

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

Tesi di Laurea Magistrale

Analisi e caratterizzazione come coibente del cippato di legno derivante da cascami di lavorazione

*Definizione sperimentale e fisica del materiale e studio delle
tecniche costruttive per l'applicazione*



Relatore

Prof. Carlo Caldera

Correlatori

Ing. Matteo Guiglia

Ing. Alberto Perron Cabus

Candidato

Giulia Preda

Luglio 2018

A mamma e papà

Indice

Premessa

Abstract

1. 'Best practice', stato dell'arte ed applicazioni del cippato di legno.....	5
1.1 <i>Utilizzi del cippato di legno nel settore agricolo e alimentare</i>	6
1.2 <i>Il cippato di legno impiegato a fini energetico- costruttivi</i>	8
1.3 <i>Il cippato di legno impiegato come coibente naturale negli edifici</i>	13
1.3.1 <i>Studio ed applicazioni sperimentali del cippato di legno come coibente</i>	14
1.3.2 <i>Studio ed applicazioni sperimentali del cippato di corteccia come coibente</i> ...	19
2. Metodo operativo adottato per la caratterizzazione termica del materiale	25
2.1 <i>Descrizione del procedimento di analisi effettuato</i>	27
2.2 <i>Definizione preparatoria dei provini finalizzata alle indagini sul materiale</i>	29
2.2.1 <i>Composizione dei casseri per le prove in laboratorio</i>	29
2.2.2 <i>Parete di prova per il controllo del comportamento del materiale</i>	32
3. Analisi e valutazioni effettuate in azienda per la caratterizzazione preliminare del materiale.....	37
3.1 <i>Gestione e sviluppo della filiera aziendale in esame</i>	38
3.2 <i>Determinazione dell'umidità relativa del materiale analizzato</i>	41
3.3 <i>Determinazione della densità del materiale analizzato</i>	43
3.4 <i>Analisi di una miscela composta con corteccia e cippato di castagno</i>	49
3.5 <i>Considerazioni sulle prove effettuate</i>	51

4. Determinazione della resistenza termica del materiale tramite prove in laboratorio. Metodo della piastra calda con anello di guardia.....	53
4.1. <i>Descrizione dell'apparecchiatura di prova</i>	53
4.2. <i>Organizzazione delle prove</i>	57
4.3. <i>Analisi dei risultati e relative considerazioni</i>	60
5. Analisi dei parametri dinamici e stazionari del materiale inserito in una parete perimetrale prefissata	63
5.1. <i>Indicazioni sul procedimento di analisi effettuato</i>	63
5.2. <i>Analisi dei risultati ottenuti per una struttura verticale esterna con cappotto e controparete isolata</i>	65
5.3. <i>Analisi dei risultati ottenuti per una struttura verticale esterna senza cappotto e senza coibente in controparete</i>	74
5.4. <i>Sintesi ed interpretazione conclusiva sui risultati ottenuti</i>	82

CONCLUSIONI

BIBLIOGRAFIA

SITOGRAFIA ESSENZIALE

RINGRAZIAMENTI

Premessa

Il modello di produzione odierno, prevalentemente a sviluppo lineare, genera un'elevata quantità di prodotti non riutilizzati e ritenuti scarti.

I *surplus* materici derivanti dalle lavorazioni di legnami possono essere indirizzati nella realizzazione di nuovi progetti e prodotti. Si tratta infatti di volumi che nella maggioranza dei casi sono di entità rilevante, a volte superiori persino al prodotto finito principale ed in buone condizioni .

Parallelamente, le prestazioni energetiche di progetto sono in continua crescita (edifici passivi, Nzeb, PassivHaus...) e richiedono una coibentazione termica sempre più elevata. La razionalità di tale indirizzo progettuale si deve fondare non solo sul soddisfacimento di prestazioni di involucro elevate ma sulla sostenibilità economica ed ambientale delle ingenti quantità di coibente introdotta.

Un obiettivo progettuale di "sostenibilità" in grado di rispettare il ciclo vita del materiale porta dunque inevitabilmente all'impiego di coibenti naturali.

Fra questi il panorama costruttivo consolidato denota un ampio utilizzo della fibra di legno inserita all'interno di pacchetti costruttivi performanti.

Queste considerazioni, in accordo con esperienze di ricerca internazionali nell' impiego degli scarti di filiera, ha portato a studiare le potenzialità del cippato di legno come coibente naturale in un ottica di valorizzazione della materia prima e del suo ciclo di vita.

.

Key words : *cippato , corteccia , coibente , filiera , legno, ciclo di vita, re-thinking*

Abstract

La seguente tesi indaga le caratteristiche prestazionali raggiungibili dal cippato di legno nell'ottica del suo inserimento nel panorama edilizio odierno sul mercato dei coibenti naturali impiegabili a tale scopo.

L' iniziativa è nata dalla volontà di una realtà locale piemontese specializzata nella lavorazione primaria del legno (*società cooperativa LA FORESTA*) di ottimizzare i numerosi scarti prodotti dalla propria attività. Questi scarti sono per la maggior parte rappresentati da truciolo di legno, presente in varie pezzature e derivante da più essenze arboree, già in gran parte commercializzato come cippato a fini energetici e chips in ambito agro-alimentare .

Le prime indagini sono state effettuate a largo spettro, approfondendo gli studi già presenti in letteratura su diverse tipologie di cippato e le caratteristiche prestazionali di alcune applicazioni a scala internazionale.

Successivamente sono state selezionate le miscele di materiale mescolato in proporzioni note e valutate in azienda le proprietà di densità e umidità relativa del materiale tramite strumentazioni artigianali e tecniche adatte al prodotto di studio.

Il successivo livello di approfondimento si è incentrato sulla definizione sperimentale del materiale mediante prove in laboratorio effettuate tramite il metodo della piastra calda con anello di guardia al fine di individuare la conducibilità termica del prodotto analizzato.

Una volta elaborate le valutazioni di caratterizzazione termica si sono identificati adeguati pacchetti costruttivi, nell'ottica di valorizzare le proprietà del materiale. L'ausilio di programmi di simulazione numerica ha permesso di effettuare analisi termiche della stratigrafia di involucro in condizioni dinamiche per la determinazione di sfasamento ed attenuazione, trasmittanze periodiche e relative ottimizzazioni in termini economico-funzionali.

L'obiettivo proposto con questa tesi dunque è dimostrare l'efficacia del cippato come materiale coibente nel panorama moderno, dal punto di vista sia prestazionale che produttivo, evidenziandone le caratteristiche sia come singolo materiale che abbinato ad altri all'interno di stratigrafie complete , nell'ottica dell'innovazione tecnologica.

Abstract

The following thesis investigates the performances achievable by wood chips aiming to prove its potentiality as an insulation material and to support its inclusion in the construction market landscape.

The project was born from the aim of a company from the Piedmont region, specialized in primary wood processing, to optimize the waste product produced by its activity. These scraps are mostly represented by wood shavings, coming in various sizes and shapes, deriving from several arboreal essences, already largely marketed as chips for energy purposes and chips for the agri-food sector.

The first surveys were carried out on a broad spectrum, deepening the studies already presented in the literature on different types of wood chips and the performance characteristics of some applications on an international scale.

Afterwards, mixtures of wooden chips, mixed in known proportions, were selected and the properties of density and relative humidity of the mixture were evaluated in the company using specific artisanal and technical instruments suitable to study the product.

The next level of in-depth study focused on the experimental definition of the material through laboratory tests carried out using the “hot plate with guard ring” method in order to identify the thermal conductivity of the analyzed material.

Once the technical characterization assessments have been processed, appropriate construction packages have been identified, trying to enhancing the properties of the material. The aid of numerical simulation programs has allowed to perform thermal analyzes of the envelope stratigraphy under dynamic conditions for the determination of phase displacement and attenuation, periodic transmittances and related optimizations in economic-functional terms.

The objective proposed with this thesis is therefore, to demonstrate the effectiveness of the chips as insulating material, from the point of view of both performance and production, highlighting its characteristics both as a single material and combined with others within complete stratigraphies, looking for a technological innovation.

1. 'Best practice', stato dell'arte ed applicazioni del cippato di legno

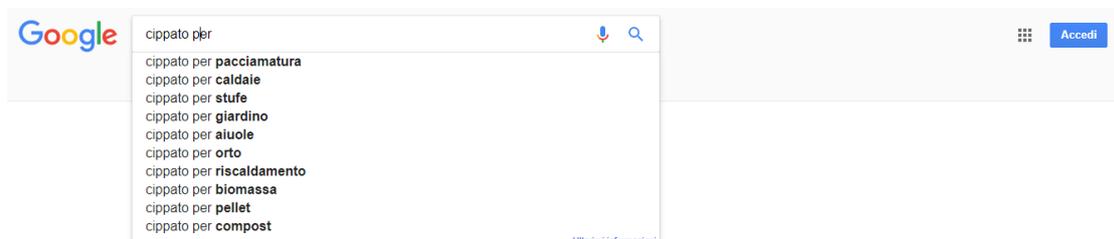


Figura 1: Risultati emersi dal motore di ricerca Google sul cippato di legno (Fonte:Google)

Fin dall'antichità il legno ha rappresentato una risorsa preziosa per lo sviluppo ed il sostentamento delle attività umane.

Caratteristiche intrinseche come l'estesa possibilità d'approvvigionamento, la semplice lavorabilità e una spiccata duttilità applicativa hanno permesso la diffusione di questo materiale specialmente in ambito tecnico .

Oggi il cippato trova ampio utilizzo principalmente nei seguenti macro settori :

- come biomassa legnosa a fini energetici
- in ambito agricolo, come pacciamatura del terreno
- nel settore alimentare dell'affumicatura di alimenti
- nell'ottica del riutilizzo di scarti di lavorazioni primarie (per mobili, oggetti di design, allestimenti, imballaggi, pallet ...) .

L'utilizzo come biomassa è il più sedimentato ma la sua diffusione sempre più estesa ad altri settori dimostra come ci sia un interesse primario sia concettuale che economico ad impiegare il materiale di risulta di altre lavorazioni più nobili per scopi secondari finalizzato alla valorizzazione della filiera .

D'altra parte, come si nota già da una semplice ricerca effettuata tramite il motore di ricerca Google (figura 1) l'impiego come materiale isolante non è per nulla ancora sedimentato .

1.1 Utilizzi del cippato di legno nel settore agricolo e alimentare

Il cippato ad uso agricolo deriva dalla triturazione di rami e/o alberi interi effettuata mediante l'utilizzo di biotrituratori o cippatrici.

Prevalentemente proveniente da latifoglie, in piccole percentuali anche dalle conifere, viene utilizzato fresco di triturazione e sparso sul terreno .

Da diversi anni si studiano tecniche agricole specifiche che prevedono l'utilizzo del cippato come pacciamatura e trattamento del suolo , la più influente delle quali deriva da esperienze di ricerca di scienziati canadesi risalenti ad una trentina di anni fa. ¹



Figura 2 : Cippato utilizzato come pacciamatura per il terreno (fonte: elaborazione personale)

Applicato ai terreni trasforma la struttura del suolo grazie ad un processo di depolimerizzazione della lignina generando la formazione di un humus molto stabile di tipo forestale dal tipico colore bruno. Questo ammorbidisce il terreno , favorendo la sua capacità di assorbimento e smaltimento dell'acqua e migliorando la sua attività biologica attraverso scambi di nutrienti essenziali al corretto ciclo di vita del suolo.

¹ Le ricerche a cui si fa riferimento sono quelle relative al cosiddetto metodo Barbaud, sviluppate in Canada dopo anni di approfondimenti sugli effetti del cippato come ammendante in agricoltura.

Il terreno arricchito dall'apporto del cippato guadagna una resistenza maggiore in relazione alle patologie che possono colpire le culture, attivando un processo cosiddetto di immobilizzazione dell'azoto indispensabile alla crescita delle piante.

Le potenzialità di questa tecnica ne hanno evidenziato l'efficacia su singoli casi di utilizzo a livello produttivo ma in linea generale resta un materiale da sperimentare e da adattare alle diverse situazioni.

La produzione di *wood chips* vede larga distribuzione anche nel settore alimentare per l'affumicatura dei cibi in conseguenza alla lenta combustione in condizioni di scarsità di ossigeno.

In questo caso le essenze sono più ricercate e di tipologie maggiormente pregiate e di qualità come il ciliegio o la vite, ma possono essere anche additivati in un secondo momento a seconda delle specifiche richieste di mercato e all'aromatizzazione che si intende ottenere.

L'utilizzo del cippato nell'affumicatura dei cibi è un mercato in continua crescita soprattutto in America, dove questa tecnica viene utilizzata in larga scala nella cottura delle carni. In questo caso il materiale deve essere sottoposto a trattamenti e controlli più specifici, le granulometrie più richieste si dividono in pezzature grosse o in cosiddetti "petali di chips" a seconda del prodotto e della tipologia di cottura.

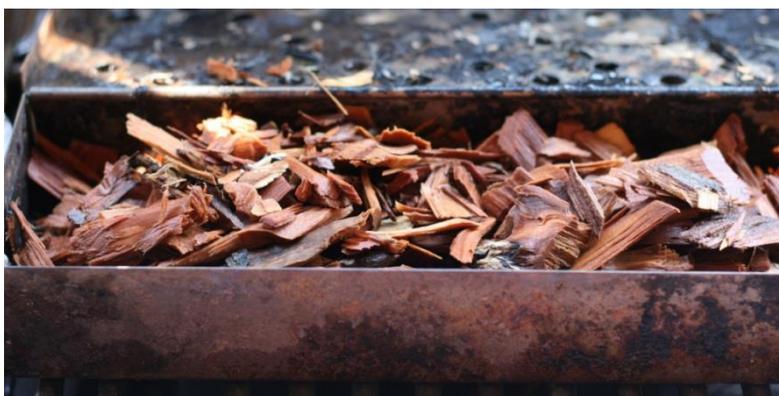


Figura 3: Petali di legno utilizzati nell'affumicatura dei cibi (Fonte: Google Images)

1.2 Il cippato di legno impiegato a fini energetico- costruttivi

Nel settore delle costruzioni il cippato viene trasformato in larga scala dalle industrie di lavorazione in pannelli truciolari. Dopo una setacciatura preliminare atta ad eliminare le pezzature maggiori e le impurità macroscopiche, il materiale tritato meccanicamente ed essiccato per eliminarne l'umidità. Viene poi miscelato omogeneamente, additivato con agenti leganti e resine e compresso a freddo e a caldo.



Figura 4: Pannello OSB a sinistra e posa di una muratura in blocchi di legno-cemento (Fonte: Google Images, Isotex)

Spesso il legno di pezzatura fine, proveniente per la maggior parte da scarti di lavorazione di segherie e sfridi, viene impiegato nella realizzazione di sottofondi per pavimenti in legno o per la produzione di blocchi da costruzione legno-cemento .

Quest'ultimi vengono realizzati con un procedimento di mineralizzazione delle fibre di legno di cippato di essenze scelte (prevalentemente abete), miscelate con cemento Portland e posati a secco con l'inserimento di barre filettate e riempimento in calcestruzzo .

Questi blocchi vengono impiegati maggiormente nell'edilizia antisismica e per la realizzazione di barriere acustiche ferroviarie e stradali .

Il settore che vede maggiormente l'impiego del legname di piccolo taglio e proveniente da cippature è il campo delle biomasse legnose per l'alimentazione di stufe e caldaie .

Tra i biocombustibili legnosi infatti, il cippato di legno è uno dei prodotti meno utilizzati rispetto alle altre pezzature legnose presenti sul mercato.

Dalle statistiche FAO relative al 2014, solo una piccola percentuale di consumi agroenergetici viene corrisposta al cippato, mentre in Italia si fa ancora largo uso di prodotti maggiormente rilavorati come il pellet.

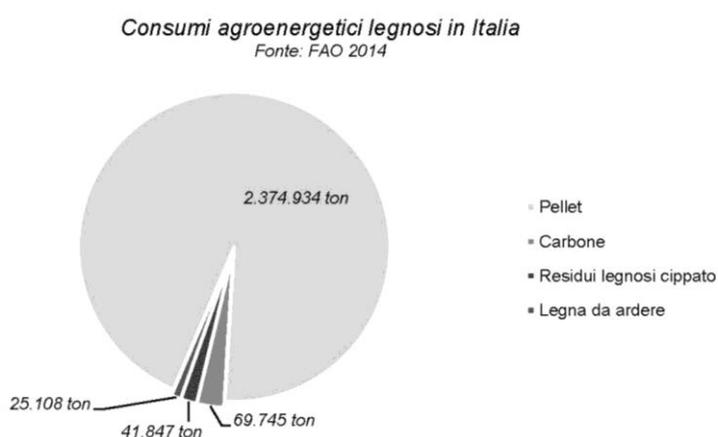


Figura 5: Grafico inerente i consumi di fonti legnose in Italia (Fonte: rielaborazione personale)

Il cippato del resto risulta un prodotto particolarmente connesso alle filiere locali e fortemente legato al territorio , flessibile all'utilizzo in più settori di impiego:

- domestico, in caldaie e stufe alimentate a biomasse ;
- industriale, all'interno di caldaie di grandi dimensioni per il riscaldamento di edifici oppure come combustibile per impianti e centrali a biomassa;
- produttivo, come semilavorato per la produzione di pellet.

A livello normativo sono stati introdotti standard qualitativi che tutelano il consumatore nei riguardi di un prodotto affidabile e accreditato .

In Italia AIEL (*Associazione Italiana Energie Agroforestali*) e ENAMA (*Ente Nazionale Meccanizzazione Agraria*) collaborano insieme per attribuire certificazioni riconoscibili ai produttori e distributori di cippato, legna da ardere e bricchetti².

Di seguito un'illustrazione delle caratteristiche che denotano le classi di qualità del cippato e le varie pezzature, utili per comprendere se il prodotto è adatto alle specifiche destinazioni per il quale è richiesto.

Il cippato viene suddiviso in quattro classi di qualità: A1+, A1, A2 e B, sulla base delle caratteristiche fisiche del materiale e valutato sulla base delle seguenti proprietà:

- *origine e provenienza*, ovvero la tipologia di legname impiegato per produrre il cippato
- *contenuto idrico*, la cui percentuale deve essere computata sul peso tal quale
- *ceneri*, la cui percentuale deve essere calcolata sul peso secco.
- *potere calorifico*, necessariamente >4,5 kWh/kg per la classe A1+

Per le restanti classi non vengono forniti range precisi ma il produttore dovrà specificarlo ugualmente in etichetta.



Figura 6: Principali pezzature di biomassa legnosa presente sul mercato (Fonte: CasaNoiBlog)

² Per ulteriori informazioni sulla modalità di conferimento della certificazione si rimanda al sito <http://www.aielenergia.it>

Caratteristiche qualitative del cippato distinte per classi di qualità					
Norma ISO 17225-4					
Classe di qualità	Unità di misura	A1+	A1	A2	B1
Origine e provenienza ISO 17225-1		Alberi interi senza radici, tronchi, residui delle utilizzazioni forestali, residui di legno non trattato chimicamente			Legno di foresta, di piantagione, e altro legno vergine; residui di legno non trattato chimicamente
Pezzatura (P)		Vedi tabella successiva			
Contenuto idrico (M)	% sul peso tal quale	<10	<25	<35	Deve essere dichiarato il valore massimo
Ceneri (A)	% sul peso secco	<1,0	<1,0	<1,5	<3,0
Potere calorifico netto (Q)	kWh/kg	4,5	Specificare		
Densità apparente (BD)	kg/m ³ tal quale	>150	>150	>150	Specificare
Elementi chimici		Non prevista	Non prevista	Non prevista	Analisi chimica secondo norma ISO 17225-4

Tabella 1 :Quadro riassuntivo delle caratteristiche del cippato distinte per classi di qualità - Norma ISO 17225-4 (Fonte: *biomassapp.it*)

E' prevista un ulteriore classificazione, come precedentemente definito, sulla base della pezzatura di cippato, per la quale si riporta di seguito una tabella con i valori dettagliati. La suddivisione è contraddistinta dalle seguenti componenti:

- frazione *principale*, pari al 60% minimo del peso totale della materia prima;
- frazione *fine*, che deve essere compreso tra 1% e il 10% del peso totale della materia prima;
- frazione *grossolana*, che deve corrispondere a un valore compreso tra 1% e il 10% del peso totale della materia prima.³

³ Valori di riferimento da fonte *biomassapp.it*

Classificazione della pezzatura delle diverse tipologie di cippato					
Classe	Minimo 60% in peso della frazione principale (MM)	% in peso della frazione fine (<3,15 mm)	% in peso della frazione grossolana (mm)	Lunghezza di tutte le particelle (MM)	Sezione massima delle particelle sovra-misura (cm²)
A1+ cippatino	3,15 ≤ P ≤ 16	≤ 1%	≤ 5% > 16	≤ 31,5	-
P16S	3,15 ≤ P ≤ 16	≤ 15%	≤ 6% > 31,5	≤ 45	< 2
P16S (A1+)	3,15 ≤ P ≤ 16	≤ 6%	≤ 3% > 31,5	≤ 45	< 2
P31,5S	3,15 ≤ P ≤ 31,5	≤ 10%	≤ 6% > 45	≤ 150	< 4
P31,5S (A1+)	3,15 ≤ P ≤ 31,5	≤ 5%	≤ 3% > 45	≤ 63	< 4
P45S	3,15 ≤ P ≤ 45	≤ 10%	≤ 10% > 63	≤ 200	< 6
P45S (A1+)	3,15 ≤ P ≤ 45	≤ 5%	≤ 5% > 63	≤ 63	< 6

Tabella 2: Quadro riassuntivo delle classificazioni di pezzature di cippato (Fonte: biomassapp.it)

1.3 Il cippato di legno impiegato come coibente naturale negli edifici

Il quadro sintetico fin qui delineato rende conto dell'impiego di questo materiale sul mercato sia agroalimentare che energetico. A livello europeo si sono avviate importanti sperimentazioni sull'utilizzo dei derivati di lavorazione primaria del legno come coibenti inseriti all'interno di stratigrafie di derivazione naturale.

Il cippato di legno viene classificato come appartenente alla classe dei materiali isolanti organici di origine naturale⁴ vale a dire quei prodotti per i quali la materia prima rimane sostanzialmente invariata .

Materiali isolanti organici di origine naturale	
<i>Lana di legno</i>	<i>Cotone</i>
<i>Fibra di legno</i>	<i>Lino</i>
<i>Pannelli di sughero</i>	<i>Cannucciato</i>
<i>Fibre di cellulosa</i>	<i>Fibre di cocco</i>
<i>Canapa</i>	<i>Cippato di legno</i>
<i>Sughero granulare</i>	<i>Balle di paglia</i>

Tabella 3: Elenco di alcuni tipi di isolanti organici naturali (Fonte : Insulation Material, ed.Detail)



Figura 7: Alcune tipologie di isolanti naturali. Da sinistra a destra: Fiocchi di cellulosa, lana di legno e balle di paglia (Fonte: Architettura sostenibile)

⁴ Definizione estratta da *Insulating Materials*, ed. Detail

1.3.1 Studio ed applicazioni sperimentali del cippato di legno come coibente

Il cippato, se non espressamente prodotto, deriva dalle lavorazioni primarie dei legnami da costruzione, presenti in grandi quantità come prodotto non riutilizzato dai cascami delle lavorazioni precedenti. Per migliorare la resistenza al fuoco e ridurre il rischio di attacco da funghi e muffe il materiale viene trattato in alcuni casi con siero di latte, idrossidi di magnesio o miscelato con il cemento.

Una ricerca⁵ particolarmente significativa in materia è stata condotta in Germania dove nell'inverno del '95/'96 è stato costruito un prototipo a destinazione residenziale utilizzando come coibentazione termica truciolo di legno.

Il materiale, proveniente da piallature, viene trattato con ripetuti bagni di soda e siero di latte ed essiccato fino a raggiungere un contenuto di umidità del 12 % circa. La soda permette un abbassamento dei valori di pH proteggendo naturalmente il materiale dall'attacco di funghi mentre il siero di latte, come accennato precedentemente, funge da ritardante di fiamma.

Caratteristiche del materiale		
Densità	ρ [kg/m ³]	60-90
Contenuto di umidità	[%]	12
Conducibilità termica	λ [W/mK]	0,045 W/mK
Permeabilità al vapore	μ	1 – 2
Classe di resistenza al fuoco	-	B2
pH	-	9

Tabella 4: Proprietà del materiale (Fonte: Porschitz Hans R., Schwarz B., *Wood shavings as insulating material for prefabricated low energy homes*)

Come tutti i materiali sciolti il cippato di legno ha la tendenza ad assestarsi anche dopo la sua posa in opera ma è stato dimostrato⁶ che aumentando la densità della miscela la possibilità di futuri assestamenti diminuisce notevolmente.

⁵ Porschitz Hans R., Schwarz B., *Wood shavings as insulating material for prefabricated low energy homes*. 1995.

⁶ Vogel K., 1999. "Dämmstoffe aus Holz und Holzreststoffen". Tesi alla Technical University di Monaco

Le misurazioni sui prototipi sono state effettuate attraverso diversi sensori e sonde per determinare parametri di umidità e temperatura mentre una sonda climatica permetteva il rilevamento delle condizioni meteorologiche durante le indagini .

Le valutazioni sono durate complessivamente tre anni , periodo nel quale le abitazioni sono state mantenute disabitate focalizzando lo studio sui parametri relativi all'assestamento e all'umidità .

L'analisi dei risultati ha fatto emergere un buon comportamento nei riguardi dell'umidità con picchi massimi di 14 % sulle pareti orientate verso nord e valori di assestamento non maggiori di 15 mm .

Quest'ultimo si è potuto analizzare praticando fori sulle pareti e sezionando interamente altre per potervi effettuare l'analisi gravimetrica .

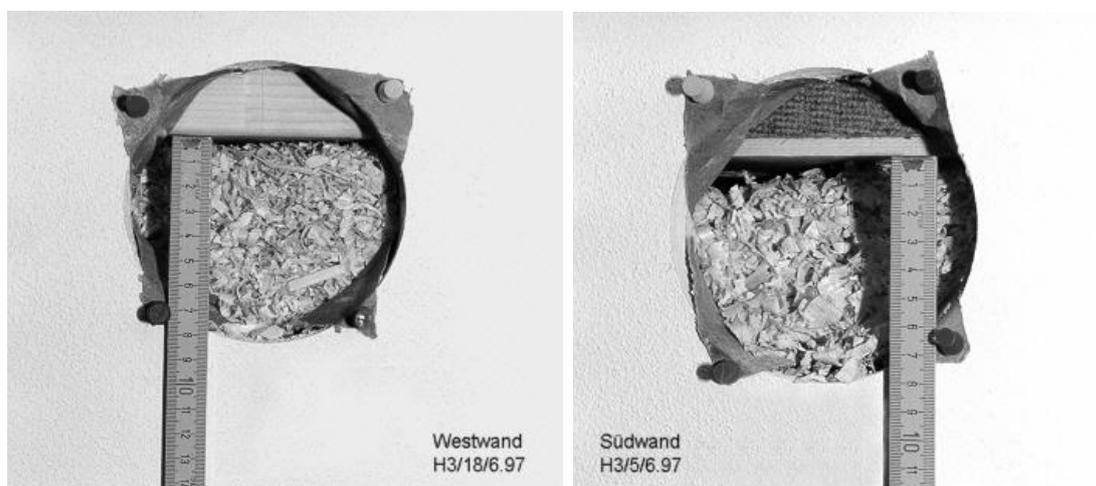


Figura 8: Controllo dell' assestamento del materiale all'interno della parete (Fonte: Porschitz Hans R., Schwarz B., Wood shavings as insulating material for prefabricated low energy homes)

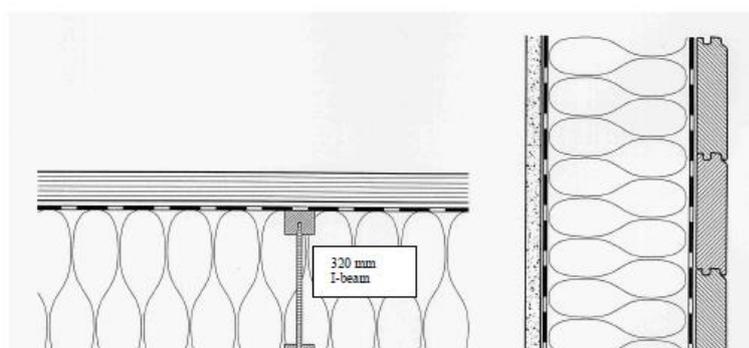


Figura 9: Parete esterna del prototipo abitativo "The Rosenheimer Haus Project" (Fonte: Porschitz Hans R., Schwarz B., Wood shavings as insulating material for prefabricated low energy homes)

No.	building material	thickness [mm]	density [kg/m ³]	thermal conductivity [W/(mK)]
1	gypsum bond fibre board	25	1000	0.36
2	vapour barrier, $s_d = 2.3$ m	-	-	-
3a	wood shavings for thermal insulation	320	80	0.055
3b	I-beam girder	320	-	-
4	moisture barrier, $s_d = 0.02$ m	-	-	-
5	air layer	4	-	-
6	T&G spruce board	50	600	0.13
$U_{average} = 0.15$ W/(m ² K)				

Tabella 5: Parametri di riferimento del progetto "The Rosenheimer Haus Project" (Fonte: Porschitz Hans R., Schwarz B., Wood shavings as insulating material for prefabricated low energy homes)



Figura 10 : I prototipi abitativi oggetto di analisi. (Fonte: Porschitz Hans R., Schwarz B., Wood shavings as insulating material for prefabricated low energy homes)

In alternativa all'isolante sfuso è possibile utilizzare il cippato di legno racchiuso all'interno di un film di plastica previa pressatura a freddo. Lo studio è stato effettuato alla Iwate University di Morioka in Giappone⁷ e si è concentrato sulla produzione di pannelli ad alta densità composti da sfibrature di diversa provenienza (cippato, corteccia ,paglia...).

⁷ Sekino N., Kawamura Y., Binder-less Insulation Panel Made of Wood Shavings for Wooden Frame Houses. 2001

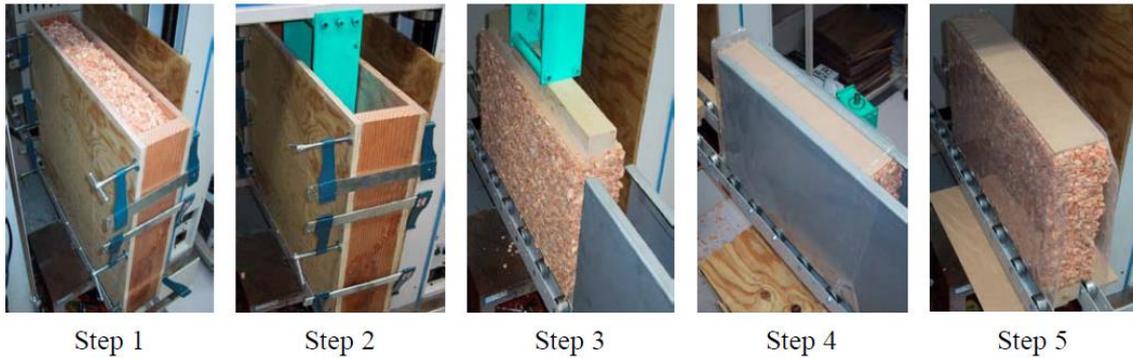
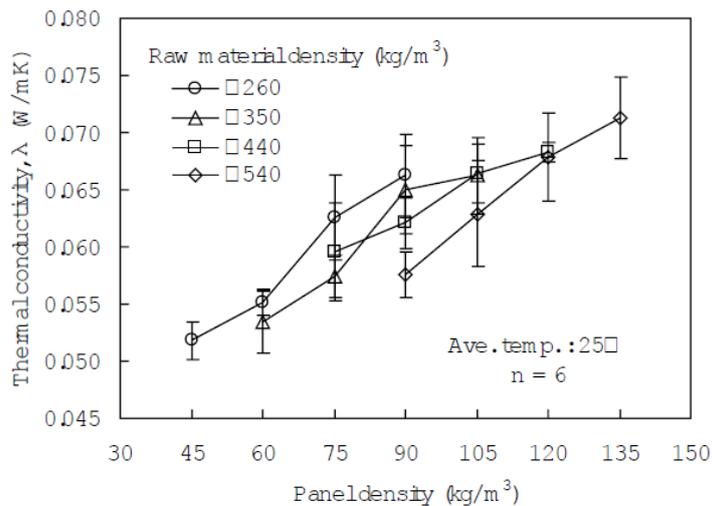


Figura 11 :Processo di produzione dei pannelli pressati . (Fonte: Sekino N.,Kawamura Y., Binder-less Insulation Panel Made of Wood Shavings for Wooden Frame Houses)

Tramite questo tipo di produzione del pannello il materiale non solo acquista un'alta resistenza meccanica ma raggiunge prestazioni termiche rilevanti sia in funzione della densità ottenuta tramite pressatura che sulla base della densità propria dell'essenza considerata .



Species	Falcatà	Japanese cedar	Japanese larch
Raw material density (kg/m ³)	260	350	440
Thickness (Ave ± std, mm, n=50)	0.15 ± 0.05	0.16 ± 0.06	0.15 ± 0.05
Mat bulk density (kg/m ³)	26.9	34.1	41.8

Tabella 6, grafico 1: Valori relativi alle prove effettuate su pannelli precompressi a freddo. La Falcatà appartiene alla famiglia delle Leguminosae , il cedro ed il larice giapponese sono alberi resinosi. Il grafico esprime la relazione tra densità del pannello e conducibilità termica al variare della densità dell'essenza analizzata (Fonte: Sekino N.,Kawamura Y., Binder-less Insulation Panel Made of Wood Shavings for Wooden Frame Houses)

Come si evince dal grafico, al diminuire della densità del pannello si ottengono prestazioni termiche migliori quindi valori di conducibilità termica più basse . La differenza di essenza e la sua densità intrinseca in questo caso non ha influenza in maniera incisiva la conducibilità.

Sensibili variazioni si verificano nel caso della *Falcata* e del cedro giapponese ($\rho = 350 \text{ kg/m}^3$) per i quali i valori di prestazione termica sono tra gli 0,050 ed i 0,055 W/mK.

Per densità maggiori invece , indicativamente intorno ai 135 kg/m^3 , i valori di conducibilità termica aumentano arrivando, come nel caso del larice giapponese, fino a 0,070 W/mK.

Il legno per usi coibentanti è presente sul mercato anche sotto forma di scaglie mineralizzate, utilizzato come materiale riempitivo nel caso di interventi su sottofondi nonché all'interno di intercapedini e pareti vuote.

L'isolamento in questo caso non è solo termico ma anche acustico in quanto il legno pietrificato può raggiungere valori di riduzione del suono fino a 18 dB⁸.

I valori di conducibilità termica in questo caso sono nell'ordine dello 0,070 W/mK a seconda del prodotto in analisi per una densità di $260\text{-}320 \text{ kg/m}^3$.



Figura 12 :Legno pietrificato utilizzato come materiale riempitivo . (Fonte: CEMWOOD)

⁸ Catalogo CEMWOOD su spessore di 40 mm .

1.3.2 Studio ed applicazioni sperimentali del cippato di corteccia come coibente

Il cippato non è il solo derivato del legno utilizzato come isolamento termico all'interno delle strutture .

Diverse applicazioni prediligono infatti l'utilizzo della corteccia, individuando in questo materiale altrettanti vantaggi rispetto a quelli descritti per il cippato .

La corteccia infatti è un prodotto naturale, economico e disponibile in grandi quantità.

Contiene materiali protettivi come il tannino e la suberina⁹ che ritardano l'invecchiamento del materiale e gli conferiscono maggiore protezione contro funghi e parassiti. La conformazione esterna della corteccia inoltre differisce sensibilmente da quella più interna che si può scomporre in fibre capaci di generare piccoli vuoti d'aria e superfici di separazione tra i componenti.

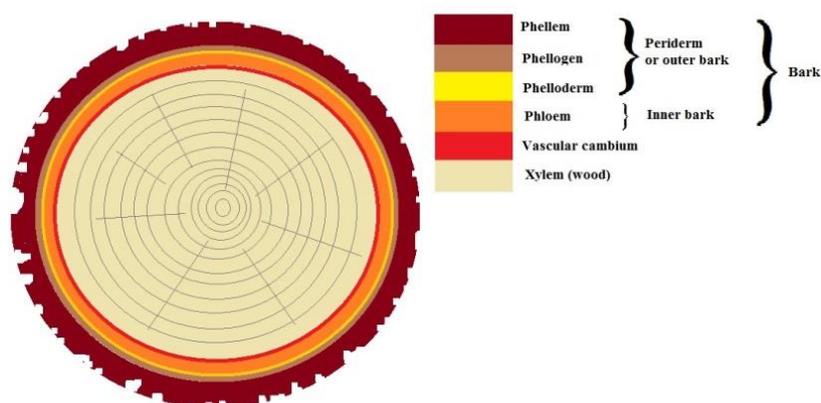


Figura 13: Sezione di un tronco di albero raffigurante le diverse parti costituenti (Fonte: enciclopedia reccani).

La West Hungary University¹⁰ ha condotto un' approfondita ricerca su cinque campioni di cortecce estratti da essenze arboree diverse e valutate separatamente in funzione delle rispettive proprietà fisiche.

⁹ Sostanza idrofoba depositata sotto forma di lamelle intorno alle cavità lasciate vuote dalle cellule morte del sughero. Conferiscono impermeabilità, elasticità e resistenza all'azione degli enzimi secreti dai parassiti.

¹⁰ Pasztory Z., Ronyecz I., *The thermal Insulation Capacity of Tree Bark*. University of West Hungary.2002

Le specie analizzate si suddividono in latifoglie (*Robinia pseudoacacia* e *Populus euramericana* cv. *Pannonia*) e conifere (*Larix decidua*, *Picea abies*, *Pinus silvestris*).

La corteccia delle conifere in fase di cippatura si divide in componenti di dimensioni maggiori rispetto alle latifoglie poiché la componente resinosa gli attribuisce una maggiore resistenza. La robinia e il pioppo invece possiedono un'alta percentuale di corteccia interna che permette l'intrecciamento delle fibre intrappolando una buona quantità di aria al suo interno. Nelle conifere questo fenomeno si riscontra più difficilmente a causa della minore superficie di contatto tra le componenti.

La corteccia più interna delle conifere inoltre è composta da celle cosiddette a setaccio mentre nelle latifoglie queste risultano più affusolate creando una struttura più porosa e conseguentemente a densità minore.

Secondo questo studio le proprietà finora enunciate influiscono sulla conducibilità termica del prodotto finale in relazione al contenuto di umidità che la conformazione intrinseca del materiale è in grado di stabilire.



Figura 14: Cippato di corteccia in fase di analisi (Fonte: Pasztory Z., Ronyecz I., The thermal Insulation Capacity of Tree Bark. University of West Hungary.)

L'alta conducibilità termica dell'acqua sfavorisce quella del materiale ma allo stesso tempo il vapore acqueo è capace di trasferire una grande quantità di calore grazie al proprio calore specifico e latente.

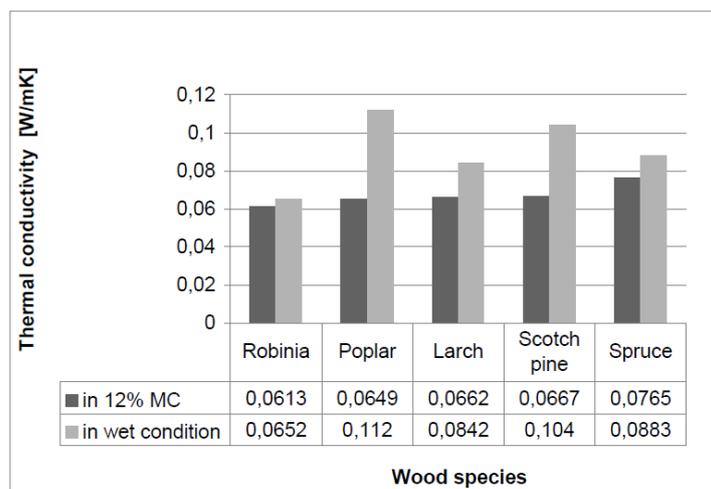


Figura 15: Conducibilità termica dei diversi tipi di corteccia in relazione all'umidità relativa (Fonte: Pasztory Z., Ronyecz I., *The thermal Insulation Capacity of Tree Bark*. University of West Hungary.)

La conducibilità termica in relazione al 12% di UR non restituisce incisive differenze tra le specie arboree fatta eccezione per l'abete rosso.

La robinia e il pioppo differiscono di solo il 5,5% posizionandosi nell'intorno dello 0,064 W/mK seguono il larice e il pino scozzese con circa 0,066 W/mK. Questo distacco tra l'abete e le restanti essenze arboree potrebbe essere riconducibile alla particolare composizione interna della corteccia il che indicherebbe questa essenza come meno indicata all'utilizzo come coibente.

Wood species	Heat conductivity at 12% MC (W/mK)	Heat conductivity under wet condition (W/mK)	MC difference (%)	MC difference (%)	Difference of heat conductivity ¹ (%)	Change of heat conductivity in percentage relation in 1% of MC change ² ((W/mK)/MC%)
Robinia	0.0613	0.0652	14.3	2.3	6.36	2.77
Poplar	0.0649	0.1120	40.2	28.2	72.57	2.57
Larch	0.0662	0.0842	24.2	12.2	27.19	2.23
Scots p	0.0667	0.1040	35.9	23.9	55.92	2.34
Spruce	0.0765	0.0883	22.8	10.8	15.42	1.43

¹ Difference of heat conductivity = (Heat conductivity under wet condition – Heat conductivity at 12%MC) / Heat conductivity at 12%MC *100%

² Change of heat conductivity in percentage relation in 1% of MC change = Difference of heat conductivity / MC difference

Figura 16: Relazione tra conduttività termica e UR. (Fonte: Pasztory Z., Ronyecz I., *The thermal Insulation Capacity of Tree Bark*. University of West Hungary.)

Dalle analisi si evince l'esistenza di una relazione tra umidità relativa e conducibilità termica variabile a seconda del contenuto di acqua presente nel materiale. Nel caso della robinia la differenza tra la condizione di umidità al 100% e quella al 12% è poco differente (solo 6,36%, come indica la tabella sovrastante) mentre appare più incisiva nel caso del pioppo in cui si passa da un valore di conducibilità di 0,0649 W/mK al 12% ad un valore di ben 0,1120 W/mK in condizioni di totale umidità (100%) .

I risultati deducibili da questa sperimentazione sono particolarmente interessanti in quanto, paragonate alle conifere, la corteccia delle latifoglie sembra possedere caratteristiche termiche migliori a causa del maggior contenuto di corteccia interna nel proprio tronco il che influisce positivamente sulla conducibilità del prodotto.

Questa risulta essere migliore al diminuire dell'aria costretta all'interno del materiale e di conseguenza al diminuire della superficie di contatto tra le componenti della miscela. Questa caratteristica va a favore delle specie con una percentuale maggiore di fibre più lunghe, come nel caso delle latifoglie. Anche la percentuale di umidità influisce consistentemente nella trasmissione del calore motivo per il quale l'abete rosso risulta , come precedentemente sottolineato, poco adatto a questo utilizzo.

Nonostante questo uno studio effettuato in Austria nel 2013¹¹ afferma l'utilizzo del cippato di corteccia proveniente dalla stessa tipologia arborea (*Picea abies*, comunemente chiamata Abete rosso), con prestazioni termiche soddisfacenti per il suo impiego come coibente naturale. Il materiale in questo caso viene essiccato fino all'ottenimento di un'umidità relativa pari al 5,8% e setacciato per raggiungere la granulometria media desiderata.



Figura 17: Provino di materiale (Fonte: Kain et al., Bark as Heat Insulation Material. University of Applied Sciences Salzburg. 2013.)

¹¹ Kain et al., *Bark as Heat Insulation Material. University of Applied Sciences Salzburg. 2013.*

Per valutare le proprietà termiche del materiale è stata costruita una muratura di prova delle dimensioni di 1300x1250x330 mm in tavolato di legno dello spessore di 50 mm, rinforzato da pannelli di OSB di 15 mm.

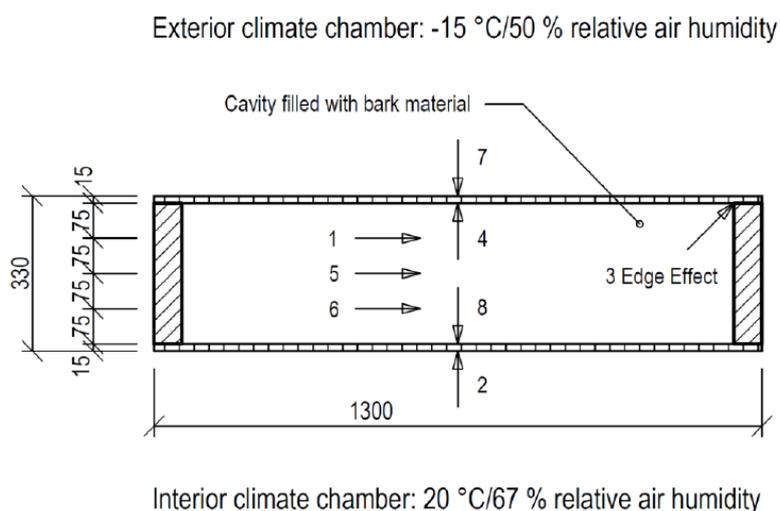


Figura 18: Muratura di prova. I numeri indicano i sensori di temperatura (Fonte: Kain et al., Bark as Heat Insulation Material. University of Applied Sciences Salzburg. 2013.)

Con l'ausilio di un'ulteriore modellazione di tipo matematico sono stati ricavati, per due prove diverse, i seguenti risultati :

Modello 1	Modello 2
$\lambda=0,062 \text{ W/mK}$	$\lambda=0,056 \text{ W/mK}$
$\rho=212 \text{ kg/m}^3$	$\rho=255 \text{ kg/m}^3$
$c_p=1475 \text{ J/kgK}$	$c_p=2139 \text{ J/kgK}$

Tabella 7: Prove su miscele di abete rosso (Fonte: Kain et al., Bark as Heat Insulation Material. University of Applied Sciences Salzburg. 2013; elaborazione personale.)

I risultati ottenuti si collocano in linea con quelli riscontrati delle sperimentazioni analizzate e rappresentano un soddisfacente punto di partenza per intraprendere le valutazioni di caratterizzazione sul materiale.

2. Metodo operativo adottato per la caratterizzazione termica del materiale

Gli studi e le applicazioni di letteratura hanno individuato una variabilità di caratteristiche che dipendono da una molteplicità di fattori. I più rilevanti risultano essere la conducibilità termica λ , fortemente variabile in funzione della densità della miscela. Questa proprietà incide sul costipamento e sulla stabilità del materiale nel tempo, a loro volta fortemente influenzati dalla granulometria del prodotto. Inoltre ci sono una serie di attenzioni di natura costruttiva che impongono di controllare l'umidità relativa di messa in opera e di stazionamento per preservare la durabilità del materiale. Tutto ciò ha comportato il limitare del campo della sperimentazione ad applicazioni coerenti con questi concetti e che tengano conto almeno preliminarmente, in modo tale da eseguire una verifica sperimentale più mirata.

I casi studio esposti sin ora sulle esperienze relative agli isolanti naturali hanno permesso di elaborare un metodo di analisi per la definizione dei parametri termogrametrici del materiale in oggetto.

Nei paragrafi successivi verrà descritto il procedimento adottato per la caratterizzazione del cippato di legno il quale, nello specifico, ha seguito i seguenti passaggi :

- Definizione delle caratteristiche tipologiche da analizzare
- Ricerca degli aspetti normativi inerenti il materiale in esame
- Composizione dei provini da analizzare in laboratorio
- Valutazione del comportamento in regime dinamico del materiale all'interno di una parete predefinita



Figura 19: Alcuni passaggi effettuati durante l'analisi del materiale. Dall'alto verso destra : stoccaggio della materia prima, caratterizzazione del materiale, preparazione per le prove e analisi in piastra calda (Fonte: elaborazione personale)

Le analisi del comportamento in regime estivo sono state svolte con l'ausilio del programma di valutazione *ProCasaClima* distribuito dall'agenzia KlimaHaus con verifiche incrociate sui parametri dinamici con Mc4.

Il software *ProCasaClima* soddisfa i requisiti delle Direttive europee 2010/31/EU e 2012/27/EU e dispone di diverse funzionalità tecniche utili per valutare i progetti dal punto di vista energetico, ambientale ed economico.

Mc4 è un software specifico per il calcolo delle prestazioni energetiche e per la redazione delle certificazioni degli edifici. E' inoltre certificato dal CTI per l'applicazione delle specifiche tecniche UNITS 11300, implementando fra le altre cose alcuni decreti regionali .

2.1 Descrizione del procedimento di analisi effettuato

La ricerca effettuata in letteratura ha rappresentato un punto di partenza indispensabile per la fase decisionale del percorso di definizione del materiale. I risultati ottenuti sono stati riassunti in forma tabellare e riportati di seguito per poter inquadrare un range di valori di riferimento in cui inserire le misure dei campioni da analizzare successivamente.

<i>Riferimento</i>	λ [W/mK]	ρ [kg/mq]	<i>Materiale</i>	<i>Umidità relativa[%]</i>
<i>Pasztorý – Ronyecz Hungary</i>	0,076	/	corteccia di larice granulometria media	12
<i>Porschitz et al. Germany</i>	0,055	80	piallatura da cascami di lavorazione	12
<i>Sekino, Kawamura Japany</i>	0,052	45-50	cippato di acacia e cedro	/
	0,069	120	cippato di cedro e larice	/
	0,070	135	cippato di larice	/
<i>Kain et al. Austria</i>	0,062	212	corteccia di abete	5,80
	0,056	255	corteccia di abete	5,80

Tabella 8 : Valori emersi dalle ricerche in letteratura (Fonte: elaborazione personale)

Come si evince dalla tabella 8, i valori di conducibilità termica attesa si individuano nell'intorno del 0,060 W/mK per una granulometria indicativa medio-fine di materiale. I risultati ottenuti sono maggiori all'aumentare della pezzatura del materiale, in quanto una densità maggiore è generalmente associata ad un incremento di conducibilità termica.

L'essenza del legname nei casi riportati incide relativamente, nonostante dalle sperimentazioni si sia riscontrata un'influenza significativamente vantaggiosa nell'utilizzo delle cippature di latifoglie, in contrasto con quelle provenienti dalle conifere resinose. Dalle ricerche analizzate non è possibile individuare in modo chiaro l'influenza di λ sull'umidità relativa se non da una sperimentazione in cui questa relazione sembra diventare più o meno significativa al variare della specie legnosa. L'umidità relativa resta comunque una caratteristica di essenziale importanza nella valutazione della durabilità del materiale. Le valutazioni sull'essenza del materiale vogliono, nel presente lavoro, tenere conto dell'effettiva presenza sul territorio, e hanno perciò incluso nelle valutazioni successive piantumazioni presenti nelle realtà locali .

Assortimenti aggregati per categoria forestale									
									Unità di misura: m ³
	MASSA ENERGETICO		ALTRI USI						MASSA PRELEVABILE
	Assortimenti da triturazione	%	Legna da ardere	%	Paleria	%	Tondame da lavoro	%	
Formazioni igrofile	400.642	75	96.154	18	10.684	2	26.710	5	534.190
Castagneti	13.069.880	55	4.752.684	20	3.564.513	15	2.376.342	10	23.763.418
Faggete	1.438.308	25	3.739.602	65	0	0	575.323	10	5.753.234
Boschi di neoformazione	436.662	31	767.988	54	71.110	5	142.220	10	1.422.200
Querceti e ostrieti	1.192.724	25	2.862.537	60	0	0	715.634	15	4.770.895
Robinieti	1.674.853	25	3.684.676	55	1.004.912	15	334.971	5	6.699.411
Lariceti	300.797	25	120.319	10	0	0	782.071	65	1.203.186
Abetine e peccete	465.999	41	217.222	19	0	0	457.310	40	1.143.275
Arbusteti	4.036	75	538	10	269	5	538	10	5.381
Pinete	985.188	55	90.273	5	0	0	722.186	40	1.805.466
TOTALE	19.969.089	42	16.331.993	34	4.651.488	9	6.133.305	13	47.100.656

Figura 20: Categorie forestali presenti sul territorio piemontese (Fonte: sito della regione Piemonte)

Identificati i valori di riferimento è stato poi effettuato uno studio approfondito per individuare la metodologia di analisi ottimale alla valutazione delle caratteristiche del materiale .

Sono state valutate le normative vigenti in materia di coibenti sciolti, sia in relazione alle caratteristiche prestazionali che sulla base delle possibili prove per analizzarne le proprietà intrinseche . Le ricerche effettuate si sono concentrate nello specifico sui principi e i procedimenti di prova per la determinazione della resistenza termica tramite i diversi metodi disponibili , nella fattispecie :

- metodo della piastra calda con anello di guardia
- metodo del termoflussimetro
- metodo della doppia camera guardiata o calibrata
- metodo radiale
- metodo della camera calda con termoflussimetro

Tra questi si è scelto di indagare le prestazioni termiche del materiale attraverso il metodo della piastra calda con anello di guardia , risultato il più adatto per il prodotto in esame .

2.2 Definizione preparatoria dei provini finalizzata alle indagini sul materiale

Una volta individuata l'apparecchiatura di prova è stato necessario sviluppare un metodo in grado di poter studiare le proprietà del materiale in maniera del tutto ripercorribile sia in fase preliminare in azienda che successivamente in laboratorio. Per definire in modo realistico ed operativo la miscela ed il costipamento del materiale è stata messa a punto una parete di prova a scala reale per valutare l'assestamento del materiale al suo interno¹². Inoltre per eseguire la prova in laboratorio è stato prodotto un cassero in OSB che consentisse di riprodurre le condizioni reali del materiale in un provino inseribile nella piastra calda.

2.2.1 Composizione dei casseri per le prove in laboratorio

Per la preparazione del cassero sono stati utilizzati quattro pannelli di compensato fenolico da 22 cm per la cornice, di altezza pari a 120 mm e larghezza 600 mm.

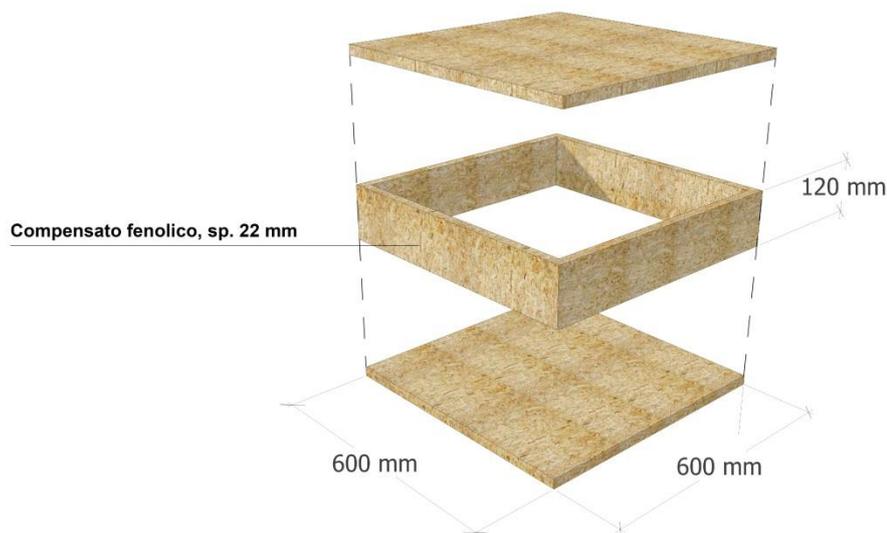


Figura 21: Cassero di legno per il confinamento del cippato durante la prova in piastra calda
(Fonte: Elaborazione personale)

¹² In allegato alcuni schizzi esemplificativi per l'assemblaggio della parete di prova e del cassero di legno.

Due tappi dello stesso materiale sono stati poi messi in aderenza alla cornice per il confinamento del materiale, attraverso supporti metallici rimovibili. Nell'ottica della corretta progettazione di questi componenti è stato necessario assicurare la totale aderenza del complesso, per evitare l'insorgere di complicazioni durante lo svolgimento della prova in laboratorio.



Figura 22: Cassero di prova (Fonte: elaborazione personale)

Nelle valutazioni preliminari, il cassero era stato progettato per ospitare quattro diverse miscele, da comporre direttamente in laboratorio previa pesatura e valutazione in azienda, composte da:

- *mix design* di due diverse pezzature (più piccola e media dimensione) provenienti da essenze arboree miscelate.
- *mix design* di pezzature diverse da quelle sopra descritte.
- *mix design* provenienti da un'essenza arborea specifica (conifera resinosa)
- *mix design* provenienti da un'essenza arborea specifica (latifoglie, prevalentemente castagno)

Queste composizioni sono state scelte per comprendere il comportamento del materiale al variare di più fattori, quali la granulometria della miscela e l'essenza analizzata, in rapporto a caratteristiche non di secondaria importanza come la loro reperibilità sul territorio e/o la percentuale di riutilizzo da cascami di lavorazione precedenti.

L'idea guida di questi procedimenti risiede infatti nel modificare la classica composizione del telaio in legno lamellare con fibra di legno usando come riempimento un *mix design* di cippato di pezzatura e tipologia di legni diversi, cercando di andare incontro all'ottimizzazione di cascami di lavorazione di legnami usualmente non riutilizzati.



Figura 23: Prodotti di lavorazione proveniente da una cippatrice artigianale in azienda (Fonte: elaborazione personale)

Il principio è concentrarsi sul concetto di filiera corta, inteso come tipologia di processo in grado di esser replicato localmente, dal contenuto costo iniziale e dalla limitata energia grigia prodotta. Per questo motivo è risultato necessario annotare tutte le caratteristiche deducibili dal materiale in questa prima fase conoscitiva, ovvero peso prima e dopo l'essiccazione, densità, umidità relativa, granulometria del materiale e tracciabilità di provenienza del materiale oggetto di prova .

Per permettere un'analisi più completa è stata assemblata una muratura di prova a scala reale, rappresentante un tipico cassone di una parete strutturale in telaio di legno. Le misure considerate sono 1170x360 mm in riferimento alla bucatura occupata dal coibente. La necessità di realizzare un prototipo di parete è stato ritenuto indispensabile per esaminare il comportamento del materiale in opera e avvalorare la validità reale del sistema.

Prima di inserire il materiale in parete è stato necessario pesare separatamente le pezzature e tipologie di legname per non perdere la tracciabilità delle analisi effettuate.

2.2.2 Parete di prova per il controllo del comportamento del materiale

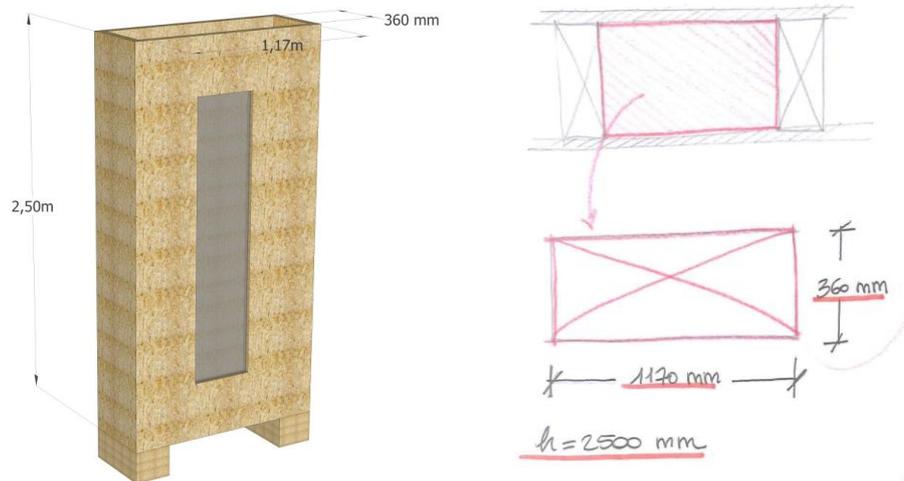


Figura 24: Parete di prova in fase di progettazione. A destra le dimensioni di un cassero standard di una parete in legno lamellare (Fonte: elaborazione personale)

Conoscendo il volume interno del cassone (circa 1 m^3) e pesando la parete al lordo del cippato al suo interno, ci si riconduce rapidamente alla densità del materiale. Le caratteristiche che sono ritenute necessarie per la corretta valutazione delle proprietà del cippato in fase di progettazione sono state le seguenti:

- Necessità di poter effettuare la pesatura del complesso
- Necessità di svuotare agevolmente ed in rapidità il cassone (motivo per il quale si è deciso di sopraelevarlo su una struttura scorporata dal resto dell'impalcato).
- Poter accedere in sicurezza al punto di inserimento del materiale (posto necessariamente in cima alla parete di prova, accessibile mediante scaletta e/o ancorato a parete per permettere la mobilità in sicurezza) .
- Facilitare il controllo dell' assestamento del materiale nella muratura attraverso una feritoia in plexiglass posta lateralmente alla struttura.
- Poter permettere al materiale di assestarsi come desiderato all'interno della muratura (decidere un metodo più funzionale possibile a riguardo).

Gran parte di questi passaggi verranno successivamente approfonditi nel capitolo relativo lo svolgimento delle prove preliminari in azienda ed implementati con documentazione fotografica dei passaggi effettuati.



Figura 25: Parete di prova dopo l'immissione del materiale (Fonte: elaborazione personale)

Premessi questi concetti chiave, il passaggio successivo insiste sulla caratterizzazione del materiale e il suo approfondimento tramite approfondimenti di tipo edilizio-costruttivo illustrati nei successivi paragrafi.

La prova in laboratorio, nella fattispecie, si è sviluppata nel seguente ordine:

- una prima prova a vuoto sul cassone (che valuta l'intercapedine d'aria creatasi al suo interno)
- una seconda prova con i due tappi del cassone a contatto (per misurare la sola resistenza termica del materiale)
- le seguenti n - prove sui provini compresi di materiale.

In questa fase si è ritenuto di notevole importanza ai fini della correttezza della prova effettuare ogni misurazione con l'ausilio dello stesso cassone per cui si è reso necessario effettuare il riempimento dello stesso all'inizio di ogni misurazione.

Le indagini sono state effettuate sui provini precedentemente descritti nelle condizioni di flusso termico ascendente e, per ogni provino, sono stati effettuati due diversi settaggi in 24 ore a temperature di set-point di 0°-20° e 15°-35° per permettere una valutazione maggiormente precisa .



Figura 26: Piastra calda con anello di guardia preparata per le prove (Fonte: elaborazione personale)

Per una maggiore completezza di indagine e per valutare il comportamento del materiale in regime dinamico si è deciso di affrontare, nota la resistenza termica del materiale, un approfondimento sui parametri dinamici della miscela posta all'interno di una stratigrafia tipo, al variare della conducibilità e dello spessore dell'isolante.

La valutazione è stata effettuata in via analitica tramite l'utilizzo dei software Procasaclima e Mc4 , con i quali sono state effettuate le analisi illustrate di seguito .

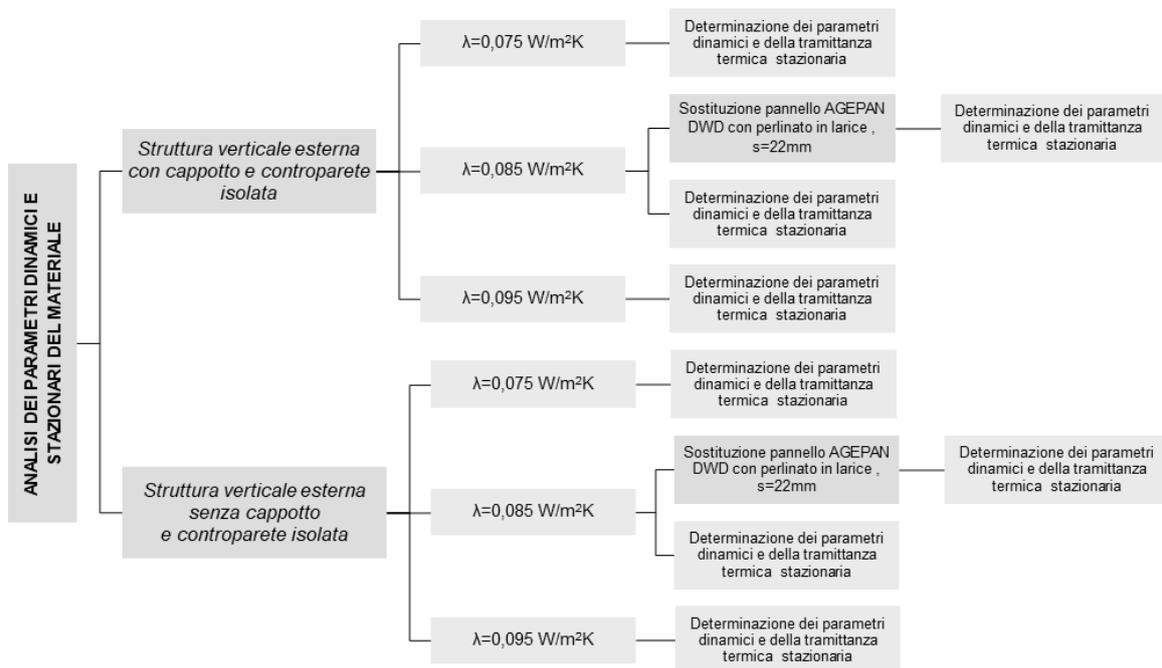


Figura 27 : Organizzazione delle analisi effettuate per la valutazione dei parametri dinamici e stazionari del materiale (Fonte: elaborazione personale)

3. Analisi e valutazioni effettuate in azienda per la caratterizzazione preliminare del materiale

Dopo la definizione preventiva di metodologie e analisi di riferimento in letteratura, si procede con la determinazione di alcuni parametri caratteristici del materiale in analisi tramite strumentazioni specifiche. Si valuteranno inoltre diversi mix-design per arrivarne a caratterizzare il più performante .

La società cooperativa LA FORESTA¹³ è un' impresa attiva dal 1995 nei settori delle utilizzazioni forestali, della selvicoltura, dell'ingegneria naturalistica e della manutenzione del verde.

Negli ultimi anni ha lavorato in diversi cantieri per le opere dei XX Giochi Olimpici Invernali relativi ad opere di mitigazione, compensazione ambientale di recupero e riqualificazione agro-forestale delle aree prevalentemente in quota .

Nel 2005 ha completato la costruzione della propria sede operativa costituita da un ampio capannone con funzione di rimessaggio macchine ed attrezzature, magazzino ricambi, officina , uffici amministrativi e locali per il personale .

Si tratta di una struttura con superficie coperta di 1.500 m², all'interno di una proprietà costituita da 15.000 m² di piazzale per manovra, disimpegno e deposito di legname.

Si occupa inoltre di realizzazione e manutenzione su impianti a biomassa con rifornimento diretto di cippato di legno per l'approvvigionamento .

L'azienda tratta in gran parte lavori selvicolturali che prevedono interventi di taglio boschivo ed esbosco con ingenti quantità di legname rilavorato . Questo ha rappresentato l'elemento chiave per la ricerca e valorizzazione dei materiali di scarto prodotti, nobilitandolo a coibente e accendendo la sostenibilità di tutta la filiera.

Dalle azioni sopra descritte si evidenzia come la cooperativa applichi al suo interno la massima interpretazione di filiera come linea di indirizzo.

¹³ Per maggiori informazioni consultare il sito <http://www.laforestascl.it/> o visitare la pagina Facebook <https://www.facebook.com/LAFORESTASUSA> .

3.1 Gestione e sviluppo della filiera aziendale in esame

Il cippato di seguito analizzato deriva da legname prelevato da specifiche foreste di taglio in alta e bassa valle Susa regolate da piani di taglio dettagliati (foglio, mappale, ubicazione).

Il taglio è diviso in tre parti :

- legname da costruzione , principalmente paleria e legname da opera (castagno proveniente da Avigliana)
- legname per uso energetico (pini, faggi principalmente provenienti da Mompantero)
- ramaglie, triturate verdi e consegnate al grosso impianto . Lavorazione direttamente in bosco .

Questo viene catalogato con punti di colore diverso e stoccato all'esterno per permetterne l'essiccazione naturale, facilitata dalla favorevole posizione in valle che permette la diminuzione di umidità relativa del legno da 40-50% appena tagliato al 30% in un anno.



Figura 28: Legname stoccato all'esterno per l'essiccazione naturale (Fonte: elaborazione personale)

Qualora questo non risulti sufficiente, viene effettuata un'ulteriore essiccazione artificiale in strumenti appositi. Essi possono essere sia di ridotte dimensioni per le campionature che per cippato, con capacità di 2 mc/h .

Il valore raggiunto risulta ottimale per la maggior parte degli impieghi di questi legnami , principalmente se usato a scopo energetico dal momento che un valore minore (intorno al 15-25%) provocherebbe un ritorno di fiamma all'interno delle caldaie.

E' bene specificare inoltre che risulta necessario avere lo stesso valore di umidità relativa ,ma si può produrre una media di queste che restituiscano il valore desiderato . Indicazioni più precise vengono comunque indicate dalla UNI EN ISO 17225 che fornisce direttive sulla classificazione di biocombustibili solidi costituiti da materiale naturale.

Ai fini della raccolta dati vengono prodotti ,subito dopo il taglio, provini cubici di legname identificati in nomenclatura, peso e provenienza . Da questi si possono ricavare informazioni sulla stagionatura ed invecchiamento delle diverse essenze catalogate , sia tramite successive pesature che con l'ausilio di igrometri ad infissione.



Figura 29: Cippato all'interno dell'igrometro per la misurazione (Fonte: elaborazione personale)

Una volta trascorso il tempo di essiccazione, il legno viene tritato mediante l'ausilio di cippatrici o con l'utilizzo di macchine prodotte artigianalmente che setacciano e dividono le diverse pezzature prodotte dalla triturazione del legno .

L'attrezzatura utilizzata per la produzione delle pezzature analizzate nasce da una vecchia betoniera costituita da un cilindro forato messo in rotazione. Alla fine di esso si trova un'elica dalla quale fuoriesce la pezzatura maggiore che aumenta la permanenza del legname triturato all'interno della macchina.



Figura 30: Cippatrice artigianale (Fonte: elaborazione personale)

Dalle due bucatre localizzate ai lati fuoriesce la frazione più fine (la più vicina al foro d'ingresso del tronco) che permette una depolverizzazione del materiale, e dalla seconda una pezzatura di media granulometria .



Figura 31: Fori di uscita del cippato dalla macchina (Fonte: elaborazione personale)

3.2 Determinazione dell'umidità relativa del materiale analizzato

La percentuale di umidità del cippato viene misurata tramite igrometro per biomasse posato su bilancia digitale. All'interno di esso viene inserito materiale per un peso di 2,8 kg , con istantanea restituzione del valore di umidità corrispondente. Essa viene misurata per mezzo di resistenze elettriche poste all'interno dell'apparecchiatura fermo restando che per ogni misurazione è necessaria una preventiva calibrazione della strumentazione .



Figura 32: Igrometro per biomasse e ad infissione durante la misurazione (Fonte: elaborazione personale)

La restituzione dei valori ricercati è immediatamente determinata ed in linea con i risultati attesi. Le variazioni infatti risultano leggermente variabili in funzione delle essenze analizzate ma non si discostano da quelli valutati in letteratura. Si ricorda a tal proposito che il materiale è stato preventivamente essiccato , sia naturalmente che artificialmente tramite essiccatore, per prevenire l'insorgenza di agenti patogeni come funghi e muffe .

Di seguito vengono restituiti in forma tabellare i risultati ottenuti .

Codice	Essenza	UR [%]	Granulometria	Compattazione
PI20c	Pino	20	mista	compattato
PI20nc	Pino	20	mista	non compattato
PI10f	Pino (essiccato)	10	fine	compattato
PI10g	Pino (essiccato)	10	grossa	compattato
CA25c	Castagno	25	mista	compattato
CA25nc	Castagno	25	mista	non compattato
CA10f	Castagno (essiccato)	10	fine	compattato
CA10g	Castagno (essiccato)	10	grossa	compattato

Tabella 8: Tabella riportante i valori di umidità relativa ricavati dalle misurazioni (fonte: Elaborazione personale)



Figura 33: Caratterizzazione dimensionale del cassero di prova (fonte: Elaborazione personale)

3.3 Determinazione della densità del materiale analizzato

Per l'indagine del cippato utilizzabile a scopi termico-isolanti si sono prodotte tre diverse pezzature di materiale proveniente da due diverse essenze, castagno e pino. Le sperimentazioni derivanti dalla letteratura¹⁴ rivelano una migliore performance isolante dei latifoglie rispetto alle conifere resinose, dalle quali però non emergono dati precisi su granulometrie e mix design.

Lo scopo prefissato consiste nell'ottenere la miscela più performante utilizzando la maggior percentuale di scarti di lavorazione provenienti della filiera, in particolar modo le pezzature maggiori, per permettere uno sfruttamento ottimale del materiale.

Le miscele scelte per l'analisi sono costituite dalle granulometrie a pezzatura maggiore mentre quelle più polverose non sono state incluse nella caratterizzazione del prodotto. Il percorso di prove ed analisi svolte in azienda intende indagare il materiale al fine di studiarne le principali proprietà ed ottenere riscontri preliminari che orientino verso un determinato range di risultati.



Figura 34: Granulometrie del materiale. Dall'alto la più fine, media pezzatura e le pezzature maggiori (Fonte: elaborazione personale)

¹⁴ Pásztor Z., Ronyecz I., *The thermal insulation capacity of tree bark*. University of West Hungary, Hungary. 2013.

Dopo aver individuato l'umidità relativa delle essenze prese in esame , si è proceduto al riempimento del cassone di riferimento. Si tratta di un prototipo assemblato specificatamente allo scopo di indagare il comportamento del materiale all'interno di una parete di telaio in legno .

Il cassone è in scala reale , in OSB con feritoie in plexiglass per il controllo dell'assestamento del cippato al suo interno. Il materiale viene inserito all'interno per gravità e , con opportune vibrazioni impresse manualmente o tramite vibratore per calcestruzzo, se ne sollecita la distribuzione omogenea .

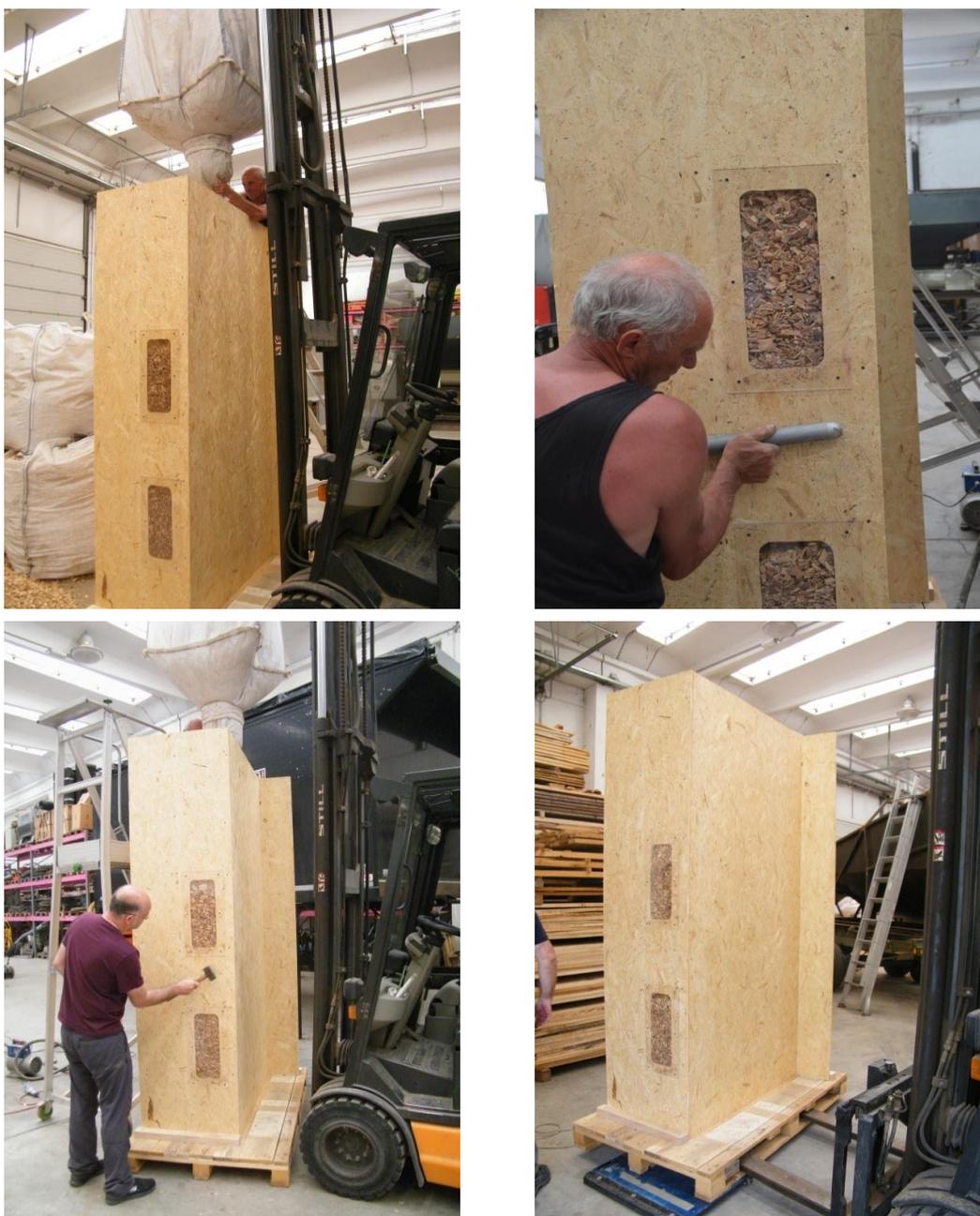


Figure 35: Procedura di riempimento del cassone di muratura. Dopo il riempimento vengono effettuate le opportune vibrazioni, e viene pesato al lordo del cippato (Fonte: elaborazione personale)



Figure 36: Procedura di riempimento del cassone di muratura. Dopo il riempimento il cassone viene svuotato dalla parte inferiore (Fonte: elaborazione personale)

Dopo opportune valutazioni e pesatura al netto e al lordo del cippato , il cassone viene svuotato da un'apertura situata nella parte inferiore del manufatto.

Parallelamente sono state verificate le dimensioni interne del cassone tramite misurazioni con distanziometro e metro ricavandone il volume netto .

Questi valori ci hanno permesso di ottenere un primo dato indicativo di densità del materiale riportato nella tabella sottostante .

Prova 1 su cassone di muratura	
<i>Cippato di pino, granulometria mista, UR 20 % .</i>	
Peso cassone a vuoto	135 kg
Peso cassone con cippato	375 kg
Peso del cippato	240 kg
Volume interno netto	1,017 mc
<i>Densità del materiale</i>	<i>236 kg/ m³</i>

Tabella 8: Dati relativi alla prima prova (Fonte: elaborazione personale)

Successivamente si è passati ad effettuare valutazioni sul cassero da utilizzare per testare la conducibilità termica del materiale in laboratorio.



Figura 37: Cassero prodotto in azienda per le prove in laboratorio (Fonte: elaborazione personale)

Dimensioni del cassero per le prove in laboratorio [mm]	
Lunghezza lorda	600
Larghezza lorda	600
Altezza lorda (chiuso)	150
Lunghezza netta	556
Larghezza netta	556
Altezza netta	120
Spessore tappo	15
<i>Volume netto</i>	<i>0,0371 m³</i>

Tabella 9: Valori relativi al cassero di prova (Fonte: elaborazione personale)

Sulla base dei risultati ottenuti dalla prova sul cassone di muratura sono stati scelti due parametri di riferimento della densità per le diverse granulometrie da analizzare . In particolare sono stati utilizzati per le successive analisi le seguenti :

Pezzatura	Densità di riferimento [kg/ m ³]	Peso provino [kg]
Granulometria grossa	240	8,88
Granulometria fine	230	8,51

Tabella 10: Miscele selezionate per le prove su piastra calda (fonte: elaborazione personale)

Tenendo conto dei valori appena riportati sono state indagate le densità di diversi mix-design per valutare l'entità della loro variazione al variare della miscela scelta.

Le valutazioni sono state effettuate mediante l'ausilio di un contenitore di cui era possibile valutare con precisione il volume che il cippato avrebbe occupato al suo interno e per il quale il costipamento era agevole. Ricavato questo dato, è stato riempito con il mix design da esaminare, in peso pari alla granulometria in analisi. Dato il peso e noto il volume del contenitore si è risaliti con facilità alla densità del mix-design analizzato. Ogni miscela è stata poi catalogata all'interno di sacchi di polietilene sigillati con scotch da pacco per preservarne le proprietà analizzate in attesa di effettuare le prove di conducibilità termica.

Codice	Volume di riferimento [m ³]	Peso [kg]	Densità [kg/m ³]
PI20c	0,023	6,605	268
PI20nc		5,455	220
PI10f		5,710	232
PI10g		5,925	241
CA25c		7,455	307,4
CA25nc		6,350	259,5
CA10f		5,710	231,7
CA10g		5,915	240,6

Tabella 11: Codici identificativi delle miscele (Fonte: Elaborazione personale)



Figura 38: Procedimento di analisi della densità dei mix-design. La miscela viene inserita all'interno del volume di riferimento e pesata per permettere la ripercorribilità del procedimento (Fonte: elaborazione personale)



Figura 39: Procedimento di analisi della densità dei mix-design . Dopo la scelta della miscela, la sua pesatura e l'inserimento nel cassero, il cippato viene inserito in sacchi di polietilene sigillati per il trasporto in laboratorio (Fonte: elaborazione personale).

E' stato infine riempito un' altro cassone di muratura per ripetere una seconda analisi con una miscela di entrambe le essenze ad una percentuale di umidità relativa del 10% (Codd. PI10g – CA10g). Di seguito riportati i risultati ottenuti .

Prova 2 su cassone di muratura	
<i>Cippato di pino e castagno, granulometria grossa, UR 10 % .</i>	
Peso cassone a vuoto	135 kg
Peso cassone con cippato	360 kg
Peso del cippato	225 kg
Volume interno netto	1,017 m ³
Densità del materiale	221 kg/m³

Tabella 12 : Valori relativi alla seconda prova sul cassone di muratura (fonte: Elaborazione Personale)

3.4 Analisi di una miscela composta con corteccia e cippato di castagno

In aggiunta alle valutazioni appena esposte è stata effettuata un'ulteriore analisi su un campione composto da cippato in granulometria fine additivato in proporzioni diverse con corteccia di larice essiccata .

Le proprietà del materiale corteccia come isolante naturale sono già state discusse nei capitoli precedenti ed è stato ritenuto utile ai fini della valutazione complessiva analizzarla analogamente alle altre miscele .



*Figura 40: Tronco di larice prima della decorticazione
(Fonte: elaborazione personale)*

L'inserimento della seguente analisi è stata valutata principalmente per osservare la percentuale di incidenza del peso della miscela sulle proprietà termiche analizzate successivamente in quanto a parità di volume, la corteccia possiede un peso minore delle miscele a base di cippato .

La corteccia è stata preventivamente essiccata artificialmente e setacciata sia per eliminarne le impurità presenti dalla cippatura (fogliame, ramaglie...) che per selezionare la pezzatura desiderata .



Figura 41 : Setacciatura della corteccia (Fonte: elaborazione personale)

La miscela è stata poi effettuata con l'accoppiamento di cippato di castagno a granulometria medio-fine nelle proporzioni tabellate di seguito .

Codice	Essenza	Granulometria	Volume di riferimento [m ³]	UR [%]	Peso [kg]	Densità [kg/m ³]
CoCaFi	corteccia di larice	grossa	0,037	10	3,335	200
	cippato di castagno	fine			4,065	

Tabella 12: Valori ricavati dalle analisi in azienda sulla miscela cippato-corteccia (fonte: elaborazione personale)

Il volume di riferimento è cambiato sensibilmente per questioni pratiche ma non ha comportato problemi nella valutazione complessiva. Lo stoccaggio del materiale per il trasporto in laboratorio è stato il medesimo dei provini precedenti . Nei capitoli successivi verranno analizzate le proprietà di conducibilità termica di queste miscele e valutate le prestazioni estive di una parete perimetrale con isolamento in cippato di legno .

3.5 Considerazioni sulle prove effettuate

Dalle prove sopra descritte si possono effettuare alcune considerazioni sul materiale analizzato.

In primo luogo si può affermare che la densità non varia tanto in funzione dell'essenza analizzata o dell'umidità relativa, quanto al variare della granulometria ma soprattutto della compattazione del materiale. Questo infatti emerge nel caso del pino con umidità relativa al 20% come nel caso del castagno al 25%, per i quali sono state effettuate variazioni di compattazione del materiale all'interno del volume di prova. Questo è accettabile in quanto la densità aumenta in maniera proporzionale all'aumentare del peso del materiale.

Sensibili variazioni si hanno al variare della granulometria per una stessa essenza, come si può notare per il castagno e il pino al 10%. Maggiore è la pezzatura del materiale infatti, maggiore è la densità che emerge dalle prove.

Appare però più complesso ridurre la densità a valori inferiori a 220 kg/m^3 senza introdurre all'interno della miscela ulteriori prodotti di origine legnosa con caratteristiche marcatamente diverse (corteccia, particelle fini, fiocchi derivati da piallatura).¹⁵ Questi valori possono essere ottimizzati a livello di prestazioni termiche con l'aggiunta di sfibrature e parti più fini ma comporta maggiori complessità logistiche e di integrazione di filiera.

Sulla base dei dati acquisiti e delle considerazioni effettuate si è deciso di selezionare quattro miscele e studiarle più approfonditamente effettuando valutazioni di caratterizzazione termica in laboratorio.

¹⁵ Vale la pena ricordare che alcune ricerche commentate nei capitoli precedenti prevedevano l'utilizzo di prodotti a densità decisamente meno elevate (50-80 kg/mc) raggiungendo valori di conduttività tra lo 0,052 e i 0,055 W/mK.

I campioni selezionati sono :

Codice	Essenza	UR	Granulometria	Compattazione	Densità [kg/m ³]
PI20c	Pino	20%	mista	compattato	268
PI20nc	Pino	20%	mista	non compattato	220
PI10f	Pino (essiccato)	10%	fine	compattato	230
PI10g	Pino (essiccato)	10%	grossa	compattato	240
CA25c	Castagno	25%	mista	compattato	307,4
CA25nc	Castagno	25%	mista	non compattato	259,5
CA10f	Castagno	10%	fine	compattato	230
CA10g	Castagno	10%	grossa	compattato	240

Tabella 13 : Campioni selezionati per la prova in laboratorio, in colore verde (fonte: Elaborazione personale)

4. Determinazione della resistenza termica del materiale tramite prove in laboratorio. Metodo della piastra calda con anello di guardia

4.1. Descrizione dell'apparecchiatura di prova

Dopo aver determinato le caratteristiche di densità e umidità relativa in azienda , si è proseguito con la determinazione della conducibilità termica dei campioni tramite il metodo della piastra calda con anello di guardia .

Questo tipo di strumentazione permette di definire il trasporto di energia , sotto forma di calore, che attraversa il provino a causa di un determinato gradiente di temperatura in regime stazionario.

Il metodo della piastra calda con anello di guardia è standardizzato dalla normativa ISO 8302, recepita a livello europeo e nazionale dalla UNI EN 12664 e dalla UNI EN 12667 .

L'apparato in questione è del tipo "a singolo provino" ed è costituito da un elemento scaldante rappresentato dalla piastra calda, di dimensioni 1041x762 mm, con zona di misura centrale di dimensioni 300x300 mm e da un elemento di contorno rappresentante l'anello di guardia . Al di sopra è posta la piastra fredda, delle stesse dimensioni dell'elemento scaldante circondate a loro volta dall'isolante, che ha il compito di evitare dispersioni di calore durante la prova. Un chiller posto all'esterno della apparecchiatura permette il raffreddamento del liquido.

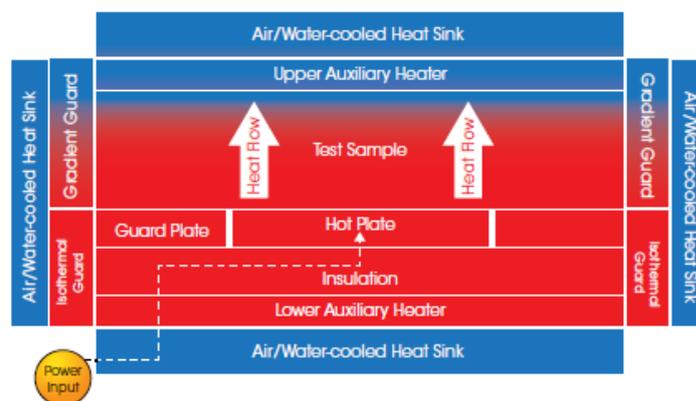


Figura 42: Schema di funzionamento della piastra calda (Fonte: LaserComp)

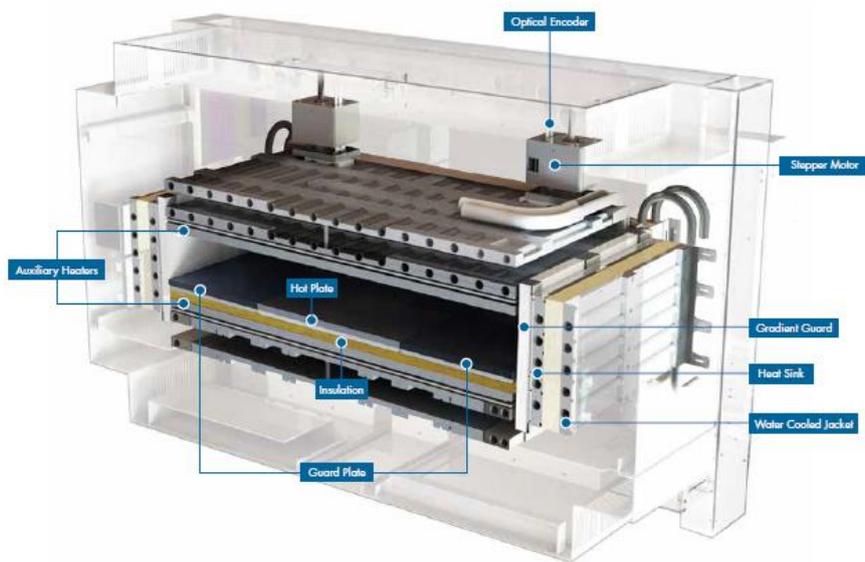


Figura 43: Apparecchiatura utilizzata per la prova (Fonte: LaserComp)

Il raggiungimento della temperatura di rugiada produce la condensa dell'aria all'interno dell'apparecchiatura, motivo per il quale viene insufflato azoto tramite un piccolo tubo inserito prima dell'avviamento della prova. L'azoto infatti secca l'aria interna permettendo l'eliminazione dell'umidità.



Figura 41: Piastra calda utilizzata per le prove in laboratorio (fonte: Elaborazione personale)

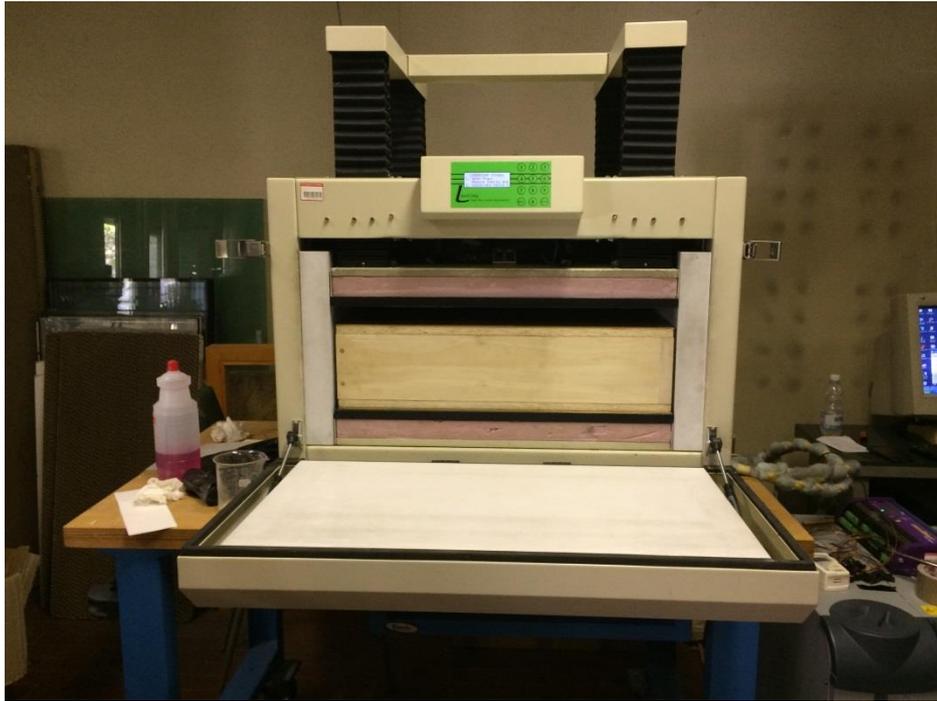


Figura 45: Cassero contenente la miscela di prova inserito all'interno della piastra calda (Fonte: elaborazione personale)

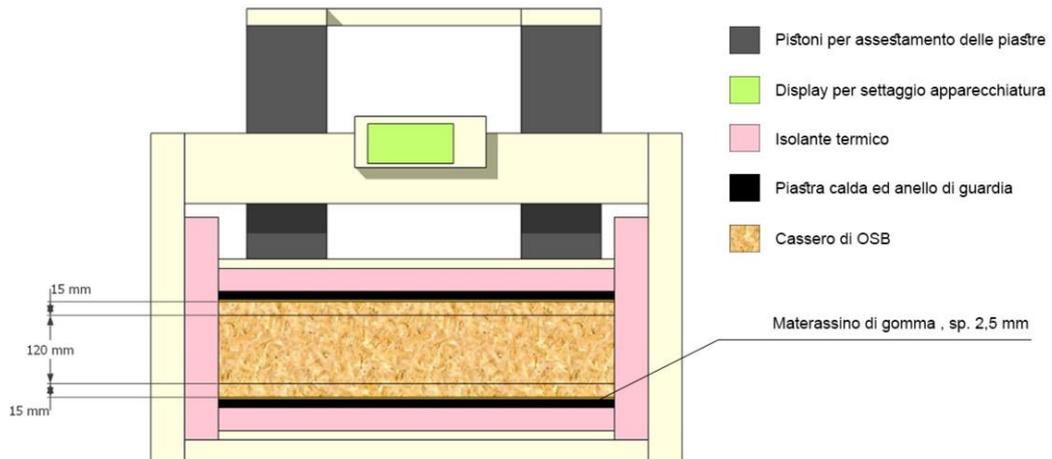


Figura 46: Schema dei componenti della piastra calda (Fonte: elaborazione personale)

Al fine di garantire la massima planarità tra le superfici del cassero e le piastre sono stati inseriti due materassini di gomma di circa 3 mm di spessore.

Gli input possono essere inseriti sia dal display dell'apparecchiatura che dal PC, attraverso il software "WinTherm32", che permette il settaggio di tutte le impostazioni necessarie all'avvio della prova e al suo controllo durante le singole analisi.

La prova viene effettuata, per ogni miscela, in condizioni di flusso ascendente a due range di temperature differenti, il primo 15°C – 35°C, il secondo 0°C – 20°C per permettere l'analisi del comportamento del materiale al variare della temperatura.

I test sono stati impostati attraverso il software, settando inizialmente i parametri relativi alle dimensioni del provino e successivamente i range di setpoint di temperatura e i file di calibrazione utilizzati dal programma per permettere l'elaborazione dei dati. Queste impostazioni vengono inserite una sola volta e confermate all'inizio di prova.

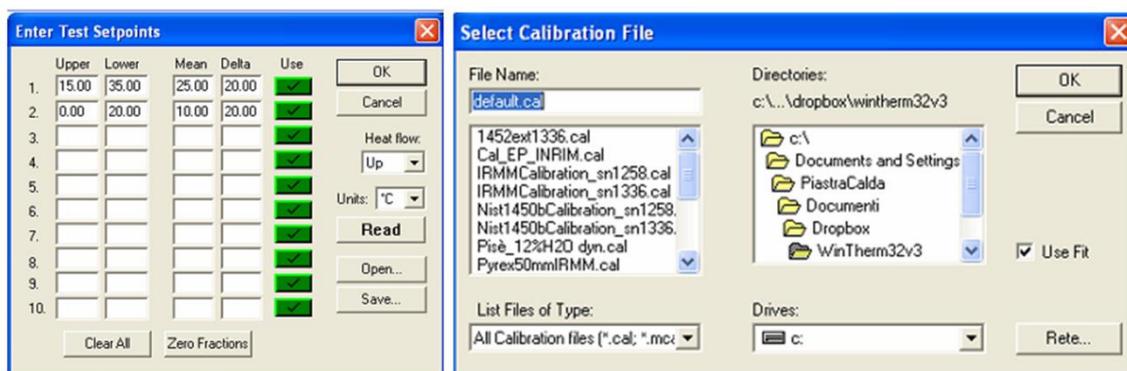


Figura 47: Settaggi iniziali per l'avviamento della prova (Fonte: Elaborazione da Wintherm)

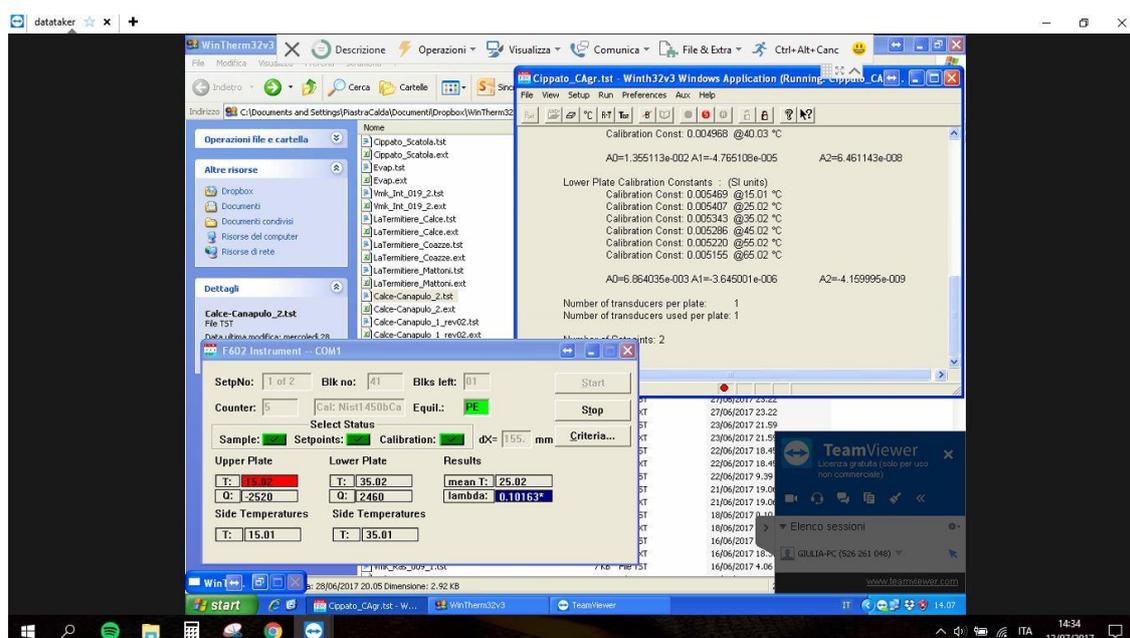


Figura 48: Schermata estratta da Wintherm durante l'avanzamento di una prova (Fonte: elaborazione personale)

I file di output sono restituiti in formato .tst al termine di ogni prova e contengono i parametri di settaggio inseriti all'avviamento, quelli rilevati durante il processo d'analisi e i risultati in termini di resistenze termiche.

4.2 Organizzazione delle prove

La conducibilità termica del materiale è stata indagata analizzando i campioni di cippato di legno selezionati sulla base delle considerazioni riportate nel capitolo precedente.

Questo ha permesso di rendere più chiaro e ripercorribile il percorso di analisi del materiale, in quanto le quantità analizzate in laboratorio risultano in connessione diretta con le proprietà del singolo materiale.

I file di output restituiti dalla piastra calda hanno richiesto una successiva rielaborazione dal momento che il software non permetteva la scomputazione automatica dei parametri termici del solo materiale sito nel cassero.

Come si evince dalla tabella 16 dai valori totalitari restituiti da *Wintherm*, per ogni singola prova, sono stati decurtati i valori di resistenza termica relativi ai materassini di gomma, all'isolante e ai due tappi del cassero di OSB.

Dal seguente valore di resistenza termica la restituzione del valore di conducibilità di ogni singola miscela è stata determinata utilizzando la formula:

$$\lambda_{cippato} = \frac{s}{R_{cippato}} \left[\frac{W}{mK} \right]$$



Figura 49: Miscela di cippato inserita nel cassero di prova (Fonte: elaborazione personale)

Le prove sono state così suddivise :

Prova	Miscela	Granulometria
1	castagno	grossa
2	castagno	fine
3	pino	grossa
4	pino	fine
5	corteccia di larice	grossa
	cippato di castagno	fine

Tabella 14 : Tabella riassuntiva delle prove effettuate (Fonte: elaborazione personale)

Per ogni prova sono state elaborate delle schede riepilogative (inserite in allegato alla seguente) contenenti i valori di conducibilità termica della miscela e le sue caratteristiche principali, determinate in sede di analisi in azienda .

I parametri relativi agli elementi scomputati sono riportati nelle tabelle di seguito .

Tappi - Setpoint 0°-20°		
$S_{tappilordo}$	[mm]	34,73
$\lambda_{tappilordo}$	[W/mK]	0,101
$R_{tappilordo}$	[m ² K/W]	0,345
$R_{materassini}$	[m ² K/W]	0,029
R_{tappi}	[m ² K/W]	0,315
S_{tappi}	[mm]	30,77
λ_{tappi}	[W/mK]	0,098

Tappi - Setpoint 15°-35°		
$S_{tappilordo}$	[mm]	34,73
$\lambda_{tappilordo}$	[W/mK]	0,104
$R_{tappilordo}$	[m ² K/W]	0,335
$R_{materassini}$	[m ² K/W]	0,029
R_{tappi}	[m ² K/W]	0,306
S_{tappi}	[mm]	30,77
λ_{tappi}	[W/mK]	0,101

Materassini		
$S_{materassini}$	[mm]	3,97
$\lambda_{materassini}$	[W/mK]	0,136
$R_{materassini}$	[m ² K/W]	0,029

Tabella 15: Parametri relativi ai tappi del cassero e ai materassini di gomma (Fonte : elaborazione personale).

VALORI DI CONDUCEBILITÀ TERMICA DETERMINATI TRAMITE IL METODO DELLA PIASTRA CALDA DI COIBENTI TERMICI NATURALI IN CIPPATO DI LEGNO											
Prova	Setpoint	T _{med. misurata} [°C]	T _{upper} [°C]	T _{lower} [°C]	ΔT _{misurato} [°C]	S _{misurato} [mm]	R _{totale} [m ² K/W]	R _{tappi + R_{mat}} [m ² K/W]	R _{cippato} [m ² K/W]	S _{effettivo} [mm]	λ _{cippato} [W/mK]
CA10g	15°C-35°C	25,02	15,02	35,02	20,00	155,34	1,543	0,335	1,208	120,61	0,0998
	0°C-20°C	10,01	0,01	20,01	20,00	155,34	1,775	0,345	1,430	120,61	0,0843
CA10f	15°C-35°C	25,02	15,02	35,02	20,00	156,24	1,738	0,335	1,403	121,50	0,0866
	0°C-20°C	10,01	0,01	20,01	20,00	156,24	2,010	0,345	1,665	121,50	0,0730
PI10f	15°C-35°C	25,02	15,02	35,02	20,00	156,69	1,749	0,335	1,414	121,95	0,0862
	0°C-20°C	10,01	0,01	20,01	20,00	156,69	1,968	0,345	1,623	121,95	0,0751
PI10g	15°C-35°C	25,02	15,02	35,02	20,00	157,04	1,571	0,335	1,236	122,31	0,0989
	0°C-20°C	10,01	0,01	20,01	20,00	157,04	1,733	0,345	1,389	122,31	0,0881
CoCaFi	15°C-35°C	25,02	15,02	35,02	20,00	154,46	1,676	0,335	1,341	119,73	0,0893
	0°C-20°C	10,01	0,01	20,01	20,00	154,46	1,923	0,345	1,578	119,73	0,0759
LEGENDA											
Codice	Caratteristiche										
CA10g	Castagno (<i>granulometria grossa</i>)										
CA10f	Castagno (<i>granulometria fine</i>)										
PI10f	Pino (<i>granulometria fine</i>)										
PI10g	Pino (<i>granulometria grossa</i>)										
CoCaFi	Corteccia e castagno (<i>gr. fine, ρ=200 kg/m³</i>)										

Tabella 16: Valori di conducibilità termica delle miscele analizzate in laboratorio tramite in metodo della piastra calda (fonte: Elaborazione personale)

4.3 Analisi dei risultati e relative considerazioni

Nella seguente tabella vengono riportati i risultati principali ottenuti dalle prove sperimentali, per ciascun campione di materiale e per range di temperature. Come si evince dai risultati emersi in laboratorio, le prestazioni più soddisfacenti appartengono alle composizioni a granulometria fine, ottenute dalle pezzature di dimensioni minori e sfibrature di essenza analoga.

Prova	Setpoint	$R_{cippato}$ [m^2K/W]	$\lambda_{cippato}$ [W/mK]
CA10g	15°C-35°C	1,208	0,0998
	0°C-20°C	1,430	0,0843
CA10f	15°C-35°C	1,403	0,0866
	0°C-20°C	1,665	0,0730
PI10f	15°C-35°C	1,414	0,0862
	0°C-20°C	1,623	0,0751
PI10g	15°C-35°C	1,236	0,0989
	0°C-20°C	1,389	0,0881
CoCaFi ($\rho=200 \text{ kg/m}^3$)	15°C-35°C	1,341	0,0893
	0°C-20°C	1,578	0,0759

Tabella 17 : Valori riassunti dalle prove in laboratorio . In evidenza le miscele termicamente più performanti (Fonte: elaborazione personale).

Ripercorrendo i parametri emersi in letteratura si denota un allineamento di risultati non solo tra essenze simili ma soprattutto a parità di densità raggiunta .

Come emerso infatti la conducibilità termica è fortemente influenzata della compattazione del provino, funzione della granulometria e quindi della densità. Il setpoint di temperatura utilizzato per la singola prova influisce sui valori ottenuti ma non è strettamente legato al materiale in analisi bensì dipendente in parte dalle condizioni climatiche esterne.

Dai risultati ottenuti emerge inoltre come l'influenza dell'umidità relativa caratterizzante le singole essenze arboree non sia così strettamente legata alla conducibilità termica,

come si evince dalle sperimentazioni riportate in letteratura. Infatti il pino differisce di pochi punti percentuali rispetto al castagno che a sua volta risulta equivalente in termine di prestazioni termiche alla miscela mista di corteccia e cippato di conifera ottenuta diminuendo sensibilmente la densità. Si può perciò affermare che il parametro che maggiormente influenza la prestazione termica risulta la densità della miscela, dipendente a sua volta della quantità di particelle fini presenti. La combinazione di cippato e corteccia infatti, a parità di granulometria, ha raggiunto una conducibilità molto simile alla miscela costituita con sola conifera in funzione della diminuzione di peso ottenuta tramite l'aggiunta proprio della corteccia.

Codice	Essenza	Granulometria	UR [%]	Densità [kg/m ³]
CA10g	Castagno	grossa	10	240
CA10f	Castagno	fine		230
PI10f	Pino (essiccato)	fine		230
PI10g	Pino (essiccato)	grossa		240
CoCaFi	Corteccia di larice Cippato di castagno	Grossa (corteccia) Fine (cippato)		200

Tabella 18 : Parametri di riferimento ottenuti dalle prove in azienda relativi all'umidità relativa e alla densità. (Fonte: elaborazione personale).

E' lecito comunque supporre che il risultato migliore in termini di prestazioni termiche restituito dalla miscela di cippato di castagno a granulometria fine sia dipendente in parte dall' alta percentuale di corteccia interna presente nelle latifoglie che permette l'intrecciamento delle fibre intrappolando una buona quantità di aria all' interno. Ricordiamo che nelle conifere questo fenomeno si riscontra più difficilmente a causa della minore superficie di contatto tra le componenti.

Inoltre si può considerare che la miscelazione di essenze diverse evidenzia una minor correlazione fra densità e conducibilità termica, probabilmente introducendo più articolati fattori che influenzano il risultato finale.

5. Analisi dei parametri dinamici e stazionari del materiale inserito in una parete perimetrale prefissata

5.1. Indicazioni sul procedimento di analisi effettuato

Dopo aver indagato le caratteristiche intrinseche del cippato attraverso la composizione di più miscele analizzate in laboratorio, si è ritenuto opportuno effettuare alcune considerazioni atte a valutare il comportamento del materiale in regime dinamico. Per effettuare i seguenti studi è stata determinata una stratigrafia tipo composta prevalentemente da materiali naturali e sono state effettuate le analisi su tre campionature di conducibilità termica rappresentative dei valori emersi dalle prove su piastra calda.

Nr.	ID materiale	λ	ρ	c	μ	κ	tempo di	GW/P	GW/P	AP	PEI
							utilizzo	kg	kg	kg SO ₂	MJ/kg
		W/(mK)	kg/m ³	kJ/kgK	-	kg/m ³	anni	CO ₂ e/kg	CO ₂ e/kg	e/kg	
1	43 rasante per intonaco $\lambda = 1$	1,000	1350	1,13	30	0,02	50	0,24	0,24	0,0006	2,4
2	16 lastre di cartongesso $\lambda = 0,21$	0,210	900	1,05	8	0,02	50	0,23	0,26	0,0007	4,8
3	15 lastre di fibrogesso $\lambda = 0,27$	0,270	1180	0,79	10	0,02	50	0,09	0,38	0,0015	5,4
4	192 legname piallato, legno di abete rosso, essic	0,130	500	2	50	0,2	50	-1,44	0,21	0,0013	3,6
5	178 pannello in fibra di legno 50 kg/m ²	0,039	50	2	5	0,2	50	-0,80	0,91	0,0040	14,4
6	189 pannello OSB 3 con colla poliuretanic	0,110	660	2	240	0,2	50	-1,05	0,49	0,0022	11,8
7	177 cippato di legno	0,090	230	2	2	0,2	50	-1,43	0,12	0,0015	1,8
8	180 pannello in fibra di legno, Agepan DWD	0,090	565	2	5	0,2	50	-0,15	1,35	0,0112	12,7
9	226 pannello di sughero per cappotto $\lambda = 0,04$	0,040	120	1,9	18	0,01	50	-1,21	0,60	0,0020	7,3
10	43 rasante per intonaco $\lambda = 1$	1,000	1350	1,13	30	0,02	50	0,24	0,24	0,0006	2,4
11											
12											
13											

Figura 50: Definizione della parete perimetrale oggetto di analisi (Fonte: estratto del software ProCasaClima)

I valori di conducibilità termica utilizzati per l'analisi sono i seguenti :

$\lambda=0,075$ W/mK

$\lambda=0,085$ W/mK

$\lambda=0,095$ W/mK

ognuno dei quali è stato analizzato per spessori di isolante dai 10 ai 70 cm .

Questo metodo permette di valutare il comportamento della parete al variare dello spessore di coibente inserito e definire con maggior precisione le caratteristiche termiche che è necessario raggiungere per soddisfare i valori limite previsti da normativa.

I parametri di riferimento individuati dall'agenzia CasaClima relativi ai fattori analizzati sono i seguenti:

ELEMENTI STRUTTURALI OPACHI			
<i>zona climatica</i>	<i>sfasamento</i>	<i>fattore di attenuazione (24h)</i>	<i>ammittenza interna Y_{11} [W/m²K]</i>
A,B,C,D	≥ 12 h	≤ 0,30	≥ 2,0
E,F (≤ 4000 GG)	≥ 9 h	-	
F (≥ 4000 GG)	-	-	

Tabella 19: Valori limite di alcuni parametri dinamici (Fonte: Direttiva Tecnica Nuovi Edifici CasaClima)

Il DM 26/06/2015 individua invece i valori limite relativi alla trasmittanza termica periodica ed in particolare, ad esclusione della zona F , per le località in cui il valore medio mensile dell'irradianza sul piano orizzontale nel mese di massima insolazione $I_{m,s} \geq 290 \text{ W/m}^2$, deve verificarsi che :

- per le pareti verticali opache sia rispettato il valore di trasmittanza termica periodica :

$$Y_{IE} < 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$$

- per tutte le pareti opache orizzontali e inclinate:

$$Y_{IE} < 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Il DM requisiti minimi determina i valori di trasmittanza termica U di riferimento per strutture opache verticali verso l'esterno come di seguito indicato in tabella .

TRASMITTANZA TERMICA U PER STRUTTURE OPACHE VERTICALI		
zona climatica	U_{rif} [W/m ² K]	
	Dal 1°ottobre 2015	Dal 1°gennaio 2019/2021
A-B	0,45	0,43
C	0,38	0,34
D	0,34	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

Tabella 20 :Trasmittanza termica U per elementi opachi (Fonte: estratto dal DM requisiti minimi)

I risultati ottenuti sono restituiti in forma tabellare e graficizzati in funzione di range di spessore variabile ritenuti significativi, non solo dal punto di vista analitico, ma anche della messa in opera della parete .

I riferimenti per i valori limite di trasmittanza termica U considerati di seguito saranno quelli riferiti alle zone climatiche E,F in vigore a partire dal 1°gennaio 2019/2021 e verranno contrassegnati nelle tabelle di seguito riportate tramite due diversi colori rappresentati nella tabella sottostante .

zona climatica	U_{rif} [W/m ² K]
	Dal 1°gennaio 2019/2021
E	0,26
F	0,24

Tabella 21 : Valori di riferimento U_{rif} per le zone climatiche E,F (Font: estratto dal DM requisiti minimi)

5.2. Analisi dei risultati ottenuti per una struttura verticale esterna con cappotto e controparete isolata

Nel seguito si presenta l'analisi di una stratigrafia di involucro al fine di evidenziare in modo pratico le potenzialità del materiale. La stratigrafia di riferimento è inizialmente definita in modo completo, al fine di risultare aderente ad un caso reale.

L'analisi è stata condotta scorporando i dati relativi allo scheletro portante con isolamento in cippato dal resto della struttura in modo da evidenziarne l'incidenza sull'intero sistema costruttivo.

Sulla base di questi risultati sono stati successivamente rimossi il cappotto esterno e l'isolamento in controparete ed effettuate analoghe valutazioni in riferimento ai valori limite sopra definiti .



Figura 51: Stratigrafia della muratura esterna in esame (Fonte: elaborazione personale)

I risultati ottenuti sono restituiti nelle tabelle seguenti per valori distinti di conducibilità crescente al variare dello spessore di isolante in parete.

Di seguito vengono riportati i valori graficizzati dei risultati ottenuti con i riferimenti ai valori limite di ciascuna grandezza come precedentemente indicato nei paragrafi specifici.

STRUTTURA VERTICALE ESTERNA CON CAPPOTTO E COIBENTE IN CONTROPARETE

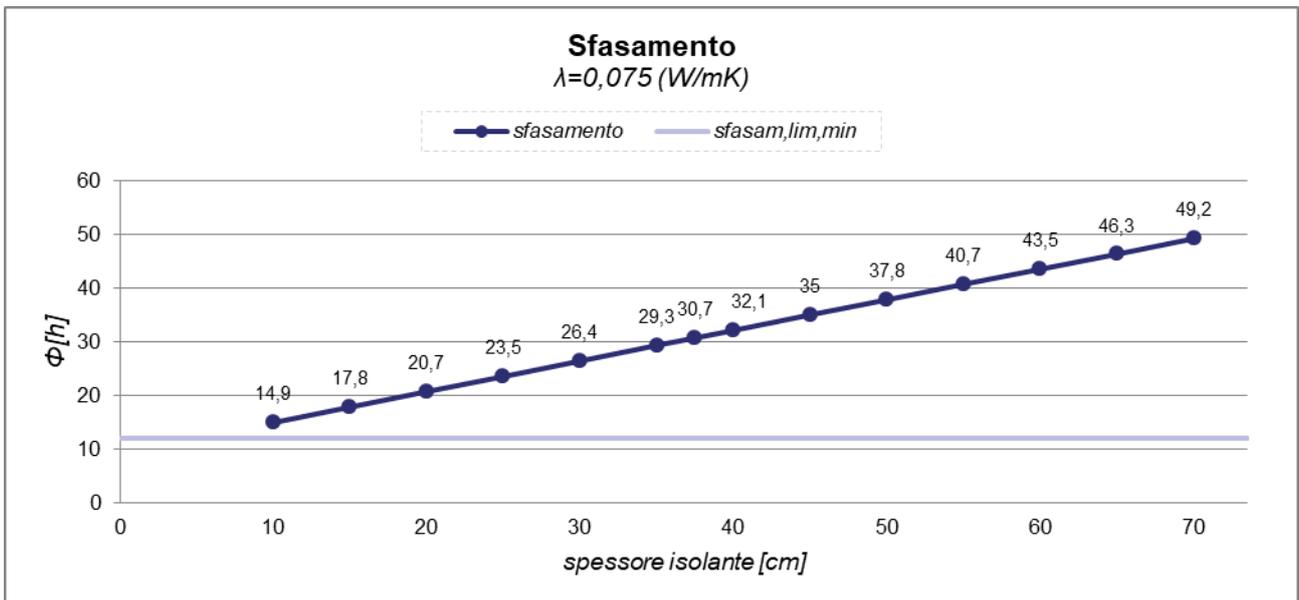
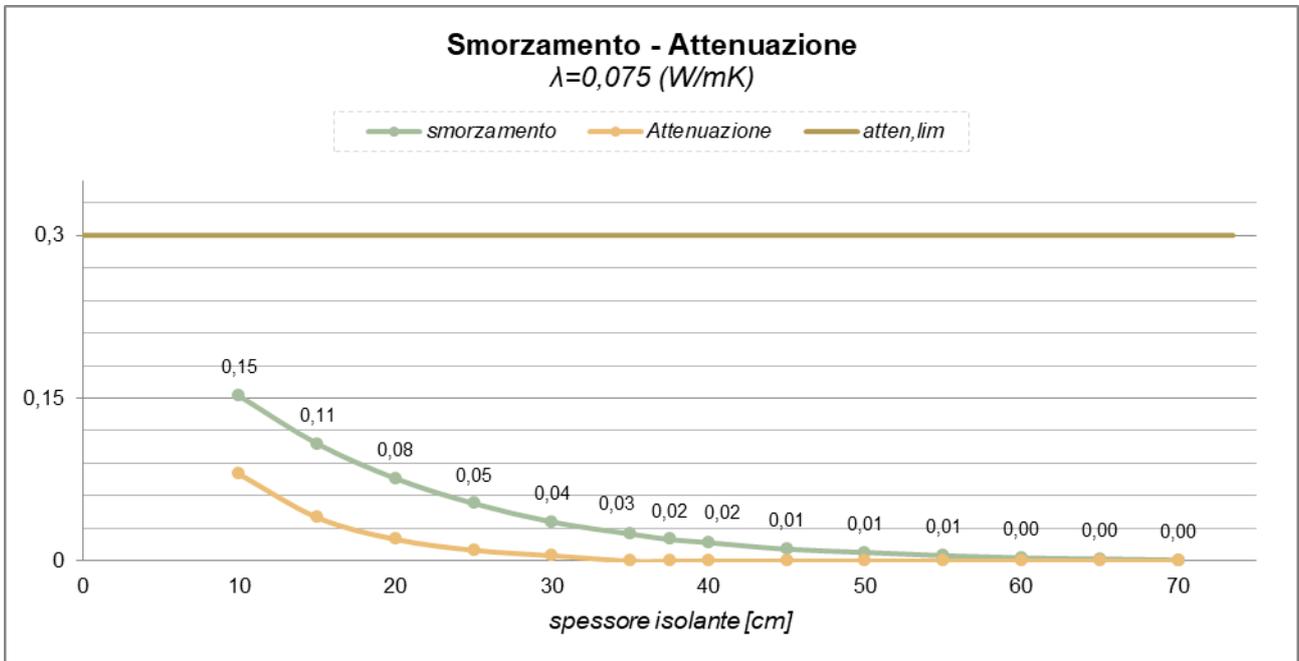
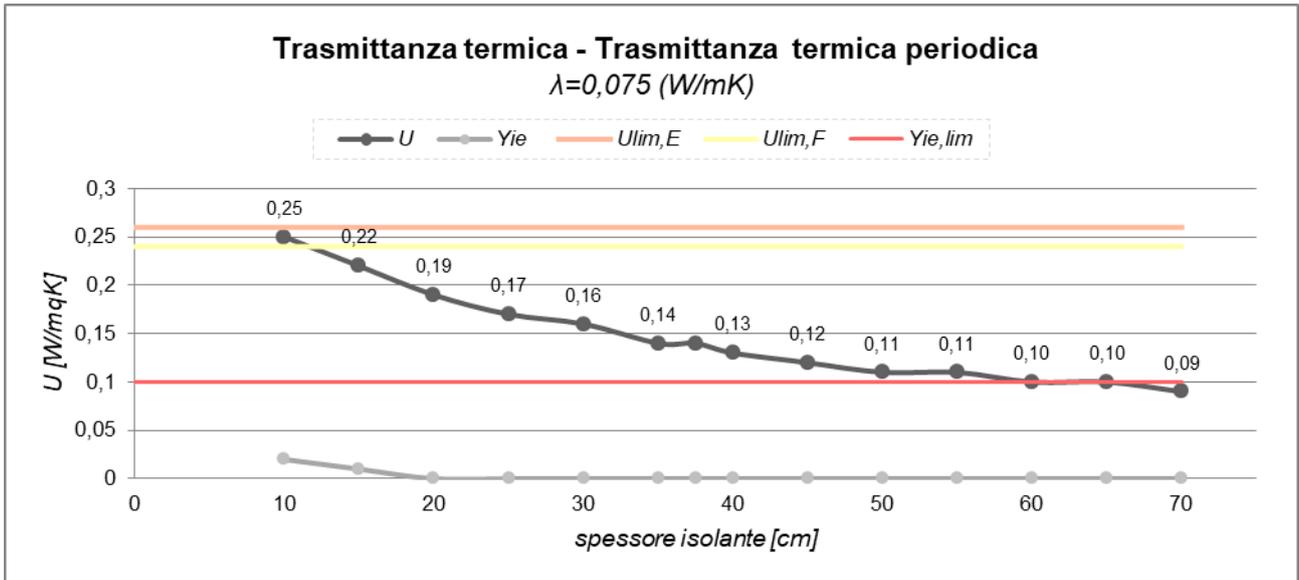
Parametri dinamici e stazionari funzione dello spessore dello strato isolante ($\lambda=0,075$ W/mK, 24 h)

Spessore str.portante c/ cippato [cm]	Spessore totale parete [cm]	Resistenza termica parete [m ² K/W]	Resistenza termica str.portante c/ cippato [m ² K/W]	Resistenza termica restanti materiali [m ² K/W]	Trasmittanza termica parete [W/m ² K]	Trasmittanza termica str.portante c/ cippato [W/m ² K]	Trasmittanza termica periodica parete [W/m ² K]	Sfasamento parete [h]	Ammetenza parete [W/m ² K]	Fattore di attenuazione parete [-]	Fattore di smorzamento parete [-]
10	27,5	4,00	1,97	2,035	0,25	0,51	0,02	14,9	2,12	0,08	0,152
15	32,5	4,55	2,51		0,22	0,40	0,01	17,8	2,12	0,04	0,108
20	37,5	5,26	3,23		0,19	0,31	0,00	20,7	2,12	0,02	0,076
25	42,5	5,88	3,85		0,17	0,26	0,00	23,5	2,12	0,01	0,053
30	47,5	6,25	4,22		0,16	0,24	0,00	26,4	2,12	0,01	0,036
35	52,5	7,14	5,11		0,14	0,20	0,00	29,3	2,12	0,00	0,025
37,5	55	7,14	5,11		0,14	0,20	0,00	30,7	2,12	0,00	0,020
40	57,5	7,69	5,66		0,13	0,18	0,00	32,1	2,12	0,00	0,017
45	62,5	8,33	6,30		0,12	0,16	0,00	35	2,12	0,00	0,011
50	67,5	9,09	7,06		0,11	0,14	0,00	37,8	2,12	0,00	0,008
55	72,5	9,09	7,06		0,11	0,14	0,00	40,7	2,12	0,00	0,005
60	77,5	10,00	7,97		0,10	0,13	0,00	43,5	2,12	0,00	0,003
65	82,5	10,00	7,97		0,10	0,13	0,00	46,3	2,12	0,00	0,002
70	87,5	11,11	9,08		0,09	0,11	0,00	49,2	2,12	0,00	0,001

LEGENDA

zona climatica	U _{rif} [W/m ² K]
E	0,26
F	0,24

Tabella 22: Parametri relativi ad una parete verticale in telaio di legno con cappotto e controparete isolata per valori di $\lambda=0,075$ [W/mK] (Fonte: elaborazione personale)



STRUTTURA VERTICALE ESTERNA CON CAPPOTTO E COIBENTE IN CONTROPARETE

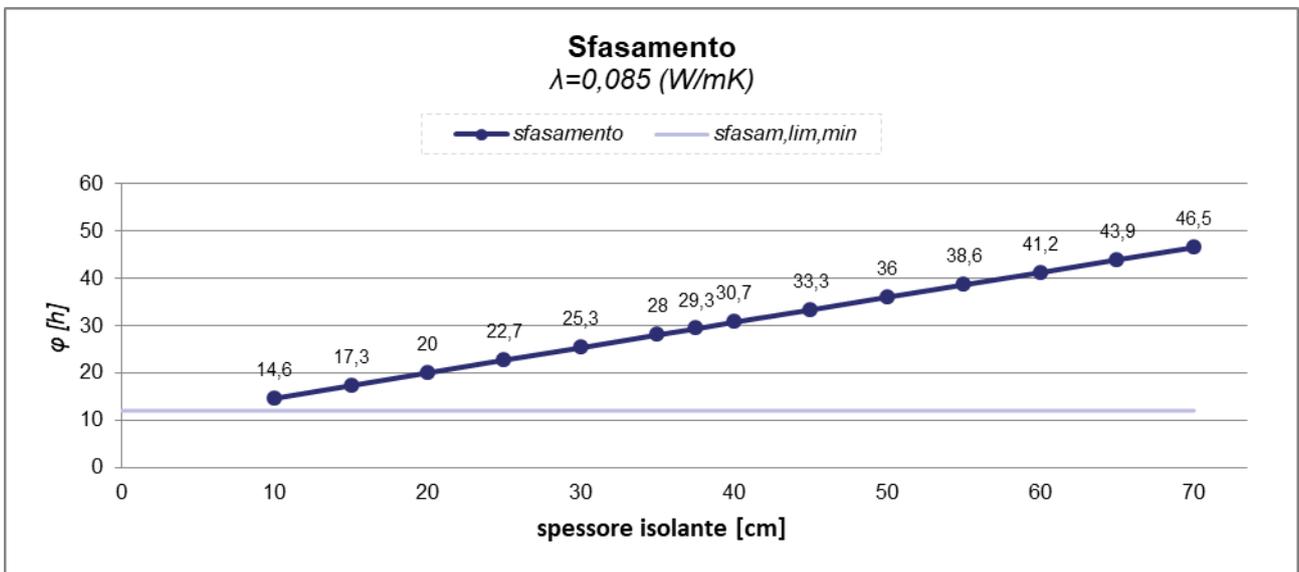
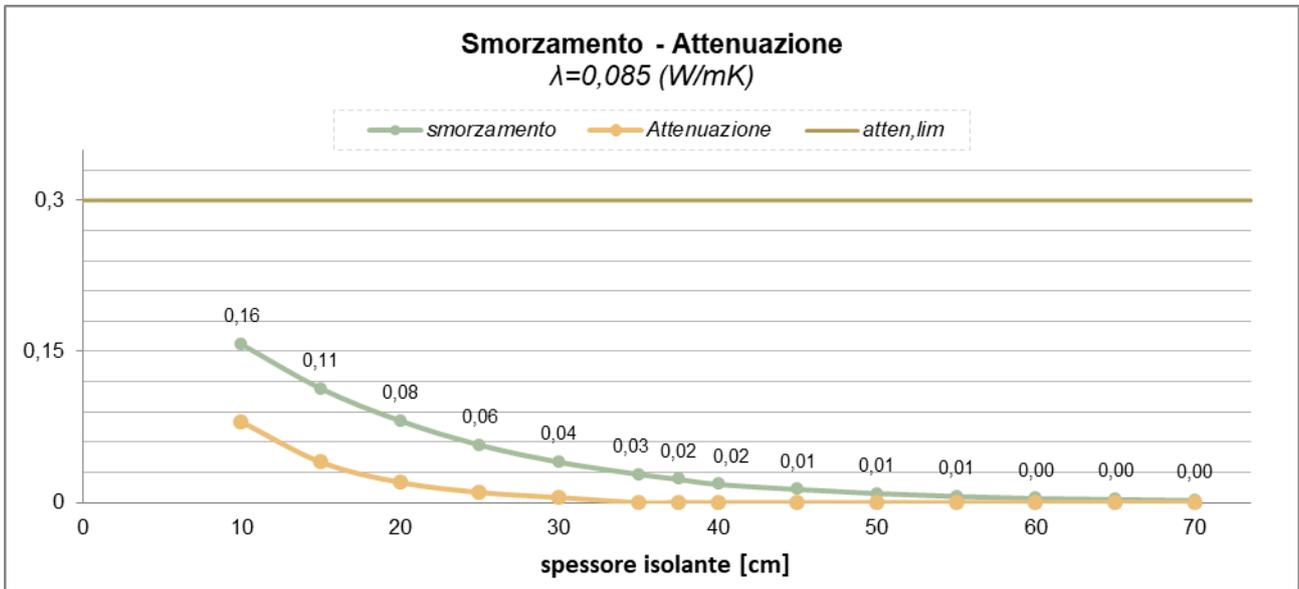
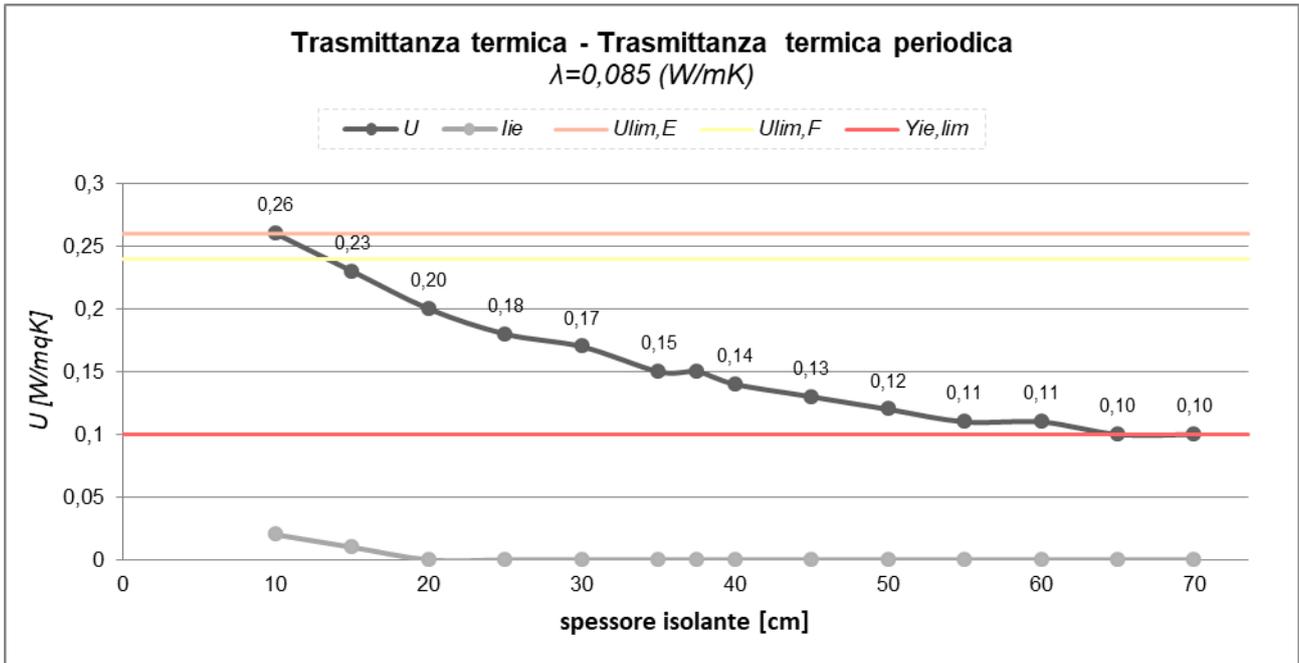
Parametri dinamici e stazionari funzione dello spessore dello strato isolante ($\lambda=0,085$ W/mK, 24 h)

Spessore str.portante c/ cippato [cm]	Spessore totale parete [cm]	Resistenza termica parete [m ² K/W]	Resistenza termica str.portante c/ cippato [m ² K/W]	Resistenza termica restanti materiali [m ² K/W]	Trasmittanza termica parete [W/m ² K]	Trasmittanza termica str.portante c/ cippato [W/m ² K]	Trasmittanza termica periodica parete [W/m ² K]	Sfasamento parete [h]	Ammetenza parete [W/m ² K]	Fattore di attenuazione parete [-]	Fattore di smorzamento parete [-]
10	27,5	3,85	1,81	2,035	0,26	0,55	0,02	14,6	2,12	0,08	0,157
15	32,5	4,35	2,31		0,23	0,43	0,01	17,3	2,11	0,04	0,113
20	37,5	5,00	2,97		0,20	0,34	0,00	20	2,11	0,02	0,081
25	42,5	5,56	3,52		0,18	0,28	0,00	22,7	2,11	0,01	0,057
30	47,5	5,88	3,85		0,17	0,26	0,00	25,3	2,11	0,01	0,040
35	52,5	6,67	4,63		0,15	0,22	0,00	28	2,11	0,00	0,028
37,5	55	6,67	4,63		0,15	0,22	0,00	29,3	2,11	0,00	0,023
40	57,5	7,14	5,11		0,14	0,20	0,00	30,7	2,11	0,00	0,018
45	62,5	7,69	5,66		0,13	0,18	0,00	33,3	2,11	0,00	0,013
50	67,5	8,33	6,30		0,12	0,16	0,00	36	2,11	0,00	0,009
55	72,5	9,09	7,06		0,11	0,14	0,00	38,6	2,11	0,00	0,006
60	77,5	9,09	7,06		0,11	0,14	0,00	41,2	2,11	0,00	0,004
65	82,5	10,00	7,97		0,10	0,13	0,00	43,9	2,11	0,00	0,003
70	87,5	10,00	7,97		0,10	0,13	0,00	46,5	2,11	0,00	0,002

LEGENDA

zona climatica	U _{rif} [W/m ² K]
E	0,26
F	0,24

Tabella 23: Parametri relativi ad una parete verticale in telaio di legno con cappotto e controparete isolata per valori di $\lambda=0,085$ [W/mK] (Fonte: elaborazione personale)



Grafici 3: Grafici dei parametri termici analizzati e relativi valori limite (Fonte: elaborazione personale)

STRUTTURA VERTICALE ESTERNA CON CAPPOTTO E COIBENTE IN CONTROPARETE

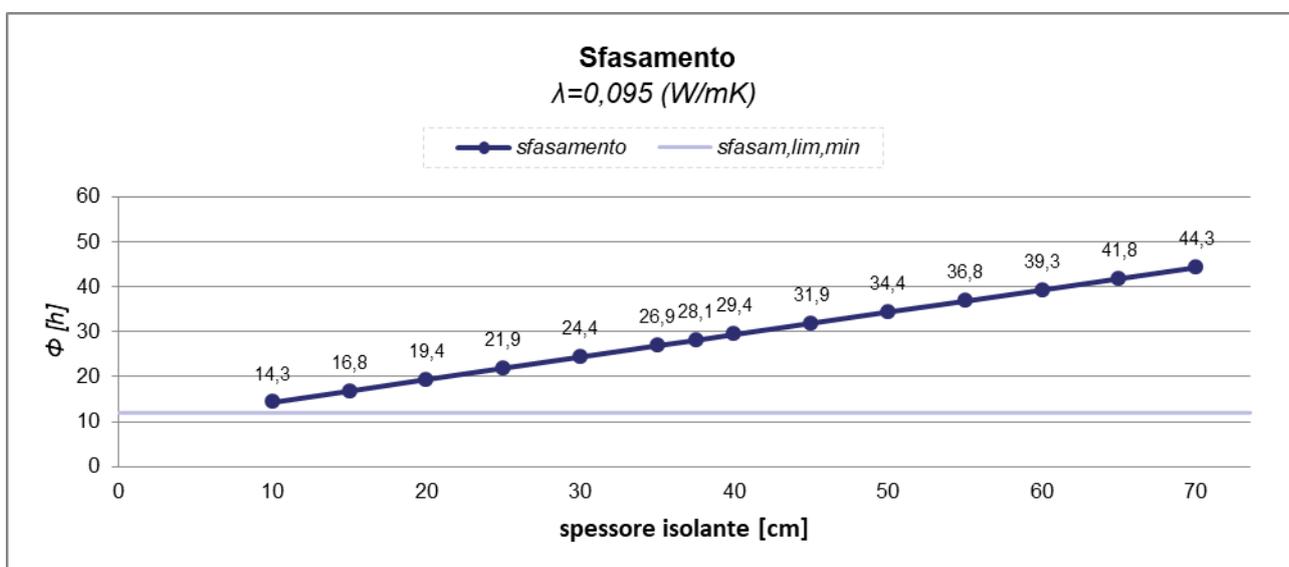
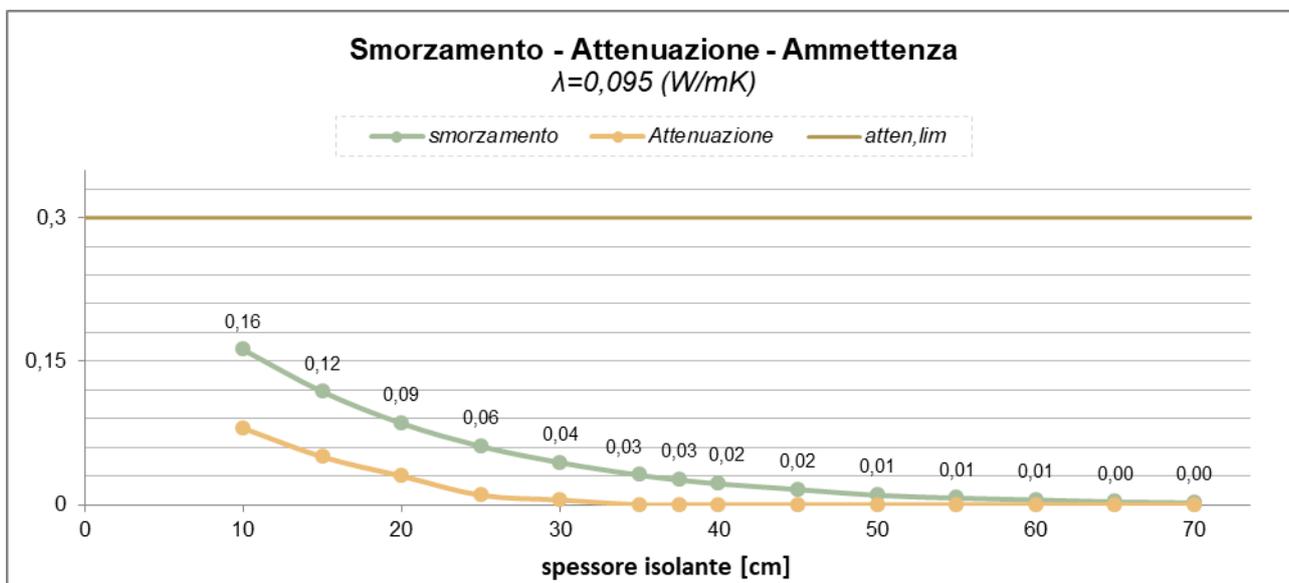
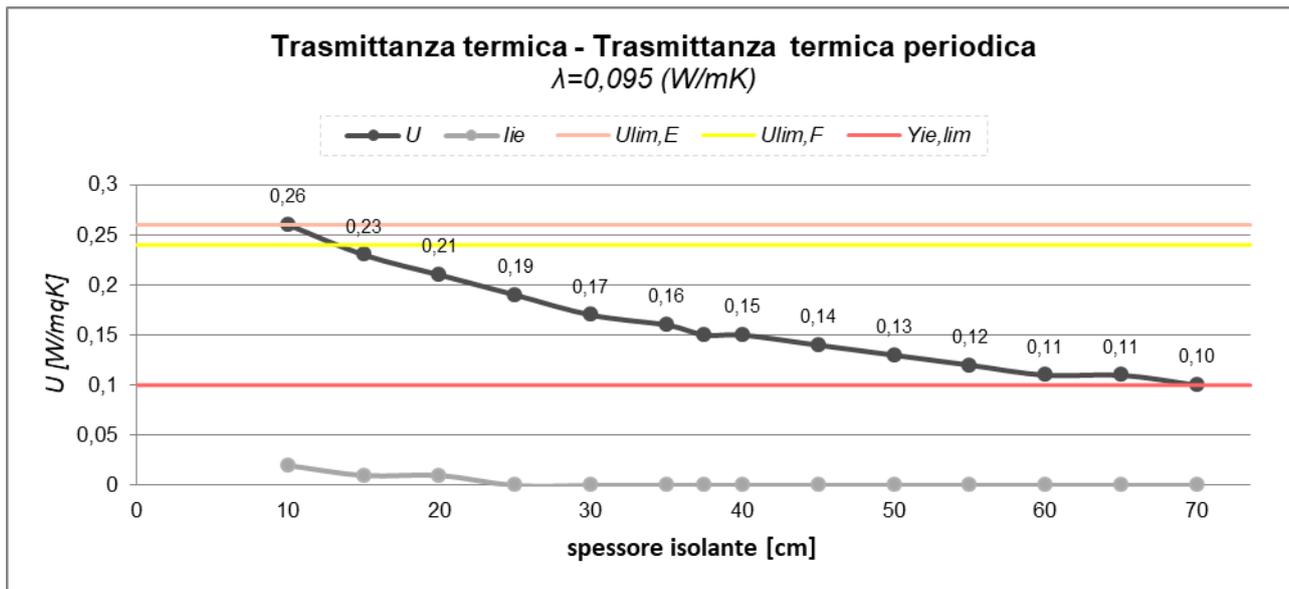
Parametri dinamici e stazionari funzione dello spessore dello strato isolante ($\lambda=0,095$ W/mK, 24 h)

Spessore str.portante c/ cippato [cm]	Spessore totale parete [cm]	Resistenza termica parete [m^2K/W]	Resistenza termica str.portante c/ cippato [m^2K/W]	Resistenza termica restanti materiali [m^2K/W]	Trasmittanza termica parete [W/m^2K]	Trasmittanza termica str.portante c/ cippato [W/m^2K]	Trasmittanza termica periodica parete [W/m^2K]	Sfasamento parete [h]	Ammetenza parete [W/m^2K]	Fattore di attenuazione parete [-]	Fattore di smorzamento parete [-]
10	27,5	3,85	1,81	2,035	0,26	0,55	0,02	14,3	2,11	0,08	0,162
15	32,5	4,35	2,31		0,23	0,43	0,01	16,8	2,11	0,05	0,118
20	37,5	4,76	2,73		0,21	0,37	0,01	19,4	2,11	0,03	0,085
25	42,5	5,26	3,23		0,19	0,31	0,00	21,9	2,11	0,01	0,061
30	47,5	5,88	3,85		0,17	0,26	0,00	24,4	2,11	0,01	0,044
35	52,5	6,25	4,22		0,16	0,24	0,00	26,9	2,11	0,00	0,031
37,5	55	6,67	4,63		0,15	0,22	0,00	28,1	2,11	0,00	0,026
40	57,5	6,67	4,63		0,15	0,22	0,00	29,4	2,11	0,00	0,022
45	62,5	7,14	5,11		0,14	0,20	0,00	31,9	2,11	0,00	0,016
50	67,5	7,69	5,66		0,13	0,18	0,00	34,4	2,11	0,00	0,010
55	72,5	8,33	6,30		0,12	0,16	0,00	36,8	2,11	0,00	0,007
60	77,5	9,09	7,06		0,11	0,14	0,00	39,3	2,11	0,00	0,005
65	82,5	9,09	7,06		0,11	0,14	0,00	41,8	2,11	0,00	0,003
70	87,5	10,00	7,97		0,10	0,13	0,00	44,3	2,11	0,00	0,002

LEGENDA

zona climatica	U_{rif} [W/m^2K]
E	0,26
F	0,24

Tabella 24: Parametri relativi ad una parete verticale in telaio di legno con cappotto e controparete isolata per valori di $\lambda=0,095$ [W/mK] (Fonte: elaborazione personale)



Grafici 4: Grafici dei parametri termici analizzati e relativi valori limite (Fonte: elaborazione personale)

La stessa analisi (per valori di conducibilità termica del cippato pari a $\lambda=0,085$ W/mK) è stata effettuata per valori di trasmittanza termica della parete più prossimi al limite stabilito per strutture verticali dal DM requisiti minimi ($U=0,24$ W/m²K, zona climatica F), sostituendo al pannello in fibra di legno AGEPAN DWD un perlinato in larice dello spessore di 22 mm .

TAVOLATO DI LARICE												
(s=22 mm ; $\lambda=0,130$ W/mK; $\rho=500$ kg/mc; $\mu=5$)												
S_{L+C} [cm]	S_{tot} [cm]	R_p [m ² K/W]	R_{L+C} [m ² K/W]	R_{al} [m ² K/W]	U_p [W/m ² K]	U_{L+C} [W/m ² K]	Y_{ie} [W/m ² K]	Sfas. [h]	Ammet. [W/m ² K]	Atten. [-]	Smorz. [-]	
15	31,7	4,17	2,30	1,871	0,24	0,44	0,01	16,3	2,11	0,06	0,147	
20	36,7	4,76	2,89		0,21	0,35	0,01	19,0	2,11	0,03	0,106	
S_{L+C} : spessore del telaio in legno con isolamento in cippato S_{tot} : spessore della parete R_p : resistenza termica della parete R_{L+C} : resistenza termica del telaio in legno con isolamento in cippato R_{al} : resistenza termica al netto del telaio con isolamento in cippato						U_p : trasmittanza termica della parete U_{L+C} : trasmittanza termica del telaio in legno con isolamento in cippato Y_{ie} : trasmittanza termica periodica						

Tabella 25 : Valori ottenuti con il tavolato in larice in sostituzione al pannello in fibra di legno (Fonte: elaborazione personale)

Dai risultati ottenuti emerge con evidenza che, a partire da spessori esigui di cippato all'interno della struttura in telaio, si raggiungono prestazioni termiche ottimali sia in termini di parametri stazionari che in regime dinamico.

Inoltre all'interno della stratigrafia analizzata, al variare della conducibilità termica del cippato, non si sono rilevati significativi peggioramenti delle caratteristiche prestazionali della struttura complessiva.

Lo sfasamento emerso dall'analisi identifica un alto livello prestazionale in quanto i valori ottenuti restano sempre sopra le 12 ore aumentando in rapporto allo spessore di coibente considerato. Si è ritenuto perciò opportuno svolgere un'analisi valutativa di carattere economico-funzionale eliminando il cappotto esterno e la coibentazione in controparete, per analizzare più precisamente le potenzialità del singolo materiale.

5.3 Analisi dei risultati ottenuti per una struttura verticale esterna senza cappotto e senza coibente in controparete

Dalle considerazioni sopra effettuate si può perciò avanzare un ragionamento aggiuntivo, finalizzato alla diminuzione degli spessori finali del pacchetto costruttivo e dei costi derivanti dal cappotto esterno .

Nelle tabelle seguenti sono riportati i risultati derivanti dall'analisi di una parete verticale esterna con analoga struttura della precedente, privata sia dei pannelli in sughero che del coibente presente nella controparete impiantistica .



Figura 52: Parete verticale opaca priva di isolamento esterno e in controparete (Fonte: Elaborazione personale)

STRUTTURA VERTICALE ESTERNA SENZA CAPPOTTO E SENZA COIBENTE IN CONTROPARETE

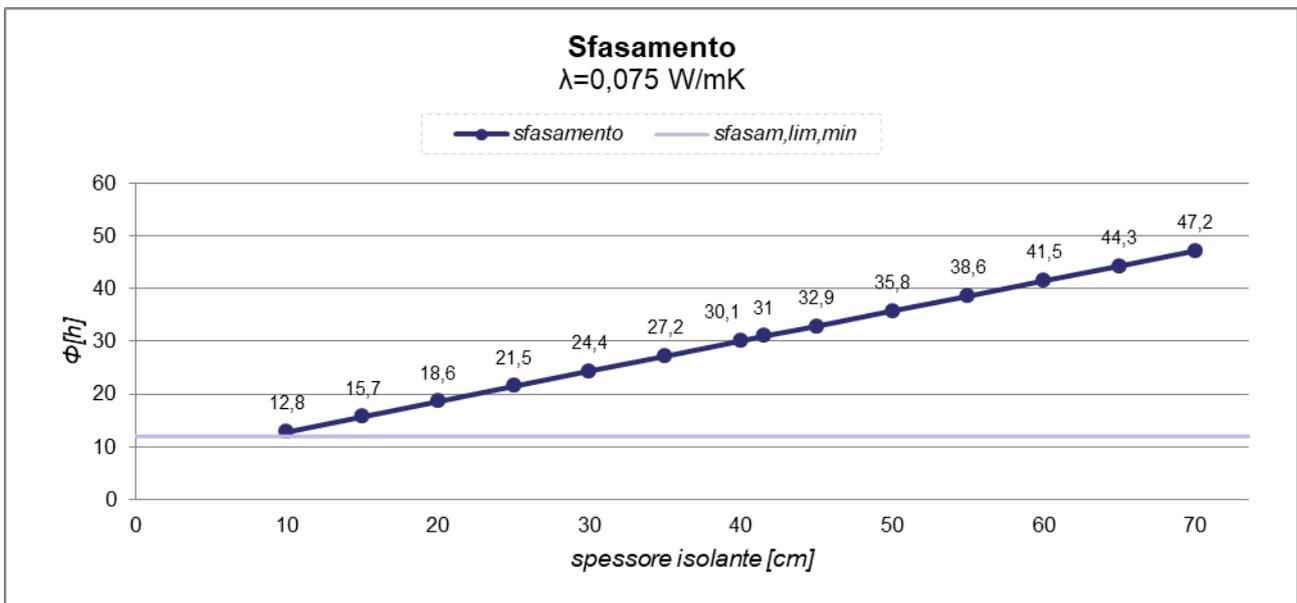
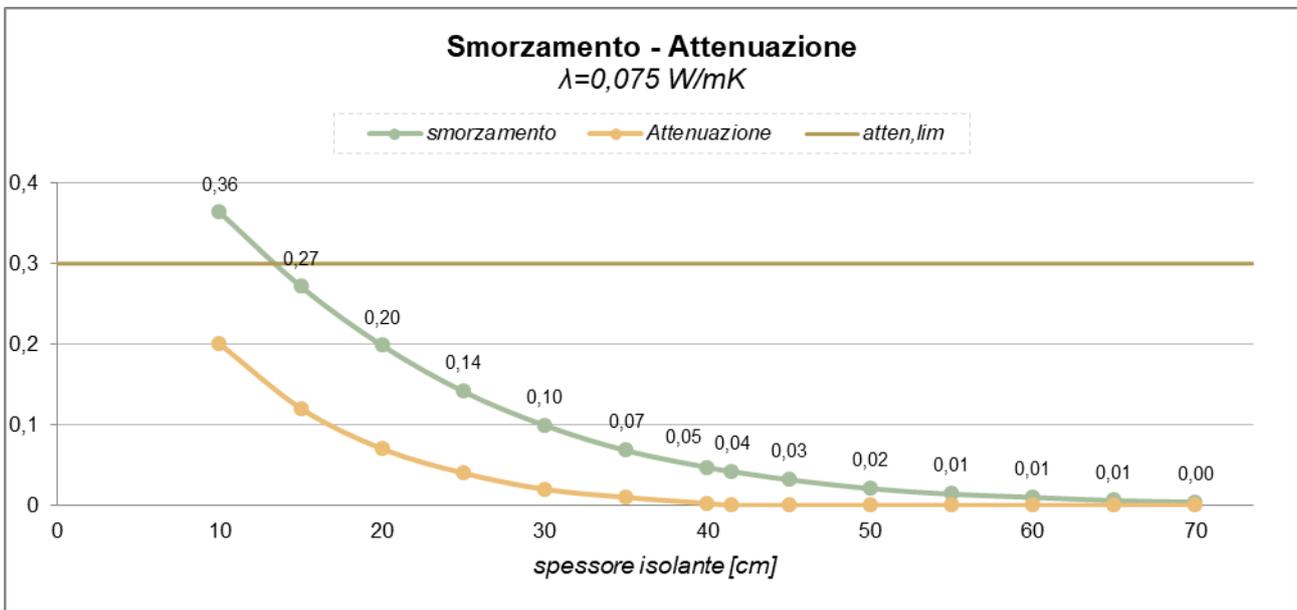
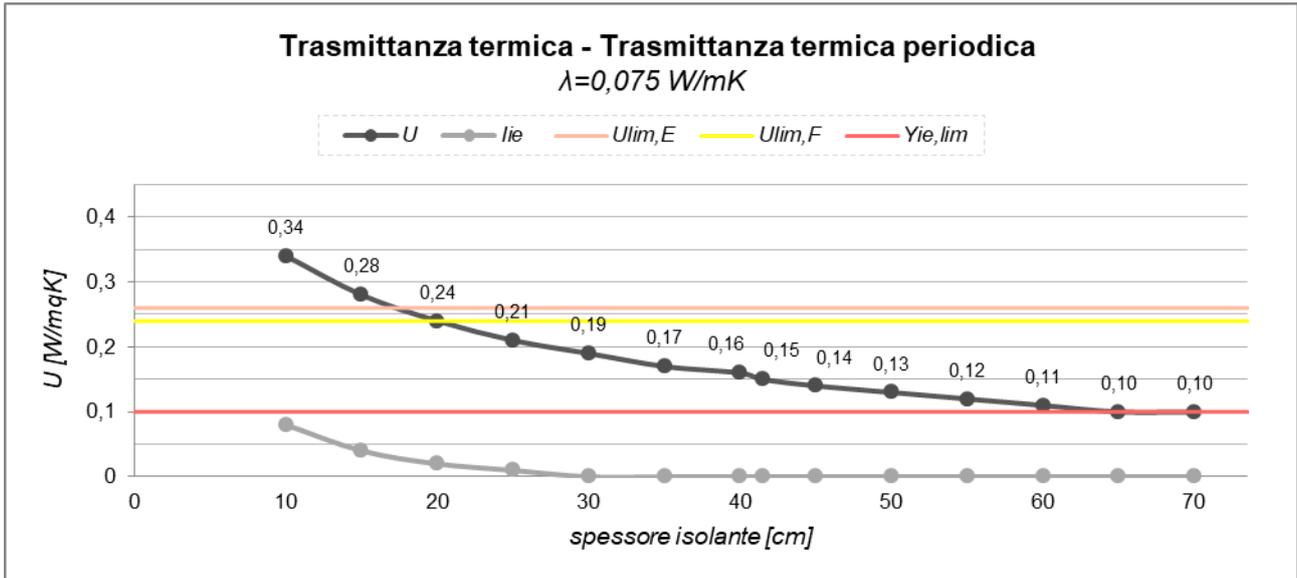
Parametri dinamici e stazionari funzione dello spessore dello strato isolante ($\lambda=0,075$ W/mK, 24 h)

Spessore str.portante c/ cippato [cm]	Spessore totale parete [cm]	Resistenza termica parete [m^2K/W]	Resistenza termica str.portante c/ cippato [m^2K/W]	Resistenza termica restanti materiali [m^2K/W]	Trasmittanza termica parete [W/m^2K]	Trasmittanza termica str.portante c/ cippato [W/m^2K]	Trasmittanza termica periodica parete [W/m^2K]	Sfasamento parete [h]	Ammettanza parete [W/m^2K]	Fattore di attenuazione parete [-]	Fattore di smorzamento parete [-]
10	23,5	2,94	2,29	0,650	0,34	0,44	0,08	12,8	2,81	0,20	0,363
15	28,5	3,57	2,92		0,28	0,34	0,04	15,7	2,81	0,12	0,271
20	33,5	4,17	3,52		0,24	0,28	0,02	18,6	2,81	0,07	0,198
25	38,5	4,76	4,11		0,21	0,24	0,01	21,5	2,81	0,04	0,141
30	43,5	5,26	4,61		0,19	0,22	0,00	24,4	2,81	0,02	0,099
35	48,5	5,88	5,23		0,17	0,19	0,00	27,2	2,81	0,01	0,068
40	53,5	6,25	5,60		0,16	0,18	0,00	30,1	2,81	0,01	0,047
41,5	55	6,67	6,02		0,15	0,17	0,00	31	2,81	0,00	0,042
45	58,5	7,14	6,49		0,14	0,15	0,00	32,9	2,81	0,00	0,032
50	63,5	7,69	7,04		0,13	0,14	0,00	35,8	2,81	0,00	0,021
55	68,5	8,33	7,68		0,12	0,13	0,00	38,6	2,81	0,00	0,014
60	73,5	9,09	8,44		0,11	0,12	0,00	41,5	2,81	0,00	0,010
65	78,5	10,00	9,35		0,10	0,11	0,00	44,3	2,81	0,00	0,006
70	83,5	10,00	9,35		0,10	0,11	0,00	47,2	2,81	0,00	0,004

LEGENDA

zona climatica	U_{rif} [W/m^2K]
E	0,26
F	0,24

Tabella 26: Parametri relativi ad una parete verticale in telaio di legno senza cappotto e controparete isolata per valori di $\lambda=0,075$ [W/mK] (Fonte: elaborazione personale)



76 Grafici 5: Grafici dei parametri termici analizzati e relativi valori limite (Fonte: elaborazione personale)

STRUTTURA VERTICALE ESTERNA SENZA CAPPOTTO E SENZA COIBENTE IN CONTROPARETE

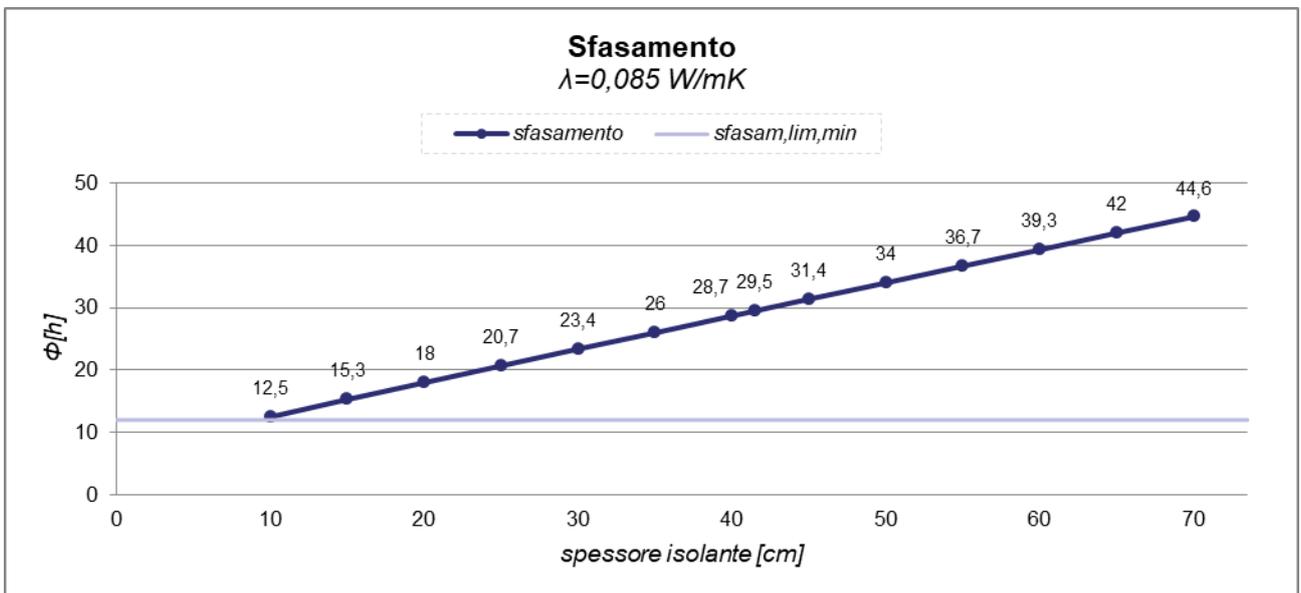
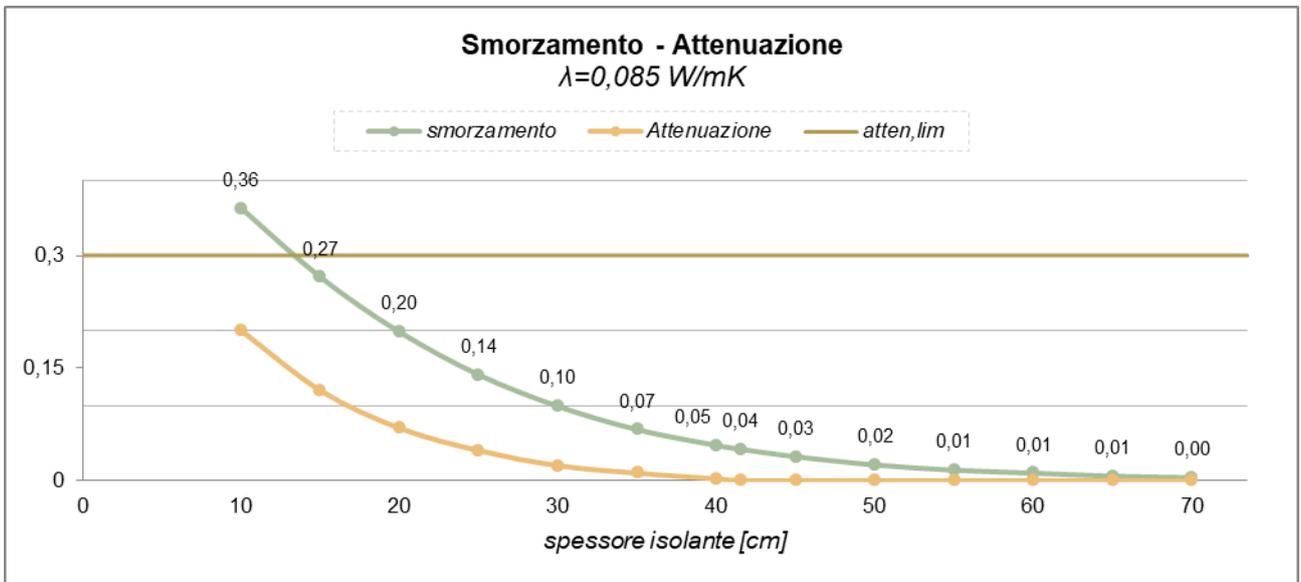
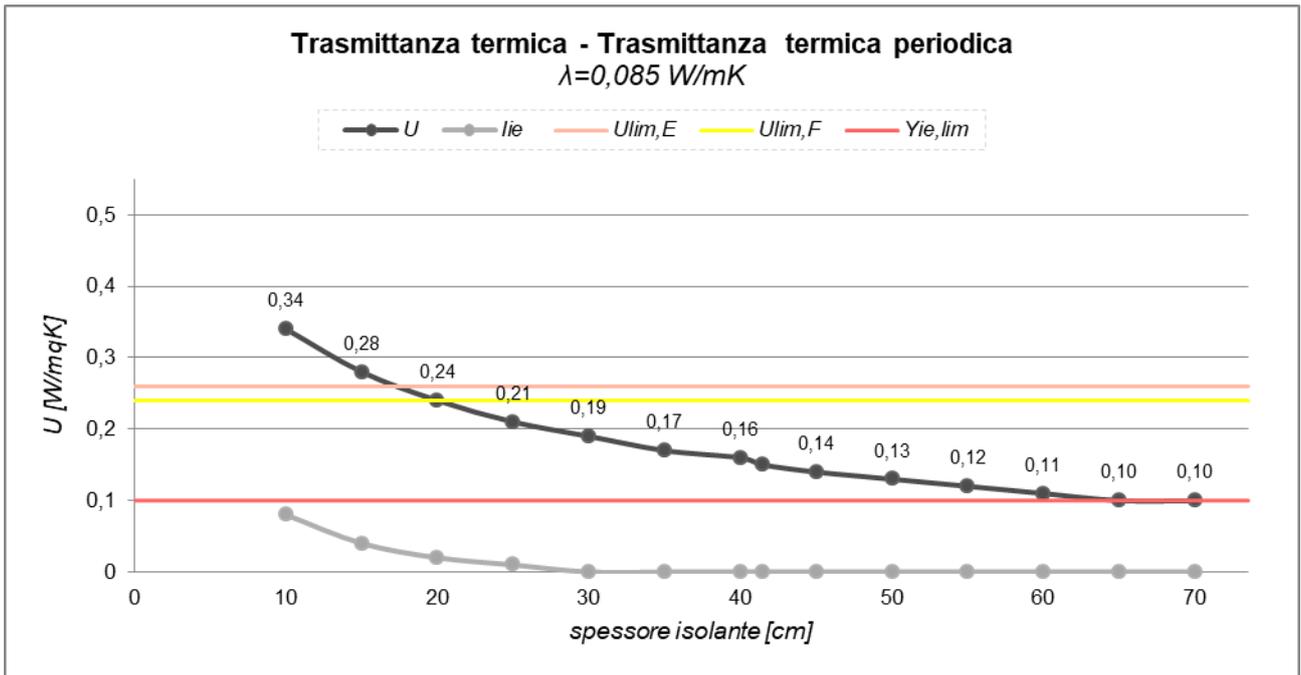
Parametri dinamici e stazionari funzione dello spessore dello strato isolante ($\lambda=0,085$ W/mK, 24 h)

Spessore str.portante c/ cippato [cm]	Spessore totale parete [cm]	Resistenza termica parete [m ² K/W]	Resistenza termica str.portante c/ cippato [m ² K/W]	Resistenza termica restanti materiali [m ² K/W]	Trasmittanza termica parete [W/m ² K]	Trasmittanza termica str.portante c/ cippato [W/m ² K]	Trasmittanza termica periodica parete [W/m ² K]	Sfasamento parete [h]	Ammetenza parete [W/m ² K]	Fattore di attenuazione parete [-]	Fattore di smorzamento parete [-]
10	23,5	2,86	2,21	0,650	0,35	0,45	0,09	12,5	2,81	0,21	0,374
15	28,5	3,33	2,68		0,30	0,37	0,04	15,3	2,8	0,13	0,281
20	33,5	3,85	3,20		0,26	0,31	0,02	18	2,8	0,07	0,209
25	38,5	4,35	3,70		0,23	0,27	0,01	20,7	2,8	0,04	0,151
30	43,5	5,00	4,35		0,20	0,23	0,01	23,4	2,8	0,02	0,108
35	48,5	5,56	4,91		0,18	0,20	0,00	26	2,8	0,01	0,076
40	53,5	5,56	4,91		0,18	0,20	0,00	28,7	2,8	0,01	0,053
41,5	55	5,88	5,23		0,17	0,19	0,00	29,5	2,8	0,01	0,048
45	58,5	6,67	6,02		0,15	0,17	0,00	31,4	2,8	0,00	0,037
50	63,5	7,14	6,49		0,14	0,15	0,00	34	2,8	0,00	0,025
55	68,5	7,69	7,04		0,13	0,14	0,00	36,7	2,8	0,00	0,017
60	73,5	8,33	7,68		0,12	0,13	0,00	39,3	2,8	0,00	0,012
65	78,5	9,09	8,44		0,11	0,12	0,00	42	2,8	0,00	0,008
70	83,5	9,09	8,44		0,11	0,12	0,00	44,6	2,8	0,00	0,005

LEGENDA

zona climatica	U _{rif} [W/m ² K]
E	0,26
F	0,24

Tabella 27: Parametri relativi ad una parete verticale in telaio di legno senza cappotto e controparete isolata per valori di $\lambda=0,085$ [W/mK] (Fonte: elaborazione personale)



78 Grafici 6: Grafici dei parametri termici analizzati e relativi valori limite (Fonte: elaborazione personale)

STRUTTURA VERTICALE ESTERNA SENZA CAPPOTTO E SENZA COIBENTE IN CONTROPARETE

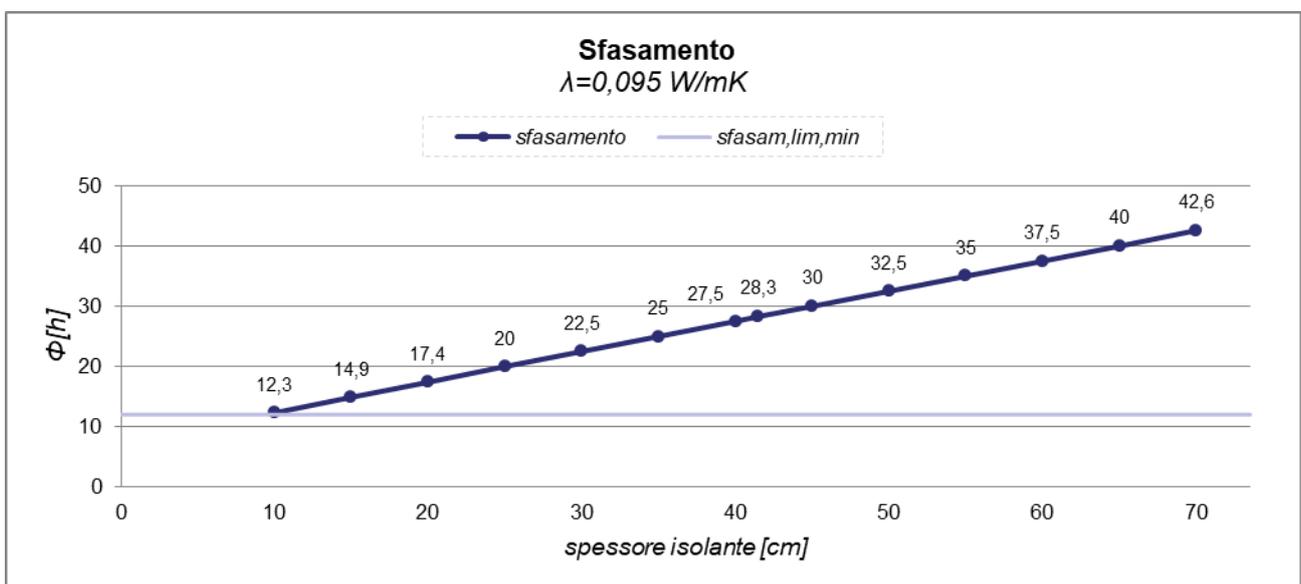
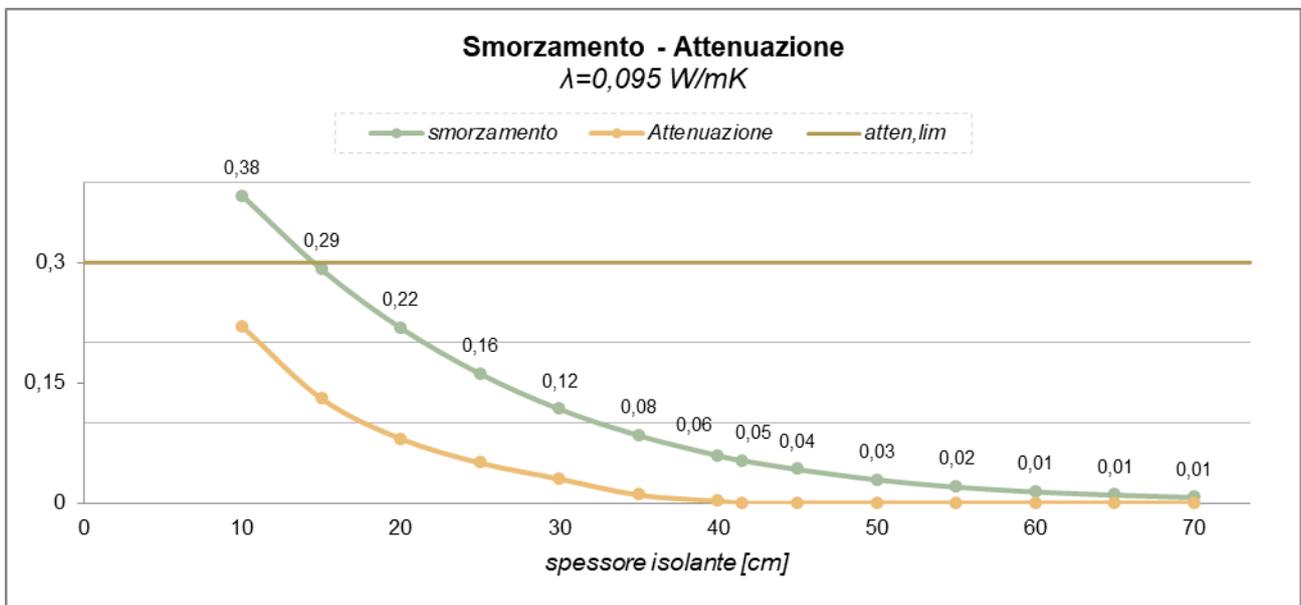
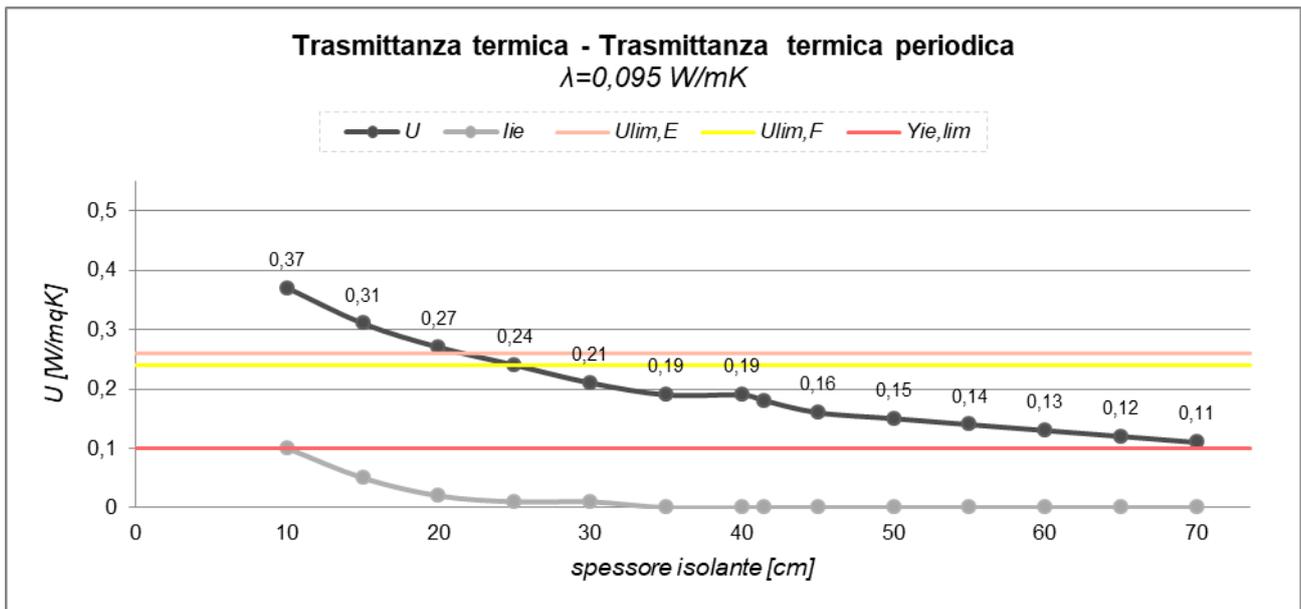
Parametri dinamici e stazionari funzione dello spessore dello strato isolante ($\lambda=0,095$ W/mK, 24 h)

Spessore str.portante c/ cippato [cm]	Spessore totale parete [cm]	Resistenza termica parete [m ² K/W]	Resistenza termica str.portante c/ cippato [m ² K/W]	Resistenza termica restanti materiali [m ² K/W]	Trasmittanza termica parete [W/m ² K]	Trasmittanza termica str.portante c/ cippato [W/m ² K]	Trasmittanza termica periodica parete [W/m ² K]	Sfasamento parete [h]	Ammetenza parete [W/m ² K]	Fattore di attenuazione parete [-]	Fattore di smorzamento parete [-]
10	23,5	2,70	2,05	0,650	0,37	0,49	0,1	12,3	2,8	0,22	0,383
15	28,5	3,23	2,58		0,31	0,39	0,05	14,9	2,8	0,13	0,291
20	33,5	3,70	3,05		0,27	0,33	0,02	17,4	2,8	0,08	0,218
25	38,5	4,17	3,52		0,24	0,28	0,01	20	2,8	0,05	0,161
30	43,5	4,76	4,11		0,21	0,24	0,01	22,5	2,8	0,03	0,117
35	48,5	5,26	4,61		0,19	0,22	0,00	25	2,8	0,01	0,084
40	53,5	5,26	4,61		0,19	0,22	0,00	27,5	2,8	0,01	0,059
41,5	55	5,56	4,91		0,18	0,20	0,00	28,3	2,8	0,00	0,053
45	58,5	6,25	5,60		0,16	0,18	0,00	30	2,8	0,00	0,042
50	63,5	6,67	6,02		0,15	0,17	0,00	32,5	2,8	0,00	0,029
55	68,5	7,14	6,49		0,14	0,15	0,00	35	2,8	0,00	0,020
60	73,5	7,69	7,04		0,13	0,14	0,00	37,5	2,8	0,00	0,014
65	78,5	8,33	7,68		0,12	0,13	0,00	40	2,8	0,00	0,010
70	83,5	9,09	8,44		0,11	0,12	0,00	42,6	2,8	0,00	0,007

LEGENDA

zona climatica	U _{rif} [W/m ² K]
E	0,26
F	0,24

Tabella 28: Parametri relativi ad una parete verticale in telaio di legno senza cappotto e controparete isolata per valori di $\lambda=0,095$ [W/mK] (Fonte: elaborazione personale)



Grafici 6: Grafici dei parametri termici analizzati e relativi valori limite (Fonte: elaborazione personale)

Analogamente all'analisi effettuata in presenza di cappotto ed isolante in controparete è stata ipotizzata, per i valori più prossimi al limite di trasmittanza termica previsto dal DM requisiti minimi in zona climatica F, la sostituzione del pannello AGEPAN DWD con un tavolato in legno dello spessore di 22 mm .

TAVOLATO DI LARICE											
(s=22 mm ; $\lambda=0,130$ W/mK; $\rho=500$ kg/mc; $\mu=5$)											
S_{L+C} [cm]	S_{tot} [cm]	R_p [m ² K/W]	R_{L+C} [m ² K/W]	R_{al} [m ² K/W]	U_p [W/m ² K]	U_{L+C} [W/m ² K]	Y_{ie} [W/m ² K]	Sfasam. [h]	Ammet. [W/m ² K]	Atten. [-]	Smorz. [-]
30	42,7	4,35	3,86	0,486	0,23	0,26	0,01	22,3	2,81	0,03	0,129
35	47,7	4,76	4,28		0,21	0,23	0,00	24,9	2,81	0,02	0,091
S_{L+C} : spessore del telaio in legno con isolamento in cippato S_{tot} : spessore della parete R_p : resistenza termica della parete R_{L+C} : resistenza termica del telaio in legno con isolamento in cippato R_{al} : resistenza termica al netto del telaio con isolamento in cippato						U_p : trasmittanza termica della parete U_{L+C} : trasmittanza termica del telaio in legno con isolamento in cippato Y_{ie} : trasmittanza termica periodica					

Tabella 28 : Valori ottenuti con tavolato in larice in sostituzione al pannello in fibra di legno
(Fonte: elaborazione personale)

5.4 Sintesi ed interpretazione conclusiva sui risultati ottenuti

Il confronto impostato sulle due stratigrafie esposte permette di effettuare alcune considerazioni di natura concettuale. Il cippato di legno può sostenere la coibentazione termica di una parete verticale autonomamente già da spessori esigui. A partire da 25 cm infatti la trasmittanza termica U rientra nei limiti di legge previsti per le zone climatiche più restrittive e i parametri dinamici risiedono ampiamente nei valori limite. Lo sfasamento, per valori accettabili di trasmittanza termica, supera le 20 ore assicurando il benessere climatico estivo senza raggiungere pareti di massa troppo elevate.

STRUTTURA VERTICALE ESTERNA CON CAPPOTTO E CONTROPARETE COIBENTATA							
s_{L+C} [cm]	s_{tot} [cm]	R_D [m ² K/W]	U_D [W/m ² K]	Y_e [W/m ² K]	sfasamento parete [h]	Fattore di attenuazione parete [W/m ² K]	Fattore di smorzamento parete [-]
$\lambda=0,075$ W/mK							
15	32,5	4,55	0,22	0,01	17,8	0,04	0,108
$\lambda=0,085$ W/mK							
15	32,5	4,35	0,23	0,01	17,3	0,04	0,113
$\lambda=0,095$ W/mK							
15	32,5	4,35	0,23	0,01	16,8	0,05	0,118
STRUTTURA VERTICALE ESTERNA SENZA CAPPOTTO E CONTROPARETE COIBENTATA							
s_{L+C} [cm]	s_{tot} [cm]	R_D [m ² K/W]	U_D [W/m ² K]	Y_e [W/m ² K]	sfasamento parete [h]	Fattore di attenuazione parete [W/m ² K]	Fattore di smorzamento parete [-]
$\lambda=0,075$ W/mK							
25	38,5	4,76	0,21	0,01	21,5	0,04	0,141
$\lambda=0,085$ W/mK							
30	43,5	5,00	0,20	0,01	23,4	0,02	0,108
$\lambda=0,095$ W/mK							
30	43,5	4,76	0,21	0,01	22,5	0,03	0,117

LEGENDA	
s_{L+C} : spessore del telaio in legno con isolamento in cippato	
s_{tot} : spessore della parete	
R_D : resistenza termica della parete	
U_D : trasmittanza termica della parete	
Y_e : trasmittanza termica periodica	

LEGENDA	
zona climatica	U_{ref} [W/m ² K]
E	0,26
F	0,24

Tabella 29: Riassunto dei parametri stazionari e dinamici di una parete perimetrale. Valori limite di $U_{rif,F}$ (Fonte: elaborazione personale)

Confrontando le due diverse configurazioni appare evidente che l'incremento di spessore totale della parete è dell'ordine di pochi centimetri ed essendo i parametri determinati più che accettabili ci si può orientare verso una soluzione progettuale più semplificata.

Questa scelta comporta sicuramente un certo vantaggio economico in quanto fornitura e posa del cappotto esterno rappresentano generalmente una spesa rilevante nelle forniture di materiale da costruzione, nonché nelle successive manutenzioni.

La sostituzione del pannello AGEPAN con un tavolato in larice¹⁶ in entrambe le soluzioni non invalida le prestazioni del pacchetto costruttivo e può essere ritenuta una valida alternativa alla stratigrafia precedente.

STRUTTURA VERTICALE ESTERNA CON CAPPOTTO E CONTROPARETE COIBENTATA							
Tavolato in larice ($s=22\text{ mm}$; $\lambda=0,130\text{ W/mK}$; $\rho=500\text{ kg/mc}$; $\mu=5$)							
s_{L+C} [cm]	s_{tot} [cm]	R_p [m ² K/W]	U_p [W/m ² K]	Y_{ie} [W/m ² K]	sfasamento parete [h]	Fattore di attenuazione parete [W/m ² K]	Fattore di smorzamento parete [-]
15	31,7	4,17	0,24	0,01	16,3	0,06	0,147
STRUTTURA VERTICALE ESTERNA SENZA CAPPOTTO E CONTROPARETE COIBENTATA							
s_{L+C} [cm]	s_{tot} [cm]	R_p [m ² K/W]	U_p [W/m ² K]	Y_{ie} [W/m ² K]	sfasamento parete [h]	Fattore di attenuazione parete [W/m ² K]	Fattore di smorzamento parete [-]
30	42,7	4,35	0,23	0,01	22,3	0,03	0,129

Tabella 30: Riassunto dei parametri stazionari e dinamici con un tavolato in larice. Raggiungimento del $U_{rif,F}$ (Fonte: elaborazione personale)

Le simulazioni riportate nei paragrafi precedenti evidenziano come sia possibile ottenere stratigrafie con prestazioni invernali buone contestualmente ad ottime *performances* in regime dinamico, quindi relative al comportamento estivo. In quest'ottica si può valutare che la massima valorizzazione dell'uso di questo tipo di coibente possa ottenersi in climi caldi o temperati, benché non sia escluso l'impiego in climi freddi.

¹⁶ Si ricorda che i valori di riferimento relativi al cippato di legno per questa soluzione prevedono un $\lambda=0,085\text{ W/mK}$.

CONCLUSIONI

Gli studi e le applicazioni riferite alla letteratura hanno permesso l'individuazione di una molteplicità di caratteristiche utili ad inquadrare il materiale da analizzare, benché esse non possano essere considerate né esaustive né consolidate per la caratterizzazione del materiale. I risultati delle sperimentazioni sembrano evidenziare un legame tra la conducibilità termica, alla densità della miscela in rapporto alla granulometria del cippato selezionato. Anche l'umidità relativa sembra avere influenza sulle prestazioni termiche, in modo variabile a seconda dell'essenza arborea analizzata.

Non risulta possibile chiarire l'effettiva influenza della forma della fibra sulla conducibilità, stabilita la notevole variabilità dei risultati e la non sistematicità del materiale oggetto di prova. Tuttavia dai dati disponibili sembra trasparire una migliore prestazione per il materiale ottenuto da piattatura ("riccioli") o con fibre lunghe.

Tali valutazioni hanno consentito di limitare del campo della sperimentazione ad applicazioni coerenti con questi fattori, in modo tale da poter eseguire una verifica sperimentale maggiormente mirata.

E' stato costruito un modello fisico di parete attraverso il quale si è potuta accertare la densità reale ottenibile con alcune granulometrie di cippato reperibili.

Ciò ha permesso di indirizzare ulteriormente la definizione dei campioni di prova.

Le prove in laboratorio eseguite su piastra calda hanno restituito valori di conducibilità termica in linea con le sperimentazioni rilevate in letteratura senza però rimarcare, specialmente nel caso della corteccia, particolari distinzioni prestazionali dipendenti dall'umidità relativa intrinseca della specie arborea considerata. Questo favorisce indubbiamente la semplicità di produzione delle miscele, disgiungendo la loro composizione dalla disponibilità della singola essenza arborea.

Le possibilità applicative pratiche, nota la caratterizzazione sperimentale del materiale, sono state esplorate analizzando alcune stratigrafie di progetto tramite simulazione numerica.

Dalle analisi effettuate mediante simulazione, i valori di prestazione invernale ottenuti sono risultati tali da evidenziare la possibilità di impiego in accordo con i limiti normativi minimi in tutte le zone climatiche e con ottime prestazioni per climi caldi o temperati.

Discutendo i risultati ottenuti su parametri dinamici relativi al comportamento estivo appare evidente che le stratigrafie proposte sono in grado di fornire prestazioni ottimali con spessori ordinari.

Al variare della conducibilità termica i risultati delle stratigrafie rimangono piuttosto omogenei. Se da una parte ciò può essere interpretabile come indice di svalutazione prestazionale, può consentire dall'altra una notevole semplificazione nel processo di selezione della miscela .

Di fatto non dover creare prodotti estremamente precisi in peso e granulometria, visti i valori di conducibilità simili risulta anche più funzionale nell'ottica della riproduzione di massa del materiale.

Si tratta infatti di puntare sul concetto di produzione locale, con coibenti naturali che restituiscono spessori e valori nella norma e, nel caso in cui venga bypassato il valore di conducibilità, si riceve vantaggio dalla lavorazione meno impegnativa della materia prima (poiché non si presenta la relativa necessità di setacciare e prediligere granulometrie rispetto ad altre).

Il prodotto così definito può trovare largo impiego nel mercato degli elementi prefabbricati ed edifici ad alte prestazioni. Inoltre la disponibilità locale e l'assenza di lavorazione può rendere utilmente impiegabile il materiale anche per situazioni di emergenza (terremoti, alluvioni...), o per strutture temporanee.

Nell'ottica di uno sviluppo futuro, il materiale potrebbe essere migliorato notevolmente aggiungendo prodotti legnosi in pezzature tali da abbassare la densità della miscela finale. Un altro esempio di approfondimento molto interessante potrebbe essere quello della miscelazione del cippato con fibre legnose di altra forma e derivazione: per esempio riccioli di piallatura o fibre lunghe. Occorre però considerare che accanto ad una potenziale ottimizzazione della trasmittanza del materiale tale scenario può produrre maggiore complessità logistica ed organizzativa in filiera.

In generale il processo di rielaborazione dei prodotti di lavorazione può essere inserito all'interno del ciclo di produzione della filiera proiettandosi verso un nuovo modello di generazione fatto d'interconnessioni, in cui gli output di alcune lavorazioni si trasformano in input per altre.

BIBLIOGRAFIA ¹⁷

Pfundstein M., Gellert R., Spitzner M., Rudolphi A., *Insulating materials, Principles, Materials, Applications*, ed. Detail, 2008.

Pubblicazioni online

Porschitz, Hans R., Schwarz, Bernhard, *Wood shavings as insulating material for prefabricated low energy homes*

Pásztor Z., Ronyecz I., *The Thermal Insulation Capacity of Tree Bark*, University of West Hungary, Hungary

Fadai A., Winter W., Gruber M., *Wood based construction for multi-story buildings. the potential of cement bonded wood composites as structural sandwich panels*

Bomberg M., Chrenka G., *Ee9-1 innovative materials: bio-fiber batts and boards*

Sekino N., Kawamura Y., *Binder-less Insulation Panel Made of Wood Shavings for Wooden Frame Houses*

Wang Y., Fukuda H., *Timber chips as the insulation material for energy saving in prefabricated offices*,

Spalt Karl W., Reifsnnyder William E., *Bark characteristics and fire resistance: a literature survey*, Southern forest experiment station forest Service, U. S. department of agriculture in cooperation with school of Forestry, Yale University, 1962

Pasztor Z., Mohácsiné Ronyecz I., Gorbacheva G., Borcsok Z., *The utilization of tree bark*

¹⁷ La bibliografia è stata stilata utilizzando i sistemi di citazione relativi al metodo Harvard .

SITOGRAFIA ESSENZIALE

<https://www.gse.it/> , ultimo accesso : 09/07/2018

<http://www.aielenergia.it> , ultimo accesso : 09/07/2018

<http://www.regione.piemonte.it/> , ultimo accesso : 09/07/2018

<http://www.laforestascl.it>, ultimo accesso : 09/07/2018

RINGRAZIAMENTI

Giunta all'epilogo di questo elaborato, mi preme ringraziare singolarmente coloro i quali hanno contribuito alla sua stesura.

Ringrazio innanzitutto il mio relatore, il professor Carlo Caldera, per la disponibilità e la profonda professionalità dimostrata lungo tutta la redazione della tesi.

Ringrazio i miei correlatori Matteo ed Alberto per avermi affiancata in questo percorso con competenza, affetto ed impegno e trasmettendomi la loro passione ed esperienza nel settore. Il mio ringraziamento non può che estendersi a tutto lo studio AITEC, a Marie e ai ragazzi che vi collaborano. Grazie per il sostegno e la confidenza che mi avete dimostrato.

Ringrazio Giorgio Talachini e tutti i professionisti della soc. coop. La Foresta che hanno collaborato ad effettuare le prove sulle miscele e alla fornitura del materiale, preparando il necessario alle analisi e senza i quali questa tesi non sarebbe potuta esser redatta.

Ringrazio il professor Marco Perino per avermi permesso di compiere le prove necessarie alla caratterizzazione della miscela presso i laboratori del DENERG, per aver condiviso la propria conoscenza in materia e la sua professionalità.

A tal proposito ringrazio il dottorando Francesco Isaia e gli altri ragazzi del dipartimento di Energetica per avermi affiancata durante tutte le prove in laboratorio, per la pazienza e rapidità di trasmissione dei dati ricevuti dalle apparecchiature.

Il resto dei ringraziamenti sono diretti a tutti coloro che mi hanno sostenuta, affiancata ed accompagnata in questi anni nel proseguimento di questo percorso.

I miei amici, il mio ragazzo, i miei parenti ed entrambi i miei genitori, anche se da due "punti di vista" un po' diversi.

Senza di voi tutto questo non sarebbe stato possibile.

INDICE ALLEGATI

ALLEGATO 1 : Schede riassuntive delle prove con il metodo della piastra calda con anello di guardiaI

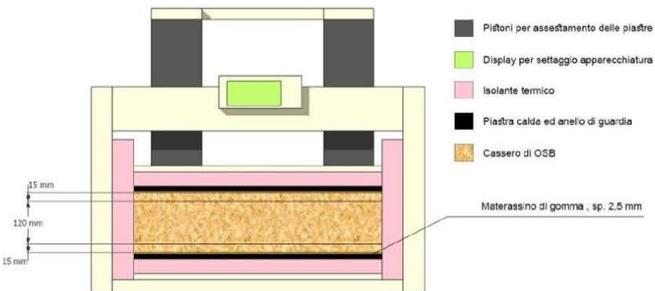
ALLEGATO 2 : Estratto della restituzione dei risultati delle prove su piastra caldaVI

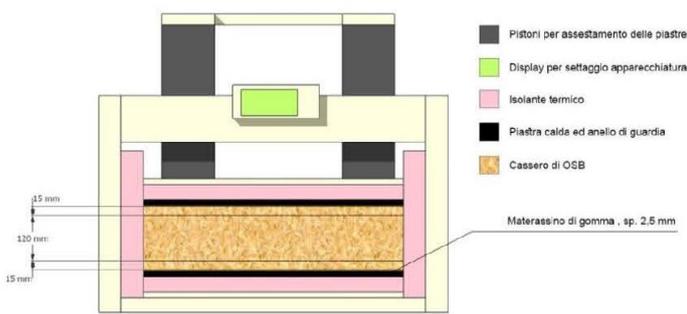
ALLEGATO 3 : Schemi grafici elaborati per la realizzazione della muratura di prova in azienda.....IX

ALLEGATO 4 : Schemi grafici elaborati per la realizzazione del cassero per le prove in laboratorio.....VI

ALLEGATO 5 : Definizione dei parametri termici in regime dinamico analizzati per la stratigrafia in esame.....XI

ALLEGATO 1 : Schede riassuntive delle prove con il metodo della piastra calda con anello di guardia

Determinazione dei valori di resistenza termica con il metodo della piastra calda di isolanti termici naturali in cippato di legno							
Castagno , granulometria grossa							
							
Descrizione del campione		I campioni giungono in laboratorio all'interno di sacchi di polietilene sigillati e trasferiti in casseri di OSB di dimensione 600x600x150 mm. Il materiale all'interno viene poi assestato leggermente tramite battitura a mano e chiuso all'interno del cassero .					
Modalità e caratteristiche di prova		Le indagini sui campioni vengono fatte su piastra calda a due setpoint di temperatura diversi . Durante la prova viene insufflato dell' azoto per ridurre l'umidità all'interno . Il rilevamento dello spessore viene effettuato in automatico dall'apparecchiatura, l'area di misurazione è centrale di dimensioni 30x30 cm.					
Dati del campione							
Cod.	Essenza	Granulometria	Dimensioni [mm]	UR [%]	Peso [kg]	ρ [kg/mc]	
CA10g	Castagno	Grossa	600x600x120	10%	5,915	240	
Dati sul cippato emersi dalla prova							
Setpoint	T_{lower} [°C]	T_{upper} [°C]	$T_{media, misurata}$ [°C]	ΔT [°C]	$S_{effettivo}$ [mm]	$R_{cippato}$ [m²K/W]	$\lambda_{cippato}$ [W/mK]
0°-20°	20,01	0,01	10,01	20	120,61	1,4304	0,0843
15°-35°	35,02	15,02	25,02	20	120,61	1,209	0,0998
Informazioni sulla prova							
							
Miscela analizzata	Setpoint	$S_{misurato}$ [mm]	R_{totale} [m²K/W]	$R_{appo} + R_{mat}$ [m²K/W]			
Castagno (granulometria grossa)	0°C - 20 °C	155,34	1,775	0,345			
	15°C - 35°C	155,34	1,5439	0,335			

Determinazione dei valori di resistenza termica con il metodo della piastra calda di isolanti termici naturali in cippato di legno							
Castagno , granulometria fine							
							
Descrizione del campione			I campioni giungono in laboratorio all'interno di sacchi di polietilene sigillati e trasferiti in casseri di OSB di dimensione 600x600x150 mm. Il materiale all'interno viene poi assestato leggermente tramite battitura a mano e chiuso all'interno del cassero .				
Modalità e caratteristiche di prova			Le indagini sui campioni vengono fatte su piastra calda a due setpoint di temperatura diversi . Durante la prova viene insufflato dell' azoto per ridurre l'umidità all'interno . Il rilevamento dello spessore viene effettuato in automatico dall'apparecchiatura, l'area di misurazione è centrale di dimensioni 30x30 cm.				
Dati del campione							
Cod.	Essenza	Granulometria	Dimensioni [mm]	UR [%]	Peso [kg]	ρ [kg/mc]	
CA10f	Castagno	Fine	600x600x120	10%	5,710	230	
Dati sul cippato emersi dalla prova							
Setpoint	T_{lower} [°C]	T_{upper} [°C]	$T_{media, misurata}$ [°C]	ΔT [°C]	$S_{effettivo}$ [mm]	$R_{cippato}$ [m ² K/W]	$\lambda_{cippato}$ [W/mK]
0°-20°	20,01	0,01	10,01	20	121,50	1,6650	0,0730
15°-35°	35,02	15,02	25,02	20	121,50	1,4030	0,0866
Informazioni sulla prova							
							
Miscela analizzata	Setpoint	$S_{misurato}$ [mm]	R_{totale} [m ² K/W]	$R_{tagli} + R_{mat}$ [m ² K/W]			
Castagno (granulometria fine)	0°C - 20 °C	156,24	2,010	0,345			
	15°C - 35°C	156,24	1,738	0,335			

Determinazione dei valori di resistenza termica con il metodo della piastra calda di isolanti termici naturali in cippato di legno

Pino , granulometria grossa



Descrizione del campione

I campioni giungono in laboratorio all'interno di sacchi di polietilene sigillati e trasferiti in casseri di OSB di dimensione 600x600x150 mm. Il materiale all'interno viene poi assestato leggermente tramite battitura a mano e chiuso all'interno del cassero .

Modalità e caratteristiche di prova

Le indagini sui campioni vengono fatte su piastra calda a due setpoint di temperatura diversi .
Durante la prova viene insufflato dell' azoto per ridurre l'umidità all'interno .
Il rilevamento dello spessore viene effettuato in automatico dall'apparecchiatura, l'area di misurazione è centrale di dimensioni 30x30 cm.

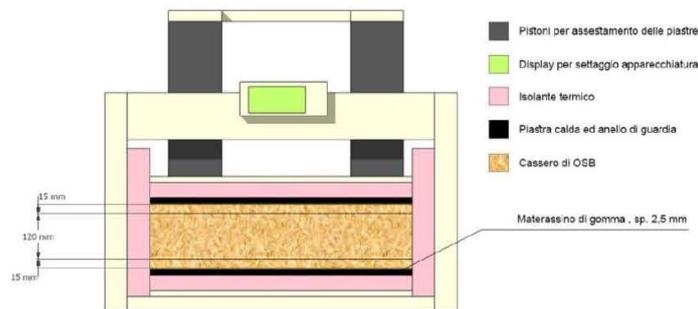
Dati del campione

Cod.	Essenza	Granulometria	Dimensioni [mm]	UR [%]	Peso [kg]	ρ [kg/mc]
Pl10g	Pino	Grossa	600x600x120	10%	5,925	240

Dati sul cippato emersi dalla prova

Setpoint	T_{lower} [°C]	T_{upper} [°C]	$T_{media, misurata}$ [°C]	ΔT [°C]	$S_{effettivo}$ [mm]	$R_{cippato}$ [m²K/W]	$\lambda_{cippato}$ [W/mK]
0°-20°	20,01	0,01	10,01	20	157,04	1,3890	0,0881
15°-35°	35,02	15,02	25,02	20	157,04	1,2362	0,0989

Informazioni sulla prova



Miscela analizzata	Setpoint	$S_{misurato}$ [mm]	R_{totale} [m²K/W]	$R_{tappi} + R_{mat}$ [m²K/W]
Pino (granulometria grossa)	0°C - 20 °C	157,04	1,7336	0,345
	15°C - 35°C	157,04	1,5712	0,335

Determinazione dei valori di resistenza termica con il metodo della piastra calda di isolanti termici naturali in cippato di legno

Pino , granulometria fine



Descrizione del campione

I campioni giungono in laboratorio all'interno di sacchi di polietilene sigillati e trasferiti in casseri di OSB di dimensione 600x600x150 mm. Il materiale all'interno viene poi assestato leggermente tramite battitura a mano e chiuso all'interno del cassero .

Modalità e caratteristiche di prova

Le indagini sui campioni vengono fatte su piastra calda a due setpoint di temperatura diversi .
Durante la prova viene insufflato dell' azoto per ridurre l'umidità all'interno .
Il rilevamento dello spessore viene effettuato in automatico dall'apparecchiatura, l'area di misurazione è centrale di dimensioni 30x30 cm.

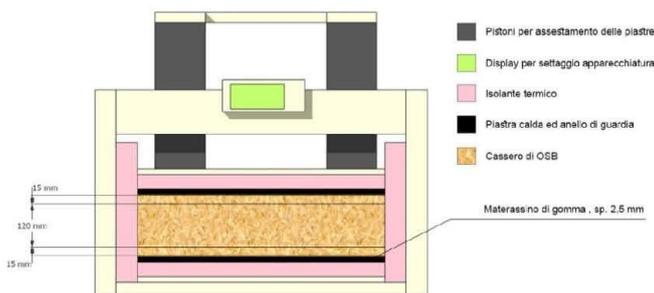
Dati del campione

Cod.	Essenza	Granulometria	Dimensioni [mm]	UR [%]	Peso [kg]	ρ [kg/mc]
PI10f	Pino	Fine	600x600x120	10%	5,710	230

Dati sul cippato emersi dalla prova

Setpoint	T_{lower} [°C]	T_{upper} [°C]	$T_{media, misurata}$ [°C]	ΔT [°C]	$S_{effettivo}$ [mm]	$R_{cippato}$ [m²K/W]	$\lambda_{cippato}$ [W/mK]
0°-20°	20,01	0,01	10,01	20	121,95	1,6230	0,0751
15°-35°	35,02	15,02	25,02	20	121,95	1,4140	0,0862

Informazioni sulla prova



Miscela analizzata	Setpoint	$S_{misurato}$ [mm]	R_{totale} [m²K/W]	$R_{tappi} + R_{mat}$ [m²K/W]
Pino (granulometria fine)	0°C - 20 °C	156,69	1,9680	0,345
	15°C - 35°C	156,69	1,7490	0,335

Determinazione dei valori di resistenza termica con il metodo della piastra calda di isolanti termici naturali in cippato di legno

Corteccia di larice e cippato di castagno , granulometria fine



Descrizione del campione

I campioni giungono in laboratorio all'interno di sacchi di polietilene sigillati e trasferiti in casseri di OSB di dimensione 600x600x150 mm. Il materiale all'interno viene poi assestato leggermente tramite battitura a mano e chiuso all'interno del cassero .

Modalità e caratteristiche di prova

Le indagini sui campioni vengono fatte su piastra calda a due setpoint di temperatura diversi .
Durante la prova viene insufflato dell' azoto per ridurre l'umidità all'interno .
Il rilevamento dello spessore viene effettuato in automatico dall'apparecchiatura, l'area di misurazione è centrale di dimensioni 30x30 cm.

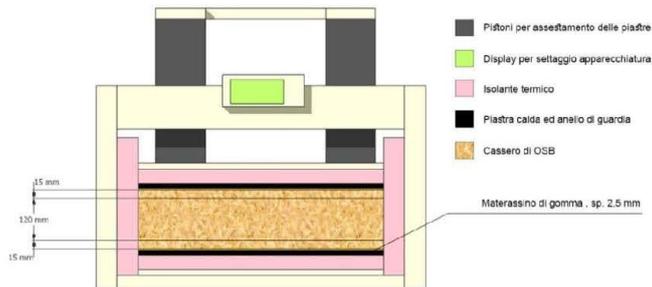
Dati del campione

Cod.	Essenza	Granulometria	Dimensioni [mm]	UR [%]	Peso [kg]	ρ [kg/mc]
CoCaFi	larice	grossa	600x600x120	10%	3,335	200
	castagno	fine			4,065	

Dati sul cippato emersi dalla prova

Setpoint	T_{lower} [°C]	T_{upper} [°C]	$T_{media, misurata}$ [°C]	ΔT [°C]	$S_{effettivo}$ [mm]	$R_{cippato}$ [m ² K/W]	$\lambda_{cippato}$ [W/mK]
0°-20°	20,01	0,01	10,01	20	119,73	1,6650	0,0759
15°-35°	35,02	15,02	25,02	20	119,73	1,4030	0,0893

Informazioni sulla prova



Miscela analizzata	Setpoint	$S_{misurato}$ [mm]	R_{totale} [m ² K/W]	$R_{appi} + R_{mat}$ [m ² K/W]
Corteccia (gr.grossa) Castagno (gr.fine)	0°C - 20 °C	154,46	1,923	0,345
	15°C - 35°C	154,46	1,676	0,335

ALLEGATO 2 : Estratto della restituzione dei risultati delle prove su piastra calda

Cippato_CAf1

Thursday, July 13, 2017, Time 16:19

Wintherm32v3 Version 3.31.47
Instrument: F602
Instrument Program Version 78
Instrument Serial Number: 1336

Sample Name: Cippato_CAf1
Thickness: 156.2354mm
Thickness obtained : from instrument

TEST RUN

Calibration used : 1450b
Calibration File Id: Nist1450bCalibration_sn1336

Calibration File Info :

File Name: Nist1450bCalibration_sn1336
Thickness: 25.4000mm
Area: 0.3716m²
Mass: 1.3000kg

Upper Plate Calibration Constants : (SI units)
Calibration Const: 0.005480 @-9.98 °C
Calibration Const: 0.005366 @0.02 °C
Calibration Const: 0.005239 @10.01 °C
Calibration Const: 0.005129 @20.02 °C
Calibration Const: 0.005041 @30.02 °C
Calibration Const: 0.004968 @40.03 °C

A0=1.355113e-002 A1=-4.765108e-005
A2=6.461143e-008

Lower Plate Calibration Constants : (SI units)
Calibration Const: 0.005469 @15.01 °C
Calibration Const: 0.005407 @25.02 °C
Calibration Const: 0.005343 @35.02 °C
Calibration Const: 0.005286 @45.02 °C
Calibration Const: 0.005220 @55.02 °C
Calibration Const: 0.005155 @65.02 °C

A0=6.864035e-003 A1=-3.645001e-006
A2=-4.159995e-009

Number of transducers per plate: 1
Number of transducers used per plate: 1

Number of Setpoints: 2

Pagina 1

Cippato_CAFi

Block Averages for setpoint 1 in SI units

	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [μV]	Qlower [μV]	Lambda [W/mK]	HeatFluxU [W/m²]	HeatFluxL [W/m²]
-pe-	15.01	35.03	-2226	2277	0.09254	11.54	12.17
-pe-	15.01	35.03	-2215	2261	0.09199	11.48	12.09
-pe-	15.01	35.03	-2206	2246	0.09151	11.44	12.01
-pe-	15.01	35.03	-2203	2228	0.09107	11.42	11.91
-pe-	15.01	35.02	-2197	2217	0.09073	11.39	11.85
-pe-	15.01	35.02	-2194	2204	0.09040	11.38	11.78
-pe-	15.02	35.03	-2195	2187	0.09006	11.38	11.69
-pe-	15.02	35.03	-2198	2171	0.08980	11.40	11.60
-pe-	15.02	35.02	-2199	2162	0.08964	11.40	11.56
-pe-	15.01	35.02	-2196	2162	0.08958	11.39	11.56

Last Side Temperatures readings in SI units
15.02 35.01

Thursday, July 13, 2017, Time 20:18

Setpoint No. 1

Setpoint Upper: 15.00 °C
 Setpoint Lower: 35.00 °C
 Temperature Upper: 15.02 °C
 CalibFactor Upper: 0.005185
 Results Upper: 0.08892 W/mK
 HeatFlux Upper: 11.39 W/m²
 Temperature Lower: 35.02 °C
 CalibFactor Lower: 0.005346
 Results Lower: 0.09087 W/mK
 Percent Difference: 2.17%
 HeatFlux Lower: 11.64 W/m²
 Temperature Average: 25.02 °C
 Results Average: 0.08990 W/mK
 Resistance Avg : 1.738 m²K/W
 R/unit Avg : 11.12 mK/W

Thermal Equilibrium Criteria:

Temperature Equilibrium: 0.20
 Between Block HFM Equil.: 200
 HFM Percent Change: 2.00
 Min Number of Blocks: 10
 Calculation Blocks: 5

Block Averages for setpoint 2 in SI units

	Tupper [°C]	Tlower [°C]	Qupper [μV]	Qlower [μV]	Lambda [W/mK]	HeatFluxU [W/m²]	HeatFluxL [W/m²]
-pe-	0.01	20.01	-2154	1542	0.07780	11.53	8.386
-pe-	0.01	20.01	-2145	1548	0.07774	11.49	8.419
-pe-	0.01	20.01	-2128	1564	0.07773	11.40	8.506
-pe-	0.00	20.01	-2108	1582	0.07770	11.29	8.605

				Cippato_CAf1			
-pe-	0.01	20.01	-2095	1597	0.07775	11.22	8.683
-pe-	0.01	20.01	-2082	1609	0.07773	11.15	8.748
-pe-	0.01	20.01	-2074	1617	0.07774	11.11	8.796
-pe-	0.01	20.01	-2074	1621	0.07780	11.11	8.813
-pe-	0.01	20.01	-2070	1622	0.07773	11.09	8.818
-pe-	0.01	20.02	-2068	1621	0.07769	11.08	8.816

Last Side Temperatures readings in SI units
0.01 20.02

Friday, July 14, 2017, Time 06:05

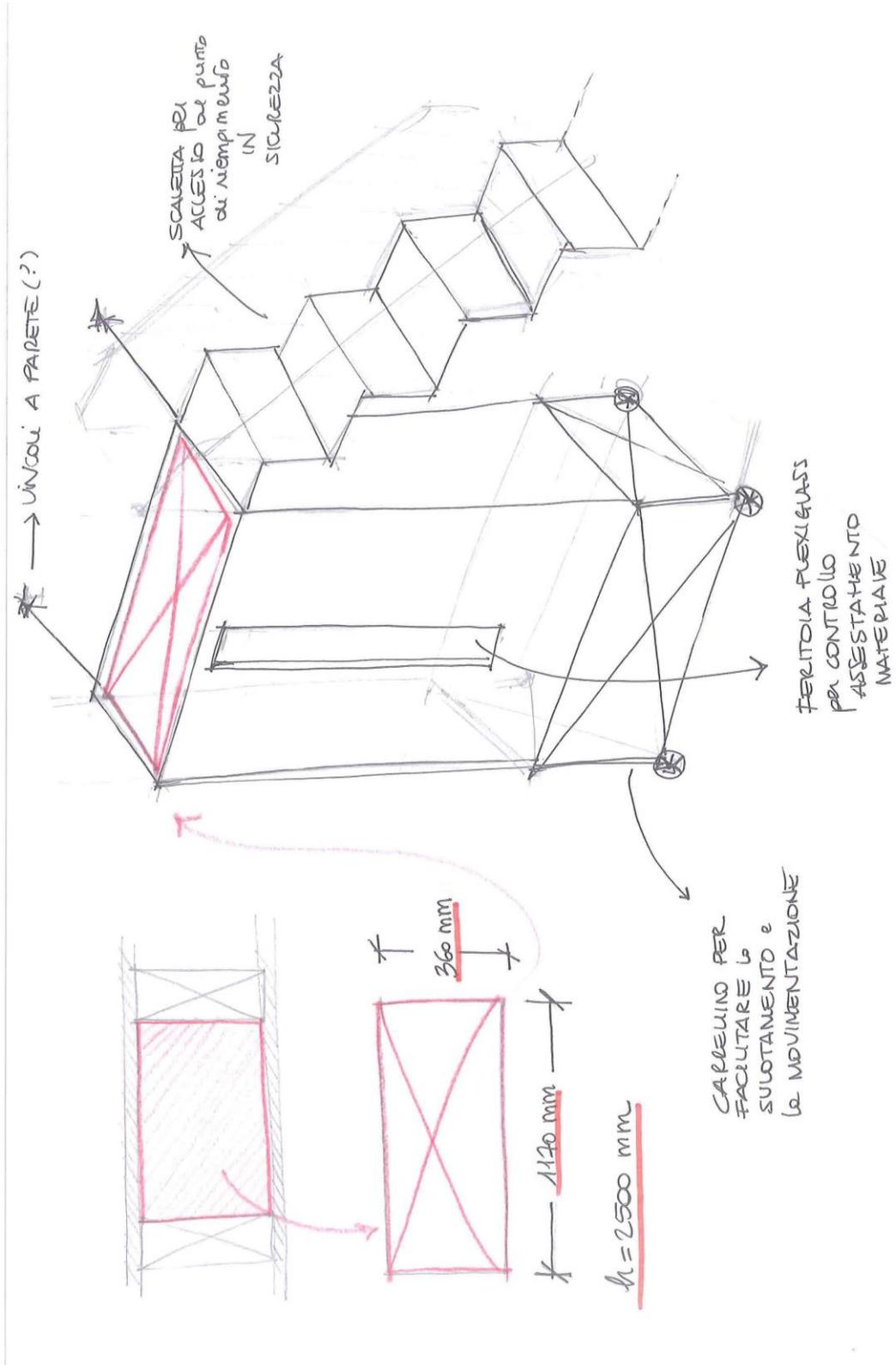
Setpoint No. 2
Setpoint Upper: 0.00 °C
Setpoint Lower: 20.00 °C
Temperature Upper: 0.01 °C
CalibFactor Upper: 0.005356
Results Upper: 0.08675 W/mK
HeatFlux Upper: 11.11 W/m²
Temperature Lower: 20.01 °C
CalibFactor Lower: 0.005438
Results Lower: 0.06873 W/mK
Percent Difference: 23.18%
HeatFlux Lower: 8.798 W/m²
Temperature Average: 10.01 °C
Results Average: 0.07774 W/mK
Resistance Avg : 2.010 m²K/W
R/unit Avg : 12.86 mK/W

Thermal Equilibrium Criteria:
Temperature Equilibrium: 0.20
Between Block HFM Equil.: 200
HFM Percent Change: 2.00
Min Number of Blocks: 10
Calculation Blocks: 5

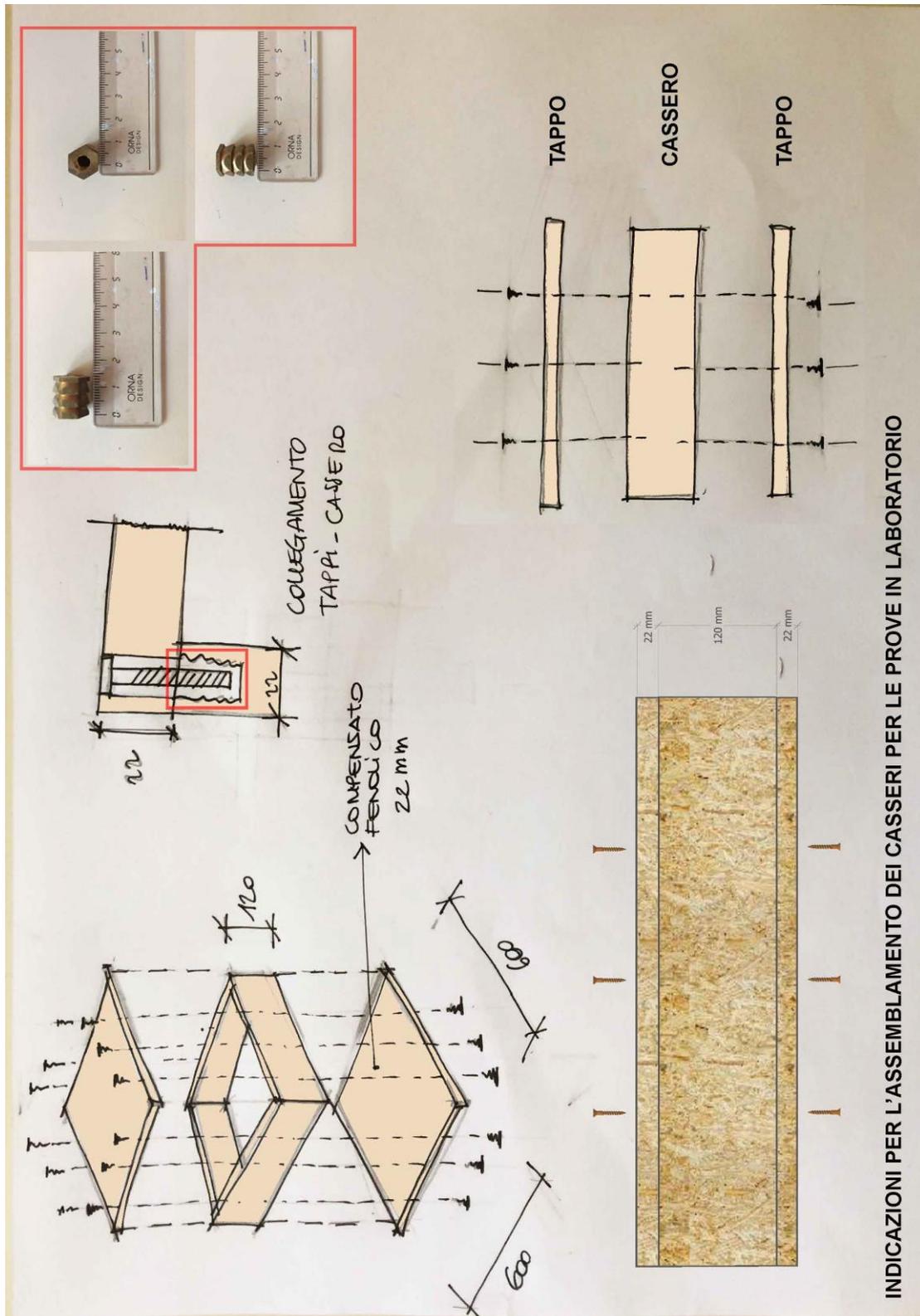
Results Table -- SI Units

Mean Temp	Upper Cond	Lower Cond	Average Cond
25.02	0.08892	0.09087	0.08990
10.01	0.08675	0.06873	0.07774

ALLEGATO 3 : Schemi grafici elaborati per la realizzazione della muratura di prova in azienda



ALLEGATO 4 : Schemi grafici elaborati per la realizzazione del cassero per le prove in laboratorio
in laboratorio



ALLEGATO 5 : Definizione dei parametri termici in regime dinamico analizzati per la stratigrafia in esame¹⁸

La **trasmissione termica periodica** Y_{mn} di un componente edilizio, calcolata sul lato del componente posto verso l'ambiente m valutando il comportamento dinamico di entrambe le superfici m e n dell'elemento, è definita dalla seguente relazione:

$$Y_{mn} = L_{mn} / A$$

dove

L_{mn} = conduttanza termica periodica¹⁹ [W/K]

A = area frontale della superficie attraversata dal flusso termico [m²]

L' **ammittenza termica** Y_{mn} di un componente edilizio, calcolata sul lato del componente posto verso l'ambiente m, quando l'ampiezza della temperatura sul lato n è pari a zero, è definita dalla seguente formula:

$$Y_{mn} = L_{mn} / A$$

dove

L_{mn} = conduttanza termica periodica¹⁹ [W/K]

A = area frontale della superficie attraversata dal flusso termico [m²]

Essa è definita anche come *la quantità di calore che un lato di un elemento tecnico riesce a scambiare con lo strato d'aria a contatto con esso.*

L'attenuazione, o fattore di decremento, è definita dalla norma ISO 13786 come il rapporto tra la trasmissione termica periodica del componente e la sua trasmissione termica in condizioni stazionarie; è definita dalla seguente relazione:

$$f = Y_{mn} / U$$

¹⁸ Estratto da *Appunti di fisica tecnica*, edizioni Bozen University Press. 2010.

¹⁹ Essa relaziona il flusso termico periodico sul lato m del componente alla temperatura periodica del lato considerato, quando l'ampiezza della temperatura sul lato n è pari a zero.

dove

Y_{mn} = trasmittanza termica periodica del componente [W/m^2K]

U = trasmittanza termica stazionaria del componente [W/m^2K]

Lo **sfasamento ϕ** è l'intervallo di tempo, espresso in ore, necessario all'onda termica per fluire dalla superficie esterna di un elemento edilizio alla sua superficie interna.

Lo sfasamento deriva dalla differenza di fase tra la temperatura superficiale interna massima $T_{si,max}$ e la temperatura superficiale esterna massima $T_{se,max}$.

Più grande è lo sfasamento, maggiore risulta il tempo necessario al flusso termico per passare dall'interno all'esterno; quindi alti valori di sfasamento garantiscono una buona protezione dal calore estivo.

Il **fattore di smorzamento** esprime il rapporto tra la variazione massima della temperatura esterna ΔT_e e quella della temperatura interna ΔT_i in riferimento alla temperatura media della superficie interna.