



Università degli Studi di Catania
Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura

Corso di Dottorato di Ricerca
VALUTAZIONE E MITIGAZIONE DEI RISCHI
URBANI E TERRITORIALI
XXXIII Ciclo

**RAW MATERIAL COME POSSIBILE INTERVENTO DI
MITIGAZIONE DEL RISCHIO CLIMATICO: INVOLUCRO IN LEGNO
COIBENTATO CON SCARTI PROVENIENTI DELLA FILIERA
OLIVICOLA-OLEAREA**

GIUSEPPE RUSSO

Responsabile: Prof. Santi Maria Cascone

Gruppo tesi: Prof. Gaetano Sciuto

Prof. Antonio Gagliano

Catania, 2021

INDICE

ABSTRACT.....	1
1. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Introduzione	1
1.1.1. Quali sono gli impatti osservati?.....	3
1.1.2. Le simulazioni e gli scenari futuri.....	5
1.1.3. I principali indicatori per quantificare l'impatto ambientale.....	9
1.2. Gli impegni internazionali per contrastare il cambiamento climatico	12
1.2.1. La normativa comunitaria.....	14
1.2.2. Le principali strategie risolutive: mitigazione e di adattamento.....	15
1.2.3. L'economia circolare: come principale strategia di mitigazione dei cambiamenti climatici.....	18
1.3. L'impatto dei cambiamenti climatici sul sistema urbano	20
1.3.1. Le cause del fenomeno isola di calore urbano.....	20
1.3.2. I fattori controllabili che influenzano l'UHI.....	24
1.3.3. Le strategie di mitigazione del fenomeno urbano.....	26
2. IL RUOLO DELL'INVOLUCRO NELLA QUESTIONE ENERGETICO-AMBIENTALE.....	30
2.1. L'importanza del settore edile nel cambiamento climatico	30
2.1.1. L'impatto del settore edile.....	30
2.1.2. Le esigenze di rinnovamento.....	33
2.1.3. L'involucro edilizio.....	36
2.2. Le prestazioni energetiche ed ambientali degli edifici	37
2.2.1. Evoluzione legislativa e normativa.....	37
2.2.2. Le certificazioni ambientali per gli edifici italiani.....	39
2.2.3. Prestazioni energetiche di un edificio.....	40
2.2.4. Comfort abitativo di un edificio.....	44
2.2.5. Analisi del ciclo di vita LCA.....	48
2.2.6. I CAM in edilizia.....	53
2.2.7. I protocolli di sostenibilità energetico-ambientale.....	60
3. I MATERIALI ISOLANTI BIO-BASED.....	63
3.1. Introduzione	63
3.2. Le diverse tipologie di materiali isolanti	66
3.2.1. Breve panoramica delle tipologie di materiali isolanti.....	66
3.2.2. I materiali isolanti air-based.....	67
3.2.3. Gli isolanti di origine sintetica.....	68
3.2.4. I materiali organici vegetali.....	69

3.3.	I materiali isolanti di origine naturale	72
3.3.1.	<i>Le fibre di canapa</i>	72
3.3.2.	<i>Canne</i>	73
3.3.3.	<i>La Posidonia oceanica</i>	74
3.3.4.	<i>Il sughero</i>	75
3.3.5.	<i>La lana di legno (Wood Wool Cement Board - WWCB)</i>	76
3.3.6.	<i>La fibra di legno (Fiberboard F)</i>	77
3.3.7.	<i>I pannelli truciolari (Particleboard P)</i>	78
3.3.8.	<i>La paglia (Straw Bales SB)</i>	78
3.3.9.	<i>Il cotone</i>	79
3.4.	I materiali provenienti dal settore agricolo	80
3.4.1.	<i>La cellulosa (guardare bene dove posizionarlo)</i>	80
3.4.2.	<i>Durian</i>	81
3.4.3.	<i>Fibre di cocco</i>	81
3.4.4.	<i>Fique</i>	82
3.4.5.	<i>Girasoli</i>	83
3.4.6.	<i>Riso</i>	83
3.4.7.	<i>Bagassa</i>	84
3.4.8.	<i>Typha</i>	85
3.4.9.	<i>Dattero</i>	86
3.4.10.	<i>Ananas</i>	86
3.4.11.	<i>Bambù</i>	87
3.4.12.	<i>Pannocchia di mais</i>	88
3.4.13.	<i>Banana</i>	88
3.4.14.	<i>Lino</i>	89
3.4.15.	<i>Kenaf</i>	90
3.4.16.	<i>Lana di pecora</i>	90
4.	IL SETTORE OLIVICOLO	91
4.1.	Introduzione	91
4.2.	Il ciclo produttivo dell'olio di oliva	93
4.2.1.	<i>Estrazione a con ciclo discontinuo a pressione</i>	93
4.2.2.	<i>Estrazione a con ciclo continuo per centrifugazione</i>	94
4.2.3.	<i>Gli scarti del processo lavorativo della produzione delle olive</i>	95
4.2.4.	<i>Le attuali soluzioni di riutilizzo degli scarti della lavorazione dell'ulivo</i>	98
5.	METOLOGIA E METODI	102
5.1.	Metologia di ricerca	102
5.2.	Caratterizzazione dei materiali utilizzati	103
5.2.1.	<i>I materiali utilizzati</i>	103
5.2.2.	<i>Determinazione curva granulometrica</i>	103
5.2.3.	<i>Determinazione della densità reale e apparente</i>	107
5.3.	la Caratterizzazione dei campioni di studio	111

5.3.1.	Realizzazione dei provini	111
5.3.2.	Determinazione della massa volumica apparente	115
5.3.3.	Determinazione del contenuto di umidità	116
5.3.4.	Determinazione della conducibilità e della resistenza termica con il metodo della piastra calda	117
5.3.5.	Determinazione della permeabilità al vapore acqueo e fattore di resistenza alla diffusione del vapore	124
5.3.6.	Confronto con altri materiali isolanti di origine naturale.	126
5.4.	Caso studio	129
5.4.1.	Calcolo orario delle prestazioni energetiche UNI EN ISO 52016.....	130
5.4.2.	Calcolo del comfort adattivo.....	136
5.4.3.	Studio dell'LCA dei materiali	136
6.	CONCLUSIONI.....	149
6.1.	I principali risultati della ricerca	149
6.2.	Prospettive e sviluppi futuri della ricerca	151
	BIBLIOGRAFIA.....	153
	ALLEGATO 1 – ELEMENTI OPACHI.....	168
	ALLEGATO 2 – ELEMENTI TRASPARENTI.....	171

ABSTRACT

La crescente consapevolezza della pericolosità degli impatti connessi al cambiamento climatico ha spinto il settore delle costruzioni verso l'utilizzo di soluzioni sostenibili in grado di coniugare il miglioramento delle prestazioni ambientali e energetiche.

L'involucro edile è un elemento centrale nello scambio termico tra ambiente esterno ed interno e, pertanto, su di esso sono stati condotti diversi studi inerenti alle strategie possibili per soddisfare il nuovo quadro esigenziale.

Lo sviluppo dei materiali isolanti naturali *bio-based* può essere inquadrato in tale contesto evolutivo delle prestazioni energetiche degli edifici. Diversi studi hanno affermato che l'utilizzo di fibre naturali all'interno di materiali compositi, se confrontati con i materiali isolanti sintetici, comporta una significativa riduzione dell'impatto ambientale in fase di produzione. Un aspetto fondamentale nella preparazione di nuovi materiali compositi è la scelta del legante, che, in molti casi, può ridurre notevolmente la sostenibilità del prodotto introducendo elementi sintetici e plastici.

In questa ricerca è stato investigata il possibile riutilizzo di alcuni degli scarti provenienti dal settore olivicolo al fine di ottenere un pannello isolante composito *bio-based*.

Nel primo capitolo della ricerca sono state analizzate le principali cause e gli effetti del cambiamento climatico globale. In questa fase vengono proposti, sulla base dei rapporti dell'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), i principali scenari attesi nei prossimi decenni e le ripercussioni che tale cambiamento ha sull'ambiente costruito.

Nel secondo capitolo è stato discusso il ruolo che l'involucro edilizio ricopre alla luce delle nuove necessità energetico-ambientali. In questa fase della ricerca si pone l'attenzione sugli aspetti normativi che oggi regolano le prestazioni termiche e ambientale degli involucri edili.

Nel terzo capitolo è stato proposto uno studio dei materiali isolanti oggi presenti sul mercato e un'analisi dello stato dell'arte dei principali materiali naturali di origine naturale o derivanti dagli scarti del settore agroalimentare.

Nel quarto capitolo sono stati indagati i principali processi lavorativi delle olive al fine di individuare e quantificare gli scarti in uscita.

Nel quinto capitolo vengono quantificate le prestazioni energetiche e ambientali di un caso studio. I materiali individuati. Dopo aver proposto diversi materiali isolanti utilizzando il granulato di sughero come legante naturale e differenti percentuali in peso di sansa di oliva e nocciolino, è stato testato sperimentalmente le loro prestazioni isolanti. Le performance energetico ambientali sono state simulate introducendo tali materiali all'interno di un sistema ETICS (*External Thermal Insulation Construction System*) determinando per ciascuno di essi il consumo energetico annuale mediante il calcolo dinamico orari ai sensi della UNI EN ISO 152016. Le prestazioni ambientali dei materiali sono state quantificate sia mediante il calcolo dell'energia risparmiata in fase di esercizio che in termini di emissioni in fase di preparazione del pannello isolante.

Infine nell'ultimo capitolo sono state presentate la conclusione del presente lavoro di ricerca e i possibili spunti di ricerca futuri.

«I cambiamenti climatici costituiscono la maggior sfida umana del XXI secolo. Le sue cause sono profondamente radicate nel modo in cui produciamo e utilizziamo l'energia, produciamo cibo, gestiamo i territori e consumiamo più di quello che abbiamo bisogno. I suoi effetti hanno il potenziale di influenzare tutte le regioni della Terra, ogni ecosistema e molti aspetti delle attività umane. Le sue soluzioni richiedono un impegno coraggioso per il nostro futuro comune»

Dichiarazione finale CFCC15 (Our Common Future Under Climate Change)

1. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

1.1. INTRODUZIONE

Alla luce del rapporto Meadows intitolato *The limits to growth* pubblicato nel 1972 oggi è ormai evidente che l'evoluzione delle società moderne ha determinato un impoverimento delle risorse naturali causando un grave inquinamento ambientale che ha avuto come principale conseguenza il peggioramento degli equilibri del sistema climatico.

Le numerosissime emergenze climatiche registrate negli ultimi anni sono da attribuire all'aumento della temperatura media globale (GMTS)^[1], denominato dalla comunità scientifica come surriscaldamento globale, principalmente dovuto all'effetto serra o *greenhouse effect*.

Alcuni gas atmosferici noti come gas serra (GHG) tra cui l'anidride carbonica (CO₂), il metano (CH₄), il protossido di azoto (NO₂), il biossido di zolfo (SO₂), e l'ozono (O₃), hanno la proprietà di trattenere nel sistema una quota parte dell'energia termica solare emessa dalla superficie terrestre, sotto forma di raggi infrarossi (IF), provocando il riscaldamento atmosferico e la conseguente alterazione dei complessi fattori che regolano il clima terrestre.

La presenza dei GHG nell'atmosfera terrestre è stata determinante per lo sviluppo della vita della terra: la loro mancanza, infatti, genererebbe un abbassamento di alcune decine di gradi della temperatura superficiale terrestre tale da rendere impossibile le condizioni vitali all'interno del pianeta. Tuttavia negli ultimi decenni stiamo assistendo ad un innaturale innalzamento della GMTS tale da permettere di distinguere l'effetto serra in due tipologie:

- effetto serra naturale ossia il fenomeno naturale che riscaldando superficie terrestre rende possibile il mantenimento delle condizioni vitali sul pianeta;
- effetto serra antropico causato dall'aumento dei GHG a seguito dall'azione antropica.

Sebbene le prime teorie sul riscaldamento globale, ad opera di Arrhenius, si fossero già sviluppate nel 1896, il problema venne sottoposto all'attenzione pubblica solo nel 1979 in occasione della prima Conferenza globale sul clima tenutasi a Ginevra ed organizzata dal *World Meteorological*

Organization (WMO). Durante la conferenza venne posta l'attenzione sull'effetto serra antropico e sui dati attestanti che l'aumento della GMTS fosse connessa alle attività antropiche [2].

I recenti rapporti sul tema dell'Istituto Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici (IPCC) hanno quantificato l'aumento della temperatura media superficiale terrestre. Il contributo antropico al riscaldamento della superficie terrestre odierno è stato osservato essere pari a 1 °C rispetto al valore di partenza registrato nel 1960 (cfr. **Figura 1**) [3].

I dati raccolti dai satelliti orbitanti attorno alla terra e i continui monitoraggi delle concentrazioni dei gas serra delle stazioni di monitoraggio dislocate nel globo (cfr. **Figura 2**), hanno permesso agli scienziati di poter raccogliere differenti tipologie di informazioni che collegano l'aumento dei livelli di gas serra come la causa principale del riscaldamento terrestre.

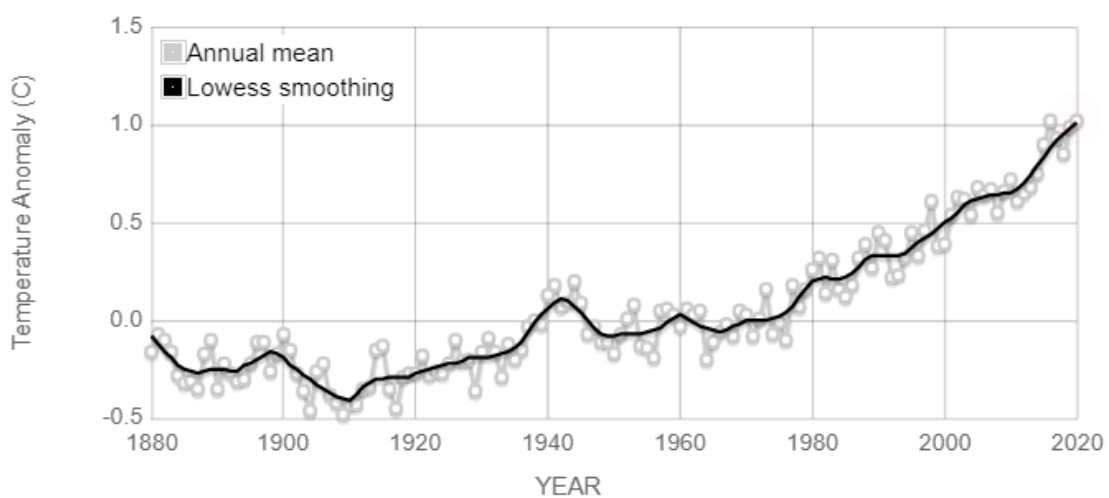


Figura 1 - Misurazione storica della temperatura superficiale globale dal 1880 (Fonte NASA / GISS <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>)

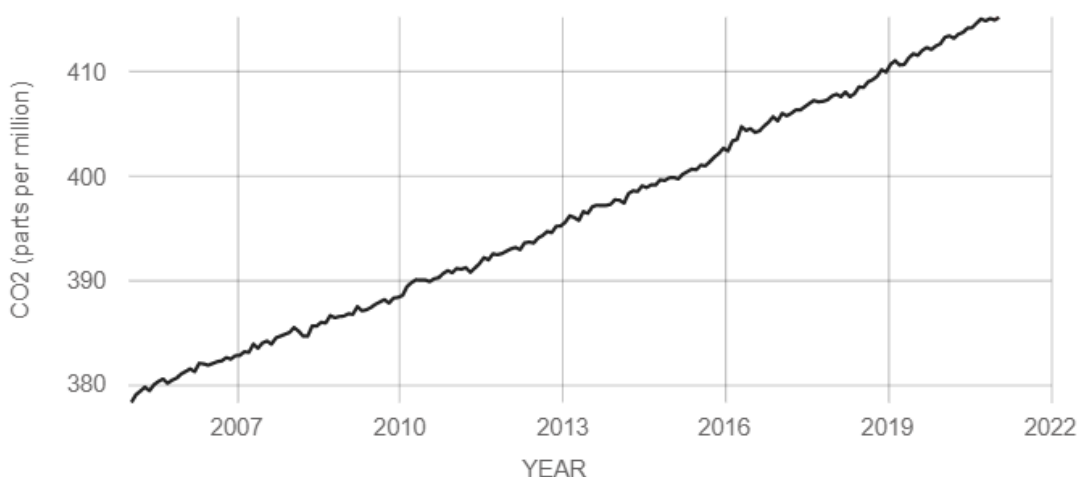


Figura 2 - Misurazione storica del diossido di carbonio (CO₂) dal 2005. (Fonte NOAA - <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>)

Dal confronto tra la serie storica dei dati relativi alle temperature (**Figura 1**) e alle concentrazioni di diossido di carbonio (**Figura 2**) di nota un trend di crescita concorde che confermano le tesi di Arrhenius. Diversi autori hanno analizzato il consenso del settore scientifico affermando che il 97% degli studi da loro analizzati, relativi alle tendenze del riscaldamento climatico avvenute nel secolo scorso, sono concordi nel ritenere che le maggiori cause siano imputabili all'attività umana [4][5][6].

Il boom economico successivo agli anni '50 ha contribuito all'incremento delle emissioni di diossido di carbonio trasformando in maniera significativa sia l'ambiente che i rapporti socio-economici su scala globale. Tale cambiamento è avvenuto con una rapidità senza precedenti nella storia dell'uomo ed il periodo successivo agli anni '50 ad oggi è stato ribattezzato da alcuni antropologi come "la Grande accelerazione" [7]. La concentrazione di diossido di carbonio derivante dall'impiego dei combustibili fossili e dalle trasformazioni economico-sociali, è aumentata del 35% rispetto all'epoca pre-industriale ed è attualmente in fase di crescita con un incremento medio annuo dello 0,4% [3][8].

Le concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica, metano e protossido di azoto sono aumentate a livelli superiore a quelli degli ultimi 800.000 anni. Nel 2011 la concentrazione dell'anidride carbonica (CO₂) ha raggiunto 391 ppm, del metano (CH₄) 1803 ppb e del protossido di azoto (NH₂) 324 ppb registrando rispetto ai rispettivi livelli preindustriali un +40%, + 150% e + 20% [8].

1.1.1. Quali sono gli impatti osservati?

Secondo i rapporti dell'IPCC, il riscaldamento della superficie terrestre è un dato innegabile e, a partire dagli anni '60, le conseguenze del cambiamento climatico, osservate su diverse scale temporali, risultano essere senza precedenti. Gli impatti prodotti dal cambiamento climatico si ripercuotono sull'intero sistema climatico: sull'atmosfera, sugli oceani, sull'altezza del livello del mare, sulla criosfera e sul ciclo del carbonio. La misurazione della temperatura atmosferica degli ultimi decenni mostra che ciascun decennio è stato più caldo del precedente rispetto al valore di partenza del 1850 (cfr. **Figura 3**).

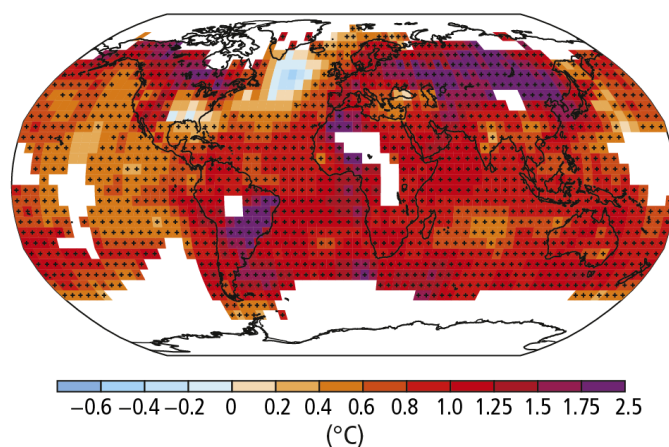


Figura 3 - Mappa delle variazioni delle temperature superficiali osservate dal 1901 al 2012
(Fonte: Figure 1.1 dell'AR5 - *Synthesis Report: Climate Change 2014*)

Come detto, la temperatura superficiale terrestre ha acquisito un incremento di $+1^{\circ}\text{C}$ rispetto ai livelli preindustriali e un ulteriore incremento di $+0,5^{\circ}\text{C}$ rispetto alla temperatura attuale comporterà un aumento dei giorni di caldo estremo alle medie latitudini [3]. L'aumento delle temperature superficiali ha determinato un incremento delle precipitazioni intense associate alla maggior quota di evaporazione dell'acqua marina e dell'innalzamento della temperatura del mare. I dati paleoclimatici raccolti evidenziano che si è verificato un aumento delle precipitazioni annuali in tutto l'emisfero settentrionale, con particolari picchi nel Nord America e in Europa, già a partire dal 1901 (cfr Figura 4).

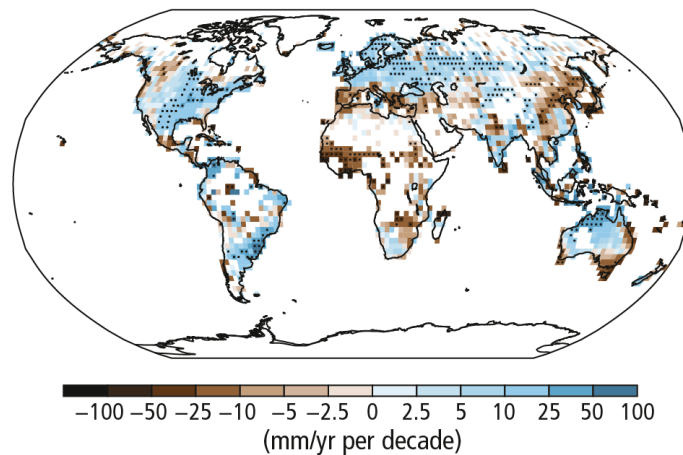


Figura 4 - Mappa delle variazioni delle temperature superficiali osservate dal 1901 al 2012
(Fonte: Figure 1.1 dell'AR5 - *Synthesis Report: Climate Change 2014*)

Il riscaldamento degli oceani è connesso all'aumento dell'energia termica immagazzinata all'interno del sistema. Lo strato superficiale dell'oceano (0-700 m) si è riscaldato ed in particolare nei primi 75 metri di profondità è stato registrato un innalzamento di $0,11^{\circ}\text{C}$ nel periodo di riferimento 1971-2010 [8]. L'aumento del contenuto di calore degli oceani è stato stimato essere pari a $17 \times 10^{22} \text{ J}$ [8].

Nel corso degli ultimi decenni le calotte glaciali in Groenlandia e Antartide hanno subito una riduzione significativa della loro massa con un tasso di perdita di 215 Gt/anno nel periodo tra il 2002 e il 2011 [8].

In contemporanea allo scioglimento delle calotte glaciali si è verificato un ritiro dell'estensione dei ghiacciai registrando, nel periodo compreso tra il 1971 e il 2009, un tasso medio di perdita pari a 226 Gt/anno [8].

A seguito dello scioglimento delle calotte glaciali, il livello del mare ha registrato un innalzamento pari a 0,19 m tra il 1901-2010. I dati raccolti dall'IPCC evidenziano che la velocità con cui il livello del mare è aumentato non è costante ed è aumentato con un tasso medio di innalzamento del 3,2 mm/anno nel periodo 1993-2010 [8].

1.1.2. Le simulazioni e gli scenari futuri

Il perdurare delle emissioni dei GHG contribuirà ad aggravare il riscaldamento terrestre e dunque ad aggravare tutte le componenti del sistema climatico. Limitare il cambiamento climatico richiede una riduzione sostanziale e prolungata dei GHG.

La comunità scientifica ha definito quattro diversi scenari climatici, denominati RCP, ai quali corrispondono quattro differenti percorsi futuribili. Ciascuno scenario è caratterizzato da un preciso valore di forzante radiativa antropica aggiungibile nel lungo periodo (cfr. **Tabella 1**).

Tabella 1 - Scenari futuri di evoluzione del problema

Denominazione RCP		Riduzione
RCP 2.6	Scenario di mitigazione	Riduzioni emissioni molto elevate
RCP 4.5	Scenario di stabilizzazione	Riduzioni consistenti
RCP 6.0	Scenario di stabilizzazione	Riduzioni blande
RCP 8.5	Scenario ad alte emissioni	"Business as usual"

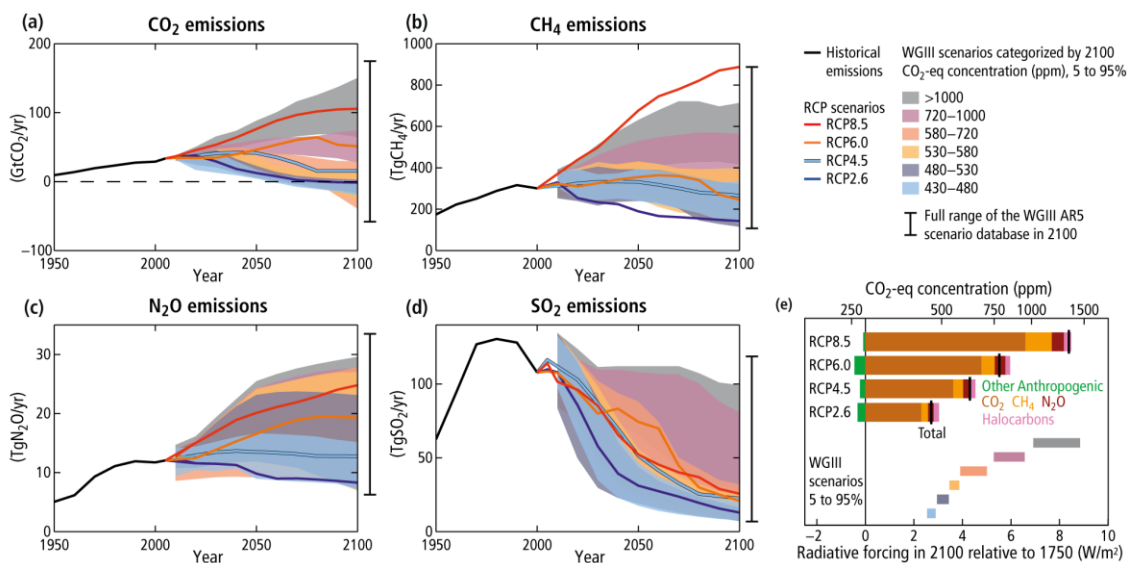


Figura 5 - Scenari di emissione e livelli di forzanti radiativi risultanti per i percorsi di concentrazione rappresentativi

Gli scenari proposti sono basati su simulazione numeriche di processi centrali nel sistema climatico terrestre: essi includono modelli complessi come il *General Circulation Models* (GCM) e l'*Earth System Models* (ESMs) che simulano anche il ciclo del carbonio. Tali modelli simulano molti aspetti climatici tra cui l'andamento della temperatura atmosferica e degli oceani, le precipitazioni, i venti, le nuvole, l'evoluzione delle correnti oceaniche e l'estensione del ghiaccio marino.

Le proiezioni sui cambiamenti climatici sono realizzate sulla base delle informazioni desunte dalle emissioni di gas serra e inquinanti atmosferici e dai modelli di utilizzo del suolo. I fattori chiave che

determinano i cambiamenti nelle emissioni di gas serra associabili all'azione antropica sono riconducibili a fattori che presentano un'elevata incertezza. La crescita economica delle società moderne e i suoi cambiamenti nello stile vita associabili all'uso di energia e del suolo congiuntamente all'evoluzione del progresso tecnologico e delle decisioni politiche rappresentano le principali incertezze delle simulazioni climatiche fornite all'IPCC.

Le variazioni di temperatura superficiale e l'innalzamento medio del livello del mare rispetto al 1986-2005 per gli scenari futuribili sono riportati nella **tabella 2**.

Tabella 2 - Elaborazione delle variazioni superficiali e innalzamento livello del mare su dati del AR5

		2046-2065		2081-2100	
Scenario		Valore	Range	Valore	Range
Variazione globale della GMTS [° C]	RCP 2.6	1,0	0,4-1,6	1,0	0,3-1,7
	RCP 4.5	1,4	0,9-2,0	1,8	1,1-2,6
	RCP 6.0	1,3	0,8-1,8	2,2	1,4-3,1
	RCP 8.5	2,0	1,4-2,6	3,7	2,6-4,8
Scenario		Valore	Range	Valore	Range
Variazione globale del livello del mare [m]	RCP 2.6	0,24	0,17-0,32	0,40	0,26-0,55
	RCP 4.5	0,26	0,19-0,33	0,47	0,32-0,63
	RCP 6.0	0,25	0,18-0,32	0,48	0,33-0,63
	RCP 8.5	0,30	0,22-0,38	0,63	0,45-0,82

L'aumento delle temperature atteso in tutti gli RCP (ad eccezione dell'RCP 2.6) renderà più frequenti il verificarsi di temperature estreme calde e fredde su scala globale e su scale temporali giornaliere e stagionali. Il livello medio globale del mare continuerà a salire nel XXI secolo con un tasso di crescita superiore a quello osservato nel periodo 1971-2010. In particolare, lo scenario RCP 8.5 induce a considerare che nella seconda metà del XXI secolo si possa arrivare ad un innalzamento del livello del mare con un tasso di crescita compreso tra gli 8 e i 16 mm all'anno.

Le conseguenze dirette di questi fenomeni potrebbero essere la sommersione e l'inondazione dei sistemi e delle zone basse esponendo la popolazione a rischi costieri.

A seguito della variazione delle temperature è previsto che frazioni significative della popolazione globale sperimenteranno la scarsità d'acqua e le inondazioni dei grandi percorsi fluviali saranno proporzionali a tale variazione. Le risorse idriche subiranno una riduzione nelle regioni subtropicali aride ed aumenterà la frequenza della siccità nelle regioni aride. Anche la produzione alimentare sarà influenzata dai cambiamenti climatici con impatti diversi a seconda degli scenari di adattamento considerati. L'aumento della temperatura globale e l'aumento della domanda alimentare sono indici che dovrebbero essere attenzionati per scongiurare danni alla sicurezza alimentare su scala globale [8].

Secondo i rapporti internazionali, la regione europea, ed in particolar modo l'area mediterranea, dovrà fronteggiare l'impatto negativo dei cambiamenti climatici. L'area mediterranea, pertanto costituisce la zona di maggior vulnerabilità su cui dover concentrare gli interventi di mitigazione del rischio.

Le temperature dei paesi europei hanno registrato un incremento concorde al quadro dei cambiamenti climatici illustrato nel V rapporto dell'IPCC.

L'entità del riscaldamento degli ultimi decenni è stata quantificata dall'*European Environmental Agency* (EEA): l'Europa, così come la regione artica, ha subito un riscaldamento con un tasso di velocità superiore alla media globale. La temperatura media annuale nell'ultimo decennio è stata di 1,9 °C superiore al periodo preindustriale. Le regioni maggiormente esposte all'incremento delle temperature sono la penisola iberica e l'Europa centrale e nord-orientale. Gli scenari delle proiezioni EURO-CORDAX¹ suggeriscono che per i paesi dell'UE le temperature continueranno a salire ad un ritmo superiore alla media globale tra 1,4 e 4,2 °C nello scenario RCP 4.5 e tra 2,7 e 6,2 °C nello scenario RCP 8.5.

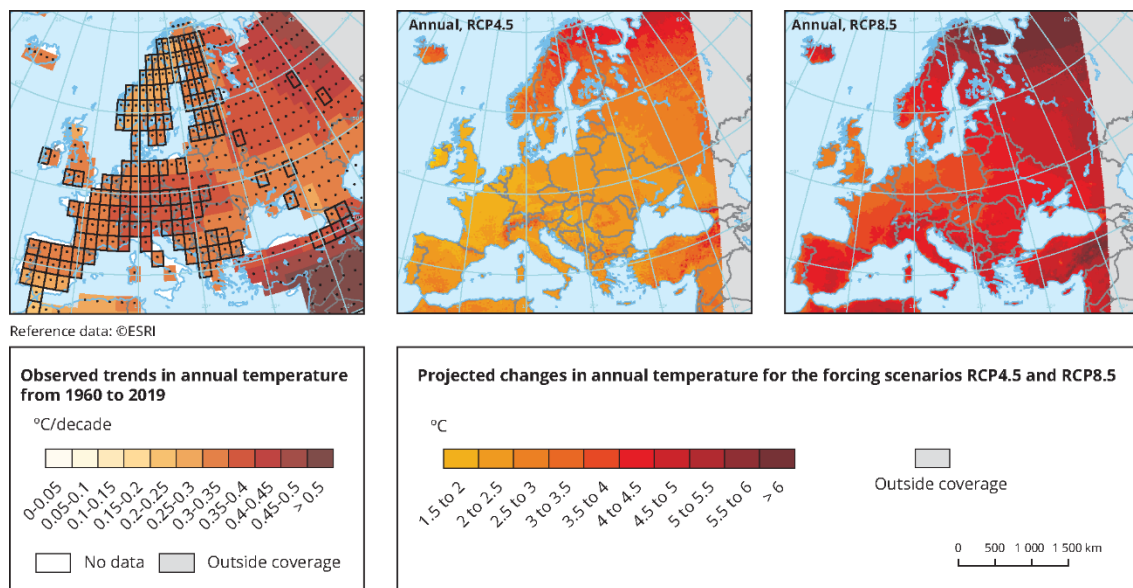


Figura 6 - Variazione delle temperature previste per il XXI secolo nei diversi scenari (Fonte EEA <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/trends-in-annual-temperature-across-1>)

Senza opportune strategie di intervento, il raggiungimento del livello massimo di riscaldamento di 2 °C stabilito in occasione dell'accordo di Parigi (2015), verrebbe superato già nel 2040. Il livello medio globale del mare (GMSL) nel 2019 è stato il più alto registrato nel corso dei secoli e le

^{1 1} L'EURO-CORDEX è il ramo europeo dell'iniziativa internazionale CORDEX. Il CORDEX è un programma di iniziativa del *World Climate Research Program* (WRCP) per organizzare un quadro coordinato a livello internazionale per produrre migliori proiezioni regionali sui cambiamenti climatici.

osservazioni effettuate mediante il mareometro mostrano un aumento di 19 cm dal 1900 [9]. La forzante antropica è stata la principale causa dell'accelerazione del tasso di innalzamento del GMSL degli ultimi decenni [10].

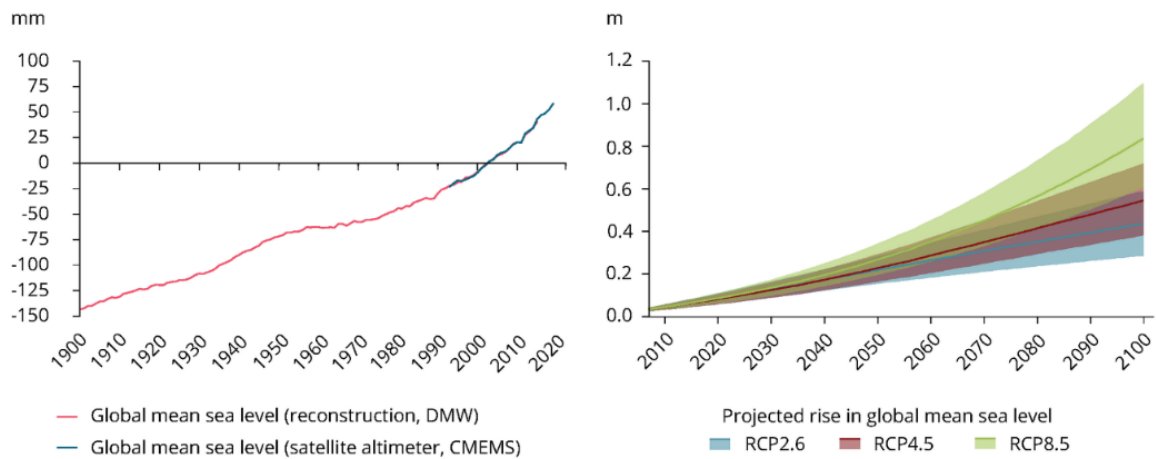


Figura 7 - Variazione della GMSL prevista per il XXI secolo nei diversi scenari (Fonte EEA <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/observed-change-in-global-mean>)

I modelli climatici globali basati sul processo prevedono che l'aumento di GMSL durante il XXI secolo avverrà nell'intervallo tra 0,29-0,59 m, se si considera uno scenario a basse emissioni (RCP2.6), e tra 0,39-0,72 m per uno scenario a emissioni medie (RCP4.5) e tra 0,61-1,10 m per uno scenario ad alte emissioni (RCP8.5) [10].

Le grandi aree urbane incidono in maniera significativa sui cambiamenti climatici in quanto nelle città si concentrano le attività a cui vengono attribuite le principali emissioni di gas serra [11]. I cambiamenti climatici che hanno influenzato le aree urbanizzate sono molteplici e già studiati da diversi autori [12].

È possibile suddividere tali impatti in due diverse tipologie:

- diretti: ovvero tutti gli impatti che generano un effetto sul tessuto fisico degli ambienti urbanizzati;
- indiretti: ovvero tutti gli impatti che interessano il contesto economico, sociale e ambientale che hanno ripercussioni sugli ambienti urbani.

Tabella 3 - Potenziali impatti connessi alle aree urbanizzate

<i>Potenziali impatti diretti del cambiamento climatico</i>	<i>Conseguenze sulle aree urbanizzate</i>
Cambiamenti della temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento del carico di surriscaldamento e utilizzo di aia condizionata; • Diminuzione del riscaldamento negli ambienti invernali; • Diminuzione dell'energia di riscaldamento dell'acqua.
Aumento degli eventi metereologici estremi	<ul style="list-style-type: none"> • Danni agli edifici e alle infrastrutture
Cambiamenti nelle tipologie di precipitazioni	<ul style="list-style-type: none"> • Danni in fondazione • Aumento delle inondazioni • Danni alle facciate e alla struttura interna causata dalla penetrazione della pioggia • Aumento dei cedimenti • Aumento di erosione, frane e smottamenti • Cambiamenti nelle falde acquifere e nella fornitura delle acque urbane
Dilatazione termica degli oceani e scioglimento dei ghiacciai	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento delle inondazioni costiere • Aumento delle erosioni • Cambiamenti nei modelli di sedimentazione • Cambiamenti nelle falde acquifere e possibile infiltrazione • Perdita di aree cuscinetto
Cambiamenti nell'intensità del vento	<ul style="list-style-type: none"> • Cambiamenti nel carico da vento negli edifici
Aumento dell'inquinamento atmosferico	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento nella necessità di aria pulita e di ventilazione

1.1.3. I principali indicatori per quantificare l'impatto ambientale

I GHG ad oggi sono considerati i principali responsabili delle mutazioni del clima terrestre. Tuttavia, nel considerare l'impatto dei GHG esistono alcune variabili dovute ai propri cicli di vita all'interno dell'atmosfera terrestre.

Per rendere immediato il confronto degli effetti di ciascun gas sono stati individuati quattro indici di riferimento [13]:

- AGWP, *Absolute Global Warming Potential*;
- GWP, *Global Warming Potential*;
- AGTP, *Absolute Global Temperature Potential*;
- GTP, *Global Temperature Potential*.

L'indice AGWP costituisce la quantità di radiazione solare trattenuta da 1 kg di gas presente in atmosfera durante l'orizzonte di riferimento. Esso si esprime analiticamente mediante la seguente espressione:

$$AGWP(x, TH) = \int_0^{TH} a_x \cdot x(t) dt \quad (1)$$

in cui:

- TH è il tempo di riferimento (*time horizon*);
- a_x è l'assorbimento della radiazione solare dovuto all'introduzione del generico gas (*radiative efficiency*);
- $x(t)$ è la funzione del decadimento della concentrazione del gas in atmosfera (*decay in abundance*).

Tabella 4 - Valori di AGWP dei principali gas serra con orizzonti temporali di 20 e 100 anni

GHG	AGWP 20 anni	AGWP 100 anni	AGWP ₁₀₀ /AGWP ₂₀
Anidride carbonica (CO ₂)	2,49 E-14	9,17 E-14	3,7
Metano (CH ₄)	2,09 E-12	2,61 E-12	1,2
Protossido di azoto (N ₂ O)	6,58 E-12	2,43 E-12	0,4
Clorofluorocarburo (CCl ₃ F)	1,78 E-10	4,28 E-10	2,4
Idroclorofluorocarburo (CHClF ₂)	1,32 E-10	1,62 E-10	1,2
Idrofluorocarburo (CHF ₃)	2,70 E-10	1,14 E-09	4,2

Dai confronto dei valori rispetto al tempo di orizzonte riportati in **Tabella 4** si osserva che tra tutti i gas serra, l'anidride carbonica e gli idrofluorocarburi presentano i valori maggiori in termini di permanenza nell'atmosfera terrestre. In merito ai gas naturali l'incremento in termini di AGWP si attesta a +268% per l'anidride carbonica e a +25% per il metano.

Per confrontare in modo agevole l'impatto di ciascun gas serra l'IPCC nel 1990 ha introdotto l'indice GWP, ovvero il rapporto tra l'AGWP di un generico gas con l'AGWP dell'anidride carbonica come illustrato nella formula seguente:

$$GWP_x = \frac{AGWP_x}{AGWP_{CO_2}} = \frac{\int_0^{TH} a_x \cdot x(t) dt}{\int_0^{TH} a_{CO_2} \cdot CO_2(t) dt} \quad (2)$$

L'indice GWP pertanto, esprime l'impatto in termini di riscaldamento globale esercitato da un generico gas rispetto ad uguale quantitativo di anidride carbonica.

Tabella 5 - Valori di GWP dei principali gas serra con orizzonti temporali di 20 e 100 anni

<i>GHG</i>	<i>GWP 20 anni</i>	<i>GWP 100 anni</i>
Anidride carbonica (CO ₂)	1	1
Metano (CH ₄)	84	28
Protossido di azoto (N ₂ O)	264	265
Clorofluorocarburo (CCl ₃ F)	6900	4660
Idroclorofluorocarburo (CHClF ₂)	5280	1760
Idrofluorocarburo (CHF ₃)	10800	12400

Sebbene tale indice sia attualmente applicato in ambito scientifico per la determinazione dell'impatto ambientale dei principali gas a cui si attribuisce l'effetto serra, alcuni autori hanno evidenziato alcune carenze nella metodologia, in quanto due gas aventi lo stesso GWP potrebbero non essere equivalenti in termini di apporto all'incremento della temperatura media superficiale [8] [9]. L'apporto in termini di temperatura media della superficie terrestre causata dall'immissione di 1 kg di gas serra nell'atmosfera terrestre viene calcolata mediante l'AGTP.

Tabella 6 - Valori di AGTP dei principali gas serra con orizzonti temporali di 20 e 100 anni

<i>GHG</i>	<i>AGTP 20 anni</i>	<i>AGTP 100 anni</i>	<i>Riduzione % (AGTP₁₀₀-AGTP₂₀)</i>
Anidride carbonica (CO ₂)	6,84 E-16	5,47 E-16	- 20
Metano (CH ₄)	4,62 E-14	2,34 E-15	- 95
Protossido di azoto (N ₂ O)	1,89 E-13	1,28 E-13	- 32
Clorofluorocarburo (CCl ₃ F)	4,71 E-12	1,28 E-12	- 73
Idroclorofluorocarburo (CHClF ₂)	2,87 E-12	1,43 E-13	- 95
Idrofluorocarburo (CHF ₃)	7,88 E-12	6,95 E-12	- 12

Dai valori riportati nella **Tabella 5** si osserva che l'impatto dell'anidride carbonica sulla temperatura media terrestre si mantiene stabile nel tempo, infatti considerando orizzonte temporali di 20 e 100 anni si ottiene una riduzione del -20%. L'apporto del metano nel lungo periodo è meno stabile e tende a scomparire quasi del tutto (-95%).

Per confrontare l'impatto di ciascun gas serra in termini di AGTP, così come convenzionalmente accade per l'AGWP, si è soliti confrontare i valori con AGTP dell'anidride carbonica.

Tabella 7 - Valori di GTP dei principali gas serra con orizzonti temporali di 20 e 100 anni

<i>GHG</i>	<i>GTP 20 anni</i>	<i>GTP 100 anni</i>
Anidride carbonica (CO ₂)	1	1
Metano (CH ₄)	67	4
Protossido di azoto (N ₂ O)	277	234
Clorofluorocarburo (CCl ₃ F)	6890	2340

Idroclorofluorocarburo (CHClF ₂)	4200	262
Idrofluorocarburo (CHF ₃)	11500	12700

1.2. GLI IMPEGNI INTERNAZIONALI PER CONTRASTARE IL CAMBIAMENTO CLIMATICO

La convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change) venne approvata durante la conferenza sull'ambiente tenutasi a Rio de Janeiro nel 1992 e, assieme alla convenzione sulla biodiversità (CBD) e per la lotta contro la desertificazione (UNCDD), costituisce una delle tre convenzioni ambientali multilaterali.

L'obiettivo dell'UNFCCC fu di impedire le pericolose interferenze di origine antropica con il sistema climatico globale, e a seguito della conferenza venne istituito il principale organo direttivo dell'UNFCCC, la Conferenza delle Parti (COP).

A seguito dell'accordo quadro venne stabilito che, con cadenza annuale a partire dalla stipula della convenzione, la COP fosse riunita per le negoziazioni sul clima tra 197 parti contraenti l'accordo coinvolgendo, con status di osservatore, anche i rappresentanti del mondo imprenditoriale, le organizzazioni internazionali, i gruppi interessati e le associazioni.

Durante la terza convocazione della COP, 192 dei paesi siglanti l'UNFCCC si impegnarono a ridurre del 12% le emissioni globali siglando un accordo internazionale noto come Protocollo di Kyoto. Tale valore fu scelto anche in base alla rinuncia da parte degli Stati Uniti, ritenuta responsabile del 36,2% delle emissioni, rinuncia che nel corso degli ultimi decenni è stata più volte rinegoziata.

Sebbene il protocollo venne sancito nel 1997, l'entrata in vigore ufficiale avvenne a seguito della ratifica della Russia² solo nel febbraio del 2005. Dopo tale data ciascun Paese aderente assunse l'impegno a ridurre le emissioni di gas serra seguendo due distinte scadenze temporali: il 5% nel periodo 2008-2012 e il 18% nel periodo 2013-2020 entrambi riferiti ai livelli del 1990.

Il protocollo di Kyoto introdusse anche alcuni strumenti flessibili per l'acquisizione di "crediti" di emissione aventi l'obiettivo di realizzare azioni di mitigazione delle emissioni di gas serra, come l'*Emission Trading* (ET), il *Join Implementation* (JI) e il *Clean Development Mechanism* (CDM)³.

² L'entrata della Russia fu determinante in quanto la condizione per cui il protocollo fosse ratificato richiedeva l'impegno di un numero superiore a 55 stati firmatari e che contribuissero ad almeno il 55% delle emissioni inquinanti. L'ostacolo principale è stato ottenere il consenso degli Stati Uniti che dopo aver negato inizialmente la loro adesione all'accordo ha fatto inversione di marcia durante li ultimi mesi del mandato dell'allora presidente degli Stati Uniti d'America Bill Clinton salvo poi ritiro dell'adesione da parte del successore alla presidenza alla casa bianca George W. Bush.

³ Attraverso questi meccanismi è possibile generare crediti che a loro volta possono essere scambiati tra gli stati membri per ottemperare agli obblighi imposti in seguito all'accordo di Kyoto. Il mercato dei crediti, inoltre, aveva la finalità di permettere ai paesi in difficoltà di rispettare i propri impegni.

Le successive contrattazioni durante le COP non portarono significative modifiche agli accordi raggiunti nel 2005 raggiungendo solo ad un accordo ponte basato su vincoli meno stringenti denominato "Kyoto 2".

Nel 2015, alla scadenza del limite temporale per la riduzione delle emissioni di ciascun Paese, durante la conferenza delle parti tenutasi a Parigi (COP21) venne ratificato un nuovo accordo che ha vincolato, senza alcuna distinzione, tutti i paesi alla riduzione delle proprie emissioni (NDCs). L'accordo riguarda le misure di contrasto al cambiamento climatico da seguire dal 2020.

Gli obiettivi concordati in occasione dell'Accordo di Parigi si riassumono in:

- mantenere l'aumento medio della temperatura mondiale ben al di sotto di 2°C rispetto ai livelli preindustriali come obiettivo a lungo termine;
- puntare a limitare l'aumento a 1,5°C, dato che ciò ridurrebbe in misura significativa i rischi e gli impatti dei cambiamenti climatici;
- fare in modo che la riduzione delle emissioni globali raggiungano il livello massimo al più presto possibile, pur riconoscendo che per i paesi in via di sviluppo occorrerà più tempo;
- conseguire rapide riduzioni successivamente secondo le migliori conoscenze scientifiche disponibili, in modo da raggiungere un equilibrio tra emissioni e assorbimenti nella seconda metà del secolo.

L'accordo raggiunto prevede anche la possibilità di scambiare crediti mediante gli ITMO di cui ancora devono essere concordate le regole dalle parti della Convenzione quadro delle Nazioni Unite.

Parallelamente agli accordi di Parigi, nel 2015 l'ONU introduce la propria strategia per ottenere in futuro migliore e sostenibile per tutti definendo l'Agenda 30 che include i 17 obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs).

Gli SDGs mirano ad affrontare i temi inerenti allo sviluppo economico e sociale dei paesi e alla loro compatibilità con i modelli di sviluppo sostenibile nell'ottica di raggiungimento di risultati entro il 2030. All'interno degli SDGs vi sono alcuni obiettivi che rafforzano quanto già stabilito durante il COP21.

In particolare, l'obiettivo 13, lotta contro il cambiamento climatico, stabilisce che lo sviluppo economico e il clima sono strettamente correlati ed incoraggia il settore pubblico ad assumersi l'impegno di minimizzare i propri effetti negativi sull'ambiente. L'undicesimo e il dodicesimo obiettivo ONU, invece, pongono l'attenzione alla necessità di rendere le città e gli insediamenti urbani inclusivi, sicuri e, resilienti e sostenibili e al contempo esorta all'utilizzo di modelli produttivi ecocompatibili.



Figura 8 - Obiettivi per lo sviluppo sostenibile dell'Agenda 30, SDG11 Città e comunità sostenibili - SDG12 Consumo e produzione responsabili -SDG13 Lotta contro il cambiamento climatico

Nel 2019 l'Unione Europea, nel recepire i contenuti dell'Accordo di Parigi, ha stabilito i propri obiettivi in merito alle emissioni dei propri paesi nel lungo termine, mediante l'adozione dell'8° PAA, atto che prende il nome del "Green Deal" europeo.

I leader dell'UE approvando tali obiettivi si sono impegnati a raggiungere l'impatto climatico zero entro il 2050 e di raggiungere una riduzione del 55% delle sue emissioni entro il 2030.

1.2.1. La normativa comunitaria

Le politiche europee coprono un ruolo strategico per il miglioramento dell'ambiente. Nel 1973 la CE ha adottato il primo Programma d'Azione Ambientale (PAA) con l'obiettivo di definire proposte legislative e obiettivi futuri in materia di ambiente e cambiamenti climatici.

Nel condurre il proprio impegno la CE si avvale del supporto scientifico dell'Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA) e dell'Agenzia Europea per le Sostanze Chimiche (ECHA). In particolare, l'EEA raccoglie i dati delle singole nazioni in merito allo stato dell'ambiente, avvalendosi di indicatori, che questa stessa elabora e riferisce successivamente alla CE.

I PAA vengono emanati con cadenza pluriennale e seguono gli impegni internazionali contratti durante le COP. Attualmente, come già detto, a seguito degli Accordi di Parigi nel 2015, il Consiglio e il Parlamento europeo stanno per adottare l'8° PAA definendo in tal modo le iniziative strategiche per gli Stati membri per raggiungere la neutralità climatica entro il 2050. Le strategie politiche comunitari prevedono l'impegno dei diversi settori produttivi tra cui quello relativo al settore delle costruzioni degli edifici prevedendo per tale settore la promozione di metodi costruttivi efficienti dal punto di vista energetico e resilienti ai cambiamenti climatici [16].

Gli edifici europei consumano il 40% di energia elettrica (Fonte dati: Eurostat 2019) e, pertanto, al fine di migliorare le prestazioni energetiche sono stati definiti le linee strategiche di intervento per il settore edile:

1. Edifici efficienti sotto il profilo energetico;
2. progettazione degli edifici conforme all'economia circolare;
3. Potenziare la digitalizzazione;
4. Aumentare la resilienza ai cambiamenti climatici degli edifici;
5. Applicare rigorosamente la norma in materia di prestazione energetica degli edifici.

Nell'ambito delle politiche comunitarie bisogna citare anche il 7° PAA⁴, che sebbene sia scaduto il 31 dicembre 2020, costituisce l'elemento strategico dalla quale sono scaturite le normative nazionali degli Stati membri ad oggi vigenti. Il settimo piano d'Azione si articola nei seguenti nove obiettivi prioritari:

- **Obiettivo prioritario 1:** proteggere, conservare e migliorare il capitale naturale dell'Unione
- **Obiettivo prioritario 2:** trasformare l'Unione in un'economia a basse emissioni di carbonio, efficiente nell'impiego delle risorse, verde e competitiva
- **Obiettivo prioritario 3:** proteggere i cittadini dell'Unione da pressioni legate all'ambiente e da rischi per la salute e il benessere
- **Obiettivo prioritario 4:** sfruttare al massimo i vantaggi della legislazione dell'Unione in materia di ambiente migliorandone l'attuazione
- **Obiettivo prioritario 5:** migliorare le basi di conoscenza e le basi scientifiche della politica ambientale dell'Unione
- **Obiettivo prioritario 6:** garantire investimenti a sostegno delle politiche in materia di ambiente e clima e tener conto delle esternalità ambientali
- **Obiettivo prioritario 7:** migliorare l'integrazione ambientale e la coerenza delle politiche
- **Obiettivo prioritario 8:** migliorare la sostenibilità delle città dell'Unione
- **Obiettivo prioritario 9:** aumentare l'efficacia dell'azione dell'UE nell'affrontare le sfide ambientali e climatiche a livello internazionale.

1.2.2. *Le principali strategie risolutive: mitigazione e di adattamento*

La convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC - *United Nations Framework Convention on Climate Change*) del 1992 vengono definite le principali strategie per

⁴ Attualmente è in fase di adozione l'8° PAA che dovrebbe essere ratificato entro il 2021, definendo in tal modo le strategie comunitarie a lungo termine fino al 2050.

contrastare gli impatti prodotti dal cambiamento climatico: la mitigazione delle cause antropiche e l'adattamento degli effetti ambientali.

L'IPCC definisce la mitigazione come l'intervento antropico finalizzato alla riduzione delle fonti di produzione di gas serra o al loro assorbimento, mentre per adattamento la regolazione dei sistemi naturali e antropici al fine di rispondere agli stimoli climatici e agli effetti da essi prodotti.

È evidente che la mitigazione e l'adattamento differiscono per l'ambito di applicazione: mentre la mitigazione è riferito alle cause del problema, l'adattamento opera sugli effetti in modo da massimizzare quelli positivi e ridurre quelli negativi.

L'adattamento, in particolare, costituisce un aspetto fondamentale per fronteggiare i cambiamenti climatici che, alla luce dei recenti rapporti sul tema, sono inevitabili nel prossimo futuro.

Gli impatti attesi e le vulnerabilità dei singoli settori naturali e socio-economici sono stati affrontati a livello nazionale durante la formazione del PNACC. Lo scenario di impatto dei fenomeni connessi ai cambiamenti climatici è basato sull'analisi della letteratura aggiornata disponibile e sui risultati delle proiezioni climatiche per l'Italia e, in alcuni casi, sul calcolo di indicatori aggiuntivi e simulazioni modellistiche di maggior dettaglio. Nel PNACC sono individuate 8 aree climatiche omogenee (6 terrestri e 2 marine) mediante la sovrapposizione delle macroregioni climatiche e alla zonazione delle anomalie in funzione di indicatori dei principali impatti meteo-indotti introdotti da Schmidt-Thomé and Greiving (2013).

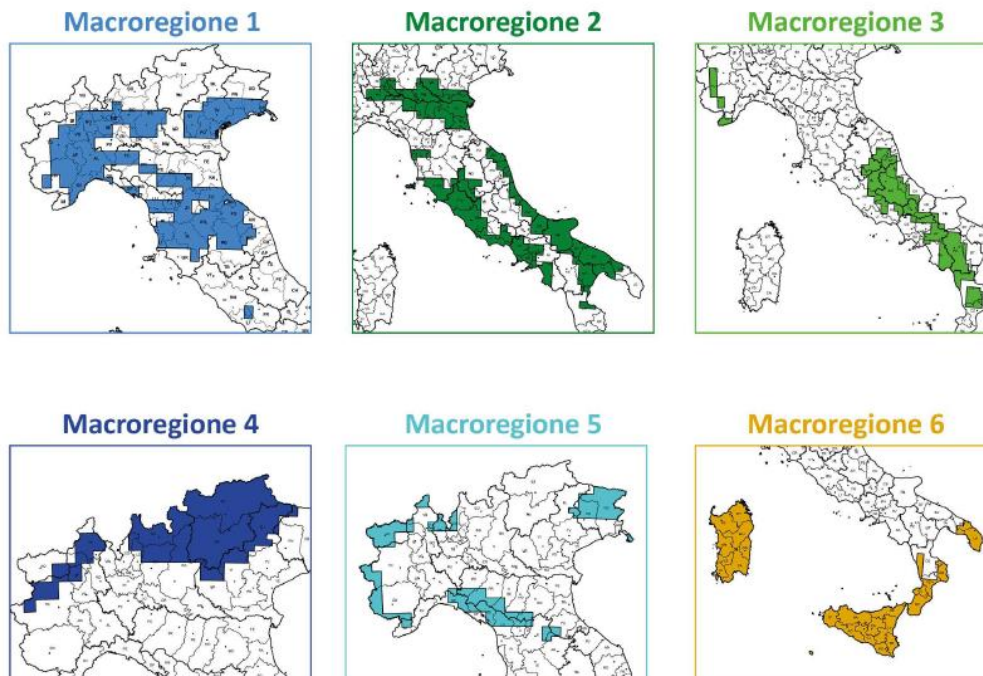


Figura 9 - Zonazione climatica del territorio italiano (fonte: PNACC)

Negli scenari di impatto per il territorio nazionale sono stati utilizzati i modelli climatici sviluppati dall'IPPC, l'RCP 4.5 e l'RCP 8.5. All'interno del PNACC è stato analizzato l'Indice Nazionale di Capacità di Adattamento (NACI) sulla base della metodologia impiegata da EPSON (EPSON, 2013).

Sulla base di tali dati emerge una marcata dicotomia tra la capacità di adattamento o tra le regioni del Nord e quelle del Sud. Nel divario esistente tra le due aree concorrono alcuni fattori quali il PIL regionale e la disoccupazione che storicamente riproducono il divario economico-sociale tutt'oggi esistente. Tuttavia alcune province del Veneto, del Piemonte, della Toscana e del Lazio presentano alcune carenze tali da accomunarli con le aree del mezzogiorno.

Il piano illustra una tassonomia di 361 "azioni" suddivise in 5 macro-categorie: informazione; processi organizzativi e partecipativi; governance; azioni di adeguamento e/o miglioramento di impianti e infrastrutture; soluzioni basate su sistemi ecosistemici.

Le azioni del PNACC sono state suddivise in due tipologie in base alla loro entità: le azioni di tipo A, dette *soft*, e le azioni di tipo B, dette *non soft - green* o *grey*. Alle azioni *soft* appartengono quella tipologia di interventi che non richiedono contributi strutturali o implicano l'uso diretto di materiali come ad esempio la creazione della capacità di adattamento mediante una maggiore sensibilizzazione sul tema a seguito di una campagna informativa. Le azioni *non soft*, suddivise in *green* e *grey*, corrispondono ad interventi di tipo strutturale; la differenza tra le azioni *green* e *grey* consiste nel fatto che le prime implicano l'utilizzo di soluzioni *nature based* come ad esempio l'utilizzo di fonti energia rinnovabili per l'approvvigionamento dei centri urbani.

Dalla valutazione delle 361 azioni contenute nel piano secondo i criteri di giudizio di valore individuati da Flörke et al. l'87,8% delle azioni rientra in una classe medio-alta e alta. All'interno delle azioni di giudizio alto sono state individuate 21 azioni che riguardano diversi settori e si distinguono in 4 aree tematiche: dissesto geologico, idrologico ed idraulico; gestione delle zone costiere, biodiversità e insediamenti urbani.

Gli obiettivi posti per l'adattamento degli insediamenti urbani ai cambiamenti climatici consistono in:

- Incentivare la ricerca scientifica su natura e magnitudine dei cambiamenti climatici in contesto urbano e valutazione del rischio
- Aumentare conoscenza, educazione e formazione su vulnerabilità e adattamento a livello urbano
- Promozione della pianificazione e progettazione per la prevenzione dei rischi e facilitare il monitoraggio
- Promuovere interventi sperimentali di adattamento in aree periurbane, periferie, centri storici e spazi pubblici
- Razionalizzare la spesa pubblica in ottica di adattamento urbano ai cambiamenti climatici

- Promuovere interventi sperimentali di adattamento in aree periurbane, periferie, centri storici e spazi pubblici (miglioramento del confort termico e qualità dell'abitare)
- Promuovere interventi sperimentali di adattamento in aree periurbane, periferie, centri storici e spazi pubblici (incremento della permeabilità dei suoli e dell'efficienza del sistema idraulico)
- Promuovere interventi sperimentali di adattamento in aree periurbane, periferie, centri storici e spazi pubblici (miglioramento dell'efficienza del sistema di approvvigionamento idrico)

Per contrastare l'aumento delle temperature in corso e le conseguenti ondate di calore che investiranno gli insediamenti urbani disseminati nel territorio nazionale è necessario realizzare:

- IU007 Interventi sperimentali di adattamento nelle aree periurbane e in ambiti di competenza sovralocale
- IU008 Interventi sperimentali di adattamento nelle periferie e nei centri storici
- IU010 Interventi sperimentali di adattamento a scala di edificio
- IU015 Interventi sperimentali e dimostrativi per la realizzazione di infrastrutture verdi urbane

La sperimentazione e la ricerca di nuove soluzioni tecniche di adattamento assumono un ruolo rilevante nella strategia nazionale per contrastare gli effetti consequenziali al cambiamento climatico.

1.2.3. *L'economia circolare: come principale strategia di mitigazione dei cambiamenti climatici*

Un approccio risolutivo del problema discusso si trova nel concetto di economia circolare, che secondo la definizione delle *Ellen MacArthur Foundation*, consiste in un'economia che si rigenera da sola. In un'economia circolare i flussi di materiali sono di tipo biologico, in grado di reintegrarsi nella biosfera, e di tipo tecnico, in grado di essere rivalorizzati senza entrare nella biosfera [17].

Il modello economico circolare contribuisce alla riduzione delle emissioni di gas serra GHG operando su tre aspetti: aumentando la circolazione dei materiali, migliorando l'efficienza dei materiali e creando nuovi modelli di business [18].



Figura 10 - Riduzione delle emissioni dal processo di produzione e consumo di materiali (Fonte *Material Economics* traduzione propria)

Secondo lo studio condotto da *Materials Economics*, il modello economico circolare applicato all'economia dei paesi nordici può implicare una riduzione entro il 2050 delle proprie emissioni (10-20 milioni di tonnellate di CO₂) e dei materiali importati (20-30 milioni di tonnellate di CO₂) [18].

Il ricircolo di materie prime riduce le emissioni di GHG in quanto la produzione di materie seconde è meno intensiva e sostituisce la produzione primaria.

Migliorare l'efficienza dei materiali significa ridurre il volume delle materie prime all'interno del processo produttivo. Il perseguimento di questo obiettivo è strettamente legato alla riduzione degli scarti all'interno dei processi realizzativi e all'avanzamento delle tecniche e dei materiali costruttivi.

Il Piano d'Azione dell'Unione Europea per l'economia circolare (COM/2015/614 final) individua nel settore edile uno tra i più incidenti nella produzione di rifiuti (*CDW – Construction and Demolition Waste*) che a causa della loro origine, eterogeneità e in assenza di un preventivo piano di demolizione e smaltimento, non vengono riutilizzati provocando processi di smaltimento onerosi in termini ambientali ed economici [17].

Le modalità di applicazione dell'economia circolare sono il riuso/riutilizzo e il riciclo. Il riuso/riutilizzo prevede che un prodotto al termine del suo ciclo di vita (*end of life*) venga riutilizzato per lo stesso scopo o con un ruolo differente; in questo caso il concetto di *end of life* si trasforma in *end of service life*. Il riuso/riutilizzo deve essere preventivato nella fase di progettazione del prodotto insieme alla sua durabilità. Infatti per riusare/riutilizzare un prodotto è importante che questo mantenga i propri requisiti nel tempo.

Il riciclo consiste nel processo per cui il materiale da smaltire viene trasformato in un materiale secondario per preservare gli scopi originali o essere impiegato in altri scopi. In tal caso il fine vita del materiale lo rende materia prima per un nuovo processo di produzione.

Entrambi i processi descritti possono essere applicati al settore edile a diverse scale. Un edificio sottoposto a regolare manutenzione, alla fine della sua vita utile, può essere utilizzato con nuove destinazioni d'uso, scoraggiando interventi di nuova costruzione o sostituzione edilizia.

Un prodotto o un materiale edile possono essere riutilizzati o riciclati per altri scopi.

A scala del materiale è molto influente l'apporto di altri settori verso il settore edile. Prodotti di scarto provenienti da industrie di produzione, come quella alimentare, o dallo smaltimento di prodotti provenienti da altri settori, come quello tessile, trovano nuovo impiego per la produzione di materiali o componenti edili. In questo campo sono numerosi i processi già avviati, quanto i processi in via di ricerca e sperimentazione [17].

1.3. L'IMPATTO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUL SISTEMA URBANO

1.3.1. Le cause del fenomeno isola di calore urbano

Nelle città urbane l'aumento delle temperature dovuto al surriscaldamento globale provoca l'inasprimento del fenomeno *isola di calore* (UHI), già aggravato dagli attuali processi di urbanizzazione.

L'isola di calore descrive l'anomalia termica in cui si verifica una maggior temperatura nelle aree urbanizzate rispetto alle aree rurali periferiche. Il principale indicatore del fenomeno è *l'intensità dell'isola di calore* (UHII) che descrive il gradiente termico esistente tra la temperatura urbana e quella rurale [19] [20].

Con isola di calore urbana UHI o UCL (*urban canopy layer*) ci si riferisce alla maggior temperatura dell'aria in prossimità del suolo che caratterizza le zone cittadine rispetto alle campagne circostanti. In questo caso il riferimento in cui osservare l'anomalia termica è costituito dallo strato atmosferico sotto l'altezza media degli edifici in essa si verifica. L'influenza diretta che la temperatura dell'aria assume in questo strato atmosferico ha delle ripercussioni sul comfort termico abitativo e stradale.

Il fenomeno dell'isola di calore urbano è abbastanza complesso ma alcuni autori sintetizzano i principali fattori in quattro tipologie: **1)** la posizione geografica e clima, **2)** le caratteristiche a scala regionale e urbana (uso del suolo, topografia, demografia eccetera), **3)** le caratteristiche locali che influenzano la temperatura come ad esempio i rivestimenti degli edifici e l'attività umana, **4)** le condizioni meteorologiche tra cui radiazione solare, nuvolosità, precipitazioni [21].

Rizwan et al. affrontano il problema delle cause dell'UHI determinando due tipologie di fattori: naturali e antropiche (cfr. **Figura 11**) [22].

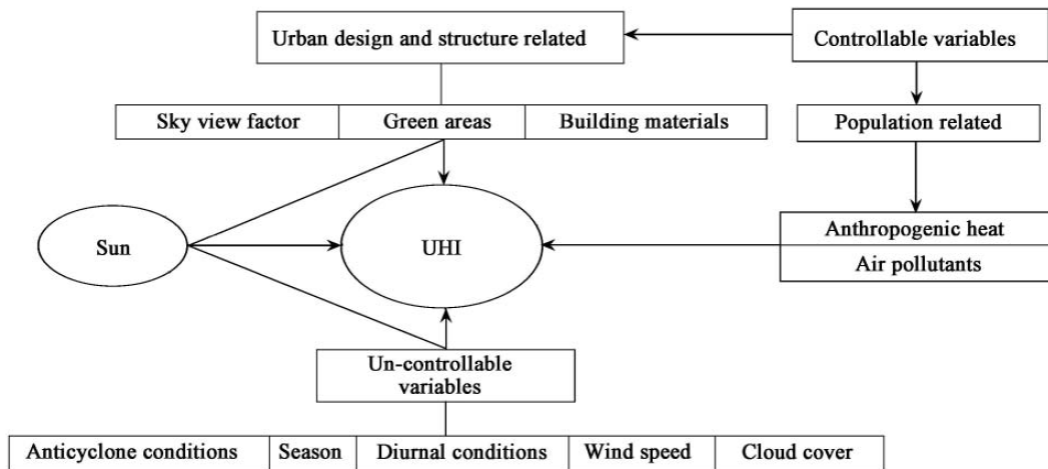


Figura 11 - Cause dell'effetto isola di calore UHI

Lo stesso studio di Rizwan et al. afferma che i fattori di tipo naturale sono incontrollabili, pertanto, la possibile soluzione del problema è da cercare nella mitigazione dei fattori antropici [22].

La causa principale riconducibile all'azione antropica è la variazione dei processi di evaporazione e di traspirazione a seguito della modifica della permeabilità del terreno.

L'aumento delle temperature diurne nelle aree urbane è dovuto principalmente all'assenza di evaporizzazione e di traspirazione vegetale. I materiali che caratterizzano le superfici urbane possiedono un minor albedo, ovvero trattengono gran parte dell'energia luminosa sotto forma di calore per rilasciarla durante le ore notturne.

L'altezza e la distanza degli edifici possono influenzare l'albedo e dunque incidere negativamente sull'UHI. In particolare, nei tessuti urbani in cui gli edifici sono particolarmente alti e vicini si innescano una serie di riflessioni multiple che, sebbene comportino un aumento dell'albedo del sistema, incidono sullo *sky view factor* ψ_s (SVF) riducendo la possibilità che il vento possa asportare il calore emesso dalle superfici. L'attività antropica e l'inquinamento da esso provocato contribuiscono negativamente al bilancio energetico del sistema.

Data la complessità dei fattori che governano il fenomeno UHI, si è soliti considerare la validità del principio di conservazione dell'energia all'interno di un determinato volume di controllo e in funzione dell'altezza del *canopy layer* (cfr. Figura 12).

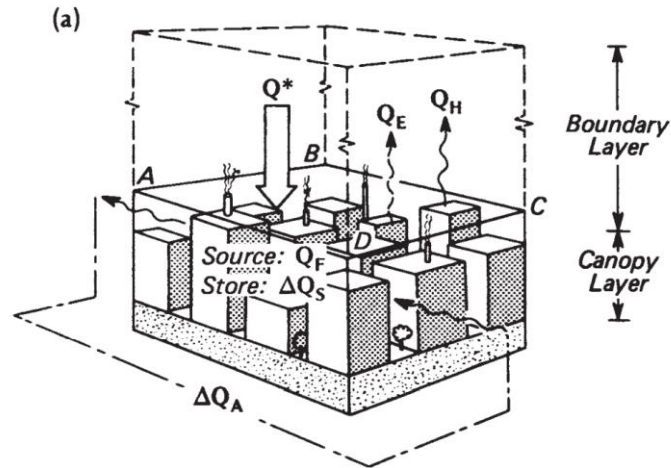


Figura 12 - Schema del bilancio energetico di un generico volume di controllo (fonte: Oke T.R., *Boundary Layer Climates*, 1987)

Il bilancio energetico superficiale (SEB) è espresso mediante la seguente equazione [23] che descrive il processo di riscaldamento e raffreddamento superficiale:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad \text{Eq. (3)}$$

in cui Q^* rappresenta la radiazione netta, Q_F il contributo antropogenico, Q_H il flusso turbolento di calore sensibile, Q_E il flusso turbolento di calore latente, ΔQ_S l'accumulo di calore sensibile e ΔQ_A il calore netto per avvezione.

Durante le ore diurne nell'area urbanizzata si verifica un eccesso di calore sensibile sul calore latente dovuto al consistente numero di superfici opache e basso tenore di acqua e vegetazione. Le superfici opache, pertanto, veicolano il calore sensibile come canale preferenziale per il trasferimento del calore all'aria soprastante la quale riscaldandosi aumenta la temperatura dell'ambiente urbano. Durante le ore pomeridiane e notturne le strutture urbane rilasciano il calore immagazzinato durante le ore diurne [24].

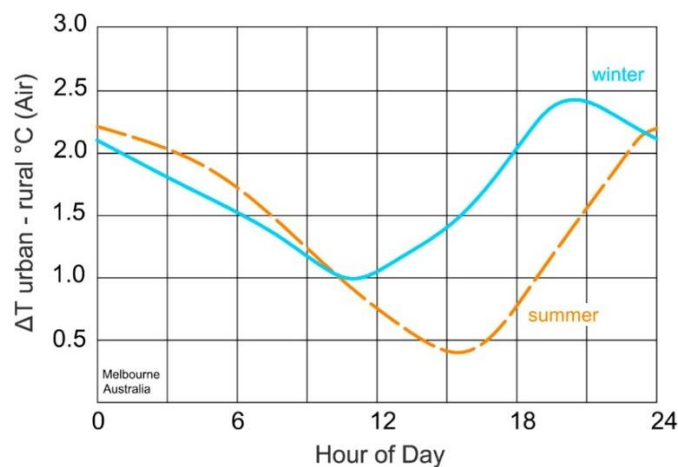


Figura 13 - Differenza di temperatura dell'aria nell'area di Melbourne durante la giornata e durante il periodo estivo ed invernale

L'assenza di evotraspirazione delle superfici urbane si traduce in un aumento della quota di calore sensibile. Il rapporto di Bowen β esprime la disuguaglianza esistente tra il flusso di calore latente e il flusso di calore sensibile. Nelle aree urbane, pertanto, si raggiungono valori di β pari a 5 mentre nelle aree periferiche i valori tipici sono pari a 0,5.

Christen e Vogt affermano che la misurazione diretta dell'accumulo di calore sensibile in un'area urbanizzata è quasi impossibile a causa della complessità dei materiali che caratterizzano le superfici dell'ambiente di riferimento e, pertanto, tale termine viene considerato come residuo dell'equazione SEB [25].

Santamouris sostiene che il contributo per avvezione può essere considerato trascurabile all'interno del centro urbano mentre Christen e Voogt affermano che il contributo può essere trascurato prestando attenzione nel determinare l'altezza di misurazione [26].

Il contributo antropogenico Q_F , diversamente dagli accumuli di calore sensibile costituisce un contributo non trascurabile nel bilancio energetico. Esso assume valori rilevanti durante il periodo invernale causati dall'utilizzo intensivo delle fonti di riscaldamento domestico mentre la massima UHI viene registrata solitamente nel periodo estivo a causa dell'aumento delle temperature e dei terminali di emissione degli impianti di raffrescamento. Ne consegue che il calore antropogenico influenza inevitabilmente l'ambiente costruito, seppur con apporti diversi, durante l'intero arco solare. In particolare l'intensità del UHI durante il periodo estivo contribuisce ad aumentare la domanda energetica comportando una maggior emissione di gas serra GHG.

Il calore antropogenico può essere suddiviso in tre fattori come riportato nella seguente equazione [27][28]:

$$Q_F = Q_{FV} + Q_{FH} + Q_{FM} \quad \text{Eq. (4)}$$

ovvero dal calore generato da mezzi trasporto Q_{FV} , dal calore proveniente dalle abitazioni e impianti produttivi Q_{FH} e dal calore metabolico prodotto dall'uomo e dagli animali presenti all'interno del volume di controllo.

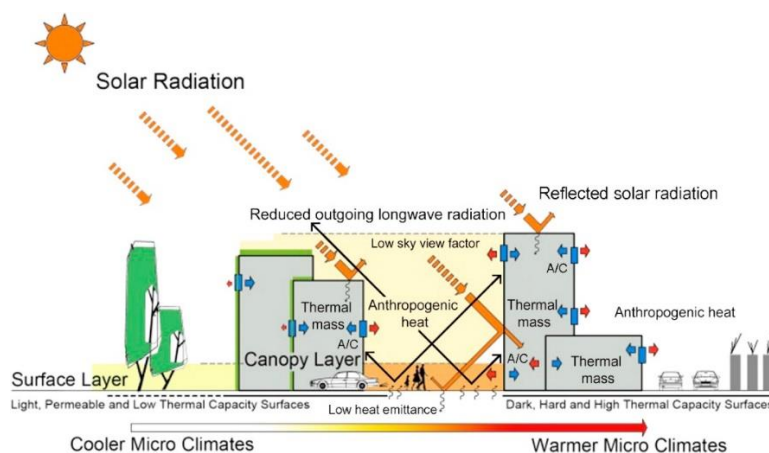


Figura 14 - Schema dei fattori che contribuiscono all'effetto UHI nelle aree altamente sviluppate (fonte: *Daily variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide*)

Grimmond sostiene che il contributo metabolico, rispetto agli altri fattori, può essere trascurato rendendo maggiormente palese che il calore antropico è correlato all'aumento della pressione demografica (veicoli e abitazioni).

1.3.2. I fattori controllabili che influenzano l'UHI

La geometria dell'insediamento urbano influisce in modo significativo all'intensità dell'effetto isola di calore. L'altezza e la distanza degli edifici costituiscono dei parametri essenziali in grado di modificare i percorsi radiativi solari. Le cortine edilizie in cui predomina l'altezza, tipiche delle grandi città urbanizzate, sono definite da diversi studiosi come *canyon* urbani.

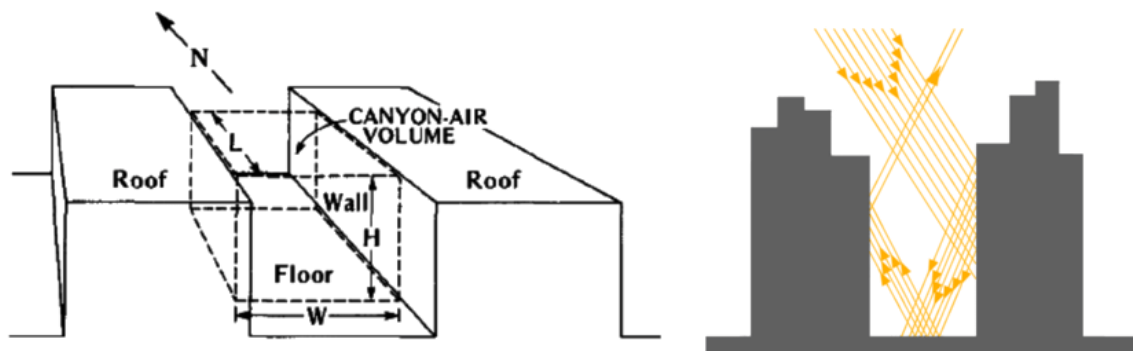


Figura 15 - Rappresentazione schematica di un canyon urbano e delle riflessioni e degli assorbimenti multipli che si verificano al suo interno (fonte: *Planning Cities' Adaptation to Climate Change. Application to Naples Metropolitan Area*, 2016)

I parametri del canyon urbano che influenzano la temperatura superficiale sono [29]:

- l'orientamento
- l'*aspect ratio* o rapporto H/d (altezza e distanza degli edifici);
- il fattore di vista del cielo *sky view factor* (SVF).

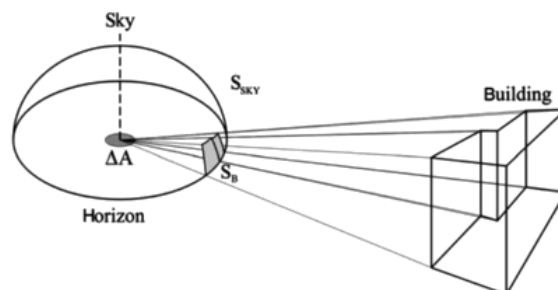


Figura 16 - Rappresentazione schematica dello *sky view factor* (fonte: *Planning Cities' Adaptation to Climate Change. Application to Naples Metropolitan Area*, 2016)

La geometria del canyon urbano influisce sul bilancio energetico in quanto, ad elevati valori dell'*aspect ratio* consegue un aumento del numero delle riflessioni sulle superfici (cfr. **Figura 16**) determinando in tal modo un assorbimento maggiore di calore rispetto ad una configurazione geometrico spaziale piana.

Il rapporto altezza distanza agisce anche sulla porzione di cielo visibile all'interno del canyon. L'SVF esprime l'entità dello scambio radiativo di uno specifico punto nello spazio con il cielo ed è definito come il rapporto tra la radiazione ricevuta/emessa da una superficie planare e la radiazione ricevuta/emessa dall'intero ambiente emisferico (cfr. **Figura 17**) [30] [31].

La riduzione dello SVF all'interno dei canyon urbani, inoltre, è considerata una delle cause concomitanti all'asseveramento del fenomeno UHI al di sotto *urban canopy layer* poiché all'aumento della densità edilizia è associata una perdita della capacità di mitigare le alte temperature per effetto della ventilazione notturna.

Oke nel 1981 ha proposto la seguente formulazione per esprimere l'UHI in funzione dei parametri geometrici sopra esposti (Oke, 1981):

$$\Delta T_{(U-R)max} = 7,45 + 3,97 \cdot \ln \frac{H}{d} \quad \text{Eq. (5)}$$

$$\Delta T_{(U-R)max} = 15,27 - 13,88 \cdot SVF \quad \text{Eq. (6)}$$

Un altro elemento che contribuisce alla formazione dell'isola di calore è la tipologia e le proprietà termiche dei materiali presenti nelle zone urbane. Come detto le superfici di tale aree sono caratterizzate da un basso valore di albedo e da elevati valori di conducibilità termica λ e capacità termica C .

La quantità di calore scambiato dalle superfici con lo strato d'aria limitrofo detto ammettenza μ è data dalla combinazione della conducibilità e della capacità termica secondo la seguente relazione:

$$\mu = \sqrt{\lambda \cdot C} \quad \text{Eq. (7)}$$

le proprietà radiative dei materiali urbani possono essere analizzate mediante il seguente bilancio energetico:

$$Q^* = K \uparrow + K \downarrow + L \uparrow + L \downarrow \quad \text{Eq. (8)}$$

in cui distinguiamo il flusso energetico dovuto alla radiazione solare K (onda corta) e il flusso energetico infrarosso L (onda lunga) mentre la direzione del flusso è indicato mediante simbologia \uparrow (verso atmosfera) e \downarrow (verso la superficie) (cfr. **Figura 17**).

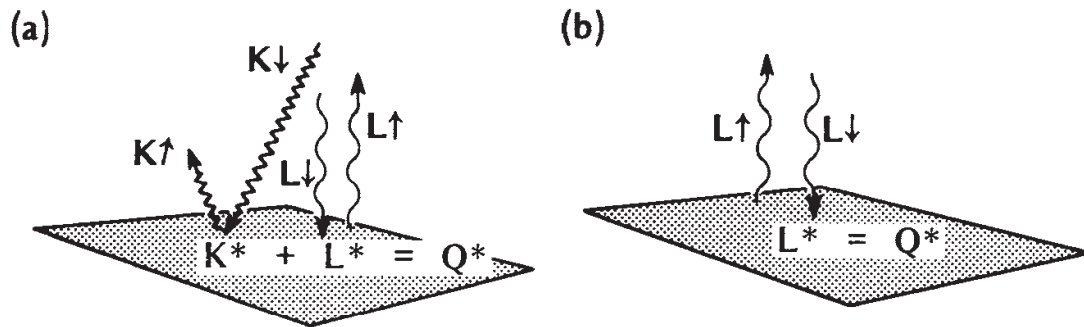


Figura 17 - Direzione dei flussi radiativi giornalieri (a) e notturni (b) (fonte: Oke T.R., *Boundary Layer Climates*, 1987)

Implementando la precedente equazione con la legge di Kirchhoff con cui un corpo emette solo le radiazioni che riesce ad assorbire e la legge di Stefan-Boltzmann per quantificare la potenza emessa da un corpo con emissività ε e temperatura T si ottiene:

$$Q^* = -\alpha K \downarrow + K \downarrow - \varepsilon_{IR} \sigma T^4 - (1 - \varepsilon_{IR}) L \downarrow + L \downarrow \quad \text{Eq. (9)}$$

$$Q^* = (1 - \alpha) K \downarrow - \varepsilon_{IR} \sigma T^4 + \varepsilon_{IR} L \downarrow \quad \text{Eq. (10)}$$

Definendo con α l'albedo, ossia la frazione di radiazione solare incidente sulla superficie che viene riflessa si nota la relazione tra tale parametro e la radiazione netta. le aree rurali sono caratterizzate da valori α comprese tra 0,25-0,30 mentre nelle aree urbane l'albedo è tipicamente più basso con valori prossimi a 0,05.

L'assenza di vegetazione, aspetto tipico delle aree urbanizzate, influisce sull'enfaticizzazione della radiazione emessa dal suolo nell'atmosfera circostante contribuendo anch'essa ad accrescere l'intensità del fenomeno.

Diversi studi hanno mostrato l'effetto di mitigazione dell'UHI attraverso l'aumento della superficie di aree vegetate all'interno delle aree urbane, rilevando come il verde urbano possa contenerne la temperatura superficiale entro i 20 °C e che l'ombreggiamento assicurato dagli alberi possa ridurre globalmente la temperatura dell'aria di 5-7 °C, migliorando così il comfort microclimatico [11].

1.3.3. Le strategie di mitigazione del fenomeno urbano

Per ridurre l'anomalia termica urbana bisogna agire sui singoli componenti che costituiscono il bilancio energetico superficie al fine di avvicinare la temperatura urbana a quella rurale.

In sintesi gli interventi mitigativi dovrebbero operare al fine di ridurre:

- *il flusso di calore immagazzinato nella struttura urbana ΔQ_S* , tramite modifica della geometria urbana e attraverso l'utilizzo di materiali con minor ammettenza termica;
- *la radiazione netta Q^** , aumentando l'albedo delle superfici e modificando la geometria degli edifici;
- *il rapporto di Bowen β* , cioè trasformare parte del flusso di calore sensibile Q_H in flusso di calore latente Q_E , aumentando la permeabilità delle superfici e la presenza di vegetazione;
- *il flusso di calore antropogenico Q_F* , limitando i consumi di energia elettrica, diminuendo il traffico veicolare e migliorando l'efficienza energetica.



Figura 18 - Schema strategie di mitigazione (Elaborazione personale su dati L'adattamento delle città ai cambiamenti climatici)

Intervenire sulla geometria urbana appare una circostanza piuttosto complessa, pertanto, l'applicazione degli opportuni valori di orientamento, di aspect ratio e di sky view factor è un aspetto fondamentale in fase di pianificazione urbanistica e durante gli interventi di nuove costruzioni.

Ciò non toglie che la mitigazione dell'UHI può avvenire anche all'interno di aree già urbanizzate.

Nel mitigare l'effetto isola di calore bisogna considerare che il fenomeno è fortemente influenzato da fattori specifici della località e pertanto non esistono interventi universali da poter applicare a tutti gli insediamenti urbani.

Rizwan et al. forniscono un quadro delle principali approcci di ricerca presenti in letteratura relativi agli strumenti di indagine e alle misure di mitigazione (cfr. **Tabella 8**) [22].

Tabella 8 - Principali misure di mitigazione con indicazione della riduzione massima della temperatura e possibile risparmio energetico (fonte: A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island)

<i>Misure di mitigazione</i>	<i>Riduzione massima di temperatura</i> [°C]	<i>Risparmi ottenuti</i> [%]	<i>Reference</i>
Vegetazione, colori chiari delle superfici orizzontali e tetti freddi	3	-	Rosenfield et al., 1998
Piantumazione e vegetazione	1,6	-	Tong et al., 2005
Piantumazione e vegetazione	1,5	-	Ca et al., 1998
Riduzione del calore antropogenico e piantumazione e vegetazione	1,2	40	Kikegawa et al., 2006
Piantumazione e vegetazione	1,3	25	Ashie et al., 1999
Piantumazione e vegetazione	-	10	Yu and Hien, 2006
Ventilazione	-	10	Kolokotroni et al., 2006
Vegetazione e correzione albedo	2,0	10	Taha et al., 1999
Spegnimento condizionatori	1,0	6	Kikegawa et al., 2003
Piantumazione e vegetazione	-	-	Spronken-Smith et al., 2000
Riduzione del calore antropogenico e miglioramento della progettazione	-	-	Urano et al., 1999
Raffreddamento a spruzzo in copertura	13-17 (in superficie)	40	Jain and Rao, 1974
Flusso d'acqua sopra il tetto	-	-	Sodha et al., 1980
Ristagno d'acqua sul tetto e movimentazione di un flusso d'acqua sopra il tetto	-	-	Tiwari et al., 1982
Schermature e materiali riflettenti, aumento degli spazi aperti, riduzione della produzione di calore dagli edifici	-	-	Yamamoto, 2006
Tetti verdi e riflettenti	-	-	Takebayashi and Moriyama, 2007
Umidificazione e aumento dell'albedo	-	-	Ihara et al., 2008
Pensiline fotovoltaiche	-	-	Golden et al., 2007

L'aumento delle temperature nelle aree urbane dovute all'UHI riduce tanto il comfort interno delle abitazioni quanto il comfort esterno e la qualità ambientale.

Per fronteggiare le condizioni di discomfort interno, dovuto alle alte temperature, si interviene molto spesso con l'utilizzo di sistemi di raffrescamento che comportano un aumento dell'energia d'uso e alte emissioni di gas serra. Le previsioni di crescita del consumo di energia per il raffrescamento sono sostenute dal rapporto dell'IPCC che ha dimostrato come nei prossimi anni è previsto un aumento delle notti tropicali e delle giornate calde nelle aree mediterranee [3]. Inoltre,

nelle stesse aree, si prevede un crescente utilizzo dei sistemi di raffrescamento anche nel periodo autunnale e primaverile [32].

Tra gli interventi da attuare per mitigare il cambiamento climatico, oltre a sforzi che mirano a interventi tecnico-progettuali, sono richiesti sforzi in ambito socio-ambientale. Alcuni studi, infatti, sottolineano l'importanza di campagne di educazione informazione della popolazione nel conseguire una maggiore resilienza ai cambiamenti climatici [33].

2. IL RUOLO DELL'INVOLUCRO NELLA QUESTIONE ENERGETICO-AMBIENTALE

2.1. L'IMPORTANZA DEL SETTORE EDILE NEL CAMBIAMENTO CLIMATICO

2.1.1. *L'impatto del settore edile*

Le aree urbane occupano il 2-3% della superficie del pianeta ed ospitano oltre la metà della popolazione mondiale. Il trend attuale dell'incremento demografico porta a pensare che nel prossimo futuro circa il 70% della popolazione arriverà a stabilizzarsi nelle aree urbane [19] contribuendo così ad accrescere l'impatto del settore.

Sebbene le aree urbane occupino una superficie limitata del pianeta ad esse è attribuito il 75% del consumo delle risorse globali e il 75% delle emissioni globali. Nella transazione verso una società a basse emissioni di carbonio, resiliente e sostenibile, gli edifici coprono un ruolo centrale in quanto, nella maggior parte dei paesi industrializzati, essi sono tra le maggiori fonti di gas serra GHG [34].

Nel 2019 il consumo energetico del settore edilizio a livello globale si attesta al 35% mentre le emissioni in termini di CO₂ costituiscono il 38% delle emissioni globali (cfr. **Figura 19**).

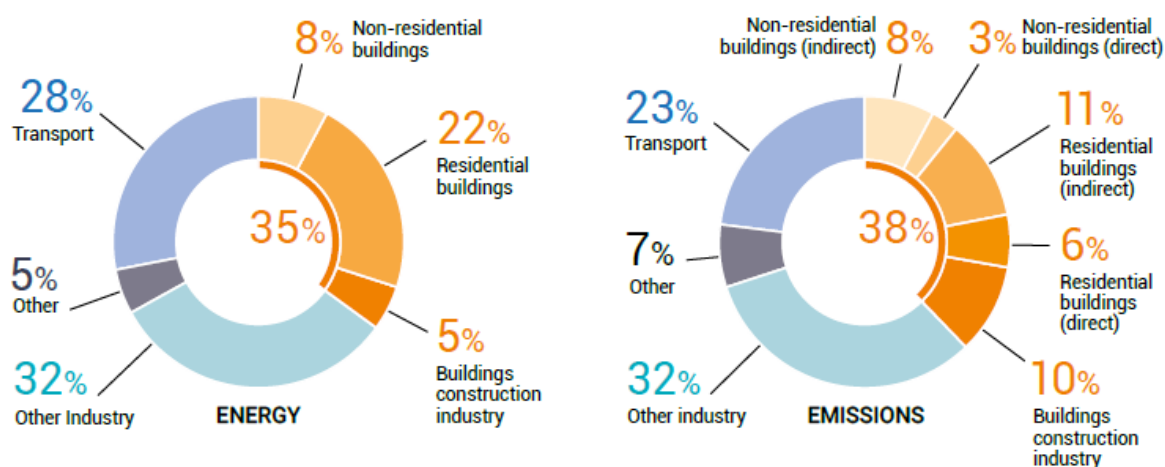


Figura 19 - Consumi globali di energia finale ed emissioni di diossido di carbonio del settore delle costruzioni edile nel 2019 (Fonte: IEA 2020d; IEA 2020b)

In Europa il settore dell'edilizia è il responsabile del 40% dei consumi energetici e del 36% delle emissioni di CO₂, inoltre, il 35% del patrimonio immobiliare europeo ha più di 50 anni e il 75% dell'intero patrimonio immobiliare è inefficiente sotto il profilo energetico.

Dall'analisi del trend storico dei dati inerenti al settore edile si osserva che, sebbene il contributo delle emissioni globali sia calato rispetto al 2018, a seguito dell'incremento delle emissioni del settore dei trasporti, il contributo diretto e indiretto delle emissioni relative agli aspetti energetici nel 2019 è pari a 10,1 Gt CO₂.

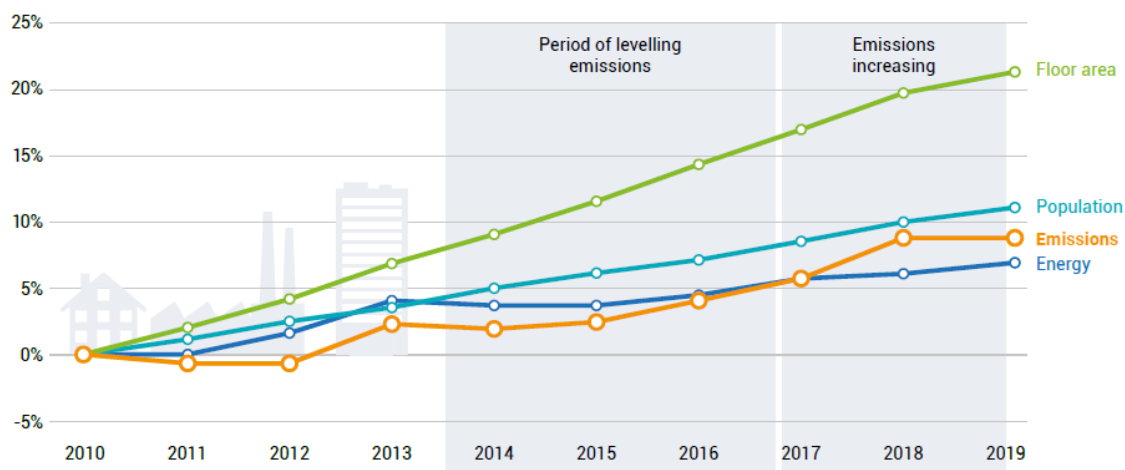


Figura 20 - Cambiamento nei driver globali delle tendenze nell'energia degli edifici e nelle emissioni 2010-2019 (Fonte: IEA 2020b)

Tale valore è da considerarsi come il livello più alto mai registrato per il settore edile, inoltre esso rappresenta un punto di svolta dopo l'appiattimento dei consumi avvenuto nel periodo tra il 2013 e il 2016 (cfr **Figura 20**).

L'aumento della domanda energetica degli edifici e dei loro processi costruttivi è dovuto principalmente a seguito del migliore accesso all'energia da parte dei paesi in via di sviluppo e dal maggiore utilizzo dei dispositivi domestici che consumano energia.

Il consumo finale di energia negli edifici è cresciuto a 128 EJ nel 2019. Il settore dell'HVAC degli edifici e l'utilizzo degli elettrodomestici guidano i consumi del settore edile. Anche l'uso di combustibili fossili connesso al settore edile è aumentato nel 2019 con tasso di crescita pari a 0,7% dal 2010. Le conseguenze dirette a questi trend di crescita è l'aumento delle emissioni dirette degli edifici che nel 2019 hanno raggiunto il +5% rispetto al 2010.

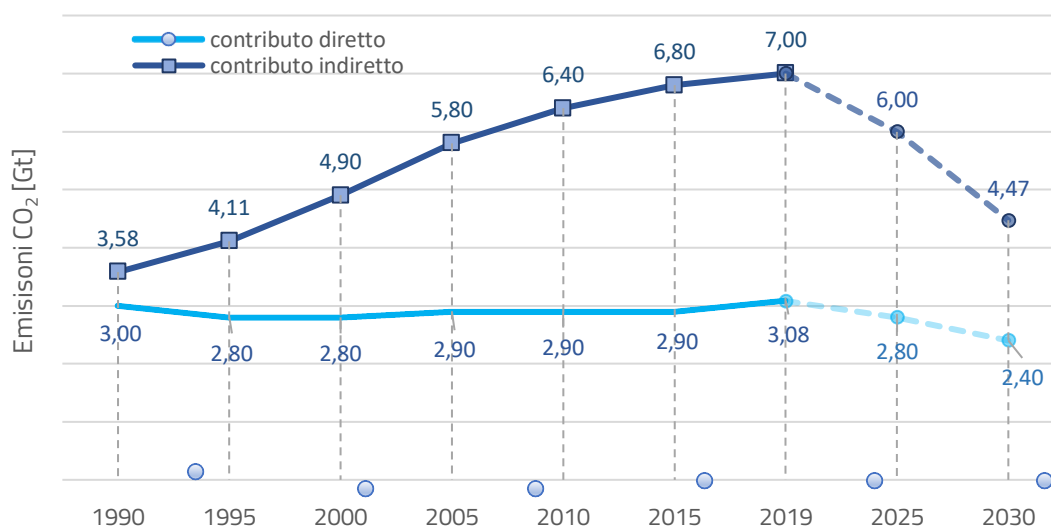


Figura 21 - IEA, Emissioni di CO₂ legate all'energia nel settore degli edifici nello scenario di sviluppo sostenibile, 2000-2030, IEA, Parigi [https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/buildings-sector-energy-related-CO₂-emissioni-nello-scenario-di-sviluppo-sostenibile-2000-2030](https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/buildings-sector-energy-related-CO2-emissioni-nello-scenario-di-sviluppo-sostenibile-2000-2030)

La crescita dei consumi connessa all'aumento della domanda energetica registrata a partire dal 2016 rappresenta un cambio di direzione rispetto ai valori del plateau delle emissioni del triennio 2013-2016. Gli eventi meteorologici estremi (ondate di calore) e periodici, come il riscaldamento del sistema oceanico conosciuto come El-Niño, hanno contribuito in maniera significativa alla crescita dei consumi energetici degli edifici.

L'intensità energetica del settore (espressa in uso finale di energia per m²) è diminuita costantemente dal 2010 con un tasso compreso tra 0,5 e 1%, tuttavia, tale valore è inferiore alla crescita media annua della superficie calpestabile che si mantiene costante dal 2010 ed è pari a 2,5%. Tale aspetto implica una mancanza di efficienza con cui si interviene oggi sugli edifici esistenti a livello globale, infatti, l'evoluzione delle norme energetiche non segue la continua espansione dei paesi emergenti e il tasso degli interventi di ristrutturazione nei paesi già consolidati non è adeguato agli obiettivi di sostenibilità ambientale (SDS).

La superficie costruita negli edifici in tutto il mondo è aumentata di circa il 65% dal 2000, raggiungendo quasi 245 miliardi di m² nel 2019. Tuttavia, considerando l'utilizzo medio di energia per unità di superficie, nel 2019 è avvenuta una riduzione di circa il 25% rispetto al consumo registrato nel 2000.

Tale dato sottolinea che gli attuali progressi nell'efficienza energetica hanno solo compensato parzialmente l'incremento della superficie costruita. Il tasso di rinnovamento energetico del patrimonio edilizio esistente è pari al 2% all'anno, con riduzioni medie dell'intensità energetica generalmente non superiori al 15%. Per raggiungere gli obiettivi degli scenari di sviluppo sostenibile

(SDS), tuttavia, le ristrutturazioni energetiche devono ridurre l'attuale intensità energetica del 30-50%.

Per raggiungere tale obiettivo è necessario adottare un triplice approccio al problema come suggerito dall'IEA (Rapporto). Per ridurre l'intensità energetica del settore edile bisogna lavorare su tre distinti livelli di intervento: ridurre il fabbisogno energetico, ridurre il consumo energetico, fornire soluzioni energetiche pulite.

Tale strategia presuppone un supporto sostanziale da parte degli organi politici, i quali dovranno fornire strumenti e misure economiche che incoraggino il rinnovamento del patrimonio edilizio esistente ed incentivino la realizzazione di nuove costruzioni energeticamente efficienti.

L'involucro edilizio, influisce sul bilancio termico dell'edificio, in quanto gli elementi che lo costituiscono partecipano sia alla trasmissione termica che all'accumulo e al rilascio di calore durante le stagioni. La funzione dell'involucro dal punto di vista termico è quella di ridurre le dispersioni di calore dall'interno verso l'esterno nel periodo invernale e di contenere il flusso di calore dall'esterno verso l'interno durante il periodo estivo.

In altre parole l'involucro edilizio è la fonte principale delle dispersioni che avvengono nell'edificio e le strutture opache verticali, data la loro ampia superficie di interfaccia con l'esterno, sono quelle maggiormente responsabili dei fenomeni di dispersioni.

2.1.2. Le esigenze di rinnovamento

I codici energetici definiscono lo standard per la costruzione di edifici con migliori prestazioni energetiche e sono il metodo più comune per apportare significative riduzioni in termini di consumo energetico degli edifici. Tuttavia ad oggi 2 paesi su 3 sono sprovvisti o stanno sviluppando un codice energetico degli edifici obbligatorio o volontario e circa il 45% dei regolamenti edilizi di tali paesi copre una parte limitata del settore (cfr. **Figura 22**).

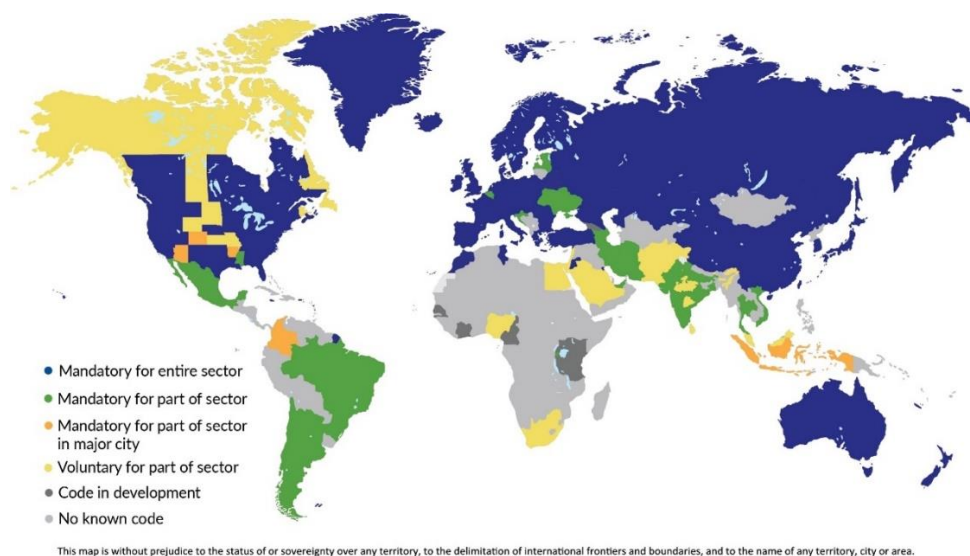


Figura 22 – Quadro internazionale dei codici energetici esistenti

L'austerità del panorama internazionale è accentuata dal divario oggi esistente tra i paesi OCSE e i paesi emergenti (cfr. **Figura 22**), inoltre, laddove i codici energetici degli edifici siano già in vigore, è necessario un aggiornamento degli standard che rifletta lo stato dell'arte delle pratiche di costruzione, dei materiali e delle tecnologie alla luce degli accordi di Parigi.

Molti paesi stanno attualmente revisionando i propri codici energetici per aumentare il rigore dei requisiti prestazionali degli edifici. In questo contesto è possibile inserire le recenti manovre politiche europee.

La situazione europea relativa alla efficienza energetica degli edifici è attualmente regolata da direttive comunitarie che ne affidano l'attuazione dei contenuti ai singoli Stati membri. Per comprendere la base normativa che accumuna la normativa degli Stati europei, inclusa l'Italia, è stato ricreato l'exkursus storico delle direttive comunitarie che hanno segnato l'evoluzione dei codici energetici degli edifici europei.



*Direttiva 2002/91/CE*⁵ Prima norma di definizione delle prestazioni energetiche dell'edilizia (**EPBD**);

Direttiva 2009/28/CE Misure per la promozione dell'uso di energia da fonti rinnovabili;

Direttiva 2010/31/UE Seconda norma di ridefinizione delle prestazioni energetiche nell'edilizia (**EPBD 2°**) che introduce gli edifici a energia quasi zero (NZEB);

Direttiva 2012/27/UE Misure per la promozione dell'efficienza energetica al fine di garantire il conseguimento dell'obiettivo principale dell'UE di ottenere un'efficienza energetica del 20% entro il 2020;

Direttiva 2018/844/UE Terza norma di ridefinizione delle prestazioni energetiche nell'edilizia (**EPBD 3°**) che modifica la direttiva 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia e la direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica.

Il quadro normativo ad oggi si avvale della pubblicazione di due raccomandazioni sulla ristrutturazione (2019/786) e sull'ammodernamento (2019/1019) in cui la Commissione Europea

⁵ La prima direttiva europea sul tema del rendimento energetico degli edifici è databile nel 1992 (Direttiva 2002/91/CE). Tale norma aveva il duplice obiettivo di incrementare le azioni volte al risparmio energetico e di ridurre il divario esistente tra gli stati membri. La norma, pertanto, pone le basi per una metodologia di definizione di standard minimi comuni di prestazione energetica lasciando di fatto la scelta degli standard ai singoli stati membri. La Direttiva 2002/91/CE pone le sue basi per un metodo di calcolo "integrato" che tiene conto delle condizioni climatiche, dell'orientamento, degli impianti di condizionamento presenti e della coibentazione delle strutture. La norma, inoltre, introduce l'attestato di certificazione energetica, elemento diventato obbligatorio per le compravendite di immobili.

manifesta il suo impegno a lavorare a stretto contatto con gli Stati membri nel recepimento e nell'attuazione efficace della direttiva sulle EPBD.

Le raccomandazioni della CE si collocano all'interno del percorso normativo, finalizzato al raggiungimento di un parco di edifici a basse e zero emissioni entro il 2050, modulato su tabelle di marcia nazionali con tappe e indicatori di avanzamento interni, nonché sostenuto da finanziamenti e investimenti pubblici e privati.

Recentemente l'CE ha pubblicato la COM 662/2020 in cui delinea una nuova strategia denominata *Renovation Wave - Un'onda di rinnovamento per l'Europa: rendere più verdi i nostri edifici, creare posti di lavoro, migliorare la vita* con l'obiettivo di raddoppiare il tasso annuo di rinnovamento energetico nei prossimi dieci anni.

L'ondata di ristrutturazioni prevista per l'Europa non si limita a rendere gli edifici esistenti meno energivori e climaticamente neutri, ma è in grado di innescare una grande trasformazione delle nostre città e dell'ambiente edificato.

Nel programma di rinnovamento edilizio la Commissione Europea ha lanciato "Level(s)", un quadro volontario in materia di valutazione sostenibile per il settore edile.

L'obiettivo di Level (s) è quello di aumentare il rigore dei propri codici energetici basandosi su un nuovo approccio metodologico per la valutazione delle prestazioni di sostenibilità degli edifici che tenga conto dell'intero ciclo di vita.



Figura 23 - Logo ufficiale del progetto comunitario Level (s)

La valutazione Level (s) prevede l'introduzione di indicatori della sostenibilità appositamente sviluppati per le esigenze del settore edile.

Gli indici o "livelli" possono essere utilizzati anche da sistemi di valutazione e certificazione per assicurarsi che i loro criteri riflettano le priorità più importanti per l'economia circolare a livello europeo. La formulazione di criteri comune nella valutazione della sostenibilità dell'edificio rende più facile la comparazione dei dati di edifici diversi fornendo, in tal modo, elementi di valutazione immediati per i responsabili degli Enti pubblici.

Gli elementi di valutazione si dividono in tre aree: utilizzo delle risorse e prestazioni ambientali durante il ciclo di vita di un edificio, salute e comfort e costo, valore e rischio. Ciascuna delle tre aree ha il proprio set di indicatori relativi alla sostenibilità ambientale, sociale ed economica a lungo termine di un edificio. Il progetto è sotto osservazione e precede la



collaborazione sinergica con il World Green Building Council Europe (WGBC) per l'avvio della fase di test su larga scala e dovrebbe essere disponibile entro il 2022.

2.1.3. L'involucro edilizio

A oggi, gli obiettivi che sono stati proposti con gli accordi di Parigi, sono ben lontani dall'essere raggiunti: il tasso di rinnovamento energetico del patrimonio edilizio esistente nel 2019 è pari al 2% con una riduzione dell'intensità generica media annua inferiore al 15%.

Lo scopo della strategia di rinnovamento del patrimonio edilizio avviata con il *Green Deal* europeo dal 2019 è di ridurre il consumo di energia e di risorse primarie, così da migliorare la qualità della vita delle persone e ridurre le emissioni di gas serra. A supporto di questa strategia è fondamentale la digitalizzazione che aiuterà a intensificare il riutilizzo e il riciclaggio dei materiali. La vera sfida nel rinnovamento edilizio sarà non compromettere le esigenze di comfort termico [35].

La *Renovation wave* pone un maggior interesse verso edifici in grado di consumare meno energia. Esistono diverse tecnologie in grado di ridurre il consumo energetico degli edifici e queste si possono dividere in tecnologie di tipo attive e passive.

Un'esauritiva elencazione delle principali tecnologie oggi disponibili è stata compiuta da Cabeza e Chàfer il cui risultato è mostrato nella **Tabella 9** [36].

Tabella 9 - Strategie passive e attive per la riduzione dei consumi energetici [36].

<i>Area di interesse</i>	<i>Tecnologia</i>
<i>Miglioramento dell'involucro</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Isolamento termico • Tenuta all'aria • Massa termica • Coperture orizzontali riflettenti/verdi • Sistemi di ombreggiamento attivo • Nuovi materiali/avanzati/sostenibili
<i>Miglioramento delle aperture/vetri</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Vetri selettivi • Vetri avanzati • Vetri elettrocromici
<i>Condizioni interne</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Condizioni di progettazione interna • Carichi termici interni • Controllo dell'occupazione
<i>Riscaldamento, ventilazione e aria condizionata (HVAC)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Ventilazione naturale • Caldai a biomassa • Pompa di calore ad aria • Pompa di calore geotermica • Ventilazione meccanica e recupero di calore • Teleriscaldamento e teleraffrescamento • Solare termico

<i>Energia</i>	<ul style="list-style-type: none">• Solare fotovoltaico• Celle a combustibile
<i>HVAC e potenza</i>	<ul style="list-style-type: none">• Energia solare ibrida fotovoltaico-termico• Generazione di micro-eolico• Micro-combinazione di calore ed energia• Ottimizzatori di tensione• Controllo avanzato
<i>Illuminazione</i>	<ul style="list-style-type: none">• Illuminazione efficiente• Illuminazione LED
<i>Elettrodomestici</i>	<ul style="list-style-type: none">• Apparecchi a basso consumo energetico• IOT

Nel presente lavoro è stato posto l'interesse verso le tecnologie passive riguardanti l'involucro edilizio.

Diversi autori concordano che i parametri dell'involucro edilizio influenzano le prestazioni energetiche degli edifici, infatti, l'involucro edilizio è considerato un elemento critico per il miglioramento delle prestazioni termiche degli edifici in quanto esso rappresenta il 50-60 % del trasferimento di calore totale [37]. L'involucro edilizio è tipicamente costituito da componenti opachi, trasparenti o dalla combinazione di componenti opachi e trasparenti. Le proprietà dei materiali di tali componenti condizionano la modalità di trasmissione dell'energia solare. I componenti trasparenti, le vetrate, consentono di servirsi del guadagno di luce solare diurna mentre i componenti opachi permettono di beneficiare del guadagno indiretto. Ne consegue che i sistemi HVAC sono fortemente influenzati da tali parametri.

Negli edifici isolati se la riduzione dell'energia richiesta dagli edifici durante la fase di esercizio è superiore alla energia utilizzata per la produzione degli elementi che compongono l'involucro si ottiene un bilancio energetico netto positivo e al contempo si ottiene una riduzione delle emissioni di GHG [38]. Per tali ragioni i governi degli Stati europei dovrebbero ampliare la ricerca sugli involucri edilizi ad alte prestazioni che hanno una maggiore capacità termica e uno strato isolante più sottile, e che hanno anche una migliore capacità di adattarsi ai cambiamenti e alle diverse esigenze [34].

2.2. LE PRESTAZIONI ENERGETICHE ED AMBIENTALI DEGLI EDIFICI

2.2.1. Evoluzione legislativa e normativa

A livello europeo ad oggi sono state emanate tre importanti direttive con la finalità di governare il comparto dell'efficientamento energetico degli edifici per il raggiungimento degli obiettivi energetici e ambientali dell'UE. Queste direttive prendono il nome di EPBD (*Energy Performance of Building Directive*) e sono di carattere volontario.

Il recepimento dei contenuti delle direttive comunitarie è affidato ai singoli stati membri dell'Unione Europea: l'Italia, con l'intento di recepire i contenuti di ciascuna direttiva ha emanato diverse norme di cui l'ultima nel giugno 2020 (cfr. **Figura 24**).

Contestualmente alle direttive comunitarie il CEN (*European Committee for Standardization*) ha sviluppato dei mandati da cui discendono i "pacchetti" normativi emanati dall'UNI - Ente Italiano di Normazione. L'emanazione delle prime direttive sull'EPB hanno avuto come conseguenza la produzione delle norme UNI/TS 11300 e delle norme UNI serie 52000 di cui fa parte la UNI 52016-1 relativa al calcolo orario dinamico degli edifici.

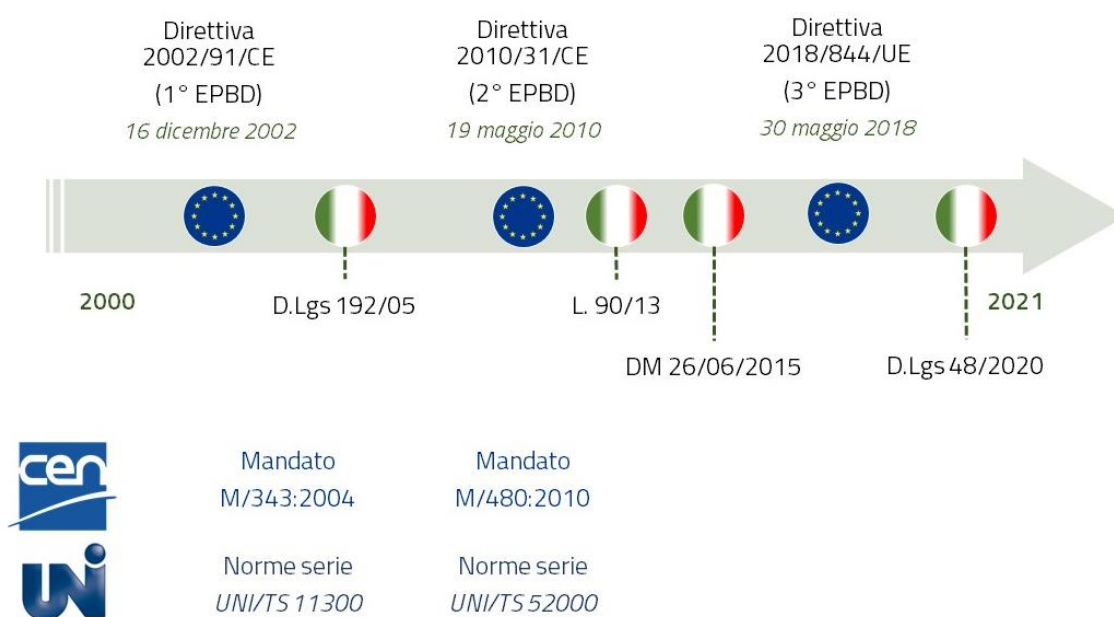


Figura 24 – Excursus storico dell'evoluzione normativa delle prestazioni energetiche degli edifici

Il recepimento delle direttive comunitarie è stato un processo piuttosto lento per tutti gli Stati membri dell'UE. L'Italia è stato uno dei primi paesi ad emanare una norma in materia di emissioni energetiche degli edifici in risposta alla Direttiva 2002/91/CE: il D.Lgs 192/2005, il quale a seguito delle modifiche apportate dal decreto correttivo D.Lgs 311/2006, fornisce il quadro normativo sul tema della prestazione energetica nell'edilizia.

Nel 2009 viene pubblicato il D.P.R. n.59, il quale definisce i criteri generali, le metodologie di calcolo e i requisiti minimi per la prestazione energetica degli edifici e degli impianti termici per la climatizzazione invernale e per la preparazione dell'acqua calda per usi igienici sanitari, oltre le metodologie di calcolo e i requisiti minimi per la prestazione energetica degli impianti termici per la climatizzazione estiva e, limitatamente al terziario, per l'illuminazione artificiale degli edifici; vengono quindi indicate univocamente le procedure di calcolo nazionali.

Il D.M. 26/06/2009 recante le «Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici» (entrato in vigore il 25/07/2009) rende obbligatorio su tutto il territorio nazionale la certificazione energetica, come prevista dalla Direttiva 2002/91/CE, effettuata da un soggetto indipendente.

Con il D. Lgs. 28/2011, inoltre, è reso obbligatorio in tutti gli annunci commerciali e di vendita l'indice di prestazione energetica contenuta nell'Attestato di Prestazione Energetica (APE).

Nel 2013 viene recepita la Direttiva 2010/21/UE (EBPD 2) con il D.L. 63/2013 che, oltre a porre fine alle procedure di infrazione avviate dalla CE a seguito della possibilità di autodichiarazione della classe G da parte del proprietario, introduce nuove regole per l'efficienza energetica del patrimonio edilizio esistente rendendo obbligatorio l'APE. Il decreto legge venne convertito con modificazioni in legge L.90/2013 e nello stesso anno vengono emanati:

- *DPR 74/2013* relativo ai criteri di esercizio e manutenzione degli impianti di climatizzazione degli edifici;
- *DPR 75/2013* guardante i criteri di accreditamento per esperti e organismi per la certificazione energetica degli edifici.

Infine nel 2015 è stato pubblicato il D.M. 26/06/2015 che aggiorna le linee guida nazionali per la certificazione energetica, il D.M. 26/06/2009, e contestualmente lo schema e le modalità per la compilazione della relazione tecnica al fine di applicare i criteri minimi di efficienza energetica per gli edifici.

In seguito alla direttiva UE 2018/844 (EBPD 3) sulla prestazione energetica in edilizia e sull'importanza di realizzare economie di scala, condividere le migliori pratiche per ottenere un impatto più profondo in tutto il continente, è stato emanato dal D.Lgs 48/2020 che definisce i criteri nazionali per la predisposizione della strategia di ristrutturazione a lungo termine del parco immobiliare.

A seguito di questo complesso apparato normativo emerge la necessità assoluta di regolare i consumi degli edifici nel prossimo futuro. In questa nuova logica di intervento l'involucro assume un ruolo centrale nel perseguimento dell'obiettivo di abbattere le emissioni di GHG degli edifici del 60% e il loro consumo energetico del 14% entro il 2030 (IP/20/1835).

2.2.2. *Le certificazioni ambientali per gli edifici italiani*

Il settore delle costruzioni è una delle attività che gravano maggiormente sul carico delle emissioni inquinanti in atmosfera, circa 38%. Oltre all'eccessivo contenuto di energia consumata durante l'intero processo realizzativo, il settore delle demolizioni e costruzioni edili (D&C) è responsabile della produzione di rifiuti a cui spesso sono associati elevati costi di smaltimento.

In Italia dal 1° ottobre 2015 sono quindi in vigore le nuove regole sui requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e per la redazione dell'APE. Le prestazioni energetiche degli immobili italiani

sono identificate dall'Indice di Prestazione Energetica globale non rinnovabile dell'edificio $EP_{gl,nren}$ e dal confronto con una scala di classi prefissate (cfr. **Tabella 10**).

L'APE, tramite l'attribuzione agli immobili di specifiche classi prestazionali e di specifiche raccomandazioni per la riqualificazione energetica, è uno strumento di orientamento del mercato verso edifici a migliore qualità energetica.

Tabella 10 - Scala di classificazione degli edifici italiani

	Classe A4	$\leq 0,40 EP_{gl,nren,rif,standard}$
$0,40 EP_{gl,nren,rif,standard} <$	Classe A3	$\leq 0,60 EP_{gl,nren,rif,standard}$
$0,60 EP_{gl,nren,rif,standard} <$	Classe A2	$\leq 0,80 EP_{gl,nren,rif,standard}$
$0,80 EP_{gl,nren,rif,standard} <$	Classe A1	$\leq 1,00 EP_{gl,nren,rif,standard}$
$1,00 EP_{gl,nren,rif,standard} <$	Classe B	$\leq 1,20 EP_{gl,nren,rif,standard}$
$1,20 EP_{gl,nren,rif,standard} <$	Classe C	$\leq 1,50 EP_{gl,nren,rif,standard}$
$1,50 EP_{gl,nren,rif,standard} <$	Classe D	$\leq 2,00 EP_{gl,nren,rif,standard}$
$2,00 EP_{gl,nren,rif,standard} <$	Classe E	$\leq 2,60 EP_{gl,nren,rif,standard}$
$2,60 EP_{gl,nren,rif,standard} <$	Classe F	$\leq 3,50 EP_{gl,nren,rif,standard}$
	Classe G	$> 3,50 EP_{gl,nren,rif,standard}$

Con l'obiettivo di ridurre l'impatto ambientale degli edifici sono state introdotte le certificazioni ambientali, ovvero delle certificazioni attestanti il livello di sostenibilità raggiunto dall'edificio. La sostenibilità del progetto è valutata mediante un approccio globale all'organismo edilizio e valutano il suo ciclo di vita (LCA). Attualmente esistono diversi protocolli di certificazione basati su un sistema di punteggio in base al raggiungimento di diverse categorie oggetto di valutazione.

2.2.3. Prestazioni energetiche di un edificio

Alla base della valutazione di impatto energetico e di emissione di GHG degli edifici vi è la necessità di normare il calcolo del fabbisogno energetico degli edifici e dei livelli di comfort termico interno.

Ad oggi è possibile calcolare il fabbisogno invernale ed estivo avvalendosi del metodo statico introdotto dalla norma UNI TS 11300. La norma trae spunto dalle considerazioni tecniche introdotte con la prima direttiva sull'EPB e rappresenta un metodo efficace per il calcolo del riscaldamento e raffrescamento degli edifici nel caso di soluzioni tecniche semplici mentre il metodo presenta evidenti limiti nel caso di edifici complessi con carichi termici variabili nel tempo.

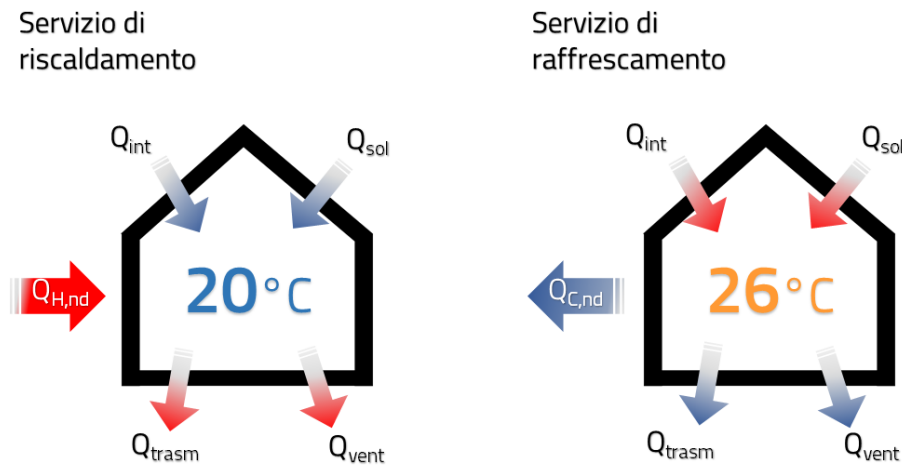


Figura 25 – Schema del bilancio dei carichi termici in regime statico riferiti alla stagione invernale ed estiva

Una delle principali limitazioni del metodo statico è costituito dalla mancanza di valutare l'effetto degli accumuli termici all'interno delle stratigrafie che compongono l'involucro edilizio.

Inoltre, le variazioni dei dati climatici esterni e delle condizioni interne producono dei valori riferiti al servizio di raffrescamento poco affidabili rispetto alle condizioni reali. Analizzando il bilancio energetico estivo con il passo mensile, infatti, tende a sottostimare il carico termico estivo. Ciò può essere reso maggiormente visibile osservando le temperature esterne su base mensile riferiti ai diversi capoluoghi di provincia sul territorio nazionale in cui la temperatura esterna nel periodo estivo risulta essere prossima a 26 °C o in alcuni casi al di sotto del *set point*.

La norma UNI EN ISO 52016 rientra nelle normative sull'EPB (*Energy Performance of Buildings*) che hanno come obiettivo l'armonizzazione della metodologia per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici a livello europeo.

La normativa definisce le procedure di calcolo dei fabbisogni energetici per il riscaldamento e il raffrescamento su base oraria o mensile e il metodo di calcolo delle temperature interne e dei carichi termici sensibili e latenti su base oraria.

Così come per le altre norme EPB, la UNI EN ISO 52016 definisce le zone termiche e i dati in input essenziali per l'applicazione del metodo di calcolo. In particolare sia il modello di calcolo che i dati in input sono elencati nelle appendici A e B della norma.

La normativa fornisce una revisione del metodo di calcolo mensile e introduce il calcolo dinamico con passo orario. Il calcolo orario permette di valutare sia gli accumuli interni alle stratigrafie dell'involucro sia di valutare con maggiore attenzione l'apporto del carico interno (Q_{int}) generato dalle attività interne.

Gli strati della parete vengono divisi in un numero finito di nodi che vengono associate ad un circuito formato da resistenze e capacità costituendo gli elementi basilari del modello RC.

Nell'approccio alle differenze finite del sistema RC, ogni elemento edilizio è diviso in un numero finito di strati paralleli e il differenziale di tempo è approssimato come un intervallo di tempo discreto come illustrato nella **Figura 26**.

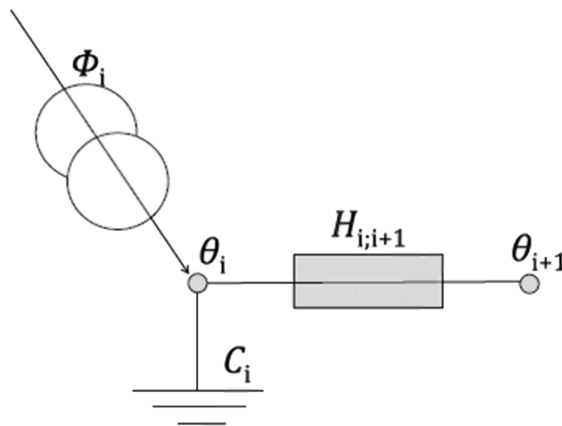


Figura 26 – Schematizzazione del sistema RC

La distribuzione spaziale delle temperature in funzione del tempo è approssimata al differenziale della variazione di temperatura in un intervallo di tempo finito come nella seguente equazione:

$$\frac{C_i}{\Delta t} \cdot (\vartheta_{i,t} - \vartheta_{i,t-1}) = H_{i,i} \cdot (\vartheta_{i+1,t} - \vartheta_{i,t}) + \Phi_{i,t} \quad \text{Eq. (11)}$$

In cui:

- $\vartheta_{i,t}$ è la temperatura al nodo i all'intervallo di tempo t , in °C;
- $\vartheta_{i+1,t}$ è la temperatura al nodo $i+1$ all'intervallo di tempo t , in °C;
- $H_{i,i}$ è la conduttanza termica tra il nodo i e il nodo $i+1$, in W/K;
- C_i è la capacità termica del nodo i , in J / kg K;
- $\Phi_{i,t}$ è la potenza immessa nel nodo i nell'intervallo di tempo t , in W;
- Δt è l'intervallo di tempo, in s.

Ciascun elemento costruttivo analizzato è suddiviso in un insieme di strati paralleli separati da nodi, inclusi due strati superficiali per i nodi di estremità interno ed esterno. Nei nodi estremi, corrispondenti al nodo interno ed esterno, è applicata l'equazione di conservazione dell'energia in cui confluiscono la radiazione solare assorbita, l'emissione di radiazione a onde lunghe verso la volta celeste, la parte radiativa degli apporti interni ed i carichi di riscaldamento e raffrescamento (cfr. **Figura 27**).

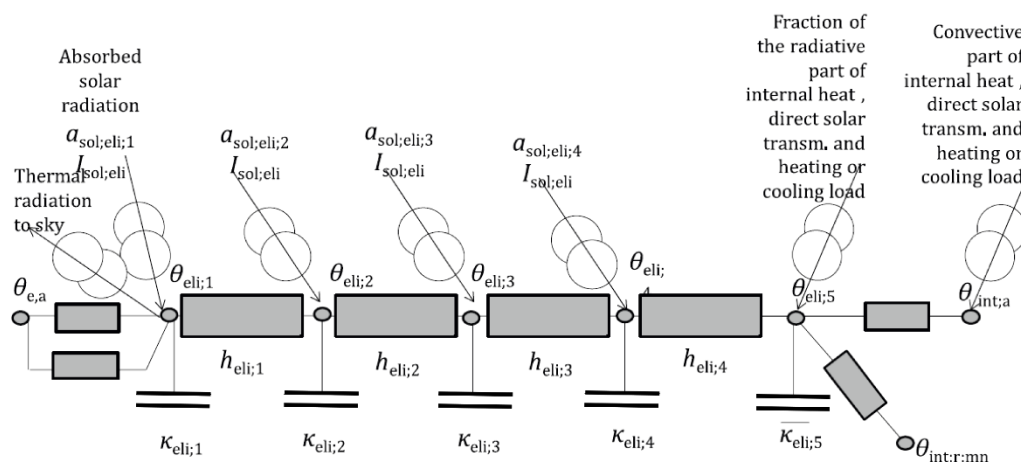


Figura 27 – Schema degli elementi costruttivi dell'edificio nel modello RC

Secondo le disposizioni della norma UNI EN ISO 52016-1, le chiusure verticali opache vengono associate ad un sistema di 5 nodi o 4 strati. In particolare la chiusura verticale opaca è definita dalla posizione della sua capacità termica e vengono suddivise in 5 classi o tipi come illustrato in **Figura 28**.

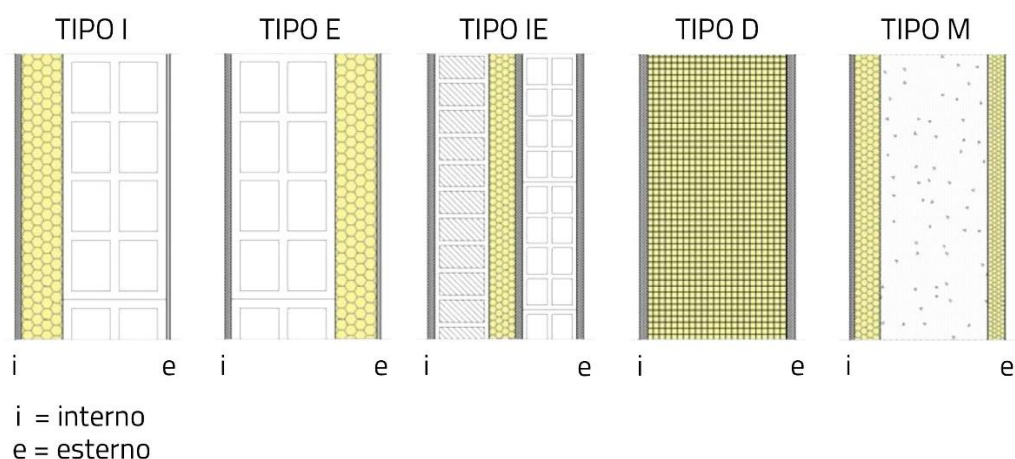


Figura 28 – Classificazione delle chiusure verticali-

La procedura di calcolo prevede che per ciascuna ora e zona termica vengano definiti la temperatura operativa interna effettiva e il relativo carico di riscaldamento o raffrescamento. Tale procedura si articola in 5 fasi come nel seguito riepilogate:

- Fase 1 Si verifica il tipo di carico termico (riscaldamento o raffrescamento);
- Fase 2 Si stabilisce se il set point di temperatura di riscaldamento e raffrescamento e contestualmente si calcola il relativo carico termico;
- Fase 3 Si controlla se la potenza di riscaldamento/raffrescamento sia sufficiente allo scopo.
- Fase 4 Nel caso in cui la potenza di riscaldamento/raffrescamento sia insufficiente si procede al calcolo della temperatura interna

Fase 5 Si calcola il carico energetico effettivo per il riscaldamento/raffrescamento.

La temperatura interna della zona termica dell'edificio, pertanto, viene calcolata con un passo orario attraverso un sistema di equazione che descrivono la trasmissione del calore in regime transitorio tra l'ambiente esterno e interno attraverso i componenti dell'involucro che delimitano la zona.

La procedura del calcolo presuppone alcune semplificazioni quali:

- la temperatura dell'aria uniforme in tutte le zone termiche;
- le superfici della zona termica sono isotermitiche;
- la conduzione del calore attraverso gli elementi che compongono la stanza (ad esclusione degli elementi verso il terreno) è monodimensionale;
- i ponti termici sono accoppiati termicamente alla temperatura dell'aria esterna ed interna;
- la temperatura radiante media viene calcolata come media ponderata delle temperature superficiali interne per l'area di ciascun componente.

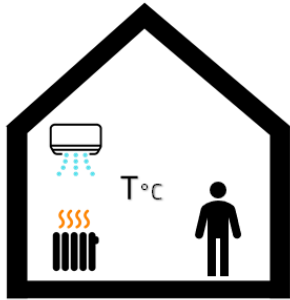
2.2.4. Comfort abitativo di un edificio

La variazione delle temperature esterne, oltre ad asseverare l'effetto isola di calore, comporta una variazione del clima interno e del comfort abitativo dell'edificio. Nel valutare le prestazioni dell'involucro dell'edificio, in un contesto in cui l'adattabilità agli effetti dei cambiamenti climatici appare oggi di centrale interesse, bisogna considerare la capacità di mantenere entro dei limiti normativi la vivibilità degli spazi interni.

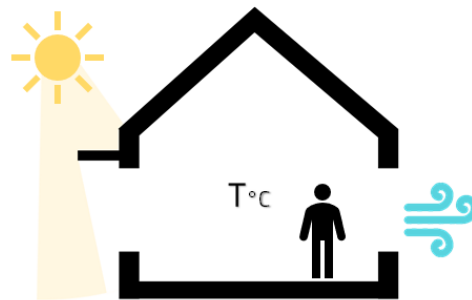
Il flusso energetico che incide sull'involucro, per le leggi di trasmissione del calore, genera delle variazioni delle temperature superficiali interne che, se non opportunamente considerate, possono determinare delle asimmetrie della temperatura radiante delle superfici interne. La definizione di un buon clima interno è importante per il buon risultato di un edificio, non solo perché mette a proprio agio i suoi occupanti, ma anche perché determina il suo consumo energetico e quindi influenzerà la sua sostenibilità [39].

A partire dagli anni '60 sono stati sviluppati diversi indici di comfort termico e ad oggi è possibile utilizzare due differenti approcci progettuali al problema. Le norme UNI EN ISO 7730:2006 e ASHRAE 55:32007 si occupano di quantificare il comfort interno di un ambiente confinato mentre la norma UNI ISO 15251:2008 quantifica la capacità di comfort termico adattiva nel caso di ambienti aperti senza il funzionamento del sistema HVAC. Entrambi i metodi, dunque, hanno la finalità di esprimere in termini numerici alcuni aspetti legati alla sfera emotiva dell'uomo.

Ambiente confinato
UNI EN ISO 7730:2006



Capacità adattiva
UNI EN ISO 15251:2008



Nel primo caso l'ergonomia degli ambienti interni è determinata mediante la definizione analitica e l'interpretazione del benessere termico con il calcolo degli indici PMV (*predicted mean vote*) e PPD (*predicted percentage of dissatisfied*).

Il PMV rappresenta il giudizio medio che darebbe un gruppo di individui adulti sani, privi di particolari necessità termiche, esposto all'ambiente termico in esame. L'indice PMV è espresso in una scala termica a 7 punti e, pertanto, fornisce un giudizio medio sulla condizione di comfort o discomfort globale relativa al corpo umano nella sua interezza.

Il PPD, invece, costituisce la percentuale di insoddisfatti alle condizioni termiche a cui il gruppo di individui è stato sottoposto. La relazione tra i due parametri è schematizzata nella curva visibile nella **Figura 29**.

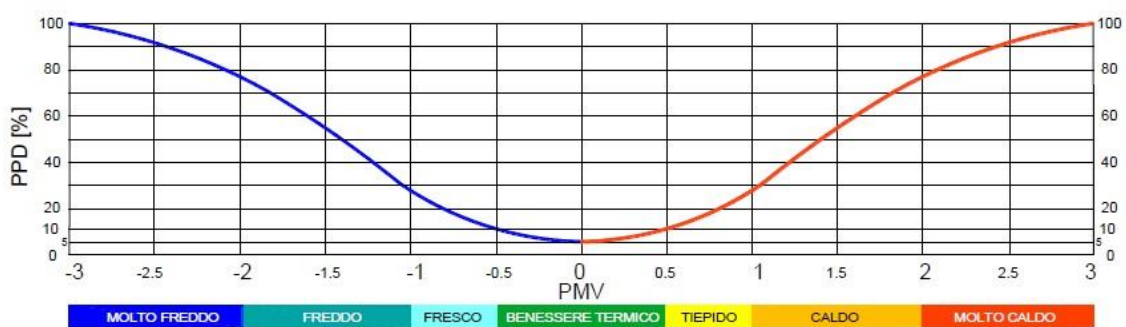


Figura 29 – Grafico della valutazione del comfort termico negli ambienti moderati (fonte: <https://www.sicurezzascanavino.it/News/187/Analizziamo-i-Rischi---Il-rischio-Microclima>)

Tra le cause del discomfort degli ambienti interni sussistono anche degli indici locali DR e PD che esprimono la percentuale di insoddisfazione rispetto a:

- correnti d'aria (DR);
- differenze verticali tra la temperatura della testa e delle caviglie (PD);
- pavimento troppo caldo o troppo freddo (PD);

- asimmetria della temperatura radiante (PD).

La valutazione del comfort termico dell'ambiente è determinata dal calcolo degli indici globali e locali e dalla verifica che i valori rientrino all'interno delle categorie limite indicate dalla norma (cfr **Tabella 11**).

Tabella 11 – Valori di accettabilità delle condizioni di discomfort

Categoria	Parametri globali		Parametri locali			
	PMV [%]	PPD	DR [%] Correnti d'aria	PD [%] differenza verticale della temperatura dell'aria	PD [%] pavimento troppo caldo o troppo freddo	PD [%] asimmetria della temperatura radiante
A	$-0,2 < PMV < +0,2$	< 6	< 10	< 3	< 10	< 5
B	$-0,5 < PMV < +0,5$	< 10	< 20	< 5	< 10	< 5
C	$-0,7 < PMV < +0,7$	< 15	< 30	< 10	< 10	< 10

L'approccio adattivo al comfort termico si basa sulla naturale tendenza delle persone ad adattarsi alle mutevoli condizioni dell'ambiente in cui si trovano e sull'assunto che il clima esterno influenzi il comfort interno. L'ipotesi adattativa, pertanto, prevede che fattori specifici al contesto ambientale come l'accesso ai controlli ambientali e la storia termica passata, possano influenzare le aspettative e le preferenze termiche degli occupanti dell'edificio.

L'approccio adattivo permette dunque di valutare le prestazioni dell'ambiente senza l'ausilio di sistemi di controllo della temperatura di natura elettrica.

Le aspettative di comfort delineate dalla norma europea EN 15251 sono:

Categoria **Descrizione**

I	Alto livello di aspettativa. È consigliato per spazi occupati da persone molto sensibili e fragili con esigenze speciali come portatori di handicap, malati, bambini molto piccoli e anziani
II	Livello di aspettativa normale
III	Un livello di aspettativa accettabile e moderato

Il calcolo delle condizioni di comfort adattivo dipende da due parametri dalla temperatura operante e dalla temperatura di comfort. La temperatura operante dipende quindi dalla temperatura dell'aria interna e dalle temperature superficiali della zona termica, da cui si ricava la temperatura media

radiante. Questi parametri possono essere calcolati in accordo con UNI EN ISO 52016-1 in regime dinamico con passo orario e in assenza di impianti.

La temperatura operante θ_{op} può essere calcolata mediante la seguente equazione:

$$\theta_{op} = \frac{\theta_{aria,t} + \theta_{mr}}{2} \quad \text{Eq. (12)}$$

In cui:

temperatura media radiante;

$\theta_{aria,t}$ temperatura aria interna all'istante t.

La temperatura di comfort interno θ_{co} , invece, è descritta nella UNI EN ISO 15251 come:

$$\theta_{co} = 18,8 + (0,33 \cdot \theta_{est}) \quad \text{Eq. (13)}$$

In cui θ_{est} è la temperatura esterna.

A seguito del calcolo orario definito della norma UNI EN ISO 52016, ogni istante di tempo t all'interno di un ambiente può essere valutato in funzione alla coppia di valori (T operativa, T esterna). L'analisi oraria dinamica del comfort interno, pertanto, può essere letta all'interno del grafico mostrato in **figura 30**.

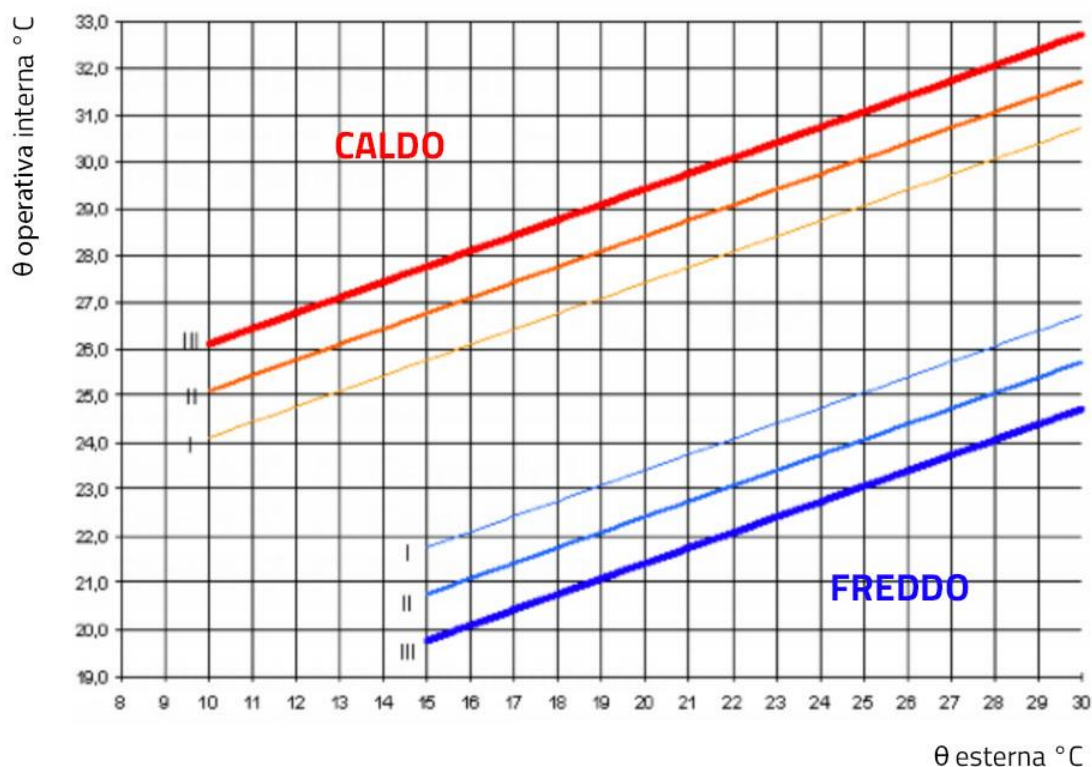


Figura 30 – Grafico della temperatura operativa interna e della temperatura esterna

2.2.5. Analisi del ciclo di vita LCA

L'impegno del settore edile verso la mitigazione degli impatti ambientali provocati dai processi di costruzione si ispira al LCT (*Life Cycle Thinking*). Il *Life Cycle Thinking* è un approccio che valuta l'intero ciclo di vita di un prodotto o di un processo, dalla nascita alla morte, per valutare tutti gli input e gli output che questo scambia con la sfera ambientale, sociale ed economica, per ridurne l'impatto su di esse. Tale approccio nasce negli Stati Uniti verso la fine degli anni '60 ed approda in Europa il decennio successivo, trovando inizialmente applicazione nel settore industriale al fine di fronteggiare la prima crisi energetica e del consumo delle risorse (Baldo, 2005). Solo qualche decennio più tardi approderà nel settore edile con la definizione di una metodologia di valutazione dell'impatto ambientale di un prodotto o di un edificio definita LCA (*Life Cycle Assessment*). La valutazione LCA si occupa di fare un bilancio dei flussi di materia ed energia che coinvolgono un edificio dalla produzione dei materiali di costruzione, passando per la costruzione dell'edificio, l'uso e la gestione durante la vita utile, fino alla sua dismissione o al suo riutilizzo [40].

Il diffondersi dell'utilizzo del metodo LCA è anche conseguenza della richiesta di applicazione all'interno di norme e regolamenti internazionali. Il regolamento Europeo EMAS II⁶ e la Norma ISO

⁶ Regolamento CE n. 1836/93 Environmental Management and Audit Scheme, riveduto e aggiornato

14001 edizione 2004 lo individuano come strumento scientificamente adatto per il miglioramento del sistema di gestione ambientale delle aziende, mentre il Regolamento Europeo Eco-label e le norme ISO della serie 14020, dedicata all'*Environmental labels and declarations*, designano LCA come unico strumento per riconoscere la dichiarazione ambientale sui prodotti.

Inoltre le norme ISO della serie 14040 (ISO 1404X) propongono le linee guida per l'esecuzione della LCA. Sono composte da quattro norme, ciascuna dedicata a una parte specifica della metodologia. Di seguito l'elenco delle norme così come recepite dall'UNI [41].

- UNI EN 14040: Gestione ambientale-Valutazione del ciclo di vita-Principi e quadro di riferimento (1998)
- UNI EN 14041: Gestione ambientale-Valutazione del ciclo di vita-Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione e analisi dell'inventario (1999)
- UNI EN 14042: Gestione ambientale-Valutazione del ciclo di vita-Valutazione dell'impatto del ciclo di vita (2001)
- UNI EN 14043: Gestione ambientale-Valutazione del ciclo di vita-Interpretazione del ciclo di vita (2001)

LCA edilizio di definisce come il processo di identificazione dei carichi ambientali, attraverso l'analisi e la quantificazione di energia e materiali utilizzati e di emissioni rilasciate nell'ambiente. Lo scopo della valutazione è individuare le possibilità di riduzione degli impatti e il miglioramento e ottimizzazione del comportamento ambientale (SETAC,1993)⁷.

La metodologia da seguire per la realizzazione di una LCA proposta dalla norma ISO 14040 si struttura in 4 fasi:

1. **Goal and Scope Definition**, è una fase preliminare dello studio in cui vengono individuati gli scopi, le unità funzionali, i confini del sistema, il fabbisogno di dati, le assunzioni e i limiti;
2. **Life Cycle Inventory Analysis, LCI**, è la fase in cui si identificano e si quantificano i flussi in ingresso e in uscita del sistema in oggetto lungo la sua intera vita. Questo richiede la definizione di tutti i materiali e processi necessari alla vita del sistema dalla sua nascita alla sua morte. Si redige un inventario, mediante schede informative, in cui si raccolgono i dati relative alle materie prime impiegate, i trasporti, le emissioni gassose in atmosfera, le emissioni nel terreno e in acqua, i rifiuti solidi, l'energia termica ed elettrica impiegata. La parte più complessa di questa fase è il reperimento delle informazioni che a oggi può essere facilitato grazie al supporto delle aziende produttrici, di database e software dedicati;

nel Regolamento n. 761/2001 (EMAS II).

⁷ SETAC (1993) – *Guidelines for Life-Cycle Assessment: a code of practice* – SETAC, Brussels 1993

3. **Life Cycle Impact Assessment, LCIA**, è la fase in cui i dati raccolti vengono valutati in termini di impatto sull'ambiente, ovvero le conseguenze sull'ambiente dovuti ai rilasci e al consumo di materie prime. Per svolgere questa valutazione i dati raccolti nella fase precedente vengono suddivisi in categorie di impatti ambientali (*Impact Categories*). Le categorie di impatto devono essere caratterizzate seguendo la ISO 14042. Tra i documenti più completi e attendibili per la scelta delle categorie di impatto, vi è il *Working Group on LCIA*, elaborato dalla SETAC (*The Society on Environmental Toxicology and Chemistry*), relativo alle tipologie di impatto ambientale delle attività antropiche: impoverimento di risorse abiotiche, impoverimento delle risorse biotiche, uso del territorio, produzione di rifiuti solidi, effetto serra, impoverimento dell'ozono stratosferico, ecotossicità, tossicità per l'uomo, acidificazione, arricchimenti in nutrienti.

Nel settore delle costruzioni la norma EN 15804:2012 fornisce una classificazione per gli indicatori ambientali per LCA di prodotti edilizi ed edifici classificandoli come segue:

a. Indicatori di impatto ambientale

- *Global warming potential* (GWP) – Potenziale di surriscaldamento del globo;
- *Depletion potential of the stratospheric ozone layer* (ODP) – Assottigliamento potenziale dello strato di ozono stratosferico;
- *Acidification potential of land and water* (AP) – Potenziale di acidificazione di suolo e acqua;
- *Eutrophication potential* (EP) – Potenziale di eutrofizzazione;
- *Summersmog potential* (POCP) – Potenziale di formazione dello smog estivo;
- *Abiotic depletion of non fossil resources (ADP elements)* – Riduzione abiotica delle risorse non fossili;
- *Abiotic depletion of fossil resources (ADP fossil fuels)* – Riduzione abiotica delle risorse fossili;

b. Indicatori energetici

- *Non renewable primary energy, excluding feedstock* – Energia primaria non rinnovabile, esclusi I feedstock;
- *Input of nonrenewable feedstock* – Immissione di feedstock non rinnovabile;
- *Total input of non renewable primary energy* – Totale delle immissioni di energia primaria non rinnovabile;
- *Renewable primary energy, excluding feedstock* – Energia primaria rinnovabile, esclusi feedstock;
- *Input of renewable feedstock* – Immissione di feedstock rinnovabile;

- *Total input of renewable primary energy* – Totale delle immissioni di energia primaria rinnovabile;
- c. Indicatori dell'acqua
- *Input of net fresh water* – Immissione di acqua fresca e pulita;
- d. Uso di materiali riciclati
- *Input of secondary material* – Immissione di materiali secondari;
 - *Input of renewable secondary fuel* – Immissione di combustili secondari rinnovabili;
 - *Input of non renewable secondary fuel* – Immissione di combustili secondari non rinnovabili;
- e. Indicatori dei rifiuti
- *Hazardous waste disposed* – Raccolta di rifiuti pericolosi;
 - *Non hazardous waste disposed* – Raccolta di rifiuti non pericolosi;
 - *Radioactive waste disposed* – Raccolta di rifiuti radioattivi;
- f. Materiali esportati dal ciclo di vita considerato
- *Components for re-use* – Componente per il riuso;
 - *Materials for recycling* – Materiali per il riciclo
 - *Materials for energy recovery* – Materiali per il recupero del vettore energetico;
 - *Exported energy* – Energia esportata.
4. ***Life Cycle Interpretation***, è la fase conclusiva in cui si interpretano i dati delle analisi, evidenziando le criticità riscontrate e proponendo dei miglioramenti da applicare al sistema oggetto di studio.



Figura 31- Metodologia dell'LCA

Svolgere LCA in ambito architettonico implica complessità di non poco spessore. Intanto alla base vi dev'essere la consapevolezza che lo strumento LCA dev'essere alla base della fase progettuale e accompagnarla durante tutto l'iter decisionale, e non essere solo una verifica finale o il mezzo per ottenere un riconoscimento. Non si esclude che una volta definito il settore coinvolto e i confini del sistema da analizzare si può ricorrere ad una metodologia semplificata e spesso comparativa. Ciò dipende anche dal livello da analizzare: scala del materiale, scala del componente, scala del sub sistema tecnologico, scala dell'edificio.

Le diverse scale di semplificazione dell'LCA sono:

- LCA di prodotto o semplificata: si limita a valutare solo il prodotto in esame (materiale, componente o edificio) escludendo i processi secondari di produzione in termini di materie prime, dei combustibili e dell'energia elettrica utilizzati. Un processo così semplificato può compromettere la completezza e veridicità del risultato ottenuto;
- LCA a tecnologia allargata o di selezione: si valuta oltre al processo oggetto di analisi anche i processi secondari ad esso correlati. Principalmente attinge informazioni in banche dati e si usa per avere una valutazione rapida dei miglioramenti da apportare;
- LCA completa o dettagliata: ogni fase viene svolta in modo dettagliato, prendendo in esame tanto il processo principale che i secondari, considerando per ciascuno tutte le categorie di impatto. È il metodo più oneroso ma fornisce maggiore affidabilità dei risultati ottenuti [40].

Il livello b è il più usato nel settore edile sia per lo studio di un singolo processo sia per avere una comparazione da processi diversi.

2.2.6. L'CAM in edilizia

Il dodicesimo obiettivo (SDG12) dell'Agenda 30 dell'ONU prende spunto dal principio di consumo e produzione sostenibile (SCP) definito prioritario durante il simposio tenutosi ad Oslo nel 1994⁸.

In ambito europeo l'obiettivo di consumo sostenibile è perseguito dalle strategie a lungo termine di riduzione dei consumi che coinvolgono i piani d'azione quali il *Green Public Procurement* (GPP) e la Politica integrata dei prodotti (IPP).

Il GPP è uno strumento politico ambientale finalizzato allo sviluppo di un mercato di prodotti e servizi a ridotto impatto ambientale. La pratica del GPP è indirizzata agli appalti pubblici, che in Europa costituiscono il 18% del PIL (dati ISPRA), in quanto le pubbliche amministrazioni, ricoprendo il duplice ruolo di cliente e consumatore, acquisiscono un forte impulso nell'orientamento dei mercati.

L'utilizzo dei GPP, in sinergia con gli IPP, può produrre significativi risultati ambientali strategici quali la riduzione delle emissioni di gas climalteranti, della produzione di rifiuto o la produzione di sostanze nocive [42].

La politica integrata di prodotto è un approccio basato sull'applicazione della metodologia LCA ai prodotti al fine di quantificarne e migliorarne l'impatto ambientale.

L'IPP, pertanto, si configura come uno strumento integrato al GPP, entrambi avente la finalità di rafforzare ed orientare le politiche ambientali riguardanti i prodotti e servizi e di promuovere lo sviluppo di un mercato sostenibile incentrato sul sistema dell'analisi del ciclo di vita (LCA).

Per attuare il GPP è stato introdotto il sistema di etichettatura ambientale atto a "certificare" le informazioni sul ciclo di vita dei prodotti mediante le quali è possibile conoscere le caratteristiche ecologiche dei beni e servizi acquistati.

Le etichettature ambientali presenti nel mercato comunitario si suddividono in:

- *Etichette ambientali* (ISO Tipo I) ovvero etichette ecologiche volontarie basate su un sistema multicriteria che considera l'intero ciclo di vita del prodotto, sottoposte a certificazione esterna da parte di un ente indipendente (disciplinate dalla Norma ISO 14024);
- *Autodichiarazioni ambientali* (ISO Tipo II), ovvero etichette ecologiche che riportano autodichiarazioni ambientali da parte di produttori, importatori o distributori di prodotti,

⁸ Durante l'incontro venne riconosciuta l'importanza dell'uso sostenibile di servizi e prodotti, che rispondono ai bisogni di base e portano una migliore qualità della vita in grado di ridurre al minimo l'uso di risorse naturali e materiali tossici nonché le emissioni di rifiuti e inquinanti durante il ciclo di vita del servizio o del prodotto.




senza che vi sia l'intervento di un organismo indipendente di certificazione (disciplinate dalla Norma ISO 14021);

- Dichiarazioni Ambientali di Prodotto (ISO Tipo III), Etichette ecologiche che riportano dichiarazioni basate su parametri stabiliti e che contengono una quantificazione degli impatti ambientali associati al ciclo di vita del prodotto calcolato attraverso un sistema LCA. Sono sottoposte a un controllo indipendente e presentate in forma chiara e confrontabile (disciplinate dalla Norma ISO 14025);
- *Marchi ed etichettature obbligatori;*
- *Certificazioni di sistemi di gestione ambientale* di attività e servizi influenti sulle caratteristiche del prodotto acquistato.

Tali etichette rappresentano nell'ambito del GPP il riferimento principale per l'individuazione di "criteri" afferenti alle tipologie di prodotti; i criteri ambientali previsti dalle Etichette di Tipo I possono essere infatti utilizzati come requisiti ambientali e il possesso dell'etichetta come mezzo di prova del soddisfacimento del criterio.

In questa categoria di certificazione rientrano le etichette ambientali operative e diffuse sul mercato europeo e mondiale (cfr. **Tabella 12**).

Tabella 12 - Principali etichette ambientali di tipo I utilizzati nell'UE

Etichetta ambientali tipo I	Area di utilizzo in UE	Logo
EU Ecolabel	Unione europea (UE 27)	
Ecolabel Nordic Swan	Paesi scandinavi (Svezia, Danimarca, Norvegia, Finlandia e Islanda)	
Der Blauer Engel	Germania	

L'Ecolabel Europeo rappresenta un riferimento basilare perché fornisce garanzia del fatto che i relativi criteri siano tracciati sulle migliori caratteristiche ambientali riscontrate nei prodotti diffusi nell'intero mercato comunitario e, in considerazione dell'assenza di un marchio nazionale, costituisce il principale riferimento per l'Italia.

Le autodichiarazioni ambientali di Tipo II si differenziano dalle altre tipologie di etichettatura perché rappresentano lo standard di riferimento per una limitata tipologia di impatto ambientale o per determinati settori merceologici e costituiscono uno strumento conoscitivo molto utile per la definizione di requisiti ambientali e per la verifica degli stessi.

Le Dichiarazioni Ambientali di Prodotto di tipo III (EPD o DAP), sono etichette basate su dati ambientali quantificati per un determinato prodotto e sono generalmente basati su parametri pre-determinati contenuti nelle ISO 14040 (LCA) ed ulteriori informazioni di tipo qualitativo.

In particolare le DAP o EPD si basano su specifici protocolli chiamati PCR (*Product Category Rules*) che forniscono regole e requisiti utili per rendere confrontabili tra loro i dati e le informazioni relative a una data categoria merceologica. Questo rende possibile il confronto delle performance ambientali di prodotti diversi appartenenti alla stessa categoria merceologica. Nelle procedure di gara riferite al settore edile i DAP o EPD assumono un maggior valore in quanto risulta difficile trovare l'applicazione di etichette di Tipo I.

All'interno del PAN GPP trova applicazione la definizione dei Criteri Ambientali Minimi (CAM) ovvero i requisiti ambientali ed ecologici definiti dal Ministero dell'Ambiente della Tutela del Territorio della Transazione Ecologica (MATTE) per le varie fasi del processo di acquisto. L'applicazione dei CAM in Italia da parte delle Stazioni Appaltanti è stata resa obbligatoria a seguito del codice degli appalti D.Lgs 50/2016 e successive modifiche ed integrazioni.

Ad oggi il regolamento dei CAM riferiti all'edilizia è soggetto ai contenuti del DM 11 ottobre 2017 che ne fornisce le indicazioni di carattere generale per gli appalti di nuova costruzione, ristrutturazione, manutenzione, riqualificazione energetica di edifici e per la gestione dei cantieri.

Il DM 11 ottobre 2017, inoltre, fornisce indicazioni e suggerimenti alle Stazioni Appaltanti per l'acquisto di beni e all'esecuzione dei servizi in appalto. Il documento, inoltre, definisce i "criteri ambientali», tali da migliorare il servizio o il lavoro prestato e assicurare che le prestazioni ambientali siano al di sopra della media del settore.

Per progetti di ristrutturazione di primo livello e per progetti di ristrutturazione di secondo livello di edifici con $S_u \geq 2'500 \text{ m}^2$, a seguito dell'obbligatorietà dei CAM, deve essere condotta una diagnosi energetica, ai sensi della UNI CEI EN 16247, ad opera di un soggetto certificato o da un organismo di valutazione, per individuare la prestazione energetica dell'edificio e le azioni da intraprendere per la riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio.

Per i progetti di ristrutturazione importante di secondo livello di edifici con $S_u < 2'500 \text{ m}^2$ e per i progetti di riqualificazione energetica, deve essere prodotta una valutazione costi/benefici e deve essere supportato dall'APE ai sensi del Dlgs 192/2005.

I progetti degli interventi di nuova costruzione, inclusi gli interventi di demolizione e ricostruzione e quelli di ampliamento di edifici esistenti che abbiano un volume lordo climatizzato superiore al 15% di quello esistente o comunque superiore a 500 m^3 , e degli interventi di ristrutturazione importante di primo livello devono garantire che le seguenti prestazioni:

- H'_T risulti inferiore al corrispondente limite normativo indicati nell'Allegato A del D.lgs. 192/2005;
- $A_{sol,est}/A_{sup\ util}$ risulti inferiore al corrispondente limite normativo indicati nell'Allegato A del D.lgs 192/2005;
- $EP_{H,nd}$, $EP_{C,nd}$ e $EP_{gl,tot}$, risulti inferiore al corrispondente limite calcolati in base all'indice di riferimento;
- η_H , η_W e η_C risultino superiori ai valori delle corrispondenti efficienze indicate per l'edificio di riferimento.

In particolare, per ogni singola struttura opaca dell'involucro esterno vengano garantite le condizioni di comfort termico per gli ambienti interni attraverso il calcolo della capacità termica periodica (Cip), ai sensi della UNI EN ISO 13786:2008, in modo tale che sia superiore a 40 kJ/m²K oppure calcolando la temperatura operante estiva ($T_{o,est}$) e lo scarto in valore assoluto valutato in accordo con la norma UNI EN 15251 (cfr. **Equazione 11**).

$$\Delta T_i = |T_{o,est} - T_{rif}| < 4^\circ C \quad (14)$$

In cui:

- $T_{o,est}$ = temperatura esterna media del giorno più caldo calcolato secondo UNI 10349 parte 2
- $T_{rif} = (0.33 \cdot T_{o,est}) + 18.8$

In merito alle prestazioni dell'involucro edilizio, il D.M. 11/10/2017 obbliga i progettisti all'utilizzo di dispositivi di protezione solare per tutti gli elementi trasparenti dell'involucro con esposizione da sud-sud est e sud-sud ovest. In particolare, al fine del controllo delle radiazioni solari dirette negli ambienti interni le parti trasparenti devono presentare schermature solari di almeno Classe 2⁹ e sistemi di ombreggiamento fissi o mobili verso l'esterno.

Per le prestazioni impiantistiche degli edifici, sia nel caso di nuove costruzioni che negli interventi di ristrutturazione, il decreto prevede che venga eseguita un'equazione sul fabbisogno energetico dell'edificio e il relativo progetto dell'impianto con alimentazione da fonti rinnovabili secondo la percentuale di copertura prevista nell'Allegato 3 del D.Lgs 28/2001. Per l'approvvigionamento idrico degli edifici pubblici il decreto, in linea con il criterio di risparmio delle risorse, consiglia l'utilizzo di sistemi di raccolta delle acque piovane per uso irriguo e/o per l'alimentazione degli scarichi sanitari nel caso di ristrutturazione e ne rende obbligatorio la presenza negli interventi di nuova costruzione.

⁹ Secondo quanto definito nella UNI EN 14501:2006

Per le prestazioni degli ambienti interni invece il decreto stabilisce che tutti gli interventi, siano essi relativi a nuove costruzioni, demolizioni e ricostruzioni o ristrutturazioni, devono garantire un fattore di luce diurna superiore al 2% e garantire l'aerazione naturale diretta in tutti i locali abitabili, tramite superfici apribili in relazione alla superficie calpestabile del locale (almeno 1/8 della superficie del pavimento), con strategie allocative e dimensionali finalizzate a garantire una buona qualità dell'aria interna ¹⁰.

I CAM introducono anche requisiti minimi delle prestazioni relative acustiche passive degli elementi dell'edificio; in particolare per tutti gli intervenenti su edifici ad uso residenziale deve essere garantita almeno la classe II (cfr. **Tabella 13**). Per gli elementi che costituiscono l'involucro, sia trasparenti che opachi, il potere di isolamento deve essere superiore a 40 dB.

Tabella 13 - Classi acustiche secondo la norma di classificazione acustica UNI 11367

Classe	Isolamento acustico normalizzato di facciata	Potere fonoisolante apparente	livello di pressione sonora di calpestio	livello sonoro corretto immesso da impianti a funz. continuo	livello sonoro corretto immesso da impianti a funz. discontinuo
	$D_{2m,nT,w}$ [dB]	R'_w [dB]	L'_{nw} [dB]	$L_{i,c}$ [dB]	$L_{i,d}$ [dB]
I	≥ 43	≥ 56	≤ 53	≤ 25	≤ 30
II	≥ 40	≥ 53	≤ 58	≤ 28	≤ 33
III	≥ 37	≥ 50	≤ 63	≤ 32	≤ 37
IV	≥ 32	≥ 45	≤ 68	≤ 37	≤ 42

Inoltre, al fine di assicurare le condizioni ottimali di benessere termo-igrometrico e di qualità dell'aria interna il decreto stabilisce che bisogna garantire almeno le condizioni di comfort relative alla classe B della norma ISO 7730:2005 in termini di PMV e di PPD (cfr. **Tabella 14**).

Tabella 14 - Classi di benessere termo-igrometrico secondo la norma EN ISO 7730:2005

Categoria	<i>Strato termico complessivo</i>		<i>Discomfort termico locale</i>			
	PPD [%]	PMV	Corrente d'aria	Diff. temperatura verticale	Pavimenti caldi o freddi	Asimmetria radiante

¹⁰ Per garantire una buona qualità dell'aria interna il D.M. 11/10/2017 obbliga ad osservare quanto previsto dalle norme di riferimento, UNI 1039 e Uni 13779, per le gli edifici ad uso residenziale. Per destinazioni d'uso diverse da quelle residenziali i valori dei ricambi d'aria dovranno invece essere ricavati in funzione delle indicazioni tecniche contenute nella norma UNI EN ISO 13779:2008. Nel caso in cui fosse presente un impianto di ventilazione meccanica (VM) il numero di ricambi d'aria deve fare riferimento alla norma UNI 15251:2008 tenendo conto che per i servizi igienici secondari senza aperture dovranno essere provvisti obbligatoriamente di sistemi di aerazione forzata, che garantiscano almeno 5 ricambi l'ora.

			DR [%]	PD [%]	PD [%]	PD [%]
Classe A	< 6	- 0,2 < PMV < 0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
Classe B	< 10	- 0,5 < PMV < 0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
Classe C	< 15	- 0,7 < PMV < 0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

Il decreto sui CAM introduce anche dei parametri minimi relativi ai materiali da utilizzare negli appalti pubblici siano essi inerenti ad interventi di nuova costruzione o ristrutturazione importante di primo e secondo livello.

I materiali utilizzati devono assolvere al duplice criterio della disassemblabilità e del contenuto minimo di materia recuperata o riciclata. Il requisito di disassemblabilità richiede che il professionista, in merito alla procedura di appalto, produca un elenco di tutti i componenti edilizi che compongono l'opera indicandone per ciascuno la percentuale di materiale che è possibile riciclare al termine del ciclo di vita dell'edificio.

Nel caso di nuova realizzazione, in particolare, il decreto, in linea con le politiche ambientali europee, impone che almeno il 50% del peso dei materiali¹¹ rispetto al peso totale dell'edificio deve essere sottoponibile a fine vita a demolizione selettiva o essere avviati verso procedure di riciclo o riutilizzo. Il requisito di disassemblabilità impone altresì che il 15% del peso dei materiali riciclabili e/o riutilizzabili provenga da materiali non strutturali.

Negli interventi di nuova costruzione e/o ristrutturazione, invece, il criterio indica un contenuto minimo di materia recuperata o riciclata all'interno dei materiali che costituiscono l'oggetto edilizio. Per ottemperare tale requisito deve essere soddisfatta una duplice verifica: a livello globale e del singolo materiale.

Per la verifica globale, il progettista deve verificare che il contenuto di materiale riciclato o recuperato deve essere pari ad almeno il 15% del peso valutato sul totale di tutti i materiali utilizzati ed almeno il 5% di questa quantità deve provenire da materiali non strutturali.

Nel calcolo della quantità totale di materiale riciclato il progettista deve dunque assolvere ad un'ulteriore verifica della percentuale minima di materia riciclata o recuperata del singolo materiale. Tale quantità varia in base alla tipologia di materiale (cfr. **Tabella 15**).

Tabella 15 - Prescrizione minime per categorie di materiale contenute nel D.M. 11/10/2017

Materiale	Prescrizione contenuti minimi
<i>Calcestruzzi confezionati in cantiere e preconfezionati</i>	5% sul peso secco del prodotto

¹¹ La verifica viene effettuata dal progettista, il quale, al fine di soddisfare deve escludere dal calcolo il peso dei componenti impiantistici.

<i>Elementi prefabbricati in calcestruzzo</i>	5% in peso di materie riciclate, e/o recuperate, e/o di sottoprodotti.
<i>Laterizi</i>	10% sul peso secco del prodotto
<i>Sostenibilità e legalità del legno</i>	Non esiste una percentuale minima in quanto il legno è un materiale naturale, tuttavia il decreto impone un obbligo sulla provenienza ovvero deve provenire da boschi/foreste gestiti in maniera sostenibile
<i>Ghisa, ferro, acciaio</i>	70% per acciaio da forno elettrico 10% per acciaio da ciclo integrale
<i>Componenti in materie plastiche</i>	30% in peso valutato sul totale di tutti i componenti in materia plastica utilizzata
<i>Tramezzature e controsoffitti</i>	5% in peso di materie riciclate e/o recuperate e/o di sottoprodotti
<i>Pavimenti e rivestimenti</i>	Devono possedere un marchio comunitario attestante la qualità ecologica
<i>Pitture e vernici</i>	Devono possedere un marchio comunitario attestante la qualità ecologica

Il decreto fornisce utili considerazioni ambientali anche per gli isolanti termo-acustici. Il requisito normativo impone che la loro produzione deve avvenire senza l'utilizzo di ritardanti di fiamma che siano oggetto di restrizioni o proibizioni previste da normative nazionali o comunitarie applicabili; non devono essere prodotti con agenti espandenti con un potenziale di riduzione dell'ozono superiore a zero; non devono essere prodotti o formulati utilizzando catalizzatori al piombo quando spruzzati o nel corso della formazione della schiuma di plastica.

Per i principali materiali isolanti il decreto fornisce le quantità minime di materiale riciclato siano essi prodotti in forma di pannelli, applicati a spruzzo o in materassini (cfr. [tabella 16](#)).

Tabella 16 - tabella riepilogativa delle quantità minime CAM inerenti i materiali isolanti

Materiale	pannello	a spruzzo	materassino
cellulosa	--	80%	-
lana di vetro	60%	60%	60%
lana di roccia	15%	15%	15%
perlite espansa	30%	40%	8-10%
fibre in poliestere	60-80%	--	60-80%
poliestere espanso	10-60%	10-60%	--
poliestere estruso	5-45%	--	--
poliuretano espanso	1-10%	1-10%	--
agglomerato in poliuretano	70%	70%	70%
agglomerati in gomma	60%	60%	60%
isolanti riflettenti in alluminio	--	--	15%

Le quantità minime di materiale riciclato e/o recuperato devono essere verificate dalla Stazione Appaltante mediante il possesso delle certificazioni ambientali previste nel PAN GPP. Inoltre, tutti i requisiti trattati in precedenza sono da ritenersi minimi e, pertanto, è prevista un maggior punteggio premiante per l'utilizzo in fase di progettazione di materiali che abbiano prestazioni ambientali superiori.

Tuttavia ad oggi sussistono difficoltà oggettive nel reperimento di materiali conformi ai CAM anche se i numeri [43] indicano che è già in atto una conversione del mercato, infatti, la loro adozione all'interno degli appalti pubblici ha innescato un aumento dell'offerta dei materiali sostenibili da parte dei produttori.

Allo scopo di ridurre l'impatto ambientale sulle risorse naturali e di incentivare l'uso dei materiali riciclati e aumentare il recupero dei rifiuti prodotti dal settore D&C nei casi di ristrutturazione e manutenzione e demolizione, almeno il 70% in peso dei rifiuti non pericolosi generati durante la demolizione di edifici e rimozione di manufatti deve essere avviato a operazioni di preparazione per il riutilizzo, recupero o riciclaggio.

2.2.7. I protocolli di sostenibilità energetico-ambientale

I protocolli di sostenibilità ambientale nascono negli anni '90 con lo scopo di combinare aspetti energetici ed ecologici all'interno del settore edile. Essi si basano su sistemi di *rating*, ovvero procedure di accumulo di "crediti" al fine di acquisire un corrispondente punteggio.

Tali sistemi presentano criteri quantitativi e qualitativi incentrati sul contesto normativo, climatico e culturale dei paesi con l'obiettivo di valutare l'edificio come un sistema complesso nel quale confluiscono diverse relazioni.

I protocolli di sostenibilità nascono dall'esigenza di diffondere la sostenibilità in edilizia, con l'obiettivo di valutarne le prestazioni energetico ambientali e di poter comparare i risultati tra edifici diversi. Attualmente esistono molteplici protocolli di sostenibilità ambientale in base alla regione di interesse. LEED, *Leadership in Energy and Environmental Design*, è un programma di certificazione volontario diffuso in ambito internazionale che può essere applicato a qualsiasi tipo di edificio e concerne il suo intero ciclo di vita. Il sistema di certificazione LEED nasce negli Stati Uniti ed è stato introdotto in Italia nel 2010 dalla GBC Italia (*Green Building Council Italia*).

Attualmente lo standard di certificazione LEED ha raggiunto la versione 4 ed è basato su 7 categorie di valutazione: Trasporto e Ubicazione (LT), Sostenibilità del sito (SS), Efficienza risorse idriche (WE), Energia e Atmosfera (EA), Materiali e Risorse (MR), Qualità degli ambienti interni (IEQ), Innovazione (I). Gli edifici vengono valutati sulla base di un punteggio ottenuto in base ad una checklist che viene periodicamente aggiornata dal GBC. Sulla base del punteggio raggiunto l'edificio raggiunge la sua certificazione. Per gli edifici che raggiungono elevati standard di sostenibilità è possibile ottenere la categoria *silver, gold e platinum* che costituiscono le più alte categorie raggiungibili.

Lo standard di certificazione LEED è incentrato su aspetti normativi americani di difficile applicazione alle diverse realtà italiane, pertanto, traendo spunto dal sistema LEED, il GBC Italia ha introdotto dei protocolli appositamente sviluppati per il mercato e la legislatura nazionale. La famiglia dei protocolli ambientali introdotti da GBC Italia si dividono in; GBC Historic Building, per la sostenibilità del patrimonio edilizio storico, GBC Home per gli edifici residenziali, GBC Quartieri per la progettazione e riqualificazione di aree urbane e il GBC condomini per la progettazione e riqualificazione di complessi residenziali.

Per le abitazioni residenziali si applica il protocollo GBC Home il quale è basato su 7 categorie ambientali: Sostenibilità del sito (SS), Gestione delle acque (GA), Energia e Atmosfera (EA), Materiali e Risorse (MR), Qualità degli ambienti interni (QI), Innovazione e progettazione (IP), Priorità Regionale (PR). Per gli interventi di progettazione o ristrutturazioni di edifici residenziali il protocollo prevede l'assegnazione di un punteggio massimo conseguibile di 110 suddivisi come in **tabella 17**.

Tabella 17 - Suddivisione dei punteggi massimi per il protocollo di certificazione LEED e GBC

<i>Area</i>	<i>Punteggio massimo</i>
Sostenibilità del sito (SS)	22
Gestione delle acque (GA)	12
Energia e Atmosfera (EA)	32
Materiali e Risorse (MR),	14
Qualità degli ambienti interni (QI)	20
TOTALE	100
Innovazione e progettazione (IP)	6
Priorità Regionale (PR)	4
TOTALE PUNTI AGGIUNTIVI	10

In base al punteggio raggiunto è possibile ottenere la valutazione base (da 40 a 49 punti), argento (da 50 a 59 punti), oro (da 60 a 79 punti) e platino (da 80 a 110).

La progettazione virtuosa dell'involucro edilizio permette di ottenere alcuni dei punti necessari per la valutazione positiva dell'edificio. Un'attenta selezione dei materiali nella progettazione dell'involucro a minimizzare il consumo di risorse naturali e di migliorare la qualità degli ambienti interni. Entrambi i protocolli, pertanto, consentono di ottenere delle premialità proporzionali alla percentuale di materiali certificati sul totale costo totale dei prodotti installati permanentemente nel progetto.

L'utilizzo di materiali rinnovabili nella misura superiore al 50% rispetto al costo totale dei materiali utilizzati, oltre ad eventuali materiali in possesso di certificazioni ambientali di prodotto ai sensi delle norme UNI EN ISO 14021, consente di ottenere 4 punti. Inoltre, la presenza di prodotti dotati di un report LCA contenenti i dati in merito al Global Warming Potential consentono di ottenere ulteriori

3 punti. Le prestazioni acustiche dell'involucro edilizio, invece, sono premiate con un massimo di 3 punti per il raggiungimento della classe acustica I.

In definitiva, la scelta dei materiali, il sito della loro produzione e l'innovazione tecnologica nella progettazione dell'involucro di un edificio incidono per un 15% per il raggiungimento della massima certificazione ed il 30% per l'ottenimento della certificazione base.

3. I MATERIALI ISOLANTI BIO-BASED

3.1. INTRODUZIONE

Le politiche internazionali e nazionali inerenti alla risoluzione dei problemi ambientali hanno come obiettivo primario la riduzione dei GHG. Come già discusso, per il settore delle costruzioni edili la riduzione dei GHG è fortemente connessa ad una riduzione dei consumi energetici.

Tuttavia valutare l'impatto ambientale degli edifici con indici riconducibili al comportamento energetico degli edifici non è sufficiente per definire in modo compiuto la loro reale incidenza in termini di emissioni.

L'attenzione al consumo energetico connesso all'utilizzo degli edifici sembra orientare le preoccupazioni solo su un terzo degli impatti ambientali degli edifici [44]. L'adozione dell'LCA come strumento di guida per le scelte progettuali contribuisce ad identificare la soluzione con il minor impatto complessivo su tutto il ciclo di vita dell'edificio. Pertanto, la soluzione più efficiente dal punto di vista ambientale non può essere considerata solo su indici di riduzione energetica ma su molteplici indicatori che valutano il suo impatto durante tutto il ciclo di vita [44].

L'aspetto principale per la riduzione dei consumi energetici degli edifici concerne alle modalità di trasferimento del calore tra ambiente interno ed esterno. Il calore, dunque, si muove in funzione del gradiente termico tra due ambienti in funzione della legge della diffusività termica (α) degli strati che compongono la parete di separazione tra i due ambienti. La diffusività termica (α) costituisce la velocità con cui varia la temperatura nel tempo all'interno di un determinato materiale. Ridurre la diffusività termica della parete, dunque, è la condizione basilare per limitare il passaggio di calore stagionale tra gli ambienti interni ed esterni. La conduttività termica di una parete è direttamente proporzionale alla conducibilità termica (λ) del materiale e inversamente proporzionale al rapporto tra densità (ρ) e capacità termica (C).

L'involucro, come detto, agisce come un elemento passivo che, tramite la corretta progettazione della sua stratigrafia, si oppone ad un rapido trasferimento del calore attraverso gli elementi che lo compongono, garantendo le condizioni termo-igrometriche ottimali degli ambienti interni.

A parità di gradiente termico per ridurre il passaggio di calore tra due ambienti è essenziale operare seguendo due differenti modalità di intervento:

- Ridurre la conducibilità termica (λ), ovvero utilizzare materiali isolanti;
- Aumentare la densità (ρ) e la capacità termica (C) dei materiali.

L'utilizzo di materiali isolanti all'interno degli strati che compongono la stratigrafia dell'involucro è un fattore chiave per il raggiungimento dell'efficienza energetica, specialmente quando l'edificio è situato in siti con condizioni climatiche difficili [45] [46].

Ad un'adeguata strategia di isolamento delle diverse tipologie di edifici consegue un risparmio sostanziale della quantità di energia consumata dagli impianti di HVAC e una riduzione delle emissioni di gas serra [46]. La crescente preoccupazione sul tema delle emissioni degli edifici ha alimentato il flusso della ricerca sul ruolo e sulle prestazioni ambientali dei materiali isolanti.

Aumentare la sostenibilità degli edifici, dunque, significa sia ridurre i consumi che favorire l'adozione di materiali organici che non abbiano impatti negativi sull'ambiente e sulla salute umana [47]. La scelta dei materiali da costruzione influisce fortemente sull'impatto ambientale complessivo dell'edificio, in particolare la selezione dei materiali che costituiscono l'involucro dell'edificio hanno una maggiore influenza in quanto, oltre all'impatto derivante dal loro processo produttivo, regolano i consumi energetici degli edifici.

Considerando la crescente priorità sociale sugli aspetti ambientali i materiali a base biologica (*bio-based*) costituiscono una valida alternativa a quelli oggi presenti sul mercato e ricavati dal carbonio.

La domanda di materiali da costruzione eco-compatibili è in costante ascesa e con essa anche il numero di materiali isolanti ricavati da risorse rinnovabili [48].

L'evoluzione del mercato tedesco degli isolanti termici è stato analizzato da Bozsaky [49], il quale ha riscontrato un effettivo incremento, non ancora sufficiente, dei materiali di origine naturale (cfr. **Tabella 18**).

Tabella 18 - trend del mercato dei materiali isolanti in Germania (Bozsaky, 2019)

<i>Materiale</i>	<i>Mercato</i>					
	1989	1994	1999	2004	2010	2014
MW	59%	60%	58%	54%	53%	50%
EPS	32%	31%	28%	28%	27%	27%
XPS	3%	3%	4%	6%	6%	6%
PUR	5%	4%	4%	5%	5%	5%
Altro	-	1%	1%	1%	1%	1%
Naturali	1%	1%	5%	6%	8%	11%

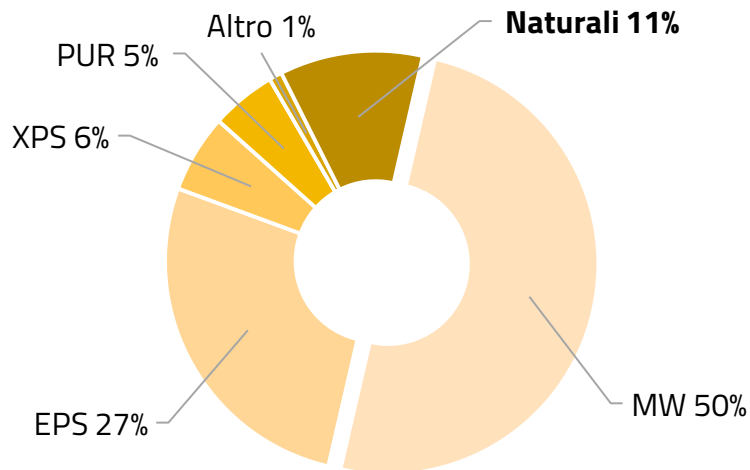


Figura 32 - Mercato dei materiali isolanti tedesco nel 2014 (fonte: Nature-based thermal insulation materials from renewable resources – a state-of-the-art review, Bozsaky 2019)

Essendo il mercato tedesco il più importante nell'ambito dell'UE, lo studio di Bozsaky può essere considerato come un indice dell'evoluzione del mercato europeo.

Analizzando la velocità con cui è cresciuta la percentuale relativa ai materiali naturali è possibile affermare che negli ultimi 15 anni in Europa abbiamo assistito ad una crescita importante di tali materiali.

Alcuni materiali biogenici come la paglia e la canapa sono contraddistinti da bassi valori di conducibilità termica e negli ultimi anni sono cresciuti notevolmente gli studi inerenti alla loro applicazione all'interno degli edifici come strato isolante.

I materiali biogenici mediante la fotosintesi assorbono diossido di carbonio dall'ambiente durante la loro crescita. Tale quantità è stata stimata essere pari al 50% del peso secco del materiale biogenico indagato [50].

Il loro utilizzo nelle facciate degli edifici può essere considerato come un sistema di Carbon Capture and Storage (CCS), pertanto, l'utilizzo di materiali biogenici all'interno dell'involucro edilizio può essere considerato come un sistema di cattura e stoccaggio del carbonio (CCS) e costituisce un intervento di mitigazione dei cambiamenti climatici.

La possibilità di acquisire carbonio combinata ad una crescita sostenibile delle biomasse contribuisce a ridurre le concentrazioni atmosferiche di CO₂, riducendo l'effetto serra del sistema terrestre.

La quantità di anidride carbonica biogenica eventualmente rilasciata a fine vita del materiale è totalmente compensata dalla quantità di CO₂ assorbita durante la crescita, pertanto i materiali organici si configurano come materiali ad impatto nullo [51] [52].

3.2. LE DIVERSE TIPOLOGIE DI MATERIALI ISOLANTI

3.2.1. Breve panoramica delle tipologie di materiali isolanti

Alcuni autori hanno classificato i differenti tipi di isolanti termici in funzione delle proprietà termiche dei materiali [53] [54]:

- Isolanti sottovuoto o riempiti con gas isolanti (VIP) o (GFP)
- Isolanti nano-cellulari tra cui gli aereogel
- Isolanti termici commutabili (PCM)
- Membrane riflettenti
- Isolanti "air based"

I pannelli isolanti sottovuoto (VIP) sono elementi le cui prestazioni isolanti dipendono dall'assenza o dalla riduzione della pressione gassosa all'interno di un nucleo costituito da un materiale poroso aperto. I pannelli VIP sono costituiti da tre parti: nucleo centrale, un essiccante e un foglio di rivestimento.

Il nucleo è sottoposto a valori di pressione compresi tra 0,2 e 3 mbar, a seconda della conduttività termica del materiale che costituisce il nucleo del pannello ed è in grado di raggiungere valori di conducibilità termica estremamente bassi dell'ordine di 0,002-0,004 W /mK.

Diversi autori hanno studiato alcuni aspetti dei pannelli isolanti VIP, tra cui la risoluzione dei ponti termici, la conducibilità, la penetrazione all'interno del nucleo di aria e umidità, l'invecchiamento e la durata, controllo di qualità e integrazione di pannelli isolanti sottovuoto nella costruzione di edifici [55]–[58]. Tuttavia ad oggi il costo e l'impatto del processo produttivo limita l'utilizzo dei pannelli VIP nel settore delle costruzioni.

I pannelli riempiti con gas (GFP) sono applicazioni avanzate dell'isolamento termico: essi sono costituiti da superfici riflettenti alle onde infrarosse (bassa emissività) che racchiudono un volume d'aria a pressione atmosferica o un gas con bassa conducibilità. Per evitare la fuoriuscita del gas le superfici del materiale sono sigillate ermeticamente, le pareti basso emissive, inoltre, permettono di limitare gli scambi convettivi e radiativi.

Alcuni autori hanno riscontrato che le conduttività termiche dei prototipi di GFP sono leggermente superiori rispetto ai valori dei materiali isolanti tradizionali, pertanto, la loro applicazione è oggetto di dibattito [59].

Gli aerogel sono composti in cui la componente liquida del gel, in seguito al passaggio di fase del materiale si trasforma in sostanza gassosa conferendo all'aerogel la sembianza di "nebbia solidificata".

Gli aerogel sono normalmente prodotti da gel di silice sinteticamente amorfo, che a differenza del silicio cristallino, non produce effetti negativi sulla salute.

Gli aerogel in silice sono sostituiti da catene di biossido di silice SiO_2 all'interno di un reticolato avente un elevato numero di pori di dimensione molto piccole riempiti con aria. Questa caratteristica del materiale si traduce in notevoli proprietà degli aerogel in termini termici, fisici, ottici e acustici. Tuttavia la presenza dei pori ne limita la resistenza meccanica e, pertanto, si è soliti associare l'aerogel ad altri materiali per sopperire a tale mancanza.

I materiali a cambiamento di fase immagazzinano e rilasciano calore a seconda delle condizioni ambientali circostanti. Tali materiali sfruttano l'energia termica latente scambiata a temperatura costante durante i passaggi di fase dei materiali. I materiali utilizzati nell'involucro edilizio hanno temperature del punto di fusione prossime alla temperatura di comfort interna, pertanto, essi sono in grado di contribuire positivamente alle prestazioni energetiche invernali ed estive. L'utilizzo di tali materiali all'interno degli strati delle costruzioni edili è stato studiato da diversi autori [60][61][62].

Kuznik et al. [63] hanno effettuato una revisione dello stato dell'arte dei materiali a cambiamento di fase integrati nelle chiusure verticali degli edifici individuando due tipologie di materiali: organici (le paraffine e gli acidi grassi) ed inorganici (composti salino idrati).

I materiali riflettenti sono caratterizzati da un basso coefficiente di assorbimento ed alta emittanza e, pertanto, le proprietà isolanti dei materiali riflettenti scaturiscono dalla riflessione del calore per irraggiamento.

L'utilizzo di tali materiali all'interno degli strati dell'involucro edilizio comporta una riduzione del trasferimento del calore agli strati sottostanti migliorando le temperature interne e il comfort ambientale.

I materiali riflettenti sono composti da pellicole in polietilene termofuse su fogli di alluminio: tali materiali sono generalmente applicati nei sottotetti e nelle pareti. Diversi autori si sono soffermati sulle prestazioni termiche dei materiali [64][59][60].

Le tipologie di isolamento di cui sopra sono alcune delle recenti innovazioni nel campo dell'isolamento termico. Esse presentano interessanti spunti per la progettazione e la ristrutturazione del patrimonio edilizio esistente tuttavia, la loro applicazione appare fortemente vincolata dalle questioni economiche e ambientali. Per tal motivo è stato deciso di approfondire nel seguito del capitolo i materiali air-based che costituiscono la quota maggioritaria degli isolanti oggi presenti sul mercato.

3.2.2. *I materiali isolanti air-based*

Il principio isolante dei materiali air-based avviene a seguito della dissipazione del calore convettivo all'interno dei pori del materiale. Tali materiali isolanti possono essere distinti in base alla tipologia della struttura interna, materiali cellulari o fibrosi, o in base alla tipologia di materiale: inorganici;

organici; sintetici o combinati. Nel seguito è proposta una tabella riepilogativa delle diverse tipologie di materiali isolanti che sfruttano il principio di isolamento dell'aria (cfr. **Tabella 19**).

Tabella 19 - Classificazione degli isolanti termici [67]

<i>Origine</i>	<i>Struttura</i>	<i>Materiale isolante</i>
Sintetica	Fibrosa	<i>Fibre di poliestere</i>
	Cellulare	<i>Poliestere espanso</i> <i>Poliuretano espanso</i> <i>Polietilene espanso</i>
Organici vegetale	Fibrosa	<i>Fibre di legno</i> <i>Fibre di kenaf</i> <i>Fibre di canapa</i> <i>Fibre di lino</i> <i>Fibre di mais</i> <i>Fibre di cocco</i> <i>Fibre di Juta</i>
	Cellulare	<i>Sughero</i>
Organici animale	Fibrosa	<i>Lana di pecora</i>
Organici minerale	Fibrosa	<i>Fibre di vetro</i> <i>Fibre di roccia</i>
	Cellulare	<i>Pomice naturale</i> <i>Argilla espansa</i> <i>perlite espansa</i> <i>Vermiculite espansa</i> <i>Vetro cellulare</i>

Alcuni autori concordano nel ritenere che ad oggi il 93% dei materiali isolanti comunemente utilizzati derivano dalla lana minerale e dalla plastica, pertanto, i materiali organici vegetale e animale, sebbene oggetto di interesse da parte della comunità scientifica, coprono solo una piccola porzione del mercato [68].

3.2.3. Gli isolanti di origine sintetica

Il polistirene espanso (EPS) è un polimero costituito da piccole sfere di polistirene contenenti al loro interno un agente di espansione, ad esempio il pentano o isopentano, che sotto azione del vapore acqueo surriscaldato provocano un aumento di volume.

Per aumentare le proprietà di resistenza al fuoco viene aggiunto il 7% in peso di esanbromociclododecano.

Il materiale isolante viene prodotto in forma di pannelli e possiede una struttura a pori parzialmente aperti. Il materiale, essendo costituito per il 98% d'aria si presenta come un ottimo isolante a bassa

densità. I valori tipici di conducibilità termica per i pannelli in polistirene espanso sono compresi tra 0,03 e 0,04 W/mK. Tali valori sono fortemente variabili in base alla temperatura, al contenuto d'acqua e alla densità del pannello.

Il polistirene estruso (XPS) è fra gli isolanti sintetici maggiormente utilizzato sia per le prestazioni termiche che per il suo basso costo. Così come l'EPS, il polistirene estruso è ricavato dal polistirene fuso e, pertanto, rientra tra i prodotti a base di petrolio.

Le lastre in XPS sono ottenute mediante l'insuflaggio di un gas espandente del polistirene, come i fluorocarburi o il diossido di azoto, e la successiva laminazione all'interno di appositi macchinari.

Il polistirene espanso ha una struttura a pori chiusi e i pannelli in XPS sono caratterizzati da una bassa densità e da una buona conducibilità termica. Tali pannelli presentano valori tipici di conducibilità termica compresi tra 0,030 e 0,040 W/mK. Essi trovano applicazione come isolante per le pareti perimetrali con intercapedine e grazie alla loro buona resistenza a compressione sono adatti anche per l'isolamento delle coperture o dei solai.

Entrambi i prodotti derivano dalla lavorazione del polistirene, un materiale facilmente combustibile, e per il loro corretto impiego come materiale isolante necessita di essere additivato con ritardanti di fiamma. Dal punto di vista acustico, invece, non sono presenti studi che mostrano significativi valori di isolamento acustico del materiale.

3.2.4. *I materiali organici vegetali*

All'interno dei materiali organici rientrano tutti i materiali di origine naturale o *bio-basati*. I *bio-basati materials* o materiali compositi sono materiali costituiti da una o più sostanze derivanti interamente o parzialmente da materia vivente biomassa, pertanto, rientrano nella categoria anche i prodotti dalla frazione biodegradabile di altri materiali, rifiuti e residui dell'agricoltura, della silvicoltura e delle industrie correlate, nonché la frazione biodegradabile dei rifiuti industriali e urbani (2001/77 / CE 2001).

Tali materiali costituiscono un'utile alternativa agli isolanti a base di petrolio oggi presenti sul mercato. Tra i vantaggi connessi all'applicazione degli isolanti di tipo naturale si annovera la concreta possibilità di mitigare le cause dei cambiamenti climatici. Gli isolanti di tipo naturale, infatti, hanno la capacità di acquisire carbonio biogenico e di soddisfare al contempo le prestazioni di comfort termico degli ambienti interni consentendo di ridurre le emissioni inquinanti di gas serra e di ridurre la vulnerabilità dello spazio urbano [12] [69].

Il loro utilizzo si integra con i principi di economia circolare, infatti, quando i materiali da costruzione sono naturali o derivati da materiali naturali, il loro smaltimento non costituisce una minaccia per il sistema ambientale e si avvicinano alle idee basate sul ciclo di produzione chiuso di McDonough e Braungart [70] [71].

Tra gli isolanti di origine naturale oggi sono disponibili diversi prodotti come le fibre di legno, il kenaf, il cotone e la lana di pecora che possiedono buone capacità igrotermiche che ne rendono possibile il loro impiego all'interno degli strati coibenti dell'edificio.

A tali materiali si aggiungono i materiali naturali derivanti dagli scarti di natura industriale o agricola. L'uso dei sottoprodotti delle colture in compositi da utilizzare in applicazioni edilizie fornisce un'interessante alternativa ai materiali isolanti esistenti. Tali materiali oltre ad avere un impatto positivo sull'ambiente consentono di innescare processi economici virtuosi su scala locale.

Tuttavia, questa tipologia di materiali presentano alcuni inconvenienti quali la non omogeneità del materiale a causa dei fattori esterni che ne influenzano la crescita/produzione, la variabilità del prezzo e la loro disponibilità stagionale.

Le proprietà di base di questi materiali, inoltre, dipendono da diversi fattori. Alcuni autori [72][73] concordano che il processo di fabbricazione, l'orientamento delle particelle dell'aggregato nella matrice del materiale, la distribuzione granulometrica, la struttura porosa interna delle materie prime, il rapporto e la natura del legante concorrono per le buone proprietà di isolamento termico del biomateriale.

La densità, in particolare, è un fattore molto importante per tutti i tipi di materiali isolanti a base d'aria, incluso i materiali a base naturale. Come ben documentato nella pubblicazione di Domínguez-Muñoz et al. [74], in cui sono stati analizzati diversi contributi scientifici di altri autori, i valori ottimali della conducibilità termica sono stati ottenuti negli isolanti *air-based* aventi densità compresa nell'intervallo tra 30 e 100 kg/m³ mentre al di sotto e al di sopra di tale intervallo gli autori hanno riscontrato un peggioramento della conducibilità termica.

La dipendenza tra la densità del materiale fibroso e la conducibilità termica è sostenuta anche da altri autori come Vejeliene et al. [75] che nelle sue sperimentazioni su campioni contenenti paglia ha testato che i campioni contenenti paglia sminuzzata ($\rho_0=80$ kg/m³) presentano valori di conducibilità termica inferiore rispetto ai campioni realizzati con steli interi ($\rho_0=50$ kg/m³).

Altri studi sui materiali fibrosi hanno dimostrato anche una relazione tra l'orientamento delle fibre e la conducibilità termica: la conduttività termica è minore quando le fibre sono ortogonali al flusso di calore mentre la dimensione delle particelle non sembra influire sulla conducibilità termica. Vejeliene et al. [75] hanno dimostrato che la presenza di particelle fini diminuisce il passaggio di calore per irraggiamento ma aumenta il passaggio di calore per conduzione; anche se la presenza di particelle fini riduce la trasmittanza termica del materiale, gli studi hanno dimostrato che ne riduce anche la resistenza meccanica.

Infine un altro fattore significativo per la conducibilità termica del materiale è la dimensione dei pori: Vejeliene et al. [72] dimostrano che la presenza di pori con dimensioni eccessivamente piccoli non sono in grado di smorzare il calore e presentano dunque valori di conducibilità termica superiori.

Per non inficiare i vantaggi ambientali dell'uso di materiali di tipo organico è essenziale la valutazione del legante utilizzato, al fine di contenere le emissioni nella fase produttiva.

Inoltre la tipologia di legante utilizzato ha anche conseguenze sulle prestazioni meccaniche del materiale. Ad oggi i leganti utilizzati possono essere classificati in organici e inorganici.

Tra i leganti di tipo inorganico più frequentemente usati troviamo cemento, calce e altri materiali come il silicato di sodio. L'uso di questi leganti favorisce sia la resistenza al fuoco sia il rallentamento della crescita di muffe dei *materiali bio-based*, ma inficiano il loro utilizzo al termine della vita utile del materiale, e spesso, hanno processi di produzione ad alta velocità che sfavoriscono la conducibilità termica del prodotto finito.

Tra i leganti di tipo organico si trovano i polimeri che è possibile distinguere in naturali e sintetici. Tra i polimeri naturali si trovano le proteine e i polisaccaridi mentre tra i sintetici si trovano i vinili e le resine aldeiche. Inoltre in base al processo di indurimento, i leganti organici possono classificarsi in termoplastici o termoindurenti. I primi vengono lavorati mediante fusione o solventi e successivamente solidificati e raffreddati, senza subire mutamenti chimici. I leganti organici termoplastici sono adatti ad applicazioni per interni non strutturali.

I leganti organici termoindurenti subiscono un cambiamento chimico irreversibile che ne consente l'indurimento e la formazione di legami resistenti. Questi ultimi trovano applicazione strutturale nei prodotti in legno. Tra i leganti organici termoindurenti si contano le resine aldeiche di cui però si scoraggia l'utilizzo poiché emettono composti organici volatili VOC (formaldeide) nocivi per l'uomo. Invece, leganti come il difenildiisocianato (MDI) e il polimero MDI (pMDI), pur non emanando sostanze nocive, presentano problemi di smaltimento essendo derivati dal petrolio.

Per superare i limiti dei leganti sopra citati, la ricerca si sta spendendo nello studio di leganti a base di polimeri biodegradabili, tra cui l'acido polilattico (PLA) e le proteine di soia, anche se, a oggi, richiedono elevati costi di produzione e la loro natura idrofila ne compromette la durabilità e i campi di applicazione.

Oltre ai leganti biodegradabili, alcuni campi di ricerca si stanno spendendo nella sperimentazione di pannelli senza legante, che però richiedono lavorazioni che lo sottopongano ad alte pressioni per aumentarne densità e diminuirne la conduttività termica.

Altro metodo di produzione vede l'utilizzo del micelio della muffa come legante. Il micelio viene lasciato crescere su un substrato sottoprodotto del raccolto fino a quando non si forma la tavola (tipicamente una o due settimane), dopodiché le spore rimanenti vengono eliminate con i raggi UV.

Da sottolineare è che i vantaggi offerti dai materiali a base biologica sono validi solo se accompagnati a metodi di produzione semplici e altrettanto favorevoli per l'ambiente, e al momento questo è il limite maggiore.

3.3. I MATERIALI ISOLANTI DI ORIGINE NATURALE

Le nuove problematiche ambientali, già da diversi decenni, hanno riposto l'attenzione verso lo sviluppo tecnologico di materiali compositi a base di fibre naturali di origine animale, minerale e vegetali. Comunemente utilizzati dalle civiltà del passato, diversi autori concordano che le prime applicazioni di fibre vegetali all'interno di prodotti cementizi risale agli anni '70 dello scorso secolo, per sostituire le fibre di amianto usate come rinforzo del materiale [76] [77].

L'utilizzo delle fibre naturali nei materiali compositi produce diversi vantaggi sia ambientali che energetici [71].

Le fibre naturali ben legate con la matrice contribuiscono a migliorare la resistenza meccanica del composto grazie all'uniformità della loro distribuzione e al basso contenuto di vuoti [77]. Inoltre determinano una riduzione della densità che migliora le prestazioni termiche del materiale.

Di grande interesse per diversi autori è anche l'utilizzo delle fibre naturali senza un legante, sia in forma di pannello che fuso, per le loro proprietà di isolamenti termico.

3.3.1. *Le fibre di canapa*

La canapa è una pianta il cui utilizzo risale alle tecniche produttive volte a ricavarne delle fibre per la produzione di cordami, tessuti, teli e vele per imbarcazioni. Con l'introduzione dei filati sintetici l'utilizzo della canapa si è notevolmente ridotto. Ad oggi la coltivazione della canapa sta riaffiorando anche in virtù delle nuove scoperte nel campo medico ed edile.

Il fusto della pianta è composto da una corteccia esterna costituita da fibre e da una parte interna chiamata canapulo. Entrambe le parti della pianta vengono utilizzate: il canapulo, in particolare, trova applicazione nelle miscele plastiche, come l'impasto calce-canapa, mentre le fibre ricavate dal fusto vengono impiegate per la realizzazione di pannelli ricorrendo all'aggiunta di appositi leganti per tenere insieme le fibre. La canapa presenta diversi vantaggi legati alla sua struttura e alla sua produzione.

A livello produttivo la coltivazione della canapa rispetto ad altre colture richiede una minore concimazione e irrigazione, inoltre, la pianta cresce rapidamente arrivando fino a 4 m di altezza in quattro mesi. La notevole rapidità della crescita della pianta consente di ottimizzare i rendimenti della coltura primaria poiché essa può essere impiegata come "raccolto di stacco", ovvero un raccolto secondario che interrompe una semina ripetuta all'interno dei processi di rotazione delle colture. Infine i prodotti ricavati dalla canapa sono totalmente e facilmente riciclabili.

La canapa sativa è un materiale caratterizzato da una bassa densità alla quale consegue una bassa conducibilità termica, inoltre, la sua struttura porosa, permette di attenuare le variazioni di calore e l'umidità ambientale [78]. Per quanto sopra esposto, la canapa ha attratto l'interesse di molti ricercatori, che hanno indagato il suo utilizzo per la produzione di materiali da costruzione. La

possibilità di assorbire diossido di carbonio in fase di crescita, come tutti i materiali biogenici, ha incrementato ulteriormente l'interesse della comunità scientifica.

Alcuni studiosi stimano che una parete di 1 m² con uno spessore di 260 mm assorbe 14-35 kg di diossido di carbonio dall'atmosfera durante il suo ciclo di vita [79] [80].

Il canapulo, circa il 70% della pianta, oggi viene utilizzato per la produzione di biomattoni in calce e canapa o in terra cruda e canapa [81][82] [83].

Le fibre di canapa invece sono state studiate da diversi per lo studio delle proprietà fisico-meccaniche del materiale e del suo utilizzo con diversi materiali leganti [84][85].

Alcuni autori hanno studiato le proprietà di un pannello biocomposito realizzato con fibre di canapa come aggregato e amido di mais come binder [86].

Charai et al. [87] indagano sul potenziale di isolamento termico delle fibre di canapa all'interno di materiali a base di gesso.

Balčiūnas et al. [78] hanno studiato un materiale composito a base di canapa e scarti della produzione della carta uniti mediante un legante a base di sapropel. Gli autori hanno indagato sulle proprietà del materiale tra le quali conduttività termica, assorbimento acustico, stress a compressione, assorbimento d'acqua a breve termine e resistenza alla diffusione del vapore acqueo. I risultati raggiunti per la conducibilità termica del materiale sono variabili. La variazione ottenuta è stata associata alla variazione della densità del materiale e gli autori hanno fornito una formula di correlazione, che unisce la conducibilità termica alla dimensione e alla densità delle particelle.

3.3.2. Canne

Le canne che vengono utilizzate nel settore edile provengono dalla *Phragmites australis*, una pianta tipicamente raccolta durante la stagione invernale, e vengono poste in opera una accanto all'altra sottoforma di pannelli mediante l'ausilio di fil di ferro o nylon. Il loro utilizzo all'interno della fabbrica edile non è recente: pannelli in canna sono stati utilizzati in antichità per la realizzazione di soffitti e pareti e, in alcuni casi, anche come supporto per intonaco. La conducibilità termica dei pannelli in canna varia tra 0,045 e 0,056 W/mK con densità anche essa variabile da 130 a 190 kg/m³ [88].

Alcuni autori hanno studiato le proprietà acustiche di pannelli isolanti realizzate in canne utilizzando il metodo del tubo di impedenze per determinarne il coefficiente di assorbimento [88] [89]. Lo studio ha mostrato che nei campioni posti sotto esame si è ottenuto un coefficiente di assorbimento superiore a 0,5 per le frequenze oltre i 300Hz. Lo studio di OldHam et al. [90] sull'assorbimento acustico delle biomasse ha confermato le notevoli prestazioni acustiche del pannello di canne mediante misurazioni acustiche all'interno di una camera di riverberazione.

Nelle aree mediterranee l'*Arundo donax L.*, conosciuta anche come "canna gigante" cresce ampiamente lungo le rive del torrente e dei fiumi. La canna gigante è stata tradizionalmente

impiegata per la costruzione di recinzioni e rifugi temporanei per uomini e animali. Sono stati utilizzati anche come puntelli per piante, come giacche a vento o come barriere ombreggianti [68].

Barreca e Fichera hanno proposto un pannello realizzato con l'*Arundo donax L.* e ne hanno studiato le proprietà termiche [91]

3.3.3. La Posidonia oceanica

La *Posidonia Oceanica*, conosciuta anche come "*barba di Nettuno*" è una pianta acquatica molto diffusa nella regione mediterranea. Ad oggi lungo le coste italiane se contano tra i 30.000 e i 40.000 km². La pianta è composta da radici, un rizoma da cui escono 6 o 7 gruppi di foglie nastriforme di colore verde che possono raggiungere la lunghezza di 1,5 metri.

La loro presenza in mare è indice di buona salubrità delle acque, tuttavia, durante la stagione autunnale, invernale e primaverile, a seguito dell'azione delle correnti marine e degli agenti atmosferici, la posidonia è solita depositarsi sulle coste in forma di masse di foglie in decomposizione dette *banquette* o di *egagropili*. In Italia la *Posidonia arenata* è considerata un rifiuto solido da smaltire secondo il D.Lgs 152/2006. La difficoltà e i costi legati allo smaltimento della *Posidonia* hanno favorito la pratica del loro riutilizzo tramite compostaggio per la produzione di ammendante così come disciplinato dal D.Lgs 88/2009 e dal D.Lgs 75/2010.

Cocozza et al. [92] hanno fornito un documento che indaga il compostaggio e il recupero energetico di foglie e fibre di *P. oceanica* al fine di suggerire soluzioni alternative alla discarica. La porzione fibrosa dei residui di *P. oceanica*, in particolare, sembra essere particolarmente adatta alla produzione di energia mediante il loro incenerimento.

L'Istituto di ricerca tedesco Fraunhofer ha recentemente indagato sull'applicazione degli scarti della pianta all'interno di materiali per l'edilizia. L'Istituto di ricerca ha condotto uno studio finalizzato all'individuazione di un processo di lavorazione a cui sottoporre la pianta per renderla idonea alle finalità termiche dell'edificio. In particolare il risultato raggiunto dalla ricerca tedesca ha riguardato la formulazione di un materiale sciolto da inserire agevolmente a mano o mediante insufflaggio nelle intercapedini delle chiusure verticali e delle chiusure orizzontali.

Sebbene il materiale presenti valori di trasmittanza interessanti rimane ancora da incrementare la ricerca sotto il profilo ambientale, infatti, il processo lavorativo include una considerevole spesa energetica per liberare le egagropili dalla sabbia e sciogliere nella loro interezza le foglie della pianta.

Lo studio della Fraunhofer ha evidenziato una buona resistenza alla muffa e alla fiamma e una maggiore capacità di conservare il calore rispetto agli isolanti derivanti dal legno.

Altri autori hanno studiato le proprietà della *P. oceanica* per la produzione di materiali nanocompositi di alta qualità e per la produzione di derivati della cellulosa [93] [94]. Lo studio condotto da Khiari e Belgacem ha permesso di stabilire dei nuovi metodi di valorizzazione dei rifiuti marini e apre nuovi scenari per l'utilizzo di nuovi materiali fibrosi a diverse scale e dimensioni.

Seggiani et al. [95] hanno proposto un materiale biocomposito ottenuto dalla combinazione di polioidrossialcanoati e fibre di *P. oceanica* studiandone le caratteristiche termiche, reologiche, meccaniche e morfologiche soffermandosi sui processi di degradazione.

Allegue et al. [96] hanno studiato l'utilizzo delle fibre di *Posidonia oceanica* all'interno di prodotti a base cementizia studiandone le proprietà meccaniche.

Hamdaoui et al. [97] hanno valutato l'effettivo utilizzo della pianta come materiale isolante nelle regioni mediterranee fornendo un'analisi comparativa tra il materiale indagato e gli isolanti tradizionali.

Kuqo e Mai [98] hanno studiato le proprietà meccaniche dei compositi di gesso contenenti *Posidonia oceanica* e fibre di legno provenienti dal *Pinus sylvestris*.

Garcia et al. [99] studiano le prestazioni di resistenza meccanica di un pannello, ottenuto per termocompressione, contenente il 70% di fibra di *P. oceanica* e resina epossidica.

3.3.4. Il sughero

Il sughero è un tessuto vegetale ottenuto dalla corteccia dell'albero del sughero, noto come *Quercus suber*. La corteccia dell'albero da sughero è organizzata in una serie di strati circolari che rivestono il fusto dell'albero. Il sughero è un composto cellulare suddiviso in cinque strati. Gil sostiene che in 1 cm³ di materiale ci sono 42 milioni di cellule [100]. Il sughero è un materiale leggero, elastico e impermeabile ai gas e ai liquidi e le sue caratteristiche dipendono dalla struttura delle sue cellule [101]. Le cellule sono distribuite uniformemente in file sovrapposte e le loro pareti secondarie sono costituite da suberina e cere.

La maturità delle cellule comporta la sostituzione del protoplasma cellulare con aria conferendo al materiale ottime proprietà isolanti [100]. I valori tipici di conducibilità termica per il sughero sono compresi tra 0,040 e 0,050 W/mK.

Le proprietà del materiale hanno consentito l'applicazione del sughero in diversi settori tra cui la realizzazione di tappi di bottiglia e l'isolamento termico e acustico [100].

La polvere di sughero, il principale rifiuto delle industrie di lavorazione del sughero, viene generata durante il processo industriale del sughero e proviene dalle operazioni di molatura, taglio e finitura [102]. Durante il processo di produzione del sughero oltre il 75% diventa un prodotto di scarto che, dopo essere tritato per ottenere granuli di sughero, può essere riutilizzato per la realizzazione di materiali isolanti. Le principali applicazioni del granulato di sughero si dividono in: materiali agglomerati e i materiali compositi.

Nei materiali agglomerati, il sughero, dopo essere stato macinato, viene posto in forme d'acciaio quindi posto a lavorazione a caldo entro autoclavi formando un blocco omogeneo autoincollato. I blocchi isolanti vengono successivamente raffreddati e quindi rifilati con nastri metallici riscaldati.

Successivamente, le assi di sughero vengono fatte passare attraverso una banca di raddrizzatura prima dell'invecchiamento del pack [103].

Nei materiali compositi i granuli del sughero, invece, vengono uniti mediante l'ausilio di leganti per la realizzazione di pannelli isolanti.

Hernandez-Olivares et al. [104] hanno esaminato la fattibilità tecnica di compositi a base di sughero e gesso. I risultati ottenuti hanno mostrato delle mancanze nelle proprietà meccaniche e che tale composto, grazie alle loro proprietà di isolamento termico e alla capacità di assorbimento e riflessione del suono, poteva trovare applicazione nelle pareti divisorie.

Sair et al. [77] hanno aggiunto fibre di cartone ad un composto di sughero e gesso dimostrando che l'aggiunta del cartone consente di superare le mancanze meccaniche.

3.3.5. *La lana di legno (Wood Wool Cement Board - WWCB)*

Diversi autori concordano nel ritenere che la produzione della fibra di legno per applicazione nel campo dell'isolamento edile risale al 1908.

La fibra di legno è attualmente in commercio e viene venduta in forma di materassini. Essa è composta da legno, solitamente pino, abete o pioppo, e da un legante costituito solitamente da cemento o magnesite.

Durante la produzione dei pannelli i tronchi di legno vengono segati in una forma di sezione trasversale, quindi vengono piallati per ottenere la "lana" di spessore 3-5 mm e lunghezza massima di 100 mm. Per prevenire la formazione di muffe, le lane vengono essiccate in ambiente controllato avente un contenuto di umidità pari al 12% e successivamente immerse in soluzione salina. Dopo il trattamento protettivo le lane di legno vengono impastate con il legante all'interno di macchine impastatrici e successivamente il composto viene inserito in stampi in acciaio e posto ad alta pressione. I pannelli in lana di legno vengono conservati a temperatura controllata fino all'indurimento del legante. Insieme al suo isolamento termico relativamente buono, la sua qualità fonoisolante è eccellente [105] [106]. La lana di legno ha una buona permeabilità al vapore e un'elevata resistenza meccanica. Presenta una buona resistenza alla fiamma e alle muffe; la sua superficie è facilmente intonacabile. I prodotti in lana di legno sono utilizzati per realizzare strutture fonoisolanti e fonoassorbenti e l'isolamento termico di facciate, pavimenti, tetti a falda e controsoffitti. Può essere utilizzato come cassaforma a perdere per eliminare i ponti termici degli architravi, balconi e pilastri.

Al giorno d'oggi, la produzione dei pannelli in lana di legno in commercio utilizzano essenze lignee provenienti solo dalla raccolta forestale [107], poiché un qualsiasi cambiamento delle caratteristiche del legno può alterare in modo significativo le proprietà complessive del composito, pertanto, l'utilizzo di essenze lignee diverse dall'abete rosso o dal pioppo è tutt'oggi una grande sfida [108] [109].

Berger et al. [106] indagano sulla possibilità di trovare alternative sostenibili alle essenze lignee tipicamente utilizzate per la produzione dei pannelli in lana di legno. L'utilizzo di legno proveniente dai pallet sembra essere un buon sostituto del legno di abete anche se l'eterogeneità delle fibre comporta una diminuzione della resistenza meccanica.

Ashori et al. [110] hanno presentato uno studio inerente all'utilizzo delle traverse ferroviaria in legno all'interno dei pannelli composti in legno-cemento.

3.3.6. La fibra di legno (Fiberboard F)

La produzione dei pannelli in fibra di legno si è sviluppata come ramo secondario dell'industria della carta. Il pannello in fibra di legno è costituito da trucioli di legno ottenuti dalla cippatura di legno fresco o riciclato incollati tra loro mediante una sostanza adesiva. I pannelli in fibra di legno si distinguono in base alla densità: bassa (*low-density fiberboard* LDF), media (*medium-density fiberboard* MDF) ed alta (*high-density fiberboard* HDF).

I trucioli del legno vengono raffinati mediante un defibratore e, pertanto nei pannelli con densità media e alta vengono ammorbiditi preliminarmente con il vapore mediante un processo che può avvenire a umido o a secco. Il secondo processo è stato ideato nel 1955 per sopperire all'eccessiva quantità di acqua e corrente elettrica richiesta dal processo a umido.

I trucioli di legno ammorbiditi vengono additivato con paraffina ed infine con adesivi come l'urea-formaldeide (UF) e la resina fenolo-formaldeide (PF) [111] [112].

Dopo aver aggiunto l'adesivo, si procede con la formazione del materiale e la pressatura a caldo per regolare la densità apparente del prodotto finale: i pannelli di isolamento termico hanno una densità apparente di 200-400 kg/m³.

Gli ultimi passaggi sono il raffreddamento, la rifinitura del bordo e la levigatura.

Il pannello a bassa densità è riciclabile e ha un buon isolamento termico e acustico. Il pannello di fibra ha un basso assorbimento d'acqua e resistenza alla permeazione del vapore. Il pannello di fibra è preferito per l'isolamento di soffitte e coperture inclinate (nell'estradosso delle travi), nonché per il riempimento di pareti divisorie e altre strutture fonoassorbenti.

La sostenibilità dei pannelli in fibre di legno dipende sia dal metodo utilizzato per l'ammorbidimento dei trucioli di legno che dall'adesivo utilizzato per la formazione del pannello. Ad oggi le resine UF, in virtù del loro basso costo e del tempo di indurimento ridotto, costituiscono gli adesivi utilizzati per la realizzazione dei pannelli in fibre di legno. Esse però presentano lo svantaggio di rilasciare formaldeide [113], sostanza nociva per la salute umana. Sebbene le resine PF risolvano il problema delle emissioni nocive, la loro applicazione è stata fortemente limitata dal costo e dai tempi di indurimento più lunghi. Ad oggi le resine PF vengono applicate con successo con risultati comparabili alle resine UF tramite la regolazione di alcuni parametri come la temperatura e la pressione del composto.

Al fine di ridurre l'impatto del pannello in fibra di legno sono stati sviluppati nuovi leganti naturali privi di formaldeidi [114].

Sul mercato sono disponibili anche materiali isolanti in trucioli di legno soffiati sfusi con una densità (32-45 kg/m³) e conduttività termica ($\lambda = 0,038 \text{ W / mK}$) inferiore rispetto al pannello isolante in fibre di legno. Il suo campo di applicazione pertanto risulta essere il riempimento dei vuoti delle chiusure verticali.

3.3.7. I pannelli truciolari (Particleboard P)

I pannelli truciolari sono anch'essi ottenuti dai trucioli del legno. Si differenzia dal pannello in fibra di legno per le scaglie di legno utilizzate e per il suo procedimento realizzativo per strati. I pannelli truciolari sono caratterizzati da una bassa densità e vengono generalmente associati ai LDF. Le fasi realizzative sono identiche a quelle dei pannelli in fibra di legno e, pertanto, necessitano di un legante per unire tra loro gli strati. I pannelli truciolari a bassa densità hanno un buon isolamento termico ma la loro qualità è inferiore alla lana di legno e alle fibre di legno. I principali vantaggi dei pannelli truciolari sono il loro basso tasso di ritiro, elevata resistenza meccanica e comportamento quasi isotropo [49].

A causa della loro relativamente alta conducibilità termica, il pannello truciolare è usato raramente come strato termoisolante autonomo e solitamente esso è utilizzato come superficie di appoggio nei pannelli sandwich o nei pannelli isolanti combinati.

3.3.8. La paglia (Straw Bales SB)

Sebbene gli steli di paglia provenienti da varie colture di cereali siano stati utilizzati nelle costruzioni per millenni, l'uso delle balle di paglia compattate al fine dell'isolamento termico è iniziato nel diciannovesimo secolo nel Nebraska (USA), con l'avvento delle macchine imballatrici meccaniche [49] [115].

Sebbene diversi studi abbiano confermato che le balle di paglia abbiano proprietà di isolamento e possano essere impilate per la realizzazione di muri portanti, esse sono attualmente prodotte per le esigenze agricole piuttosto che per le richieste del mercato delle costruzioni. Di conseguenza, l'uso di balle di paglia nell'edilizia rimane circoscritto e in gran parte non regolamentato [115].

Per incrementare la stabilità meccanica delle strutture in balle di paglia pressate è spesso necessario utilizzare un telaio di legno in cui la paglia pressata acquisisce il ruolo di isolante.

Diversi ricercatori hanno dimostrato che i valori di conducibilità termica delle balle di paglia pressata sono ortotropi [115]. Quando le balle di paglia hanno le fibre orientate parallelamente alla direzione del flusso di calore, il materiale assume una conducibilità termica compresa tra 0,060 e 0,067 W/mK [116], invece, quando la direzione delle fibre è ortogonale al flusso di calore la conducibilità termica si riduce raggiungendo valori compresi tra 0,043-0,045 W/mK [115].

In generale, la conduttività termica della paglia aumenta con la densità apparente ρ , tuttavia in vari studi sono state riportate correlazioni diverse [117].

Costes et al. [118] utilizzando il metodo della piastra calda ha osservato una correlazione lineare nel range di 60–130 kg/m³ mentre altri autori [119]–[121] indicano nei loro studi una correlazione piuttosto debole tra la densità apparente e la conduttività termica.

Véjeliené [75], invece, ha individuato i valori ottimali della conducibilità termica nell'intervallo di densità di 50–80 kg/m³.

La paglia pressata, inoltre, è un materiale scarsamente infiammabile, in quanto la sua notevole densità non permette l'alimentazione dell'ossigeno nel processo di combustione e la carbonizzazione degli strati superficiali della paglia pressata non consente alla fiamma di penetrare all'intero del materiale. Bozsaky [49] sostiene che la resistenza al fuoco della paglia pressata può essere ulteriormente migliorata con l'applicazione di intonaco sulle due superfici del materiale.

3.3.9. Il cotone

Le fibre di cotone sono utilizzate principalmente dall'industria tessile e la loro disponibilità è limitata nella regione europea, pertanto, l'80-90% dei materiali di isolamento termico e acustico a base di cotone utilizzati in Europa sono prodotti utilizzando scarti tessili. Le fibre di cotone ricavate dagli scarti tessili vengono sottoposti a cardatura, stabilizzate meccanicamente e trattate con acido borico per migliorarne la resistenza al fuoco e la muffa.

Nel complesso il cotone è una materia prima rinnovabile e dotato di una buona permeabilità al vapore, inoltre, la sua produzione comporta un basso consumo energetico.

Il suo principale svantaggio è l'elevato assorbimento d'acqua; pertanto, l'isolamento in cotone non è consentito per le strutture isolanti a diretto contatto con l'umidità incluse le facciate degli edifici. Gli isolanti in fibre di cotone vengono utilizzati principalmente per isolare soffitte, solai e coperture inclinate.

Zhou et al. [122] hanno condotto uno studio su pannelli isolanti contenenti gambi di cotone compressi. Il gambo di cotone essendo ricchi di cellulosa lignina ed emicellulosa vengono comunemente utilizzati come materia prima per la preparazione di pannelli truciolari, pasta di legno e in alcuni studi anche come combustibile alternativo [123].

Nello studio di Zhou et al. [122] è stato analizzato il processo produttivo dei pannelli in gambi di cotone ponendo attenzione alla pressione utilizzata per la formazione del pannello. I risultati ottenuti hanno evidenziato che i pannelli analizzati, oltre ad avere una buona resistenza alle sollecitazioni meccaniche, possiedono valori di conducibilità termiche comprese tra 0,0585-0,0815 W/mK.

3.4. I MATERIALI PROVENIENTI DAL SETTORE AGRICOLO

Un gruppo di materiali di recente introduzione è costituito dai prodotti di isolamento termico contenente residui delle attività agricole. Diversi studi rivelano che ciascun materiale proveniente da residui agricoli hanno caratteristiche specifiche e possono essere utilizzati per usi differenti. Ogni regione geografica presenta diverse possibilità di riutilizzo degli scarti in funzione della specificità delle proprie colture.

La diffusione dell'architettura eco-consapevole ha permesso la proliferazione di diversi studi che affrontano il tema del riutilizzo degli scarti agricoli.

Nel seguito sono riportati i materiali utilizzati al fine dell'isolamento termico provenienti dagli scarti agricoli delle diverse aree geografiche.

3.4.1. La cellulosa (guardare bene dove posizionarlo)

L'isolamento in cellulosa sfuso e soffiato è stato introdotto nei paesi scandinavi intorno agli '20 dello scorso secolo. Sebbene per molto tempo l'utilizzo della cellulosa fosse circoscritto nell'area di origine, oggi la cellulosa viene studiata per applicazioni di diversa scala geografica. La cellulosa viene utilizzato come materiale isolante sia in forma di pannelli che come materiale da riempimento e insufflaggi all'interno delle pareti esistenti. Il materiale è costituito prevalentemente da carta riciclata o da fibre di legno aventi proprietà termiche simili a quelli della lana. In alcuni casi al prodotto si è soliti aggiungere acido borico o clorati di boro al fine di aumentarne le prestazioni. La conducibilità termica della cellulosa è influenzata dalle condizioni di temperatura e umidità a cui sono sottoposte [53].

La cellulosa è ricavata dai quotidiani dopo essere stata preventivamente classificata, macinata e trattata con additivi al fine di acquisire proprietà protettive contro il fuoco e la muffa. La cellulosa è solitamente imbustata in sacchi di plastica oppure utilizzata come materiale di riempimento negli strati delle murature. La cellulosa, pertanto, è comunemente applicata per l'isolamento delle facciate degli edifici e in alcuni casi anche per l'isolamento dei solai e delle coperture inclinate.

Asdrubali et al. [124] hanno studiato le proprietà di isolamento acustico e termico dei pannelli di cartone ondulato realizzati con carta da macero. I pannelli in cartone ondulato solitamente vengono utilizzati nell'industria del packaging e oltre ad essere autoportanti sono interamente riciclabili. La geometria interna dei pannelli consente all'aria di rimanere all'interno delle scanalature, comportando un vantaggio nelle performance termiche del pannello.

Sutcu e Akkurt [125] hanno utilizzato i residui della lavorazione della carta come additivo per la produzione di un mattone di terracotta. Lo studio ha indagato le proprietà meccaniche del mattone nonché i valori di assorbimento d'acqua e conducibilità termica dei campioni cotti. Il risultato finale della ricerca ha mostrato che l'inserimento della carta all'interno dei mattoni, sebbene abbia

prodotto un peggioramento accettabile della resistenza a compressione, ha determinato un calo della conducibilità termica del 50 %.

Lertsutthiwong et al. [126] hanno dimostrato che i rifiuti solidi derivanti dalla produzione di carta velina potevano essere utilizzati per la preparazione di pannelli truciolari e che l'aggiunta di chitosano influisce sul miglioramento della conducibilità termica.

3.4.2. Durian

Il Durian è il frutto di diverse specie arboree derivanti dal Durio appartenente alla famiglia delle *Malvacee*. Il Durian è un frutto abbastanza comune nei paesi del sud-est asiatico ed è caratterizzato dalla buccia spinosa, dalla polpa e dal seme. La buccia, in particolar modo, è considerata uno scarto del settore alimentare.

Khedari et al. [127] hanno studiato l'applicazione degli scarti del durian (*Durio zibenthinus*) all'interno di calcestruzzi leggeri. L'indagine sperimentale condotta dagli autori ha rivelato che l'utilizzo delle fibre degli scarti del durian all'interno della matrice cementizia ha generato una riduzione della conduttività termica e del peso dei materiali indagati.

Khedari et. al. [128] hanno sviluppato un pannello a basso costo ottenuto dalla mescola di buccia di durian e cocco avente conducibilità termica variabile tra 0,073 e 0,134 W/m²K mostrandosi adatta per essere applicata su superfici orizzontali e verticali. Per la preparazione del pannello è stata utilizzata una resina PU per permettere alle fibre dei materiali indagati di incollarsi. La formazione del pannello è stata eseguita mediante pressione a caldo e successivamente condizionato ad umidità e temperatura controllata. L'indagine sperimentale ha indicato che le proprietà ottimali del pannello si ottengono con un rapporto in peso 90:10 (fibra di cocco e buccia di durian) e che il pannello può essere utilizzato per applicazioni edili.

3.4.3. Fibre di cocco

Il Cocco è una pianta della famiglia delle *Arecaceae* originaria nelle isole con clima tropicale del sud-est asiatico. I frutti della pianta, comunemente nominate noci di cocco, sono delle drupe composte da mesocarpo liscio e sottile, un mesocarpo fibroso strettamente connesso all'esocarpo.

La buccia del cocco è disponibile in grandi quantità come residuo della produzione di materassi in fibra di cocco. Nei paesi in cui si concentra la coltivazione del cocco, la buccia costituisce il principale scarto da dover smaltire. Il mesocarpo del frutto (la buccia) è composta da fibre e midollo entrambe ricche di lignina che consente al materiale di auto-incollarsi sotto pressione.

Studi precedenti hanno stabilito che la buccia di cocco possono essere prodotte per la realizzazione di tavole mediante il sistema di pressatura a caldo [129][130].

La lignina contenuta nella buccia di cocco ha proprietà termoindurenti, pertanto, sotto condizioni termiche controllate, questa proprietà può essere utilizzata per sviluppare un processo per la produzione di tavole senza legante a base di buccia di cocco intera.

Panyakaew e Fotios [131] hanno studiato un sistema per la produzione di pannelli a bassa densità per l'isolamento termico contenenti buccia di cocco e bagassa.

I pannelli realizzati sono stati valutati per la loro densità e per le proprietà fisiche. I risultati mostrano che le proprietà di resistenza meccaniche dei pannelli aumentavano linearmente con la densità del pannello, del tempo di pressatura e della temperatura. Sebbene lo studio di Panyakaew e Fotios [131] abbia rivelato che i pannelli contenenti solo bagassa, rispetto a quelli contenenti solo fibra di cocco, presentassero proprietà isolanti superiori, gli autori concordano con Khedari et. al. [128] nel ritenere che la conducibilità termica dei pannelli isolanti realizzati con buccia di cocco e bagassa presentino valori assimilabili a quelli dei materiali isolanti convenzionali.

Fabrizi et al. [132] hanno analizzato le prestazioni termoigrometriche degli isolanti in fibra di cocco comparandole a quelle EPS. I risultati hanno mostrato che CF ed EPS hanno raggiunto le stesse prestazioni termoigrometriche. Inoltre, considerando il comportamento energetico dinamico di entrambe le diverse tipologie di materiali, il materiale isolante in fibra di cocco è risultato avere uno spostamento temporale maggiore di 1 h rispetto all'isolante sintetico.

3.4.4. *Fique*

Il Fique è una pianta tropicale da cui si estrae la fibra naturale chiamata *fique* o *cabuya*. La pianta deriva dalla famiglia delle *Agavaceae* e cresce spontanea nella fascia equatoriale del Sud-America.

La pianta è tradizionalmente utilizzata per la produzione di cordame e imballaggi. Tuttavia, solo il 4% della biomassa ha applicazioni commerciali mentre il 96% della pianta costituisce un sottoprodotto da dover smaltire [133].

La pianta è caratterizzata da un piccolo e robusto fusto e dalle foglie che assumono l'aspetto di lame di coltello spinate nei bordi. Le fibre di fique vengono estratte dalle foglie mediante la tecnica della decorticazione. A seguito di questo processo le fibre vengono essiccate con una perdita di massa cospicua, circa il 95%.

A seguito della crescente domanda ambientale negli ultimi anni è stata indagata la possibilità di applicare le fibre come materiale da costruzione.

Diversi autori hanno posto particolare attenzione alla combinazione delle fibre di fique con resine epossidiche [134], con matrici cementizie [121] [122] e con matrici termoplastiche [136].

Navacerrada et al. [137] hanno studiato le proprietà acustiche e termiche di materiali composti da fibre di fique. I risultati finali hanno evidenziato che il materiale indagato acquisisce proprietà termoacustiche comparabili alla lana minerale, infatti, la conducibilità termica è risultata essere variabile tra 0,04 e 0,08 W/mK e l'assorbimento acustico risulta essere massimo per le frequenze alte.

3.4.5. Girasoli

Il girasole (*Helianthus annuus*) appartenente alla famiglia delle *Asteraceae*, per via dell'alto contenuto di olio nei suoi semi, è una delle culture più diffuse [138]. Il gambo di girasole, in particolare, è considerato un rifiuto per gli agricoltori, i quali sono soliti bruciare tali rifiuti in campo aperto causando problemi ambientali e perdite economiche per i paesi che li producono [139].

L'applicazione di semi e steli di girasoli rientra tra i prodotti innovativi volti alla ricerca e sviluppo di nuovi materiali isolanti termici innovativi costituiti da residui di coltivazione delle piante [88] [140].

La conduttività termica di pannelli isolanti contenenti i semi di girasole macinati è stata misurata da Vandebossche et al. [141] i quali hanno analizzato i valori di campioni di diverse densità del materiale e diametro granulometrico. Il valore di conducibilità termica più basso è stato ottenuto per il materiale con la minore densità, 36 kg/m^3 , caratterizzato da diametro granulometrico inferiore a 1 mm. Evon et al. [138] hanno misurato le prestazioni di un pannello contenente una miscela generata a valle del processo di raffinazione del girasole mediante un estrusore bivate. Tuttavia il campione con le migliori prestazioni termiche era piuttosto fragile e caratterizzato da un'elevata conducibilità termica, $0,0885 \text{ W/mK}$.

Da Rosa et al. [142] hanno sviluppato un pannello termoisolante, da utilizzare all'interno di collettori solari per il riscaldamento dell'acqua, utilizzando diverse percentuali di lolla di riso, gambi di girasole, tessuto di iuta e gesso come legante. La conducibilità termica del pannello è risultata essere variabile con valori compresi tra $0,049$ e $0,104 \text{ W/mK}$.

Brouard et al. [143] hanno analizzato le proprietà igrotermiche di campioni contenenti steli di girasole e aventi gesso e argille come legante: i risultati hanno dimostrato che aumentando la densità del materiale si è ottenuta una migliore resistenza termica ma allo stesso tempo una diminuzione delle proprietà isolanti. La ricerca ha messo in evidenza l'eccessiva capacità di assorbire acqua dei materiali indagati. In altro lavoro, gli steli di girasole sono stati aggiunti agli scarti della lavorazione del cotone ed a una resina epossidica come legante [139].

3.4.6. Riso

Il riso è una delle colture principali a livello globale e nel 2019 la sua produzione è stata di 508,7 milioni di tonnellate (FAO, 2020). La produzione del riso comporta una grande quantità di residui che possono causare seri problemi di smaltimento. Tale problematica ha favorito nuove pratiche di recupero. Yarbrough et al. [144] hanno esaminato le prestazioni di isolamento termico di alcuni pannelli contenenti particelle di scafo di riso, uno dei principali sottoprodotti della coltivazione del riso. La conducibilità termica a 24°C del pannello è risultata essere compresa tra $0,0464$ e $0,0566 \text{ W/mK}$; in particolare, il valore più basso è stato riscontrato per il pannello avente densità ρ di 154 kg/m^3 . Goncalves e Bergmann [145] hanno utilizzato le ceneri della lolla di riso, un altro importante scarto della coltivazione del riso, per produrre isolanti termici. Gli isolanti termici sono stati caratterizzati sia chimicamente che fisicamente e le loro proprietà sono state correlate alla loro

microstruttura. Gli autori hanno scoperto che la conduttività termica degli isolanti contenenti la cenere di lolla di riso è piuttosto bassa anche se i valori sono superiori alla media degli isolanti termici commerciali.

La valutazione delle prestazioni di pannelli isolanti contenenti paglia di riso realizzati mediante pressatura a caldo ad alte frequenze è stata effettuata da Wei et al. [146].

Dalla sperimentazione degli autori è stato ottenuto un nuovo materiale isolante con una bassa densità di 200-350 kg/m³ avente uno spessore di 40 mm e conducibilità termica compresa tra 0,051-0,053 W/mK.

Kocaman et al. [147] hanno sviluppato un composito isolante utilizzando particelle di gambo di girasole e lolla di riso come materie prime e gesso e cemento come legante. I risultati hanno mostrato che il composito avente un rapporto di 10:45:45 per gesso, gambi di girasole e lolla di riso può raggiungere una conducibilità termica di 0,057 W/mK.

Wang et al. [148] hanno recentemente sperimentato un nuovo biomateriale contenente lolla di riso e geopolimeri provenienti dal caolino pervenendo a valori di conducibilità termica compresi tra 0,082 a 0,184 W/mK.

3.4.7. Bagassa

La bagassa è un residuo generato dalla schiacciatura e spremitura della canna da zucchero. Il processo estrattivo dello zucchero avviene in diverse fasi lavorative e al prodotto finale è associata la produzione della bagassa che costituisce circa il 30 % della materia prima in entrata. La bagassa, pertanto, costituisce un residuo da dover smaltire. La necessità di dover smaltire questo sottoprodotto ne ha permesso l'impiego in diversi settori tra cui l'industria delle costruzioni. La presenza di cellulosa all'interno della bagassa ne rende possibile la sua trasformazione in pannelli mediante pressatura a caldo.

Manohar et al. [149] hanno studiato le proprietà di pannelli di densità variabile realizzati con la bagassa. Lo studio inoltre ha indagato sull'effetto della densità sulla conduttività termica ottenendo il risultato ottimale con il campione avente densità ρ pari a 100 kg/m³ e conducibilità termica λ pari a 0,046 W/mK.

Panyakaev and Fotios [131] hanno replicato lo studio precedente realizzando un pannello ad alta densità il cui contenuto di cellulosa era pari al 76,31% in peso. I risultati raggiunti hanno mostrato che esiste una relazione tra densità e conducibilità termica riuscendo ad ottenere dei valori prossimi a quelli individuati nella ricerca di Manohar et al. nei provini aventi densità pari a 250 kg/m³.

Le proprietà di assorbimento acustico sono state studiate da Doost-hoseini et al. [150] ottenendo valori di assorbimento sopra allo 0,5 per frequenze superiori a 1000 Hz.

Diversi autori hanno studiato il comportamento delle fibre e della cenere di bagassa come sostituzione parziale del cemento all'interno di composti a base cementizia [151] o come aggregato leggero all'interno di malte cementizie [152] [153] [154] [155].

Alcuni autori hanno proposto l'utilizzo di fibre di bagassa per il rinforzo e la produzione di cartongesso [156].

3.4.8. *Typha*

La Tifa è una pianta appartenente al genere delle *Typha* L. riconducibile alla famiglia delle Typhaceae. La Tifa è considerata una pianta invasiva originaria dell'Europa e dell'America, pertanto, la sua applicazione come materiale da costruzione costituisce un'interessante opportunità di business per i produttori locali e per controllare la sua proliferazione [157] [158]. La pianta si diffonde molto rapidamente mediante le sue radici nelle vicinanze di specchi d'acqua ed è solita sviluppare un'altezza massima di circa 3 metri [159].

Come per altre piante acquatiche, la sua concentrazione minerale dipende dall'apporto di acqua e nutrienti, dall'età e dallo stadio di sviluppo [157]. Le caratteristiche principali della pianta sono l'elevata porosità e la bassa densità, che offre interessanti opportunità per applicazioni termo-acustiche [88].

Alcuni autori hanno utilizzato le fibre di *Typha australis* come rinforzo di materiali in cemento. Diatta et al. [160] hanno dimostrato che l'aggiunta delle fibre di *Typha* ne migliora l'isolamento termico mentre Diagne et al. [161] hanno dimostrato che l'aggiunta di *Typha*, oltre a polpa di sisal e fibre in polipropilene, migliora le caratteristiche meccaniche dei materiali in calcestruzzo.

Dieye et al. [158] ha studiato la possibilità di realizzare un pannello in fibre di *Typha australis* utilizzando l'argilla come legante. Il pannello studiato ha una buona conducibilità termica ma, a causa dei bassi valori di resistenza a trazione e compressione, necessita di essere utilizzato in aggiunta ad una struttura portante.

Inoltre, è stato osservato che la conduttività termica del composito è fortemente connessa al contenuto di umidità

Mar Barbero et al. [157] hanno studiato le proprietà fisico-meccaniche di pannelli contenenti *Typha domingensis* con cemento Portland, aggiunto all'impasto nelle percentuali comprese tra 0-80%, in peso come legante. Gli autori hanno osservato che l'aggiunta delle fibre della pianta provoca una riduzione della resistenza a flessione e un maggior assorbimento d'acqua che ne limita l'impiego nei climi caldo-umidi. Tuttavia, lo studio ha individuato che valori ottimali di resistenza e isolamento possono essere raggiunti con pannelli aventi 60% di fibre di *Typha* e 40% di cemento.

Luamkanchanaphan et al. [162] hanno studiato le proprietà fisiche, meccaniche e termiche di pannelli isolanti preparati con fibre di *Typha angustifolia* a foglia stretta utilizzando difenilmetano diisocinato (MDI - C15H10N2O2) come legante.

I risultati hanno evidenziato che l'isolamento termico dei pannelli con fibre di typha a foglia stretta e MDI, aventi densità di 200, 300 e 400 kg/m³ e uno spessore pari a 10 mm, hanno buone proprietà fisiche, meccaniche e termiche secondo gli standard internazionali, inoltre, la conduttività termica osservata ricade nell'intervallo di valori compresi tra 0,044-0,061 W/mK.

3.4.9. Dattero

La palma da dattero (*Phoenix dactylifera*) è una pianta della famiglia delle *Arecaceae* coltivate nelle regioni semiaride per la produzione dei frutti, conosciuti come datteri.

I residui della coltivazione della palma da dattero, i piccioli e i grappoli del frutto, sono comunemente considerati degli scarti.

L'attuale produzione del dattero è concentrata nei paesi del Golfo arabo i quali producono il 50% della produzione mondiale. Alcuni autori stimano che la produzione mondiale dei datteri causa 1.910 tonnellate di materiale di scarto all'anno [163].

Agoudjil et al. [163] hanno condotto un'indagine sperimentale sulle proprietà termofisiche, chimiche e dialettiche del legno della palma da dattero al fine di utilizzare il materiale indagato per l'isolamento degli edifici. Le prove condotte dagli autori hanno altresì testato l'influenza dell'orientamento delle fibre del materiale. Sono stati esaminati tre varietà di legno di palma da dattero evidenziando che i risultati migliori indicavano una conducibilità termica di 0,072 W/mK per i campioni avente fibre ortogonali al flusso di calore.

Oushabi et al. [164] indagano sull'opportunità di utilizzare gli scarti della palma da dattero come materiale naturale isolante efficiente e sicuro. Gli autori hanno analizzato sette varietà di piante presenti dell'area del Marocco. Dalle analisi condotte la varietà *Boufeggous* ha mostrato un buon contenuto di umidità (3-5%), ottima resistenza a flessione (353,5 MPa), un ottimo modulo di elasticità (4.410 MPa) e ottimi valori di conduttività termica (0,041 W/mK).

Alcuni autori hanno studiato le proprietà termofisiche e meccaniche di materiali compositi rinforzati con fibre di palma da dattero ottenute per macinatura del legno della pianta e cemento [135] [136]. I risultati hanno rivelato che la presenza di fibre di palma da dattero migliora le prestazioni e l'efficienza del materiale composito: abbassamento della resistenza alla diffusione del vapore acqueo e miglioramento del trasferimento di umidità.

Chikhi et al. [167] hanno presentato un nuovo materiale biocomposito contenente fibre di palma da dattero e gesso rivelando che la conducibilità termica, l'assorbimento d'acqua e la resistenza meccanica sono tutte influenzate dalla quantità di fibre.

3.4.10. Ananas

L'Ananas è gruppo di piante appartenenti alla famiglia delle *Bromeliaceae* originarie del Sud America. Il frutto delle piante dell'ananas vengono comunemente chiamati con il nome della pianta e la loro

raccolta produce diversi residui tra cui le foglie che attualmente vengono bruciate o utilizzate come biocombustibili [88].

Le pratiche di smaltimento dei residui dell'ananas, pertanto, contribuiscono all'inquinamento ambientale. A tal fine alcuni autori ne hanno studiato la loro applicazione come materiali per l'isolamento edile.

Kumfu e Jintakosol [168] hanno realizzato un pannello isolante termico con fibre delle foglie di ananas e gomma naturale utilizzando la tecnica di pressatura a caldo. Gli autori hanno altresì investigato l'assorbimento d'acqua e la conduttività del pannello da loro realizzato. L'intento degli autori era quello di trovare un'alternativa sostenibile agli attuali isolanti sintetici. I valori di conducibilità riscontrati dalle prove effettuate dagli autori hanno stabilito il processo realizzativo del pannello ed una conducibilità termica di 0,057 W/mK prossima ai valori dei materiali isolanti comunemente utilizzati.

Tangjuank [169] effettua uno studio simile in cui utilizza il lattice naturale per incollare le fibre delle foglie di ananas. L'autore afferma che l'utilizzo delle foglie d'ananas e del legante nel rapporto 1:3 possiede valori di isolamento ideali (0,035 W/mK) per essere applicato come isolante termico degli edifici.

3.4.11. *Bambù*

Il termine bambù identifica un gruppo di piante appartenenti alla famiglia delle Poacee. Tali piante crescono nelle zone tropicali e subtropicali e le maggiori quantità di queste piante si possono trovare in Asia. La pianta è caratterizzata dal rizoma, dal culmo e dai rami. Il culmo, in particolare è composto da cellulosa (55%), emicellulosa (20%) e la lignina (25%) [170]. Per la sua somiglianza al legno, nel settore delle costruzioni sono presenti applicazioni di questo materiale in sostituzione o in combinazione con fibre di legno. La presenza di cellulosa, inoltre, ne ha reso possibile l'applicazione nel campo dell'isolamento edile. Alcuni autori hanno provato recentemente a studiare le prestazioni meccaniche ed isolanti di pannelli contenenti fibre di bambù.

Yang et al. [171] hanno studiato il processo realizzativo di un pannello contenente fibre del bambù unite con una resina UF. La formazione del pannello, inoltre, ha richiesto la procedura di pressatura a caldo. Altri autori hanno studiato le prestazioni termiche di un pannello realizzato con fibre di bambù del diametro massimo di 0,2 mm e diversi adesivi biologici provenienti dai nervi del bestiame [172]. La conducibilità termica dei pannelli di fibra di bambù è risultata essere piuttosto bassa, variando tra 0,0582 e 0,0812 W/mK, inoltre, la conduttività termica del materiale, così come molti materiali fibrosi naturali è risultato essere dipendente dell'umidità relativa ambientale e del contenuto di umidità.

3.4.12. Pannocchia di mais

La pannocchia di mais è un'infiorescenza della pianta del mais (*Zea mays L.*) appartenente alla famiglia delle *Poaceae*. Il mais è uno dei principali cereali e largamente coltivato nelle regioni tropicali e temperate. Comunemente, la pannocchia di mais è trattata come un rifiuto agricolo della produzione del mais [173] e, considerando che la produzione mondiale di mais nel 2019 è stata pari a 1.148.487.291 tonnellate [174], allo smaltimento di questo rifiuto è associabile un considerevole impatto ambientale.

Diversi autori negli ultimi decenni hanno lavorato con l'intento di trovare un uso compatibile degli scarti del mais con le politiche ambientali, intensificando la produzione scientifica riguardante composti isolanti *green*.

Pinto et al. [175] scoprirono che in Portogallo gli edifici realizzati con la tecnica del *Tabique* erano stati realizzati utilizzando le pannocchie del mais e terra cruda come materiali di riempimento. Una ricerca successiva si concentra sulla possibile applicazione delle pannocchie di mais come materiale isolante per le nuove costruzioni [173]. Sebbene gli autori abbiano fornito una procedura per la macinazione delle pannocchie finalizzata alla produzione di un pannello interamente realizzato con granulato di pannocchia e colla per legno, il valore di conducibilità termica ottenuto (0,101 W/mK) dimostra che è necessario un ulteriore approfondimento del processo di lavorazione [176]. Nella stessa ricerca le fibre delle pannocchie sono state aggiunte come rinforzo per la preparazione di elementi non strutturali in calcestruzzo dimostrando che, dal punto di vista termico, il loro impiego migliora le prestazioni del materiale.

3.4.13. Banana

Il banano è una pianta appartenente alla famiglia delle *Musaceae* originaria dei paesi con clima tropicale del sud-est asiatico. Il banano è una pianta caratterizzata da una rapida crescita e dai suoi frutti, *muse acuminata* conosciute come banane. Essendo il banano una pianta di tipo ornamentale la sua presenza può essere apprezzata anche in Italia. Essendo la pianta originaria adatta ai climi caldi è possibile trovare alcune sue coltivazioni nel sud-Italia, in particolare nelle regioni della Puglia, Calabria e Sicilia.

La pianta è caratterizzata dal fusto principale in grado di raggiungere altezze comprese tra i 6-7 metri e dalle foglie disposte a spirale attorno al fusto. Dal fusto emergono delle inflorescenze da cui è possibile ammirare i frutti della pianta.

La coltivazione del banano produce una considerevole quantità di rifiuti che vengono comunemente bruciati all'aria aperta e, pertanto, non esiste un corretto utilizzo di questi rifiuti [177] [178].

Nolasco et al. [179], hanno effettuato una caratterizzazione fisico- meccanica delle fibre del banano affermando che il fusto della pianta è un materiale simile a una foglia morbida, con un alto contenuto fibroso le cui fibre lunghe costituiscono circa l'1,5% della massa totale della pianta. Bhatnagar et al. [180], dopo aver indagato sulle proprietà delle fibre del banano, hanno concluso ipotizzando

utilizzi alternativi degli scarti della pianta quali la realizzazione di articoli sportivi e per il tempo libero e applicazioni per le industrie navali e aerospaziali.

Parkash [181] ha sviluppato un nuovo materiale isolante utilizzando gli scarti della banana. In particolare l'autore ha utilizzato le foglie verdi della pianta utilizzando un processo di trattamento chimico per la preparazione degli scarti. Dopo esser stati trattati, gli scarti del banano sono stati triturati e mescolati con resina epossidica e plastica. I valori di trasmittanza riscontrati dall'autore variano tra 0,366 e 0,456 W/mK.

Muthukumar et al. [182] hanno studiato la conducibilità termica e la resistenza termica di composti contenenti fibre di banana miscelate con percentuali diverse di fibre di ananas e juta ottenendo valori ottimali per la miscela contenente 60% di fibre di banano, 32% di fibre di ananas e 8% di fibre di juta.

Sherely et al. [183] hanno utilizzato le fibre del banano e polipropilene per produrre un materiale composito innovativo. Sono stati analizzati gli effetti della variazione della quantità dei due componenti e dei diversi trattamenti chimico fisici. Il campione più performante aveva una conducibilità termica di 0,157 W/mK e una densità di circa 980 kg/m³.

3.4.14. Lino

Le fibre di lino sono prodotte dal *Linum usitatissimum L.*, una pianta i cui primi utilizzi risalgono al periodo degli egizi.

La pianta è caratterizzata da un alto contenuto di cellulosa, circa il 70%, e le sue fibre hanno una spiccata capacità di trattenere l'aria, che conferisce al materiale buone proprietà di isolamento termico [88].

Le prestazioni termiche delle fibre di lino sono influenzate dalla grandezza delle fibre macinate. El Hajj et al. [184] hanno scoperto che ad un aumento delle dimensioni della macinatura corrisponde un aumento della conducibilità termica e un aumento dell'assorbimento acustico. I materiali analizzati dagli autori hanno mostrato prestazioni termiche e acustiche interessanti (conduttività termiche comprese tra 0,06 e 0,09 W/mK e coefficiente acustico superiore a 0,5) associate a proprietà meccaniche sufficienti che ne consentono l'applicazione all'interno di pannelli sandwich.

Le prestazioni termiche del lino sono state misurate da diversi autori i quali hanno sempre miscelato le fibre del lino con altri materiali fibrosi. Ad esempio Kymalainen e Sjoberg [185] hanno studiato le proprietà termiche di un composto naturale realizzato con fibre di lino e canapa sativa mentre Korjenic et al. [48] hanno studiato le proprietà delle fibre di lino con un legante di origine sintetico bicomponente. Le prove effettuate Korjenic et al. su un campione di densità di 32 kg/m³ ha mostrato una conducibilità termica di 0,043 W/mK e un fattore di resistenza al vapore acqueo pari a 2,9.

Altri autori, invece, hanno condotto uno studio sulla crescita della muffa delle fibre vegetali determinando che l'applicazione di acido borico permette alle fibre di ostacolare con successo la crescita di muffe [186].

3.4.15. *Kenaf*

Le fibre di kenaf sono ottenute dall'*Hibiscus cannabinus*, una pianta a crescita rapida in grado di raggiungere grandi altezze in pochi anni [187]. Per incrementare le prestazioni ignifughe del materiale, le fibre di kenaf sono additivate con poliestere e additivi ritardanti di fiamma. Il materiale è caratterizzato da una conducibilità termica compresa tra 0,034 e 0,043 W/mK [88]. Esistono già in commercio alcuni pannelli isolanti in kenaf aventi densità compresa tra 30 e 180 kg/m³ e un calore specifico pari a 1,7 kJ / kg K.

Xu et. al [188] hanno testato le proprietà termo-acustiche di un pannello a bassa densità avente un nucleo in fibre di kenaf tenute insieme tra loro per pressione di vapore acqueo. La conducibilità termica del pannello indagato è risultata essere dipendente dalla sua densità, che varia tra 0,040 W/m K, per densità pari a 100 kg/m³, 3 0,060 W/m K per il pannello avente 250 kg/m³. Le proprietà acustiche del pannello, invece, hanno mostrato un maggior assorbimento nelle frequenze superiori a 1000 Hz. Nel complesso il pannello presenta valori confrontabile con altri isolanti convenzionali, come la lana di roccia.

Uno studio interessante sull'impatto ambientale del materiale è stato effettuato da Ardente et al. [189], i quali, sulla base dell'LCA, hanno confrontato le prestazioni di vari prodotti isolanti affermando che l'impatto del materiale isolante contenente kenaf è minore rispetto a materiali sintetici come poliuretano e lana di vetro.

3.4.16. *Lana di pecora*

La lana di pecora è una fibra tessile ottenuta dalla tosatura delle pecore. La lana di pecora è un materiale rinnovabile, ecocompatibile e isolante. Essa è composta per il 60% da fibre proteiche animali, il 15% di umidità, 10% di grassi e il 10% di impurità [190].

Diversi autori hanno utilizzato la lana delle pecore come materia prima per applicazioni di isolamento termico e assorbimento acustico.

Zach et. al [190] hanno investigato le proprietà dell'isolamento termico e acustico della lana di pecora ottenendo risultati confrontabili alla lana minerale. Ghermezgoli et al. [191] hanno utilizzato la lana di scarto prodotta a seguito della periodica tosatura delle pecore. I risultati della ricerca hanno indicato che la lana di scarto può essere utilizzata come materiale di isolamento termico e acustico: essa ha caratteristiche acustiche e termiche comparabili a minerali e lane e materiali a base di fibra di vetro.

Pennacchio et al. [192] hanno sperimentato un nuovo pannello semirigido naturale ed ecocompatibile contenente canapa e lana di pecora naturale.

4. IL SETTORE OLIVICOLO

4.1. INTRODUZIONE

L'ulivo (*Olea europaea*) è un albero da frutto sempreverde la cui propria attività vegetativa, escludendo la stagione invernale, può essere considerata costante durante tutto l'anno. L'oliva è il frutto dell'ulivo e viene comunemente utilizzato sia scopo alimentare che come materia prima per l'estrazione dell'olio di oliva.

L'oliva è una **drupa** ossia un frutto che racchiude al suo interno il seme della pianta. Tutti i frutti appartenenti alla famiglia delle Drupacee, tra cui l'ulivo, presentano una suddivisione in tre parti: l'*epicarpo*, la parte più esterna e sottile del frutto comunemente chiamata buccia; il *mesocarpo*, la parte carnosa del frutto conosciuta anche come polpa; l'*endocarpo*, ovvero la parte legnosa del frutto contenente al suo interno il seme e denominato nocciolo (vedi [Figura 33](#)).

La coltivazione globale dell'*Olea europea* si estende su un'area di 105.782,5 km² e il 48% di questa superficie è situata in Europa. La diffusione della pianta dell'ulivo è principalmente localizzata nell'area mediterranea [\[193\]](#).

In Europa (UE27) la coltivazione dell'ulivo occupa un'area di 50.531,6 km² e costituisce la quinta coltura per estensione nel territorio dopo i cereali, l'orzo, il mais e la colza (FAOSTAT,2020). Tale area è concentrata in Spagna (51,5%), Italia (22,5%) e Grecia (17,9%) che costituiscono anche i principali produttori di olive a livello europeo (vedi [Figura 35](#))



Figura 33 - Schematizzazione della composizione del frutto dell'oliva (*Olea europaea*)



Figura 34 – Coltivazione olea europea nell'area mediterranea (Fonte:)

La produzione globale di olive nel 2019 è stata di 19,5 Mt e i paesi dell'UE hanno contribuito nella misura del 54%. L'Italia ha contribuito nella misura del 21% alla produzione europea delle olive e il 94% di esse è stata destinata alla produzione di olio d'oliva mentre solamente il 6% è riservato ad uso alimentare.

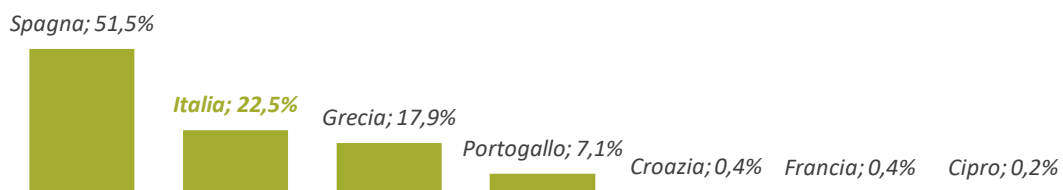


Figura 35 - Area coltivata con *Olea europea* nei paesi UE27 - anno 2019 (fonte dati: FAOSTAT)

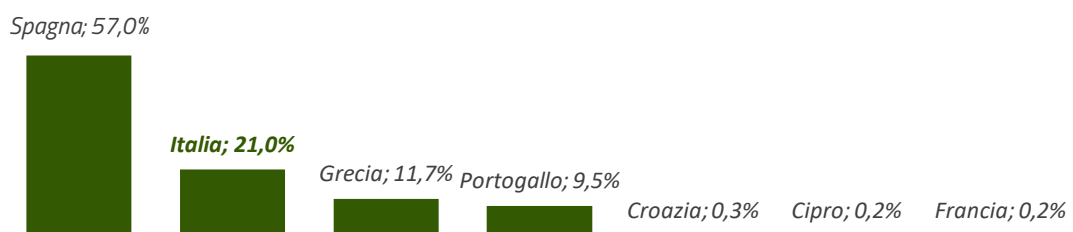


Figura 36 - Produzione di olive nei paesi UE27 - anno 2019 (fonte dati: FAOSTAT)

L'Italia è il terzo paese per area coltiva e il secondo produttore di olive a livello mondiale, inoltre, possiede un patrimonio olivicolo apprezzato a livello internazionale che vanta 150 milioni di piante

diffuse su tutto il territorio nazionale e 825 mila aziende che operano annualmente nel settore olivicolo.

Analizzando i dati relativi alla ripartizione regionale, si osserva che 79% della produzione nazionale è concentrata nell'area del sud-Italia e in particolare in Puglia (53%), Calabria (13%) e Sicilia (10%).

La produttività del settore è caratterizzata da una bassa redditività connessa principalmente ai costi molto elevati della manodopera impiegata nella coltivazione delle olive. Tale aspetto ha favorito la diffusione di fenomeni negativi come la non raccolta delle olive e l'abbandono degli oliveti italiani. Confrontando il numero delle aziende spagnole e italiane è possibile accorgersi di un'estrema frammentarietà del settore che influisce negativamente sulla redditività del settore [194].

Analizzando il rendimento dei paesi dell'UE27 è possibile notare che l'Italia, sebbene sia il secondo produttore a livello mondiale di olive, è il 25esimo paese per rendimento (FAOSTAT,2020).

Nel corso degli ultimi anni, pertanto, l'intero settore è stato oggetto di politiche di ammodernamento con l'obiettivo risolvere le problematiche sopra descritte e al contempo di incentivare le performance ambientali del settore. Sulla base delle analisi storiche emerge, dunque, la necessità di salvaguardare un settore molto importante per il paese che è diventato un emblema del *Made in Italy* e di trovare soluzioni che consentono di rispettare le politiche di decarbonizzazione europea entro il 2050.

Alle difficoltà economica del settore dell'olivicoltura italiana si aggiunge il problema ambientale indotto dalla gestione dei rifiuti provenienti dai frantoi connessi all'attività estrattiva dell'olio. Tali rifiuti sono considerati un'importante fonte di inquinamento ambientale poiché essi costituiscono circa il 75% delle olive raccolte.

4.2. IL CICLO PRODUTTIVO DELL'OLIO DI OLIVA

Come detto in Italia la produzione delle olive è destinata al settore alimentare, olive da tavola, e al settore dell'estrazione di olio d'oliva, olive da olio. Quest'ultime, in particolare, costituiscono il 94% della produzione nazionale e, pertanto, ad esse è associabile il principale impatto ambientale.

Attualmente la produzione dell'olio di oliva avviene operando secondo due differenti processi lavorativi: il sistema tradizionale a ciclo discontinuo a pressione e sistema di centrifugazione a ciclo continuo.

4.2.1. Estrazione a con ciclo discontinuo a pressione

Il sistema di estrazione a ciclo discontinuo costituisce il metodo tradizionale che è stato storicamente il principale sistema di estrazione fino agli anni '60. Il funzionamento del sistema è basato sulla iniziale molitura delle olive e la successiva separazione della frazione solida (*sansa*) della fase liquida (*mosto oleoso*), costituita da una miscela di acqua e olio, mediante una pressa olearia.

Il sistema tradizionale include anche alcune fasi intermedie quali la frangitura e la gramolatura, con lo scopo di rompere i vacuoli cellulari e favorire la fuoriuscita delle gocce d'olio più piccole dell'oliva e di impastare il composto. Il sistema tradizionale negli anni ha subito alcune innovazioni riguardanti il mezzo meccanico frangente. Nei frantoi italiani che tutt'oggi applicano il sistema tradizionale la molazza in pietra è stata sostituita con frangitori a martelli o a dischi.

La pasta d'olive prodotta dalla fase iniziale dell'estrazione viene stesa per mezzo di un dosatore meccanico su dei fiscoli, dischi in fibra di grandi dimensioni, sovrapposti tra loro e alternati con dischi metallici in modo tale da costituire una pila.

La pila poi viene posizionata su dei torchi idraulici o presse per la spremitura della pasta d'oliva e la raccolta del mosto oleoso che cade verso il basso per effetto dello schiacciamento e della gravità e raccolte da vasche di decantazione. Le presse presentano un pistone di diametro pari a 40 cm che esercita una pressione dal basso verso l'alto nell'ordine delle 350-400 atmosfere per un intervallo di tempo compreso tra 45 e 90 minuti. Il mosto oleoso raccolto viene in seguito sottoposto a centrifugazione al fine di separare la parte oleosa dalle acque di vegetazione.

In questo sistema di estrazione, dunque, si generano due differenti tipologie di flussi uscenti: una parte solida, la sansa disposta sui fiscoli, e le acque di vegetazione dopo la separazione dal mosto oleoso.

4.2.2. Estrazione a ciclo continuo per centrifugazione

La necessità di valorizzare e aumentare la produttività del settore della olivicoltura ha favorito l'avvicinarsi di nuovi sistemi di estrazione caratterizzati da una migliore efficienza.

All'interno degli impianti a ciclo continuo le olive raccolte sono immerse nella macchina lavatrice, mediante il nastro trasportatore, per il loro lavaggio, successivamente, le olive sono trasferite nella tramoggia e trasportate nella macchina frangitrice che, come nel ciclo discontinuo, ha la finalità di rompere i vacuoli interni delle olive formando la pasta di olive. Quest'ultima viene trasferita nella macchina gramolatrice, solitamente suddivisa in diversi settori, in cui delle pale in acciaio inossidabile motorizzate si occupano di mescolare il mosto oleoso. Le pareti della macchina gramolatrice possiedono un'intercapedine all'interno delle quali viene fatta circolare acqua tiepida con lo scopo di preriscaldare il mosto oleoso.

Con l'ausilio di un'elettropompa la pasta d'olio viene trasferita dalla gramolatrice all'interno di un decantar in cui pale troncoconiche motorizzate vengono fatte ruotare ad una velocità di 10-20 giri al minuto per separare la parte solida (sansa) dalle parti liquide (olio e acque di vegetazione).

I primi impianti di estrazione a ciclo continuo per centrifugazione prevedevano che la pasta d'olio fosse frazionata in due parti: olio d'oliva e sansa umida. La necessità di diluire il quantitativo d'acqua presente nella pasta d'olio ha favorito l'inserimento di un'ulteriore fase di centrifugazione che ha consentito di frazionare il composto in tre parti: olio, sansa umida e acqua di vegetazione.

Ad oggi i sistemi di centrifugazione a ciclo continuo sono suddivisi in metodo:

- a 2 uscite o bifase: in cui sono ricavati olio (con un contenuto d'acqua compreso tra il 5 e il 15% e solidi in sospensione) e sansa (con un contenuto d'acqua compreso tra il 58 e il 62% e solidi in sospensione);
- a 3 uscite o trifase: in cui sono ricavati olio (con un contenuto d'acqua compreso tra il 2 e il 5% e solidi in sospensione), acqua (che contiene dal 10 al 15% di solidi in sospensione) e sansa (contenente dal 48 al 54% di acqua, solidi in sospensione e dall'8 al 12% di olio) [195].

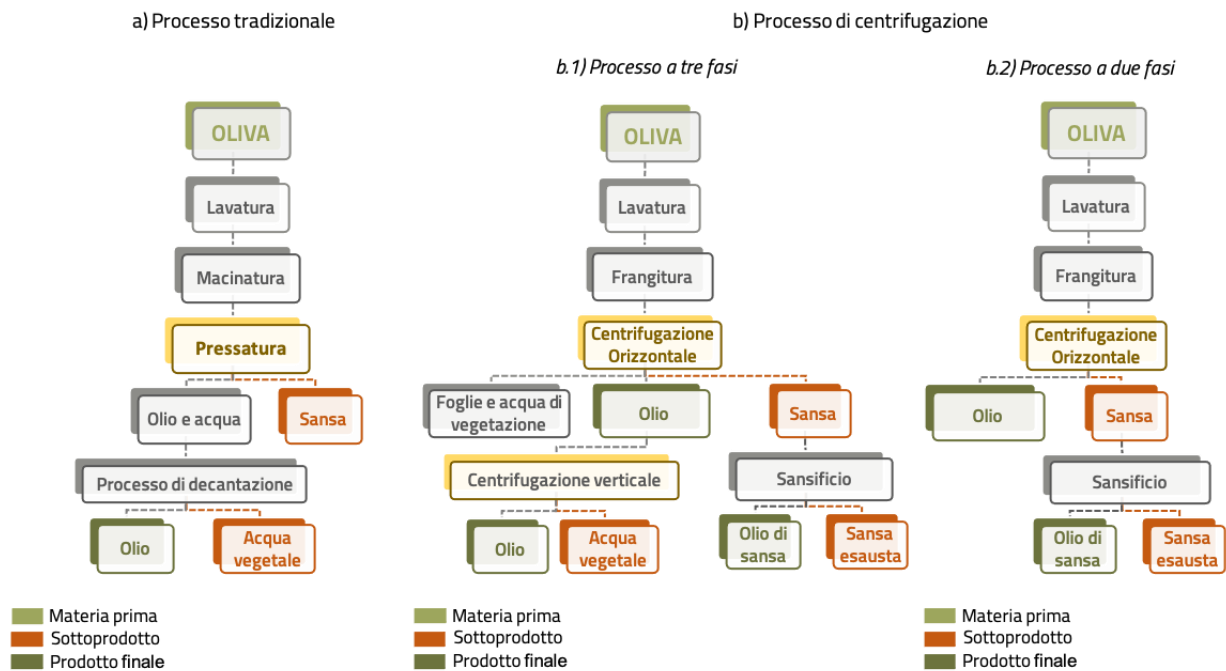


Figura 37 - Schema dei principali processi lavorativi per l'estrazione dell'olio di oliva

4.2.3. Gli scarti del processo lavorativo della produzione delle olive

La qualità e la quantità degli scarti derivanti dalla lavorazione delle olive è connessa al metodo utilizzato per l'estrazione dell'olio d'oliva. I processi di estrazione dell'olio di oliva producono ingenti quantità di rifiuti che, a causa della loro elevata fitotossicità, gravano sull'ambiente e sulla falda acquifera [196].

I rifiuti prodotti all'intero dei frantoi sono considerati pericolosi per l'ambiente e vengono classificati come olive mill wastes (OMWs). La loro corretta gestione è considerata una delle principali sfide ambientali che coinvolge tutti i paesi della regione mediterranea [197]. Durante la produzione dell'olio circa il 98 % del contenuto fenolico dell'oliva costituisce un sottoprodotto del frantoio. Sebbene gli OMW rappresentino una serie minaccia per l'ambiente oggi sono già presenti soluzioni di riuso degli scarti in diversi settori.

Osservando il ciclo produttivo dell'olio di oliva, dalla coltivazione alla trasformazione delle olive in olio, si possono osservare diverse tipologie di scarto. Il primo sottoprodotto è costituito da un mix di particelle legnose e alcuni piccoli rami e foglie accumulate durante la potatura annuale e la fase di raccolta delle olive [198]. La quantità di materiale di scarto dipende dalla tecnica utilizzata per la raccolta delle olive: comunemente gli olivicoltori si avvalgono di tecniche di tipo manuale quali la brucatura, la bacchiatura, la pettinatura e la raccattatura. La scelta di una tecnica, essendo un'operazione manuale dispendiosa per gli olivicoltori sotto il profilo economico, dipende dalle risorse e dalla qualità desiderata. Tutte le tecniche di raccolta conosciute, ad eccezione della brucatura, producono degli scarti per le aziende agricole che sommati agli scarti della potatura possono stimarsi a 25 kg per albero.

Avvalendosi del coefficiente di produttività stabilito dal CEESTAT, che indica il rapporto tra residuo e prodotto sul territorio nazionale (cfr. **Tabella 20**), e della superficie nazionale coltivata a ulivo¹², si può quantificare che la produzione degli scarti nazionale nel 2019 è pari a 1,9 milioni di tonnellate [199][200].

Tabella 20 – Produzione media di residui e rapporto residuo/prodotto in Italia

<i>Pianta</i>	<i>Residuo/rapporto</i>	<i>Residuo/prodotto</i>
	<i>[t/ha]</i>	<i>[t/ha]</i>
Vite	2,9	0,2-0,8
Olivo	1,7	0,5-0,6
Melo	2,4	0,1
Pero	2,0	0,1
Pesco	2,9	0,2
Agrumi	1,8	0,1
Mandorlo	1,7	1,9
Nocciolo	2,8	1,9

A tali residui bisogna aggiungere gli scarti dei processi estrattivi dell'olio di oliva. Come detto nei capitoli precedenti, ad oggi esistono due tipologie di sistemi di lavorazione delle olive: metodo tradizionale (ciclo discontinuo) e metodo moderno (ciclo continuo).

Entrambi i processi estrattivi necessitano di un significativo apporto di acqua in entrata che influiscono sia sulla resa dell'olio che sull'ammontare dei rifiuti. La necessità di lavorare le olive entro 48 h dalla loro raccolta, inoltre, comporta un accumulo quasi istantaneo di rifiuti misti (solidi e liquidi) [197].

Nel momento in cui le olive entrano nel frantoio, a seguito della fase preparatoria di defogliatura, viene prodotto un primo flusso in uscita di legnetti e foglie. Tale flusso è identico nei due metodi

¹² Secondo i dati ISTAT la superficie italiana coltivata ad ulivo è pari a 1.100.000 ha.

estrattivi e costituisce il 6% del peso totale delle olive in ingresso al frantoio. Prima dell'attuale normativa ambientale, tale scarto era solito essere smaltito mediante incenerimento nei campi con evidenti problemi di carattere ambientale. Oggi la necessità di far fronte ai margini economici in calo degli olivicoltori ha favorito pratiche di riutilizzo del fogliame e dei legnetti come ammendante privo di patogeni.

La spremitura delle olive ottenuta con il metodo tradizionale o per centrifugazione genera un flusso in uscita di olio d'oliva vergine e due tipologie di sottoprodotti: una componente solida composta da buccia, polpa e noccioli di oliva denominata *sansa* e un flusso liquido costituito dalle acque di lavaggio e di lavorazione delle olive denominate *olive mill water waste (OMWW)* (cfr. **Figura 38**).

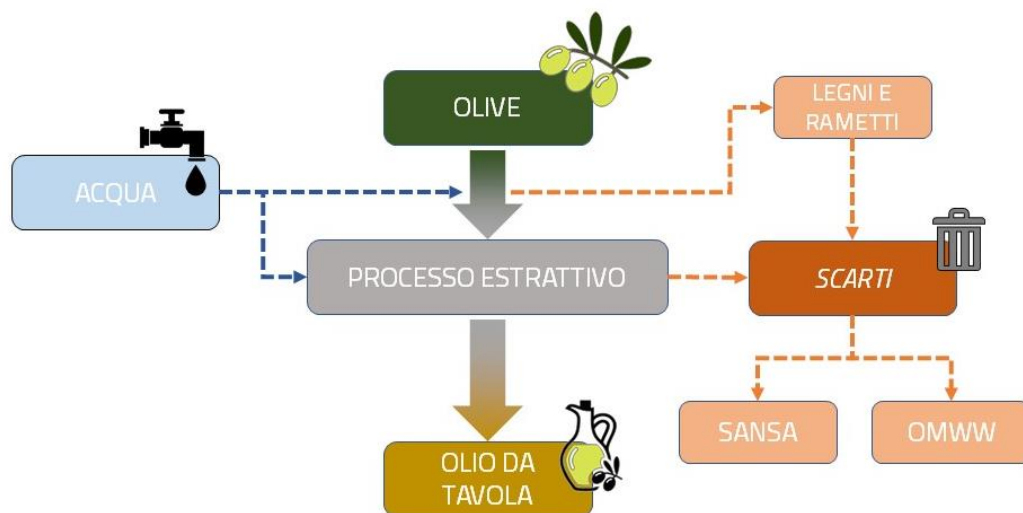


Figura 38 - Schematizzazione dei flussi in input e output del processo estrattivo dell'olio di oliva (elaborazione personale)

Il processo di spremitura tradizionale ottenuto per pressione delle olive è ancora largamente diffuso e richiede un utilizzo di acqua in ingresso superiore rispetto ai processi moderni di centrifugazione. I processi estrattivi per centrifugazione pertanto, consentono di migliorare l'efficienza del sistema ottenendo in output una qualità dell'olio migliore e una riduzione dei rifiuti del 75%.

Il sistema di centrifugazione trifase produce in condizioni normali un 20% di olio d'oliva, un 30% di *sansa* e il rimanente 50% da OMWW. Complessivamente il sistema a centrifugazione a tre fasi produce l'80% di sottoprodotti sul peso delle olive in ingresso ovvero una quantità quattro volte superiore a quella del prodotto finale [197].

Il sistema di centrifugazione bifase, invece, come è noto richiede un quantitativo d'acqua inferiore, circa il 90% in meno, e conseguentemente comporta un quantitativo inferiore di scarti. Tuttavia tali scarti contengono un'umidità elevata, il 62%, che rende il sottoprodotto difficile da smaltire o da avviare a processi di riutilizzo.

Durante questo metodo estrattivo le olive vengono lavate, frantumate, gramolate ed infine viene estratto l'olio separandolo dagli scarti. Il processo di decantazione avviene in seguito al passaggio della gramolatura all'interno di un decantar a temperatura controllata e costante, massimo 27°C, in modo da non alterare le proprietà organolettiche dell'olio, per un intervallo di tempo di 30 minuti.

Le acque di vegetazione (OMWW) in uscita derivano dalle operazioni di lavaggio e dalle modalità con cui le olive vengono pressate o frantumate e il loro volume può variare in un intervallo compreso tra 0,1 a 1 m³ per tonnellata di olive lavorate (cfr. **Tabella 21**) [194]

Tabella 21. Analisi delle quantità input/output dei processi produttivi dell'olio di oliva (elaborazione su dati [194])

<i>Tipologia di lavorazione</i>	<i>Input</i>	<i>Quantità</i>	<i>Output</i>	<i>Quantità [Kg]</i>
Tradizionale	Olive	1000 kg	Olio	~ 200 kg
	Lavaggio	0,1-0,12 m ³	Sansa (25% acqua e 6% olio)	~ 400 kg
	Energia	40-63 kWh	Acqua di lavaggio (88% acqua, solidi e olio)	~ 600 kg
Decantazione trifase	Olive	1000 kg	Olio	200 kg
	Lavaggio	0,1- 0,12 m ³	Sansa (50% acqua e 4% olio)	500-600 kg
	Aggiunta d'acqua lavaggio	0,5 - 1 m ³	Acqua di lavaggio (94% acqua e 1% olio)	1000- 1200 kg
	Aggiunta d'acqua decanter	~ 10 L		
Decantazione bifase	Energia	90 - 117 kWh		
	Olive	1000 kg	Olio	200 kg
	Lavaggio	0,1-0,12 m ³	Sansa (60% acqua e 3% olio)	800-950 kg
	Energia	< 90 - 117 kWh		

4.2.4. Le attuali soluzioni di riutilizzo degli scarti della lavorazione dell'ulivo

Le modifiche introdotte con il codice dell'ambiente costituiscono un punto di rottura con il passato. La norma D.lgs. 152/2006 e la L. 116/2014 hanno accolto quanto già previsto nella direttiva comunitaria 2008/98/CE e hanno imposto procedimenti e metodi volti a proteggere l'ambiente e la salute umana. Ai sensi dell'art. 184 del D.lgs 152/2006 tutti i rifiuti delle attività agricole e agro-industriali sono classificati come rifiuti speciali e, pertanto, ad essi sono associati costi di trasporto e smaltimento. Nell'art.185 comma 1 del D.lgs 152/2006 è altresì esplicitato che le potature e qualsiasi materiale agricolo non pericoloso utilizzato in agricoltura o per la produzione di energia non è considerabile come un rifiuto.

A seguito dell'entrata in vigore della norma sull'ambiente, pertanto, sono aumentate le pratiche di riutilizzo degli scarti delle attività agricole al fine di contenere i costi di produzione e gestione dell'intero settore agricolo.

Le limitazioni imposte con la normativa ambientale e la scarsa redditività dell'olio ha indotto gli olivicoltori a ridurre al minimo le operazioni colturali e a introdurre pratiche di riuso in linea con i principi di economia circolare in grado di fornire una fonte di reddito aggiuntiva [194].

La gestione dei residui di potatura ha rappresentato generalmente un problema di smaltimento, più che un'opportunità di guadagno aggiuntivo. La normale pratica di gestione delle potature presuppone che esse siano pacciamate, tagliate o lasciate in loco per ammendare il terreno o, nella maggior parte dei casi, ammucciate e incenerite [201][202].

Ad oggi i residui della coltivazione dell'ulivo sono stati impiegati anche in alcune applicazioni chimiche quali la produzione di bioetanolo [203], come colorante naturale del cotone [204], come pasta di carta [205] o per la produzione di nanofibre a base di cellulosa [198].

In letteratura sono presenti diversi studi che affermano che gli scarti derivanti dalle operazioni di potatura dell'albero dell'ulivo possono essere utilizzati ai fini della valorizzazione energetica [191] [192]. Tale tipologia di sottoprodotto, infatti, può essere sottoposto a gassificazione mediante la quale lo scarto, dopo essere stato posto a decomposizione termica, produce un gas sintetico (syngas) con proprietà termiche simili a quelle del metano [206].

Martellotta et al. [207] hanno studiato gli scarti della potatura dal punto di vista acustico analizzando le loro proprietà di assorbimento acustico. I campioni osservati sono stati realizzati con un legante a base di chitosano in modo da contenere l'impatto ambientale del materiale composito. I risultati sperimentali degli autori hanno dimostrato che è possibile ottenere coefficienti di assorbimento pari a 0,9 per frequenze superiori a 1000 Hz.

Liuzzi et al. [208] hanno studiato, invece, l'applicazione degli scarti della potatura dell'ulivo combinati all'argilla per ottenere un intonaco naturale. Lo studio si è focalizzato sulle proprietà igrometriche del materiale aventi differenti percentuali di fibre naturali simulando per ciascuno di essi il loro comportamento all'interno di un *test building* posto in clima mediterraneo. L'aggiunta delle fibre derivanti dalla potatura dell'ulivo ha avuto un impatto positivo sulle prestazioni termiche del materiale e dalla simulazione del *test building* con sistemi HVAC è stato notato una riduzione della domanda energetica durante la stagione estiva.

Oltre ai residui provenienti dalle attività di coltivazione dell'ulivo sono stati indagati gli scarti provenienti dall'estrazione dell'olio. Alcuni autori hanno studiato l'applicazione del nocciolo dell'oliva come additivo nella malta cementizia [209] [210]. Il nocciolo di oliva varia dal 25 al 40% del peso delle olive spremute e in funzione delle tecnologie utilizzate per l'estrazione dell'olio. Il nocciolo dell'oliva ha un potere calorifero prossimo a 17 MJ/kg ed attualmente può trovarsi in commercio come biocombustibile, tuttavia, la maggiore quantità di fumi prodotti dal nocciolino rispetto altre biomasse ne rende complesso il suo utilizzo [209].

Barreca e Fichera [209] hanno applicato i noccioli dell'oliva per migliorare le prestazioni isolanti degli intonaci a base di calce e cemento. Le misurazioni in situ effettuate dagli autori hanno evidenziato che l'aggiunta del 70% in peso di nocciolo d'oliva ha permesso di ridurre la conduttività termica del 76% e ridotto la densità del materiale del 30%. Tuttavia tutti i campioni contenenti i noccioli di ulivo hanno evidenziato un aumento dell'assorbimento d'acqua. Del Rio Merino et al. [210] hanno studiato la possibilità di sostituire l'argilla espansa con i noccioli dell'oliva all'interno di intonaco a base cementizia tipicamente utilizzata nelle abitazioni spagnole. Attraverso l'indagine con il microscopio elettronico (SEM) gli autori hanno osservato che il trattamento di pirolisi dei noccioli di oliva aumenta la rugosità del materiale e con essa la miglior aderenza con il cemento. Il materiale indagato, pertanto, ha conferito all'intonaco ottime proprietà isolanti e meccaniche.

In alcuni studi presenti in letteratura sono presenti interessanti ed innovativi riutilizzi della sansa di oliva come additivo per resina, abrasivo. In uno studio è stato osservato sperimentalmente il comportamento della buccia di olivo come additivo per conglomerati bituminosi. A seguito dello studio di Al-Masaeid et al. si è scoperto che l'aggiunta del 10% in peso di buccia di oliva alle miscele di calcestruzzo bituminoso aumenta la resistenza allo stripping, la durata, la resistenza all'acqua e alla temperatura e la resistenza sia all'umidità che ai ripetuti danni indotti dai cicli di gelo e disgelo [211]. Altri autori hanno utilizzato la sansa come additivo per la produzione di mattoni termicamente isolanti con una buona resistenza termica [212][213].

Sutcu et al. [212] hanno aggiunto la sansa secca all'interno dell'argilla hanno riscontrato una diminuzione del 31% della conduttività termica dei mattoni indagati notando che l'aumento della temperatura di cottura ha influito sulle proprietà meccaniche e fisiche. La Rubia-Garcia et al. [213] invece, hanno utilizzato la sansa in uscita dal frantoio contenente un'elevata umidità, pari al 60% in peso. I mattoni preparati contenenti fino al 25% in peso di sansa di oliva umida all'interno di un impasto argilloso sono stati cotti solo a 950 °C per lungo tempo senza alcuna aggiunta di acqua.

Le acque reflue emesse dalla fase di lavaggio dell'olio (OMWW) provenienti di estrazione dell'olio d'oliva sono state utilizzate per sostituire l'acqua dolce nella produzione di mattoni di argilla [214] [208] [209].

Mekki et al. [209] hanno studiato gli effetti dell'aggiunta delle acque reflue del frantoio con estrazione dell'olio tri-fase all'interno della fabbricazione di mattoni. I risultati hanno mostrato un aumento significativo della contrazione volumetrica (10%) e dell'assorbimento d'acqua (12%), mentre la resistenza alla trazione è rimasta costante. Il valore massimo dell'indice di plasticità è stato trovato per i mattoni aventi il 23% di OMW. De la Casa et al. [214], invece, si sono concentrati sul riutilizzo delle acque reflue provenienti da un frantoio con processo estrattivo bi-fase. Anche in questo caso i risultati ottenuti dagli autori hanno mostrato che i prodotti ottenuti con le acque reflue dell'olio d'oliva sono paragonabili ai mattoni tradizionali in termini di prestazioni e proprietà tecnologiche dei prodotti finali. Inoltre, l'utilizzo dei mattoni indagati può ridurre il fabbisogno di riscaldamento invernale del 2,4–7,3%.

Tuttavia, dall'esamina degli studi più recenti è stato notato che gli attuali tentativi di ricircolo degli scarti del settore olivicolo sono concentrati sul recupero del materiale lignocellulosico e della biomassa al fine di produrre biocarburanti solidi, liquidi o gassosi. Eppure, nonostante i benefici ambientali derivanti dall'utilizzo di questa energia rinnovabile, rimangono alcuni problemi, come l'inquinamento atmosferico causato da monossido di carbonio, ossidi di azoto, fuliggine e ceneri prodotte dalla combustione [209].

L'obiettivo di questo lavoro è valutare la possibilità di utilizzare il nocciolo di oliva proveniente dall'attività estrattiva dell'olio di oliva come materia prima per la produzione di pannelli isolanti

5. METOLOGIA E METODI

5.1. METOLOGIA DI RICERCA

L'oggetto della ricerca è stata la sperimentazione di un innovativo pannello isolante composto contenente scarti della filiera produttiva dell'olio di oliva. Gli scarti utilizzati per la produzione del pannello isolante riguardano la componente solida dei flussi in uscita del processo estrattivo dell'olio all'interno del frantoio, in particolare, nel presente lavoro sono stati indagate le caratteristiche energetico-ambientali della sansa vergine e del nocciolino estratto dalla sansa.

Le proprietà autoportanti del pannello oggetto dello studio sono state garantite utilizzando come legante il granulato di sughero di diverse dimensioni.

Preliminarmente alla produzione del pannello isolante è stato necessario caratterizzare i materiali oggetto dello studio a seguito di prove di laboratorio conformi alle normative standard UNI EN ISO.

A seguito dei dati ricavati è stato possibile ipotizzare le realizzazioni di 16 diverse tipologie di materiale isolante avente diverse percentuali di dosaggio e di granulometria di ciascun componente.

I provini sono stati realizzati mediante il metodo di pressione a caldo della miscela all'interno di stampini metallici appositamente realizzati per simulare il funzionamento di un'autoclave. Sono effettuate diverse prove per stabilire il tempo ideale di esposizione al calore dei provini.

I provini ottenuti sono stati testati per determinare le caratteristiche termo-igrometriche, tuttavia, i provini contenenti la sansa e il nocciolo di oliva con granulometria pari a 1 mm sono stati scartati poiché, a seguito della cottura, hanno manifestato scarse proprietà di adesione dei granuli.

Per quantificare le prestazioni termo-energetiche del pannello composito è stato effettuato una simulazione dinamica oraria utilizzando come test builder un edificio realizzato in XLAM sito in area mediterranea: Sant'Agata li Battiati (CT). La simulazione effettuata ha permesso di calcolare la produzione annuale di CO₂ considerando i consumi energetici dell'edificio in fase d'uso per ciascuna delle 8 diverse tipologie di pannello isolante.

A completamento dello studio è stata effettuata un'analisi LCA dei processi di produzione dei differenti pannelli per quantificare l'impatto ambientale in termini di emissioni di GHG. A conclusione è stato possibile determinare l'impatto ambientale complessivo dell'uso dei pannelli isolanti dalla fase di produzione e del loro utilizzo.

5.2. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI UTILIZZATI

5.2.1. *I materiali utilizzati*

Il pannello isolante investigato è stato ottenuto aggiungendo percentuali crescenti di scarti dell'attività olivicola all'interno di un impasto di acqua e granulato di sughero.

In questo lavoro sono stati utilizzati sansa d'oliva (Figura 39.1) proveniente dall'oleificio Scalia Antonio in Ragalna (CT) e noccioli di oliva (Figura 39.2) provenienti dall'azienda olearia Ecolama s.r.l. di Granada. Il granulato di sughero (Figura 39.3) utilizzato come legante per la preparazione dei provini, invece, è stato reperito dall'azienda Discor la Sureda – Cork con stabilimento produttivo in Girona (SPA).

La sansa è stata prelevata direttamente dal frantoio al termine di ciclo estrattivo giornaliero dell'olivo di oliva, mentre il nocciolino indagato è stato ottenuto dall'estrazione dalla sansa umida mediante un macchinario per la centrifugazione della sansa ad alimentazione elettrica.

Il legante utilizzato, invece, è stato ottenuto dalla lavorazione stagionale della decorticazione delle querce da sughero spagnole.

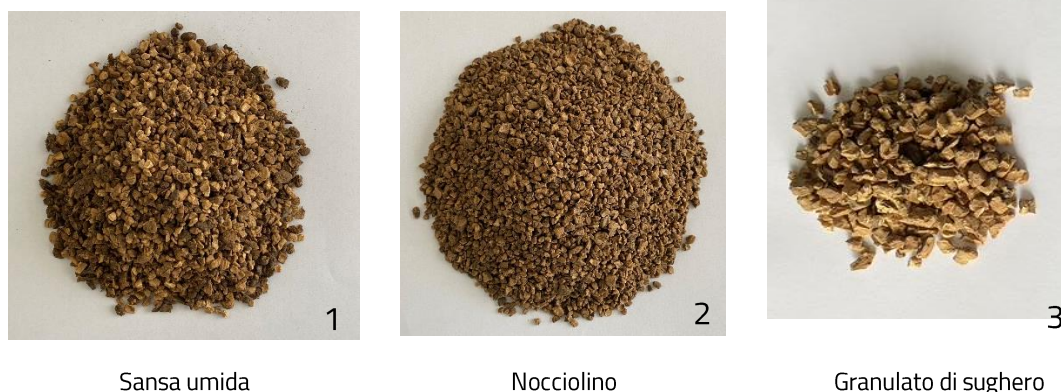


Figura 39 – Materiali indagati di presente studio.

5.2.2. *Determinazione curva granulometrica*

Al fine di terminare le particelle del materiale è stata determinata la curva granulometrica dei materiali indagati. Il materiale osservato è stato versato dall'alto all'interno della batteria di setacci sovrapposti. La batteria di setacci utilizzata comprende 8 setacci, con aperture comprese tra 8 mm e 63 μm , disposti in ordine decrescente in modo da avere in sommità il setaccio con apertura più grande. La batteria è stata quindi agitata manualmente per Δt 5 minuti. Al termine dell'intervallo di tempo Δt i setacci sono stati rimossi uno per uno a partire da quello con apertura maggiore.

Al termine della prima fase della prova il materiale trattenuto da ciascun setaccio è stato pesato mediante una bilancia digitale con precisione pari a 0,001 gr. Dopo aver completato l'intera batteria di setacci è stato possibile costruire la curva granulometrica dei materiali (cfr. tabelle 21-23).

Tabella 22 - Calcolo curva granulometrica del nocciolo d'oliva

Apertura setaccio	Massa del materiale trattenuto	Percentuale trattenuto	Percentuali cumulative passanti
mm	kg	%	%
8	0,000	0,00	100,00
4	0,000	0,03	99,97
2	0,140	24,35	75,62
1	0,379	65,89	9,82
0,5	0,025	4,41	5,41
0,25	0,016	2,84	2,57
0,125	0,009	1,63	0,94
0,0063	0,005	0,94	0,00



Tabella 23 – Calcolo curva granulometrica della sansa di olive

Apertura setaccio	Massa del materiale trattenuto	Percentuale trattenuto	Percentuali cumulative i passanti
mm	kg	%	%
8	0,000	0,00	100,00
4	0,001	0,12	99,88
2	0,350	42,05	57,83
1	0,300	36,04	21,78
0,5	0,150	18,02	3,76
0,25	0,016	1,98	1,78
0,125	0,009	1,13	0,65
0,0063	0,005	0,65	0,00



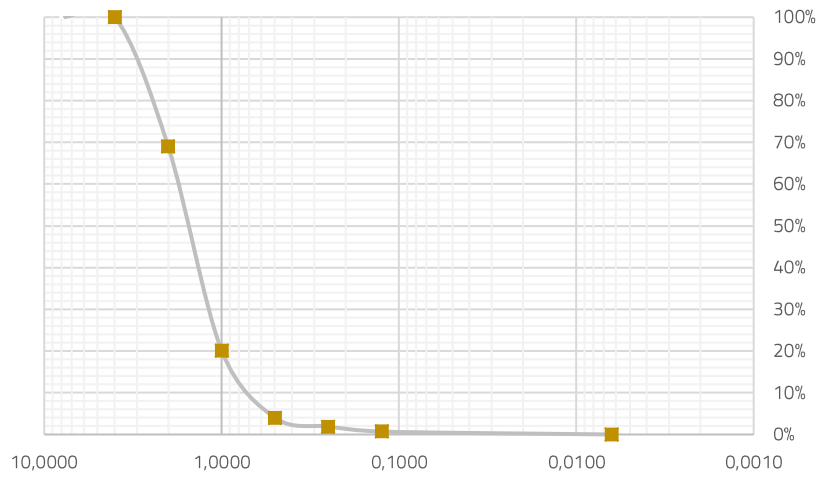
Tabella 24 - Calcolo curva granulometrica del sughero

Apertura setaccio	Massa del materiale trattenuto	Percentuale trattenuto	Percentuali cumulative passanti
mm	kg	%	%
8	0,000	0,00	100,00
4	0,000	0,44	99,56
2	0,027	29,85	69,72
1	0,032	35,29	34,42
0,5	0,015	16,78	17,65
0,25	0,009	10,24	7,41
0,125	0,004	4,79	2,61
0,0063	0,002	2,61	0,00

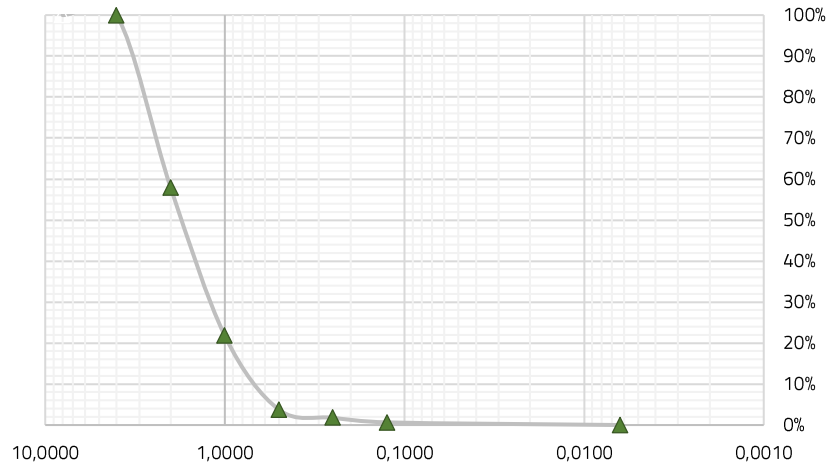


Figura 40 – Fasi del procedimento di determinazione della curva granulometrica dei materiali

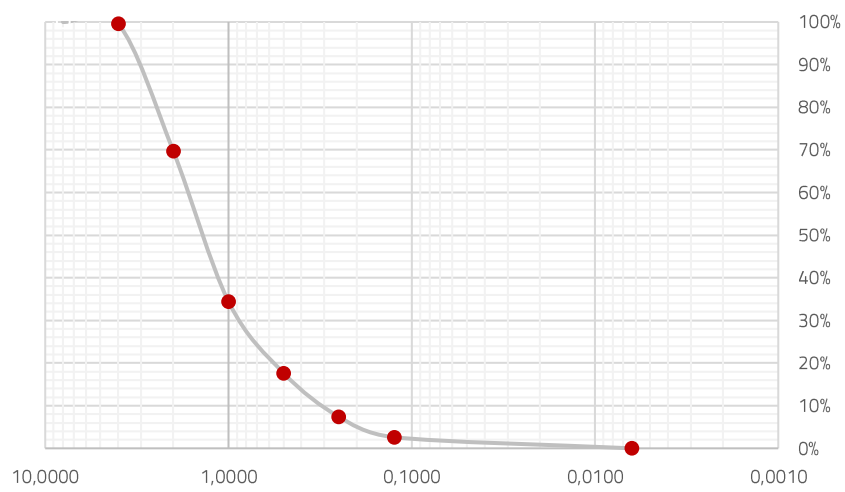
Curva granulometrica - Nocciolino



Curva granulometrica - Sansa



Curva granulometrica - Sughero



Dall'analisi delle curve granulometriche dei materiali indagati è possibile definire che la frazione prevalente per ciascun materiale, secondo gli intervalli dimensionali delle classi granulometriche di Wentworth, è la sabbia molto grossolana: ovvero nocciolino, sansa e sughero.

Definendo il coefficiente di uniformità Cu come il rapporto tra il d_{60} , il diametro corrispondente al 60% del passante letto sulla rispettiva curva granulometrica dei materiali, e il d_{10} , ovvero il valore sulla curva in corrispondenza del 10 % del passante, si evince che i materiali analizzati sono uniformi, in particolare il sughero presenta un ottimo assortimento dei granuli.

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad \text{Eq. (15)}$$

Tabella 25 – Coefficiente di uniformità dei materiali

	d_{10} mm	d_{60} mm	Cu
Nocciolino	0,7	1,8	2,6
Sansa	0,7	2,0	2,9
Sughero	0,3	1,7	5,6

Determinare la granulometria dei materiali è stato essenziale per la scelta dei diametri di materiali con cui effettuare la preparazione dei provini. Il granulato di sughero, in particolare, ha mostrato un diametro massimo di 2 mm, pertanto, è stato scelto di studiare il comportamento del nocciolino e della sansa di olivo aventi diametro pari o inferiore a tale valore. Tuttavia, per migliorare le proprietà isolanti dei provini è stato scelto di non utilizzare granulometrie inferiori a 1 mm in quanto al di sotto di tale valore si riduce il numero dei vuoti interno e, quindi la presenza di aria all'interno dei provini. A seguito della vagliatura del materiale è stato possibile separare le frazioni dei materiali nell'intervallo di granulometria scelto.



5.2.3. Determinazione della densità reale e apparente

Per determinare la densità apparente, ossia il rapporto esistente tra massa e volume apparente di un determinato campione sono stati eseguiti dei test all'interno del laboratorio di investigazione dei materiali dell'*Escuela Técnica Superior de ingeniería y diseño industrial* dell'Università Politecnica di Madrid in accordo alla normativa UNI EN 1097-3 – Prove per determinare le proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati – Determinazione della massa volumica in mucchio.

Per determinare il peso apparente del materiale è stato necessario effettuare l'essiccazione dei campioni al fine di rimuovere il contenuto d'acqua del materiale. Dopo aver registrato il peso iniziale del contenitore vuoto m_0 (33,6 gr) avente volume pari a 1 litro, i materiali indagati sono stati posti dentro il contenitore riempiendolo per intero. Per quantificare correttamente la densità del materiale la prova è stata ripetuta utilizzando il metodo della semplice compattazione e il metodo di compattazione e vibrazione del materiale avente il fine di ridurre il numero dei vuoti dei materiali. Il contenitore pieno è stato in seguito posto all'interno di un forno per l'essiccazione a temperatura di 100 °C (vedi **Figura 41**) registrando, per ciascun materiale, il peso ad intervalli regolari di 30 minuti fino a quando è stata riscontrata una massa costante, ricavando così il valore m_1 e per sottrazione il valore di m_{secca} (cfr. **tabella 26**).



Figura 41 – Forno Digitheat TFT utilizzato per l'essiccazione dei provini

La densità apparente è stata determinando utilizzato la seguente equazione:

$$\rho = \frac{m_{secca}}{V} \text{ [gr/cm}^3\text{]} \quad \text{Eq. (16)}$$

Tabella 26 – Risultati calcolo massa volumica apparente dei materiali indagati

Metodo di riempimento	OLV-Nocciolo 2mm		SAN – Sansa 2mm		COR - Sughero granulato 2mm	
	m_{secca}	ρ	m_{secca}	ρ	m_{secca}	ρ
	gr	gr/cm ³	gr	gr/cm ³	gr	gr/cm ³
M1 Metodo compattazione	847,31	0,85	851,74	0,85	168,96	0,17
M2 Metodo compattazione e vibrazione	943,90	0,94	974,12	0,97	188,20	0,19
Media aritmetica dei valori (M1+M2)/2		0,90		0,91		0,18

Metodo di riempimento	OLV-Nocciolo 1mm		SAN – Sansa 1 mm		COR - Sughero granulato 1 mm	
	m_{secca}	ρ	m_{secca}	ρ	m_{secca}	ρ
	gr	gr/cm ³	gr	gr/cm ³	gr	gr/cm ³
M1 Metodo compattazione	856,87	0,86	862,34	0,85	178,45	0,18
M2 Metodo compattazione e vibrazione	954,40	0,95	991,03	0,98	201,25	0,19
Media aritmetica dei valori (M1+M2)/2		0,91		0,93		0,19

Il calcolo della densità reale e dell'indice dei vuoti dei materiali è stato determinato mediante lo stereopicnometro Quantachrome Spy-3 utilizzando per la misurazione dell'elio precompresso (cfr. [Figura 42](#)).



Figura 42 – Picnometro e dati tecnici dell'elio utilizzato per la prova

Il picnometro ad elio consente una determinazione accurata della densità reale (o assoluta) di polveri e solidi. L'utilizzo dell'elio come fluido di misura garantisce una grande accuratezza, date le piccole dimensioni degli atomi, che riescono a penetrare in pori ed interstizi delle dimensioni di 0,25 nm di diametro. La determinazione avviene in maniera rapida ed automatica, e permette di raggiungere precisioni di $\pm 0,001$ (g/cm³).

Il funzionamento dello strumento di misura utilizzato per la prova è mostrato nella [Figura 43](#).

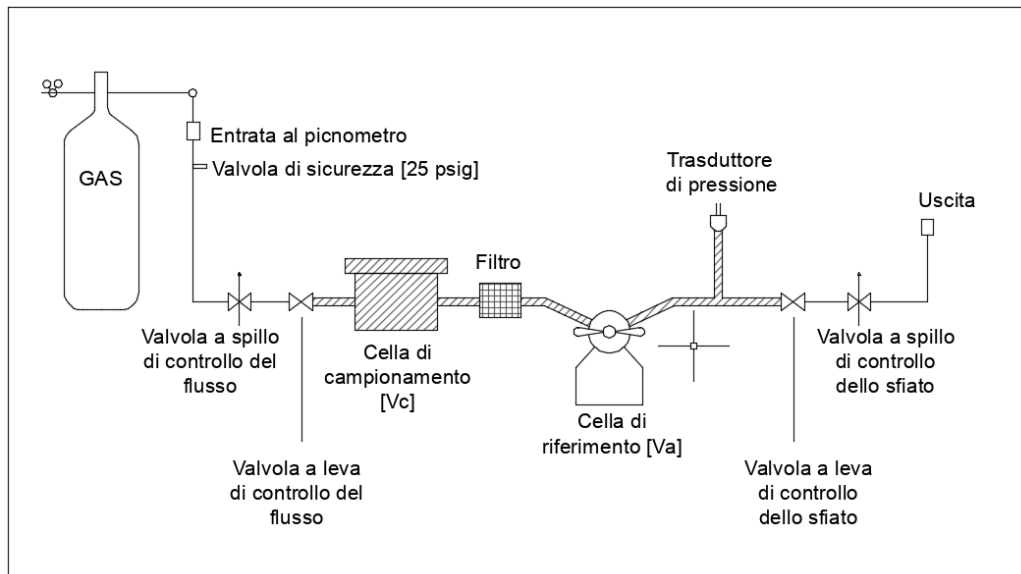


Figura 43 – Schema di funzionamento dello stereopicnometro

Dopo aver posto il materiale indagato all'interno della cella di campionamento, avente un volume noto V_c , è stato possibile ricavare il valore della massa del materiale in ingresso allo stereopicnometro m_1 .

La cella di campionamento dello strumento è separata dalla cella di riferimento V_a mediante un filtro posto tra le due camere con lo scopo che il materiale indagato possa passare all'interno di V_a . Lo stereopicnometro utilizzato ha due valvole a spillo, chiamate "controllo del flusso" e "controllo dello sfiato della cella" posizionate rispettivamente prima e dopo le valvole a leva con lo stesso nome. La valvola di alta pressione "controllo dello sfiato della cella" viene utilizzata per controllare il flusso di gas a cui viene rilasciata la pressione del sistema. La valvola a spillo "controllo del flusso" viene utilizzata per controllare la velocità del flusso di gas all'interno del sistema. Tramite i due comandi è stato possibile determinare la velocità con cui la pressione nel sistema aumenta e la velocità con cui il gas viene spurgato dal campione. L'apparecchiatura utilizzata, inoltre, ha una valvola limitatrice di pressione pari a 25 psig (1,756 kg/cm²), situata immediatamente prima del sistema di valvole, che serve ad impedire il danneggiamento all'apparecchiatura a causa della sovrappressioni interne.

Per determinare la densità reale ρ_r la cella di campionamento con all'interno il campione indagato è stata pressurizzata con l'elio precompresso fino ad arrivare alla pressione limite di 20 psig (1,406 kg/cm²) indicata nel display digitale dello stereopicnometro.

Successivamente, mediante la valvola selettiva, l'elio presente nella cella di campionamento passa alla cella di riferimento registrando, sempre sul display digitale, il nuovo valore di pressione V_c il quale, libero di muoversi nel volume di riferimento, sarà più basso del primo valore.

A seguito dell'esperimento la densità reale del campione è stata calcolata con la seguente formula:

$$\rho = \frac{M}{V_s} \text{ [gr/cm}^3\text{]} \quad \text{Eq. (17)}$$

In cui:

M massa del campione indagato in gr;

V_s volume del campione in cm^3 ;

Il volume del campione V_s è stato calcolato applicando la seguente formula:

$$V_s = V_c + \left[\frac{V_A}{1 - \left(\frac{P_2}{P_3}\right)} \right] \text{ [cm}^3\text{]} \quad \text{Eq. (18)}$$

In cui

V_c volume della cella di campionamento – 155,88 cc;

V_a volume della cella di riferimento – 76,67 cc;

P_2 lettura della pressione prima della pressurizzazione della cella di campionamento;

P_3 lettura della pressione dopo l'inclusione dell'elio nel volume della cella di riferimento.

La determinazione V_s ha reso possibile determinare la porosità n e l'indice dei vuoti ε del materiale secondo le seguenti relazioni:

$$n = \frac{V_V}{V} \cdot 100 = \frac{V - V_s}{V} \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{Eq. (19)}$$

$$\varepsilon = \frac{V_V}{V_s} = \frac{V - V_s}{V_s} \quad \text{Eq. (20)}$$

I risultati della prova sono riassunti nella **tabella 27**.

Tabella 27 – Determinazione massa volumica reale dei materiali indagati

	M	P_2	P_3	V_s	ρ	n	ε
	<i>gr</i>	<i>psig</i>	<i>psig</i>	cm^3	gr/cm^3	%	-
SAN – Sansa 2 mm	15,00	19,875	12,914	13,6	1,10	32	0,47
SAN – Sansa 1 mm	16,20	19,854	12,807	16,5	0,98	17	0,21
OLV – Nocciolo 2 mm	15,43	19,451	12,656	12,3	1,18	35	0,53
OLV – Nocciolo 1 mm	16,33	19,542	12,680	14,2	1,15	29	0,41
COR – Sughero 2 mm	3,00	19,367	12,616	12,6	0,24	37	0,59
COR – Sughero 1 mm	3,50	19,787	12,784	15,9	0,22	20	0,26

5.3. LA CARATTERIZZAZIONE DEI CAMPIONI DI STUDIO

5.3.1. *Realizzazione dei provini*

Il sughero è una materia prima che, a seguito del processo di espansione cellulare (tostatura), presenta interessanti caratteristiche chimiche e strutturali. Le cellule del sughero hanno una struttura alveolare in cui ogni cellula assume una struttura prismatica esagonale o pentagonale dell'ordine di grandezza di 10–50 μm (cfr. [Figura 44](#)). Ogni centimetro di sughero contiene circa 40 milioni cellule, le quali sono composte da tannini, cera, suberina, cellulosa e acqua. In particolare, la suberina è una resina naturale che ricoprendo le cellule del sughero blocca il passaggio dell'aria conferendo al sughero le proprietà impermeabilizzanti.

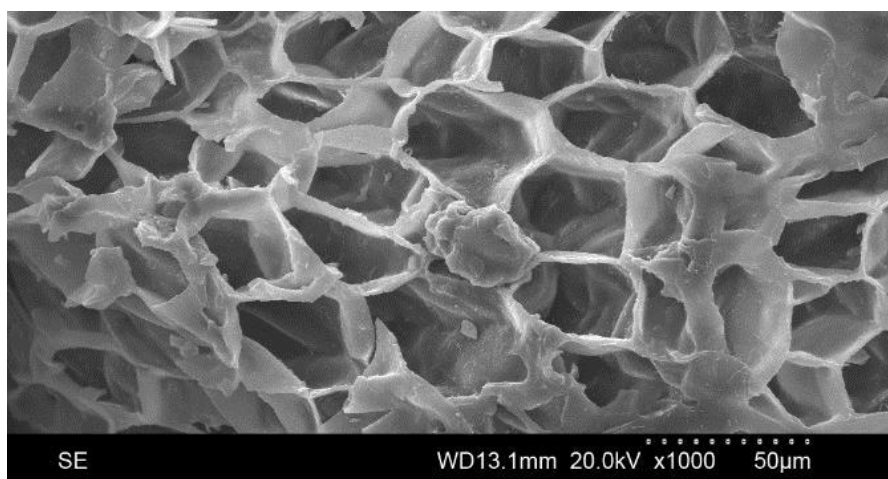


Figura 44 - Immagine al microscopio elettronico (SEM) della morfologia delle strutture cellulari del sughero (Fonte: Craveiro et al., 2017 [217])

Sotto condizioni di temperatura e pressione elevate, a seguito della rottura cellulare, è sprigionata la suberina la quale solidificandosi al termine del trattamento agisce come elemento agglomerato. Tale processo oggi è comunemente utilizzato per la produzione di pannelli isolanti in sughero espanso o "tostato".

In questo lavoro il granulato di sughero è stato aggiunto agli scarti delle attività di estrazione dell'olio di oliva ed è stato sottoposto al processo di pressatura a caldo al fine di ottenere un provino compatto, autoportante e isolante. Per valutare il beneficio ottenuto dall'inserimento dei materiali indagati sono state formulate 17 differenti miscele contenenti diverse percentuali di sansa e nocciolino d'oliva come riepilogato nella [Tabella 29](#)).

Le miscele utilizzate sono state realizzate mediante miscelazione manuale per un intervallo di tempo pari a 5 minuti fino al raggiungimento dell'omogeneità dell'impasto. Le miscele sono state quindi versate nello stampo e compresse fino al raggiungimento dello spessore finale. Lo stampo metallico, dopo essere stato chiuso ermeticamente con viti filettate, è stato posto all'interno di una camera di riscaldamento per consentire l'agglomerazione dei componenti della miscela (vedi **Figura 45b**). Gli stampi metallici utilizzati di forma scatolare a pianta quadrata di dimensione 50x50x50h mm e sono dotati di due tappi d'estremità: uno inferiore, alla quale sono state saldate 4 viti filettate, e uno superiore ad incastro per sigillare ermeticamente lo stampo metallico (vedi **Figura 45c**). Per confinare le spinte di pressione del sughero, inoltre, i tappi degli stampi metallici sono stati serrati tra loro mediante 4 viti a farfalla. I tappi delle forme metalliche essendo separabili dal materiale hanno facilitato l'operazione di sformatura dei provini, inoltre, sempre al fine di evitare che i granuli di sughero potessero fondersi sulle pareti dello stampo metallico, sono stati inserite delle protezioni in carta da forno su tutte le superfici della scatola (vedi **Figura 45a**).



Figura 45 - Fasi di preparazione delle forme metalliche per l'inserimento nella camera riscaldante: a) disposizione del tappo inferiore e rivestimento; b) versamento della miscela; c) chiusura e serraggio del tappo superiore

Secondo i dati raccolti dalla letteratura, per miscele simili a quelle indagate il tempo dell'operazione di cottura può variare tra le quattro e le ventidue ore con temperature che raggiungono i 240 °C. Il tempo di esposizione dei provini all'interno della camera di riscaldamento è stato ottenuto studiando gli effetti del tempo sul granulato di sughero. Differenti campioni di granulato di sughero sono stati posti all'interno della camera riscaldante alla temperatura di 240 °C per intervallo di tempi differenti secondo lo schema illustrato in nella **Tabella 28**. I risultati della prova hanno evidenziato che i campioni posti all'interno della camera riscaldante per 240 minuti hanno mostrato un'ottima adesione dei granuli ed una variazione del colore che può essere presa come riferimento per la tostatura del sughero (cfr. **Figura 45**).

Tabella 28 – Risultati della prova di cottura del granulato di sughero

	Peso granulato di sughero [g]	Temperatura [°C]	Tempo di esposizione [min]
Test 1	6,25	240	60
Test 2	6,25	240	240
Test 3	6,25	240	300



Figura 46 - Cambiamento cromatico dei granuli di sughero nei differenti intervalli temporali

Per la formazione dei provini le miscele sono state essiccate in forno ad alte temperature ($T= 240$ °C), in modo da favorire la produzione di suberina contenuta nelle cellule del granulato di sughero, per un intervallo di tempo pari a 240 minuti. Al termine dell'operazione gli stampi metallici sono stati estratti dalla camera di riscaldamento e posti a temperatura ambiente per raffreddarsi quindi, il provino è stato rimosso dallo stampo.

Tabella 29 – Sintesi delle quantità dei provini realizzati

Provino	Dimensione del granulo		Quantità materiale	Quantità legante	Tempo di esposizione	Temperatura
	materiale mm	legante mm				
CORK100	-	2	-	100	240	350
SAN50-2	2	2	50	50	240	350

SAN40-2	2	2	40	60	240	350
SAN30-2	2	2	30	70	240	350
SAN20-2	2	2	20	80	240	350
OLV50-2	2	2	50	50	240	350
OLV40-2	2	2	40	60	240	350
OLV30-2	2	2	30	70	240	350
OLV20-2	2	2	20	80	240	350
SAN50-1	1	2	50	50	240	350
SAN40-1	1	2	40	60	240	350
SAN30-1	1	2	30	70	240	350
SAN20-1	1	2	20	80	240	350
OLV50-1	1	2	50	50	240	350
OLV40-1	1	2	40	60	240	350
OLV30-1	1	2	30	70	240	350
OLV20-1	1	2	20	80	240	350

Ciascun campione, dopo essere stato sfornato, è stato pesato e posto a raffreddare a temperatura ambiente per garantire la stabilizzazione del peso. I provini contenenti la sansa e il nocciolo di oliva con granulometria pari a 1 mm non sono stati ulteriormente indagati poiché, a seguito della cottura, hanno manifestato scarse proprietà di adesione dei granuli.

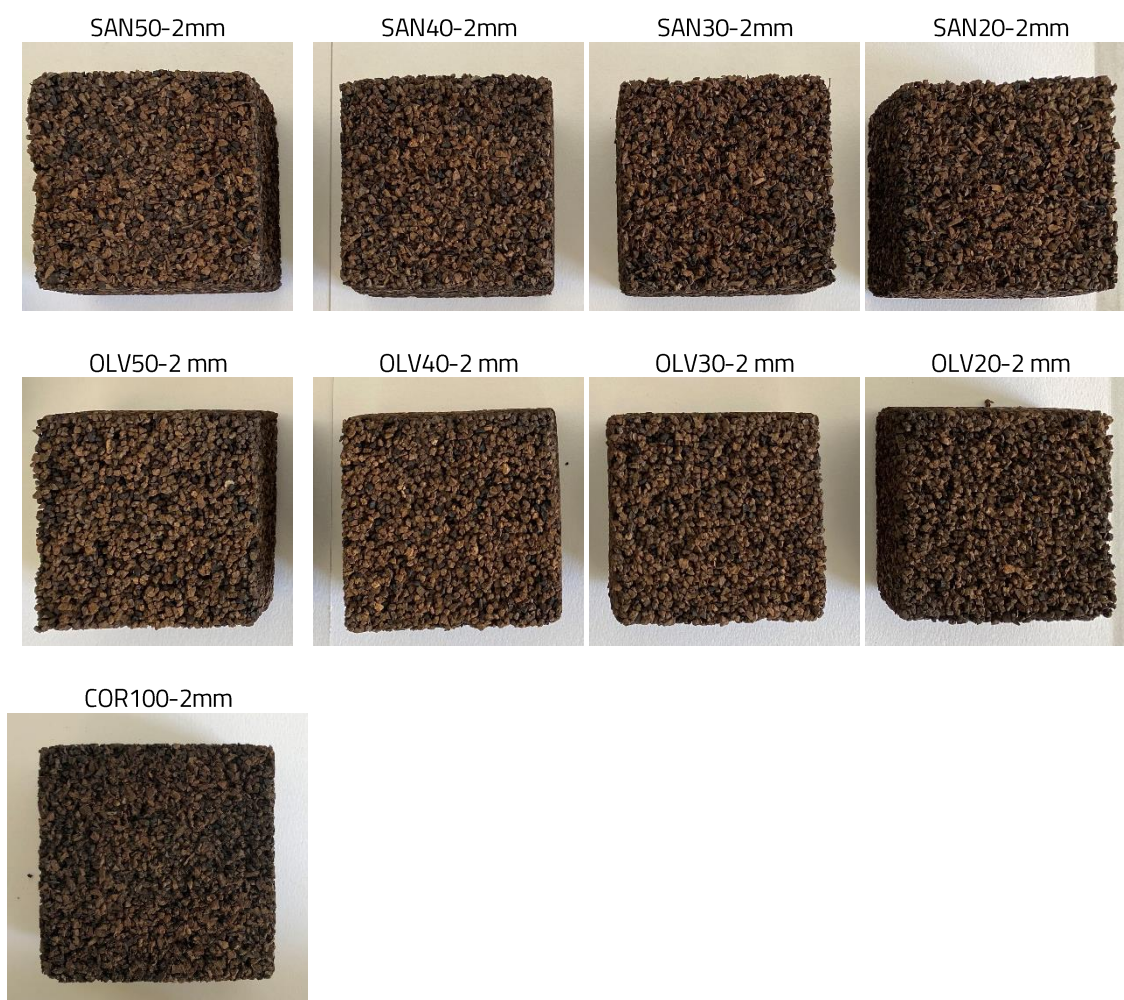


Figura 47 – I provini realizzati al termine della cottura

5.3.2. Determinazione della massa volumica apparente

La determinazione della massa volumica apparente è stata condotta in accordo alla norma UNI EN ISO 1602:2013. Il test è stato effettuato presso il laboratorio del Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas dell'Università Politecnica di Madrid.

Prima di iniziare la prova, ciascun provino è stato posto all'interno di un forno ventilato alla temperatura di 23 ± 2 °C e umidità relativa pari al $50 \pm 5\%$.

Al raggiungimento delle condizioni desiderate i provini sono stati misurati in accordo alla UNI EN 822 al fine di determinare la lunghezza e la larghezza di ciascun provino (cfr. **Tabella 29**). Per ciascun provino è stata misurata la lunghezza l e la larghezza b adoperando un metro metallico con la precisione del 0,1 mm.

Lo spessore dei provini s , invece, è stato misurato mediante un calibro metallico effettuando le misurazioni così come indicato nella UNI EN 823. I provini subito dopo sono stati pesati ripetutamente con la bilancia di precisione (0,01 gr) ottenendo la misura $m_{23,50\%}$ con un errore massimo di 0,05 gr per ciascun campione (cfr. **Tabella 30**).

Infine la densità è stata misurata utilizzando la formula:

$$\rho_{23,50} = \frac{m_{23,50\%}}{V} \quad [gr/cm^3] \quad \text{Eq. (21)}$$

Tabella 30 – Determinazione della massa volumica apparente dei provini alle condizioni standard

Provino	l <i>cm</i>	b <i>cm</i>	s <i>cm</i>	V <i>cm³</i>	$m_{23,50\%}$ <i>gr</i>	$\rho_{23,50}$ <i>gr/cm³</i>
COR100 - 2mm	4,9	4,9	4,9	117,65	28,2	0,24
SAN50 - 2mm	4,9	4,9	4,9	117,65	62,1	0,53
SAN40 - 2mm	4,9	5,0	4,8	117,60	58,2	0,49
SAN30 - 2mm	4,8	5,0	5,0	120,00	51,0	0,43
SAN20 - 2mm	5,0	5,0	5,0	125,00	50,4	0,40
OLV50 - 2mm	4,9	5,0	4,9	120,50	55,4	0,46
OLV40 - 2mm	5,0	5,0	4,9	122,50	47,3	0,39
OLV30 - 2mm	5,0	5,0	5,0	125,00	39,5	0,32
OLV20 - 2mm	5,0	5,0	5,0	125,00	39,2	0,31

Tutti i campioni osservati presentano dimensioni geometriche pressoché uguali con lievi differenze dell'ordine di 1 mm, pertanto i provini possono considerarsi dei cubi di dimensione $5 \times 5 \times 5$ cm. Il peso dei provini, così come previsto, è influenzato dalla quantità di sansa e nocciolino utilizzato all'interno dell'impasto: a parità di percentuale di materiale, i campioni contenenti la sansa hanno un peso superiore rispetto quelli contenenti il nocciolino di olivo di circa il 23%.

5.3.3. Determinazione del contenuto di umidità

Preliminarmente alle prove di determinazione delle caratteristiche termiche di ciascun provino oggetto dell'indagine è stato determinato il contenuto di umidità ai sensi della norma UNI EN 12105:2001.

Per effettuare la prova sono stati utilizzati una bilancia di precisione in grado di pesare con misure dell'ordine di 0,01 g, un forno ventilato e un essiccatore. Tutta la strumentazione utilizzata è stata resa disponibile dal Laboratorio di prova dei materiali presso il laboratorio del Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas dell'Università Politecnica di Madrid.

I provini dopo essere stati esposti alla temperatura di 23 ± 2 °C e umidità relativa pari al $50 \pm 5\%$ sono stati pesati ripetutamente con la bilancia di precisione ottenendo la misura $m_{23,50\%}$ e un errore di 0,05 gr per ciascun campione (cfr. **Tabella 31**).

Successivamente i campioni sono stati introdotti all'interno del forno ad una temperatura di 70 °C e per un intervallo di tempo di 3 h. Dopo tale intervallo, i provini sono stati posti in un essiccatore contenente silicio al fine di farli raffreddare ed in seguito sono state effettuate le misurazioni del peso m_{dry} . Il procedimento è stato ripetuto fin ad ottenere una massa costante, ovvero al riscontro di una variazione dell'ordine di 0,03 gr tra due pesate consecutive.

Al termine della prova il contenuto di umidità di ciascun provino è stato misurato utilizzando **l'equazione 22**:

$$u_{23,50} = \frac{m_{23,50\%} - m_{dry}}{m_{dry}} \quad [kg/kg] \quad \text{Eq. (22)}$$

Tabella 31 – Sintesi del contenuto di umidità dei provini

Provino	m_{dry} kg	$m_{23,50\%}$ kg	$u_{23,50}$ kg/kg	$u_{23,50}$ %
COR100 - 2mm	0,021±0,05	0,028±0,05	0,333	25,0
SAN50 - 2mm	0,052±0,05	0,062±0,05	0,161	16,1
SAN40 - 2mm	0,045±0,05	0,058±0,05	0,224	22,4
SAN30 - 2mm	0,044±0,05	0,051±0,05	0,137	13,7
SAN20 - 2mm	0,042±0,05	0,050±0,05	0,160	16,0
OLV50 - 2mm	0,043±0,05	0,055±0,05	0,218	21,8
OLV40 - 2mm	0,037±0,05	0,047±0,05	0,213	21,3
OLV30 - 2mm	0,035±0,05	0,039±0,05	0,103	10,3
OLV20 - 2mm	0,034±0,05	0,039±0,05	0,128	12,8

A seguito della prova è stato possibile affermare che i provini hanno mostrato un contenuto variabile di umidità compreso tra il 16 e 22% per i provini contenenti la sansa e tra il 12 e il 21% per quelli contenenti il nocciolino.

5.3.4. Determinazione della conducibilità e della resistenza termica con il metodo della piastra calda

La conducibilità termica dei materiali è il parametro principale per descrivere il comportamento del materiale al passaggio del flusso di calore. Nel caso oggetto di studio, trattandosi di un materiale innovativo rispetto a quanto presente sul mercato, non è stato possibile ricondurre tale parametro a dati provenienti dalla letteratura o da schede tecniche. Uno degli approcci più accurati per la misurazione della conducibilità termica dei materiali in condizioni stazionarie è il metodo dell'*Hot Flow Meter* (HFM) o misuratore di portata termica.

La determinazione della conducibilità termica è stata ottenuta mediante il flussometro modello HFM 436 / lambda (Figura 48) conforme sia allo standard ASTM C518-17 che alle norme UNI EN ISO 12667. Lo strumento di misura è dotato di due piastre in grado di raggiungere temperature comprese tra 0 e 100°C e termocoppie con precisione di $\pm 0,01^\circ\text{C}$ in grado di fornire misurazioni della conducibilità termica comprese tra 0,002 e 2 W/mK con un'accuratezza del 3%. Il sistema di controllo della temperatura delle piastre secondo la T_{mean} è gestito mediante sistemi Peltier bidirezionali.



Figura 48 – Termoflussimetro HFM 246 – lambda presso l'Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Università Politecnica di Madrid

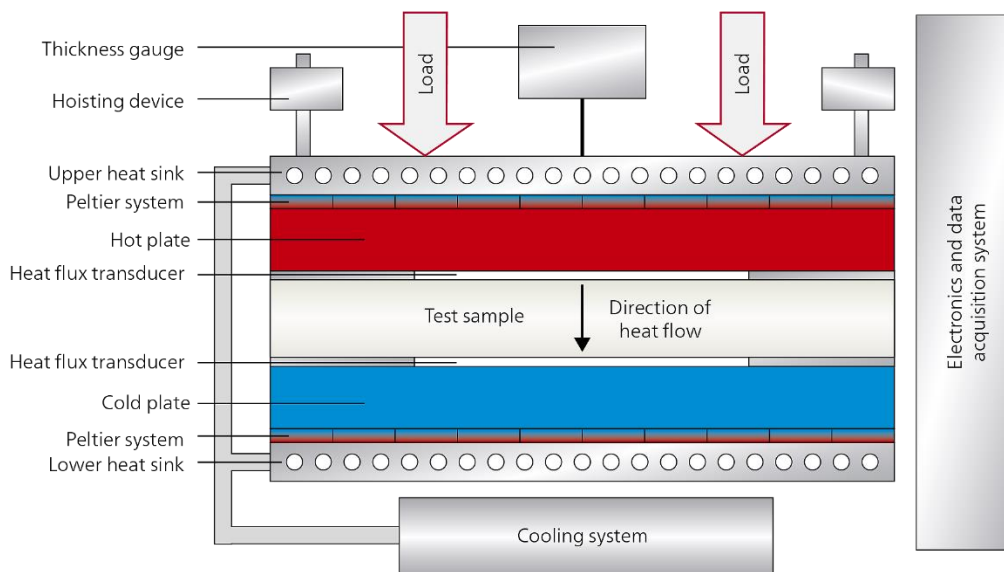


Figura 49 – Schema funzionamento del termoflussimetro

I campioni oggetto dell'indagine sono stati posti a contatto con le due piastre le quali sono state riscaldate e raffreddate elettricamente. Il flusso termico è misurato da un trasduttore di flusso di calore calibrato secondo la norma NIST 1450C.

Le temperature delle piastre sono state preimpostate prima della prova in accordo alle indicazioni della norma UNI EN ISO 12667 garantendo che per tutta la durata dell'esperimento fosse presente un gradiente termico di almeno 20 °C (cfr. **tabella 32**).

Per determinare i valori di conducibilità termica di ciascun provino è stata utilizzata una metodologia con diverse fasi operative secondo lo schema della prova stabilito nella norma UNI EN 12667.

Prima di iniziare la prova ciascun provino è stato posto all'interno di un forno a temperatura T pari a 110 °C per consentire l'evaporazione dell'umidità di ciascun provino. Il condizionamento iniziale è avvenuto nell'arco temporale di 24 h pesando ciascun provino ad intervalli di tempo regolari mediante una bilancia digitale di precisione e considerando il processo di condizionamento concluso quando la differenza di peso tra due pesate successive è stata al di sotto di 0,1 kg/m³.

Successivamente è stato determinato lo spessore sui quattro lati dei provini e registrando per ognuno il valore medio. Come detto, prima di procedere la prova, i bordi laterali di ciascun provino è stato ricoperto con del nastro per evitare che l'umidità della camera di prova potesse penetrare all'interno dei pannelli. Infine, mediante il software NETZSCH Proteus® è stato possibile impostare i valori dei dati di *setpoint* riguardanti la temperatura delle piastre e della pressione (vedi **Tabella 32**).

Tabella 32 – *Setpoint* di dati iniziali utilizzati per la prova HFM

Mean Temperature input °C	ΔT °C	Upper plate Temperature °C	Lower Plate Temperature °C	Pressure kPa
10	20	20	0	3
20	20	30	10	3
25	20	35	15	3

La misura della conducibilità termica è stata ricavata mediante il software di gestione del termoflussimetro il quale misura il flusso di calore mediante l'**equazione 23**.

$$q = c(T_{c,h}) \cdot V \text{ [W]} \quad \text{Eq. (23)}$$

in cui $c(T_{c,h})$ è il fattore di calibrazione, solitamente espresso in funzione della media della temperatura presente sulle facce del provino, e V è la tensione in uscita misurata dal sensore, pertanto la conducibilità termica e la resistenza termica sono state calcolate con le **equazioni 24** e **25**.

$$\lambda = \frac{q \cdot d}{A \cdot \Delta T} = \frac{c(T_{c,h}) \cdot V \cdot d}{A \cdot \Delta T} \text{ [W/m K]} \quad \text{Eq. (24)}$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{c(T_{c,h}) \cdot V} A \text{ [m}^2\text{K / W]} \quad \text{Eq. (25)}$$

in cui la A costituisce la superficie di ciascun provino.

Dopo il completamento del test all'interno dell'apparato è stato immediatamente misurata la massa del campione m_2 al fine di determinare la perdita di massa Δm_w calcolata con la seguente equazione:

$$\Delta m_w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \text{ [kg / kg]} \quad \text{Eq. (26)}$$

in cui m_1 è la massa del provino prima di essere immessa nell'apparato di misurazione.

Tabella 33 – Risultati calcolo della perdita di massa Δm_w

Provino	m_1	m_2	Δm_w
	Kg 10-3	Kg 10-3	Kg / kg
COR100	28,2	27,5	0,025
SAN 50	62,1	61,4	0,011
SAN 40	58,2	57,4	0,014
SAN 30	51,0	50,5	0,010
SAN 20	50,4	49,5	0,018
OLV 50	55,4	54,3	0,020
OLV 40	47,3	46,5	0,017
OLV 30	39,5	38,9	0,015
OLV 20	39,2	38,7	0,013

I risultati della prova sono riepilogati nella **tabella 34**.

Tabella 34 – Sintesi dei risultati della prova di determinazione della conducibilità e resistenza termica dei provini

	Mean Temperature °C	ΔT °C	Thermal conductivity W / (m K)	Thickness m	Thermal resistance (m ² K) / W	Thermal gradient W/m
COR100	10,9	20	0,04120	0,0499	1,2112	400,8
	20,7	20	0,04212	0,0499	1,1847	400,8
	25,4	20	0,04330	0,0499	1,1524	400,8
OLV50	10,9	20	0,05015	0,0489	0,9744	409,2
	20,7	20	0,05129	0,0489	0,9529	409,2
	25,4	20	0,05238	0,0489	0,9330	409,2
OLV40	10,9	20	0,04924	0,0487	0,9881	411,1
	20,7	20	0,05012	0,0487	0,9707	411,1
	25,4	20	0,05135	0,0487	0,9474	411,1
OLV30	10,9	20	0,05045	0,0501	0,9931	399,2
	20,7	20	0,05178	0,0501	0,9675	399,2
	25,4	20	0,05355	0,0501	0,9356	399,2
OLV20	10,9	20	0,04808	0,0503	1,0462	397,6

	20,7	20	0,04969	0,0503	1,0123	397,6
	25,4	20	0,05085	0,0503	0,9892	397,6
SAN50	10,9	20	0,05424	0,0499	0,9200	400,8
	20,7	20	0,05541	0,0499	0,9006	400,8
	25,4	20	0,05874	0,0499	0,8495	400,8
SAN40	10,9	20	0,05320	0,0486	0,9139	411,4
	20,7	20	0,05424	0,0486	0,8964	411,4
	25,4	20	0,05658	0,0486	0,8593	411,4
SAN30	10,9	20	0,05045	0,0501	0,9931	399,2
	20,7	20	0,05178	0,0501	0,9675	399,2
	25,4	20	0,05355	0,0501	0,9356	399,2
SAN20	10,9	20	0,04808	0,0503	1,0462	397,6
	20,7	20	0,04969	0,0503	1,0123	397,6
	25,4	20	0,05085	0,0503	0,9892	397,6

Osservando i dati relativi ai campioni contenenti il nocciolino di oliva è possibile affermare che l'inserimento di percentuali crescenti di nocciolino comporta un peggioramento massimo del 22% ottenuto in corrispondenza del valore dell'OLV50 alla T_{mean} di 10°C. L'aggiunta di diversi percentuali di nocciolino inoltre non determina scostamenti significativi dei valori di λ , la quale raggiunge il valore massimo pari a 0,052 W /m K (OLV50) e minimo pari a 0,045 W /m K (OLV20).

I valori di conducibilità termica ottenuti per tutti i campioni, sebbene comportino un peggioramento rispetto i valori registrati per il campione contenente il 100% di granulato di sughero, risultano essere caratterizzati da buoni valori di conducibilità termica (vedi **Figura 50**).

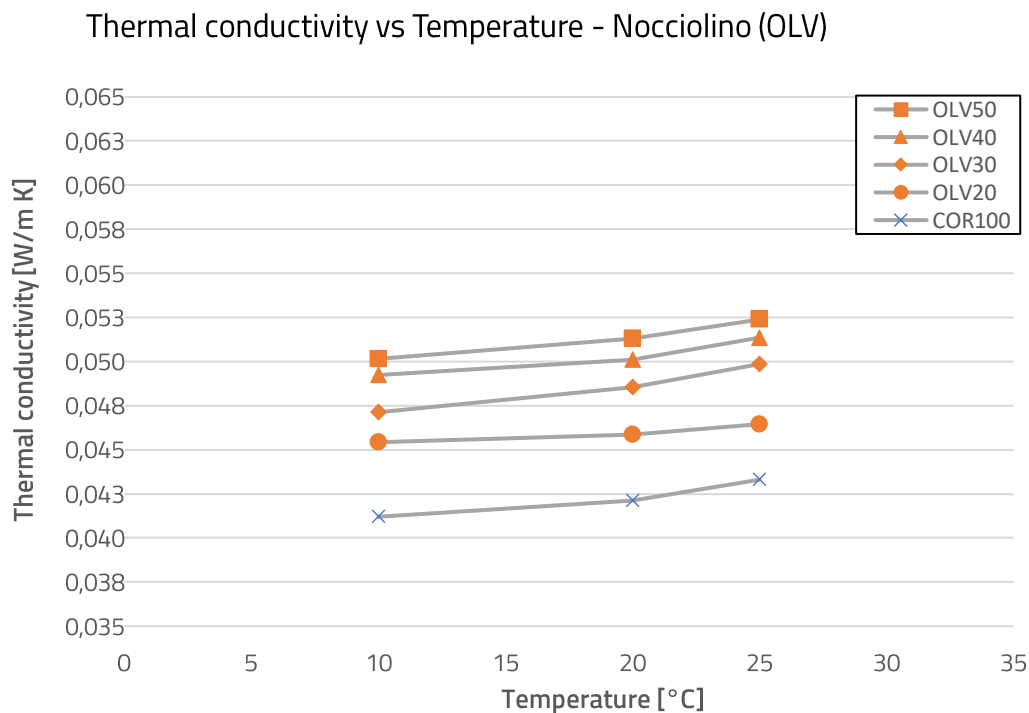


Figura 50 – Valori della conducibilità termica per i campioni contenenti nocciolino

Le prove riguardanti i campioni contenenti la sansa di olive mostrano, anche in questo caso, un peggioramento complessivo delle prestazioni isolanti del materiale composito all'aumentare della percentuale del materiale indagato raggiungendo il massimo (+36%) per il provino SAN50. Il valore massimo è stato acquisito per il provino SAN50 alla temperatura di 25 °C (0,054 W / m K) e il minimo in corrispondenza del provino SAN20 alla temperatura di 10 °C (0,048 W / m K) (vedi **Figura 51**).

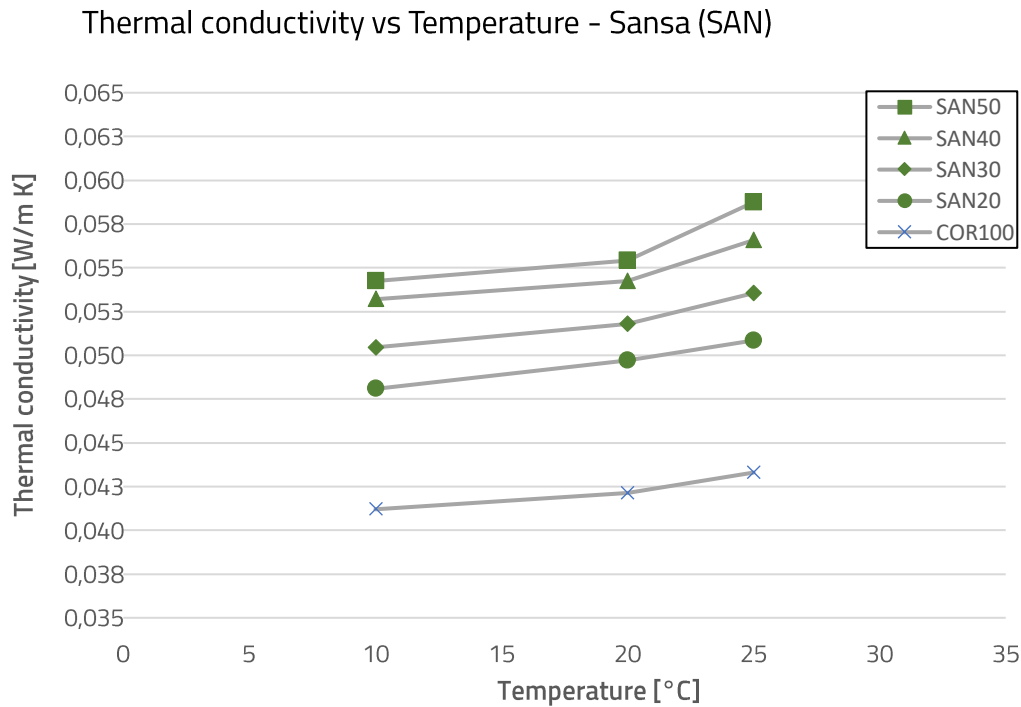


Figura 51 - Valori della conducibilità termica per i campioni contenenti sansa

Confrontando tutti i provini tra loro, la differenza di conducibilità termica risulta essere maggiormente apprezzabile (vedi **Figura 52**). Osservando i dati ottenuti dalla prova è possibile affermare che, a parità di percentuale di materiale, i campioni contenenti il nocciolino presentano una trasmittanza termica minore rispetto a quelli contenenti la sansa.

Il provino contenente il nocciolino d'oliva al 20% e 80% di granulato di sughero è risultato essere il campione con il migliore isolamento termico mentre i provini contenenti sansa al 40% e al 50% presentano una maggiore capacità di trasferimento del calore.

Confrontando i dati ottenuti con quelli ricavati dalla prova relativa alla determinazione della massa volumica apparente si nota che la tendenza con cui varia la conducibilità termica è collegata alla densità del campione. I campioni con una minore densità, infatti, mostrano valori di isolamento termico migliori (vedi **Figura 53**).

Thermal conductivity vs Temperature - Noccicolo e Sansa

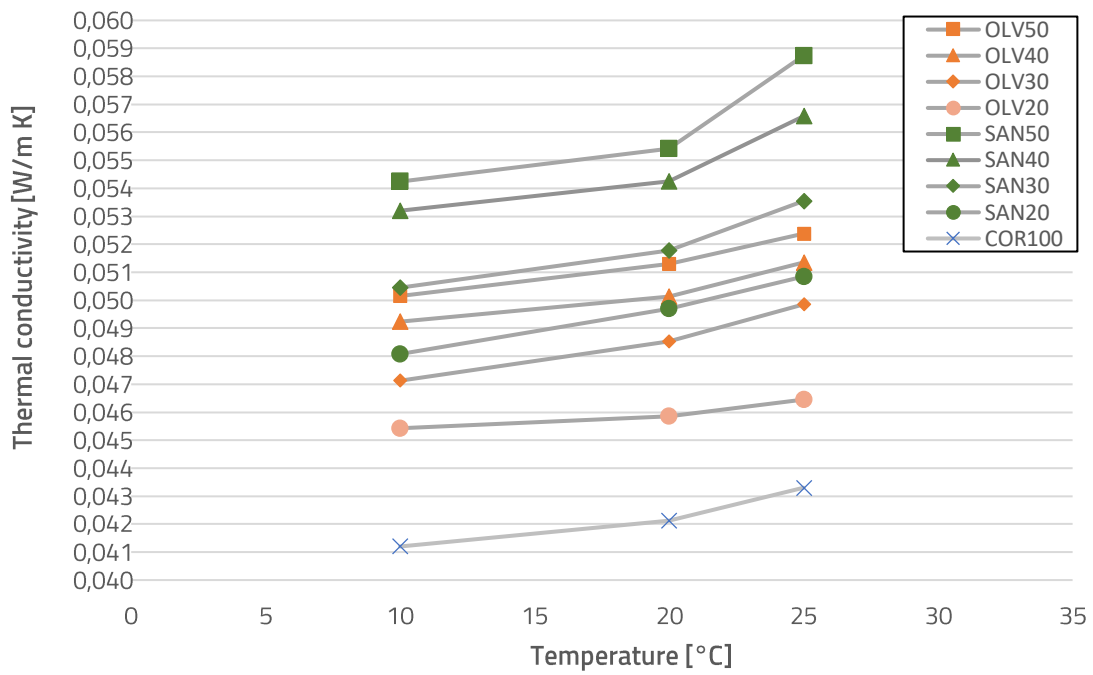


Figura 52 – Confronto dei valori della conducibilità termica per i campioni esaminati

Thermal conductivity vs density - Noccicolo e Sansa

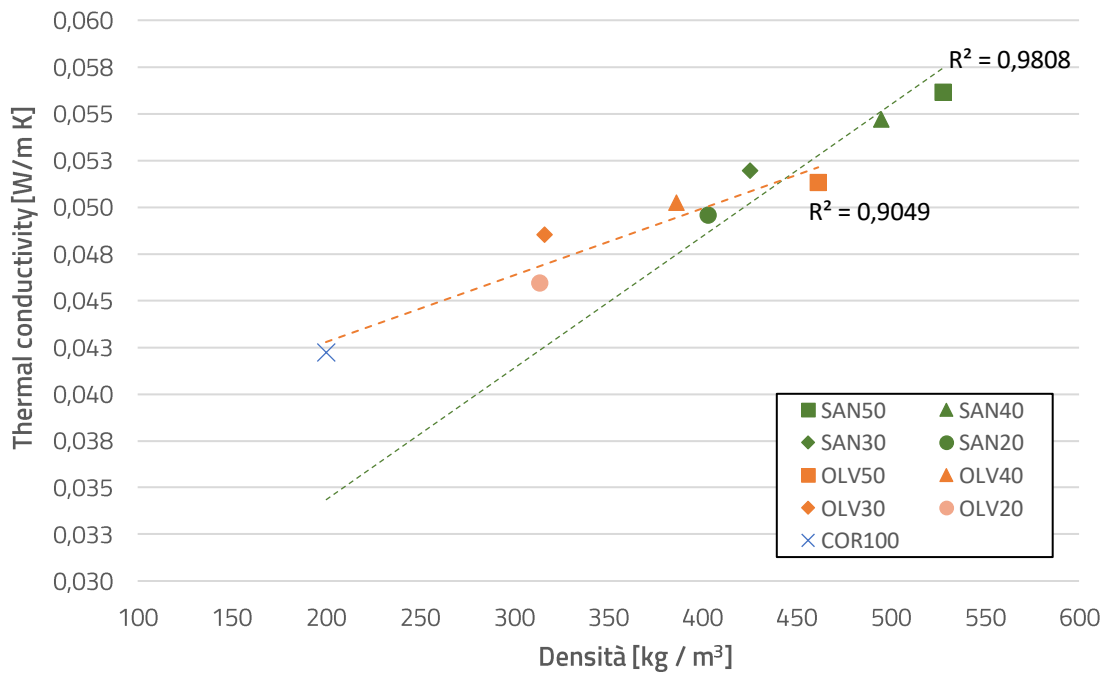


Figura 53 - Confronto dei valori della conducibilità termica e densità per i campioni esaminati

Per determinare la relazione esistente tra la conducibilità termica e l'umidità relativa ciascun provino è stato condizionato a temperatura T pari a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a diversi valori di umidità relativa crescenti (10, 30, 50, 70 e 90 %).

Misurando il valore della conducibilità termica in corrispondenza della temperatura di riferimento è stato possibile individuare la relazione esistente tra i due parametri. In entrambi i casi osservati, al variare della percentuale del materiale indagato e dell'umidità relativa, la conducibilità del provino aumenta. A tal proposito si osserva che gli incrementi maggiori si ottengono per i provini contenenti sansa di oliva raggiungendo il valore massimo per il provino SAN50 (0,065 W /m K).

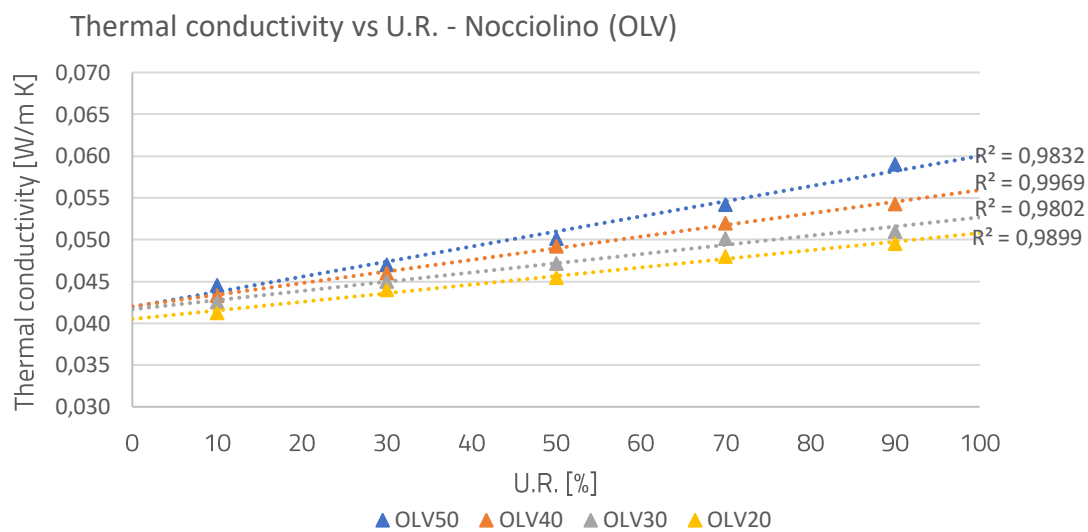


Figura 54 – Rapporto conduttività termica e umidità relativa per i provini contenenti nocciolino di oliva

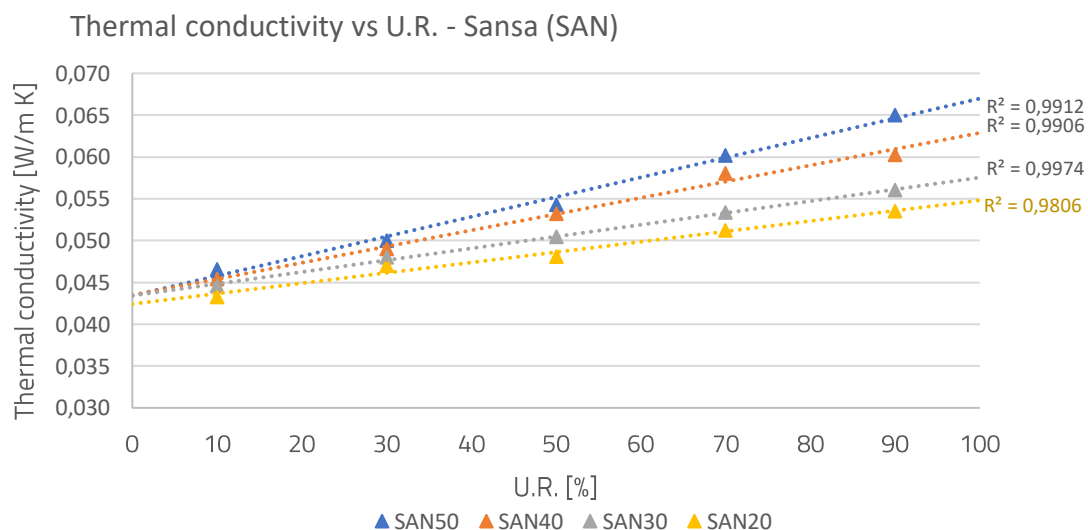


Figura 55 - Rapporto conduttività termica e umidità relativa per i provini contenenti sansa di oliva

5.3.5. Determinazione della permeabilità al vapore acqueo e fattore di resistenza alla diffusione del vapore

La permeabilità al vapore acqueo è stata misurata in accordo alla norma UNI EN 12086. La prova è stata condotta su 5 provini cilindrici dello stesso materiale aventi diametro pari a 200 mm e spessore 20 mm. Prima di eseguire la prova i campioni sono stati condizionati alle misure di temperatura e pressione standard ($T=23^{\circ}\text{C}$ e $UR=50\%$). I provini, successivamente, sono stati posti in una camera climatica con temperatura T pari a 23°C e a condizioni secondo due set di umidità relativa (cfr. **tabella 35**).

Tabella 35 – Set utilizzati per la determinazione della prova di permeabilità al vapore acqueo di ciascun provino

	$UR_{\text{inizio}} [\%]$	$UR_{\text{fine}} [\%]$	Δt [h]
Set A	0	50	3
Set B	0	90	6

Per ciascun campione è stato determinato il valore del cambiamento di massa G per ciascun provino nell'intervallo di tempo Δt utilizzando la seguente formula:

$$G = \frac{m_1 - m_2}{t_1 - t_2} [mg / h] = \frac{m_1 - m_2}{t_1 - t_2} \times 2,778 \cdot 10^{-10} [kg / s] \quad (27)$$

In cui

m_1 il peso del provino nell'istante iniziale t_1 ;

m_2 il peso del provino nell'istante finale t_2 ;

$t_1 - t_2$ sono gli istanti successivi di tempo tra le due pesate in ore.

Le misurazioni della massa dei provini sono state effettuate avvalendosi di una bilancia con precisione pari a 0,01 g. Il valore finale di G è stato ottenuto quando la variazione in percentuale del valore di G nelle ultime cinque determinazioni è stata al di sotto del $\pm 5\%$.

Il tasso di trasmissione del vapore acqueo g è stato calcolato dopo aver misurato il valore di G e dell'area esposta del provino avvalendosi della seguente equazione:

$$g = \frac{G}{A} [mg / m^2 h] = \frac{G}{A} \times 2,778 \cdot 10^{-10} [kg / m^2 s] \quad (28)$$

La permanenza al vapore acqueo W è stato ricavato mediante l'equazione 29, in cui la variazione di pressione Δp è risultata essere pari a 2390 Pa, mentre la resistenza al vapore acqueo Z è stata calcolata con l'equazione 30:

$$W = \frac{G}{A \cdot \Delta p} [mg/m^2 h Pa] = \frac{G}{A \cdot \Delta p} \times 2,778 \cdot 10^{-10} [kg / m^2 s Pa] \quad (29)$$

$$Z = \frac{1}{W} [m^2 h Pa / mg] = \frac{1}{W} \times 3.60 \cdot 10^9 [m^2 s Pa / kg] \quad (30)$$

Conoscendo lo spessore di ciascun provino è stato possibile misurare la permeabilità al vapore acqueo δ e conoscendo la permeabilità dell'aria δ_{aria} alla pressione atmosferica e alla temperatura di 23 °C ($1,94 \cdot 10^{-10} [kg/m s Pa]$) è stato possibile ricavare il coefficiente di resistenza al vapore acqueo μ mediante l'equazione 32:

$$\delta = W \cdot d [mg/m h Pa] = W \cdot d \times 2,778 \cdot 10^{-10} [kg/m s Pa] \quad (31)$$

$$\mu = \frac{\delta_{aria}}{\delta} \quad (32)$$

Tabella 36 –Risultati della prova. I valori riportati in tabella sono i valori medi ricavati dai cinque provini utilizzati per ciascun materiale indagato. A valori relativi al set A; B valori relativi al set B

Provino	G_m [kg / s]	g_m [kg / m ² s]	W_m [kg / m ² s Pa]	Z_m [m ² s Pa / kg]	$\delta_m \cdot 10^{-7}$ [kg/m s Pa]	μ_m -
SAN 50 – A	6,48 E-08	2,06 E-06	8,63 E-10	1,16 E+09	1,7	11,2
SAN 50 – B	7,41 E-08	2,36 E-06	9,87 E-10	1,01 E+09	2,0	9,8
SAN 40 – A	7,41 E-08	2,36 E-06	9,87 E-10	1,01 E+09	2,0	9,8
SAN 40 – B	8,33 E-08	2,65 E-06	1,11 E-09	9,01 E+08	2,2	8,7
SAN 30 – A	4,63 E-08	2,47 E-06	6,17 E-10	1,62 E+09	1,2	15,7
SAN 30 – B	1,20 E-07	3,83 E-06	1,60 E-09	6,24 E+08	3,2	6,1
SAN 20 – A	8,33 E-08	2,65 E-06	1,11 E-09	9,01 E+08	2,2	8,7
SAN 20 – B	1,20 E-07	3,83 E-06	1,60 E-09	6,24 E+08	3,2	6,1
OLV 50 – A	1,02 E-07	3,24 E-06	1,36 E-09	7,37 E+08	2,7	7,2
OLV 50 – B	8,33 E-08	2,65 E-06	1,11 E-09	9,01 E+08	2,2	8,7
OLV 40 – A	7,41 E-08	2,36 E-06	9,87 E-10	1,01 E+09	2,0	9,8
OLV 40 – B	9,26 E-08	2,95 E-06	1,23 E-09	8,11 E+08	2,5	7,9
OLV 30 – A	5,56 E-08	1,77 E-06	7,40 E-10	1,35 E+09	1,5	13,1
OLV 30 – B	1,06 E-07	3,39 E-06	1,42 E-09	7,05 E+08	2,8	6,8
OLV 20 – A	4,63 E-08	1,47 E-06	6,14 E-10	1,62 E+09	1,2	15,7
OLV 20 – B	1,16 E-07	3,68 E-06	1,54 E-09	6,49 E+08	3,1	6,3

Entrambi i materiali indagati presentano valori di permeabilità al vapore acqueo caratteristici dei materiali isolanti naturali. A parità di percentuale di materiale i provini contenenti la sansa umida presentano valori di resistenza alla diffusione del vapore più alta dei provini contenenti il nocciolino.

5.3.6. Confronto con altri materiali isolanti di origine naturale.

La scelta del materiale isolante è un fattore importante per migliorare la struttura dell'edificio. In questa sezione vengono confrontate le prestazioni termiche e igroscopiche dei materiali indagati alla luce dello studio dello stato dell'arte relativo ai materiali *bio-based* esistenti. In particolare, nel seguito l'attenzione è stata posta sui materiali isolanti di origine naturale che è possibile trovare nell'area mediterranea (cfr. [Tabella 37](#)).

Tabella 37 – Tabella riepilogativa

Materiale isolante	ρ (kg / m³)	λ (W / m K)	μ (-)
<i>bambù</i>	538	0,077	15,4
<i>mais</i>	257	0,010	5,2
<i>durian</i>	1456	0,035	19
<i>fibre di cocco</i>	125	0,040	30
<i>fique</i>	128	0,028	-
<i>lino</i>	100	0,033	5,28
<i>canapa</i>	100	0,039	10
<i>kenaf</i>	180	0,026	2,3
<i>canne</i>	190	0,045	2
<i>girasole</i>	152	0,038	-
<i>fibre palma dattero</i>	389	0,072	-
<i>bagassa</i>	350	0,046	-
<i>fibre cotone</i>	450	0,058	-
<i>fibra di legno</i>	270	0,038	5
<i>lana di pecora</i>	20	0,038	5

Provini	ρ (kg / m³)	λ (W / m K)	μ (-)
<i>COR100</i>	240	0,041	15
<i>SAN 50</i>	530	0,054	11,2
<i>SAN 40</i>	490	0,051	9,8
<i>SAN 30</i>	130	0,048	15,7
<i>SAN 20</i>	400	0,045	8,7
<i>OLV 50</i>	460	0,050	7,2
<i>OLV 40</i>	390	0,047	9,8
<i>OLV 30</i>	320	0,044	13,1
<i>OLV 20</i>	310	0,040	15,7

Le proprietà isolanti dei materiali sono espresse mediante la conduttività termica e l'inerzia termica del materiale, le quali, solitamente sono inferiori ai valori relativi ai materiali da costruzione usuali. La conduttività termica dei principali materiali isolanti innovativi come i pannelli VIP, PCM e aerogel presentano valori più bassi rispetto ai materiali di origine naturale, i quali hanno valori compresi tra

0,010 e 0,077 W / mK. I valori di conducibilità termica sono illustrati nella **Figura 56**. I campioni realizzati e contenenti gli scarti del processo estrattivo dell'olio di oliva presentano valori compresi tra 0,040 e 0,054 W / mK. I valori ottenuti mediante le prove di laboratorio sui provini realizzati permettono di collocare i materiali indagati nella media dei valori caratteristici dei materiali isolanti naturali.

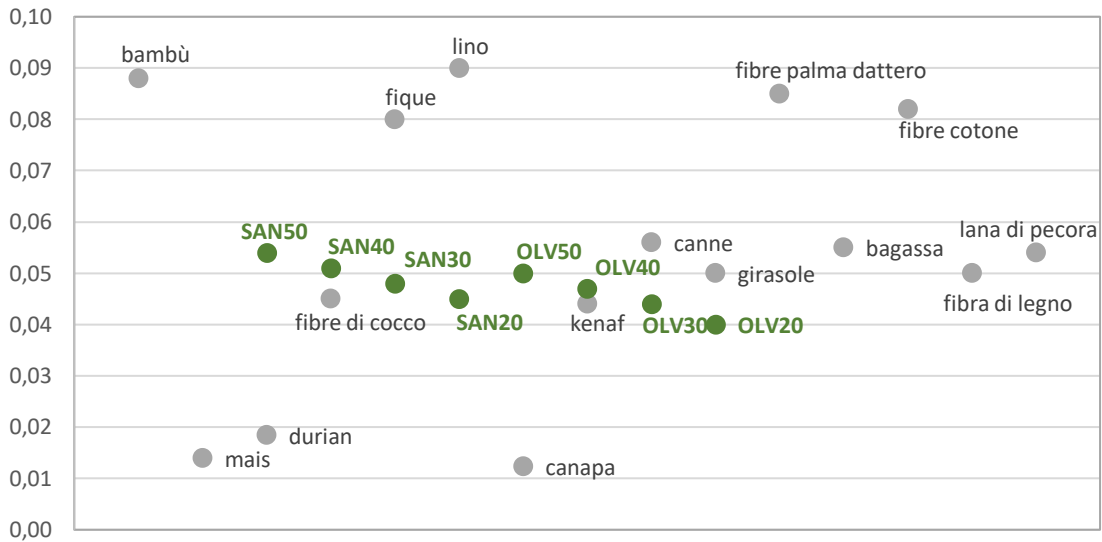


Figura 56 – Confronto della conducibilità termica dei materiali isolanti bio-based

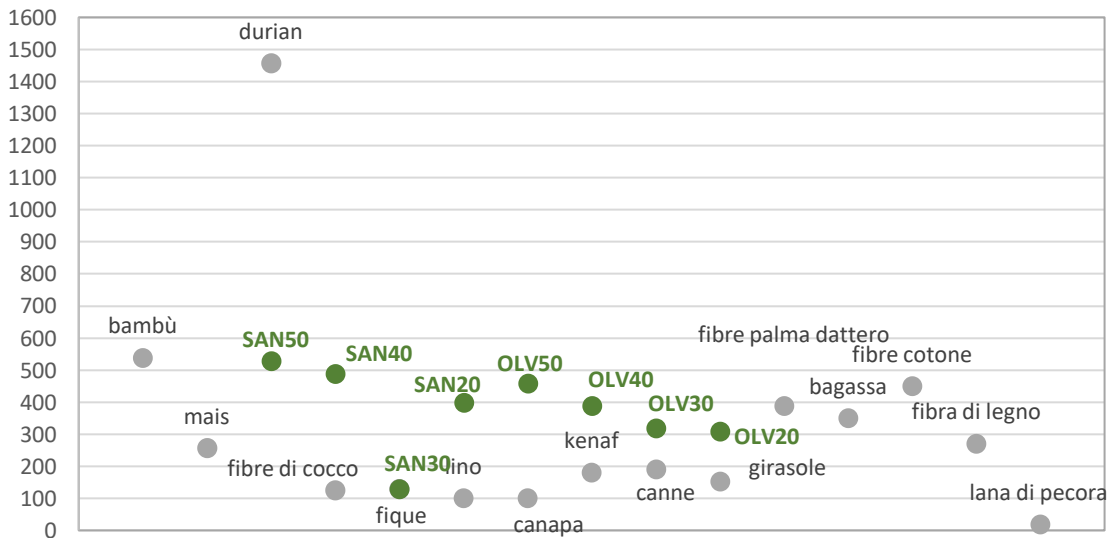


Figura 57 – Confronto della densità dei materiali isolanti bio-based

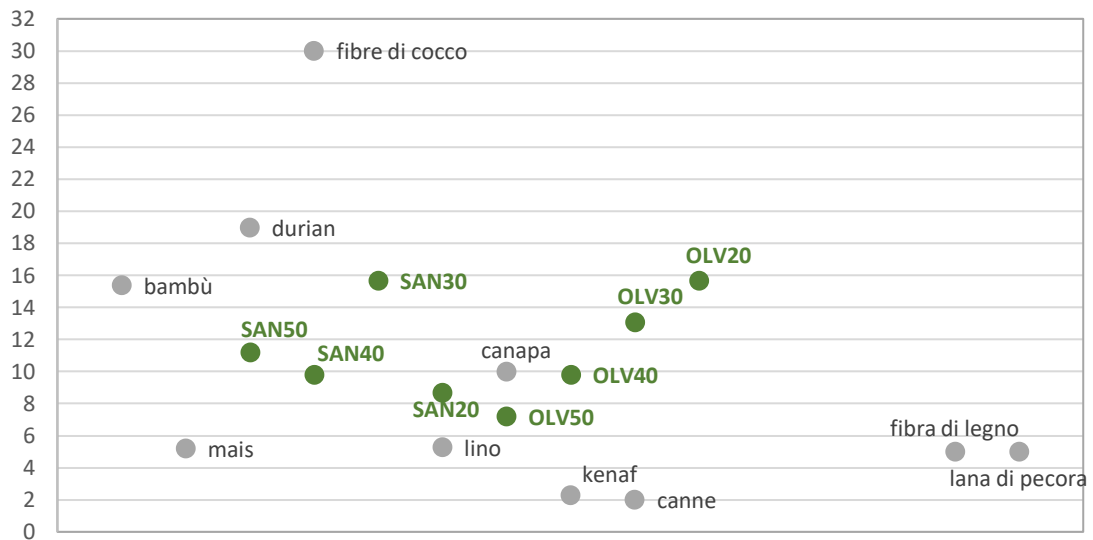


Figura 58 - Confronto della resistenza al vapore acqueo dei materiali isolanti bio-based

Osservando i grafici si evince come le caratteristiche di densità, conducibilità termica e resistenza alla diffusione al vapore sono conformi a quelli di altri materiali di origine naturale impiegati per l'isolamento termico. I risultati ottenuti rendono valida la proposta di usare i campioni ottenuti in un sistema a cappotto termico di cui si prosegue con le verifiche energetiche in un edificio studio progettato con struttura portante in legno.

5.4. CASO STUDIO

Nel presente capitolo le prestazioni dei materiali isolanti indaganti sono state analizzate mediante una simulazione numerica delle prestazioni di un edificio residenziale realizzato in XLAM sito in Sant'Agata li Battiati (CT). L'edificio di riferimento ha un volume lordo di 1050 m³ e superficie utile di 175 m² suddivisi su due livelli fuori terra, ossia un piano terra in cui è presente la zona giorno e costituita da ingresso, soggiorno, cucina e servizio igienico con lavanderia mentre al piano superiore è distribuita la zona notte composta da tre camere da letto e due servizi igienici. In **Figura 59** e **60** sono riportate rispettivamente le planimetrie del piano terra e del primo piano dell'edificio. La struttura portante dell'edificio è realizzata in legno lamellare XLAM a 5 strati. Le chiusure verticali sono realizzate in pannelli a 5 strati aventi 16 cm di spessore e coibentate termicamente mediante il fissaggio di uno strato isolante posto sull'estradosso. Internamente la chiusura verticale presenta uno spazio tecnico di 5 cm per il passaggio dei cavi e una doppia lastra in cartongesso a protezione. La chiusura orizzontale di base è costituita da un massetto in calcestruzzo isolante posto sopra un vespaio areato e posto in comunicazione con l'esterno. La chiusura di copertura è di tipo inclinata, ed è costituita da uno strato portante in XLAM e isolato termicamente con uno strato di 4 cm di lana di roccia e manto di copertura in tegole di argilla. L'edificio di riferimento presenta dispositivi di schermatura solare quali veneziane interne. Al fine di valutare i risultati numerici delle simulazioni si è ritenuto opportuno confrontare il fabbisogno energetico annuale, invernale ed estivo, dei sistemi d'involucro oggetto di analisi con quelli dell'involucro di riferimento.

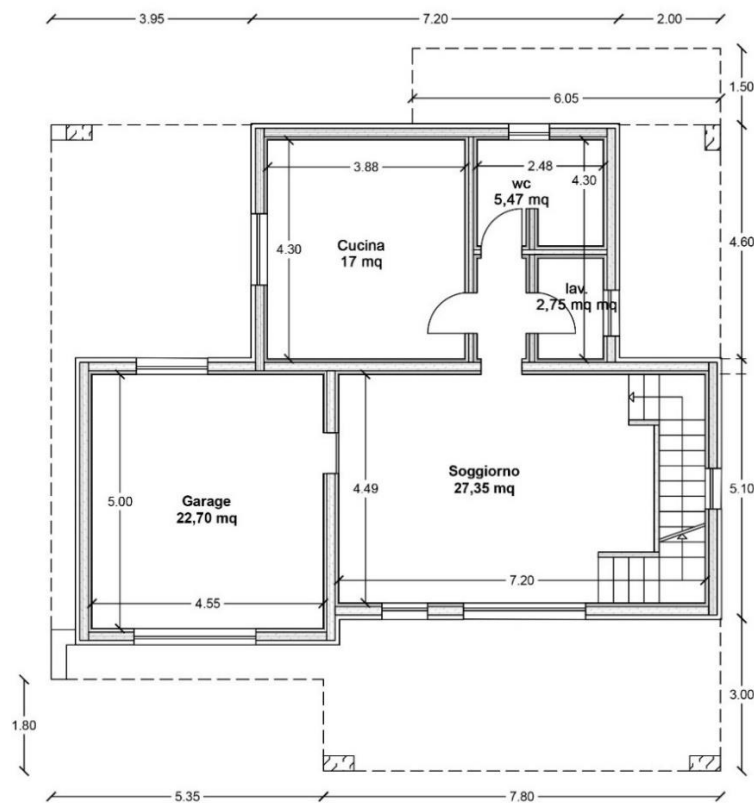


Figura 59 – Planimetria del piano terra

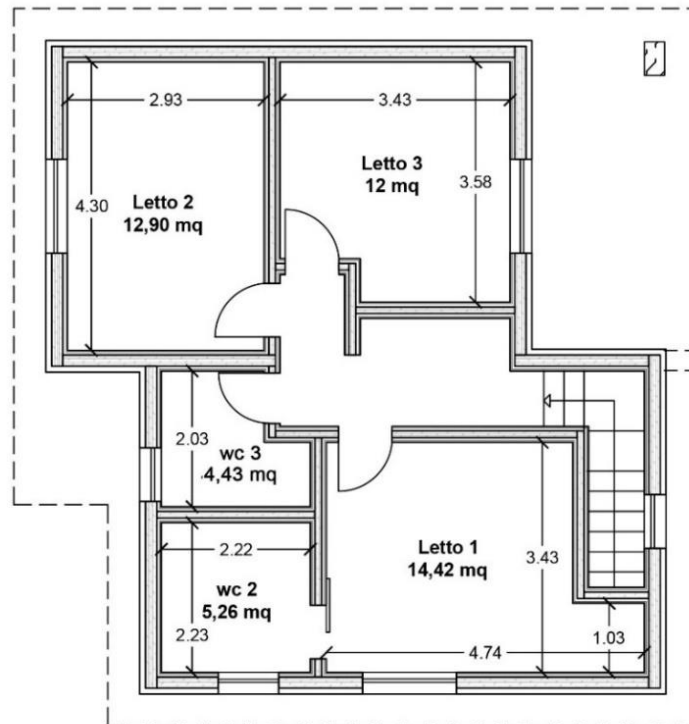


Figura 60 – Planimetria del piano primo

5.4.1. Calcolo orario delle prestazioni energetiche UNI EN ISO 52016

Per il calcolo orario delle prestazioni energetiche del caso studio è stato utilizzato il software ICARO 1.0.3.2 sviluppato da ANIT (Associazione Nazionale Isolamento Termico e Acustico). Il software scelto per l'analisi è in grado di eseguire il calcolo orario dinamico ai sensi della norma UNI EN ISO 52016 -1. Sebbene il programma di calcolo fosse in grado di utilizzare i profili orari proposti dal CTI (Comitato Termotecnico Italiano), i dati climatici utilizzati ai fini della simulazione energetica sono stati caricati manualmente mediante la compilazione di un file .xls riportante le informazioni climatiche riguardati l'area geografica di Sant'Agata li Battiati (CT). I dati in input sono riferiti all'anno solare 2019 e sono stati resi disponibili dal SIAS (Servizio Informativo Agrometeorologico Siciliano).

Così come previsto dalla normativa, i dati climatici comprendono un periodo di inizializzazione sufficientemente lungo da tralasciare eventuali perturbazioni iniziali nei nodi di analisi. I dati climatici, pertanto sono riferiti al periodo compreso tra l'1 dicembre 2018 e il 31 dicembre 2019. Il file climatico utilizzato è riferibile ai dati registrati dalla stazione di Catania sita in S. Francesco la Rena posta 10 m s.l.m. (coordinate UTM ED50 - Nord: 4144073; Est: 506089) ed è composto dai seguenti valori:

Grandezza	U.M.	Processo di acquisizione
Radiazione solare totale	W / m ²	Piranometro a termopila per la misura cumulativa della radiazione diretta e diffusa con un intervallo di campionamento di 60 s, con risoluzione di 1W/m ² , e sensibilità spettrale da 0,3 a 3 μm.
Temperatura aria esterna	°C	Posizionamento di un sensore di resistenza al platino pT100 con schermo antiradiazione, intervallo di campionamento 60 s, risoluzione di 0,1 °C e accuratezza di ± 0,15 °C
Pressione atmosferica	Pa	Posizionamento di un trasduttore piezoelettrico a resistenza con intervallo di campionamento: 60 s, risoluzione di 0,1 hPa e accuratezza ± 0,5 hPa a 22°C
Umidità relativa	%	Posizionamento di un trasduttore capacitivo a polimeri igroscopici con schermo antiradiazione, intervallo di campionamento di 60 s, risoluzione di 0,1 °C e accuratezza di ± 0,15 °C

Così come previsto dalla normativa, l'edificio è stato scomposto in zone termiche riepilogate nella tabella successiva:

Tabella 38 – Riepilogo zone termiche in cui è stato effettuato il calcolo

Zona termica	Ambiente	Sigla
ZT1	Soggiorno	Lv
ZT2	Camera da letto 1	Br1
ZT3	Camera da letto 2	Br2
ZT4	Camera da letto 3	Br3
ZT5	Cucina	K
ZT1+ZT5	Zona giorno	Zg
ZT2+ZT3+ZT4	Zona notte	Zn

Per ciascuna zona termica sono state definite le temperature di set point per il riscaldamento e raffrescamento nonché la presenza degli impianti e della loro potenza espressa in kW.

Tabella 39 - Riepilogo dei set point e delle potenze di calcolo

Sigla	Temperatura riscaldamento	Temperatura. raffrescamento	Potenza impianto riscaldamento	Potenza impianto raffrescamento
	°C	°C	kW	kW
Lv	20	26	1,2	1
Br1	20	26	1,2	1
Br2	20	26	1,2	1
Br3	20	26	1,2	1
K	20	26	1,2	1
Zg	20	26	2,4	2
Zn	20	26	3,6	3

Dopo aver definito all'interno del software le zone termiche oggetto di studio, per ciascuna di esse sono stati definiti le dispersioni termiche e gli apporti solari, gli apporti interni, gli apporti della ventilazione e la potenza fornita dai sistemi di raffrescamento e riscaldamento.

Per quantificare le dispersioni dell'involucro dell'edificio di riferimento sono state definite:

- **le strutture opache**

Le strutture opache sono state modellate mediante il software PAN 5.0 sviluppato da ANIT. Le strutture verticali e orizzontali opache sono state caratterizzate, procedendo dall'esterno verso l'interno, definendo gli strati termici e assegnando a ciascuno di essi il corrispettivo materiale e spessore. I dati relativi ai materiali utilizzati nelle stratigrafie opache dell'involucro edilizio sono stati inseriti manualmente in base ai valori riscontrati in letteratura. Lo strato isolante delle chiusure verticali, oggetto di interesse del calcolo orario, è stato progettato in funzione dei dati ottenuti dalle prove di laboratorio effettuate sui provini già discusse in precedenza. Le stratigrafie dei componenti edilizi sono riportate nell'**Allegato 1**.

- **le strutture trasparenti**

Le strutture trasparenti sono state definite utilizzando il software di calcolo APOLLO 1.0 sviluppato da ANIT. Il software è in grado di calcolare la trasmittanza delle superfici vetrate introducendo parametricamente i dati delle dimensioni dell'elemento vetrato e delle caratteristiche delle strutture (stratigrafia, materiale del telaio, tipologia di giunto e distanziatori).

Gli infissi sono stati modellati termicamente in base alla reale tipologia installata nell'edificio di riferimento. Tutti gli infissi presentano un telaio a taglio termico con trasmittanza termica pari a $2,20 \text{ W / m K}$ di dimensioni 70 mm e battente termico pari a 36 mm calcolato secondo la norma UNI TS 11300-1. I dati geometrici dei serramenti sono riportati nell'**Allegato 2**.

- **i ponti termici**

In ambito della riqualificazione energetica di un edificio, uno dei controlli più importanti è quello riguardante i ponti termici, cioè i punti della struttura in cui si verificano delle modifiche della direzione del flusso termico a causa di variazioni nella struttura stessa, ad esempio angoli, terrazze, balconi, tetti, finestre, ecc.

Per questo motivo in quei punti il flusso termico non può essere considerato mono-dimensionale e si verifica un aumento delle dispersioni di calore che riducono la temperatura della superficie interna della parete. Per tener conto dell'aumento del flusso termico dei ponti termici è necessario calcolare l'entità dell'extra-flusso e la temperatura minima che raggiunge la superficie in modo tale che non si verifichi una condizione favorevole alla formazione di condensa e di conseguenza la nascita di muffe.

La procedura per l'analisi dei ponti termici eseguita nel caso in esame è stata effettuata mediante la simulazione dei ponti termici critici tramite il software IRIS 5.0, sviluppato da ANIT,

in accordo con la norma UNI EN ISO 146833. La verifica igrometrica è stata svolta seguendo le indicazioni fornite dalla norma UNI EN ISO 137884.

Gli apporti interni sono stati definiti simulando il consumo domestico ed un'utenza di 4 persone, in particolare sono stati definiti 3 diversi scenari orari di apporti interni espressi in kW. Il consumo di kW giornaliero è stato ipotizzato essere pari a 7,2 kW.

Tabella 40 – Dati del profilo orario degli apporti interni per ciascuna zona termica

Descrizione	Inizio	fine	Giorni	Ora inizio	Ora fine	Q _{int} (kW)
Apporti giornalieri	01/01/2019	31/12/2019	lun-dom	08:00	18:00	0,40
Apporti serali	01/01/2019	31/12/2019	lun-dom	18:00	23:00	0,80
Apporti notturni	01/01/2019	31/12/2019	lun-dom	23:00	08:00	0,24

Gli apporti relativi alla ventilazione naturale sono stati ricavati assumendo un tasso di ricambio orario pari a 0,3 vol / h per la stagione di riscaldamento e di 0,5 vol/ h per la stagione di raffrescamento (cfr. **Tabella 41**).

Tabella 41 - Dati del profilo orario degli apporti di ventilazione naturale stagionale per ciascuna zona termica

Zona termica	Ambiente	V m ³	Qv inv m ³ /h	Qv Est m ³ /h
ZT1	Soggiorno	87,5	26,25	43,74
ZT2	Camera da letto 1	37,0	11,10	18,50
ZT3	Camera da letto 2	34,1	10,20	17,01
ZT4	Camera da letto 3	31,1	9,30	15,53
ZT5	Cucina	45,1	13,53	22,55
ZT1+ZT5	Zona giorno	132,6	39,78	66,30
ZT2+ZT3+ZT4	Zona notte	95,2	28,56	47,60

A seguito dei dati in input sopra descritti il software ha elaborato i consumi energetici dell'edificio in termini di kWh per i sistemi di riscaldamento e raffrescamento necessari a mantenere le temperature interne entro i limiti di set-point precedentemente definiti. I consumi ottenuti per l'edificio di riferimento sono caratteristici dei profili climatici utilizzati per il calcolo.

Le esigenze energetiche dell'edificio sono in larga parte concentrate nella stagione estiva, in cui sono presenti elevati picchi di temperatura esterna che si ripercuotono sulla temperatura radiante delle superfici interne delle zone termiche. I risultati della simulazione energetica sono riportati nelle **tabelle 42 e 43**.

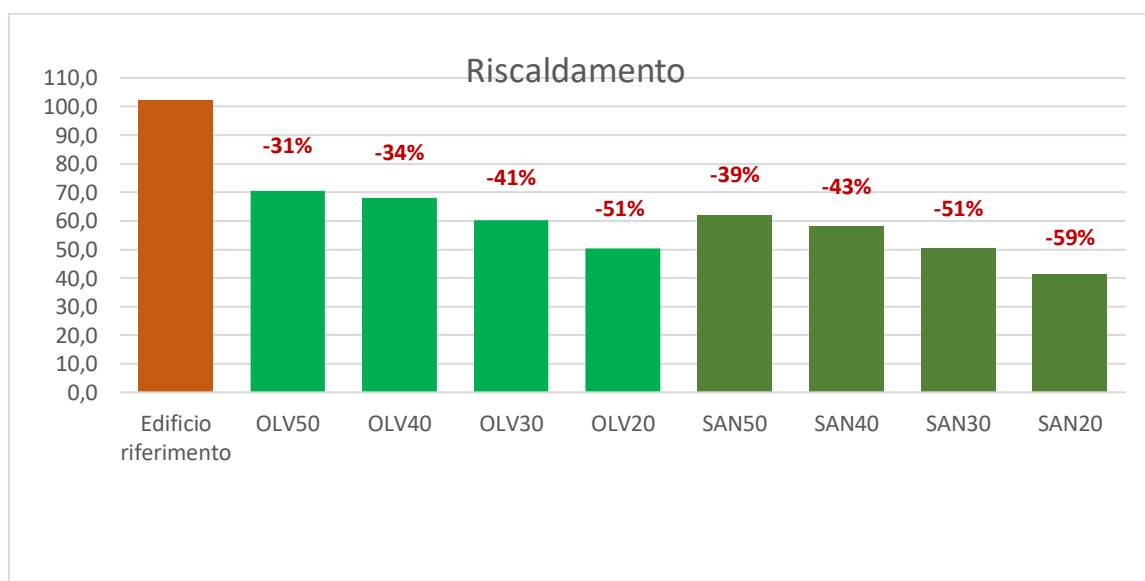
Tabella 42 – Risultati della simulazione energetica per il riscaldamento

Simulazione	Riscaldamento			
	Potenza disponibile kW	Potenza max. impiegata kW	Energia utilizzata kWh	T operativa minima °C
Edificio riferimento	7,00	7,00	102,3	19,1
Simulazione A OLV50	7,00	7,00	70,4	17,5
Simulazione B OLV40	7,00	7,00	68,0	16,9
Simulazione C OLV30	7,00	7,00	60,3	17,2
Simulazione D OLV20	7,00	7,00	50,4	17,5
Simulazione E SAN50	7,00	7,00	62,1	16,7
Simulazione F SAN40	7,00	7,00	58,2	16,5
Simulazione G SAN30	7,00	7,00	50,4	17,1
Simulazione H SAN20	7,00	7,00	41,5	17,6

Tabella 43 - Risultati della simulazione energetica per il raffrescamento

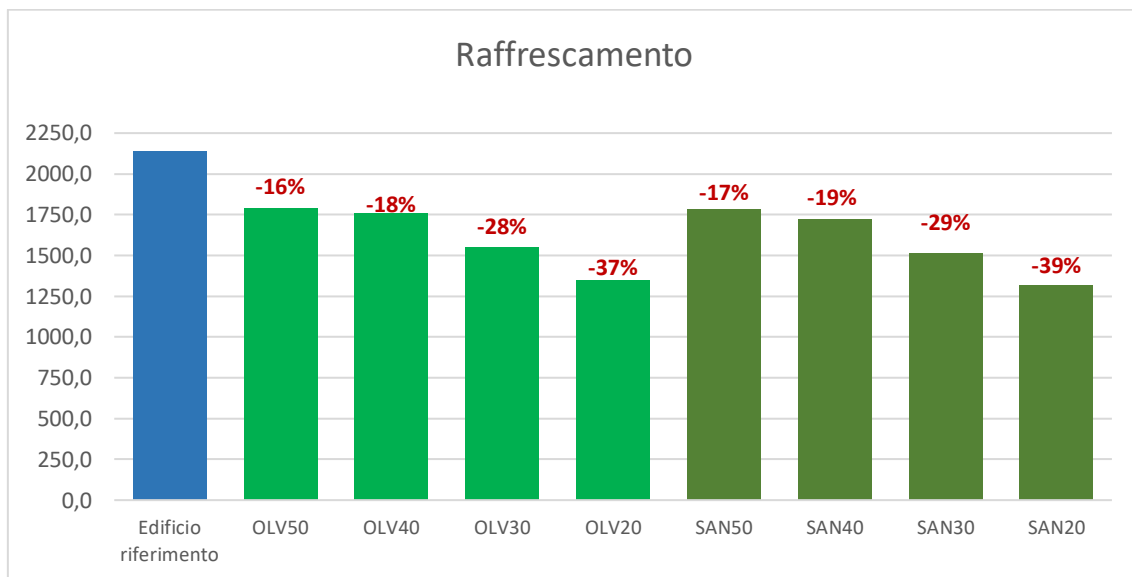
Simulazione	Raffrescamento			
	Potenza disponibile kW	Potenza max. impiegata kW	Energia utilizzata kWh	T operativa massima °C
Edificio riferimento	5,00	5,00	2140,0	31,2
Simulazione A OLV50	5,00	5,00	1790,8	28,2
Simulazione B OLV40	5,00	5,00	1756,4	29,4
Simulazione C OLV30	5,00	5,00	1547,0	27,5
Simulazione D OLV20	5,00	5,00	1345,5	28,2
Simulazione E SAN50	5,00	5,00	1780,9	29,1
Simulazione F SAN40	5,00	5,00	1724,2	28,4
Simulazione G SAN30	5,00	5,00	1510,1	28,4
Simulazione H SAN20	5,00	5,00	1315,4	28,2

L'inserimento di uno strato isolante all'interno della stratigrafia delle chiusure verticali dell'involucro contribuisce in maniera positiva alla riduzione del fabbisogno energetico globale dell'edificio di riferimento.



I materiali indagati comportano una diminuzione del fabbisogno energetico compreso tra il 31 e il 59 % dei kWh consumati dall'edificio di riferimento.

Nel calcolo dell'energia richiesta per il riscaldamento, il pannello isolante che comporta un maggiore risparmio energetico è il SAN20, circa il 60% in meno di consumi rispetto all'edificio di riferimento. Anche nelle simulazioni in cui vengono utilizzati i pannelli SAN30 e OLV20 si osservano riduzioni del 50% dei consumi dell'edificio di riferimento. In generale, è possibile notare una tendenza favorevole in funzione della riduzione della conducibilità termica del materiale.



Come discusso precedentemente, l'energia richiesta per il raffrescamento è la quota energetica che incidente maggiormente sulle zone termiche considerate. In questo caso l'inserimento dello strato termico all'interno delle strutture verticali dell'involucro edilizio genera una riduzione inferiore rispetto al calcolo effettuato per il riscaldamento. Pertanto, per conseguire benefici energetici ulteriori sarebbe opportuno inserire altri sistemi di protezione quali schermature alle radiazioni solari. Un buon miglioramento dei consumi energetici è tuttavia conseguibile attraverso l'utilizzo dei pannelli OLV20 e SAN20.

Considerando che 1 kWh di energia elettrica produce circa 352 grammi di CO₂ è possibile quantificare l'impatto ambientale dell'edificio di riferimento. Il test builder, sotto le condizioni di input imposte per il riscaldamento e il raffrescamento, produce 785 kg CO₂ all'anno. L'applicazione del materiale isolante SAN e OLV apporta riduzioni di tale numero. I pannelli in grado di ridurre maggiormente l'impatto energetico dell'edificio sono il SAN20 e l'OLV20, circa il 40 % corrispondente ad una riduzione di 310 kg CO₂. Negli altri casi la riduzione di CO₂ è risultata essere compresa tra il 17 e il 30% con una migliore propensione della sansa alla riduzione dei kg CO₂. La possibilità di integrare ulteriori strategie passive di riduzione dei consumi invernali può influire positivamente su un'ulteriore riduzione dell'impatto ambientale dell'edificio.

5.4.2. Calcolo del comfort adattivo

Il benessere termico è stato valutato mediante il calcolo orario della temperatura operante delle zone termiche. Mediante le temperature esterne ed interne orarie è stato possibile calcolare le ore di comfort termico interno così come indicato nella norma UNI EN 15251 mediante il software ICARO. Il comfort adattivo interno è stato quantificato suddividendo le ore di comfort e di discomfort in assenza degli impianti nelle tre categorie previste dalla norma (cfr. **tabella 44**).

Tabella 44 – Tabella riepilogativa del calcolo del benessere termico ai sensi della UNI EN 15251

	Categoria I			Categoria II			Categoria III		
	Ore Comfort	Ore discomfort invernale	Ore discomfort estivo	Ore Comfort	Ore discomfort invernale	Ore discomfort estivo	Ore Comfort	Ore discomfort invernale	Ore discomfort estivo
Edificio riferimento	30,6%	11,3%	58,1%	43,6%	14,7%	41,7%	66,2%	5,5%	28,3%
OLV50	40,1%	10,3%	49,6%	45,2%	11,3%	43,5%	77,3%	4,2%	18,6%
OLV40	42,8%	9,5%	47,7%	56,8%	10,7%	32,5%	80,1%	4,0%	15,9%
OLV30	51,0%	9,1%	39,9%	65,1%	8,2%	26,7%	89,7%	3,0%	7,3%
OLV20	59,0%	8,2%	32,8%	74,0%	7,4%	18,6%	98,0%	0,9%	1,1%
SAN50	40,6%	10,1%	49,3%	46,1%	11,2%	42,7%	79,4%	3,2%	17,4%
SAN40	43,0%	9,3%	47,7%	57,5%	9,8%	32,7%	82,5%	2,1%	15,4%
SAN30	54,0%	8,8%	37,2%	65,9%	7,3%	26,8%	90,2%	2,0%	7,8%
SAN20	64,4%	7,7%	27,9%	75,7%	6,5%	17,8%	98,1%	0,9%	1,0%

Le misurazioni del comfort riguardano il periodo compreso tra l'1 gennaio 2019 e il 31 dicembre 2019. L'inserimento di uno strato isolante nelle chiusure verticali mostra un aumento massimo del 33,8% delle ore di comfort in linea con i dati relativi alla riduzione dei consumi energetici.

Il miglioramento delle condizioni interne è stato raggiunto in tutte e tre le categorie di comfort nella simulazione riguardante l'utilizzo della SAN20: Categoria I + 33,8%, Categoria II + 32,1 e categoria III +31,9%. Analizzando le ore di discomfort si osserva che persiste una maggior incidenza delle condizioni ambientali del periodo estivo. La severità del clima estivo può essere spiegata anche attraverso le temperature elevate registrate dalla stazione metereologica di Catania nell'anno solare indagato.

5.4.3. Studio dell'LCA dei materiali

Per la valutazione dell'impatto ambientale sulle emissioni di GHG dei provini realizzati è stata svolta una analisi LCA di prodotto (o semplificata) [40]. Tale scelta è giustificata dal fatto che l'obiettivo dello studio è poter confrontare i dati raccolti con quelli di altri materiali isolanti i quali solitamente vengono misurati mediante EPD in un sistema *cradle to gate* escludendo la fase di distribuzione, di utilizzo, smaltimento del prodotto e produzione di materiali ausiliari. Utilizzare lo stesso sistema di misurazione dell'impatto ambientale, quindi, permette di confrontare in modo equo i diversi prodotti. La valutazione ambientale dei prodotti indagati è stata effettuata in funzione delle diverse

percentuali di materie prime seconde che costituiscono il pannello isolante composito. Per rendere confrontabile i risultati dell'analisi è stata scelta come unità funzionale il metro cubo di pannello isolante. I dati relativi all'analisi di inventario sono stati reperiti mediante ricerca bibliografica del ciclo di vita dell'olio di oliva e del granulato di sughero.

La valutazione dell'impatto ambientale in termini di Global Warming Potential (GWP100) dei processi produttivi delle materie prime seconde è stata effettuata su una valutazione delle emissioni nel ciclo *from cradle to gate* e avvalendosi del software OpenLCA. Per valutare l'impatto ambientale del processo dei sottoprodotti all'interno del processo principale è stato utilizzato, così come consigliato dalle norme serie ISO14040, il metodo di espansione del sistema in cui l'intero processo è suddiviso in diversi sottoprocessi definendo in tal modo confini precisi al sistema di valutazione. Trattandosi di sottoprodotti biogenici, al fine di quantificare il beneficio derivante dal loro riutilizzo, per ciascun pannello sono state quantificate le emissioni biogeniche di CO₂ correlate al ciclo naturale del carbonio risultanti dalla coltura dell'ulivo e del sughero.

L'ambito di definizione del sistema dell'olio di oliva utilizzato comprende una fase agricola e una fase di produzione, pertanto, escludendo dal calcolo le successive fasi di lavorazione (gestione, confezionamento e distribuzione del prodotto) che non sono contemplate ai fini dell'oggetto del presente studio. Nel caso dei pannelli isolanti contenenti il nocciolino è stata considerata un'ulteriore fase lavorativa necessaria per separare il materiale dalla sansa umida.

Per quantificare l'impatto del granulato di sughero utilizzato per la valutazione LCA sono state considerate le fasi di crescita e la potatura degli alberi di sughero, la raccolta (C1), il trasporto all'industria di trasformazione (Ct1), la ricezione (C2), la triturazione (C3), la selezione granulometrica (C4) e il packaging (C5).

Il ciclo di vita del sughero inizia con la crescita e la cura degli alberi da sughero. Durante tale periodo la quercia da sughero assorbe CO₂ e i granuli di sughero utilizzati ai fini del calcolo sono ottenuti dalla potatura dei rami della quercia da sughero nota come "falca". La falca possiede una elevata concentrazione di suberina e lignina che permettono un efficace processo di tostatura. La potatura viene normalmente eseguita utilizzando una motosega meccanica (funzionante a benzina), e viene estratto dai rami degli alberi utilizzando un'attrezzatura meccanica (funzionante con gasolio), talvolta integrata con metodi manuali. In seguito a questa operazione si ottiene la materia prima per la produzione del pannello. Tutti i sottoprodotti considerati ai fini del calcolo provengono da aziende realmente esistenti e operanti su territorio siciliano (vedi **Tabella 45**). Tali dati di contesto risultano essere fondamentali per acquisire dei valori quanto più realistici relativi ai consumi derivanti dal trasporto dei sottoprodotti.

Tabella 45 – Siti produttivi delle materie prime e materie prime seconde utilizzati ai fini del calcolo LCA

Sottoprodotto	Ditta	Località	Distanza sito produttivo
Granulato di sughero	Sud sugheri s.r.l.	Caltagirone (CT)	67 km
Olive sistema tradizionale	Oleificio Nunziata Emanuele	Paternò (CT)	20 km

Olive sistema centrifugazione bifase	Scalia Antonio s.r.l.	Ragalna (CT)	24 km
Olive sistema centrifugazione trifase	Oleificio Russo	Belpasso (CT)	20 km

Il processo oggetto di valutazione è stato valutato considerando il ciclo *from the cradle to the gate*; i dati per la formulazione dell'inventario sono stati ricavati dalla letteratura e la valutazione degli impatti ambientali è stata improntata per quantificare le emissioni di CO₂ nel processo produttivo in termini di Global Warming Potential con un ritorno di 100 anni.

Goal and Scope Definition

Il sistema oggetto di valutazione è un pannello isolante composito di sughero e sansa, prodotto dallo scarto del processo estrattivo dell'olio d'oliva dalle olive in ingresso al frantoio. L'unità funzionale oggetto dello studio è di 1 m³ di pannello. Il processo di produzione è stato considerato *from cradle to gate*, cioè dall'approvvigionamento delle materie prime fino all'imballaggio e lo stoccaggio dei pannelli. Nell'approvvigionamento delle materie prime è rilevante sottolineare che il sughero è una materia prima mentre la sansa è una materia secondaria, cioè un materiale di scarto della produzione dell'olio di oliva che viene riciclato per un nuovo scopo.

I passaggi di produzione valutati nella categoria di impatto scelta sono stati: la coltivazione e la raccolta delle olive (S1), il trasporto in frantoio (St1), il lavaggio (S2), la molitura (S3) e la separazione della sansa dalle acque di vegetazione e dell'olio (S4).

Successivamente è stato quantificato l'approvvigionamento e il trasporto della sansa e del sughero dai luoghi di produzione alla fabbrica di realizzazione del pannello isolante.

Entrambe le materie prime sono state sottoposte a setacciatura (P1) al fine di selezionare la granulometria richiesta e di eliminare eventuali residui presenti. L'operazione di setacciatura è stata considerata per ciascun materiale ed è funzionante con sistemi di tipo elettrici. Tale fase è necessaria e propedeutica alla miscelazione delle diverse percentuali in peso di materie prime seconde e alla loro espansione in autoclave (P2) necessaria alla produzione di suberina.

La cottura ad alte temperature e sotto pressione produce la fuoriuscita della suberina dai granuli di sughero che svolge la funzione di legante fra i granuli. I granuli di sughero uniti alla sansa, per mezzo del processo di "tostatura" subiscono una precompressione eseguita da vapore a temperatura compresa tra 300-350 °C e pressioni comprese tra 30-60 kPa. In questo modo le particelle vengono espanse e "autoincollate" con la suberina, senza la necessità di adesivi esterni. Al termine del processo è ricavato un blocco di agglomerato di sughero e sansa.

Il blocco di sughero e sansa in uscita dall'autoclave viene rettificato (P3) e raffreddato (P4). I blocchi vengono poi posti in un magazzino dove vengono lasciati per la stabilizzazione per 15 giorni. In questo processo viene utilizzata l'elettricità per la rettificazione del pannello. Il pannello realizzato viene in seguito imballato (P5) utilizzando un film di polietilene a bassa densità (LDPE), che consuma elettricità.

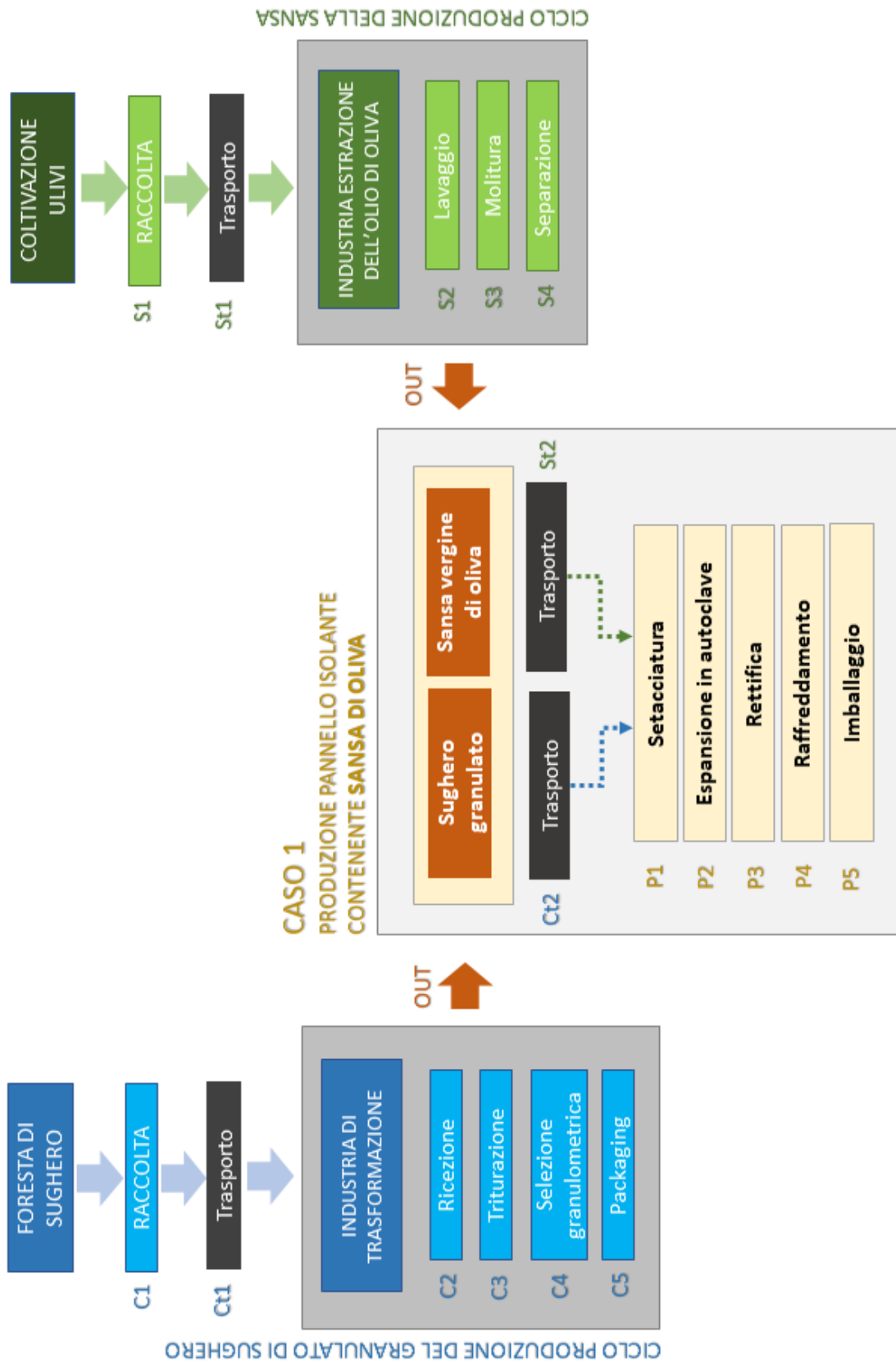


Figura 61 - Diagramma semplificato della produzione dei pannelli isolanti a base di sansa

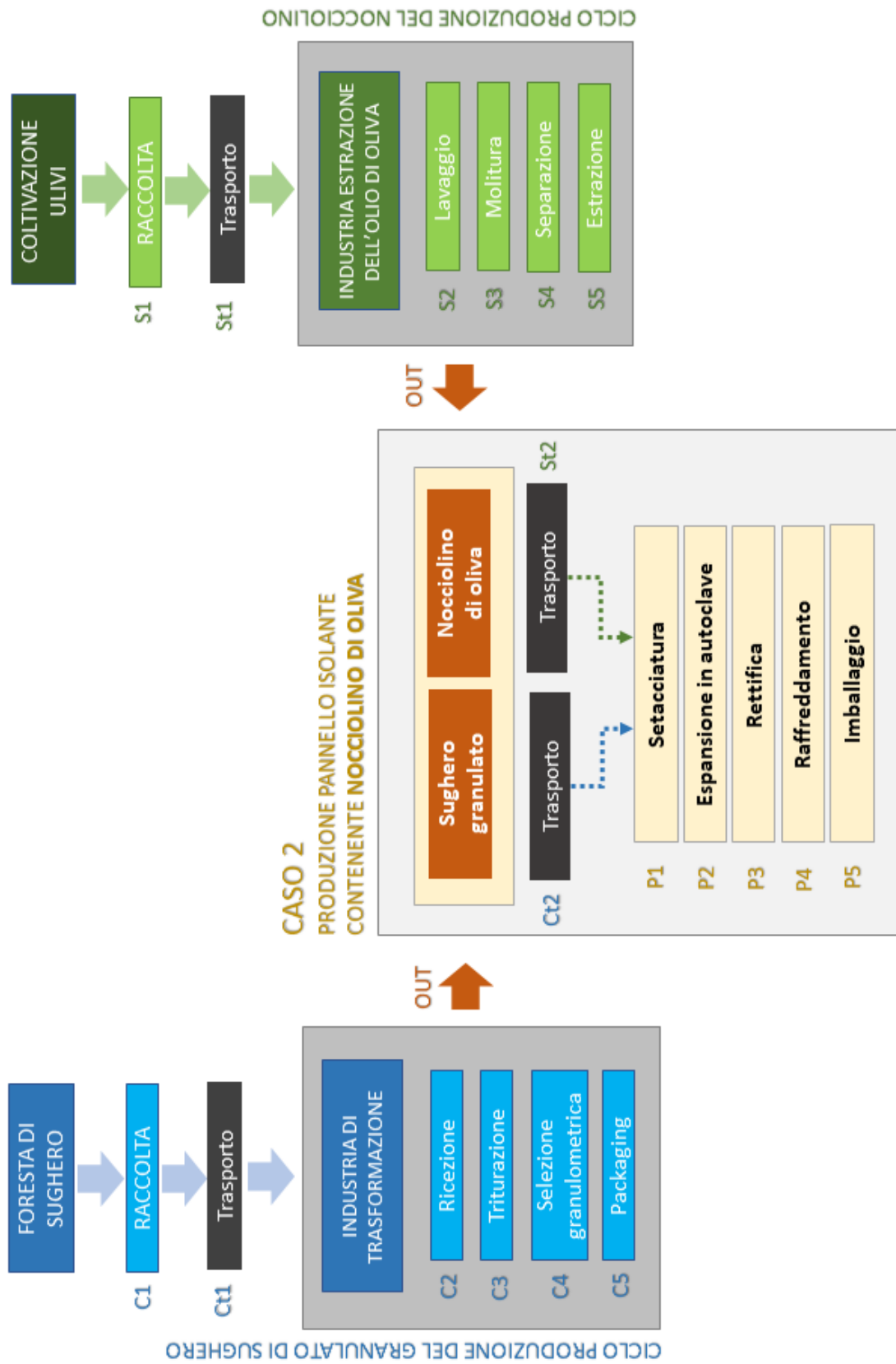


Figura 62-Diagramma semplificato della produzione dei pannelli isolanti OLV

Life Cycle Inventory Analysis, LCI

In questa fase della LCA è stato ricostruito il modello analogico del sistema di produzione realizzato mediante l'utilizzo del software OpenLCA. I dati di input al software necessari alla formulazione dell'inventario sono stati desunti dalle banche dati disponibili dal software e, quando necessario, reperiti dalla letteratura. Il sistema di produzione del pannello isolante esaminato parte dalle attività dei cicli di produzione del sughero e della sansa. La sansa, come detto, deriva dalla lavorazione delle olive per la produzione dell'olio extravergine e la qualità e quantità del sottoprodotto dipende dal processo produttivo utilizzato. Nel presente lavoro è stato valutato l'impatto della sansa per ciascun sistema estrattivo dell'olio di oliva.

La produzione di carburanti per i trasporti (benzina e diesel) e di elettricità è considerata nello studio avvalendosi dei dati presenti nella libreria di OpenLCA.

I dati relativi al trasporto delle materie prime dal luogo di raccolta al sito dello stabilimento di trasformazione e il consumo di carburante all'interno dello stabilimento sono stati stimati considerando che il trasporto delle materie avviene mediante un camion con capacità di 16-32 t alimentato da gasolio.

Il fattore di emissione considerato per la produzione di energia elettrica (276 g CO₂ / kWh) è stato ottenuto dal rapporto n.317/2020 dell'ISPRA.

I dati relative alla CO₂ incorporata nella quercia da sughero e dalle piante di ulivo sono stati ricavati dalla letteratura. Il valore relativo alla quantità di CO₂ incorporata per le querce da sughero è stato ottenuto da Gil e Pereira (2007), pari a -2,36 kgCO₂ per kg di sughero mentre la quantità incorporata nella sansa è pari a -4,9 kgCO₂.

Life Cycle Impact Assessment, LCIA

Nella fase di valutazione degli impatti ambientali della produzione del pannello composito, l'attenzione è stata rivolta all'indicatore dell'impatto sull'effetto serra tramite il valore GWP100, cioè il potenziale di riscaldamento provocato da un prodotto in una prospettiva temporale di 100 anni a causa delle emissioni di GHG che produce.

Per ciascuna fase del processo produttivo e per ciascuna tipologia di pannello è stato fatto un bilancio degli input e degli output ed è stato valutato l'impatto in termini di emissioni.

A livello esemplificativo si riporta di seguito il calcolo dettagliato per i pannelli SAN50 e OLV50 di cui si riportano nel seguito i relativi dati riepilogativi.

Tabella 46 – Consumo di GHG e di energia nelle fasi del ciclo di vita del pannello isolante

CICLO PRODUTTIVO DEL GRANULATO DI SUGHERO	
CO₂ incorporata	-28,32 kgCO ₂ eq
Potatura	
Consumo benzina	0,09 kg
Emissioni	0,30 kgCO ₂ eq
Raccolta	
Consumo gasolio	3,33 kg
Emissioni	10,55 kgCO ₂ eq
Trasporto	
Consumo gasolio	0,35 l
Emissioni	0,92 kgCO ₂ eq
Triturazione	
Consumo elettrico	0,66 kWh
Emissioni	0,19 kgCO ₂ eq
Selezione granulometrica	
Consumo elettrico	0,23 kWh
Emissioni	0,06 kgCO ₂ eq
Packaging	
Consumo diesel	0,01 kg
Consumo elettrico	0,15 kWh
Emissioni	0,06 kgCO ₂ eq
BILANCIO SUGHERO	-16,23 kgCO₂eq

CICLO PRODUTTIVO DELLA SANSÀ E DEL NOCCIOLINO

<u>CO₂ incorporata nella sansa di olivo</u>	-209,00 kgCO ₂ eq
A Op. colturali	3,08 kgCO ₂ eq
Potatura	
Consumo elettrico	0,28 kWh
Emissioni	0,08 kgCO ₂ eq
Potatura per ramaglie	
Consumo diesel	0,11 l
Emissioni	0,29 kgCO ₂ eq
Concimazione	
Consumo diesel	0,17 l
Emissioni	0,44 kgCO ₂ eq
Trinciatura	

Consumo diesel	0,28 l
Emissioni	0,73 kgCO ₂ eq
Difesa fitosanitaria	
Consumo diesel	0,25 l
Emissioni	0,66 kgCO ₂ eq
Concimazione	
Consumo diesel	0,17 l
Emissioni	0,44 kgCO ₂ eq
Difesa fitosanitaria	
Consumo diesel	0,17 l
Emissioni	0,44 kgCO ₂ eq
B Raccolta	
Consumo elettrico	0,50 kWh
Consumo diesel	0,47 l
Emissioni	1,39 kgCO ₂ eq
C Trasporto	
Consumo gasolio	0,00 l
Emissioni	0,01 kgCO ₂ eq
D+E+F Lavaggio Molitura e Separazione	
Processo 1 – Metodo tradizionale	
Consumo elettrico	3,15 kWh
Emissioni	0,88 kgCO ₂ eq
Processo 2 – Metodo centrifugazione bifase	
Consumo elettrico	5,85 kWh
Emissioni	1,64 kgCO ₂ eq
Processo 3 – Metodo centrifugazione trifase	
Consumo elettrico	4,50 kWh
Emissioni	1,26 kgCO ₂ eq
BILANCIO SANSA - Metodo tradizionale	-200,55 kgCO₂eq
BILANCIO SANSA - Metodo centrifugazione bifase	-199,80 kgCO₂eq
BILANCIO SANSA - Metodo centrifugazione trifase	-200,17 kgCO₂eq
G Separazione	
Consumo elettrico	3,13 kWh
Emissioni	0,88 kgCO ₂ eq
BILANCIO NOCCIOLINO - Metodo tradizionale	-199,68 kgCO₂eq
BILANCIO NOCCIOLINO - Metodo centrifugazione bifase	-198,92 kgCO₂eq
BILANCIO NOCCIOLINO - Metodo centrifugazione trifase	-199,30 kgCO₂eq

CICLO PRODUTTIVO DEL PANNELLO ISOLANTE	
Trasporto 1	
Consumo diesel	10,5 l
Emissioni	27,72 kgCO ₂ eq
Trasporto 2	
Consumo diesel	6,30 l
Emissioni	16,63 kgCO ₂ eq
Setacciatura	
Consumo elettrico	19,29 kWh
Emissioni	5,40 kgCO ₂ eq
Trasporto materie in autoclave	
Consumo diesel	0,69 l
Emissioni	0,19 kgCO ₂ eq
Produzione in autoclave	
Consumo elettrico	3,33 kWh
Emissioni	0,93 kgCO ₂ eq
Raffreddamento e rettifica	
Consumo elettrico	0,05 kWh
Emissioni	0,01 kgCO ₂ eq
Imballaggio	
Consumo elettrico	4,79 kWh
Consumo diesel	0,69 l
Emissioni	3,16 kgCO ₂ eq
BILANCIO PRODUZIONE PANNELLO ISOLANTE	48,65 kgCO₂eq

Life Cycle Interpretation

Nel seguito vengono riportate le tabelle riepilogative dei valori ottenuti dalla valutazione dell'impatto ambientale per le emissioni di GHG di ciascuna tipologia di pannello composito.

Tabella 47 – Emissioni di GWP per i pannelli isolanti con sansa di oliva

Tipologia pannello	<i>Metodo 1</i>	<i>Metodo 2</i>	<i>Metodo 3</i>
	<i>Processo tradizionale</i>	<i>Centrifugazione bifase</i>	<i>Centrifugazione trifase</i>
	<i>kgCO₂ eq/m³</i>	<i>kgCO₂ eq/m³</i>	<i>kgCO₂ eq/m³</i>
SAN 50	-168,13	-167,38	-167,75
<i>A.1 Sughero</i>	<i>-16,23</i>	<i>-16,23</i>	<i>-16,23</i>
<i>A.2 Sansa</i>	<i>-200,55</i>	<i>-199,80</i>	<i>-200,17</i>
<i>A.3Produzione</i>	<i>48,65</i>	<i>48,65</i>	<i>48,65</i>

SAN 40	-131,27	-130,67	-130,97
A.1 Sughero	-19,48	-19,48	-19,48
A.2 Sansa	-160,44	-159,84	-160,14
A.3Produzione	48,65	48,65	48,65
SAN 30	-94,40	-93,95	-94,17
A.1 Sughero	-22,72	-22,72	-22,72
A.2 Sansa	-120,33	-119,88	-120,10
A.3Produzione	48,65	48,65	48,65
SAN 20	-57,54	-57,24	-57,39
A.1 Sughero	-25,97	-25,97	-25,97
A.2 Sansa	-80,22	-79,92	-80,07
A.3Produzione	48,65	48,65	48,65

Tabella 48 - Emissioni di GWP per i pannelli isolanti con nocciolino

Tipologia pannello	Metodo 1	Metodo 2	Metodo 3
	Processo tradizionale kgCO ₂ eq/m ³	Centrifugazione bifase kgCO ₂ eq/m ³	Centrifugazione trifase kgCO ₂ eq/m ³
OLV 50	-167,26	-166,50	-166,88
A.1 Sughero	-16,23	-16,23	-16,23
A.2 Nocciolino	-199,68	-198,92	-199,30
A.3Produzione	48,65	48,65	48,65
OLV 40	-130,57	-129,97	-130,27
A.1 Sughero	-19,48	-19,48	-19,48
A.2 Nocciolino	-159,74	-159,14	-159,44
A.3Produzione	48,65	48,65	48,65
OLV 30	-93,88	-93,42	-93,65
A.1 Sughero	-22,72	-22,72	-22,72
A.2 Nocciolino	-119,81	-119,35	-119,58
A.3Produzione	48,65	48,65	48,65
OLV 20	-36,14	-35,84	-35,99
A.1 Sughero	-25,97	-25,97	-25,97
A.2 Nocciolino	-79,87	-79,57	-79,72
A.3Produzione	48,65	48,65	48,65

Il bilancio di ciascun pannello si conclude con un valore negativo di emissioni di GHG; questo risultato è dovuta allo stoccaggio di carbonio biogenico sia del sughero che dell'ulivo che, a parità di unità funzionale, è maggiore della quantità di GHG emessi durante i cicli di produzione. I bilanci tra i diversi tipi di pannelli studiati sono pressoché identici in quanto l'unica operazione che li differenzia è il processo di estrazione del nocciolino dalla sansa umida che, con l'ausilio di macchinari a funzionamento elettrico, incide solo per l'1% sui consumi di produzione.

Le attività che incidono maggiormente sulle emissioni di GHG nel ciclo di vita sono i trasporti delle materie prime al sito di produzione del pannello isolante, circa il 63%, inoltre, la potatura e l'estrazione del sughero incidono il 15% sulle emissioni totali. Questo perché la separazione del sughero dai rami dell'albero è un passaggio ad alta intensità energetica. Tale aspetto implica che l'aumento della percentuale degli scarti delle attività di estrazione dell'olivo contribuisce positivamente all'impatto globale del pannello. L'ulivo, infatti, oltre ad assorbire una maggiore quantità di CO₂, richiede operazioni colturali che incidono solo il 4% sulla produzione di emissioni globali.

Analizzando i dati ottenuti dal calcolo dell'impronta di carbonio con i dati di diversi materiali isolanti si osserva altresì che il contributo al riscaldamento globale o impronta di carbonio dei pannelli indagati risulta essere favorevole (cfr. **Tabella 49**).

Tabella 49 – Confronto impronta di carbonio tra pannelli isolanti

Pannelli isolanti	Impronta di carbonio Kg CO ₂ eq /m ³
Polistirene espanso (EPS)	59,0
Polistirene estruso (XPS)	94,4
Poliuretano (PU)	127,7
Lana di roccia	34,3
Aggregati di argilla espansa	53,7
Pannello SAN50	-168,13
Pannello SAN40	-131,27
Pannello SAN30	-94,40
Pannello SAN20	-57,54
Pannello OLV50	-167,26
Pannello OLV40	-130,57
Pannello OLV30	-93,88
Pannello OLV20	-36,14

Il PU è il materiale isolante con il più alto valore di CF. La produzione della schiuma di poliuretano isolante a spruzzo è molto energivora, con il corrispondente impatto sulle emissioni di GHG e quindi su GWP. L'XPS è il secondo materiale isolante, dopo l'EPS, con il maggior contributo al riscaldamento globale in quanto nel processo produttivo considerato è utilizzata anidride carbonica, aumentando così le emissioni di GHG del materiale.

L'EPS invece oltre ad essere prodotto con derivati dal petrolio per il 95% viene soffiato con pentano che viene immediatamente rilasciato nell'ambiente, pertanto, la produzione di miscele di granuli di polistirene è il principale contributo all'impatto GWP.

Il materiale isolante in argilla espansa ha un contributo medio basso rispetto ai materiali isolanti indagati. Le emissioni considerate sono in larga parte dovute al processo di riscaldamento necessario che richiede l'utilizzo di grandi quantità di energia, la maggior parte non rinnovabile, generando così significative emissioni di anidride carbonica. La lana di roccia presenta i valori più bassi dopo i pannelli contenenti gli scarti delle olive. Le emissioni associate a questo materiale sono dovute al contributo energetico necessario per la fusione del coke.

Escludendo dal calcolo dell'impronta di carbonio la quota di carbonio biogenico assorbita dalle materie prime, i pannelli presentano, a parità di unità funzionale, emissioni massime pari a 75 kg CO₂ eq. In quest'ottica i pannelli indagati avrebbero prestazioni nettamente peggiori assimilabili a quelli dei materiali isolanti di cui già discusso in precedenza.

È stata eseguita un'analisi di sensibilità del trasporto esterno per avere un'idea dell'influenza della distanza tra il sito di produzione del pannello isolante e i frantoi. Nel seguito sono state calcolate per ciascuna tipologia di pannello isolante il contributo relativo delle fasi di trasporto alle emissioni nette di CO₂.

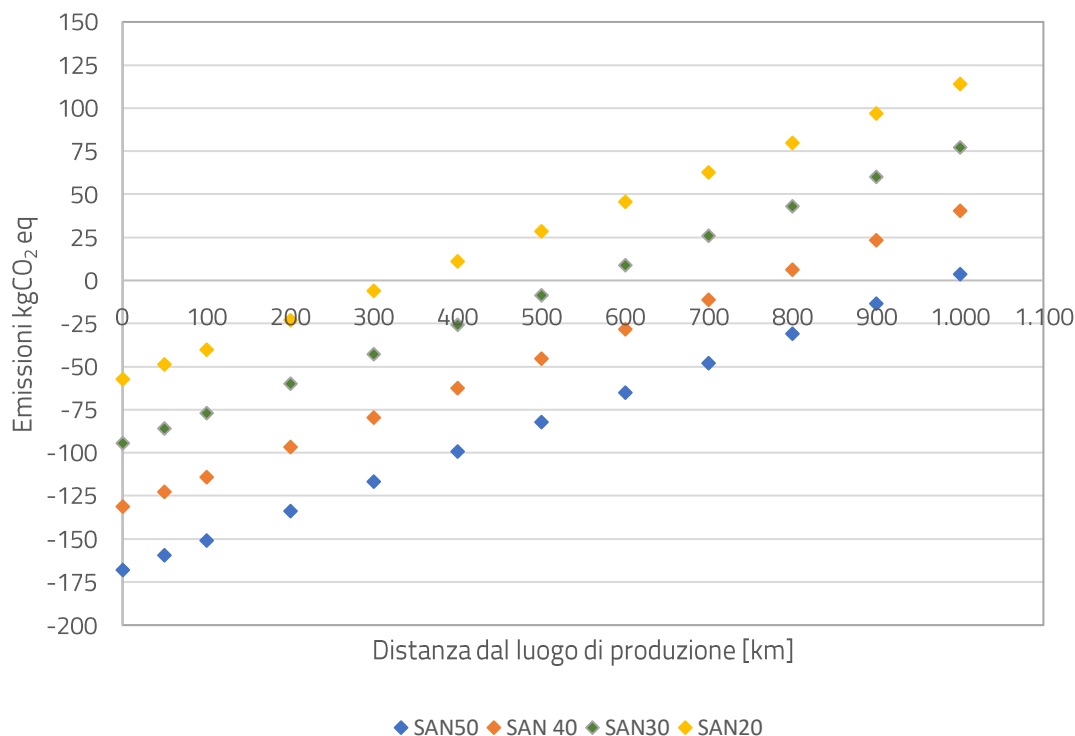


Figura 63 – Incidenza delle emissioni rispetto alla distanza per il trasporto della sansa

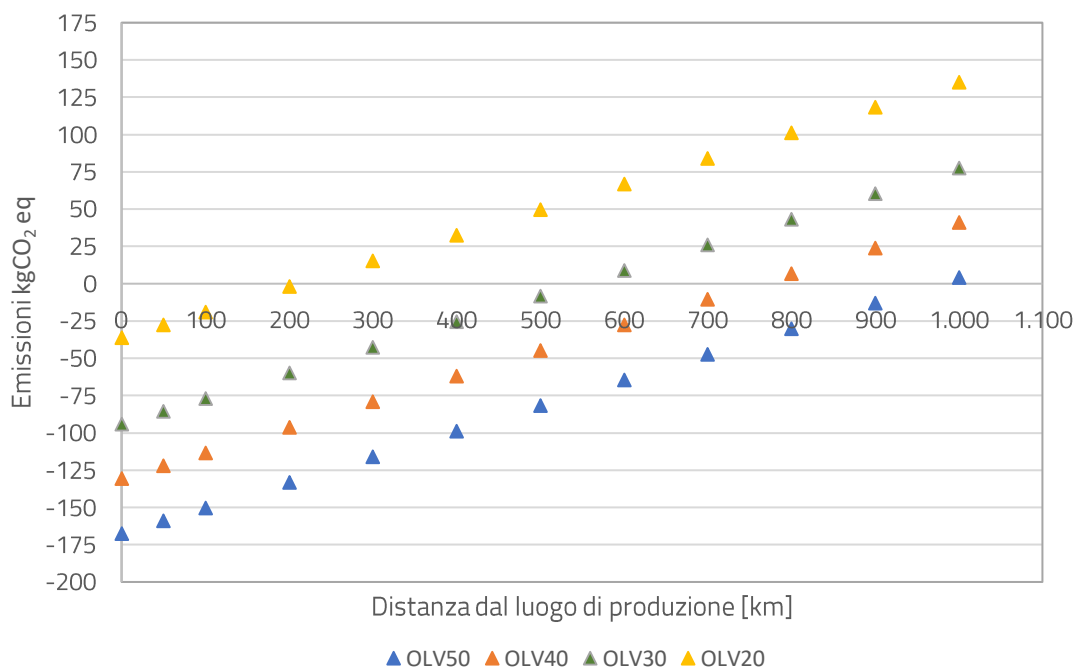


Figura 64 - Incidenza delle emissioni rispetto alla distanza per il trasporto del nocciolino

I risultati mostrati nelle Figure 63 e 64 evidenziano che le quantità di emissioni aumentano con la distanza di approvvigionamento della materia prima seconda e che per distanze comprese tra 300 e 900 km l'impatto dei pannelli isolanti può considerarsi favorevole.

Tale aspetto dimostra che le prestazioni ambientali dei pannelli isolanti sono strettamente correlate alla localizzazione del sito di produzione. Pertanto, essendo il trasporto delle materie prime un fattore chiave, l'unità di produzione del pannello isolante dovrebbe essere il più vicino possibile ai frantoi per avere un impatto migliorativo.

6. CONCLUSIONI

6.1. I PRINCIPALI RISULTATI DELLA RICERCA

Secondo i rapporti dell'IPCC il riscaldamento della superficie terrestre è una delle principali conseguenze del cambiamento climatico in atto. La misurazione storica delle temperature e delle concentrazioni di diossido di carbonio nell'atmosfera hanno mostrato che tra loro esiste una mutua connessione. La grande accelerazione economica avvenuta in seguito agli anni '50 ha segnato l'inizio di un continuo aumento delle concentrazioni di diossido di carbonio in gran parte dovuto all'impiego dei combustibili fossili. Gli scenari climatici illustrati nel V rapporto dell'IPCC annunciano che è molto probabile un aumento di +2 °C della temperatura superficiale terrestre rispetto ai livelli preindustriali se non si interviene con massicce strategie risolutive.

L'aumento della temperatura terrestre aggrava il problema delle isole di calore urbano. L'anomalia termica che colpisce le aree urbanizzate comporta delle ripercussioni sul comfort termico abitativo e stradale. Ridurre il calore antropogenico, uno dei fattori che contribuisce al bilancio energetico delle isole di calore, costituisce una strategia mitigativa del fenomeno e al contempo consente di ridurre le emissioni di GHG.

Ridurre tale apporto significa migliorare le prestazioni termiche passive degli edifici esistenti e delle nuove costruzioni, infatti, secondo il rapporto IEA, l'intero settore delle costruzioni residenziali è responsabile del 35% del consumo di energia e del 38% della produzione di gas climalteranti.

Il miglioramento dell'efficienza energetica del settore edile, dunque, assume un ruolo centrale nella corsa verso l'ambizioso obiettivo di raggiungere la neutralità delle emissioni di carbonio entro il 2050, così come definito nel Gran Deal europeo.

Il parco immobiliare europeo presenta un'importante carenza sotto il profilo energetico, stimabile attorno al 75%, che si traduce in un non trascurabile spreco di risorse primarie.

Intervenire aumentando l'efficienza degli edifici, dunque, consente di perseguire benefici energetici ed ambientali in linea con le recenti politiche europee. I dati indicano che urge un rinnovamento del patrimonio edilizio esistente e di prediligere l'uso di tecnologie e materiali con ridotto impatto ambientale.

La presente ricerca, pertanto, è in coerenza con gli ordinamenti europei e l'indirizzo strategico italiano di valorizzare processi di decarbonizzazione del settore edile avvalendosi di processi di economia circolare virtuosi.

La strategia che permette di intervenire in maniera massiva sugli edifici esistenti e nuovi è quella di utilizzare materiali in grado di ridurre il flusso di calore in entrata/uscita dagli edifici. Negli ultimi anni, a causa delle crescenti attenzioni verso la questione ambientale, è aumentato il numero di contributi scientifici che indagano il riutilizzo di scarti agroalimentari al fine di migliorare le prestazioni isolanti dei componenti edilizi e di ridurre i costi economici ed ambientali dello smaltimento di questi scarti. Lo studio dello stato dell'arte di questi materiali ha mostrato che esiste una relazione tra materiale indagato e nazione di provenienza del contributo scientifico.

L'ulivo è un albero da frutto sempreverde caratteristico dell'area mediterranea e la produzione dell'olio d'oliva è una delle attività rappresentative del *made in Italy*, caratterizzata da una scarsa redditività dovuta all'eccessiva frammentarietà del settore olivicolo. Durante la produzione dell'olio circa l'80% del materiale in ingresso costituisce un sottoprodotto del frantoio, il cui smaltimento è una delle sfide ambientali più importanti per la conversione sostenibile del settore.

Il presente lavoro di ricerca ha indagato sul possibile riutilizzo degli scarti provenienti dalla filiera olivicola al fine di produrre un pannello isolante in grado di ridurre i consumi energetici e ambientali dell'edificio.

Attraverso la determinazione delle prestazioni igrotermiche di provini differenti contenenti quantità diverse dei materiali indagati è stato possibile quantificare le prestazioni energetico-ambientali di un test building eseguendo una analisi dei consumi dinamica con passo orario.

I dati ottenuti dalle prove di laboratorio relativi ai materiali indagati hanno permesso altresì di confrontare le prestazioni di tali materiali con i principali materiali isolanti naturali riscontrati durante lo studio dello stato dell'arte. In particolare, osservando i grafici si evince come le caratteristiche di densità, conducibilità termica e resistenza alla diffusione al vapore sono compatibili a quelli di altri materiali di origine naturale impiegati per l'isolamento termico.

Le simulazioni dinamiche dell'edificio hanno dimostrato che l'inserimento del materiale di studio comporta una diminuzione del fabbisogno energetico invernale compreso tra il 31 e il 59 % dei kWh rispetto al consumo dell'edificio di riferimento. I dati relativi ai consumi energetici estivi, seppur non incisivi come nella stagione invernale, mostrano comunque un miglioramento delle prestazioni tra il 16 e 39 %. In termini di produzione di CO₂ durante la fase di esercizio dell'edificio, l'inserimento dei materiali indagati comporta una riduzione delle emissioni massima di 310 kgCO₂eq.

Sui pannelli oggetto di studio è stata effettuata anche una valutazione LCA semplificata sul processo di produzione di ciascuno, dal reperimento delle materie prime all'imballaggio dei pannelli. Considerando i processi produttivi di ciascuna tipologia di pannelli isolanti indagati è possibile affermare che tali pannelli hanno un impatto ambientale in termini di GWP massimo pari

75 kg CO₂ eq. I materiali impiegati per la produzione del pannello, tuttavia, essendo dei materiali di origine biogenica, ovvero aventi una quantità intrinseca di CO₂ la quale viene sottratta all'ambiente rispettivamente dagli ulivi e dalle querce di sughero, influiscono a ridurre le emissioni globali dei pannelli isolanti indagati. Dunque facendo un bilancio tra la CO₂ sequestrata e la CO₂ emessa, risulta che la produzione dei pannelli isolanti ha un impatto positivo sulle emissioni atmosferiche.

Inoltre dai dati forniti dalla letteratura si evince che l'efficienza di sequestro di CO₂ dell'ulivo è maggiore rispetto a quella della quercia da sughero, dunque l'uso di sansa e nocciolino induce un miglioramento dell'impatto ambientale anche nei pannelli con percentuali minori di scarti dell'olio di oliva.

Si può concludere che i pannelli oggetto della ricerca hanno un impatto sulle prestazioni energetiche e di comfort abitativo dell'edificio migliorativo, ma comunque conformi a quelle ottenute dall'impiego di altri materiali isolanti bio-based. Invece, dallo studio dell'LCA si può concludere che hanno un effetto fortemente migliorativo sulla categoria dell'impatto ambientale del GWP, sia per le emissioni dovute al processo produttivo del pannello che sono pari a zero, sia per le emissioni legate al consumo energetico dell'edificio che è significativamente ridotto.

6.2. PROSPETTIVE E SVILUPPI FUTURI DELLA RICERCA

Il presente lavoro di ricerca, come detto, può essere valutato come un piccolo contributo nella vasta ricerca di nuove metodologie e materiali in grado di diminuire le emissioni di diossido di carbonio prodotto dal settore edile.

Le prove igrotermiche effettuate costituiscono soltanto un piccolo tassello conoscitivo nel percorso valido ad affermare il materiale sul mercato degli isolanti termici. Le simulazioni condotte hanno permesso di affermare che il materiale, nelle quantità proposte, può essere applicato come soluzione sostenibile ai tradizionali materiali isolanti oggi presenti sul mercato.

I dati utilizzati per le simulazioni termo-energetiche derivano da prove di laboratorio mirate alla quantificazione dei parametri principali che vengono coinvolti durante tale tipo di simulazione. Attualmente è in fase di progettazione una campagna di indagine in situ per raccogliere dati realistici sui materiali indagati.

Per giungere all'interno del mercato urgono ulteriori prove di approfondimento. Ad esempio, potrebbero essere indagata le proprietà di resistenza meccanica per determinare la capacità dei materiali attenzionati di rispondere agli urti e alle forze di compressione. Un altro aspetto da valutare è l'assorbimento acustico del materiale in quanto la trasmissione del rumore dall'esterno è un indicatore importante per valutare il comfort abitativo. Infine, al fine di valutarne la sicurezza in caso di incendio, è opportuno valutare la resistenza al fuoco dei materiali indagati.

Una panoramica delle prove che potrebbero incrementare il livello di conoscenza dei materiali osservati è mostrata nella **tabella 50**.

Tabella 50 – Possibili prove di laboratorio valide ad aumentare la conoscenza dei materiali indagati

Prova	Metodo
Reazione al fuoco	EN 13501-1 EN 15714
Scorrimento a compressione	EN 1606
Resistenza a trazione	EN 1607
Resistenza a taglio	EN 12090
Prova a compressione	EN 12430
Deformazione sotto azione di compressione	EN 1605
Assorbimento acustico	EN ISO 354

BIBLIOGRAFIA

- [1] Carraro C.; Mazzai A., *Il clima che cambia: Non solo un problema ambientale*. 2015.
- [2] H. E. Landsberg, "Man-Made Climatic Changes," vol. 170, pp. 1265–1274, 1970.
- [3] IPCC, *Summary for Policymakers. Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the*. Geneva, 2018.
- [4] J. Cook *et al.*, "Quantifying the Consensus on Anthropogenic Global Warming in the Scientific Literature," *Environ. Res. Lett.*, vol. 8, pp. 24024–24027, Apr. 2013, doi: 10.1088/1748-9326/8/2/024024.
- [5] J. Cook *et al.*, "Consensus on Consensus: A Synthesis of Consensus Estimates on Human-Caused Global Warming," *Environ. Res. Lett.*, vol. 11, p. 48002, Apr. 2016, doi: 10.1088/1748-9326/11/4/048002.
- [6] R. Granqvist, "Examining the Scientific Consensus on Climate Change," *EOS Trans.*, vol. 90, p. 233, Jul. 2009, doi: 10.1029/2009EO270008.
- [7] W. Steffen, W. Broadgate, L. Deutsch, O. Gaffney, and C. Ludwig, "The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration," *Anthr. Rev.*, vol. 2, no. 1, pp. 81–98, 2015, doi: 10.1177/2053019614564785.
- [8] IPCC, *Summary for Policymakers. Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge, 2013.
- [9] S. Dangendorf *et al.*, "Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s," *Nat. Clim. Chang.*, vol. 9, no. 9, pp. 705–710, 2019, doi: 10.1038/s41558-019-0531-8.
- [10] M. C.-J. Oppenheimer, M., B.C. Glavovic, J. Hinkel, R. van de Wal, A.K. Magnan, A. Abd-Elgawad, R. Cai and and Z. S. R.M. DeConto, T. Ghosh, J. Hay, F. Isla, B. Marzeion, B. Meyssignac, "Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities," 2019.
- [11] C. Gerundo, *L'adattamento delle città ai cambiamenti climatici*. Napoli, 2018.
- [12] M. Pedersen Zari, *Bioinspired architectural design to adapt to climate change*. 2008.
- [13] T. Skytt, S. N. Nielsen, and B.-G. Jonsson, "Global warming potential and absolute global temperature change potential from carbon dioxide and methane fluxes as indicators of regional sustainability – A case study of Jämtland, Sweden," *Ecol. Indic.*, vol. 110, p. 105831, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105831>.
- [14] B. O'Neill, "The Jury is Still Out on Global Warming Potentials," *Clim. Change*, vol. 44, Mar. 2000, doi: 10.1023/A:1005582929198.
- [15] J. S. Fuglestedt, T. K. Berntsen, O. Godal, R. Sausen, K. P. Shine, and T. Skodvin, "Metrics of Climate Change: Assessing Radiative Forcing and Emission Indices," *Clim. Change*, vol. 58, no. 3, pp. 267–331, 2003, doi: 10.1023/A:1023905326842.
- [16] European commission, *COM 640 - Communication from the commission to the european Parliament, the european council, the council, the european Economic and social committee and the*

- committee of the Regions*. 2019.
- [17] GBC, "Economia circolare in edilizia," 2019.
- [18] Material Economics, "Circular Nordics - How the circular economy can reduce greenhouse gas emissions in the Nordic Region," Stockholm, 2019.
- [19] N. Magee, J. Curtis, and G. Wendler, "The urban heat island effect at fairbanks, alaska," *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 64, no. 1–2, pp. 39–47, 1999, doi: doi:10.1007/s007040050109.
- [20] Y.-H. Kim and J.-J. Baik, "Spatial and temporal structure of the urban heat island in Seoul," *J. Appl. Meteorol.*, vol. 44, no. 5, pp. 591–605, 2005, doi: 10.1175/JAM2226.1.
- [21] X. Yang, Y. Chen, L. L. H. Peng, and Q. Wang, "Quantitative methods for identifying meteorological conditions conducive to the development of urban heat islands," *Build. Environ.*, vol. 178, p. 106953, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106953>.
- [22] A. M. Rizwan, L. Y. C. Dennis, and C. Liu, "A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island," *J. Environ. Sci.*, vol. 20, no. 1, pp. 120–128, 2008, doi: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4).
- [23] T. R. Oke, *Boundary layer climates*, 2°. Taylor & Francis, 1987.
- [24] A. Soltani and E. Sharifi, "Daily variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide," *Front. Archit. Res.*, vol. 6, no. 4, pp. 529–538, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.08.001>.
- [25] A. M. Rizwan, L. Y. C. Dennis, and C. Liu, "A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island," *J. Environ. Sci.*, vol. 20, no. 1, pp. 120–128, 2008, doi: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4).
- [26] A. Christen and R. Vogt, "Energy and radiation balance of a Central European City," *Int. J. Climatol.*, vol. 24, pp. 1395–1421, Sep. 2004, doi: 10.1002/joc.1074.
- [27] C. Grimmond and T. Oke, "An Evapotranspiration-Interception Model for Urban Areas," *Water Resour. Res.*, Jul. 1991, doi: 10.1029/91WR00557.
- [28] A. Arnfield, "Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island," *Int. J. Climatol.*, vol. 23, pp. 1–26, Jan. 2003, doi: 10.1002/joc.859.
- [29] C. Gerundo, "Planning Cities' Adaptation to Climate Change. Application to Naples Metropolitan Area," *Sustain. Mediterr. Constr.*, vol. 4, Dec. 2016.
- [30] J. Unger, "Connection between urban heat island and sky view factor approximated by a software tool on a 3D urban database," *Int. J. Environ. Pollut.*, vol. 363, Jan. 2009, doi: 10.1504/IJEP.2009.021817.
- [31] L. Chen *et al.*, "Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: A GIS-based simulation approach," *Int. J. Climatol.*, vol. 32, pp. 121–136, Jan. 2012, doi: 10.1002/joc.2243.
- [32] A. Invidiata and E. Ghisi, "Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil," *Energy Build.*, vol. 130, pp. 20–32, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.067>.
- [33] A. L. Pisello, F. Rosso, V. L. Castaldo, C. Piselli, C. Fabiani, and F. Cotana, "The role of building occupants' education in their resilience to climate-change related events," *Energy Build.*, vol. 154, pp. 217–231, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.024>.

- [34] United Nations Environment Programme, "2020 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION. Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector," Nairobi, 2020.
- [35] A. Mavrigiannaki and E. Ampatzi, "Latent heat storage in building elements: A systematic review on properties and contextual performance factors," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 852–866, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.115>.
- [36] L. F. Cabeza and M. Châfer, "Technological options and strategies towards zero energy buildings contributing to climate change mitigation: A systematic review," *Energy Build.*, vol. 219, p. 110009, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110009>.
- [37] D. Kumar, M. Alam, P. X. W. Zou, J. G. Sanjayan, and R. A. Memon, "Comparative analysis of building insulation material properties and performance," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 131, p. 110038, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>.
- [38] B. Orlik-Kozdoń and T. Steidl, "Experimental and analytical determination of water vapour transmission properties of recyclable insulation material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 192, pp. 798–807, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.093>.
- [39] J. F. Nicol and M. A. Humphreys, "Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings," *Energy Build.*, vol. 34, no. 6, pp. 563–572, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3).
- [40] C. Monticelli, *Life cycle design in architettura. Progetto e Valutazione di Impatto Ambientale dalla Materia all'Edificio*. Maggioli editori, 2013.
- [41] G. L. Baldo, M. Marino, and S. Rossi, *Analisi del ciclo di vita LCA. Materiali, prodotti, processi*. 2005.
- [42] Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, *Piano d'azione per la sostenibilità ambientale dei consumi nel settore della pubblica amministrazione*. Italia, 2008, p. 21.
- [43] M. Lavagna, A. Bessi, A. Meneghelli, and P. Moschini, "La dimensione ambientale del progetto esecutivo. Esperienze e prospettive future - The environmental dimension of detailed design. Experiences and future perspectives.," pp. 138–146, Dec. 2019, doi: 10.13128/techne-7520.
- [44] M. Paleari, M. Lavagna, and A. Campioli, "The assessment of the relevance of building components and life phases for the environmental profile of nearly zero-energy buildings: life cycle assessment of a multifamily building in Italy," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 21, Dec. 2016, doi: 10.1007/s11367-016-1133-6.
- [45] M. Al-Homoud, "Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials," *Build. Environ.*, vol. 40, pp. 353–366, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.05.013.
- [46] D. Streimikiene, V. Skulskis, T. Balezentis, and G. P. Agnusdei, "Uncertain multi-criteria sustainability assessment of green building insulation materials," *Energy Build.*, vol. 219, p. 110021, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110021>.
- [47] A. Korjenic, S. Klarić, A. Hadžić, and S. Korjenic, "Sheep Wool as a Construction Material for Energy Efficiency Improvement," *Energies*, vol. 8, no. 6, pp. 5765–5781, 2015, doi: 10.3390/en8065765.
- [48] A. Korjenic, V. Petránek, J. Zach, and J. Hroudová, "Development and performance evaluation of natural thermal-insulation materials composed of renewable resources," *Energy Build.*, vol. 43, no. 9, pp. 2518–2523, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.012>.
- [49] D. Bozsaky, "Nature-Based Thermal Insulation Materials From Renewable Resources – A State-Of-The-Art Review," *Slovak J. Civ. Eng.*, vol. 27, pp. 52–59, Mar. 2019, doi: 10.2478/sjce-

- 2019-0008.
- [50] O. B. Carcassi, E. De Angelis, G. Iannaccone, L. Malighetti, G. Masera, and F. Pittau, "Bio-Based Materials for the Italian Construction Industry: Buildings as Carbon Sponges," 2020, pp. 237–247.
- [51] A. Levasseur, P. Lesage, M. Margni, L. Deschênes, and R. Samson, "Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 44, no. 8, pp. 3169–3174, Apr. 2010, doi: 10.1021/es9030003.
- [52] G. Guest, R. M. Bright, F. Cherubini, and A. H. Strømman, "Consistent quantification of climate impacts due to biogenic carbon storage across a range of bio-product systems," *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 43, pp. 21–30, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.05.002>.
- [53] B. Jelle, "Traditional, State-of-the-Art and Future Thermal Building Insulation Materials and Solutions-Properties, Requirements and Possibilities," *Energy Build.*, vol. 43, pp. 2549–2563, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.05.015.
- [54] M. Palumbo, "Contribution to the development of new bio-based thermal insulation materials made from vegetal pith and natural binders: hygrothermal performance, fire reaction and mould growth resistance," 2015.
- [55] E. Kucukpinar *et al.*, "Development of transparent and opaque vacuum insulation panels for energy efficient buildings," in *Energy Procedia*, 2015, vol. 78, pp. 412–417, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.685.
- [56] P. Karami, N. Al-Ayish, and K. Gudmundsson, "A comparative study of the environmental impact of Swedish residential buildings with vacuum insulation panels," *Energy Build.*, vol. 109, pp. 183–194, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.10.031.
- [57] F. Isaia, S. Fantucci, A. Capozzoli, and M. Perino, "Vacuum insulation panels: Thermal bridging effects and energy performance in real building applications," in *Energy Procedia*, 2015, vol. 83, pp. 269–278, doi: 10.1016/j.egypro.2015.12.181.
- [58] F. E. Boafu, Z. Chen, C. Li, B. Li, and T. Xu, "Structure of vacuum insulation panel in building system," *Energy Build.*, vol. 85, pp. 644–653, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.06.055.
- [59] L. Aditya *et al.*, "A review on insulation materials for energy conservation in buildings," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, pp. 1352–1365, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.034.
- [60] J. Košny, "Short History of PCM Applications in Building Envelopes BT - PCM-Enhanced Building Components: An Application of Phase Change Materials in Building Envelopes and Internal Structures," J. Košny, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 21–59.
- [61] S. A. Memon, "Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, pp. 870–906, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.12.042.
- [62] S. Álvarez, L. F. Cabeza, A. Ruiz-Pardo, A. Castell, and J. A. Tenorio, "Building integration of PCM for natural cooling of buildings," *Appl. Energy*, vol. 109, pp. 514–522, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.01.080.
- [63] F. Kuznik, D. David, K. Johannes, and J.-J. Roux, "A review on phase change materials integrated in building walls," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 379–391, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.08.019.
- [64] H. H. Saber, W. Maref, M. C. Swinton, and C. St-Onge, "Thermal analysis of above-grade wall assembly with low emissivity materials and furred airspace," *Build. Environ.*, vol. 46, no. 7, pp. 1403–1414, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.01.009>.

- [65] H. H. Saber, W. Maref, and A. E. Hajiah, "Effective R-value of enclosed reflective space for different building applications," *J. Build. Phys.*, vol. 43, no. 5, pp. 398–427, 2020, doi: 10.1177/1744259119880306.
- [66] H. H. Saber, A. E. Hajiah, and W. Maref, "Impact of reflective roofs on the overall energy savings of whole buildings," in *E3S Web of Conferences*, 2020, vol. 172, doi: 10.1051/e3sconf/202017225008.
- [67] A. Magarò, L. Calcagnini, and O. Minella, "Confronto prestazionale tra isolanti termici naturali e riciclati," Jun. 2016.
- [68] F. Barreca, A. Martinez Gabarron, J. A. Flores Yepes, and J. J. Pastor Pérez, "Innovative use of giant reed and cork residues for panels of buildings in Mediterranean area," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 140, pp. 259–266, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.005>.
- [69] H. Herzog, "What future for carbon capture and sequestration?," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 35, pp. 148A-153A, May 2001.
- [70] M. Palumbo, J. Avellaneda, and A. M. Lacasta, "Availability of crop by-products in Spain: New raw materials for natural thermal insulation," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 99, pp. 1–6, 2015, doi: 10.1016/j.resconrec.2015.03.012.
- [71] M. Bortoli and A. Lante, "Strategie di valorizzazione dei sottoprodotti della filiera vegetale: alcuni casi studio," 2015, [Online]. Available: http://tesi.cab.unipd.it/48701/1/Bortoli,_Mara.pdf.
- [72] J. Vėjelienė, A. Gailius, S. Vėjelis, S. Vaitkus, and G. Balčiūnas, "Evaluation of Structure Influence on Thermal Conductivity of Thermal Insulating Materials from Renewable Resources," *Mater. Sci.*, vol. 17, Jul. 2011, doi: 10.5755/j01.ms.17.2.494.
- [73] D. Liu, K. Xia, J. Li, K. Chen, and M. Nazhad, "Manufacturing of a biocomposite with both thermal and acoustic properties," *J. Compos. Mater. - J Compos MATER*, vol. 46, pp. 1011–1020, May 2012, doi: 10.1177/0021998311414069.
- [74] F. Domínguez-Muñoz, B. Anderson, J. M. Cejudo-López, and A. Carrillo-Andrés, "Uncertainty in the thermal conductivity of insulation materials," *Energy Build.*, vol. 42, no. 11, pp. 2159–2168, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.006>.
- [75] J. Vėjelienė, "Processed straw as effective thermal insulation for building envelope constructions," *Eng. Struct. Technol.*, vol. 4, pp. 96–103, Oct. 2012, doi: 10.3846/2029882X.2012.730286.
- [76] G. H. D. Tonoli, S. F. Santos, H. Savastano, S. Delvasto, R. Mejía de Gutiérrez, and M. del M. Lopez de Murphy, "Effects of natural weathering on microstructure and mineral composition of cementitious roofing tiles reinforced with fique fibre," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 33, no. 2, pp. 225–232, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.013>.
- [77] S. Sair, B. Mandili, M. Taqi, and A. El Bouari, "Development of a new eco-friendly composite material based on gypsum reinforced with a mixture of cork fibre and cardboard waste for building thermal insulation," *Compos. Commun.*, vol. 16, pp. 20–24, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.coco.2019.08.010.
- [78] G. Balčiūnas, J. Žvironaitė, S. Vėjelis, A. Jagniatinskis, and S. Gaidučis, "Ecological, thermal and acoustical insulating composite from hemp shives and sapropel binder," *Ind. Crops Prod.*, vol. 91, pp. 286–294, 2016, doi: 10.1016/j.indcrop.2016.06.034.
- [79] A. Shea, M. Lawrence, and P. Walker, "Hygrothermal performance of an experimental hemp-lime building," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 270–275, Nov. 2012, doi:

- 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.123.
- [80] M. Pervaiz and M. M. Sain, "Carbon storage potential in natural fiber composites," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 39, no. 4, pp. 325–340, 2003, doi: 10.1016/S0921-3449(02)00173-8.
- [81] A. Laborel-Préneron, C. Magniont, and J.-E. Aubert, "Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition," *Energy Build.*, vol. 178, pp. 265–278, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.021>.
- [82] A. W. Bruno, D. Gallipoli, C. Perlot, and H. Kallel, "Thermal performance of fired and unfired earth bricks walls," *J. Build. Eng.*, vol. 28, p. 101017, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101017>.
- [83] T. Jami, S. R. Karade, and L. P. Singh, "A review of the properties of hemp concrete for green building applications," *J. Clean. Prod.*, vol. 239, p. 117852, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117852>.
- [84] J. Cigasova, N. Stevulova, and J. Junak, "Influence of binder nature on properties of lightweight composites based on hemp hurds," *Int. J. Mod. Manuf. Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 27–31, 2013.
- [85] S. Benfratello, C. Capitano, G. Peri, G. Rizzo, G. Scaccianoce, and G. Sorrentino, "Thermal and structural properties of a hemp-lime biocomposite," *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 745–754, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096.
- [86] A. Kremensas, A. Kairytė, S. Vaitkus, S. Vėjelis, S. Członka, and A. Strąkowska, "The impact of hot-water-treated fibre hemp shivs on the water resistance and thermal insulating performance of corn starch bonded biocomposite boards," *Ind. Crops Prod.*, vol. 137, pp. 290–299, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.05.031>.
- [87] M. Charai, H. Sghiouri, A. Mezrhab, and M. Karkri, "Thermal insulation potential of non-industrial hemp (*Moroccan cannabis sativa* L.) fibers for green plaster-based building materials," *J. Clean. Prod.*, vol. 292, p. 126064, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126064>.
- [88] F. Asdrubali, F. D'Alessandro, and S. Schiavoni, "A review of unconventional sustainable building insulation materials," *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 4, pp. 1–17, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>.
- [89] V. Chitekwa, G. Sieffert, C. Egan, and D. Oldham, "The acoustical characteristics of reed configurations," *EURONOISE 2006 - 6th Eur. Conf. Noise Control Adv. Solut. Noise Control*, Jan. 2006.
- [90] D. J. Oldham, C. A. Egan, and R. D. Cookson, "Sustainable acoustic absorbers from the biomass," *Appl. Acoust.*, vol. 72, no. 6, pp. 350–363, 2011, doi: 10.1016/j.apacoust.2010.12.009.
- [91] F. Barreca and C. R. Fichera, "Wall panels of *Arundo donax* L. for environmentally sustainable agriculture buildings: Thermal performance evaluation," *J. Food, Agric. Environ.*, vol. 11, no. 2, pp. 1353–1357, 2013, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84880310942&partnerID=40&md5=3a017544b0b0464c6e77ee3894745d26>.
- [92] C. Coccozza, A. Parente, C. Zaccone, C. Mininni, P. Santamaria, and T. Miano, "Comparative management of offshore *Posidonia* residues: Composting vs. energy recovery," *Waste Manag.*, vol. 31, no. 1, pp. 78–84, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.08.016>.
- [93] R. Khiari and M. N. Belgacem, "21 - Potential for using multiscale *Posidonia oceanica* waste: current status and prospects in material science," in *Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering*, M. Jawaid, P. Md Tahir, and N. B. T.-L. F. and B.-B. C. M. Saba, Eds. Woodhead Publishing, 2017, pp. 447–471.
- [94] R. Khiari, Z. Marrakchi, M. N. Belgacem, E. Mauret, and F. Mhenni, "New lignocellulosic fibres-

- reinforced composite materials: A stepforward in the valorisation of the *Posidonia oceanica* balls," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 71, no. 16, pp. 1867–1872, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.08.022>.
- [95] M. Seggiani *et al.*, "New Bio-Composites Based on Polyhydroxyalkanoates and *Posidonia oceanica* Fibres for Applications in a Marine Environment," *Materials*, vol. 10, no. 4. 2017, doi: 10.3390/ma10040326.
- [96] L. Allègue, M. Zidi, and S. Sghaier, "Mechanical properties of *Posidonia oceanica* fibers reinforced cement," *J. Compos. Mater.*, vol. 3, pp. 1–9, 2014.
- [97] O. Hamdaoui, L. Ibos, A. Mazioud, M. Safi, and O. Limam, "Thermophysical characterization of *Posidonia Oceanica* marine fibers intended to be used as an insulation material in Mediterranean buildings," *Constr. Build. Mater.*, vol. 180, pp. 68–76, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.195.
- [98] A. Kuqo and C. Mai, "Mechanical properties of lightweight gypsum composites comprised of seagrass *Posidonia oceanica* and pine (*Pinus sylvestris*) wood fibers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 282, p. 122714, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122714>.
- [99] D. Garcia-Garcia, L. Quiles-Carrillo, N. Montanes, V. Fombuena, and R. Balart, "Manufacturing and Characterization of Composite Fibreboards with *Posidonia oceanica* Wastes with an Environmentally-Friendly Binder from Epoxy Resin," *Materials*, vol. 11, no. 1. 2018, doi: 10.3390/ma11010035.
- [100] L. Gil, "Cork composites: A review," *Materials*, vol. 2, no. 3. pp. 776–789, 2009, doi: 10.3390/ma2030776.
- [101] F. Asdrubali, S. Schiavoni, and K. V Horoshenkov, "A review of sustainable materials for acoustic applications," *Build. Acoust.*, vol. 19, no. 4, pp. 283–312, 2012, doi: 10.1260/1351-010X.19.4.283.
- [102] L. Gil, "Cork powder waste: An overview," *Biomass and Bioenergy*, vol. 13, no. 1, pp. 59–61, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)00033-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)00033-0).
- [103] L. Gil, "New cork-based materials and applications," *Materials (Basel)*, vol. 8, no. 2, pp. 625–637, 2015, doi: 10.3390/ma8020625.
- [104] F. Hernandez-Olivares, M. R. Bollati, M. Del Rio, and B. Parga-Landa, "Development of corkgypsum composites for building applications," 1999.
- [105] F. C. Jorge, C. Pereira, and J. M. F. Ferreira, "Wood-cement composites: a review," *Holz als Roh- und Werkst.*, vol. 62, no. 5, pp. 370–377, 2004, doi: 10.1007/s00107-004-0501-2.
- [106] F. Berger, F. Gauvin, and H. J. H. Brouwers, "The recycling potential of wood waste into wood-wool/cement composite," *Constr. Build. Mater.*, vol. 260, p. 119786, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119786>.
- [107] M. H. Ramage *et al.*, "The wood from the trees: The use of timber in construction," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 68, pp. 333–359, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.09.107.
- [108] K. Kochova, F. Gauvin, K. Schollbach, and H. J. H. Brouwers, "Using alternative waste coir fibres as a reinforcement in cement-fibre composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 231, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117121.
- [109] K. Kochova, V. Caprai, F. Gauvin, K. Schollbach, and H. J. H. Brouwers, "Investigation of local degradation in wood stands and its effect on cement wood composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 231, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117201.

- [110] A. Ashori, T. Tabarsa, and F. Amosi, "Evaluation of using waste timber railway sleepers in wood–cement composite materials," *Constr. Build. Mater.*, vol. 27, no. 1, pp. 126–129, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.016>.
- [111] C. M. Piekarski, A. C. de Francisco, L. M. da Luz, J. L. Kovaleski, and D. A. L. Silva, "Life cycle assessment of medium-density fiberboard (MDF) manufacturing process in Brazil," *Sci. Total Environ.*, vol. 575, pp. 103–111, 2017, doi: [10.1016/j.scitotenv.2016.10.007](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.007).
- [112] G. I. Mantanis, E. T. Athanassiadou, M. C. Barbu, and K. Wijnendaele, "Adhesive systems used in the European particleboard, MDF and OSB industries," *Wood Mater. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 104–116, Mar. 2018, doi: [10.1080/17480272.2017.1396622](https://doi.org/10.1080/17480272.2017.1396622).
- [113] W. Liang, S. Yang, and X. Yang, "Long-Term Formaldehyde Emissions from Medium-Density Fiberboard in a Full-Scale Experimental Room: Emission Characteristics and the Effects of Temperature and Humidity," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 17, pp. 10349–10356, 2015, doi: [10.1021/acs.est.5b02217](https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02217).
- [114] J. Wu *et al.*, "Eco-friendly fiberboard production without binder using poplar wood shavings bio-pretreated by white rot fungi *Coriolus versicolor*," *Constr. Build. Mater.*, vol. 236, p. 117620, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117620>.
- [115] S. Platt, D. Maskell, P. Walker, and A. Laborel-Préneron, "Manufacture and characterisation of prototype straw bale insulation products," *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, p. 120035, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120035>.
- [116] O. Douzane, G. Promis, J.-M. Roucoult, A.-D. Tran Le, and T. Langlet, "Hygrothermal performance of a straw bale building: In situ and laboratory investigations," *J. Build. Eng.*, vol. 8, pp. 91–98, 2016, doi: [10.1016/j.job.2016.10.002](https://doi.org/10.1016/j.job.2016.10.002).
- [117] C. H. (Alex) Koh and D. Kraniotis, "A review of material properties and performance of straw bale as building material," *Constr. Build. Mater.*, vol. 259, p. 120385, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120385>.
- [118] J.-P. Costes *et al.*, "Thermal conductivity of straw bales: Full size measurements considering the direction of the heat flow," *Buildings*, vol. 7, no. 1, 2017, doi: [10.3390/buildings7010011](https://doi.org/10.3390/buildings7010011).
- [119] B. Marques, A. Tadeu, J. Almeida, J. António, and J. de Brito, "Characterisation of sustainable building walls made from rice straw bales," *J. Build. Eng.*, vol. 28, p. 101041, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101041>.
- [120] M. Reif, J. Zach, and J. Hroudová, "Studying the Properties of Particulate Insulating Materials on Natural Basis," *Procedia Eng.*, vol. 151, pp. 368–374, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.390>.
- [121] S. Cascone, G. Evola, A. Gagliano, G. Sciuto, and C. Baroetto Parisi, "Laboratory and In-Situ Measurements for Thermal and Acoustic Performance of Straw Bales," *Sustainability*, vol. 11, no. 20, 2019, doi: [10.3390/su11205592](https://doi.org/10.3390/su11205592).
- [122] X. Zhou, F. Zheng, H. Li, and C. Lu, "An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibers," *Energy Build.*, vol. 42, no. 7, pp. 1070–1074, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.020>.
- [123] P. Purohit, A. K. Tripathi, and T. C. Kandpal, "Energetics of coal substitution by briquettes of agricultural residues," *Energy*, vol. 31, no. 8–9, pp. 1321–1331, 2006, doi: [10.1016/j.energy.2005.06.004](https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.06.004).
- [124] F. Asdrubali, A. L. Pisello, F. D'Alessandro, F. Bianchi, M. Cornicchia, and C. Fabiani, "Innovative cardboard based panels with recycled materials from the packaging industry: Thermal and

- acoustic performance analysis," in *Energy Procedia*, 2015, vol. 78, pp. 321–326, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.652.
- [125] M. Sutcu and S. Akkurt, "The use of recycled paper processing residues in making porous brick with reduced thermal conductivity," *Ceram. Int.*, vol. 35, no. 7, pp. 2625–2631, 2009, doi: 10.1016/j.ceramint.2009.02.027.
- [126] P. Lertsutthiwong, S. Khunthon, K. Siralertmukul, K. Noomun, and S. Chandkrachang, "New insulating particleboards prepared from mixture of solid wastes from tissue paper manufacturing and corn peel," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 11, pp. 4841–4845, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.09.051.
- [127] J. Khedari, B. Suttisonk, N. Pratinthong, and J. Hirunlabh, "New lightweight composite construction materials with low thermal conductivity," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 23, no. 1, pp. 65–70, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00072-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00072-X).
- [128] J. Khedari, S. Charoenvai, and J. Hirunlabh, "New insulating particleboards from durian peel and coconut coir," *Build. Environ.*, vol. 38, no. 3, pp. 435–441, 2003, doi: 10.1016/S0360-1323(02)00030-6.
- [129] J. E. G. Van Dam, M. J. A. Van Den Oever, W. Teunissen, E. R. P. Keijsers, and A. G. Peralta, "Process for production of high density/high performance binderless boards from whole coconut husk. Part 1: Lignin as intrinsic thermosetting binder resin," *Ind. Crops Prod.*, vol. 19, no. 3, pp. 207–216, 2004, doi: 10.1016/j.indcrop.2003.10.003.
- [130] T. Böger, S. Bianchi, C. Salzer, and F. Pichelin, "Binderless boards made of milled coconut husk: an analysis of the technical feasibility and process restraints," *Int. Wood Prod. J.*, vol. 9, pp. 1–6, Nov. 2017, doi: 10.1080/20426445.2017.1400756.
- [131] S. Panyakaew and S. Fotios, "New thermal insulation boards made from coconut husk and bagasse," *Energy Build.*, vol. 43, no. 7, pp. 1732–1739, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.03.015>.
- [132] K. Fabbri, L. Tronchin, and F. Barbieri, "Coconut fibre insulators: The hygrothermal behaviour in the case of green roofs," *Constr. Build. Mater.*, vol. 266, p. 121026, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121026>.
- [133] M. Quintero, L. Castro, C. Ortiz, C. Guzman, and H. Escalante, "Enhancement of starting up anaerobic digestion of lignocellulosic substrate: Figue's bagasse as an example," *Bioresour. Technol.*, vol. 108, pp. 8–13, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2011.12.052.
- [134] C. Gómez Hoyos and A. Vázquez, "Flexural properties loss of unidirectional epoxy/fique composites immersed in water and alkaline medium for construction application," *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 8, pp. 3120–3130, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.027>.
- [135] S. Delvasto, E. F. Toro, F. Perdomo, and R. M. de Gutiérrez, "An appropriate vacuum technology for manufacture of corrugated fique fiber reinforced cementitious sheets," *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, no. 2, pp. 187–192, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.01.010>.
- [136] M. A. Hidalgo-Salazar, J. H. Mina, and P. J. Herrera-Franco, "The effect of interfacial adhesion on the creep behaviour of LDPE–Al–Fique composite materials," *Compos. Part B Eng.*, vol. 55, pp. 345–351, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.032>.
- [137] M. Á. Navacerrada Saturio, C. Díaz, and P. Fernandez-Morales, "Characterization of a Material Based on Short Natural Fique Fibers," *BioResources*, vol. 9, Feb. 2014, doi: 10.15376/biores.9.2.3480-3496.

- [138] P. Evon, V. Vandenbossche, P.-Y. Pontalier, and L. Rigal, "New thermal insulation fiberboards from cake generated during biorefinery of sunflower whole plant in a twin-screw extruder," *Ind. Crops Prod.*, vol. 52, pp. 354–362, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.10.049>.
- [139] H. Binici, M. Eken, M. Dolaz, O. Aksogan, and M. Kara, "An environmentally friendly thermal insulation material from sunflower stalk, textile waste and stubble fibres," *Constr. Build. Mater.*, vol. 51, pp. 24–33, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.038>.
- [140] A. Paiva, S. Pereira, A. Sá, D. Cruz, H. Varum, and J. Pinto, "A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards," *Energy Build.*, vol. 45, pp. 274–279, Feb. 2012, doi: [10.1016/j.enbuild.2011.11.019](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.019).
- [141] V. Vandenbossche, L. Rigal, R. Saiah, and B. Perrin, "New agro-materials with thermal insulation properties," *Proc. 18th Int. Sunflower Conf.*, pp. 949–954, Jan. 2012.
- [142] L. C. da Rosa, C. G. Santor, A. Lovato, C. S. da Rosa, and S. Güths, "Use of rice husk and sunflower stalk as a substitute for glass wool in thermal insulation of solar collector," *J. Clean. Prod.*, vol. 104, pp. 90–97, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.127>.
- [143] Y. Brouard, N. Belayachi, D. Hoxha, N. Ranganathan, and S. Méo, "Mechanical and hygrothermal behavior of clay – Sunflower (*Helianthus annuus*) and rape straw (*Brassica napus*) plaster bio-composites for building insulation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 161, pp. 196–207, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.140>.
- [144] D. W. Yarbrough, K. E. Wikes, P. A. Olivier, R. S. Graves, and A. Vohra, "Apparent thermal conductivity data and related information for rice hulls and crushed pecan shells," *Therm. Cond.*, vol. 27, pp. 222–230, 2005.
- [145] M. R. F. Gonçalves and C. P. Bergmann, "Thermal insulators made with rice husk ashes: Production and correlation between properties and microstructure," *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 12, pp. 2059–2065, 2007, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2006.05.057](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.057).
- [146] K. Wei, C. Lv, M. Chen, X. Zhou, Z. Dai, and D. Shen, "Development and performance evaluation of a new thermal insulation material from rice straw using high frequency hot-pressing," *Energy Build.*, vol. 87, pp. 116–122, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.026>.
- [147] I. Kocaman, C. Sisman, and E. Gezer, "Investigation the using possibilities of some mineral-bound organic composites as thermal insulation material in rural buildings," *Sci. Res. Essays*, vol. 6, Apr. 2011.
- [148] S. Wang, H. Li, S. Zou, and G. Zhang, "Experimental research on a feasible rice husk/geopolymer foam building insulation material," *Energy Build.*, vol. 226, p. 110358, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110358>.
- [149] K. Manohar, D. Ramlakhan, G. Kochhar, and S. Haldar, "Biodegradable fibrous thermal insulation," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 28, Mar. 2006, doi: [10.1590/S1678-58782006000100005](https://doi.org/10.1590/S1678-58782006000100005).
- [150] K. Doost-hoseini, H. R. Taghiyari, and A. Elyasi, "Correlation between sound absorption coefficients with physical and mechanical properties of insulation boards made from sugar cane bagasse," *Compos. Part B Eng.*, vol. 58, pp. 10–15, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.011>.
- [151] M. A. S. Anjos, A. E. Martinelli, and D. M. A. Melo, "Effect of sugarcane biomass waste in cement slurries submitted to high temperature and pressure," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 529, no. 1, pp. 49–54, 2011, doi: [10.1016/j.msea.2011.08.056](https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.08.056).
- [152] J. P. Moretti, S. Nunes, and A. Sales, "Self-compacting concrete incorporating sugarcane

- bagasse ash," *Constr. Build. Mater.*, vol. 172, pp. 635–649, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.277.
- [153] C. Patil, M. Manjunath, S. Hosamane, S. Bandekar, and R. Athani, "Pozzolonic activity and strength activity index of bagasse ash and fly ash blended cement mortar," *Mater. Today Proc.*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.251>.
- [154] A. K. Parashar and A. Gupta, "Investigation of the effect of bagasse ash, hooked steel fibers and glass fibers on the mechanical properties of concrete," *Mater. Today Proc.*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.711>.
- [155] S. Loganayagan, N. Chandra Mohan, and S. Dhivyabharathi, "Sugarcane bagasse ash as alternate supplementary cementitious material in concrete," *Mater. Today Proc.*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.060>.
- [156] S. M. Costa, E. C. L. Cardoso, S. M. da Luz, S. G. Araújo, L. F. C. P. Lima, and A. B. Lugão, "Assessment of compression resistance of natural fibers –reinforced gypsum composites," in *1^o CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*, 2006, pp. 2893–2903.
- [157] M. del M. Barbero-Barrera, A. Salas Ruiz, and R. Galbis-Morales, "Mechanical and Physical Characterisation of Typha domingensis-Based Thermal Insulation Boards for Developing Areas such as Nigeria," *Waste and Biomass Valorization*, Mar. 2021, doi: 10.1007/s12649-021-01410-4.
- [158] Y. Dieye, V. Sambou, M. Faye, A. Thiam, M. Adj, and D. Azilinson, "Thermo-mechanical characterization of a building material based on Typha Australis," *J. Build. Eng.*, vol. 9, pp. 142–146, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.12.007>.
- [159] P. Ponnukrishnan, M. Chithambara Thanu, and S. Richard, "Mechanical characterization of Typha domingensis natural fiber reinforced polyester composites," *Am. Int. J. Res. Sci. Technol. Eng. Mathematics*, vol. 6, pp. 241–244, 2014.
- [160] M. Diatta, S. Gaye, A. Thiam, and D. Azilinson, *Détermination des propriétés thermo-physique et mécanique du typha australis*. 2018.
- [161] M. Diagne, G. H. D. Tonoli, A. P. Joaquim, S. Jr, A. Beye, and W. Soboyejo, "Synthetic and vegetable plant fibres as hybrid reinforcement for cement based matrix," *Inter Am. Conf. Non-Conv. Mater. Technol. Ecol. Sustain. Constr.*, pp. 617–624, Jan. 2005.
- [162] T. Luamkanchanaphan, S. Chotikaprakhan, and S. Jarusombati, "A Study of Physical, Mechanical and Thermal Properties for Thermal Insulation from Narrow-leaved Cattail Fibers," *APCBEE Procedia*, vol. 1, pp. 46–52, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.03.009>.
- [163] B. Agoudjil, A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, and M. Fois, "Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood," *Energy Build.*, vol. 43, no. 2, pp. 491–497, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.014>.
- [164] A. Oushabi, S. Sair, Y. Abboud, O. Tanane, and E. B. Abdeslam, "Natural thermal-insulation materials composed of renewable resources: Characterization of local date palm fibers (LDPF)," vol. 6, pp. 3395–3402, Jan. 2015.
- [165] N. Benmansour, B. Agoudjil, A. Gherabli, A. Kareche, and A. Boudenne, "Thermal and mechanical performance of natural mortar reinforced with date palm fibers for use as insulating materials in building," *Energy Build.*, vol. 81, pp. 98–104, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.032.
- [166] B. Haba, B. Agoudjil, A. Boudenne, and K. Benzarti, "Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material for building based on date palm concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 154, pp. 963–971, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.025>.

- [167] M. Chikhi, B. Agoudjil, A. Boudenne, and A. Gherabli, "Experimental investigation of new biocomposite with low cost for thermal insulation," *Energy Build.*, vol. 66, pp. 267–273, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.07.019.
- [168] S. Kumfu and T. Jintakosol, "Thermal insulation produced from pineapple leaf fiber and natural rubber latex," *Advanced Materials Research*, vol. 506, pp. 453–456, 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.506.453.
- [169] S. Tangjuank, "Thermal insulation and physical properties of particleboards from pineapple leaves," *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 6, no. 19, pp. 4528–4532, 2011, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-80053090933&partnerID=40&md5=f6bb92401b1dc55ca8f6455729eac86d>.
- [170] X. Li, R. Liu, L. Long, B. Liu, and J. Xu, "Tensile behavior and water absorption of innovative composites from natural cork granules and bamboo particles," *Compos. Struct.*, vol. 258, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.113376.
- [171] F. Yang, B. Fei, Z. Wu, L. Peng, and Y. Yu, "Selected Properties of Corrugated Particleboards Made from Bamboo Waste (*Phyllostachys edulis*) Laminated with Medium-Density Fiberboard Panels," *BioResources*, vol. 9, Nov. 2014, doi: 10.15376/biores.9.1.1085-1096.
- [172] D. M. Nguyen, A.-C. Grillet, Q.-B. Bui, T. M. H. Diep, and M. Woloszyn, "Building bio-insulation materials based on bamboo powder and bio-binders," *Constr. Build. Mater.*, vol. 186, pp. 686–698, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.153>.
- [173] J. Pinto, A. Briga Sá, S. Pereira, I. Bentes, and A. Paiva, "Possible Applications of Corncob as a Raw Insulation Material," 2016, pp. 25–43.
- [174] FAO, "Produzione mondiale di mais nel 2019," *FAOSTAT*, 2019. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/>.
- [175] J. Pinto *et al.*, "Corn's cob as a potential ecological thermal insulation material," *Energy Build.*, vol. 43, no. 8, pp. 1985–1990, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.04.004>.
- [176] A. Paiva, S. Pereira, A. Sá, D. Cruz, H. Varum, and J. Pinto, "A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards," *Energy Build.*, vol. 45, pp. 274–279, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.019>.
- [177] B. Abu-Jdayil, A. H. Mourad, W. Hittini, M. Hassan, and S. Hameedi, "Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview," *Constr. Build. Mater.*, vol. 214, pp. 709–735, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.102.
- [178] Y.-F. Shih, J.-X. Cai, C.-S. Kuan, and C.-F. Hsieh, "Plant fibers and wasted fiber/epoxy green composites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 7, pp. 2817–2821, 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.04.044.
- [179] A. M. Nolasco, M. L. A. P. Soffner, and A. C. Nolasco, "Physical-mechanical characterization of banana fibre *Musa cavendishii*-Nanicao variety," *Proc. 2nd Int. Symp. Nat. Polym. Compos.*, pp. 191–193, 1998.
- [180] R. Bhatnagar, G. Gupta, and S. Yadav, "A review on composition and properties of banana fibers," *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 6, no. 5, p. 452, 2015, [Online]. Available: <https://www.ijser.org/researchpaper/A-Review-on-Composition-and-Properties-of-Banana-Fibers.pdf>.
- [181] A. Parkash, "Chemical and Mechanical Treatment of Banana Waste to Develop an Efficient Insulating Material," *Biochem. Anal. Biochem.*, vol. 04, Jan. 2015, doi: 10.4172/2161-1009.1000220.

- [182] K. Muthukumar, R. V. Sabariraj, S. Dinesh Kumar, and T. Sathish, "Investigation of thermal conductivity and thermal resistance analysis on different combination of natural fiber composites of Banana, Pineapple and Jute," *Mater. Today Proc.*, vol. 21, pp. 976–980, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.140>.
- [183] S. Annie Paul, A. Boudenne, L. Ibos, Y. Candau, K. Joseph, and S. Thomas, "Effect of fiber loading and chemical treatments on thermophysical properties of banana fiber/polypropylene commingled composite materials," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, no. 9, pp. 1582–1588, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.06.004>.
- [184] N. El Hajj, B. Mboumba-Mamboundou, R.-M. Dheilly, Z. Aboura, M. Benzeggagh, and M. Queneudec, "Development of thermal insulating and sound absorbing agro-sourced materials from auto linked flax-tows," *Ind. Crops Prod.*, vol. 34, no. 1, pp. 921–928, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.02.012>.
- [185] H.-R. Kymäläinen and A.-M. Sjöberg, "Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations," *Build. Environ.*, vol. 43, no. 7, pp. 1261–1269, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>.
- [186] C. Segovia, A. Sauget, A. Besserer, R. Kueny, and A. Pizzi, "Evaluating mold growth in tannin-resin and flax fiber biocomposites," *Ind. Crops Prod.*, vol. 83, pp. 438–443, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.088>.
- [187] T. Nishino, K. Hirao, M. Kotera, K. Nakamae, and H. Inagaki, "Kenaf reinforced biodegradable composite," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 63, no. 9, pp. 1281–1286, 2003, doi: [10.1016/S0266-3538\(03\)00099-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00099-X).
- [188] J. Xu, R. Sugawara, R. Widyorini, G. Han, and S. Kawai, "Manufacture and properties of low-density binderless particleboard from kenaf core," *J. Wood Sci.*, vol. 50, no. 1, pp. 62–67, 2004, doi: [10.1007/s10086-003-0522-1](https://doi.org/10.1007/s10086-003-0522-1).
- [189] F. Ardente, M. Beccali, M. Cellura, and M. Mistretta, "Building energy performance: A LCA case study of kenaf-fibres insulation board," *Energy Build.*, vol. 40, no. 1, pp. 1–10, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.12.009>.
- [190] J. Zach, A. Korjenic, V. Petránek, J. Hroudová, and T. Bednar, "Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool," *Energy Build.*, vol. 49, pp. 246–253, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.014>.
- [191] Z. M. Ghermezgoli, M. Moezzi, J. Yekrang, S. A. Rafat, P. Soltani, and F. Barez, "Sound absorption and thermal insulation characteristics of fabrics made of pure and crossbred sheep waste wool," *J. Build. Eng.*, vol. 35, p. 102060, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2020.102060>.
- [192] R. Pennacchio *et al.*, "Fitness: Sheep-wool and Hemp Sustainable Insulation Panels," *Energy Procedia*, vol. 111, pp. 287–297, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.030>.
- [193] G. Caudullo, E. Welk, and J. San-Miguel-Ayanz, "Chorological maps for the main European woody species," *Data Br.*, vol. 12, pp. 662–666, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.05.007>.
- [194] P. Buttol *et al.*, *Usa efficiente delle risorse nelle imprese olivicole olearie*. 2018.
- [195] P. Amirante, "Dalle olive all'olio: evoluzione delle tecnologie," no. November, 2017.
- [196] S. Souilem, A. El-Abbassi, H. Kiai, A. Hafidi, S. Sayadi, and C. M. Galanakis, "Olive oil production sector: Environmental effects and sustainability challenges," *Olive Mill Waste Recent Adv. Sustain. Manag.*, no. January, pp. 1–28, 2017, doi: [10.1016/B978-0-12-805314-0.00001-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-805314-0.00001-7).
- [197] A. Khdair and G. Abu-Rumman, "Sustainable Environmental Management and Valorization

- Options for Olive Mill Byproducts in the Middle East and North Africa (MENA) Region," *Processes*, vol. 8, no. 6, 2020, doi: 10.3390/pr8060671.
- [198] Ú. Fillat *et al.*, "Assessing cellulose nanofiber production from olive tree pruning residue," *Carbohydr. Polym.*, vol. 179, pp. 252–261, 2018, doi: 10.1016/j.carbpol.2017.09.072.
- [199] G. Cavalaglio, S. Cotana, and M. Barbanera, "Valorizzazione energetica degli scarti di potatura dei vigneti," 2007. Accessed: Feb. 15, 2021. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/228823029_Valorizzazione_energetica_degli_scarti_di_potatura_dei_vigneti.
- [200] F. Cotana, "LA VALORIZZAZIONE ENERGETICA DELLE POTATURE DI OLIVO," 2021.
- [201] B. Gómez-Muñoz, J. D. Valero-Valenzuela, M. B. Hinojosa, and R. García-Ruiz, "Management of tree pruning residues to improve soil organic carbon in olive groves," *Eur. J. Soil Biol.*, vol. 74, pp. 104–113, 2016, doi: 10.1016/j.ejsobi.2016.03.010.
- [202] M. A. Kougioumtzis, I. P. Kanaveli, E. Karampinis, P. Grammelis, and E. Kakaras, "Combustion of olive tree pruning pellets versus sunflower husk pellets at industrial boiler. Monitoring of emissions and combustion efficiency," *Renew. Energy*, vol. 171, pp. 516–525, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.118>.
- [203] C. Cara, I. Romero, J. M. Oliva, F. Sáez, and E. Castro, "Liquid hot water pretreatment of olive tree pruning residues," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 137–140, no. 1–12, pp. 379–394, 2007, doi: 10.1007/s12010-007-9066-y.
- [204] T. Linhares and M. T. P. de Amorim, "Cotton dyeing with extract from renewable agroindustrial bio-resources: A step towards sustainability," *RILEM Bookseries*, vol. 12, pp. 441–453, 2016, doi: 10.1007/978-94-017-7515-1_35.
- [205] F. López, J. Ariza, M. E. Eugenio, J. Díaz, I. Pérez, and L. Jiménez, "Pulping and bleaching of pulp from olive tree residues," *Process Biochem.*, vol. 37, no. 1, pp. 1–7, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(01\)00152-2](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(01)00152-2).
- [206] M. Cohen *et al.*, "Biomolecules from olive pruning waste in Sierra Mágina – Engaging the energy transition by multi-actor and multidisciplinary analyses," *J. Environ. Manage.*, vol. 216, pp. 204–213, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.067>.
- [207] F. Martellotta, A. Cannavale, V. De Matteis, and U. Ayr, "Sustainable sound absorbers obtained from olive pruning wastes and chitosan binder," *Appl. Acoust.*, vol. 141, pp. 71–78, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.apacoust.2018.06.022.
- [208] S. Liuzzi, C. Rubino, and P. Stefanizzi, "Use of clay and olive pruning waste for building materials with high hygrothermal performances," in *Energy Procedia*, Sep. 2017, vol. 126, pp. 234–241, doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.145.
- [209] F. Barreca and C. R. Fichera, "Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation," *Energy Build.*, vol. 62, pp. 507–513, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.03.040.
- [210] M. del R. Merino, J. G. Rodríguez, F. F. Martínez, and J. S. C. Astorqui, "Viability of using olive stones as lightweight aggregate in construction mortars," *Rev. la Constr.*, vol. 16, no. 3, pp. 431–438, 2017, doi: 10.7764/RDLC.16.3.431.
- [211] H. Al-Masaeid, M. Hamed, and T. Khedaywi, "Empirical evaluation of olive husk in asphalt cement binder and bituminous concrete," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, pp. 124–132, Oct. 1994.
- [212] M. Sutcu, S. Ozturk, E. Yalamac, and O. Gencel, "Effect of olive mill waste addition on the

- properties of porous fired clay bricks using Taguchi method," *J. Environ. Manage.*, vol. 181, pp. 185–192, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.jenvman.2016.06.023.
- [213] M. D. La Rubia-García, Á. Yebra-Rodríguez, D. Eliche-Quesada, F. A. Corpas-Iglesias, and A. López-Galindo, "Assessment of olive mill solid residue (pomace) as an additive in lightweight brick production," *Constr. Build. Mater.*, vol. 36, pp. 495–500, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.009.
- [214] J. A. de la Casa, M. Lorite, J. Jiménez, and E. Castro, "Valorisation of wastewater from two-phase olive oil extraction in fired clay brick production," *J. Hazard. Mater.*, vol. 169, no. 1, pp. 271–278, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.03.095>.
- [215] H. Mekki, M. Anderson, E. Amar, G. R. Skerratt, and M. Benzina, "Olive oil mill waste water as a replacement for fresh water in the manufacture of fired clay bricks," *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 81, no. 8, pp. 1419–1425, 2006, doi: 10.1002/jctb.1579.
- [216] H. Mekki, M. Anderson, M. Benzina, and E. Ammar, "Valorization of olive mill wastewater by its incorporation in building bricks," *J. Hazard. Mater.*, vol. 158, no. 2, pp. 308–315, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.01.104>.
- [217] F. Craveiro, H. Bártolo, J. Duarte, and P. Bártolo, *Fabricating construction elements with varying material composition: a case study*. 2017.
- [218] M. Nardino *et al.*, "Annual and monthly carbon balance in an intensively managed Mediterranean olive orchard," *Photosynthetica*, vol. 51, pp. 63–74, Mar. 2013, doi: 10.1007/s11099-012-0079-6.

ALLEGATO 1 – ELEMENTI OPACHI

Chiusura verticale edificio di riferimento

Descrizione	Spessore <i>m</i>	Densità <i>Kg / m³</i>	Conduttività <i>W / m K</i>	Fattore di resistenza
intonaco esterno	0,015	1800	0,90	10
pannello in XLAM	0,167	500	0,12	50
camera d'aria non ventilata	0,050	1	0,27	1
cartongesso	0,013	700	0,21	4
cartongesso	0,013	700	0,21	40
Trasmittanza totale				0,533W / m² K
Trasmittanza termica periodica				0,167W / m² K

Chiusura verticale OLV50

Descrizione	Spessore <i>m</i>	Densità <i>Kg / m³</i>	Conduttività <i>W / m K</i>	Fattore di resistenza
intonaco esterno	0,015	1800	0,90	10
OLV50	0,080	460	0,054	7,2
pannello in XLAM	0,167	500	0,12	50
camera d'aria non ventilata	0,050	1	0,27	1
cartongesso	0,013	700	0,21	4
cartongesso	0,013	700	0,21	40
Trasmittanza stazionaria				0,288 W / m² K
Trasmittanza termica periodica				0,034 W / m² K

Chiusura verticale OLV40

Descrizione	Spessore <i>m</i>	Densità <i>Kg / m³</i>	Conduttività <i>W / m K</i>	Fattore di resistenza
intonaco esterno	0,015	1800	0,90	10
OLV40	0,080	390	0,051	9,8
pannello in XLAM	0,167	500	0,12	50
camera d'aria non ventilata	0,050	1	0,27	1
cartongesso	0,013	700	0,21	4
cartongesso	0,013	700	0,21	40
Trasmittanza stazionaria				0,266 W / m² K
Trasmittanza termica periodica				0,029 W / m² K

Chiusura verticale OLV30

Descrizione	Spessore <i>m</i>	Densità <i>Kg / m³</i>	Conduttività <i>W / m K</i>	Fattore di resistenza
intonaco esterno	0,015	1800	0,90	10
OLV30	0,080	320	0,048	13,1
pannello in XLAM	0,167	500	0,12	50

camera d'aria non ventilata	0,050	1	0,27	1
cartongesso	0,013	700	0,21	4
cartongesso	0,013	700	0,21	40
Trasmittanza stazionaria				0,256 W / m² K
Trasmittanza termica periodica				0,027 W / m² K

Chiusura verticale OLV20

Descrizione	Spessore <i>m</i>	Densità <i>Kg / m³</i>	Conduttività <i>W / m K</i>	Fattore di resistenza
intonaco esterno	0,015	1800	0,90	10
OLV20	0,080	310	0,045	15,7
pannello in XLAM	0,167	500	0,12	50
camera d'aria non ventilata	0,050	1	0,27	1
cartongesso	0,013	700	0,21	4
cartongesso	0,013	700	0,21	40
Trasmittanza stazionaria				0,239 W / m² K
Trasmittanza termica periodica				0,023 W / m² K

Chiusura verticale SAN50

Descrizione	Spessore <i>m</i>	Densità <i>Kg / m³</i>	Conduttività <i>W / m K</i>	Fattore di resistenza
intonaco esterno	0,015	1800	0,90	10
SAN50	0,080	530	0,054	11,2
pannello in XLAM	0,167	500	0,12	50
camera d'aria non ventilata	0,050	1	0,27	1
cartongesso	0,013	700	0,21	4
cartongesso	0,013	700	0,21	40
Trasmittanza stazionaria				0.295 W / m² K
Trasmittanza termica periodica				0.035 W / m² K

Chiusura verticale SAN40

Descrizione	Spessore <i>m</i>	Densità <i>Kg / m³</i>	Conduttività <i>W / m K</i>	Fattore di resistenza
intonaco esterno	0,015	1800	0,90	10
SAN40	0,080	490	0,051	9,8
pannello in XLAM	0,167	500	0,12	50
camera d'aria non ventilata	0,050	1	0,27	1
cartongesso	0,013	700	0,21	4
cartongesso	0,013	700	0,21	40
Trasmittanza stazionaria				0.272 W / m² K
Trasmittanza termica periodica				0.029 W / m² K

Chiusura verticale SAN30

Descrizione	Spessore <i>m</i>	Densità <i>Kg / m³</i>	Conduttività <i>W / m K</i>	Fattore di resistenza
intonaco esterno	0,015	1800	0,90	10
SAN30	0,080	130	0,048	15,7
pannello in XLAM	0,167	500	0,12	50
camera d'aria non ventilata	0,050	1	0,27	1
cartongesso	0,013	700	0,21	4
cartongesso	0,013	700	0,21	40
Trasmittanza stazionaria				0.263 W / m² K
Trasmittanza termica periodica				0.027 W / m² K

Chiusura verticale SAN20

Descrizione	Spessore <i>m</i>	Densità <i>Kg / m³</i>	Conduttività <i>W / m K</i>	Fattore di resistenza
intonaco esterno	0,015	1800	0,90	10
SAN20	0,080	400	0,045	8,7
pannello in XLAM	0,167	500	0,12	50
camera d'aria non ventilata	0,050	1	0,27	1
cartongesso	0,013	700	0,21	4
cartongesso	0,013	700	0,21	40
Trasmittanza stazionaria				0.256 W / m² K
Trasmittanza termica periodica				0.033 W / m² K

ALLEGATO 2 – ELEMENTI TRASPARENTI

PORTAFINESTRA 140x230

DATI GEOMETRICI

Larghezza	140 cm
Altezza	230 cm
Area del vetro A_g	5,04 m ²
Area del telaio A_f	1,82 m ²
Area totale serramento A_w	3,22 m ²
Perimetro l_g	13,2 m

DATI VETRO E TELAIO

Tipologia vetro	Vetro doppio
Trasmittanza vetro U_g	3,829 W / m ² K
Coefficiente di trasmissione solare, g	0,74
Materiale telaio	Alluminio
Spessore	75 mm
Trasmittanza termica telaio	2,2 W / m ² K
Trasmittanza termica del serramento	5,1 W / m² K

PORTAFINESTRA 70x230

DATI GEOMETRICI

Larghezza	70 cm
Altezza	230 cm
Area del vetro A_g	1,32 m ²
Area del telaio A_f	0,29 m ²
Area totale serramento A_w	1,61 m ²
Perimetro l_g	5,6 m

DATI VETRO E TELAIO

Tipologia vetro	Vetro doppio
Trasmittanza vetro U_g	3,829 W / m ² K
Coefficiente di trasmissione solare, g	0,74
Materiale telaio	Alluminio
Spessore	75 mm
Trasmittanza termica telaio	2,2 W / m ² K
Trasmittanza termica del serramento	3,8 W / m² K

PORTAFINESTRA 90x230

DATI GEOMETRICI

Larghezza	90 cm
Altezza	230 cm
Area del vetro A_g	1,76 m ²
Area del telaio A_f	0,31 m ²
Area totale serramento A_w	2,07 m ²
Perimetro I_g	6,0 m

DATI VETRO E TELAIO

Tipologia vetro	Vetro doppio
Trasmittanza vetro U_g	3,829 W / m ² K
Coefficiente di trasmissione solare, g	0,74
Materiale telaio	Alluminio
Spessore	75 mm
Trasmittanza termica telaio	2,2 W / m ² K
Trasmittanza termica del serramento	3,8 W / m² K

FINESTRA 175x210

DATI GEOMETRICI

Larghezza	175 cm
Altezza	110 cm
Area del vetro A_g	1,60 m ²
Area del telaio A_f	0,33 m ²
Area totale serramento A_w	0,53 m ²
Perimetro I_g	5,6 m

DATI VETRO E TELAIO

Tipologia vetro	Vetro doppio
Trasmittanza vetro U_g	3,829 W / m ² K
Coefficiente di trasmissione solare, g	0,74
Materiale telaio	Alluminio
Spessore	75 mm
Trasmittanza termica telaio	2,2 W / m ² K
Trasmittanza termica del serramento	5,1 W / m² K