
      digitalWrite(rele_marcia,LOW);//eccita relè 1
    }
    while(digitalRead(button_marcia_dx)==LOW&(digitalRead(button_fine_corsa_dx)==HIGH))//tasto 2 premuto
    {
      digitalWrite(rele2_polarita,LOW);//eccita relè 2
      digitalWrite(rele3_polarita,LOW);//eccita relè 3

      delay(ritardo_commutazione); //attesa
      digitalWrite(rele_marcia,LOW); //eccita relè 1
    }

    digitalWrite(rele_marcia,HIGH); //diseccita relè 1
    digitalWrite(rele2_polarita,HIGH); //diseccita relè 2
    digitalWrite(rele3_polarita,HIGH); //diseccita relè 3
    Serial.println("-----");
    break;

  case 2: //abbagliamento
    Serial.println("Abbagliamento");
    lcd.setCursor (12,1);
    lcd.print("CLOSE" );
    if(digitalRead(button_fine_corsa_sx)==HIGH){
      digitalWrite(rele_marcia,LOW); //eccita relè 1
    }
    else
      digitalWrite(rele_marcia,HIGH); //diseccita relè 1
      digitalWrite(rele2_polarita,HIGH); //diseccita relè 2
      digitalWrite(rele3_polarita,HIGH); //diseccita relè 3
      delay(ritardo_commutazione);
      Serial.println("-----");
      break;
}

```

Fig. 5.24. Codice sorgente per la gestione del prototipo SLICE 2.0

```

m
case 3: //ricarica
Serial.println("Ricarica");
if(digitalRead(button_fine_corsa_sx)==HIGH){
digitalWrite(rele_marcia,LOW); //eccita relè 1
}
else
digitalWrite(rele_marcia,HIGH); //diseccita relè 1
digitalWrite(rele2_polarita,HIGH); //diseccita relè 2
digitalWrite(rele3_polarita,HIGH); //diseccita relè 3
delay(ritardo_commutazione);
// controllo sensore pioggia
if (digitalRead(3) == HIGH)
{ // la schermatura si chiude in caso di pioggia o neve
if(digitalRead(button_fine_corsa_dx)==HIGH)
{
digitalWrite(rele_marcia,LOW); //eccita relè 1
}
else
digitalWrite(rele_marcia,HIGH); //eccita relè 1
digitalWrite(rele2_polarita,LOW); //eccita relè 2
digitalWrite(rele3_polarita,LOW); //eccita relè 3
delay(ritardo_commutazione); //attesa
}
}
Serial.println("-----");
break;

n
case 4: //gestione manuale
Serial.println("Gestione Manuale");
lcd.setCursor (12,1);
lcd.print("MAN" );
while(digitalRead(button_marcia_sx)==LOW&(digitalRead(button_fine_corsa_sx)==HIGH))//tasto 1 premuto
{
digitalWrite(rele_marcia,LOW); //eccita relè 1
}
while(digitalRead(button_marcia_dx)==LOW&(digitalRead(button_fine_corsa_dx)==HIGH))//tasto 2 premuto
{
digitalWrite(rele2_polarita,LOW); //eccita relè 2
digitalWrite(rele3_polarita,LOW); //eccita relè 3
delay(ritardo_commutazione); //attesa
digitalWrite(rele_marcia,LOW); //eccita relè 1
}

digitalWrite(rele_marcia,HIGH); //diseccita relè 1
digitalWrite(rele2_polarita,HIGH); //diseccita relè 2
digitalWrite(rele3_polarita,HIGH); //diseccita relè 3
Serial.println("-----");
break;
}
delay(1000);
}

```

Fig. 5.24. Codice sorgente per la gestione del prototipo SLICE 2.0



Fig. 5.25. Installazione del prototipo SLICE 2.0 sull'infixo per test in condizioni ambientali

Test in condizioni ambientali

Nel mese di marzo 2020, a Catania, è stata condotta una campagna di test sul prototipo SLICE 2.0 per validare il funzionamento del sistema (lat. 37.54, long, 15.07).

Le indagini sono state condotte in due sale ufficio, in quanto questo tipo di applicazione potrebbe essere più adatta per testare le caratteristiche di un componente responsivo. Queste stanze hanno una superficie di 20 mq, entrambe con finestra di 120 cm × 140 cm, orientate rispettivamente a Sud detta "Sala Sud" e Ovest detta "Sala Ovest" (Fig. 5.25).

I rilievi sperimentali sono stati effettuati il 13 e 14 marzo 2020 per la "Sala Sud" e la "Sala Ovest", in giornate soleggiate. La Fig. 5.26 mostra le componenti Globale, Diretta e Diffusa dell'irraggiamento solare durante una tipica giornata di marzo derivate dal sito Web PVGIS.

La campagna di test ha permesso di monitorare il valore della tensione prodotta dalle celle solari installate nella schermatura, nonché la luminosità misurata dal sensore installato all'interno della stanza, su una scrivania.

Per quanto riguarda la conversione delle misure in lux è stata preventivamente definita utilizzando una regressione lineare in fase di calibrazione.

La Fig. 7.27.a mostra la variazione dell'illuminamento misurato all'interno della Sala Ovest così come l'irraggiamento solare che ha colpito le celle solari. È possibile osservare che l'illuminamento aumenta durante la prima parte della giornata, raggiungendo un picco di 789 lux alle ore 16.15, per poi diminuire al variare dell'irraggiamento solare che colpisce la cella solare. La coerenza tra questi due insiemi di dati evidenzia il



corretto funzionamento della catena di misura.

La Fig. 7.27.b mostra la variazione della tensione misurata. Si osserva un andamento piuttosto costante con valori di tensione prossimi a 1,8 V fino alle ore 17:45, successivamente si osserva una netta diminuzione. Ancora una volta tale risultato è coerente con la quantità di luce che colpisce la cella fotovoltaica.

Il valore di 1,8 V corrisponde al valore atteso di tre celle collegate in serie, infatti ogni cella deve generare una tensione di circa 0,6 V. La diminuzione osservata nella seconda parte della giornata potrebbe essere attribuita all'aumento della temperatura delle celle.

La Fig. 7.28.a mostra la variazione dell'illuminamento misurato all'interno della Sala Ovest così come l'irraggiamento solare che ha colpito le celle fotovoltaiche. Sebbene si verificano alcune fluttuazioni di illuminamento, è possibile osservare un andamento crescente

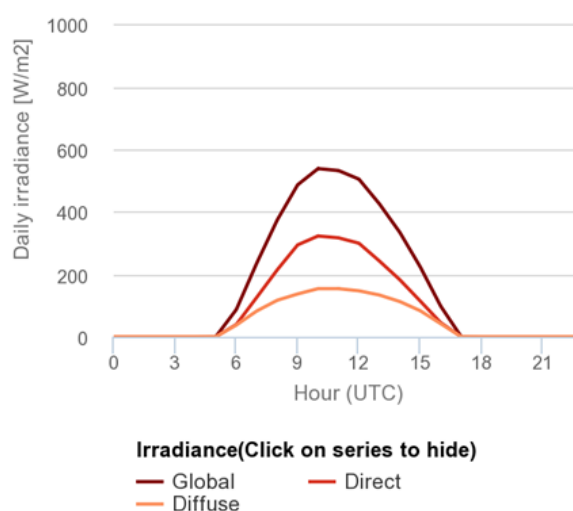
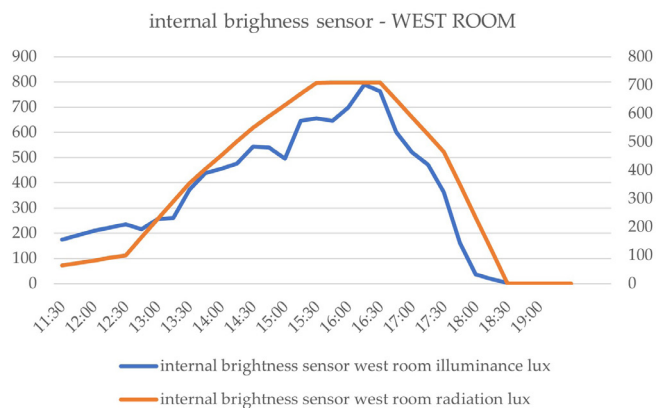
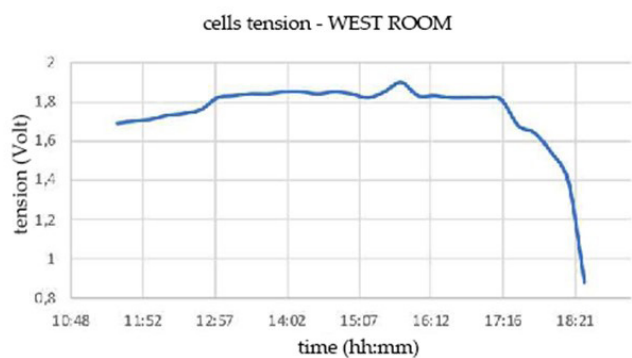


Fig. 5.26. Profilo di illuminamento giornaliero della facciata sud su piano inclinato di 90° - PVGIS

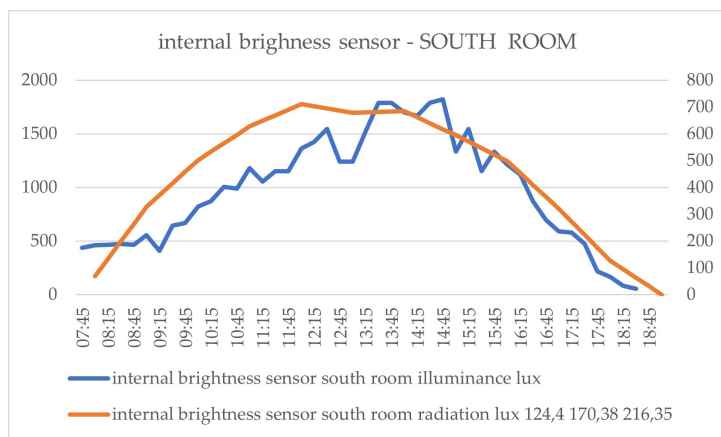


a

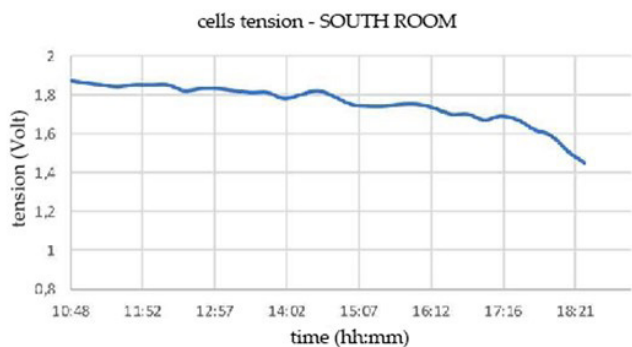


b

Fig. 5.27. Test effettuati su SLICE 2.0 – Stanza Ovest. (a) valori di illuminamento – (b) valori di tensione delle celle



a



b

Fig. 5.28. Test effettuati su SLICE 2.0 – Stanza Sud (a) valori di illuminamento – (b) valori di tensione delle celle

con un picco di 1821 lux alle 14:45, successivamente l'illuminamento diminuisce in seguito alla variazione temporale dell'irraggiamento solare che colpisce la cella. La coerenza tra questi due insiemi di dati evidenzia il corretto funzionamento della catena di misura.

La Fig. 7.28.b mostra la variazione della tensione misurata, che è pressoché costante e prossima a 1,8 V, che corrisponde al valore atteso. Alla fine della giornata, quando l'irraggiamento solare scende, non è stata rilevata la prevista brusca diminuzione della tensione, quindi è possibile sostenere che qualcosa non ha funzionato nel modo giusto.

I risultati dei suddetti test evidenziano il buon funzionamento del prototipo SLICE 2.0.

Il sensore di corrente installato ha permesso di misurare l'intensità della corrente e di conseguenza la potenza generata da SLICE 2.0. Il carico elettrico è costituito dalla scheda di ricarica. È stato predisposto un codice specifico su Arduino per la registrazione dei valori di corrente. La Figura 7.29.a mostra i risultati delle prove effettuate con il prototipo posizionato sulla finestra della Sala Ovest. La corrente elettrica raggiunge il valore di 220 mA durante la prima parte, della giornata quando l'irraggiamento solare che ha colpito la cella FV era prevalentemente diffuso, mentre dopo le 13:00 aumenta fino a 400 mA ovvero quando le celle solari sono state colpite dal più alto irraggiamento solare secondo il percorso solare.

Nel secondo giorno di test è stata monitorata la variazione della corrente elettrica con il prototipo posto sulla finestra della Stanza Sud (Fig. 7.29.b). In questo caso, la corrente elettrica sale a 400 mA alle 13:00 e poi diminuisce. Ancora una volta questo comportamento è in accordo con il percorso solare. In entrambi i casi i valori ottenuti risultano coerenti con la curva di irraggiamento solare ma inferiori ai valori attesi, soprattutto se confrontati con i valori di targa delle celle inglobate nel pannello.

Al termine delle verifiche sulle celle fotovoltaiche, è stata testata l'efficacia delle modalità operative. Nel pomeriggio del 14 maggio 2020 il prototipo è stato installato nella Sala Ovest ed è stata montata una IP Cam per monitorare il componente, mentre per monitoraggio dei dati dai sensori e la lettura delle parti di codice attivate è stata collegata la scheda Arduino ad un PC impiegato come monitor seriale. La prima fase del test ha riguardato l'*Energy Mode*: durante l'assenza di utenti nella stanza, il componente si è dispiegato completamente mantenendo questa configurazione fino all'ingresso delle persone.

Con l'ingresso di utenti nella stanza si è attivata la *Comfort Mode*, il prototipo SLICE 2.0 ha cambiato la

sua conformazione, cambiando istantaneamente la sua posizione di piegatura. Per simulare la variazione della luminosità interna, il sensore di luminosità è stato ombreggiato per alcuni minuti, con l'immediato ripiegamento del componente in modo da raggiungere il livello di illuminazione interna preimpostato. Allo stesso tempo è stata testata la *Manual Mode*: a seguito della pressione dell'apposito pulsante sono stati avviati cicli di piegatura e dispiegamento manuali agendo sui comandi di apertura e chiusura.

Al tramonto, al termine di quest'ultimo test, è stata ripristinata la *Comfort Mode*, con conseguente ripiegamento automatico del componente. Quando è stato raggiunto il valore limite di 500 lux, il componente ha interrotto il suo movimento. Infine, tutti gli utenti hanno liberato la stanza e dopo pochi minuti dall'IP Cam è stato possibile osservare la riattivazione automatica dell'*Energy Mode*, con il conseguente dispiegamento totale dell'elemento schermante.

I risultati ottenuti durante la fase sperimentale hanno evidenziato alcuni limiti del prototipo SLICE 2.0. È stato osservato che la scheda di ricarica non consentiva di ottenere un incremento dell'energia prodotta proporzionale al numero di celle fotovoltaiche installate. Questo evidenzia le basse efficienze del circuito di ricarica. Per questo motivo, nelle successive fasi della ricerca, si è deciso di aggiornare il sistema con un circuito MPPT apposito che consentisse alle celle fotovoltaiche del componente di lavorare al loro punto di massima potenza.

Le verifiche effettuate sulle modalità operative hanno confermato l'efficacia del codice di programmazione. In un successivo aggiornamento del prototipo, si potrebbero apportare upgrade all'*Energy Mode* al fine di migliorarne l'efficienza. Considerando infatti la variabilità degli angoli di zenit e azimut del sole, si potrebbe integrare la scheda Arduino con sensori aggiuntivi per consentire alle celle di raggiungere un angolo ottimale per massimizzare la produzione energia elettrica.

SLICE4ICARO

Realizzazione dei pannelli

Per il caso in esame sono stati realizzati due campioni SLICE4ICARO con la stratigrafia nelle precedenti fasi. Per via delle scelte di carattere progettuale legate alla tipologia di test da effettuare oltre alle valutazioni fatte nel corso della campagna di simulazioni di quest'ultimo prototipo, è stato modificato il numero di celle previste per ogni campione e la loro interconnessione. Nello specifico ogni pannello è stato realizzato con 15 celle, collegate in serie, distribuite su tre stringhe da

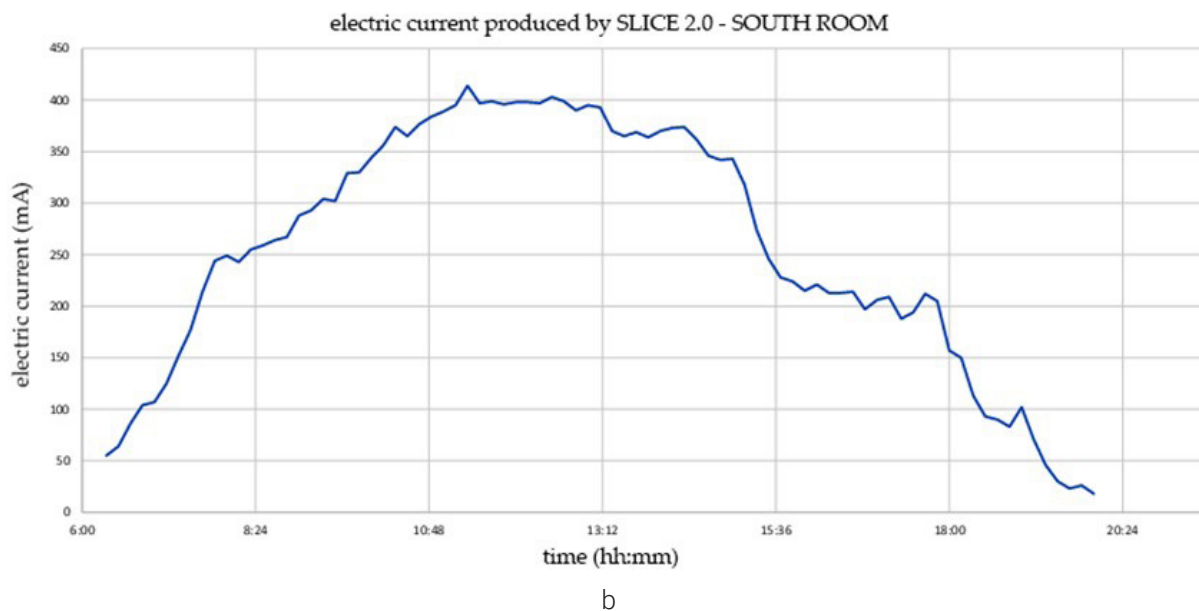
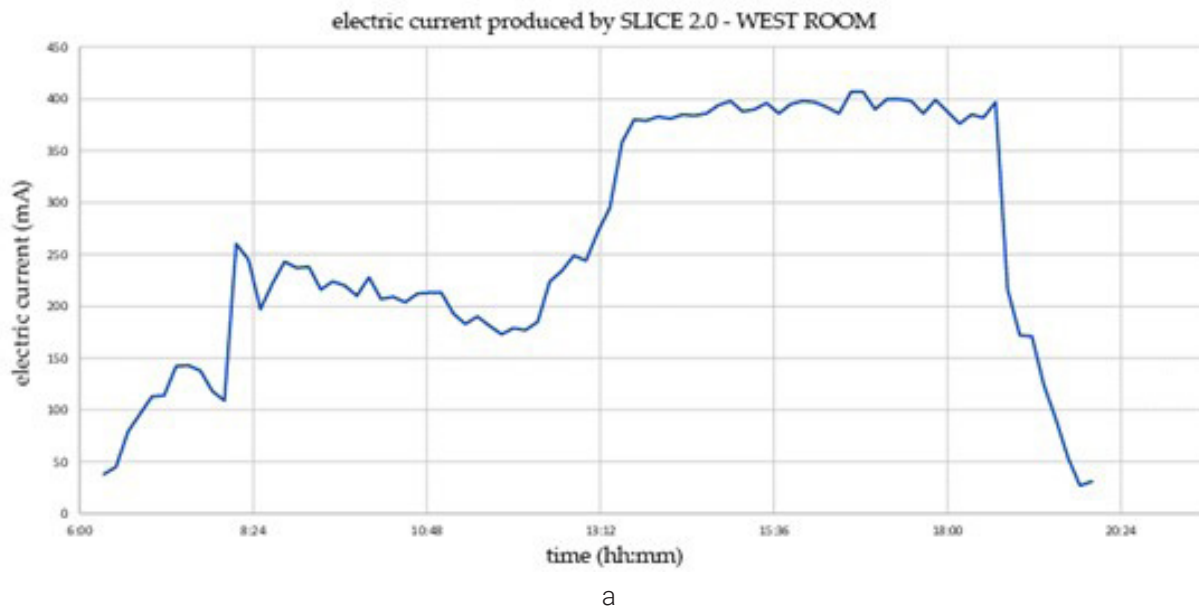


Fig. 5.29. Corrente elettrica generata da SLICE 2.0 (a) valori Stanza Ovest – (b) valori Stanza Sud

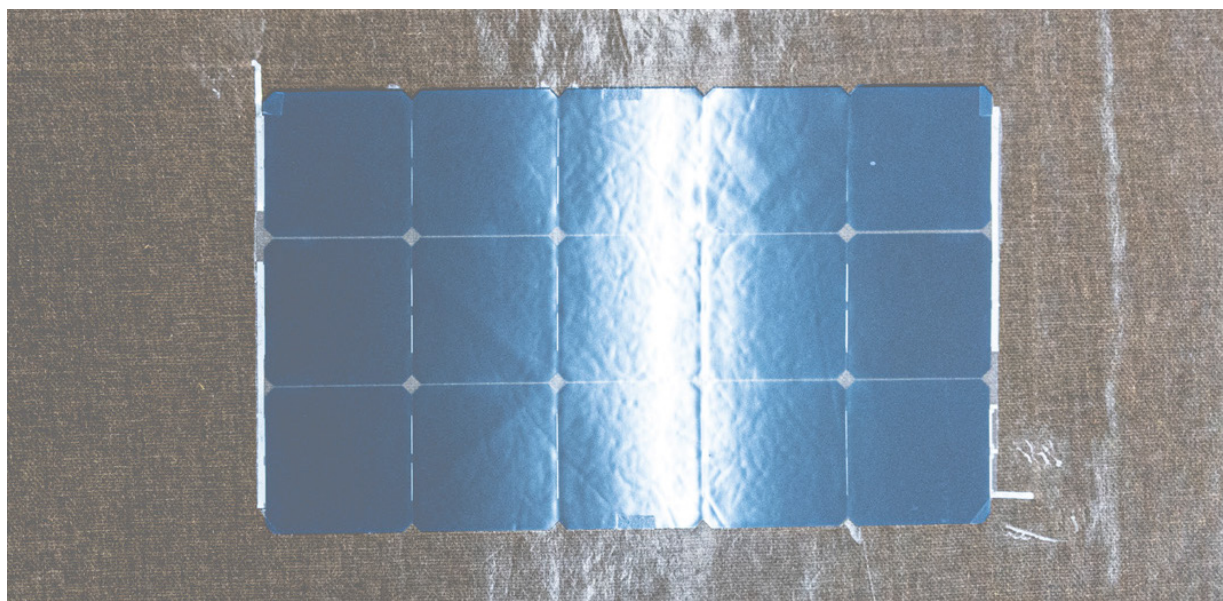


Fig. 5.30. Campione SLICE4ICARO al termine della laminazione

cinque (Fig. 5.30). Le caratteristiche tecniche di ciascun pannello realizzato sono le seguenti:

- Potenza di 49.5 W;
- Tensione di 8.55 V;
- Corrente di 5.8 A.

Dato che lo scopo di questa fase della ricerca non riguardava il sistema di movimentazione, i campioni SLICE4ICARO sono stati concepiti inoltre come componenti planari non pre-piegati. Sono state ottimizzate le superfici di installazione delle celle, saldate ciascuna alla successiva tramite le apposite bus-bar denominate dog bone. Alla fine di ogni gruppo di cinque celle è stata applicata una bus bar lineare per il collegamento alla stringa successiva.

Al termine della fase di questa fase, denominata stringatura, il pacchetto di celle è stato rivestito con i successivi layer. Riassumendo, la stratigrafia finale è composta da (Fig. 5.29):

- SKC EVA (matrice Etilene Vinil Acetato);
- Biotex Flax 400 g/m² 2x2 Twill (Tessuto di rinforzo);
- SKC EVA (matrice Etilene Vinil Acetato);
- SunPower c60 (celle in silicio monocristallino flessibili);
- SKC EVA (matrice Etilene Vinil Acetato);
- Dunsolar PPE (Polifenilene tere);

Presso l'azienda partner Meridionale Impianti, il pannello è stato laminato facendo uso del laminatore singolo impiegato per le precedenti sperimentazioni e dei medesimi parametri di produzione definiti nella prima fase della ricerca. Al termine del processo di laminazione, il pannello è stato fatto raffreddare e successivamente testato tramite tester per verificare il corretto funzionamento delle connessioni.

Test in condizioni ambientali

I risultati dei test sono stati utili per la progettazione dettagliata che consentisse di fare un bilancio energetico e confrontare i dati di produzione con i carichi relativi ai servizi dell'allestimento tecnologico del padiglione ICARO.

I test riguardanti i nuovi n. 2 pannelli da installare nel padiglione per l'accoglienza dei visitatori denominato ICARO sono durati circa tre mesi e hanno permesso di monitorare costantemente l'impianto, raccogliere tutti i dati utili e confrontarli con i dati di radiazione solare prelevati dalla stazione meteorologica installata presso il laboratorio di Fisica Tecnica Ambientale dell'Università di Catania (Risiglion, 2020).

| | |
|----------------------|---|
| Dimensioni e peso | 105 cm x 65 cm; 1.8 kg |
| Matrice | EVA SKC Films EF2N |
| Rinforzo | Biotex Flax, 400 g/m ² Composites Evolution Ltd |
| Layer aggiuntivo | DUN-SOLAR PPE |
| Celle fotovoltaiche | SunPower Maxeon® Gen I |
| Circuiti di ricarica | MPPT Epeever Triron 1206N |
| Batteria | Prime AGM VRLA" da 12V 24AH/10h |

Tab. 5.8. Scheda tecnica prototipo SLICE4ICARO

Dalle ipotesi fatte durante una preliminare analisi dell'impianto, cercando considerare le varie perdite dovute alle connessioni tramite saldature, la tipologia di installazione e lo stato prototipale dell'intera componentistica, un valore di rendimento dell'impianto

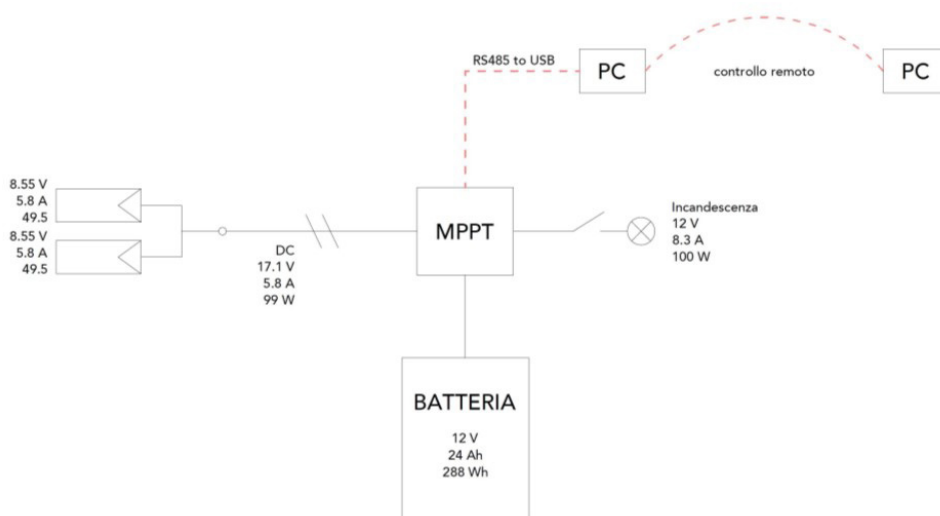


Fig. 5.31. Schema elettrico unifilare SLICE4ICARO

pari al 14%. L'area netta dei pannelli è di 0.469 m². È stata calcolata la produzione oraria teorica del pannello, che è stata successivamente confrontata con la produzione rilevata dall'impianto.

I dati ottenuti hanno evidenziato una più elevata efficienza del sistema quando i pannelli vengono disposti in orizzontale, mentre gli scostamenti maggiori sono stati ottenuti con pannelli disposti in verticale.

Inoltre, è stata rilevata una scarsa resa del pannello in condizioni meteo instabili, e dunque con radiazione prevalentemente diffusa. Tale comportamento rappresenta una caratteristica tipica delle celle in silicio monocristallino, a differenza del silicio amorfo che presenta minori perdite di efficienza per tali condizioni meteo. Ulteriori perdite di efficienze sono da attribuire alle più elevate temperature rispetto alle condizioni STC. I dati di fabbrica delle celle SunPower indicano una riduzione del rendimento di 0.32% per scostamenti di grado centigrado dalle STC (1000W/m², AM 1.5g and temperatura delle celle di 25°C).

Un altro fattore da tenere in considerazione è stata l'efficienza di conversione dichiarata dal costruttore dell'MPPT che diminuisce per bassi valori di produzione.

Il primo e il secondo grafico (Figg. 5.34 - 5.35) rappresentano la produzione oraria dell'impianto. Nel primo grafico i pannelli sono disposti in orizzontale (Fig. 5.32) e nel secondo in verticale (Fig. 5.33). La curva blu rappresenta la produzione dell'impianto calcolata sulla

base dei dati dell'irraggiamento forniti moltiplicati per l'area netta delle celle fotovoltaiche e moltiplicate per il rendimento dell'impianto pari al 14%. Poiché i dati di radiazione sono forniti con uno step temporale di un minuto si è proceduto ad effettuare le medie orarie.

La curva arancione rappresenta la produzione effettiva dell'impianto. In questo caso i dati sono stati misurati dal regolatore di carica tramite il pc collegato ad esso. I dati sono stati registrati con una frequenza di 5 minuti e poi sono state effettuate anche in questo caso le medie orarie.

Il terzo e il quarto grafico (Figg. 5.36 - 5.37) rappresentano rispettivamente la produzione totale giornaliera dell'impianto e la produzione totale riferita ad un periodo di 4 ore (dalle 10 alle 14) durante il quale il pannello non risultava ombreggiato. In entrambi i grafici è stata poi evidenziata la differenza di produzione percentuale tra quella totale prevista e la produzione totale effettiva. È possibile notare un rendimento inferiore dei pannelli quando vengono disposti in verticale.

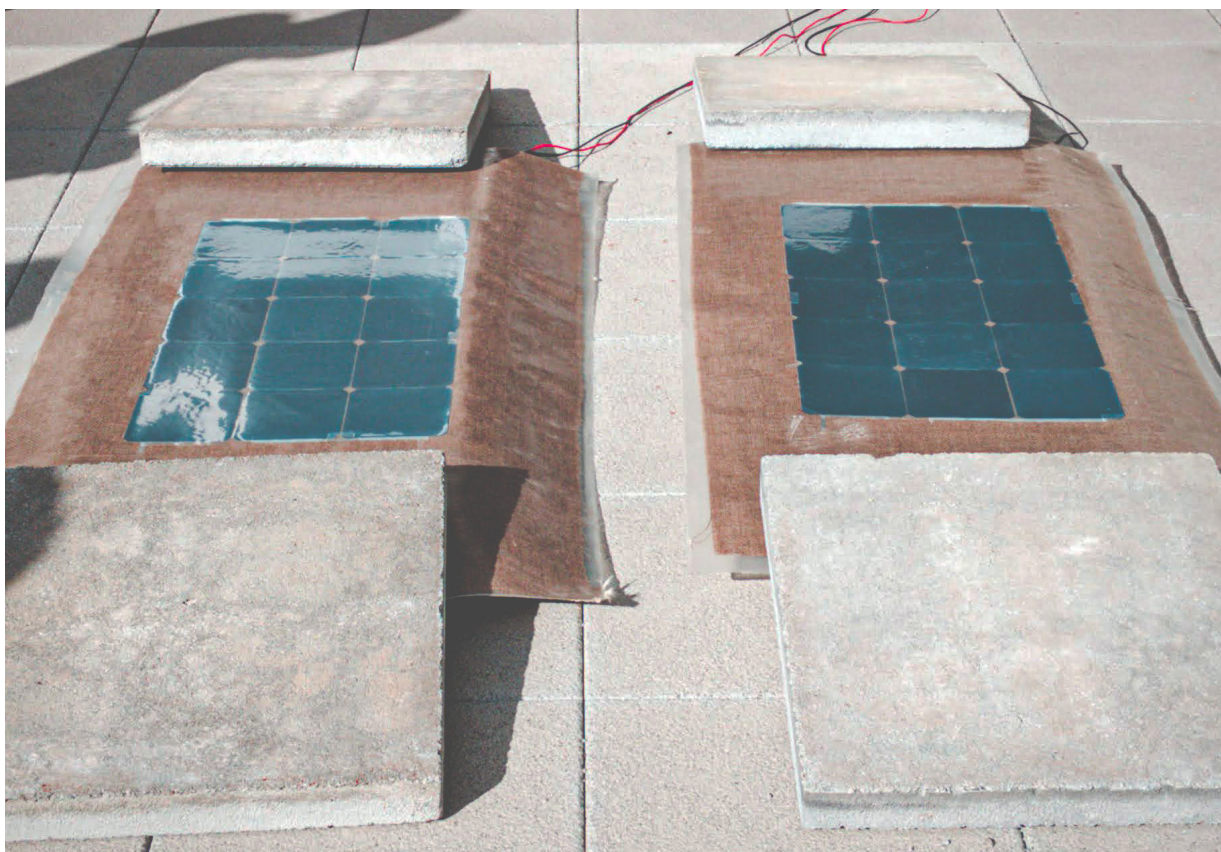


Fig. 5.32. Posizionamento dei pannelli SLICE4ICARO in orizzontale



Fig. 5.33. Posizionamento dei pannelli SLICE4ICARO in verticale

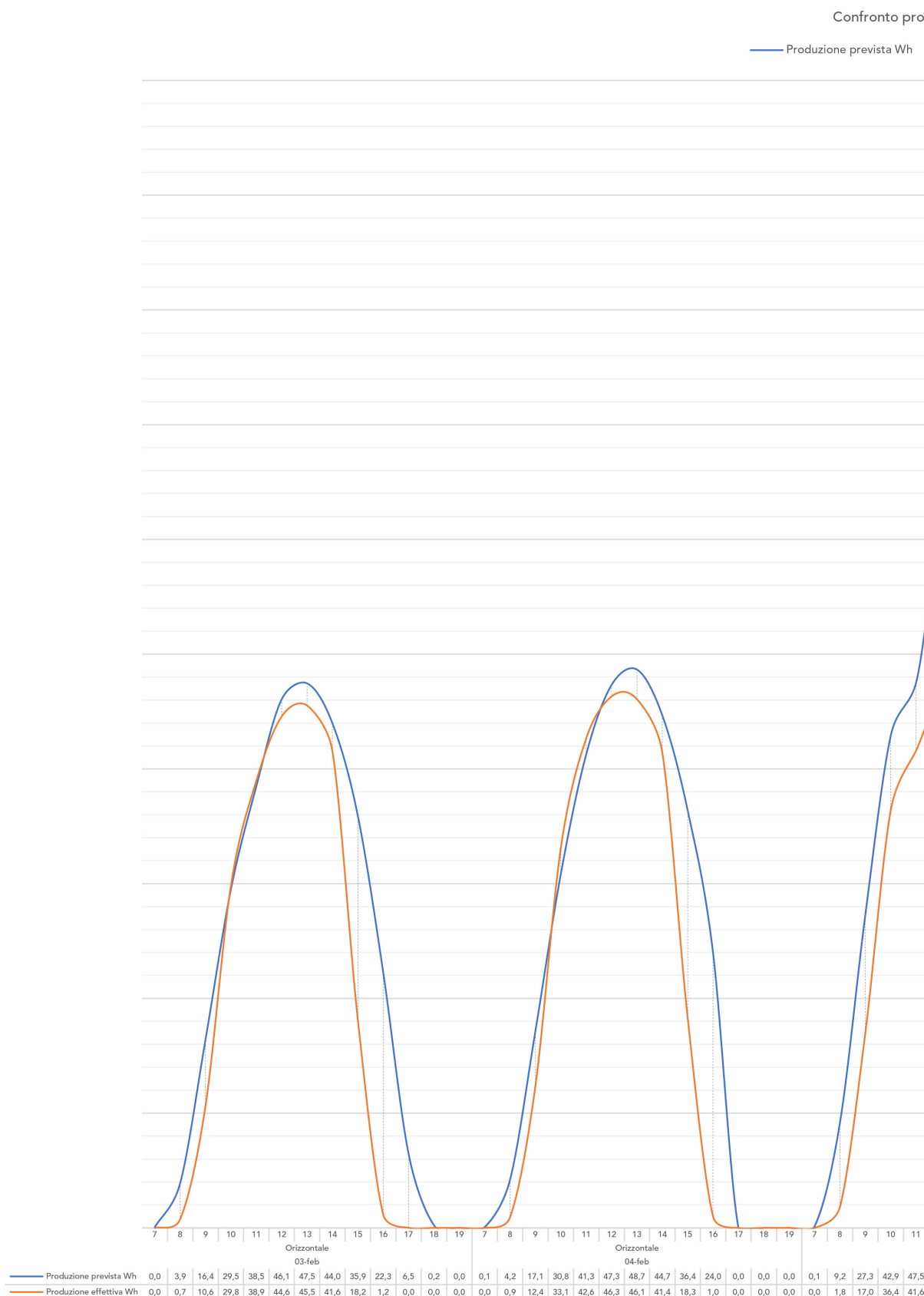
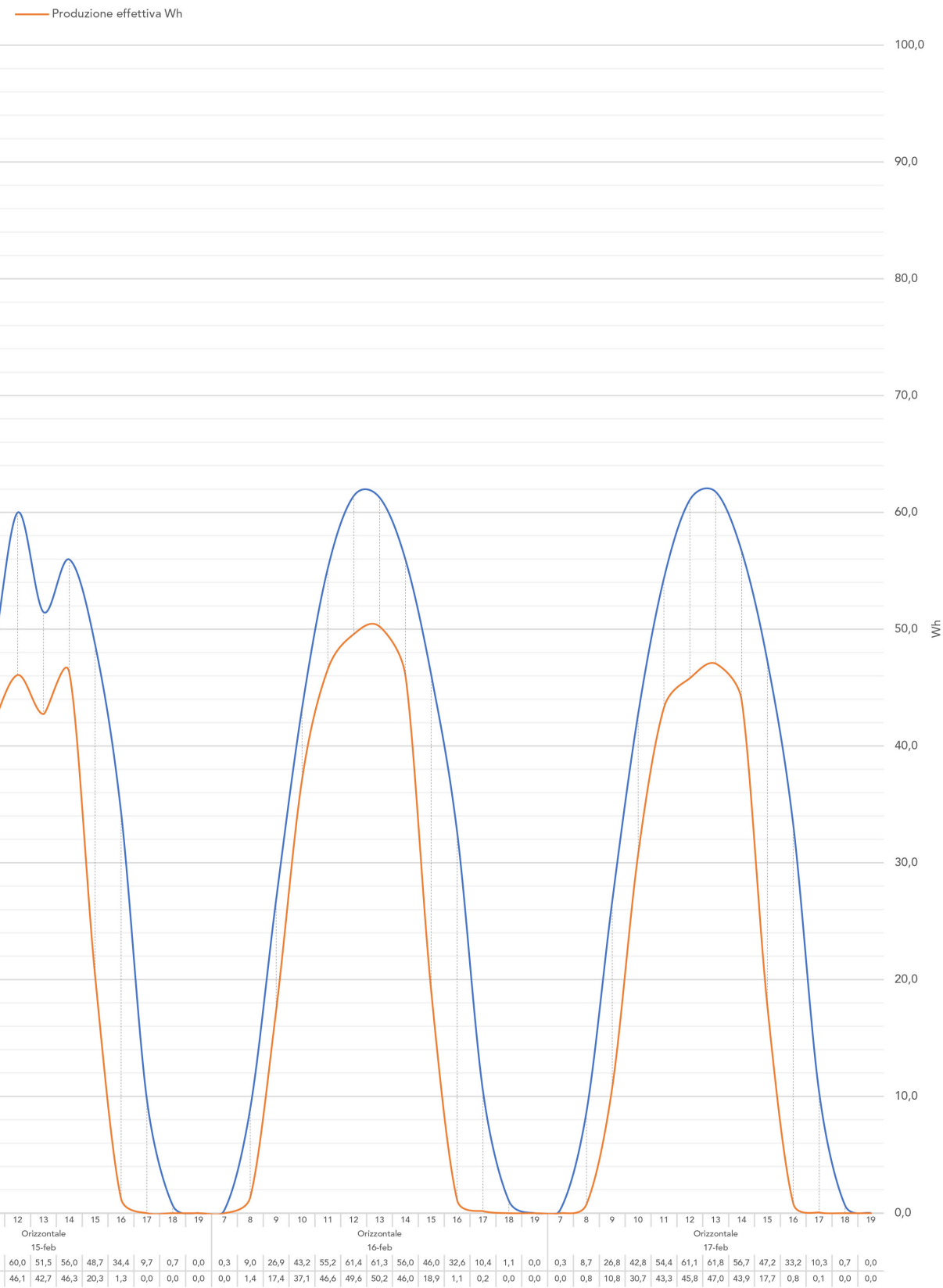


Fig. 5.34. Confronto tra la produzione oraria prevista (blu) e quella effettiva (arancione) nel caso di pannelli disposti in orizzontale.

Produzione oraria



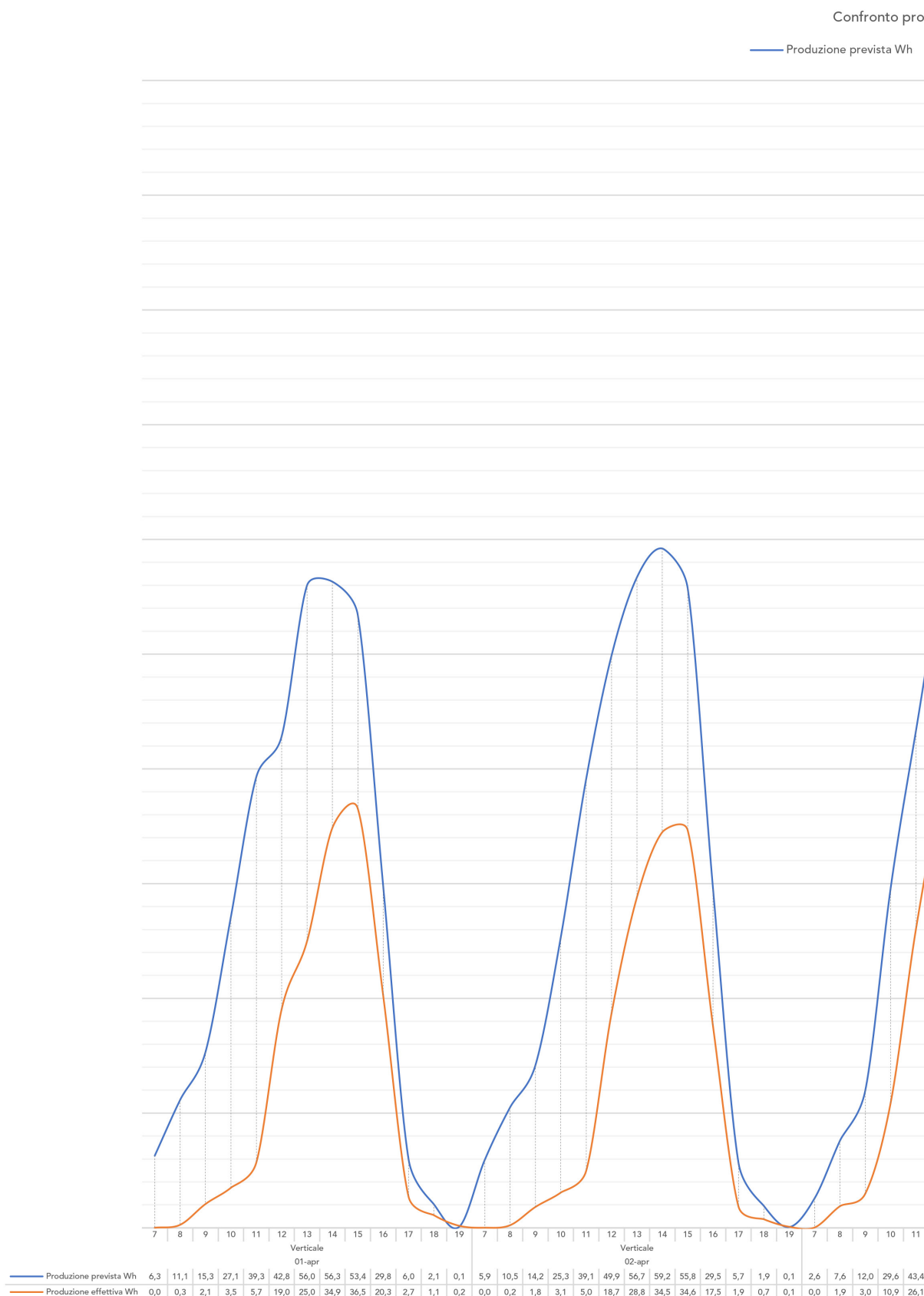
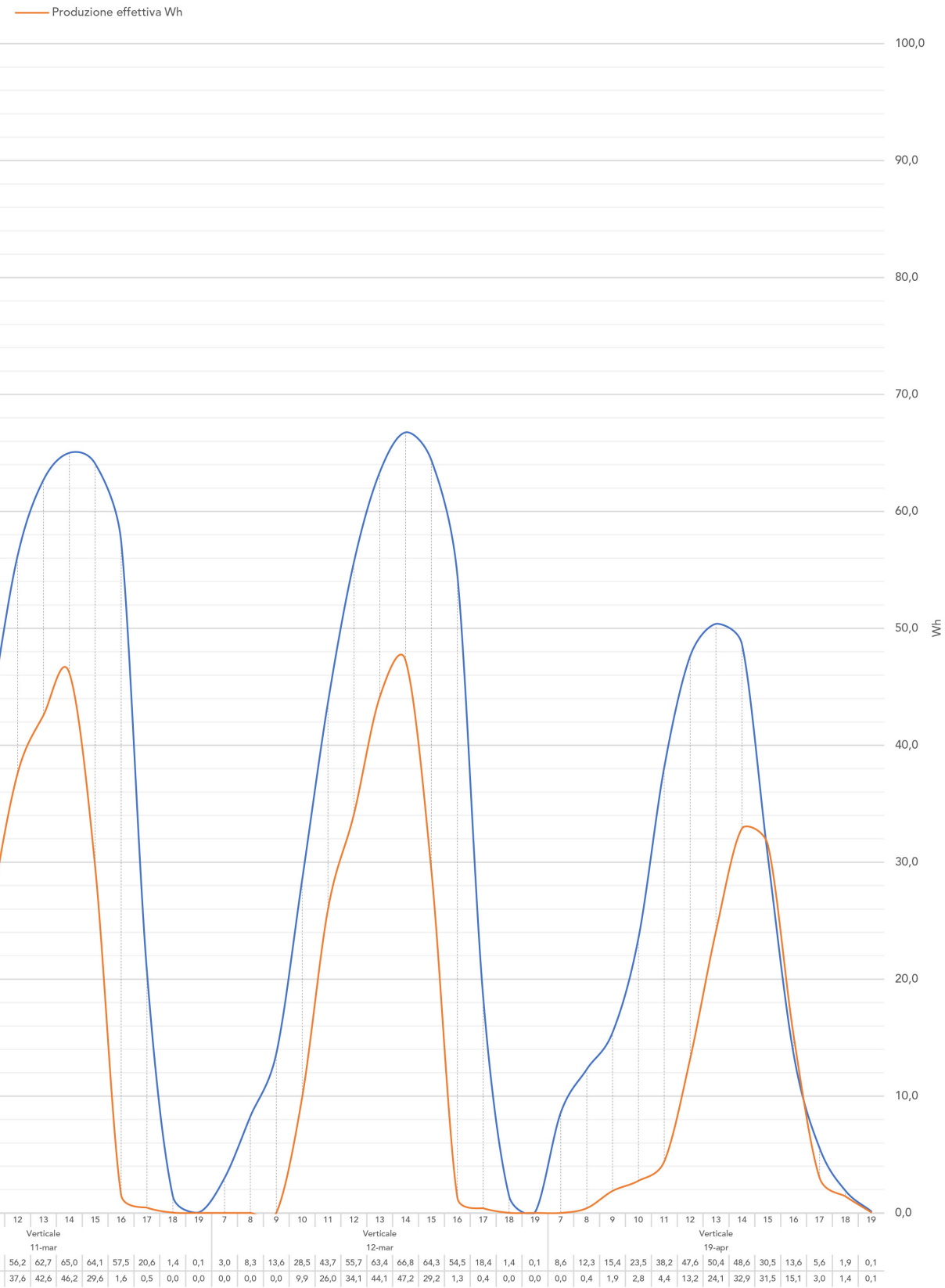


Fig. 5.35. Confronto tra la produzione oraria prevista (blu) e quella effettiva (arancione) nel caso di pannelli disposti in verticale

Produzione oraria



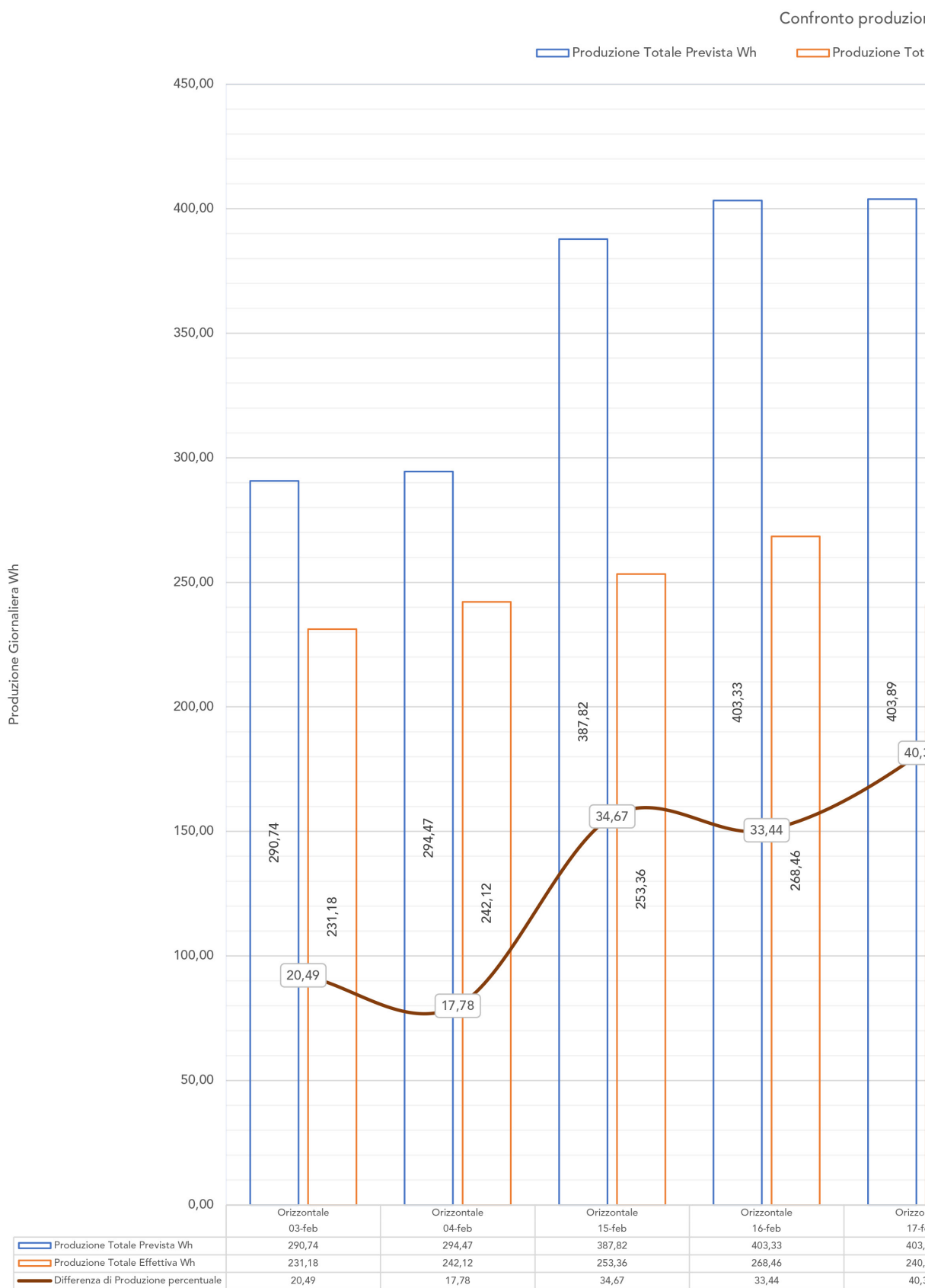


Fig. 5.36. Confronto tra la produzione totale effettiva giornaliera (arancione) e la produzione totale prevista (blu) dell'impianto, con differenza della produzione percentuale (rosso)

ne giornaliera Totale

ale Effettiva Wh

— Differenza di Produzione percentuale

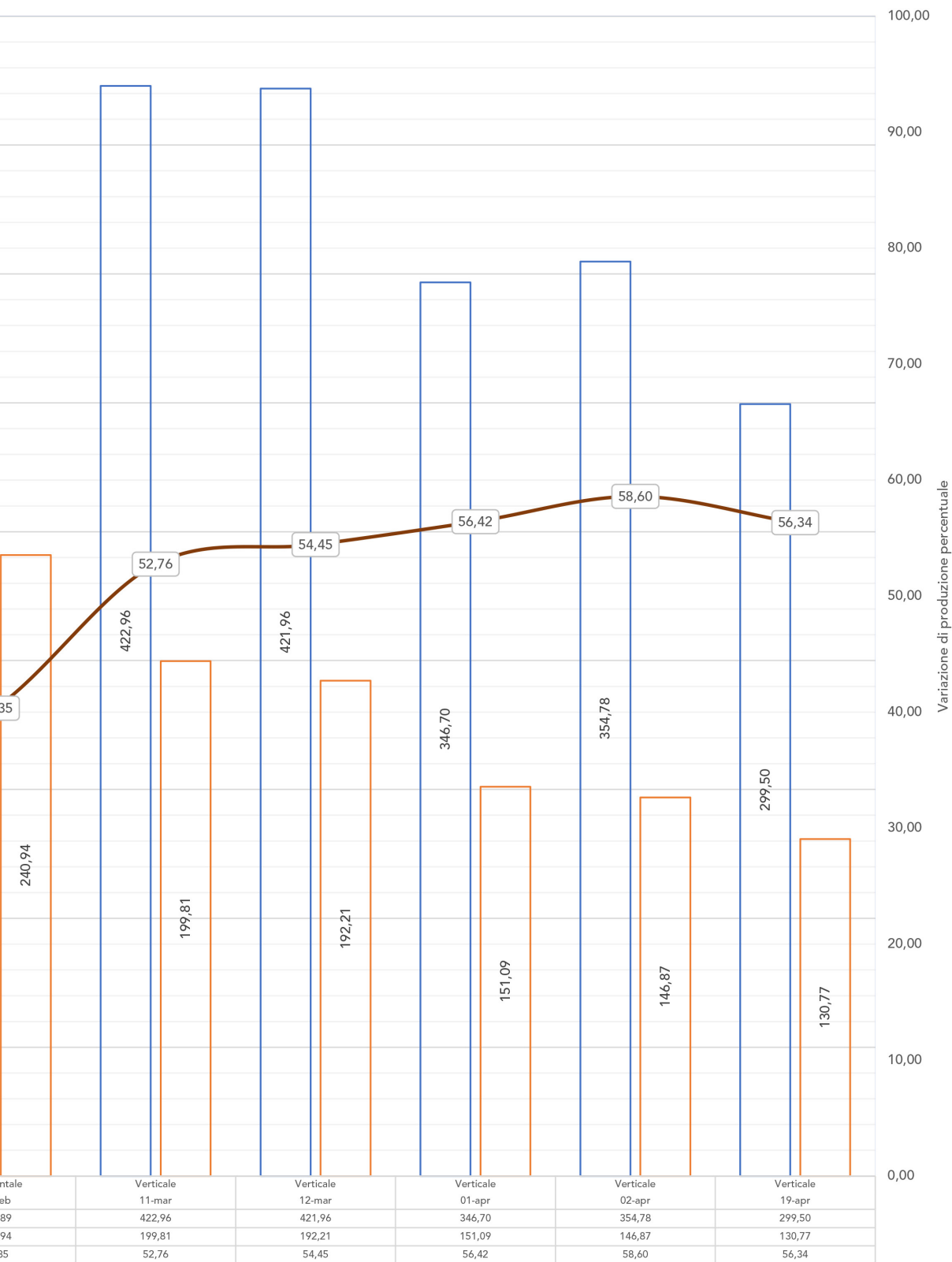
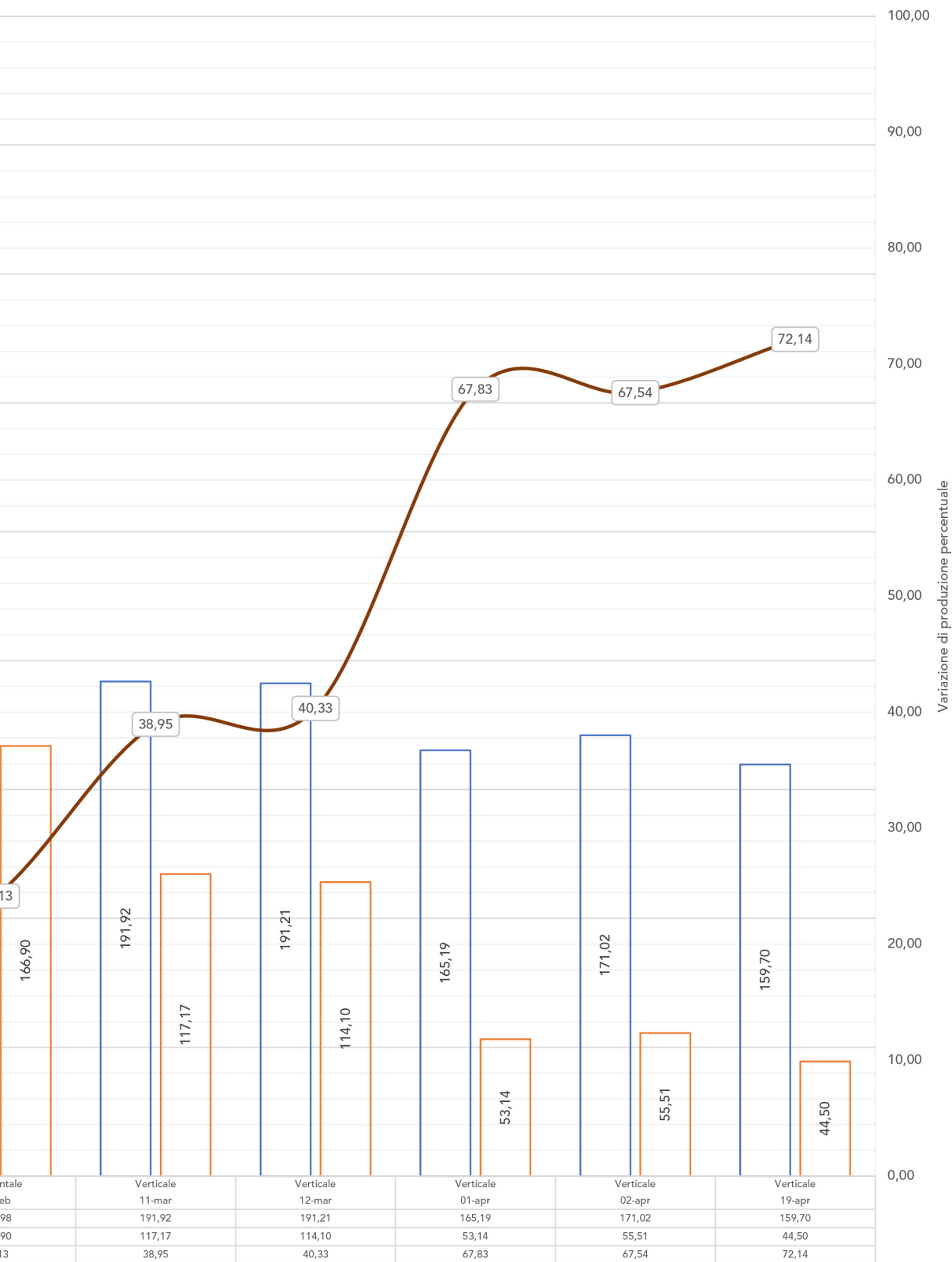




Fig. 5.37. Confronto tra la produzione effettiva (arancione) e la produzione prevista (blu) nell'arco di 4 ore in cui non risultavano ombreggiamenti, con differenza della produzione percentuale (rosso)

elle 4 ore principali (dalle 10 alle 14)

ale Effettiva Wh — Differenza di Produzione percentuale



PROGETTAZIONE PARAMETRICA SU CASO STUDIO

Attraverso l'uso di pattern di piegatura ispirati agli origami è possibile concepire strutture complesse mediante l'adozione di sistemi meccanici semplici.

Il disegno della geometria, il suo cinematismo e la sua integrazione su ciascuno degli edifici sono stati analizzati in un processo continuo che ha consentito di poter individuare la migliore configurazione per dimensionare i tasselli caratterizzanti il pattern di piegatura. La progettazione parametrica si propone infatti come un potente metodo per la modellazione di strutture origami, applicabile sia nei processi geometrici che di analisi attraverso l'uso di plug-in. Nello specifico è stato adottato il software di progettazione parametrica Grasshopper per disegnare la geometria e controllare il suo cinematismo, mentre il software di progettazione BIM Graphisoft Archicad è servito a poter lo stato di fatto degli edifici assunti come caso studio. Il plug-in Grasshopper-Archicad Live Connection ha consentito

di connettere i due modelli, BIM e parametrico, per analizzare l'integrazione del componente progettato sulla facciata dell'edificio.

Una modellazione corretta e dettagliata è necessaria per comprendere il comportamento del componente schermante ad origami e per simulare il processo di piegatura e progettazione le componenti che ne consentano il cinematismo. Per questo motivo sono stati modellati due diversi pattern di piegatura in vista dell'impiego nei casi studio. L'algoritmo in Grasshopper si basa su una simulazione rigida dell'origami scelto e utilizza angoli di piega di tutte le pieghe e la dimensione delle falde come variabili per rappresentare la configurazione del modello.

Edificio piscina Campus Universitario

Il primo caso studio individuato, si presenta come un grande parallelepipedo di vetro immerso con una esile intelaiatura metallica. Realizzato tra il 2013 e il 2014 su progetto dell'arch. Remus Hârșan, è caratterizzato



Fig. 5.38. Dettagli degli infissi - Edificio piscina Campus Universitario

da un unico grande ambiente trasparente che ingloba al proprio interno un blocco opaco sede degli spogliatoi, degli uffici e del bar, a sua volta con affaccio direttamente sulla piscina (Figg. 5.40 - 5.41). Le ampie superfici vetrate sui prospetti est ed ovest sono caratterizzate da ampi pannelli in polycarbonato alveolare che permette di ridurre gli effetti derivanti dall'abbagliamento. I prospetti sud e nord sono costituite da vetri dotati di pellicole antisolari (Fig. 5.38). Malgrado le soluzioni adottate, l'edificio non risulta schermato a sufficienza durante il periodo estivo.

La selezione del pattern di piegatura è stata orientata sulla piega semplice, scelta dettata dalla maggiore flessibilità di questa soluzione per la tipologia di facciata. Punto importante è stato lavorare sul minimo ingombro del componente quando aperto. Per il prospetto sud, sono state previste due installazioni: una in sostituzione della pensilina di ingresso, per trasformarla da un elemento di ombreggiamento fisso ad un sistema responsivo di protezione dal sole e dall'acqua, per la facciata invece è stata prevista sull'adozione elementi modulari indipendenti di dimensioni pari a quelle dei singoli elementi vetriati.

Per le facciate est ed ovest, al fine di ottimizzare l'apporto di radiazione solare all'interno dell'ambiente, è stata prevista l'installazione del componente sulle lunghe finestre a nastro, attualmente prive di filtri e schermature.

Per la geometria a soffietto (piega semplice) l'algoritmo è stato sviluppando a partire dall'elemento base, il rettangolo. Stabilito il sistema di riferimento con origine 0, è stato costruito il rettangolo OABC con base e altezza variabili, che rappresentano i primi due parametri dell'origami.

Successivamente è stato introdotto un secondo parametro, ossia la rotazione intorno all'asse passante per il segmento BC che rappresenta la piega di valle dell'origami. Il rettangolo ABCD è stato quindi specchiato rispetto al piano xz e passante per il segmento BC (Fig. 5.41.a).

Mediante la funzione Serie è stata costruita una matrice per la ripetizione lungo gli assi x e y dei moduli unitari, ovvero coppie di falde connesse da una piega di valle. La ripetizione lungo l'asse x risulta utile per dimensionare la larghezza dei pannelli da cucire per ottenere il componente finale da installare e rappresenta il terzo parametro che definisce la geometria (Fig. 5.41.b). Il processo di sincronizzazione dei dati inerenti alla geometria inizia generalmente con Grasshopper. L'interfaccia di Rhinoceros può essere utilizzata per la visualizzazione del modello, se necessario. Il modello BIM dell'edificio è stato precedentemente realizzato in

ARCHICAD. Per la connessione a Grasshopper, GH-AC LCT è selezionato per sincronizzare i dati in ArchiCAD (Fig. 5.42). Mentre il processo di modellazione può continuare con ArchiCAD, le impostazioni vengono modificate automaticamente in Grasshopper e viceversa.

Con il pulsante "Avvia / Interrompi connessione", parte la sincronizzazione dei dati del modello da Grasshopper ad ArchiCAD.

Per il progetto parametrico del componente, è stato possibile lavorare sulla variazione di cinque parametri:

- Lato *a*
- Lato *b*
- Angolo ξ
- N. falde

Agendo sui Number Slider relativi alle cinque variabili, è stato testata la completa chiusura e apertura del componente sulle tre facciate. Le modifiche apportate all'algoritmo vengono modificate automaticamente in tutti e tre i software tramite lo strumento GH-AC LCT (Fig. 5.43). Il design algoritmico in Grasshopper viene applicato direttamente all'oggetto tridimensionale visualizzato su ArchiCAD. Quando i comandi o i valori di Grasshopper vengono modificati, il modello viene aggiornato automaticamente in ArchiCAD.

Nel corso delle simulazioni, dato l'uso di patter di piegatura uguali per i tre sistemi schermati previsti, il dimensionamento delle falde è stato incentrato sulla possibilità di ottimizzare il processo produttivo. Il progetto di pattern di piegatura con falde con lato *a* di uguale dimensione per tutti e tre i sistemi schermanti, consentirebbe di ridurre i tempi di lavorazione dovendo realizzare un'unica sequenza modulare per le celle fotovoltaiche e un solo stampo per la termoformatura del materiale. Al termine della simulazione, sono stati ottenuti i seguenti parametri di dimensionamento (Tab. 5.9):

| Piega semplice | Prospetto sud | Pensilina ingresso | Prospetti est-ovest |
|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Lato <i>a</i> | 14 cm | 14 cm | 14 cm |
| Lato <i>b</i> | 316 cm | 634 cm | 594 cm |
| Angolo ξ | $5^\circ < \xi < 45^\circ$ | $5^\circ < \xi < 42^\circ$ | $5^\circ < \xi < 43^\circ$ |
| N. falde | 12 | 12 | 12 |

Tab. 5.9. Parametri sistemi di schermatura - Edificio piscina Campus Universitario

Al termine delle simulazioni, il modello è stato renderizzato su ARCHICAD con il motore di rendering Cine-Render 4D (Fig. 5.44).



BAZIN DE INOT AL UNIVERSITATII DE ARHITECTURA Strada Larisa, Bucuresti
autori: GRAPHIC STUDIO - arh. Remus Harsan, arh. Dragos Perju, arh. Karoly Nemes
arh. Crina Popescu, arh. Dragos Dordea
structura: AVZ - ing. Andrei Zybaczinski
instalatii: Smart Design - ing. Mihai Terzi
foto: Graphic Studio

SECȚIUNEA ARHITECTURĂ | categoria social-culturala

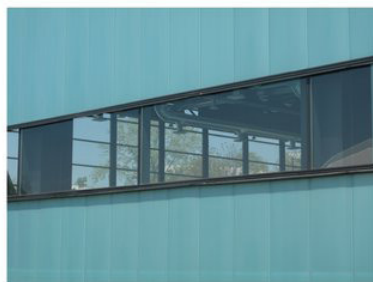
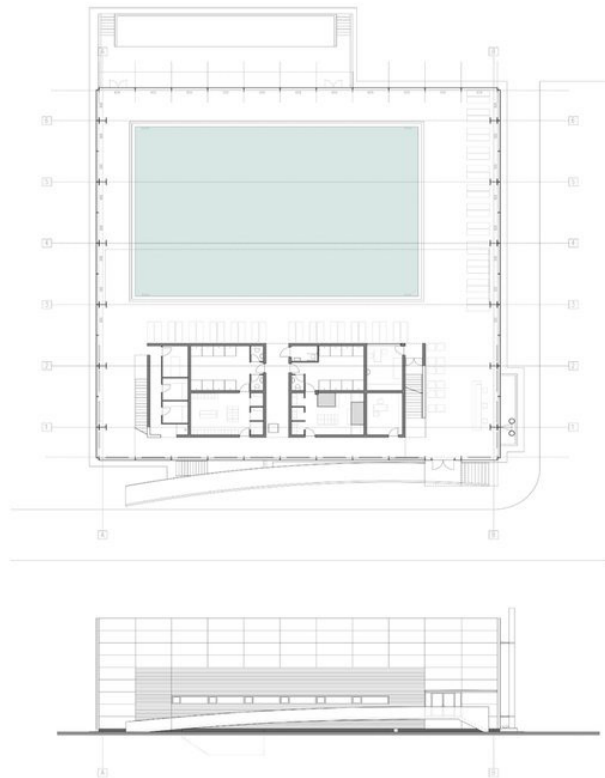
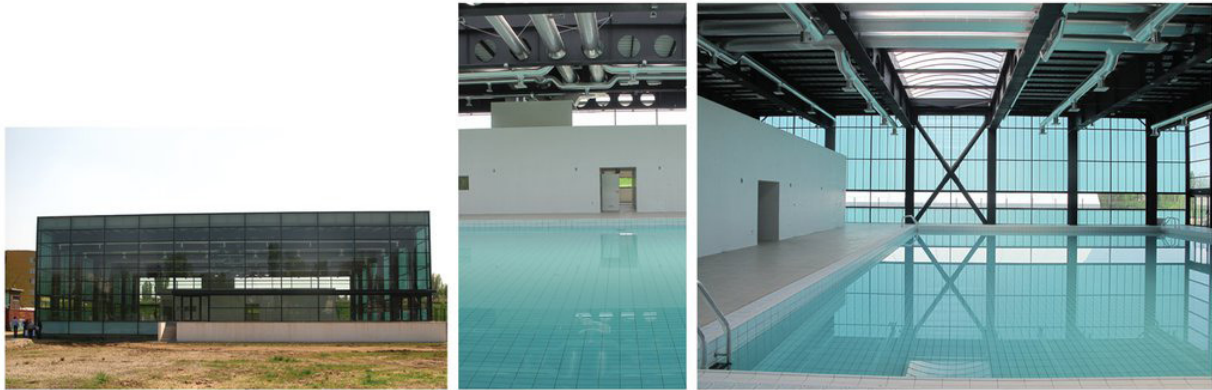


Fig. 5.39. Edificio Piscina del Campus Universitario - Tavola di progetto



BAZIN DE INOT AL UNIVERSITĂȚII DE ARHITECTURĂ Strada Larisa, București
autori: GRAPHIC STUDIO - arh. Remus Harsan, arh. Dragos Perju, arh. Karoly Nemes
arh. Crina Popescu, arh. Dragos Dordea
structura: AVZ - ing. Andrei Zybaczinski
instalații: Smart Design - ing. Mihai Terzi
foto: Graphic Studio

SECȚIUNEA ARHITECTURĂ | categoria social-culturală

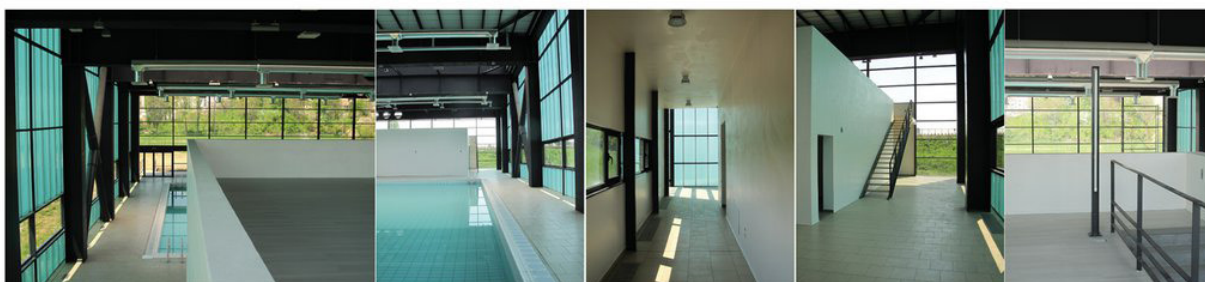
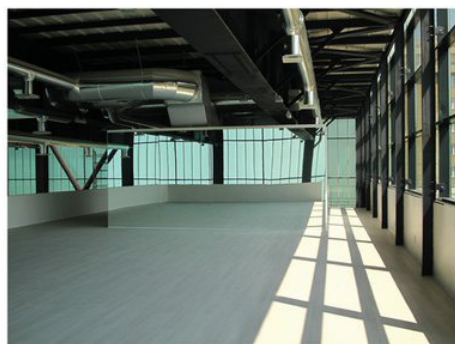
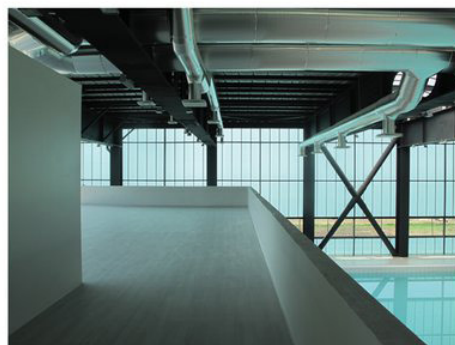
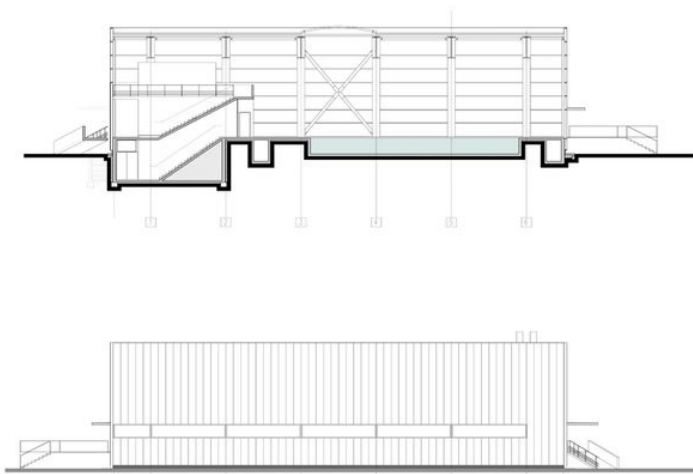
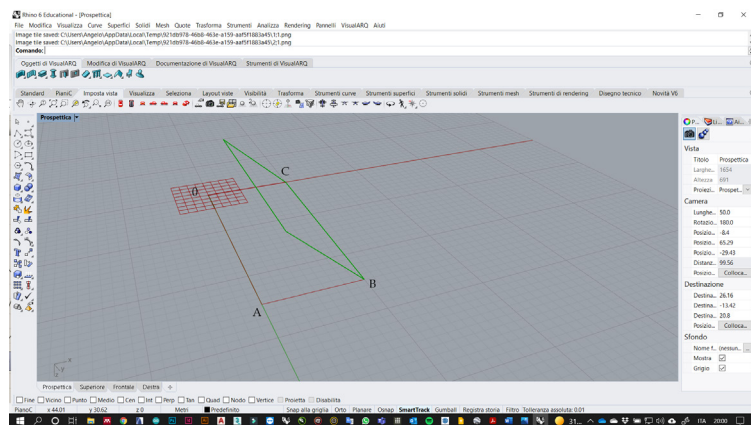


Fig. 5.40. Edificio Piscina del Campus Universitario - Tavola di progetto



a

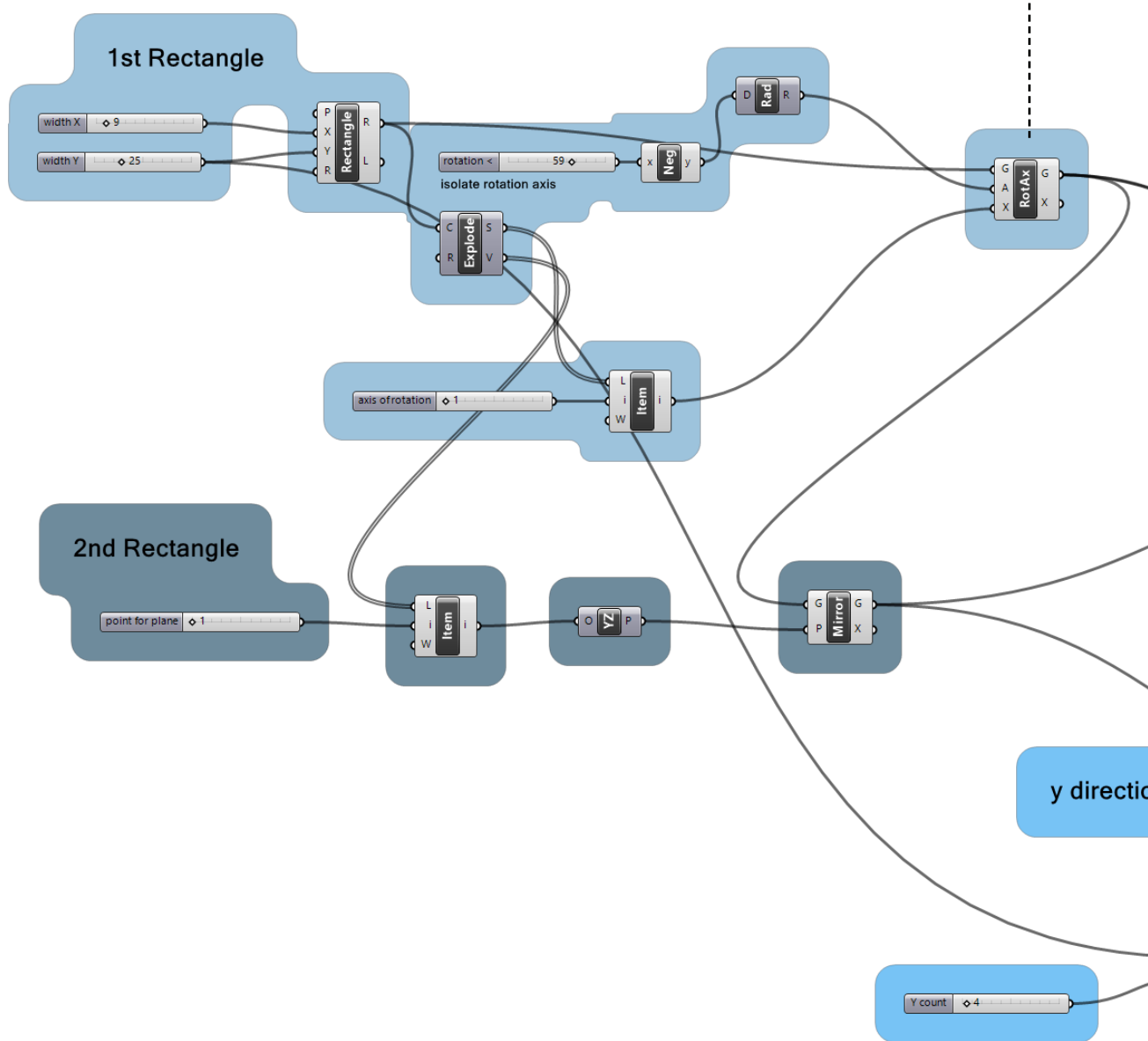
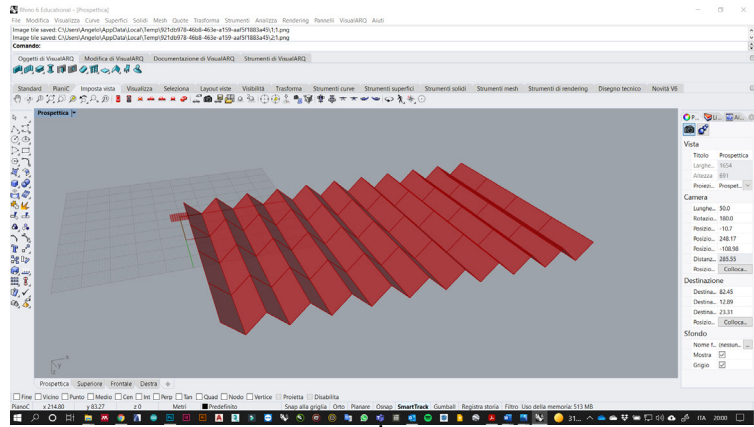
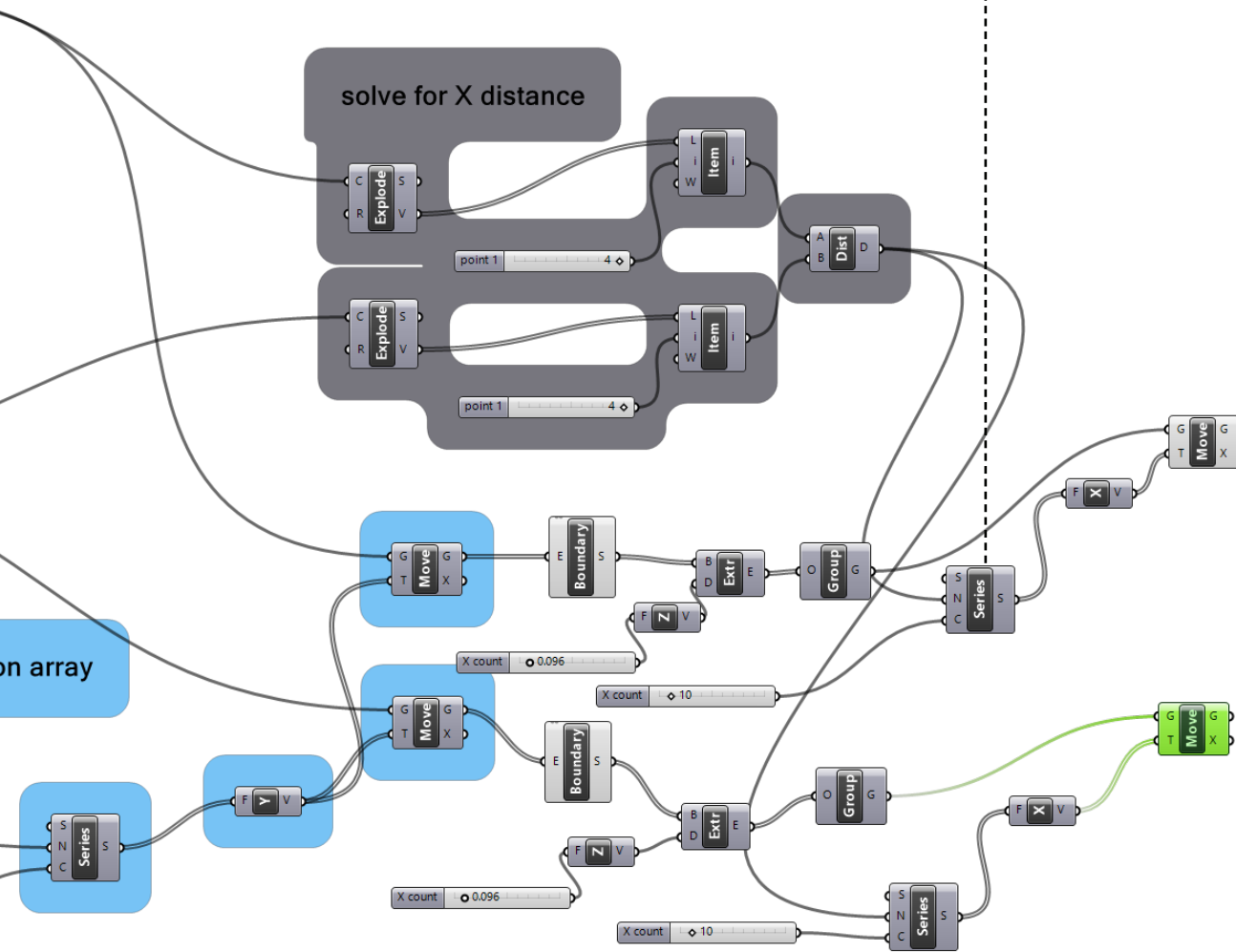


Fig. 5.41. Algoritmo per la costruzione della piega semplice



X direction array

b



on array

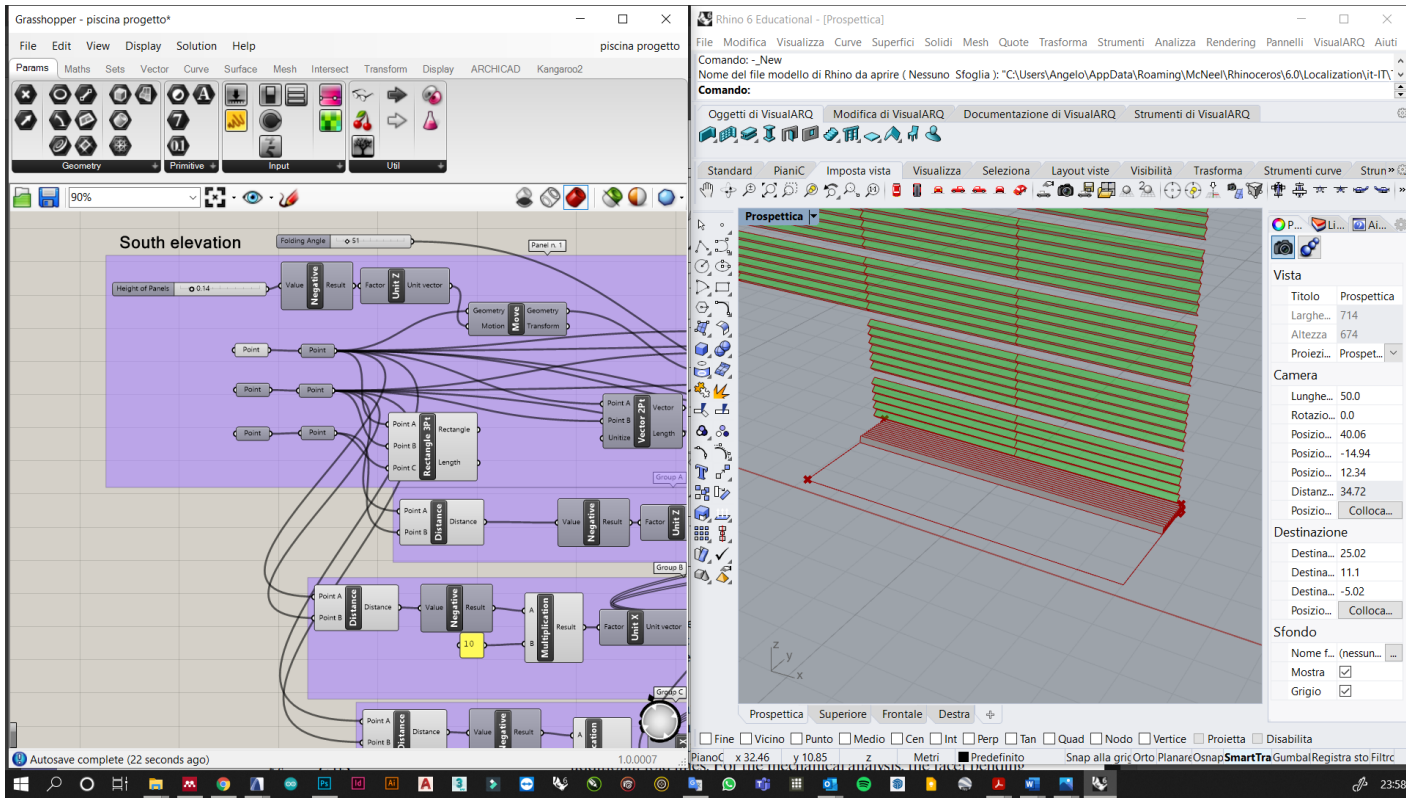


Fig. 5.42. Simulazione piega semplice sulla facciata sud - Edificio piscina Campus Universitario

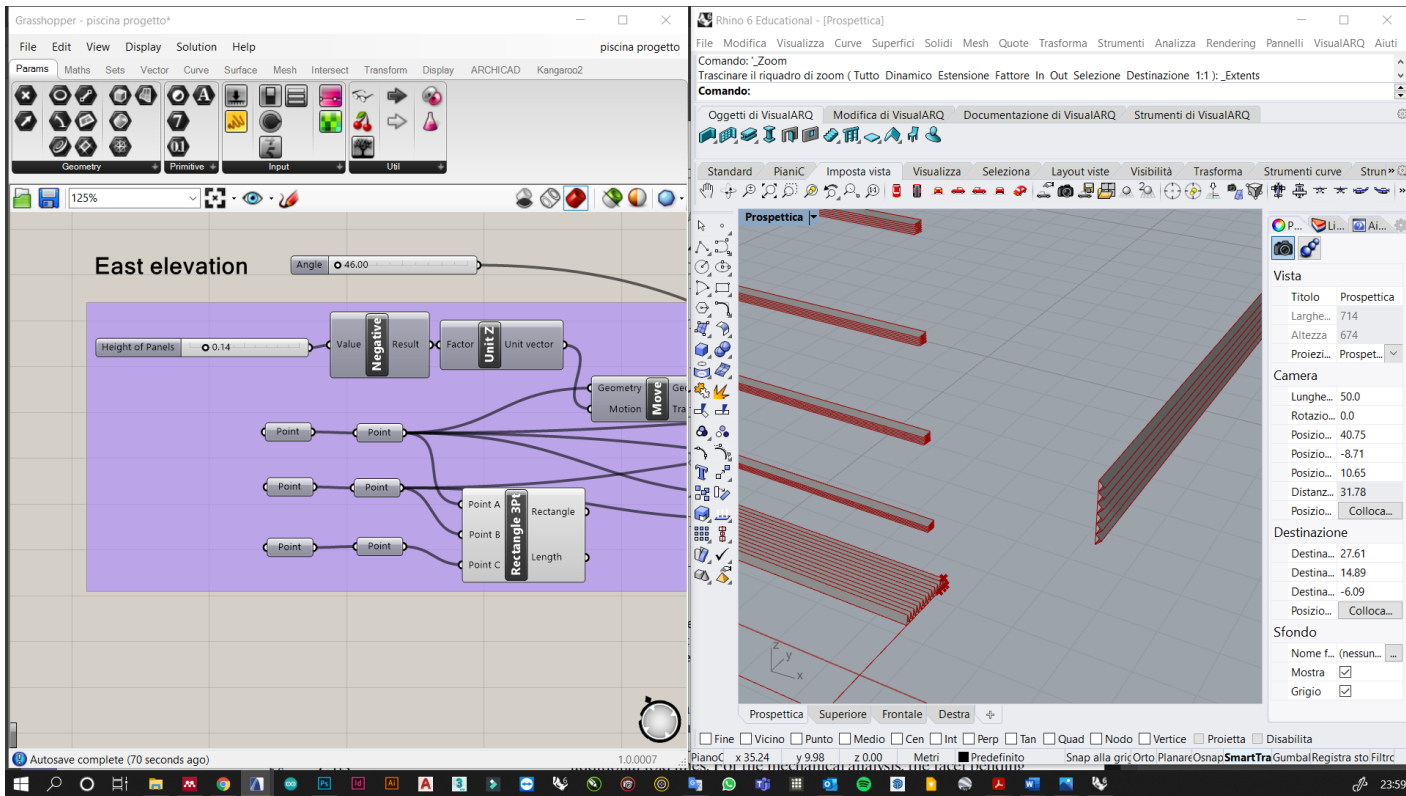
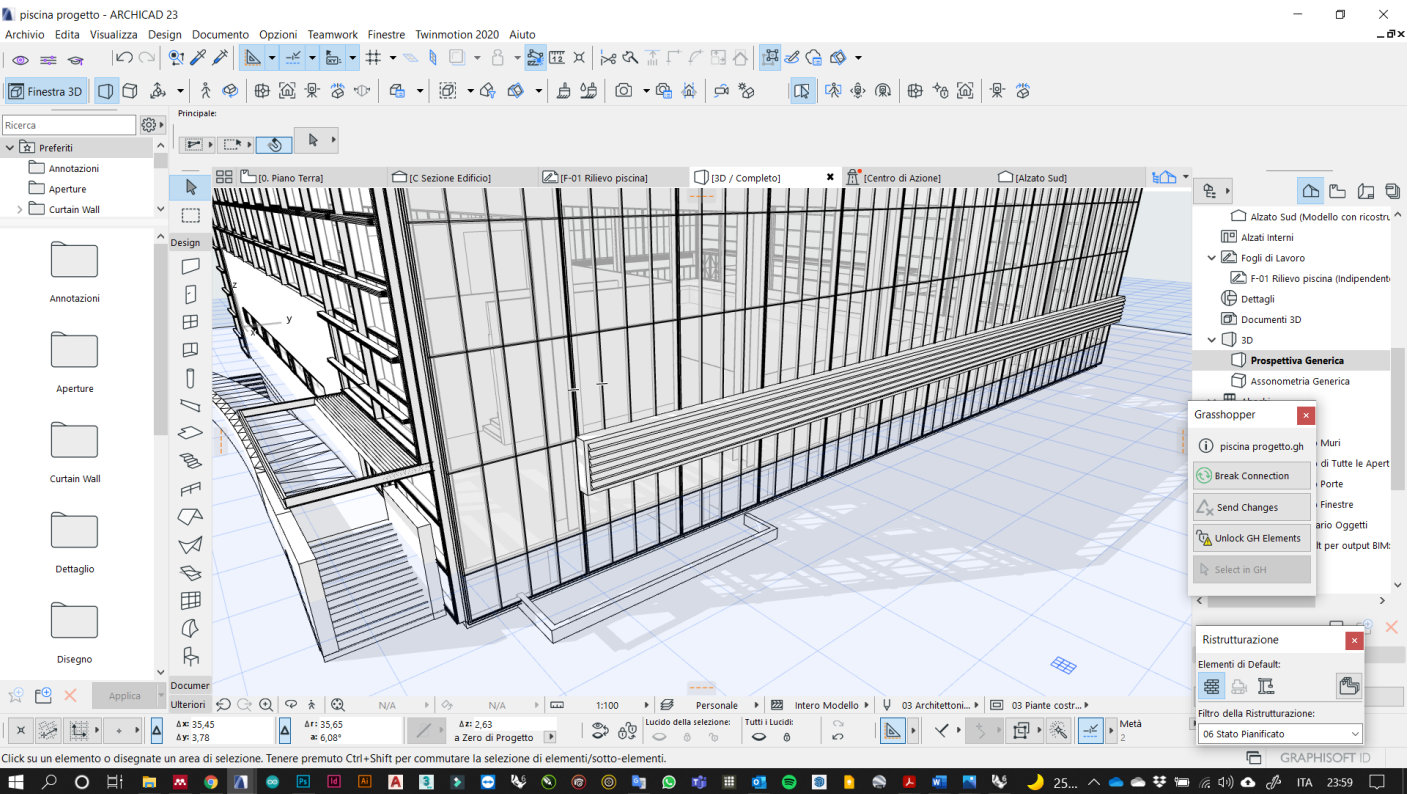
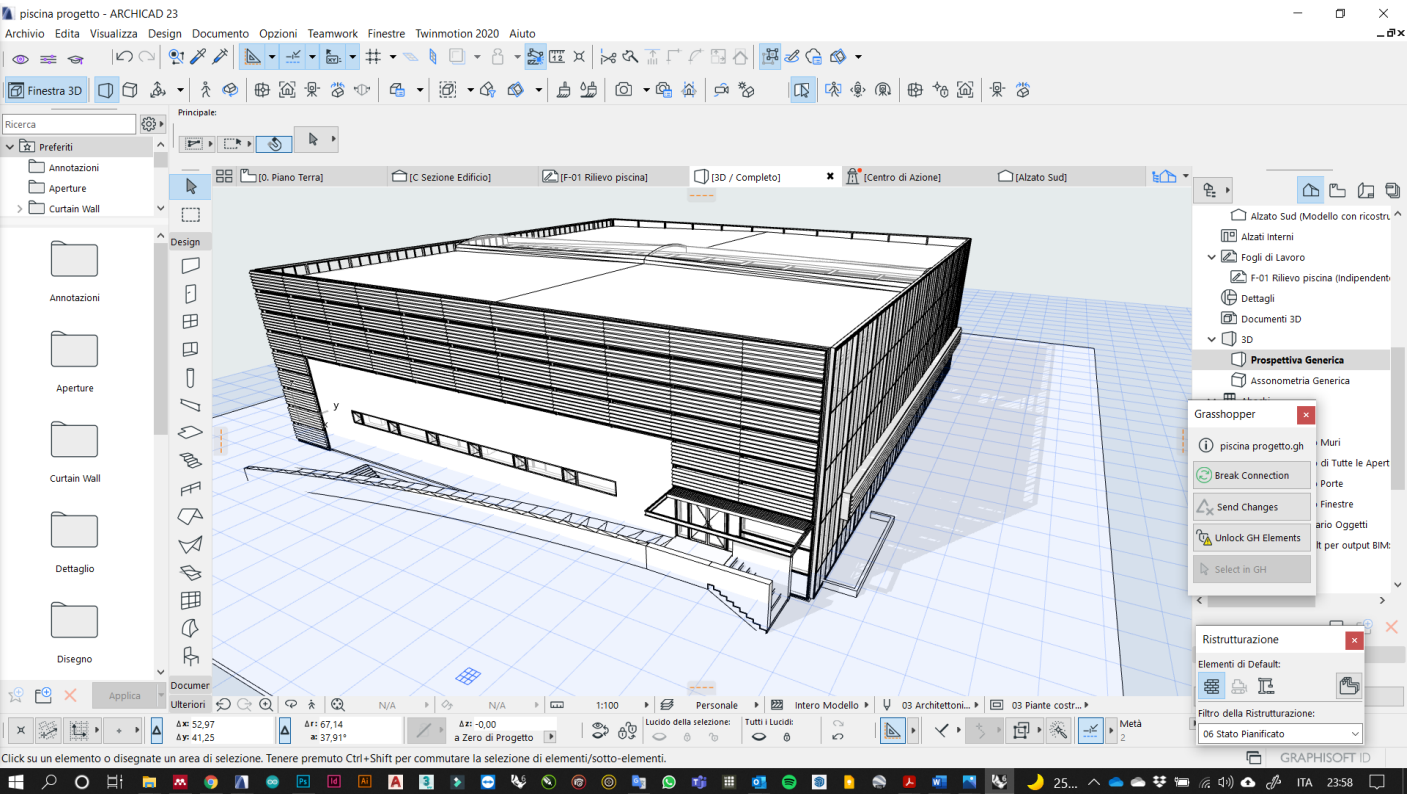


Fig. 5.43. Simulazione piega semplice sulle finestre dei prospetti est ed ovest - Edificio piscina Campus Universitario



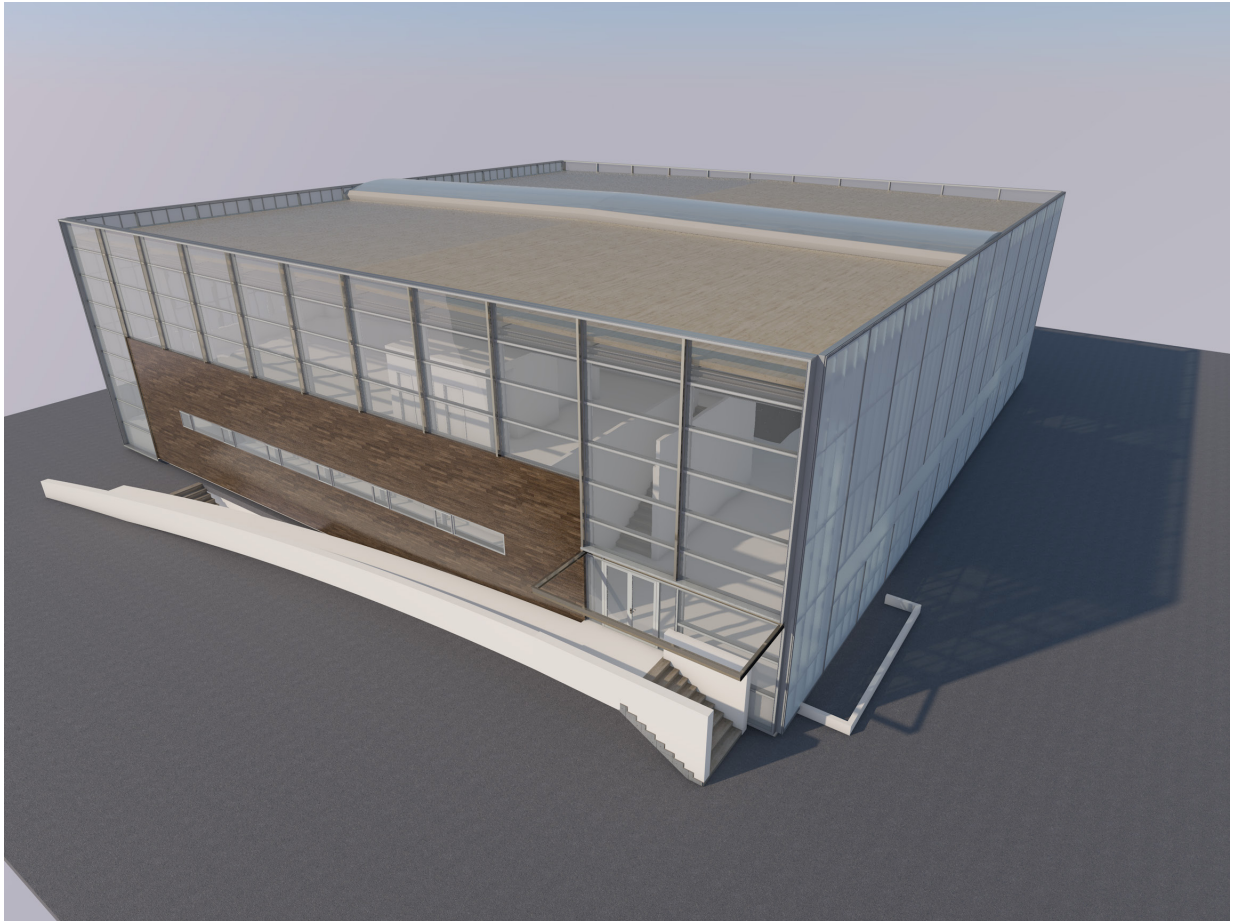
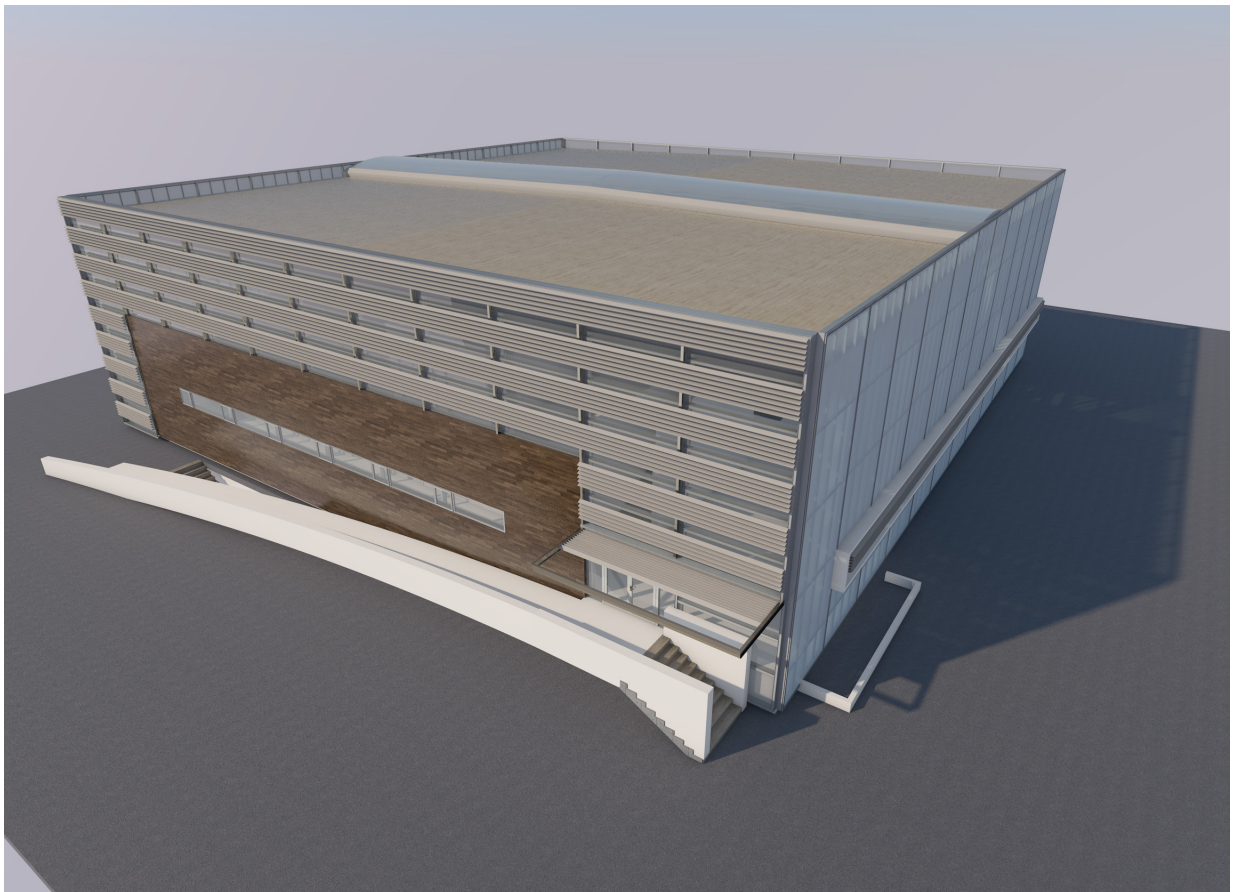


Fig. 5.44. Render della soluzione proposta - Edificio piscina Campus Universitario



Università di Architettura e Urbanistica UAUIM “Ion Mincu”

Il edificio selezionato è uno dei corpi di fabbrica dell’Università di Architettura e Urbanistica UAUIM “Ion Mincu” di Bucarest (Fig. 6.29). Situata nel Settore 1, pieno centro storico della città, è una delle più antiche università della Romania e l’unica istituzione indipendente del paese dedicata all’istruzione nel settore dell’architettura e dell’urbanistica. È ospitata in tre differenti corpi di fabbrica, realizzati in epoche successive. Il primo venne realizzato nel 1864 a seguito di un provvedimento emesso da Alexandru Ioan Cuza, principe di Moldavia e Valacchia, per farne la sede della Scuola di ponti e strade, miniere e architettura. Tuttavia, a causa della mancanza di fondi e studenti, venne chiusa poco dopo. Nel 1892 si ebbe una nuova rinascita grazie all’iniziativa della Società rumena degli architetti, che istituì una scuola privata di architettura. Dopo alcune vicissitudini, che da scuola privata di architettura la portarono a diventare Accademia di Architettura, con la prima legge nazionale rumena sulla didattica dell’architettura che ne riconobbe il livello universitario, nel 1952 divenne Facoltà autonoma con il nome di Istituto di Architettura. Nel 1953 l’Istituto fu intitolato a Ion Mincu.



Negli anni ‘60 il crescente numero di iscritti rese necessario la realizzazione di nuovi edifici in due fasi distinte. Tra il 1962 e il 1963 venne realizzato il corpo di fabbrica su Strada Edgar Quinet, su progettazione dell’arch. Heinz Nova. Successivamente, tra il 1968 e il 1970, fu aggiunto l’edificio all’angolo delle Strade Edgar Quinet e Academiei, progettato da Elena Voinescu, Gh. Filipeanu, Al. Beldiman. L’edificio assunto come caso studio, è caratterizzato da un volume semplice e si estende su tre elevazioni fuori terra di superficie 810 m², rispettivamente dedicate agli uffici amministrativi dell’università, alle aule studio e agli studi dei docenti (Figg. 5.47 - 5.48). Il fabbricato si presenta in scarso stato di conservazione, parte del rivestimento ceramico di facciata e dell’intonaco è danneggiato dalle infiltrazioni degli agenti atmosferici e d’acqua. Elemento caratterizzante dell’estetica dell’edificio è l’ampia parte finestra al primo e al secondo livello fuori terra (Fig. 5.45), privi di sistemi di schermatura, che nel corso della giornata, data l’esposizione su Strada Edgar Quinet, comporta notevoli disagi da abbagliamento nelle ore mattutine e surriscaldamento per eccessivo soleggiamento durante le stagioni più calde. Il progetto sarà orientato verso l’integrazione di tre differenti soluzioni schermati per gli ambienti vetriati del prospetto



Fig. 5.45. DCettagli degli infissi - Università di Architettura e Urbanistica UAUIM “Ion Mincu”

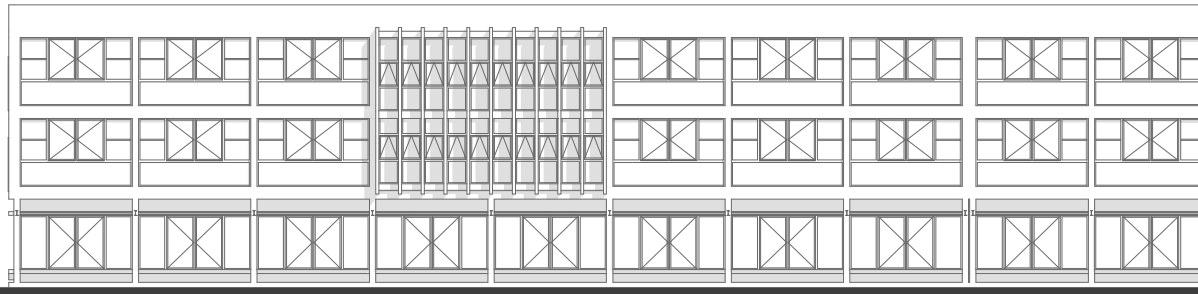


Fig. 5.46. Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" - Prospetto sud

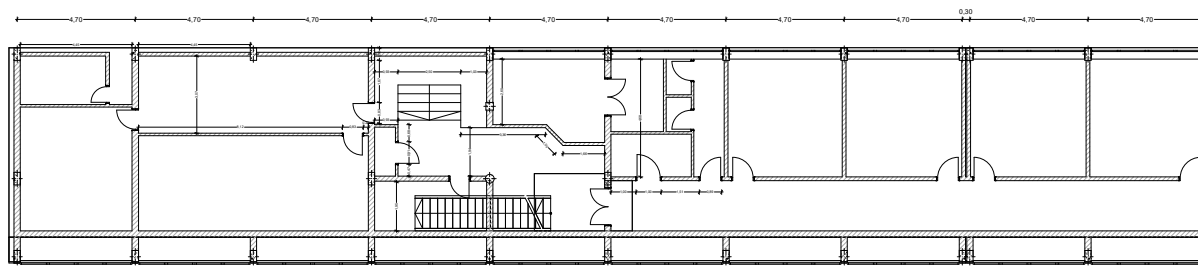


Fig. 5.47. Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" - Pianta piano terra

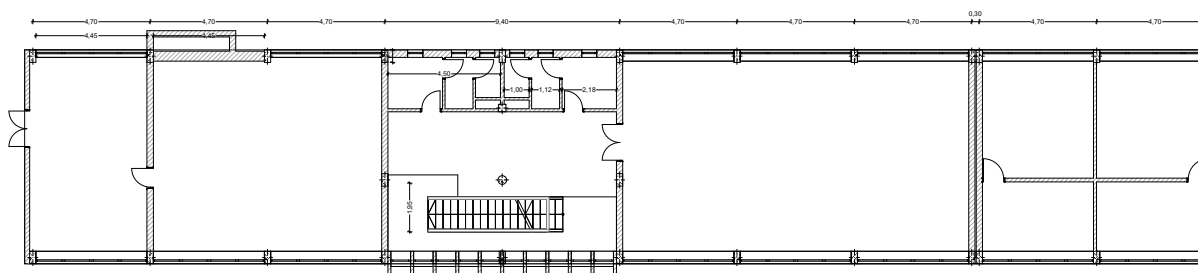
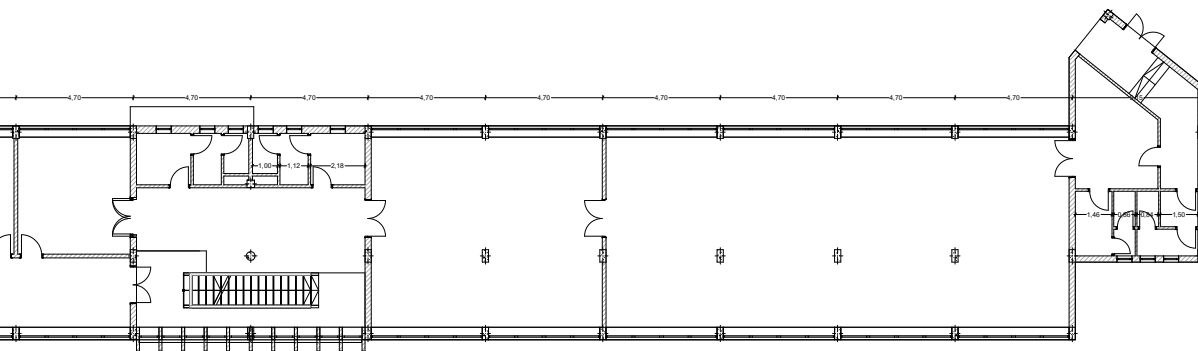
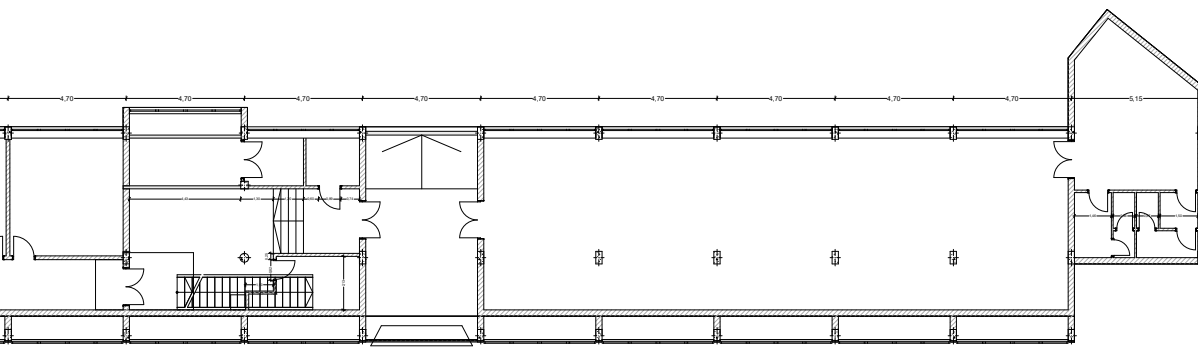
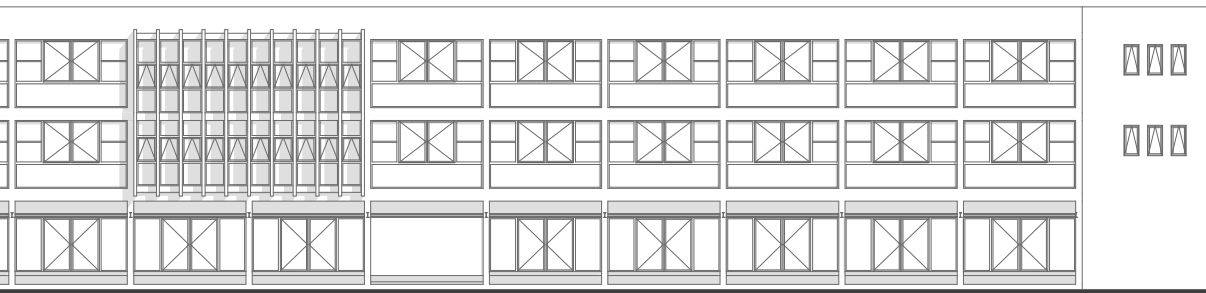


Fig. 5.48. Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" - Pianta piano primo



sud-est dell'edificio (Fig. 5.46).

Per questo edificio è stata prevista l'adozione di due differenti pattern di tassellazione per configurare tre diversi sistemi di schermatura. Nel caso delle aule studio al primo piano e degli studi al piano secondo, finestrati con larghi infissi larghi 435 cm e alti 265 cm, è stato selezionato il pattern MiuraOri, mentre per il corpo scala è stata prevista l'adozione di elementi schermanti a piega semplice. Al fine di ridurre l'apporto solare nelle aree finestrate al piano terra durante l'estate e parallelamente consentire la protezione dalla pioggia per i passanti, popolato dagli studenti per raggiungere i due estremi dell'edificio, sono state previste delle pensiline adattive a sbalzo.

L'origami MiuraOri presenta una tassellazione complessa. Conosciuto anche con il nome di Herringbone Pattern (Miura, 1985), è caratterizzato da una ripetizione di pieghe longitudinali attraversate da reverse fold, ripetute in maniera concorde. Una reverse fold è una piega trasversale rispetto ad una piega principale che determina in quest'ultima un'inversione: una piega di monte che risulti attraversata da una reverse fold diventa di valle e viceversa, una di valle diventa di monte. La tassellazione generata corruga la superficie pur tendendo a mantenerne la configurazione piana. I tasselli generati sono quadrilateri e il movimento imposto su di un tassello si ripercuote in maniera univoca su tutta la superficie (Fig. 5.49). Il singolo tassello quadrilatero, definito dalle dimensioni a e b e dagli angoli γ e ξ (Schenk and Guest, 2013).

In prima battuta per l'algoritmo della geometria di base viene stabilito il parallelogramma $OABB'$, ottenuto mediante la tralazione del punto B su B' di una distanza pari ad a e successivamente ruotata la geo-

metria di un angolo pari a γ .

L'angolo ξ identifica la rotazione del vettore del lato b del parallelogramma di base (Fig. 5.51.a).

Il punto O viene specchiato in A'' rispetto al piano xz passante per A . Traslando il segmento AB' su A'' per ottenere B'' , vengono costruiti i parallelogrammi $OABB'$ e $AB'A''B''$ (Fig. 5.51.b). I due parallelogrammi vengono successivamente specchiati rispetto al piano yz passante per B' .

Il parallelogramma $OABB'$ viene specchiato lungo la parallela all'asse y e passante per B .

Successivamente il modulo creato verrà ripetuto secondo una sequenza parametrizzabile lungo le direzioni x e y (Fig. 5.51.c). Il cinematisimo viene definito dall'angolo diedro $\theta \in [0, \pi/2]$ tra il tassello ed il piano orizzontale xy (folding).

Come nel caso precedentemente analizzato, è stata avviata la sincronizzazione tra i due modelli da Grasshopper ad ArchiCAD.

Il modello origami MiuraOri precedentemente creato con l'algoritmo su Grasshopper viene convertito in elementi costruttivi BIM in ArchiCAD.

Ai fini della prime prove sul posizionamento del componente parametrico sulla facciata dell'edificio, è risultato necessario modificare il sistema di riferimento $oxyz$ agendo sull'identificazione di una nuova origine O , sincronizzata su ARCHICAD e corrispondente con l'angolo in basso a sinistra dell'infisso.

Per il progetto parametrico del componente, è stato possibile lavorare sulla variazione di sei parametri:

- Lato a
- Lato b

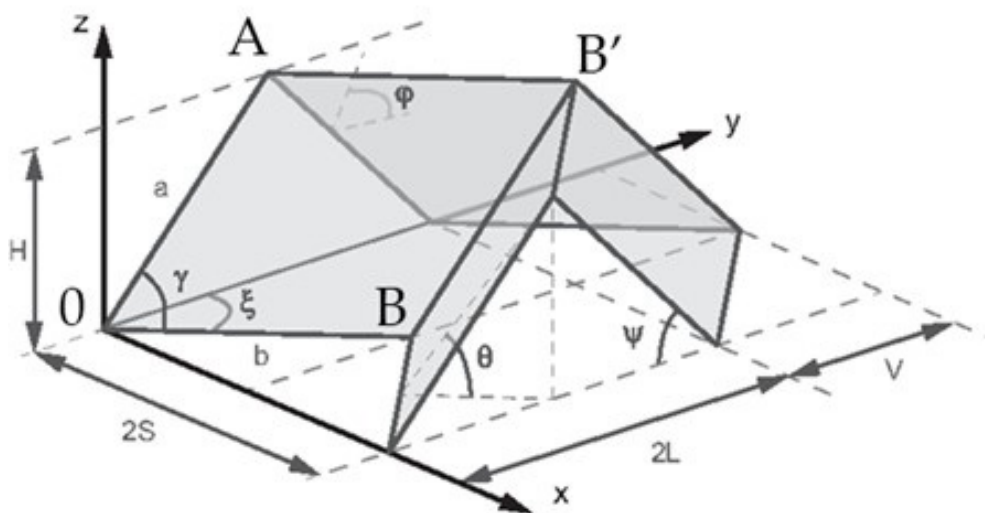


Fig. 5.49. Costruzione geometrica MiuraOri

- Angolo ξ
- Angolo γ
- N. moduli lungo x
- N. moduli lungo y

Agendo sui Number Slider relativi alle sei variabili, è stato testata virtualmente la completa chiusura e apertura del componente sull'infisso. Nel corso della simulazione è stato riscontrato che il pattern di piegatura MiuraOri quando completamente chiuso ha un ingombro nelle due direzioni che in alcuni casi potrebbe impattare con la visuale attraverso la finestra stessa. Nel caso in esame, le finestre hanno la parte inferiore in vetro opale che funge da copertura per i servizi tecnologici posti all'interno, mentre la parte superiore è dotata di vetro trasparente (Fig. 5.45). Per questo motivo, la parametrizzazione del componente è stata orientata al fine di ottenere l'ingombro del sistema schermante quando completamente chiuso, pari all'altezza della parte inferiore dell'infisso, ovvero 120 cm (Fig. 5.53).

La simulazione con pattern Miura-Ori ha resistito i seguenti parametri per gli infissi di dimensioni 465 cm x 265 cm secondo i seguenti parametri (Tab 5.10):

Con la stessa sequenza sono stati dimensionati i pannelli relativi al sistema di ombreggiamento delle fine-

| MiuraOri Pattern | Infissi facciata sud studi e aule |
|---------------------|-----------------------------------|
| Lato a | 19 cm |
| Lato b | 20 cm |
| Angolo ξ | 82,50° |
| Angolo γ | 39° |
| N. moduli lungo x | 13 |
| N. moduli lungo y | 10 |

Tab. 5.10. Parametri sistemi di schermatura pattern MiuraOri - Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu"

stre del corpo scala e dell'elemento schermate esterno al piano terra (Fig. 5.54).

La dimensione dei tasselli, sia per il pattern MiuraOri che per la piega semplice, risulta perfettamente compatibile per l'integrazione delle celle fotovoltaiche, che hanno dimensioni 125 mm x 125 mm.

La simulazione con il pattern di piega semplice per glim infissi del corpo scala e delle pensiline sul prospetto sud (Fig. 5.54) ha invece restituito i seguenti dati (Tab. 5.11):

| Piega semplice | Pensilina ingresso | Finestre corpo scala |
|----------------|----------------------------|----------------------------|
| Lato a | 14 cm | 14 cm |
| Lato b | 415 cm | 78 cm |
| Angolo ξ | $5^\circ < \xi < 45^\circ$ | $5^\circ < \xi < 45^\circ$ |
| N. falde | 16 | 30 |

Tab. 5.11. Parametri sistemi di schermatura pattern soffitto semplice - Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu"

Malgrado i primi settaggi dell'algoritmo possano risultare più macchinosi e complicati durante la modellazione e il trasferimento, GH-AC LCT permette di ridurre al minimo il dispendio di tempo e dati senza importare ed esportare file. Durante la fase di modellazione, il modello viene facilmente trasformato in disegni tecnici 2D, in quanto piante, prospetti ed ulteriori elaborati e tecnici vengono creati automaticamente in ArchiCAD.

Anche in questo caso è stato renderizzato su ARCHICAD con il motore di rendering CineRender 4D (Fig. 5.50).

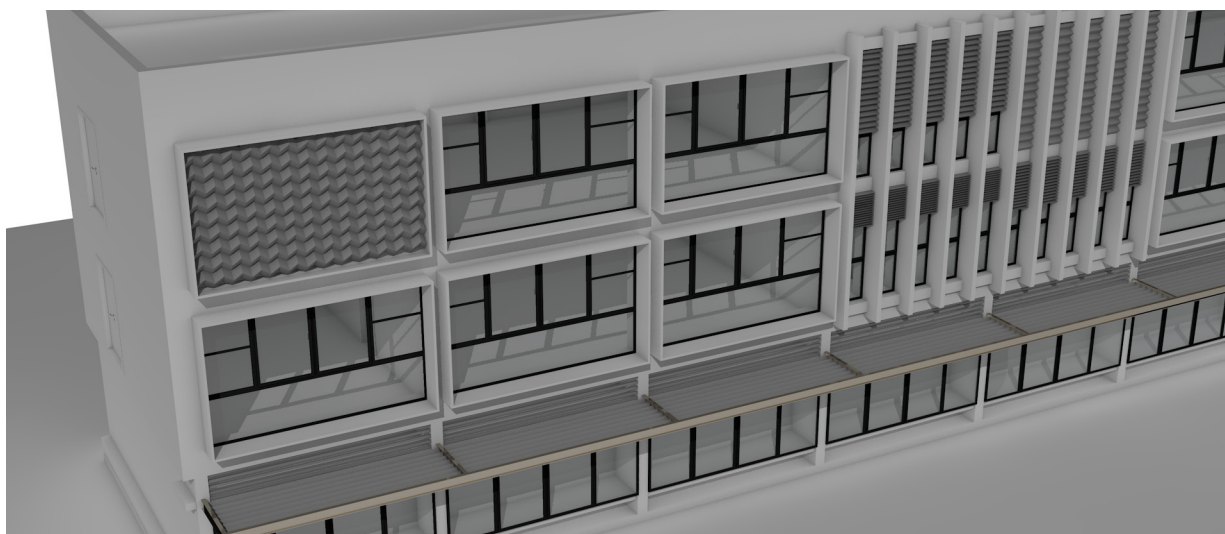
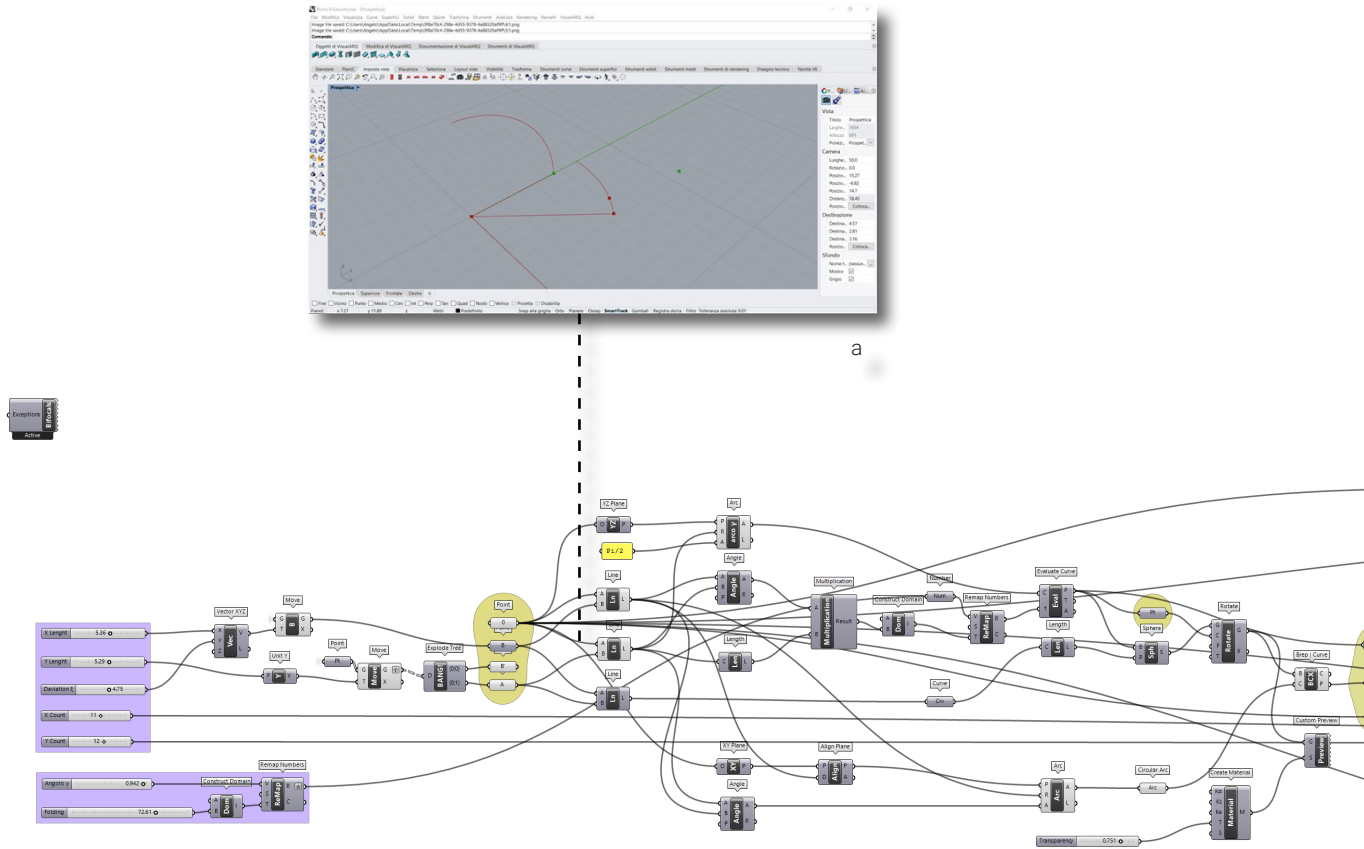


Fig. 5.50. Render della soluzione proposta - Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu"



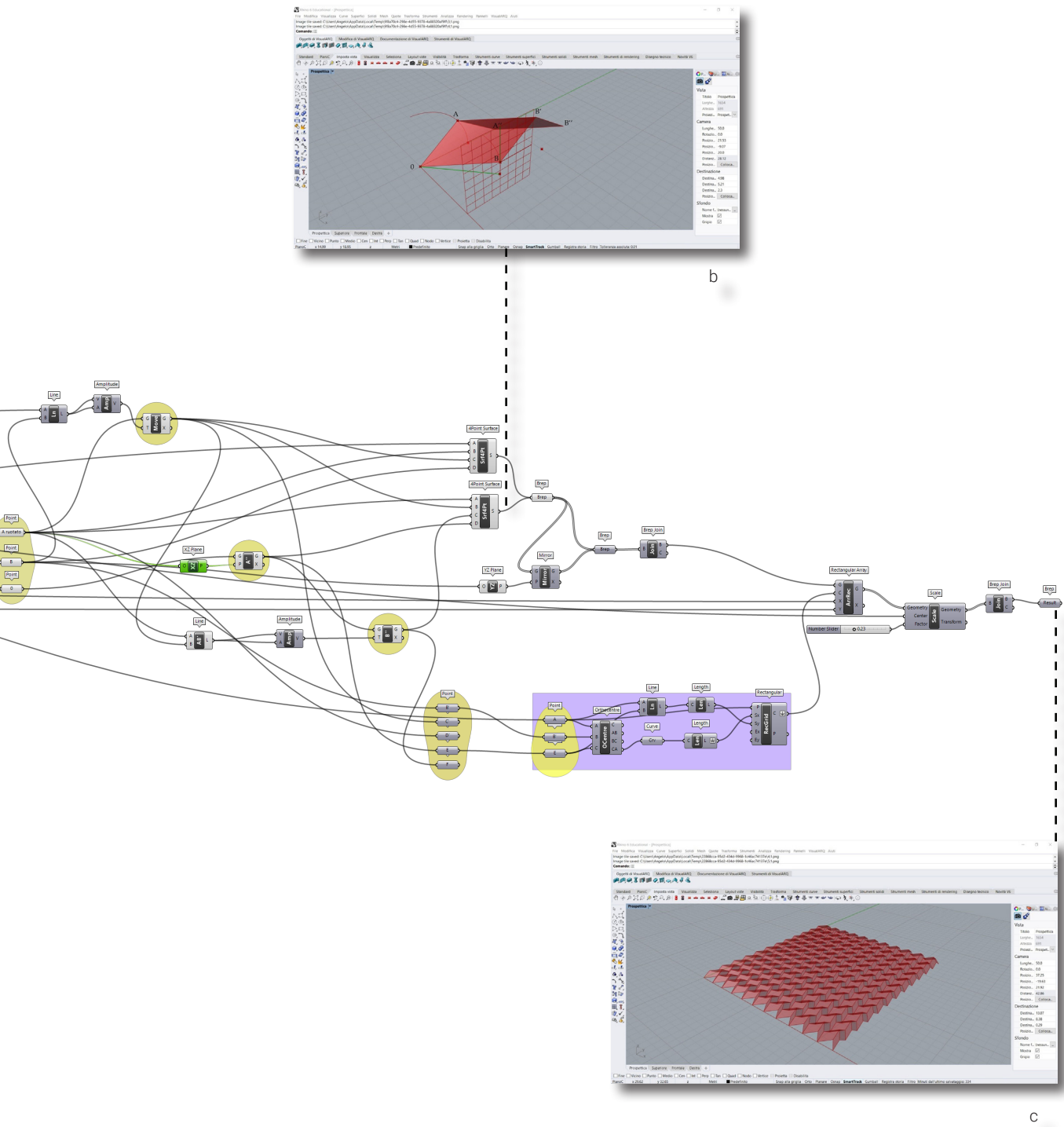


Fig. 5.51. Algoritmo per la costruzione del MiuraOri pattern

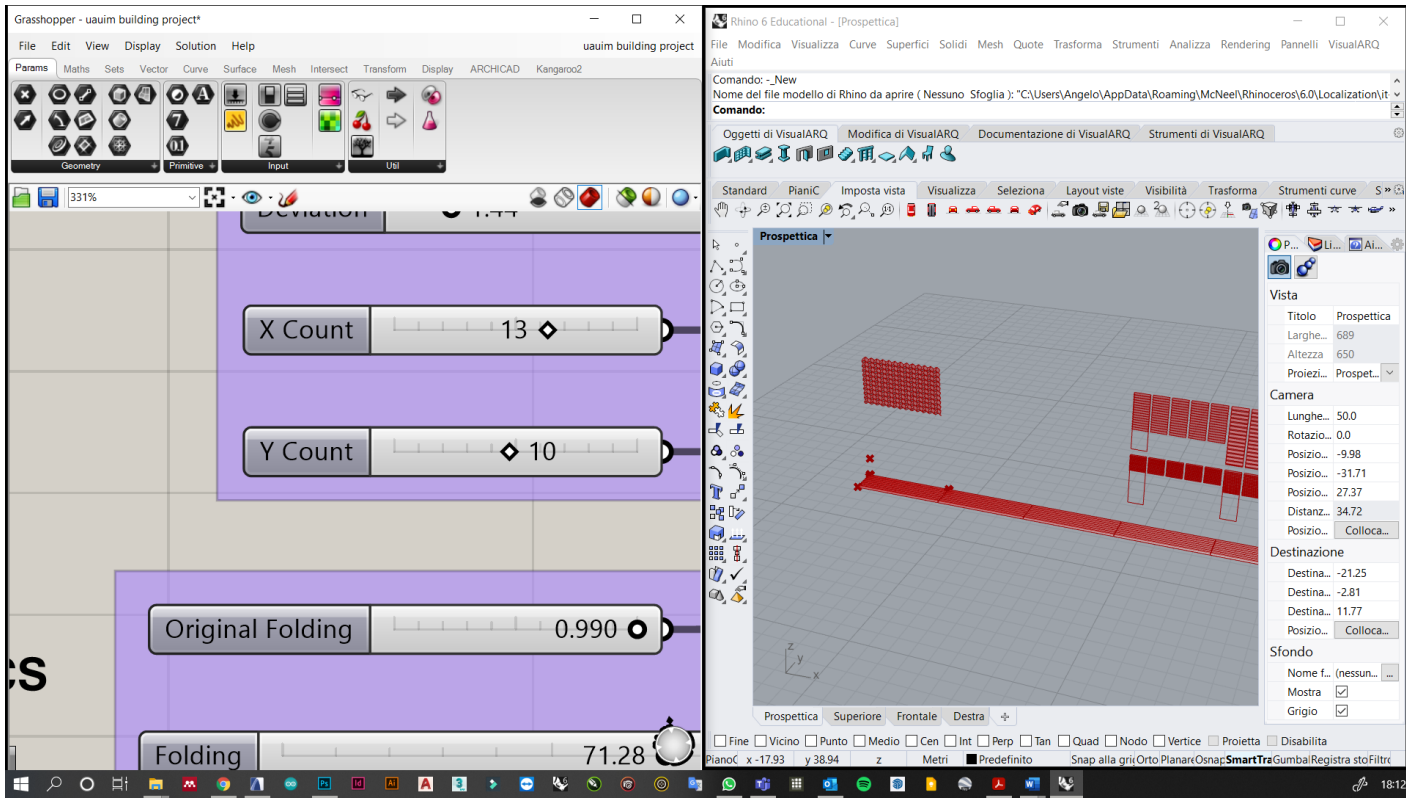


Fig. 5.52. Simulazione MiuraOri facciata sud studi e aule - Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu"

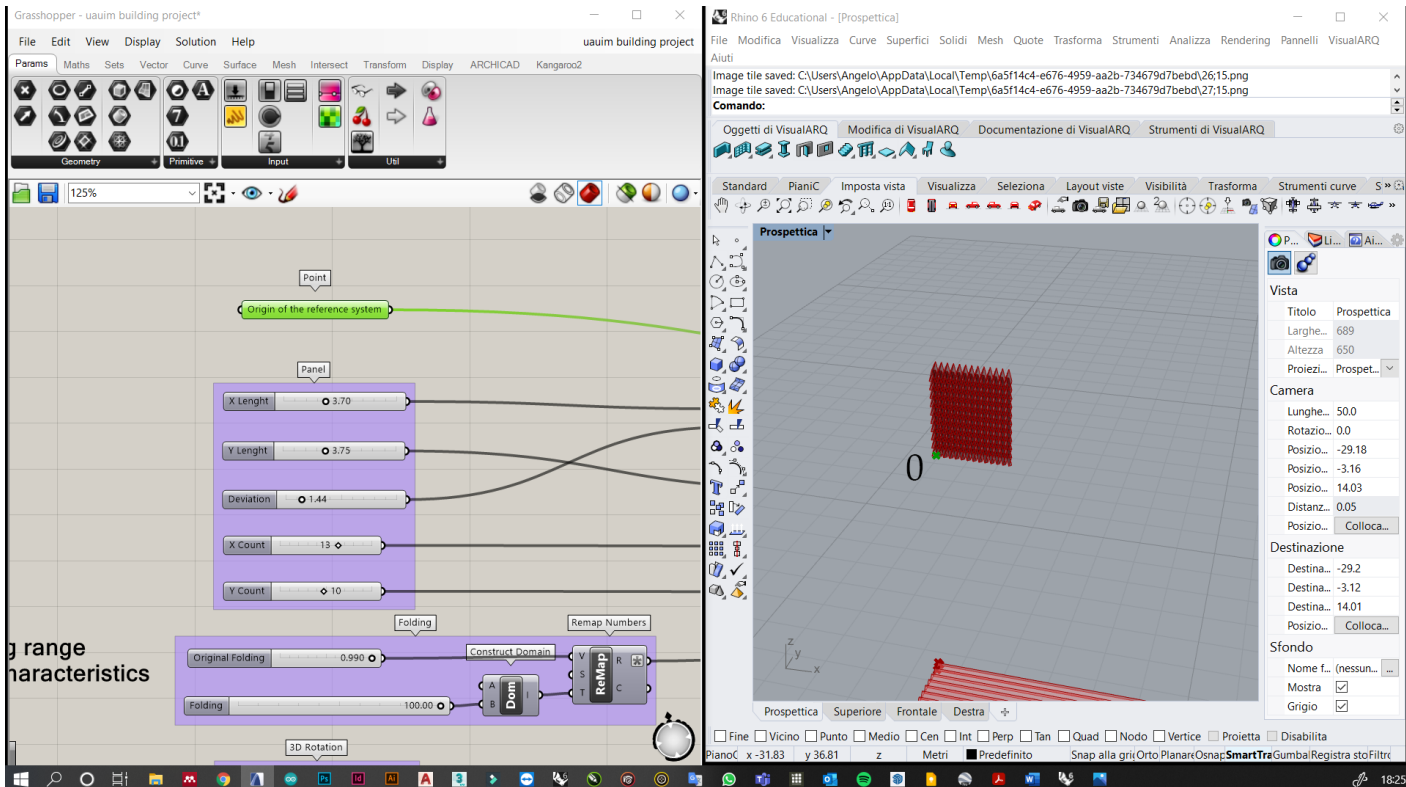
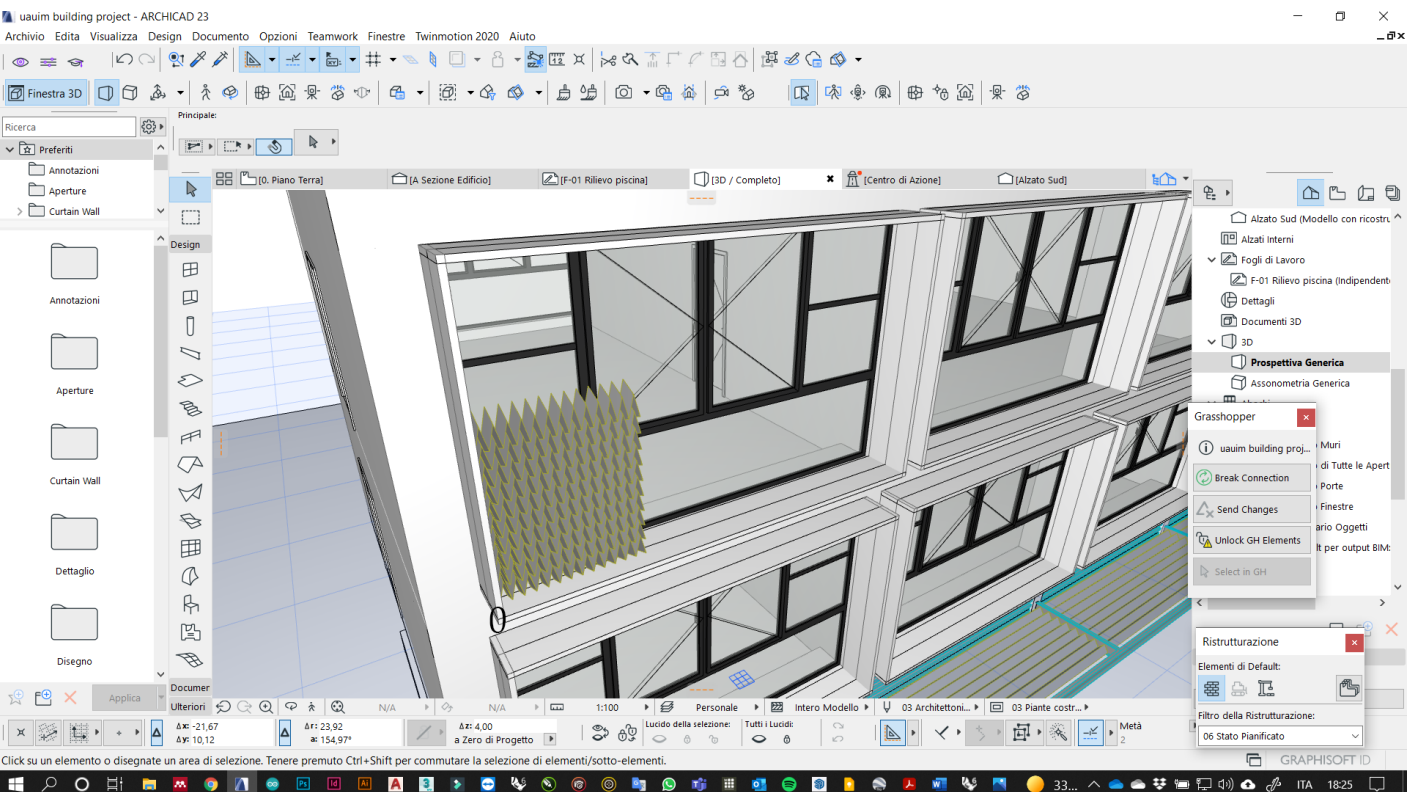
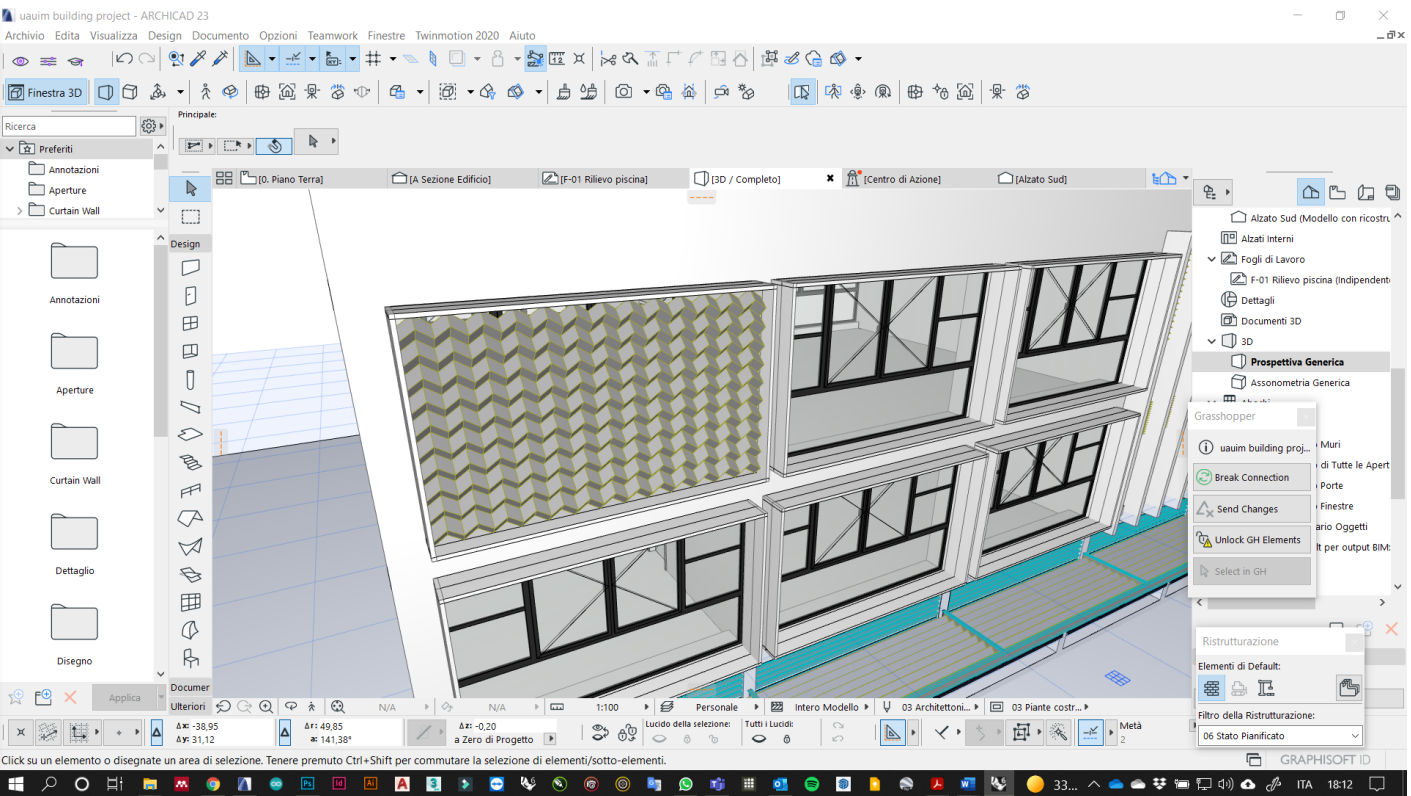


Fig. 5.53. Simulazione MiuraOri facciata sud studi e aule - Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu"



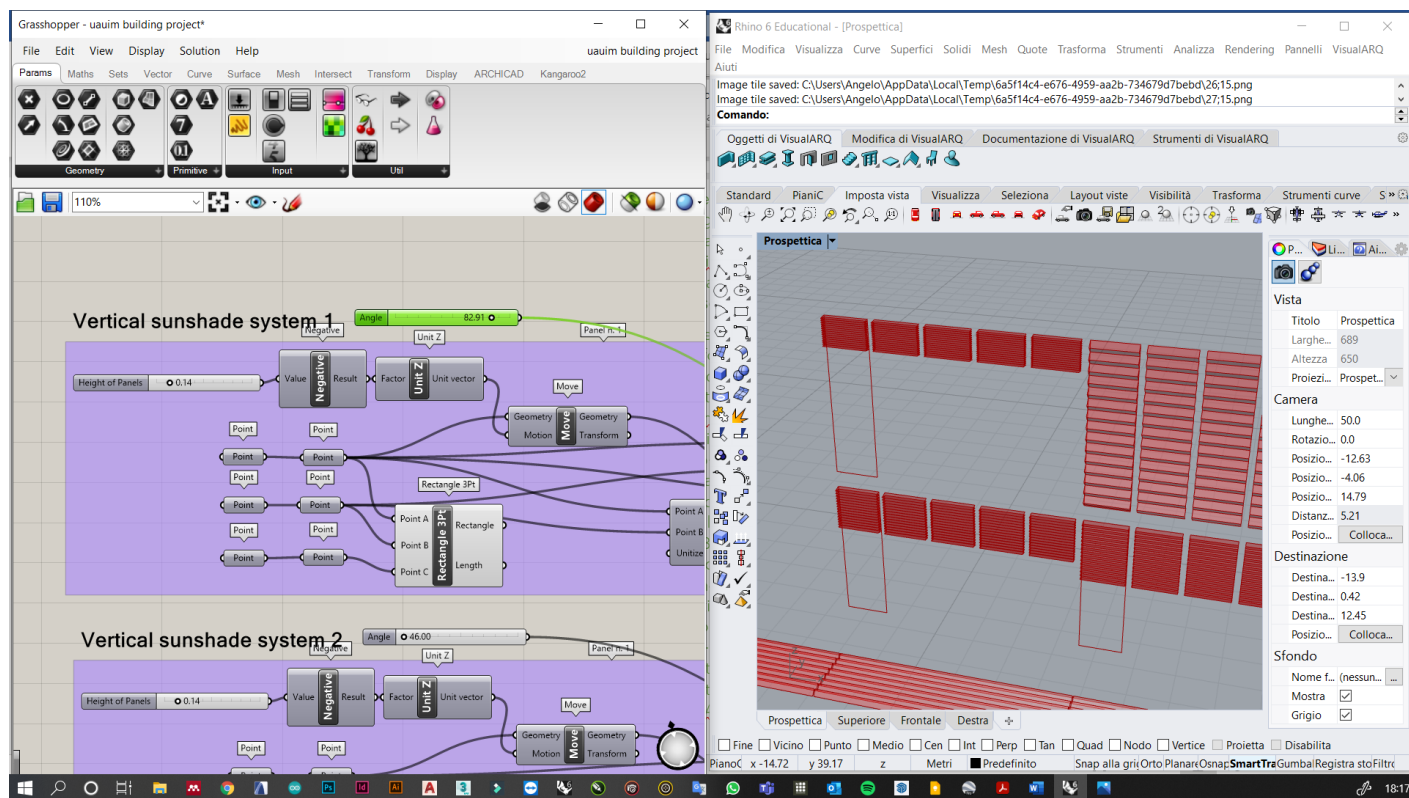


Fig. 5.54. Simulazione piega semplice sulle pensiline piano terra e sulle finestre del corpo scala - Università di Architettura e Urbanistica UAUIIM "Ion Mincu"

BREVETTO

Prima di presentare la domanda di brevetto è stato necessario verificarne il requisito di innovazione. Dalle banche dati disponibili è emerso che alcune invenzioni con caratteristiche simili siano oggetto di brevetto. Queste, tuttavia, riguardano sistemi fotovoltaici ripiegabili o movimentabili atti esclusivamente a produrre energia elettrica, ma non classificabili tra gli Adaptive Building Component. Al contrario già coperti da brevetto, il sistema SLICE prevede la movimentazione della superficie al fine di ottimizzare il contributo della radiazione solare incidente nell'ambiente protetto, al variare delle condizioni climatiche e delle fasi della giornata. Per garantire la movimentazione, occorre impiegare sensori ed attuatori di movimento, che necessitano di un approvvigionamento di energia per il loro funzionamento. L'energia prodotta dalle celle fotovoltaiche inglobate nell'involucro serve ad alimentare il sistema di controllo e gli attuatori di moto. Pertanto, il main topic dell'invenzione non è rappresentato dall'aspetto energetico che, invece, costituisce semplicemente un elemento volto a svincolare il componente dalla rete di approvvigionamento di energia rendendolo offgrid.

Inoltre, dalla ricerca di anteriorità è emerso che uno degli fattori innovativi della soluzione proposta consiste nel cinematismo semplificato. Il componente, infatti, non presenta cerniere meccaniche tra un tassello

e l'altro, ma affida la movimentazione alla deformazione elastica del materiale lungo le linee di piegatura conferitegli.

Una delle principali proprietà del componente è, inoltre, la resistenza aggiuntiva che ad esso viene conferita del pattern di piegatura. A differenza delle soluzioni presenti nei brevetti già depositati, che prevedono esclusivamente tipi di piegatura a soffietto tradizionale, il materiale composito di base è stato studiato per adattarsi a diverse conformazioni geometriche, anche complesse.

La domanda di brevetto si riferisce ad un "dispositivo cinetico adattivo per l'architettura, in particolare ad un dispositivo comprendente un elemento di copertura a conformazione variabile in grado di adattarsi automaticamente a differenti condizioni ambientali".

Nel testo della domanda è stata rivendicata, dunque, l'originalità di un componente cinetico adattivo per l'architettura, che comprende un elemento di copertura a conformazione variabile provvisto di tecnologia fotovoltaica, dei mezzi attuatori volti a consentirne il movimento ed un'unità di gestione e controllo intelligente, connessa a dei sensori. Un ulteriore oggetto di rivendicazione è la specificità del materiale composito di base, costituito da una matrice in elastomero termoplastico e da un tessuto di rinforzo, preferibilmente in fibra di carbonio, di vetro e/o di canapa.

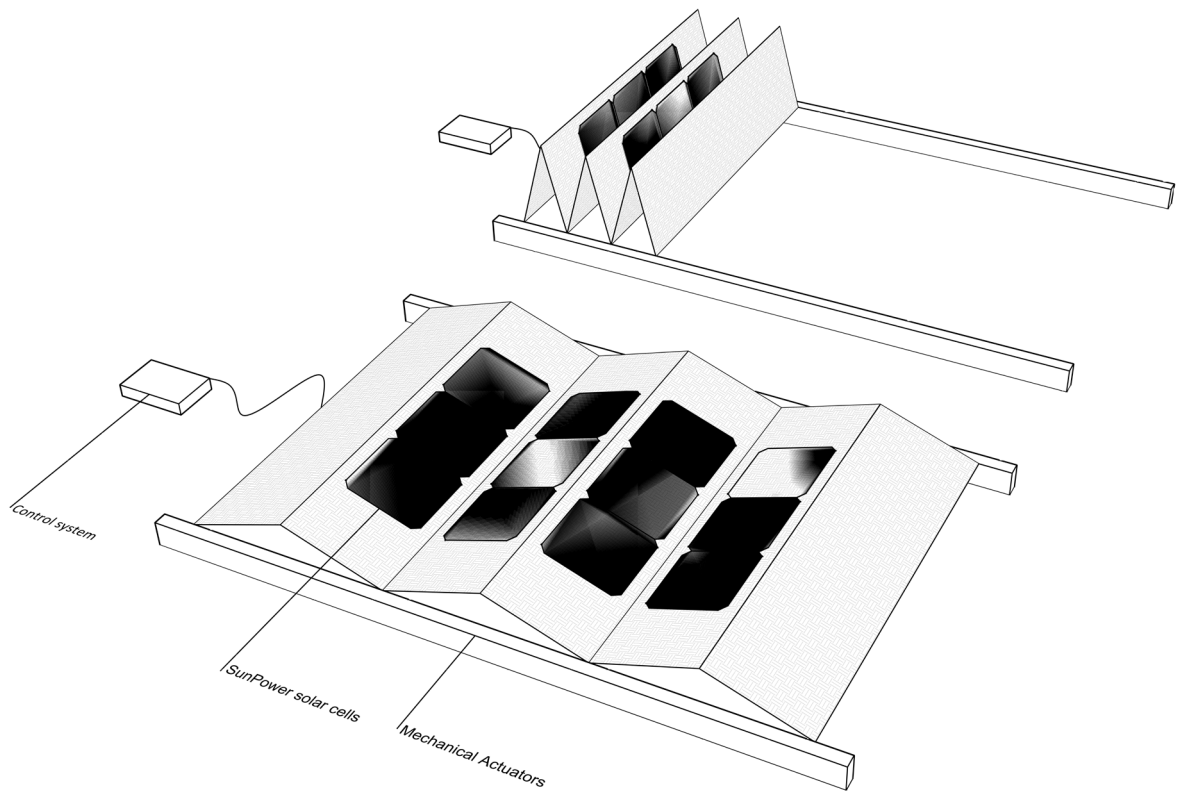
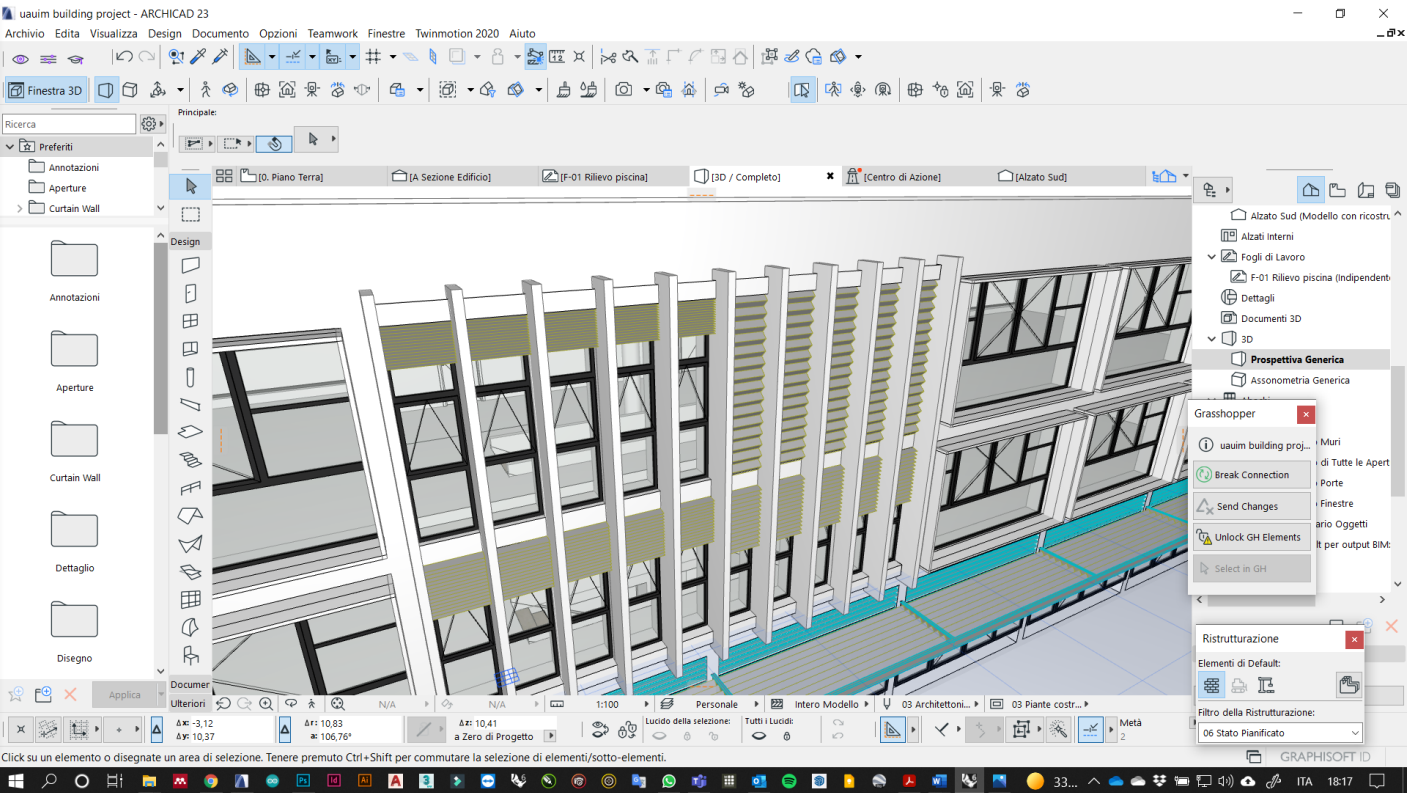
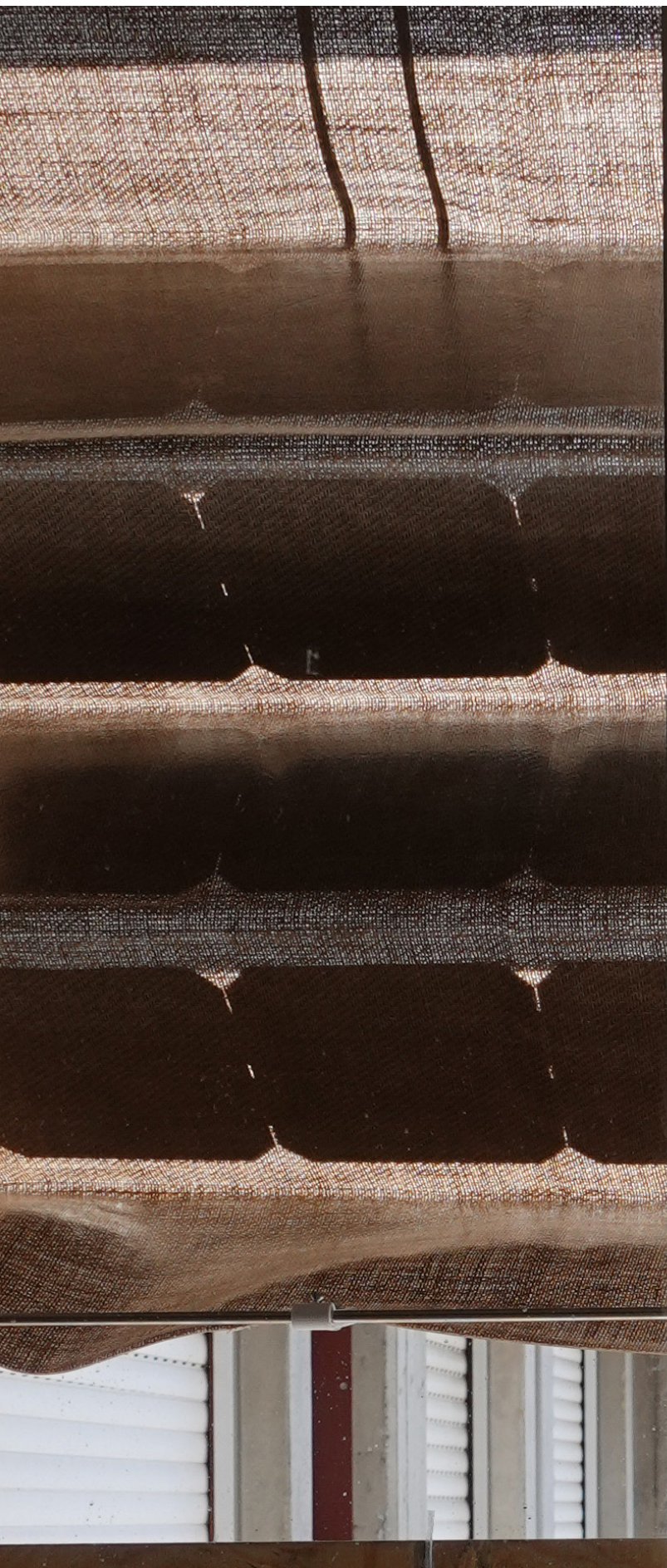


Fig. 5.55. Disegni tecnici allegati alla domanda di brevetto (SAPIENZA et al., 2019)

6. CONCLUSIONI





Il lavoro presentato appartiene ad un filone di ricerca, quello dei sistemi adattivi, di particolare rilevanza nell'ambito dell'ottimizzazione dei consumi negli edifici. Infatti, negli involucri adattivi può essere rintracciata una delle strategie più promettenti nel controllo dell'irraggiamento solare al fine di massimizzare il guadagno nel periodo invernale, migliorare le condizioni di ombreggiamento e ventilazione naturale nel periodo estivo.

SLICE è un componente caratterizzato da un materiale base in composito e sistema fotovoltaico integrato, dotato di un cinematismo semplice e privo di apparati meccanici complessi, corredato di un sistema di gestione intelligente alimentato dal sistema fotovoltaico, quindi funzionalmente ed energeticamente autosufficiente. Esso si propone come una soluzione tecnologica leggera, flessibile e stand-alone per involucri dinamici.

La prima parte della ricerca ha riguardato lo sviluppo del materiale composito di base. L'attenzione nella selezione del rinforzo è stata focalizzata su tessuti in fibra di vetro e il Biotex Flax, tessuto composto da fibre di lino, mentre come matrice è stato scelto l'EVA (etilvinilacetato), elastomero termoplastico (TPE) prodotto da "SKC films", tipo EF2N. Nella scelta della tecnologia fotovoltaica sono state tenute in considerazione vari tipi di celle solari. Sulla base delle sperimentazioni condotte presso i laboratori dell'azienda partner Meridionale Impianti SpA sono state selezionate celle solari in silicio monocristallino ad alta efficienza con dimensioni di 125 mm per 125 mm, prodotte da SunPower Maxeon®. Essendo questo tipo di prodotto dotato di tecnologia back-contact, è idoneo a resistere alle sollecitazioni generate dalla flessibilità del substrato composito.

Per ottimizzare l'integrazione delle celle fotovoltaiche nel composito, è stata introdotta una copertura finale in PET (polietilene tereftalato) prodotto dalla DUNMORE con il nome DUNSOLAR PPE. Questo layer laminato multistrato in poliestere impermeabile, fornisce protezione dagli agenti atmosferici e allo sporco.

Pertanto la stratigrafia finale è stata definita nel composito con matrice in EVA, rinforzo in Biotex Flax, celle fotovoltaiche in silicio monocristallino ad alta efficienza con dimensioni di 125 mm per 125 mm e due layer aggiuntivi di protezione rispettivamente in EVA e in PET (riservato alla superficie delle singole celle).

Il lavoro svolto ha consentito di mettere a punto un sistema di cinematismo basato sugli origami che rappresenta un ottimo connubio tra possibilità espressive, gestione del cinematismo e resistenza per forma. La piegatura del composito è stata realizzata mediante il processo di termoformatura, una tecnica consolidata

per lo stampaggio a caldo di materie plastiche, che avviene sotto pressione. Le sperimentazioni hanno consentito di individuare un processo di post-produzione.

Nello studio di definizione delle funzionalità del componente è risultato necessario avvalersi degli strumenti messi a disposizione dalla prototipazione rapida per la realizzazione di prototipi per simulare il suo funzionamento in contesti differenti.

La realizzazione del prototipo SLICE 1.0 ha consentito di lavorare sul sistema di movimentazione e di controllo intelligente, basato su piattaforma Arduino. La parte hardware e software sviluppata per questo prototipo, ha permesso mediante le prime simulazioni in laboratorio di perfezionare la componentistica meccanica e di mettere a punto un codice di programmazione intelligente. Esso tiene conto di alcune istruzioni a pacchetto che vengono impartite dal microcontrollore al gruppo di movimentazione per interpretazione di specifici input esterni. Il sistema di controllo attraverso i sensori raccoglie i dati provenienti dai sensori, sulla base dei valori di lettura individua la casistica di riferimento a cui corrisponderanno precisi comandi. Il circuito progettato è costituito dalla scheda Arduino Mega 2560, a cui sono connessi interruttori di marcia e di fine corsa, una fotoresistenza per il monitoraggio dei valori di illuminamento e la scheda relè per il comando del moto del motoriduttore. L'intero circuito è alimentato attraverso la batteria al litio da 3,7V.

Con il secondo prototipo SLICE 2.0 è stato possibile lavorare su un sistema di gestione intelligente basato su tre diverse modalità di funzionamento, denominate rispettivamente Energy Mode, Comfort Mode e Manual Mode, che consentono di modificare la configurazione SLICE per ottenere la massimizzazione della produzione di energia, il controllo dell'illuminazione interna, o una configurazione liberamente scelta dall'utente.

Il prototipo, dotato di una batteria più potente e di sensori aggiuntivi quali un fotodiodo, un sensore di luminosità, accelerometro e modulo di rilevazione del movimento a infrarossi, ha consentito di effettuare prove sperimentali in condizioni ambientali reali che hanno evidenziato l'efficacia del codice di programmazione. Nella modalità Energy Mode, SLICE opera in modo tale da ottimizzare la produzione di energia quando non ci sono persone nel locale. In questo caso, il dispositivo SLICE è completamente aperto per migliorare la produzione di energia e ridurre il carico di riscaldamento nell'ambiente. I risultati dei test hanno anche evidenziato alcuni vincoli del prototipo.

Durante la sperimentazione è stato osservato che la scheda di ricarica non ha consentito di lavorare sulla massimizzazione delle performance nella produzione

di energia dalle celle fotovoltaiche. Per questo motivo la quarta fase della ricerca ha previsto l'individuazione di un nuovo circuito di ricarica dotato di controller MPPT, che consente alle celle fotovoltaiche di funzionare al loro punto di massima potenza.

E' stato realizzato un terzo prototipo denominato SLICE4ICARO con cui poter avviare una nuova campagna di test in condizioni ambientali per valutare la massimizzazione delle performance di produzione e accumulo di energia dalle celle fotovoltaiche. I risultati di questi test e l'analisi dei dati di targa dei moduli ha suggerito di valutare l'impiego del sistema come elemento di BIPV, consentendo di sfruttare il surplus di energia prodotta per l'alimentazione dei componenti tecnologici di dotazione dell'ambiente servito dal componente stesso.

In considerazione dell'efficacia della tecnologia sviluppata, il prototipo SLICE4ICARO verrà installato in un padiglione per l'accoglienza dei visitatori responsivo ed off-grid denominato ICARO - Innovative Cardboard ARchitectural Object che verrà collocato presso il test-site di Megara Hyblaea, nell'ambito delle attività del progetto di ricerca eWAS.

L'uso di un componente adattivo per involucri di facciata, visto come soluzione di retrofit per edifici esistenti, appare adatto al miglioramento delle condizioni di comfort di ambienti in cui l'interazione dell'utente è meno presente, come appunto gli uffici o le strutture per lo sport.

Per tale ragione, la scelta dei casi studio è stata indirizzata a queste tipologie edilizie. Tale scelta è servita a validare le ipotesi fatte sulla possibilità di integrare il componente SLICE in edifici esistenti. Sono stati individuati due edifici situati a Bucarest con destinazioni d'uso diverse, realizzati in epoche differenti.

Nel corso delle attività presso l'Università partner Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu", è stato definito un workflow per importare agevolmente dati provenienti da software parametrici all'interno di modelli BIM. Attraverso questo strumento è stato possibile operare sull'ottimizzazione delle divisioni e del numero di pieghe, delle dimensioni delle falde e dei livelli di dispiegamento del componente, in modo da poter valutare l'integrazione del componente, definire punti di forza e di debolezza. Questo ha permesso anche di poter esaminare il sistema meccanico di supporto al cinematismo.

BIBLIOGRAFIA

ARTICOLI SU RIVISTA

- Al-Qaryouti, Y., Baber, K. and Gattas, J. M. (2019) 'Computational design and digital fabrication of folded timber sandwich structures', *Automation in Construction*, 102(April 2018), pp. 27–44. doi: 10.1016/j.autcon.2019.01.008.
- Attia, S. et al. (2018) 'Current trends and future challenges in the performance assessment of adaptive façade systems', *Energy and Buildings*, 179, pp. 165–182. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.09.017.
- Barozzi, M. et al. (2016) 'The Sustainability of Adaptive Envelopes: Developments of Kinetic Architecture', *Procedia Engineering*, 155, pp. 275–284. doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.029.
- Candelas, F. A. et al. (2015) 'Experiences on using Arduino for laboratory experiments of Automatic Control and Robotics', *IFAC-PapersOnLine*. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.11.221.
- D'Ausilio, A. (2012) 'Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment', *Behavior Research Methods*, 44(2), pp. 305–313. doi: 10.3758/s13428-011-0163-z.
- Fakourian, F. and Asefi, M. (2019) 'Environmentally responsive kinetic façade for educational buildings', *Journal of Green Building*, 14(1), pp. 165–186. doi: 10.3992/1943-4618.14.1.165.
- Fiorito, F. et al. (2016) 'Shape morphing solar shadings: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. doi: 10.1016/j.rser.2015.10.086.
- Fouad, S. M. A. E.-H. (2012) 'Design Methodology : Kinetic Architecture', (July), p. 9.
- Gallo, P. and Romano, R. (2017) 'Adaptive Facades, Developed with Innovative Nanomaterials, for a Sustainable Architecture in the Mediterranean Area', *Procedia Engineering*, 180, pp. 1274–1283. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.289.
- Heinstein, P., Ballif, C. and Perret-Aebi, L. E. (2013) 'Building integrated photovoltaics (BIPV): Review, potentials, barriers and myths', *Green*, 3(2), pp. 125–156. doi: 10.1515/green-2013-0020.
- Jayathissa, P. et al. (2017) 'Optimising building net energy demand with dynamic BIPV shading', *Applied Energy*, 202, pp. 726–735. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.05.083.
- Knippers, J. and Speck, T. (2012) 'Design and construction principles in nature and architecture', *Bioinspiration & biomimetics*, 7, p. 15002. doi: 10.1088/1748-3182/7/1/015002.
- Lamont, L. A. (2012) 'History of photovoltaics', in *Comprehensive Renewable Energy*. Elsevier Ltd, pp. 31–45. doi: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00102-5.
- Lee, E. et al. (2018) 'RINGA: Design and verification of finite state machine for self-adaptive software at runtime', *Information and Software Technology*, 93, pp. 200–222. doi: 10.1016/J.INFSOF.2017.09.008.

- Mazzucchelli, E. S. et al. (2018) 'Study of a BIPV adaptive system: Combining timber and photovoltaic technologies', *Journal of Facade Design and Engineering*, 6(3), pp. 149–162. doi: 10.7480/jfde.2018.3.2602.
- Milwich, M. (2010) *Types and production of textiles used for building and construction, Textiles, Polymers and Composites for Buildings*. Woodhead Publishing Limited. doi: 10.1533/9780845699994.1.13.
- Misnon, M. I. et al. (2015) 'Analyses of woven hemp fabric characteristics for composite reinforcement', *Materials and Design*, 66(PA), pp. 82–92. doi: 10.1016/j.mat-des.2014.10.037.
- Naboni, R. and Paoletti, I. (2015) 'Advanced Customization in Architectural Design and Construction', *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*, pp. i–iv. doi: 10.1007/978-3-319-04423-1.
- Nagy, Z. et al. (2016) 'The Adaptive Solar Facade: From concept to prototypes', *Frontiers of Architectural Research*. doi: 10.1016/j.foar.2016.03.002.
- Pagliaro, M., Ciriminna, R. and Palmisano, G. (2010) 'BIPV: Merging the photovoltaic with the construction industry', *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 18(1), pp. 61–72. doi: 10.1002/pip.920.
- Paoletti, I. (2017) 'Mass Customization with Additive Manufacturing: New Perspectives for Multi Performative Building Components in Architecture', *Procedia Engineering*, 180, pp. 1150–1159. doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.275.
- Pesenti, M. et al. (2015) 'Kinetic Solar Skin: A Responsive Folding Technique', *Energy Procedia*, 70, pp. 661–672. doi: 10.1016/J.EGYPRO.2015.02.174.
- Premier, A. (2016) 'SCHERMATURE E GRANDI SUPERFICI: L'INVOLUCRO TESSILE MATERIALI, TECNOLOGIE E DESIGN', *TeSS Tende e Schermature Solari*, 1, p. 36.
- Premier, A. and Brustolon, V. (2014) *Photovoltaic Awnings and Fabrics : Some Case Studies*, Tenda International.
- Reichert, S., Menges, A. and Correa Zuluaga, D. (2014) 'Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness', *Computer-Aided Design*, 60. doi: 10.1016/j.cad.2014.02.010.
- Rodonò, G. et al. (2019) 'A Novel Composite Material for Foldable Building Envelopes', *Sustainability (Switzerland)*, 11(17).
- Rossi, D., Nagy, Z. and Schlueter, A. (2012) 'Adaptive distributed robotics for environmental performance, occupant comfort and architectural expression', *International Journal of Architectural Computing*, 10(3), pp. 341–360. doi: 10.1260/1478-0771.10.3.341.
- Sadineni, S. B., Madala, S. and Boehm, R. F. (2011) 'Passive building energy savings: A review of building envelope components', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

doi: 10.1016/j.rser.2011.07.014.

Di Salvo, S. (2018) 'Kinetic Solutions for Responsive and Communicative Building Skin', *Advanced Materials Research*, 1149, pp. 86–97. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.1149.86.

Sapienza, V., Rodonò, G. and Versaci, M. (2015) 'SHELTERING, Foldable/Deflatable, Tecnologie avanzate per bisogni sociali mutevoli', *MODULO*, 394, pp. 238–243.

Shahin, H. S. M. (2019) 'Adaptive building envelopes of multistory buildings as an example of high performance building skins', *Alexandria Engineering Journal*, 58, pp. 345–352. doi: 10.1016/j.aej.2018.11.013.

Shi, X., Abel, T. and Wang, L. (2020) 'Influence of two motion types on solar transmittance and daylight performance of dynamic façades', *Solar Energy*, 201, pp. 561–580. doi: 10.1016/j.solener.2020.03.017.

Tabadkani, A. et al. (2019) 'Integrated parametric design of adaptive facades for user's visual comfort', *Automation in Construction*, 106. doi: 10.1016/j.autcon.2019.102857.

Tabadkani, A. et al. (2021) 'Design approaches and typologies of adaptive facades: A review', *Automation in Construction*, 121. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103450.

Tabadkani, A., Banihashemi, S. and Hosseini, M. R. (2018) 'Daylighting and visual comfort of oriental sun responsive skins: A parametric analysis', *Building Simulation*, 11(4), pp. 663–676. doi: 10.1007/s12273-018-0433-0.

Tablada, A. and Zhao, X. (2016) 'Sunlight availability and potential food and energy self-sufficiency in tropical generic residential districts'. *Solar Energy*, 139, pp. 757–769, ISSN 0038-092X, doi: 10.1016/j.solener.2016.10.041.

Zirbel, S. A. et al. (2013) 'Accommodating Thickness in Origami-Based Deployable Arrays 1', *Journal of Mechanical Design*, 135(11), p. 111005. doi: 10.1115/1.4025372.

TESI

Attardo, I. (2020) *SLICE SOLAR LIGHTWEIGHT INTELLIGENT COMPONENT FOR ENVELOPES*. Tesi di Laurea in Ingegneria Edile Architettura, A.A. 2018/19. Università di Catania.

Cristaldi, G. (2011) *Sviluppo di materiali compositi rinforzati con fibre naturali per l'ingegneria civile*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Materiali e innovazione tecnologica per l'ingegneria e l'architettura - XXIV Ciclo. Università di Catania.

D'Amico, N. (2020) *STUDIO DI COMPONENTI INNOVATIVI PER ARCHITETTURE TESSILI AD ATTUAZIONE INTEGRATA*. Tesi di Laurea in Ingegneria Edile Architettura, A.A. 2018/19. Università di Catania.

Mohd., M. F. A. (2017) *Intelligent Building Facade*, *Anas Contemporary Technologies Intelligent Building Facades*. Available at: <https://pt.slideshare.net/hamzaaaaaah/intelligent-building-facades-71334931/14>.

Risiglione, S. (2021) *Prototipazione di componenti fotovoltaici su supporto flessibile per micro-architetture sostenibili*. Tesi di Laurea in Ingegneria Edile Architettura, A.A. 2019/20. Università di Catania.

Rodonò, G. (2018) *KREO - Kinetic, Responsive Envelop by Origami* Tesi di Dottorato di Ricerca in "Valutazione e mitigazione dei rischi urbani e territoriali" XXX Ciclo. Catania: Università di Catania - Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura - DICAR.

Skavara, M. M. E. (2009) Learning Emergence Adaptive Cellular Automata Façade Trained By Artificial Neural Networks. Graduation work at the MSc Adaptive Architecture & Computation. London: Bartlett, UCL. Available at: <http://eprints.ucl.ac.uk/19042/>.

REPORT

Attia, S. (2019) Adaptive Facades performance assessment Interviews with Facade Experts. doi: 10.13140/RG.2.2.15828.35202.

Sung, D. (2011) 'Prototyping a Self-Ventilating Skin with Smart Thermobimetal', Report of University Research, 5(pending). Available at: <https://www.brikbase.org/sites/default/files/aiab092636.pdf>.

Zanelli, A. (2011) 'IL FOTOVOLTAICO APPLICATO ALLE MEMBRANE : SVILUPPI E PROSPETTIVE', ARCHITETTURA TESSILE, pp. 30–36.

COMUNICAZIONI A CONVEGNI

Aydın, M. and Yaman, H. (2017) 'An Analysis of Dynamic Live Connection Workflow between Building Information Modeling and Algorithmic Design with Grasshopper® & ArchiCAD® Software', in 3rd International Conference of Biodigital Architecture Genetics. Barcelona (Spain)

Curletto, G. (2016) Rigid foldable Origami structures: parametric modelling with Grasshopper. Geometric and structural issues, in Architecture in-play. Lisbon (Portugal)

Loonen, R. et al. (2015) 'Design for façade adaptability – Towards a unified and systematic characterization', in 10th Conference on Advanced Building Skins. Bern, Switzerland: Economic Forum, pp. 1284–1294.

Mozer, M. (1998) 'The Neural Network House: An Environment that Adapts to its Inhabitants', in Proceedings of the American Association for Artificial Intelligence Spring Symposium on Intelligent Environments. Menlo Park, CA: AAAI Press, pp. 110–114. Available at: <http://www.aaai.org/Papers/Symposia/Spring/1998/SS-98-02/SS98-02-017.pdf>.

Novelli, N., Shultz, J. and Dyson, A. (2015) 'Development of a modeling strategy for adaptive multifunctional solar energy building envelope systems', in SimAUD '15: Proceedings of the Symposium on Simulation for Architecture & Urban Design. Alexandria, Virginia: Society for Computer Simulation International (SCS), pp. 35–42.

Orhon, A. (2016) 'A Review on Adaptive Photovoltaic Facades', in Aralık (ed.) Solar TR2016 International Solar Conference & Exhibition. Instabul, pp. 463–470.

Orhon, A. V. (2016) 'Integration of Photovoltaics into Tensile and Inflatable Structures', Solar Conference & Exhibition, Turkey, (September), pp. 454–462.

Schenk, M. and Guest, S. D. (2013) 'Geometry of Miura-folded metamaterials', Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 110(9), pp. 3276–3281. doi: 10.1073/pnas.1217998110.

Schleicher, S. et al. (2011) Adaptive façade shading systems inspired by natural elastic kinematics. International Adaptive Architecture Conference, The Building Centre London, ISBN 978-0-901919-15-1.

Velasco, R., Brakke, A. and Tocancipà, F. (2013) 'Notes on the development of a parametric design process for a brise soleil system', 1ST eCAADe Regional International Workshop. Available at:

http://cumincad.architexturez.net/system/files/pdf/ecaade2013r_012.content_0.pdf.

Velikov, K. and Geoffrey, T. (2012) 'Responsive Building Envelopes: Characteristics and Evolving Paradigms', in *Design and Construction of High Performance Homes*. London: Routledge Press, pp. 75–92.

Wigginton, M. and Harris, J. (2013) *Intelligent Skins*. Edited by Butterworth–Heinemann. Oxford: Butterworth–Heinemann. doi: 10.4324/9780080495446.

Yekutieli, T. P. and Grobman, J. (2014) 'Controlling Kinetic Cladding Components In Building Facades – A Case For Autonomous Movement, Rethinking Comprehensive Design: Speculative Counterculture', *Proceedings of the 19th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2014)*, Kyoto (Japan)

LIBRI

Banzi, M. and Shiloh, M. (2014) *Make: Getting started with gpu programming*. 3rd Editio, *Computing in Science and Engineering*. 3rd Editio. Edited by B. Jepson. Sebastopol, CA: Maker Media. doi: 10.1109/MCSE.2009.119.

Drew, P. (1976) *Frei Otto: form and structure*. London: Crosby Lockwood Staples.

Fox, M. and Kemp, M. (2016) *Interactive Architecture : Adaptive World*. New York: PRINCETON ARCHITECTURAL PRESS.

Kuipers, N. and Engineerg, A. (2015) *From Static To Kinetic. The potential of kinetic façades in care hotels*. aE-Intecture–studio 14

Mandolesi, E. (1978) *Edilizia Vol. o*. Torino: Utet.

Moloney, J. (2011) *Designing Kinetics for Architectural Facades: State Change*. Oxon: Routledge.

Musacchio, A. (2009) *Architetture cinetiche. Apparati meccanici ed elettronici nel progetto di architettura*. Politecnico. Maggioli Editore.

Nicholas, N. (1976) *Soft Architecture Machines*. MIT Press.

Raji, M. et al. (2019) '5 - Durability of composite materials during hydrothermal and environmental aging', in *Jawaid, M., Thariq, M., and Saba Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, N. B. T.-D. and L. P. in B. (eds) *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*. Woodhead Publishing, pp. 83–119. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102290-0.00005-2>.

Di Salvo, S. (2020) 'New Technologies for Adaptive Architecture', in *Urban and Transit Planning*, pp. 457–465. doi: 10.1007/978-3-030-17308-1_41.

Sick, F. and Erge, T. (1996) *Photovoltaics in buildings - a design handbook for architects and engineers*. I. Edited by F. Sick and T. Erge. James & James.

SITI WEB

Prevalent (2018) Solgami. Available at: www.solgami.com.

PV GIS - PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (no date). Available at: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/it/#PVP.

NORME

UNI EN ISO 527-1:2012. *Materie plastiche - Determinazione delle proprietà a trazione - Parte 1: Principi generali*.

UNI EN ISO 527-4:1999. Materie plastiche - Determinazione delle caratteristiche a trazione - Condizioni di prova per i compositi plastici rinforzati con fibre, isotropi ed ortotropi.

DOMANDA DI BREVETTO

Vincenzo SAPIENZA, Gianluca RODONÒ, Angelo MONTELEONE, Fabio GIUSA, DISPOSITIVO CINETICO PER L'ARCHITETTURA, DOMANDA N. 102019000025819 del 31/12/2019, Università di Catania – Meridionale Impianti SpA.

INDICE DELLE FIGURE

1. INTRODUZIONE

Fig. 1.1. Funzioni dell'involucro architettonico (Mohd., 2017) - pag. 13

Fig. 1.2. Jean Nouvel. Institut du Monde Arabe. Paris (www.archdaily.com) - pag. 15

Fig.1.3. Stadtwerke. Aachen (Sick and Erge, 1996) - pag. 16

Fig. 1.4. Programma di ricerca (autore) - pag. 18

2. STATO DELL'ARTE

Fig. 2.1. Esempi di facciate adattive (Shi, Abel and Wang, 2020) - pag. 24

Fig. 2.2. Concept di configurazione cinematica per la piegatura su linee curve di un quadrato attraverso la suddivisione della superficie in due porzioni distinte: un centro a forma di lente e due lobi simmetrici con un bordo a forma di falce (Schleicher et al., 2011) - pag. 25

Fig. 2.3. Wooden solar trackers. ETH House of Natural Resources - Zurich (A. Orhon, 2016) - pag. 26

Fig. 2.4. Media-ICT building, Barcelona. (Shahin, 2019) - pag. 28

Fig. 2.5. Hygro-Skin Pavilion, Parigi. (Reichert, Menges and Correa Zuluaga, 2014) - pag. 28

Fig. 2.6. Aldar Central Market, Abu Dhabi (Velasco, Brakke and Chavarro, 2015) - pag. 29

Fig. 2.7. Cinematismo delle lamelle della facciata Thematic Pavilion EXPO 2012 (Velasco, Brakke and Chavarro, 2015) - pag. 30

Fig. 2.8. Al Bahar Towers, Abu Dhabi (Shahin, 2019) - pag. 31

Fig. 2.9. Adaptive Cellular Automata Facade. (Skavara, 2009) - pag. 32

Fig. 2.10. Riverhouse, New York (A. Orhon, 2016) - pag. 33

Fig. 2.11. Seine Musicale, Parigi (Di Salvo, 2020) - pag. 33

Fig. 2.12. Kiefer Technic Showroom, Bad Gleichenberg (Fouad, 2012) - pag. 33

Fig. 2.13. Soft House, Amburgo (Kuipers and Engineerg, 2015) - pag. 34

Fig. 2.14. Smart Thermobimetal Self- Ventilating Skin. Deformazioni dei fogli laminati all'aumentare della temperatura, con espansioni differenti (Velikov and Geoffrey, 2012) - pag. 35

Fig. 2.15. Spaceshift Electroactive Polymer Façade. Deformazioni dei pannelli caricati elettricamente (Velikov and Geoffrey, 2012) - pag. 35

Fig. 2.16. Technische Universität Darmstadt's TU Darmstadt's 2007 Solar Decathlon House (Velikov and Geoffrey, 2012) -pag. 39

Fig. 2.17. Adaptive Solar Skin (A. Orhon, 2016) - pag. 39

Fig. 2.18. ASF Adaptive Solar Façade. Modulo singolo (a sinistra) - Moduli su una facciata di un edificio, montati in cornici su una struttura di rete di cavi all'interno dello strato ombreggiante della facciata (a destra) (Nagy et al., 2016) - pag. 40

Fig. 2.19. ASF – Adaptive Solar Façade. Fotomontaggio per simulazione di un intervento di retrofit sull'edificio HIL dell'ETH di Zurigo. In alto a sinistra: fotografia dell'edificio. In alto a destra: fotomontaggio dell'edificio con l'ASF. In basso a sinistra: vista ravvicinata. In basso a destra: vista dall'interno (Nagy et al., 2016) - pag. 40

Fig. 2.20. Integrated Concentrating Solar Facade (ICSF) (A. Orhon, 2016) - pag. 41

Fig. 2.21. Adaptive BIPV Facade (Mazzucchelli et al., 2018) - pag. 41

3. CONOSCENZE PROPEDEUTICHE

Fig. 3.1. Struttura base di un materiale composito - pag. 45

Fig. 3.2. Categorie di materiali compositi - pag. 46

Fig. 3.3. Struttura di compositi rinforzati con particelle (a sinistra), compositi fibro-rinforzati (al centro) e compositi strutturati (a destra) - pag. 46

Fig. 3.4. Distribuzione delle fibre in compositi fibrosi. Fibre fibre continue (a sinistra), discontinue (al centro) o disperse in modo casuale (a destra) - pag. 46

Fig. 3.5. (a) Sezione di una cella fotovoltaica in silicio – (b) Schema di una cella fotovoltaica in silicio (Sick and Erge, 1996) - pag. 48

Fig. 3.6. Under the Sun Pavilion. Cooper-Hewitt National Design Museum, New York (1998) (A. V. Orhon, 2016) - pag. 52

Fig. 3.7. Ackermann & Partner Architects. AWM Carport. Monaco (Zanelli, 2011) - pag. 52

Fig. 3.8. Solgami prototype (www.solgami.com) - pag. 53

Fig. 3.9. NASA. B-roll Solar Array Origami (nasa.gov) - pag. 54

Fig. 3.10. NASA. B-roll Solar Array Origami (nasa.gov) - pag. 54

Fig. 3.11. Un foglio Miura-Ori piegato è costituito da tassellazioni di una cella unitaria. La geometria della cella unitaria può essere descritta utilizzando i parametri che definiscono una sfaccettatura del parallelogramma, a , b , γ e l'angolo di piega $\theta \in [0, \pi/2]$ (Schenk and Guest, 2013) - pag. 56

Fig. 3.12. Stampa 3D di uno dei supporti del Prototipo SLICE 1.0 - pag. 57

Fig. 3.13. Scheda Arduino UNO V3 (autore)- pag. 59

Fig. 3.14. Ambiente di sviluppo Arduino IDE (autore) - pag. 59

4. METODI E STRUMENTI

Fig. 4.1. Campioni di Biotex Flax 400 g/m² 2x2 Twill e di SEBS prima della laminazione (autore) - pag. 63

Fig. 4.2. Laminatore PANAMAC S.r.l. SL-DM 231 (autore) - pag. 67

Fig. 4.3. Macchina di Trazione monoassiale INSTRON 5980 Series - 5982 - pag. 68

Fig. 4.4. Cella fotovoltaica in silicio monocristallino (a sinistra) – Cella fotovoltaica in silicio policristallino (a destra) - pag. 69

Fig. 4.5. Prove in camera climatica (autore) - pag. 70

Fig. 4.6. Disegno per la pre-piegatura del composito a piega singola (autore) - pag. 72

Fig. 4.7. Dettagli costruttivi dello stampo per la termoformatura singola (autore) - pag. 72

Fig. 4.8. Esploso assonometrico dello stampo per la termoformatura singola (autore) - pag. 72

Fig. 4.9. A sinistra, stampo in lamiera per i campioni di dimensioni 20x40 cm durante le prove di termoformatura. A destra, risultato della piega ottenuta su un campione di composito (autore) - pag. 72

Fig. 4.10. Disegno per la pre-piegatura del composito a piega multipla (autore)- pag. 73

Fig. 4.11. Le piastre di differente spessore del conformatore (autore) - pag. 73

Fig. 4.12. Caratteristiche geometriche e dimensionali delle piastre costituenti il conformatore (autore) - pag. 73

Fig. 4.13. Fasi di preparazione del conformatore delle piastre costituenti lo stampo (autore) - pag. 73

Fig. 4.14. Vista assonometrica del conformatore (autore) - pag. 74

Fig. 4.15. Preparazione dei componenti del Prototipo SLICE 1.0 prima dell'assemblaggio (autore) - pag. 74

Fig. 4.16. Modello 3D del Prototipo SLICE 1.0. - pag. 75

Fig. 4.17. Alcune parti del Prototipo SLICE 1.0. (autore) - pag. 76

Fig. 4.18. Collegamento del campione al circuito di ricarica e test di funzionamento in condizioni outdoor (autore) - pag. 76

Fig. 4.19. Diagramma a blocchi del circuito della scheda di ricarica - pag. 77

Fig. 4.20. Schema elettrico del funzionamento dei relè - pag. 77

Fig. 4.21. Scheda Relè Elegoo IT-EL-SM-0064 Channel DC 5V - pag. 77

Fig. 4.22. A sinistra, preparazione del telaio in legno. In alt a destra, un dettaglio dei nuovi supporti per cuscinetti in plexiglass. In basso a destra, le nuove guide a scorrimento laterali con ganci a

forchetta in plexiglass - pag. 78

Fig. 4.23. Esploso assonometrico del pannello SLICE4ICARO - pag. 79

Fig. 4.24. Sistema di ricarica e componentistica per il monitoraggio dei dati dei test SLICE4ICARO - pag. 79

Fig. 4.25. Assonometria del padiglione ICARO - pag. 80

Fig. 4.26. Esploso assonometrico del modulo ZERO - pag. 80

Fig. 4.27. Masterplan Megara Hyblaea. etria del padiglione ICARO - pag. 81

Fig. 4.28. Vista Satellitare di Bucarest e localizzazione dei casi studio. Piscina del Campus Universitario (a sinistra) e Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" (a destra) - pag. 82

Fig. 4.29. Edificio Piscina del Campus Universitario - Vista sud-ovest - pag. 83

Fig. 4.30. Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" di Bucarest, prospetto su Strada Edgar Quinet - pag. 84

Fig. 4.31. Esempio del workflow Rhinoceros - Grasshopper e Archicad - pag. 85

5. DESCRIZIONE E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Fig. 5.1. Ipotesi di collegamento elettrico delle celle nel pannello - pag. 91

Fig. 5.2. A sinistra SLICE 1.0.1 – A destra SLICE 1.0.2 - pag. 93

Fig. 5.3. A sinistra SLICE 1.0.3 – A destra SLICE 1.0.4 - pag. 93

Fig. 5.4. A sinistra SLICE 1.0.5 – A destra SLICE 1.0.6 - pag. 93

Fig. 5.5. Stratigrafia SLICE 1.0.5 - pag. 93

Fig. 5.6. Pannello SLICE 1.0.5 - pag. 93

Fig. 5.7. Schema di collegamento del pannello SLICE 2.0.1 - pag. 94

Fig. 5.8. Preparazione e processo di laminazione del pannello SLICE 2.0.1 - pag. 95

Fig. 5.9. Il pannello SLICE 2.0.1 al termine del processo di laminazione - pag. 96

Fig. 5.10. Fasi della prova a trazione monoassiale - pag. 97

Fig. 5.11. Geometria dei campioni da sottoporre a test di trazione secondo la norma UNI EN ISO 527-4 - pag. 98

Fig. 5.12. Preparazione dei campioni per i test in camera climatica - pag. 99

Fig. 5.13. Lo strato superficiale del tessuto risulta degradato dal contatto diretto con le pareti dello stampo - pag. 102

Fig. 5.14. Il conformatore assemblato e prima della termoformatura - pag. 103

- Fig. 5.15. Pannello Slice 2.0.1 dopo il processo di piegatura per termoformatura con conformatore - pag. 104
- Fig. 5.16. Diagramma di flusso per la codifica del programma del prototipo SLICE 1.0 - pag. 105
- Fig. 5.17. Circuito del sistema di controllo del prototipo SLICE 1.0 - pag. 105
- Fig. 5.18. Prototipo SLICE 1.0 - pag. 105
- Fig. 5.19. Test di apertura e chiusura sul prototipo SLICE 1.0 - pag. 106
- Fig. 5.20. Rappresentazione del tessuto piegato nelle configurazioni disteso e raccolto - pag. 107
- Fig. 5.21. Test di funzionamento del prototipo SLICE 2.0 - pag. 108
- Fig. 5.22. Circuito del sistema del controllo del prototipo SLICE 2.0 - pag. 108
- Fig. 5.23. Management adaptive procedure of SLICE 2.0 - pag. 113
- Fig. 5.24. Codice sorgente per la gestione del prototipo SLICE 2.0 - pagg. 114-118
- Fig. 5.25. Installazione del prototipo SLICE 2.0 sull'infisso per test in condizioni ambientali - pag. 119
- Fig. 5.26. Profilo di illuminamento giornaliero della facciata sud su piano inclinato di 90° - PVGIS - pag. 119
- Fig. 5.27. Test effettuati su SLICE 2.0 – Stanza Ovest. (a) valori di illuminamento – (b) valori di tensione delle celle - pag. 120
- Fig. 5.28. Test effettuati su SLICE 2.0 – Stanza Sud (a) valori di illuminamento – (b) valori di tensione delle celle - pag. 120
- Fig. 5.29. Corrente elettrica generata da SLICE 2.0 (a) valori Stanza Ovest – (b) valori Stanza Sud - pag. 122
- Fig. 5.30. Campione SLICE4ICARO al termine della laminazione - pag. 123
- Fig. 5.31. Schema elettrico unifilare SLICE4ICARO - pag. 124
- Fig. 5.32. Posizionamento dei pannelli SLICE4ICARO in orizzontale - pag. 125
- Fig. 5.33. Posizionamento dei pannelli SLICE4ICARO in verticale - pag. 125
- Fig. 5.34. Confronto tra la produzione oraria prevista (blu) e quella effettiva (arancione) nel caso di pannelli disposti in orizzontale - pagg. 126-127
- Fig. 5.35. Confronto tra la produzione oraria prevista (blu) e quella effettiva (arancione) nel caso di pannelli disposti in verticale - pagg. 128-129
- Fig. 5.36. Confronto tra la produzione totale effettiva giornaliera (arancione) e la produzione totale prevista (blu) dell'impianto, con differenza della produzione percentuale (rosso) - pagg. 130-131
- Fig. 5.37. Confronto tra la produzione effettiva (arancione) e la produzione prevista (blu) nell'arco

di 4 ore in cui non risultavano ombreggiamenti, con differenza della produzione percentuale (rosso) - pagg. 132-133

Fig. 5.38. Dettagli degli infissi - Edificio piscina Campus Universitario - pag. 134

Fig. 5.39. Edificio Piscina del Campus Universitario - Tavola di progetto - pag. 136

Fig. 5.40. Edificio Piscina del Campus Universitario - Tavola di progetto - pag. 137

Fig. 5.41. Algoritmo per la costruzione della piega semplice - pagg. 138-139

Fig. 5.42. Simulazione piega semplice sulla facciata sud - Edificio piscina Campus Universitario - pagg. 140-141

Fig. 5.43. Simulazione piega semplice sulle finestre dei prospetti est ed ovest - Edificio piscina Campus Universitario - pagg. 140-141

Fig. 5.44. Render della soluzione proposta - Edificio piscina Campus Universitario - pag. 142

Fig. 5.45. DCettagli degli infissi - Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" - pag. 143

Fig. 5.46. Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" - Prospetto sud - pagg. 144-145

Fig. 5.47. Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" - Pianta piano terra - pagg. 144-145

Fig. 5.48. Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" - Pianta piano primo - pagg. 144-145

Fig. 5.49. Costruzione geometrica MiuraOri - pag. 146

Fig. 5.50. Render della soluzione proposta - Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" - pag. 147

Fig. 5.51. Algoritmo per la costruzione del MiuraOri pattern - pag. 148-149

Fig. 5.52. Simulazione MiuraOri facciata sud studi e aule - Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" - pagg. 150-151

Fig. 5.53. Simulazione MiuraOri facciata sud studi e aule - Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" - pagg. 150-151

Fig. 5.54. Simulazione piega semplice sulle pensiline piano terra e sulle finestre del corpo scala - Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" - pagg. 152-153

Fig. 5.55. Disegni tecnici allegati alla domanda di brevetto (SAPIENZA et al., 2019) - pag. 153

INDICE DELLE TABELLE

2. STATO DELL'ARTE

Tab. 2.1. Quadro riassuntivo delle caratteristiche delle principali tipologie di facciate adattive (Tabadkani et al., 2021) - pag. 36

4. METODI E STRUMENTI

Tab. 4.1. Datasheet Biotex Flax 400 g/m² 2x2 Twill - pag. 64

Tab. 4.2. Specifiche delle proprietà tipiche dei prodotti in fogli EVA prodotti da SKC. In evidenza le proprietà del prodotto utilizzato per la sperimentazione sui campioni - pag. 65

Tab. 4.3. Datasheet DUN-SOLAR™ PPE 1360 - pag. 66

Tab. 4.4. Scheda tecnica del laminatore PANAMAC S.r.l. SL-DM 231 Laminatore progettato per laminare n. 1 modulo, i moduli fotovoltaici laminati con SL-DM231 rispettano le normative IEC 61215 – IEC 61646 – IEC 61730 - pag. 67

Tab. 4.5. Schede tecniche delle celle utilizzate. Valori in condizioni standard (STC): Irradiazione solare 1000 W/m² con spettro AM 1,5 ad una temperatura cella di 25 °C - pag. 69

5. DESCRIZIONE E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Tab. 5.1. Stratigrafia campioni realizzati - pag. 92

Tab. 5.2. Risultati delle prove a trazione monoassiale - pag. 98

Tab. 5.3. Risultati delle prove in camera climatica - pag. 100

Tab. 5.4. Grafico di confronto del decadimento della tensione dei pannelli -pag. 101

Tab. 5.5. Scheda tecnica prototipo SLICE 1.0 - pag. 106

Tab. 5.6. Scheda tecnica prototipo SLICE 2.0 - pag. 109

Tab. 5.7. SLICE 2.0 – Modalità operative del Sistema adattivo di SLICE 2.0 - pag. 110

Tab. 5.9. Parametri sistemi di schermatura - Edificio piscina Campus Universitario - pag. 135

Tab. 5.10. Parametri sistemi di schermatura pattern MiuraOri - Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" - pag. 147

Tab. 5.11. Parametri sistemi di schermatura pattern soffietto semplice - Università di Architettura e Urbanistica UAUIM "Ion Mincu" - pag. 147

