



# Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

TESI MAGISTRALE

Anno Accademico 2023/2024

## Caratterizzazione chimico-fisica di tessuti non tessuti e valutazione dell'applicabilità in ambito edilizio

**Relatore:** Prof.ssa Ing. Sara Ferraris

**Co-relatore:** Prof Ing. Sergio Perero

**Candidato:** Federico Piazzolla

## **Ringraziamenti**

Desidero ringraziare profondamente la mia famiglia, in particolare mia mamma, che mi ha sostenuto con paziente fiducia e mio nonno che, sin da bambino, mi ha trasmesso la sua passione per questa facoltà ispirandomi a intraprendere questo percorso.

Un ringraziamento speciale lo dedico a Giorgia, la mia compagna di vita, che mi ha insegnato l'importanza di cercare, in ogni situazione, il risvolto positivo trasformando le sconfitte in occasioni per imparare e accogliendo le vittorie con meritata gioia.

Un sentito ringraziamento va a Giorgio e Pietro per avermi accompagnato in quest'avventura facendomi conoscere la loro realtà e fornendomi i materiali innovativi essenziali al mio progetto.

Infine, un grandissimo grazie al Professor Sergio Perero, per la sua guida preziosa, e a tutto il personale dei laboratori del politecnico senza cui questo progetto non sarebbe stato possibile.

## Abstract

La presente tesi analizza e valuta quattro materiali basati su fibre naturali: Canapa-Wave™, Resil MAC W™, Euroteck™ e JKI™ prodotti dall'azienda Safi-tech S.r.l., con l'obiettivo di verificarne l'applicabilità nel settore edilizio con funzione di isolanti termici ed acustici.

La presente tesi inizia con un approfondimento del contesto economico e normativo attuale, relativo ai requisiti energetici richiesti agli edifici di nuova costruzione o sottoposti a ristrutturazione. Sono quindi esaminate le direttive europee e le normative italiane relative all'efficienza energetica.

Segue la presentazione delle prove sperimentali chimico-fisiche, meccaniche, termiche e acustiche effettuate sui materiali, al fine di caratterizzarli.

I risultati delle caratterizzazioni sono stati impiegati per la simulazione numerica di applicazione di detti materiali ad un caso di ristrutturazione di un edificio reale al fine di poterli confrontare con quanto oggi impiegato.

È infine riportata nelle conclusioni la disamina dei risultati ottenuti con le relative considerazioni circa l'applicabilità, i pregi ed i difetti dei materiali analizzati in ambito edilizio.

## **Abstract**

The present thesis analyzes and evaluates four materials based on natural fibers: Canapa-Wave™, Resil MAC W™, Euroteck™, and JKI™ from the company Safi-Tech S.r.l., with the aim of assessing their applicability in the construction sector as thermal and acoustic insulators.

This thesis begins with an in-depth examination of the current economic and regulatory context related to the energy requirements for newly constructed or renovated buildings. It examines European directives and Italian regulations regarding energy efficiency.

Following this, experimental chemical-physical, mechanical, thermal, and acoustic tests conducted on the materials are presented to characterize them.

The characterization results were used in a numerical simulation to apply these materials to a real building renovation case, allowing for a comparison with materials currently in use.

Finally, the conclusions provide an analysis of the results obtained, along with considerations on the applicability, advantages, and disadvantages of the analyzed materials in the construction field.

# Indice

Chapter 1 – Contesto Storico-Normativo.....	14
1.1 Approccio Normativo Nazionale e Sovranazionale (CEE/UE).....	14
1.2 Prospettive Future e Nuovi Obiettivi.....	16
Chapter 2 – Materiali .....	17
2.1 Canapa-Wave™.....	17
2.2 JKI™ .....	18
2.3 Euroteck™.....	19
2.4 Resil MAC W™ .....	20
Chapter 3 – Caratterizzazione Dei Materiali.....	21
3.1 Caratterizzazione Fisica.....	21
3.1.1 Bilancia Di Archimede - Densità.....	22
3.1.2 Assorbimento Acqua A Breve Termine.....	26
3.1.3 Assorbimento Acqua A Lungo Termine.....	29
3.1.4 CT Scan – Analisi morfologica tridimensionale.....	33
3.2 Caratterizzazione Acustica .....	37
3.2.1 Tubo di Kundt - Fonoassorbimento .....	38
3.3 Caratterizzazione Meccanica.....	53
3.3.1 Resistenza A Trazione.....	53
3.4 Caratterizzazione Termica .....	65
3.4.1 Conducibilità Termica.....	65
3.4.2 Diffusività Termica .....	67
3.4.3 Capacità Termica E Calore Specifico .....	68
3.4.4 Resistenza Termica .....	69
3.4.5 Trasmittanza Termica.....	70
3.4.6 Inerzia Termica .....	73
3.4.7 Trasmittanza Termica Periodica Yie .....	75
3.4.8 Relazione Tra Sfasamento E Trasmittanza Termica Periodica .....	76
3.4.9 TPS – Conducibilità, Diffusività e Calore Specifico .....	77
3.5 Analisi dei Risultati.....	85
Chapter 4 – Applicazioni dei materiali studiati in ambito edilizio .....	86
4.1 Isolamento Termico In Edilizia .....	86
4.2 Isolamento termico delle superfici disperdenti opache (cappotto termico).....	87
4.2.1 Parete di Appoggio o Supporto.....	88
4.2.2 Colla di Adesione o Collante .....	88

4.2.3 Pannello Isolante.....	88
4.2.4 Tasselli .....	88
4.2.5 Intonaco di Fondo .....	89
4.2.6 Rete di Armatura in Fibra di Vetro .....	89
4.2.7 Intonaco Rasante.....	89
4.2.8 Primer .....	89
4.2.9 Intonaco di Finitura con Pittura Finale .....	90
4.3 Prestazione energetica .....	91
4.3.1 Classe Energetica.....	91
4.3.2 Indice Di Prestazione Energetica Globale .....	92
4.3.3 Indice Di Prestazione Termica Utile Per Riscaldamento EPH,nd .....	92
4.3.4 Indice Di Prestazione Termica Utile Per Raffrescamento EPC, nd .....	93
4.3.5 Indice Di Prestazione Energetica Per Acs EPacs.....	93
4.4 Modellazione BIM.....	94
4.4.1 Descrizione dell’edificio oggetto di calcolo .....	95
4.4.2 Stratigrafie .....	98
4.4.3 Conduttanze .....	113
4.4.4 Analisi dei Risultati.....	117
Chapter 5 – Conclusioni.....	118
Chapter 6 – Bibliografia e Sitografia .....	120
Bibliografia.....	120
Sitografia .....	122

## Indice Delle Tabelle

Tabella 3.1 Massa dei campioni in aria.....	24
Tabella 3.2 Peso dei campioni in aria.....	24
Tabella 3.3 Massa dei campioni in alcool isopropilico.....	24
Tabella 3.4 Peso dei campioni in alcool isopropilico.....	24
Tabella 3.5 Valori della Spinta di Archimede.....	25
Tabella 3.6 Volume dei campioni.....	25
Tabella 3.7 Densità dei campioni.....	25
Tabella 3.8 Massa dei campioni prima dell'immersione in acqua.....	26
Tabella 3.9 Volume geometrico dei campioni.....	26
Tabella 3.10 Massa dei campioni dopo 24 ore di immersione in acqua.....	27
Tabella 3.11 Risultati assorbimento a breve termine.....	27
Tabella 3.12 Massa dei campioni prima dell'immersione in acqua.....	29
Tabella 3.13 Volume geometrico dei campioni.....	29
Tabella 3.14 Massa dei campioni dopo 28 giorni di immersione in acqua.....	30
Tabella 3.15 Risultati assorbimento a lungo termine.....	31
Tabella 3.16 Valori di densità e assorbimento a breve termine dei materiali.....	32
Tabella 3.17 Valori di densità e assorbimento a lungo termine dei materiali.....	32
Tabella 3.18 Caratteristiche del macchinario per CT Scan, fonte J-Tech Polito.....	33
Tabella 3.19 Classifica valori di fonoassorbimento.....	39
Tabella 3.20 Classi di assorbimento, fonte BS EN ISO 11654:1997.....	50
Tabella 3.21 Caratteristiche del macchinario Zwick Roell Z050, fonte J-Tech Polito.....	54
Tabella 3.22 Calcolo della tensione di rottura (Resil MAC W™).....	59
Tabella 3.23 Calcolo della tensione di rottura (JKI™).....	61
Tabella 3.24 Calcolo della tensione di rottura (Euroteck™).....	63
Tabella 3.25 Considerazioni statistiche.....	64
Tabella 3.26 Valori di conducibilità termica e densità di materiali isolanti.....	66
Tabella 3.27 Risultati diffusività termica di materiali isolanti.....	67
Tabella 3.28 Risultati capacità termica di materiali isolanti.....	68
Tabella 3.29 Risultati calore specifico di materiali isolanti.....	68
Tabella 3.30 Trasmittanza termica U massima delle strutture opache vertical, fonte Decreto Ministeriale Requisiti Minimi 2015.....	71
Tabella 3.31 Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, fonte Decreto Ministeriale Requisiti Minimi 2015.....	71
Tabella 3.32 Trasmittanza Termica U massima delle strutture opache orizzontali di pavimento, fonte Decreto Ministeriale Requisiti Minimi 2015.....	71
Tabella 3.33 Classificazione dello sfasamento e attenuazione.....	74
Tabella 3.34 Valori di sfasamento di materiali isolanti.....	74
Tabella 3.35 Indicatore della prestazione energetica estiva dell'involucro senza considerare gli impianti.....	75
Tabella 3.36 Valori trasmittanza termica periodica di materiali isolanti.....	75
Tabella 3.37 Risultati conducibilità termica, diffusività termica e calore specifico Canapa-Wave™.....	80
Tabella 3.38 Risultati conducibilità termica, diffusività termica e calore specifico Euroteck™.....	81
Tabella 3.39 Risultati conducibilità termica, diffusività termica e calore specifico JKI™.....	82
Tabella 3.40 Risultati conducibilità termica, diffusività termica e calore specifico Resil MAC W™.....	83

Tabella 3.41 Valori risultanti dalle caratterizzazioni.....	85
Tabella 4.1 Classi energetiche con limiti, fonte dall'Appendice B del DM 26/06/2015. ....	91
Tabella 4.2 Caratteristiche del sito dove è locato il modello. ....	95
Tabella 4.3 Risultati trasmittanze delle due tipologie di infissi. ....	97
Tabella 4.4 Stratigrafia e caratteristiche con Canapa-Wave™ 30 cm.....	99
Tabella 4.5 Indici di prestazione con Canapa-Wave™ 30 cm. ....	100
Tabella 4.6 Stratigrafia e caratteristiche con Euroteck™ 30 cm.....	101
Tabella 4.7 Indici di prestazione con Euroteck™ 30 cm. ....	102
Tabella 4.8 stratigrafie e caratteristiche con JKI™ 30 cm. ....	103
Tabella 4.9 Indici di prestazione con JKI™ 30 cm. ....	104
Tabella 4.10 stratigrafia e caratteristiche con Resil MAC W™ 30 cm.....	105
Tabella 4.11 Firma energetica con Resil MAC W™ 30 cm.....	106
Tabella 4.12 Stratigrafia e caratteristiche con Lana di Roccia 30 cm.....	107
Tabella 4.13 Indici di prestazione energetica con Lana di Roccia 30 cm. ....	108
Tabella 4.14 Stratigrafia e caratteristiche con Lana di Roccia 8 cm.....	108
Tabella 4.15 Indici di prestazione con Lana di Roccia 8 cm. ....	109
Tabella 4.16 Stratigrafia e caratteristiche con l'EPS 30 cm.....	110
Tabella 4.17 Indici di prestazione con l'EPS 30 cm. ....	111
Tabella 4.18 Stratigrafia e caratteristiche con l'EPS 8 cm.....	111
Tabella 4.19 Indici di Prestazione con l'EPS 8 cm. ....	112
Tabella 4.20 Firma energetica dei materiali. ....	117

## Indice Delle Figure

Figura 2.1 Materiale Canapa-Wave™	17
Figura 2.2 Materiale JKI™	18
Figura 2.3 Materiale Euroteck™	19
Figura 2.4 Materiale Resil MAC W™	20
Figura 3.1 Bilancia di Archimede	22
Figura 3.2 Provini pesati in aria	23
Figura 3.3 Provini pesati in alcool isopropilico	23
Figura 3.4 Insieme dei campioni di cui è stata calcolata la densità	25
Figura 3.5 Becher con campioni parzialmente immersi	28
Figura 3.6 Lastra di drenaggio inclinata a 45° - frontale	28
Figura 3.7 – Lastra di drenaggio inclinata a 45° - laterale	28
Figura 3.8 – Becher con campioni totalmente immersi in acqua	31
Figura 3.9 Lastra di drenaggio inclinata a 45° - laterale	31
Figura 3.10 Lastra di drenaggio inclinata a 45° - frontale	32
Figura 3.11 Camera CT Scan	34
Figura 3.12 Risultati CT Scan	34
Figura 3.13 Piani di sezione lungo i tre assi principali	35
Figura 3.14 Zoom sui pori – Euroteck™	35
Figura 3.15 Zoom sui pori – Canapa-Wave™	35
Figura 3.16 Zoom sui pori – JKI™	36
Figura 3.17 Zoom sui pori – Resil MAC W™	36
Figura 3.18 Tubo di Kundt	38
Figura 3.19 Campioni Anecoico	41
Figura 3.20 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione Anecoico	41
Figura 3.21 Campioni Euroteck™	42
Figura 3.22 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 1	42
Figura 3.23 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 3	42
Figura 3.24 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 3	43
Figura 3.25 Coefficienti di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campioni 1,2,3	43
Figura 3.26 Campioni Resil MAC W™	44
Figura 3.27 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 1	44
Figura 3.28 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 2	44
Figura 3.29 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 3	45
Figura 3.30 Coefficienti di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campioni 1,2,3	45
Figura 3.31 Campioni di Canapa-Wave™	46
Figura 3.32 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 1	46
Figura 3.33 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 2	46
Figura 3.34 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 3	47
Figura 3.35 - Coefficienti di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campioni 1,2,3	47
Figura 3.36 Campioni JKI™	48
Figura 3.37 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 1	48
Figura 3.38 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 2	49
Figura 3.39 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 3	49
Figura 3.40 Coefficienti di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campioni 1,2,3	49
Figura 3.41 Andamento dei coefficienti di fonoassorbimento in funzione della frequenza dei materiali testati	50

Figura 3.42 Curve limite delle classi di assorbimento.....	51
Figura 3.43 Valori dei coefficienti di fonoassorbimento in funzione della frequenza di materiali tradizionali usati in edilizia.....	51
Figura 3.44 Pressa per realizzazione provini a forma di “osso di cane”.....	55
Figura 3.45 Macchina di prova universale Zwick / Roell Z050.....	56
Figura 3.46 Provino sfaldato di Canapa-Wave™.....	57
Figura 3.47 Rottura per trazione del provino Resil MAC W™.....	58
Figura 3.48 Risultati prove di trazione Resil MAC W™.....	58
Figura 3.49 Rottura per trazione del provino JKI™.....	60
Figura 3.50 Risultati prove di trazione JKI™.....	60
Figura 3.51 Rottura per trazione del provino Euroteck™.....	62
Figura 3.52 Risultati prove di trazione Euroteck™.....	62
Figura 3.53 Provini testati.....	64
Figura 3.54 Andamento dell’insieme dei provini testati con la percentuale delle deformazioni in funzione della forza in Newton.....	64
Figura 3.55 Rappresentazione grafica delle caratteristiche per l’isolamento estivo.....	73
Figura 3.56 Misure dello spessore con calibro elettronico.....	79
Figura 3.57 Sensore Hot Disk.....	77
Figura 3.58 Macchinario di misurazione Hot Disk Thermal Constants Analyser.....	78
Figura 3.59 Posizionamento campioni su Hot Disk Thermal Constants Analyser.....	79
Figura 3.60 Curva transitoria Canapa-Wave™.....	80
Figura 3.61 Residuo Canapa-Wave™.....	80
Figura 3.62 Curva transitoria Euroteck™.....	81
Figura 3.63 Residuo Euroteck™.....	81
Figura 3.64 Curva transitoria JKI™.....	82
Figura 3.65 Residuo JKI™.....	82
Figura 3.66 Curva transitoria Resil MAC W™.....	83
Figura 3.67 Residuo Resil MAC W™.....	83
Figura 4.1 Strati cappotto termico.....	87
Figura 4.2 Zone climatiche.....	95
Figura 4.3 Piante del piano terra, sottotetto e tetto del modello.....	96
Figura 4.4 Visuale 3D del modello.....	96
Figura 4.5 Finestra in legno noce a doppia anta a sinistra e finestra in legno noce a singola anta a destra.....	96
Figura 4.6 Doppio vetro con rivestimento basso-emissivo.....	97
Figura 4.7 Persiana in legno noce a singola anta a sinistra e persiana in legno noce a doppia anta a destra.....	97
Figura 4.8 Caldaia a condensazione.....	97
Figura 4.9 Pompa di calore aria-acqua.....	98
Figura 4.10 Pompa di calore invertibile.....	98
Figura 4.11 Stratigrafia del modello con legenda.....	98
Figura 4.12 Prestazione energetica con Canapa-Wave™ 30 cm.....	99
Figura 4.13 Firma energetica con Canapa-Wave™ 30 cm.....	99
Figura 4.14 Prestazioni energetiche con Euroteck™ 30 cm.....	101
Figura 4.15 Firma energetica con Euroteck™ 30 cm.....	101
Figura 4.16 – Prestazioni energetiche con JKI™ 30 cm.....	103
Figura 4.17 Forma energetica con JKI™ 30 cm.....	103

Figura 4.18 Prestazione energetica con Resil MAC W™ 30 cm.....	105
Figura 4.19 Indici di prestazione con Resil MAC W™ 30 cm.....	105
Figura 4.20 Prestazione energetica con Lana di Roccia 30 cm.....	107
Figura 4.21 Firma energetica con Lana di Roccia 30 cm. ....	107
Figura 4.22 Prestazioni energetiche con Lana di Roccia 8 cm. ....	108
Figura 4.23 Firma energetica con Lana di Roccia 8 cm. ....	109
Figura 4.24 Prestazione energetica con l'EPS 30 cm. ....	110
Figura 4.25 Firma Energetica con l'EPS 30 cm.....	110
Figura 4.26 Prestazione energetica con l'EPS 8 cm. ....	111
Figura 4.27 Firma Energetica con l'EPS 8 cm.....	112
Figura 4.28 Progressione cromatica delle conduttanze dei materiali Canapa-Wave™, Euroteck™, JKIT™ 30 cm. ....	113
Figura 4.29 Progressione cromatica delle conduttanze del materiale Resil MAC W™ 30 cm. ....	113
Figura 4.30 Progressione cromatica delle conduttanze del materiale lana di roccia 30 cm. ....	114
Figura 4.31 Progressione cromatica delle conduttanze del materiale lana di roccia 8 cm. ....	114
Figura 4.32 Progressione cromatica delle conduttanze del materiale EPS 30 cm. ....	115
Figura 4.33 Progressione cromatica delle conduttanze del materiale EPS 8 cm. ....	115

## Indice Delle Equazioni

Equazione 3.1 Formula per il calcolo dell'assorbimento a breve termine.....	27
Equazione 3.2 Formula propagazione errore del numeratore.....	27
Equazione 3.3 Formula propagazione errore del rapporto.....	27
Equazione 3.4 Formula per il calcolo dell'assorbimento a lungo termine.....	30
Equazione 3.5 Formula propagazione errore del numeratore.....	30
Equazione 3.6 Formula propagazione errore del rapporto.....	30
Equazione 3.7 Onda sonora incidente.....	38
Equazione 3.8 Onda sonora riflessa.....	38
Equazione 3.9 Coefficiente di fonoassorbimento.....	39
Equazione 3.10 Coefficiente di fonoassorbimento calcolata mediante punti minimi e massimi.....	39
Equazione 3.11 Legge di Fourier.....	65
Equazione 3.12 Flusso termico.....	65
Equazione 3.13 Conducibilità termica.....	65
Equazione 3.14 Diffusività termica.....	67
Equazione 3.15 Resistenza termica.....	69
Equazione 3.16 Flusso termico.....	70
Equazione 3.17 Trasmittanza termica.....	70
Equazione 3.18 Trasmittanza termica.....	72
Equazione 3.19 Resistenza termica per più strati.....	72
Equazione 3.20 Trasmittanza termica periodica.....	75
Equazione 4.1 Indice di prestazione energetica globale.....	92
Equazione 4.2 Fabbisogno di energia termica utile.....	92

## Introduzione

L'industria edilizia moderna richiede l'utilizzo di materiali innovativi e sostenibili che possano garantire prestazioni elevate in termini di efficienza energetica, isolamento acustico e durabilità. Questo risulta fondamentale per diminuire, grazie alla riduzione della dispersione di calore, l'uso dei generatori elettrici sia in estate, raffrescamento, sia in inverno, riscaldamento, riducendo così sia i consumi sia le emissioni delle unità abitative e comportando, in ultimo, un minor impatto ambientale.

In questa prospettiva, lo studio e la caratterizzazione di materiali alternativi diventano fondamentali per sviluppare soluzioni che possano ridurre l'impatto ambientale e migliorare la qualità degli edifici. La presente tesi si concentra sull'analisi e di quattro materiali, prodotti dall'azienda Safi-tech S.r.l. con cui si è collaborato, elencati di seguito: Canapa-Wave™, Resil MAC W™, Euroteck™ e JKI™, valutandone le proprietà fisico-chimiche, meccaniche, termiche e acustiche per determinarne l'idoneità all'uso in ambito edilizio come isolanti acustici o termici.

La prima serie di test ha riguardato la caratterizzazione chimico/fisica dei materiali. A tal fine è stata misurata la densità, utilizzando la Bilancia di Archimede; la microstruttura interna e i pori dei materiali, effettuando un CT Scan; ed infine la capacità di assorbimento dell'acqua sia a breve sia a lungo termine, per stabilire la resistenza a umidità e infiltrazioni, fattori critici per l'applicabilità a lungo termine in contesti edilizi.

Nella seconda fase sono state analizzate le caratteristiche acustiche, in particolare l'assorbimento acustico dei materiali, utilizzando Tubo di Kundt, al fine di valutarne il contributo potrebbero potenzialmente apportare per garantire il comfort abitativo in ambienti residenziali e commerciali.

Nella terza fase si è passati all'esame delle caratteristiche meccaniche eseguendo delle prove di trazione, finalizzate a determinare la tensione di rottura dei materiali, parametro fondamentale per valutare la capacità di sopportare sollecitazioni meccaniche in strutture edili.

Nella quarta, ed ultima, fase sono state esaminate le caratteristiche termiche effettuando test di conducibilità termica, per mezzo dell'Hot Disk Thermal Constants Analyser, per comprendere le potenzialità dei materiali come isolanti termici in grado di ridurre, una volta applicati, il consumo energetico degli edifici.

Ottenute le caratterizzazioni dei materiali i parametri ricavati sono stati impiegati in una simulazione numerica mediante software commerciale per stabilire l'economicità e la funzionalità effettiva di questi materiali in applicazioni edilizie.

Il presente studio si pone, dunque, come un'analisi multidisciplinare, volta a esplorare potenzialità e limitazioni dei materiali presi in esame al fine di esplorare nuove potenziali applicazioni degli stessi in ambito edilizio apportando un'innovazione sostenibile nel panorama dei materiali attualmente in uso e risultando infine in linea con le nuove normative e le aspettative di mercato.

# Chapter 1 – Contesto Storico-Normativo

Negli ultimi decenni, la sostenibilità ambientale è diventata un tema centrale nelle politiche nazionali e sovranazionali, guidato dalla crescente consapevolezza dell'impatto dell'edilizia sull'ambiente e sulla qualità della vita. L'edilizia rappresenta uno dei settori con maggiori emissioni di gas serra, consumo di energia e produzione di rifiuti, rendendo indispensabile l'adozione di norme e obiettivi specifici volti a ridurre l'impatto. A livello normativo, l'Italia e l'Unione Europea hanno intrapreso percorsi legislativi volti alla riduzione delle emissioni degli edifici, all'efficientamento energetico e alla promozione di pratiche edilizie sostenibili. Questi interventi si sono concretizzati attraverso l'adozione di direttive, regolamenti e norme tecniche che cercano di armonizzare le pratiche di costruzione e di ristrutturazione in un'ottica di riduzione dell'impatto ambientale. Nel panorama legislativo europeo, queste misure rappresentano un pilastro della politica ambientale dell'UE, con ripercussioni dirette e indirette sui Paesi membri, compresa l'Italia.

## 1.1 Approccio Normativo Nazionale e Sovranazionale (CEE/UE)

Le normative in ambito di sostenibilità edilizia, sia italiane sia europee, sono state introdotte gradualmente a partire dagli anni '90, parallelamente all'aumento della consapevolezza ambientale globale. Questi interventi legislativi mirano a definire standard per la riduzione delle emissioni, il miglioramento dell'efficienza energetica e la promozione di pratiche edilizie sostenibili. Di seguito sono riportati i principali sviluppi normativi in ordine cronologico:

- 1993 - Direttiva 93/76/CEE (Direttiva SAVE): questa direttiva è una delle prime normative europee che affronta direttamente il tema dell'efficienza energetica nel settore edilizio con l'obiettivo di limitare le emissioni di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) attraverso il miglioramento dell'efficienza energetica. La direttiva introduce il concetto di certificazione energetica, suddividendo gli edifici in dieci classi energetiche, che indicano il livello di consumo energetico e l'efficienza dell'edificio suddivisa in dieci classi (A1-A4, B-G);
- 1997 - Protocollo di Kyoto: firmato anche dall'Unione Europea e dai suoi Paesi membri, tra cui l'Italia, il Protocollo impegna i Paesi industrializzati a ridurre le emissioni di gas serra. Sebbene non sia una normativa specifica per l'edilizia, ha gettato le basi per le successive politiche di sostenibilità;
- 2002 - Direttiva 2002/91/CE (EPBD - Energy Performance of Buildings Directive): è la prima Direttiva europea volta a promuovere l'efficienza energetica degli edifici, che rappresentano una significativa fonte di consumo energetico. La Direttiva stabilisce requisiti per migliorare le prestazioni energetiche degli edifici e richiede agli Stati membri di adottare misure per la certificazione energetica;
- 2005 - Decreto Legislativo 192/2005 (Italia): recepisce la Direttiva EPBD e introduce per la prima volta in Italia requisiti obbligatori per la certificazione energetica degli edifici, la diagnosi energetica e standard per l'isolamento termico degli edifici;
- 2010 - Direttiva 2010/31/UE: aggiorna la Direttiva EPBD e impone agli Stati membri di garantire che entro il 2020 tutti i nuovi edifici siano "a energia quasi zero" (Nearly Zero-

Energy Buildings - NZEB). Stabilisce inoltre standard più stringenti per gli edifici pubblici, con scadenze anticipate rispetto agli edifici privati;

- 2013 - Decreto Legislativo 63/2013 (Italia): adatta la normativa italiana alla nuova Direttiva EPBD, introducendo la classificazione NZEB e definendo requisiti specifici per il miglioramento delle prestazioni energetiche in fase di progettazione, costruzione e ristrutturazione degli edifici;
- 2015 - Decreto Interministeriale del 26 giugno 2015 (Italia): noto come "Decreto Requisiti Minimi", questo decreto definisce le metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e stabilisce i requisiti minimi per l'efficienza energetica degli edifici nuovi e per le ristrutturazioni. Questo intervento rappresenta un passo fondamentale verso la standardizzazione delle misure di efficienza energetica in Italia, allineandosi alle normative europee e promuovendo edifici a basso impatto energetico;
- 2018 - Direttiva 2018/844/UE: aggiorna nuovamente gli standard della EPBD, con un'attenzione specifica alla ristrutturazione degli edifici esistenti. Viene enfatizzata la necessità di una transizione energetica accelerata, e si promuovono interventi di riqualificazione del patrimonio edilizio esistente per favorire l'efficienza energetica e ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>;
- 2020 - Decreto Rilancio (Italia): introduce il Superbonus 110%, un incentivo che copre fino al 110% delle spese sostenute per interventi di efficientamento energetico in ambito residenziale, favorendo l'adozione di tecnologie e materiali sostenibili. Questo bonus rappresenta uno degli incentivi fiscali più importanti in Italia per incoraggiare l'efficienza energetica e la riduzione delle emissioni degli edifici;
- 2024 - Direttiva (UE) 2024/1275 (Direttiva "Case Green"): stabilisce obiettivi ambiziosi per la riduzione del consumo energetico e delle emissioni di gas serra degli edifici entro il 2030 e il 2035. In particolare, prevede che gli edifici residenziali raggiungano una riduzione del consumo energetico del 16% entro il 2030 e del 20% entro il 2035. Per gli edifici non residenziali, la direttiva stabilisce che entro il 2030 ne venga ristrutturato il 16%, ed entro il 2033 il 26%, garantendo il rispetto di nuove norme minime di prestazioni energetiche. Inoltre, la direttiva introduce l'obbligo per gli edifici di nuova costruzione di essere a "emissioni zero" a partire dal 2028 per quelli di proprietà pubblica e dal 2030 per quelli privati. Questa normativa rappresenta un impegno concreto dell'Unione Europea verso la decarbonizzazione del settore edile;
- 2024 - Decreto Requisiti Minimi 2024 (Italia): sottostà alla direttiva "Case Green" europea e aggiorna i requisiti minimi di efficienza energetica stabiliti dal decreto del 2015. Questo nuovo decreto mira a rendere ancora più stringenti i requisiti di sostenibilità e di prestazioni energetiche per gli edifici, in linea con gli obiettivi di decarbonizzazione europei. In particolare, introduce parametri aggiuntivi per il miglioramento della qualità dell'aria interna e per l'adozione di materiali a basso impatto ambientale, contribuendo così alla sostenibilità complessiva del settore edilizio.

Questi decreti e direttive rappresentano un'evoluzione normativa che risponde alla necessità di un'edilizia più sostenibile ed efficiente dal punto di vista energetico. Ogni normativa introduce nuove misure, incentivi e requisiti, definendo un percorso sempre più chiaro e preciso verso edifici a basso impatto ambientale e a elevate prestazioni energetiche.

## **1.2 Prospettive Future e Nuovi Obiettivi**

Per il futuro, l'Unione Europea e l'Italia hanno fissato ambiziosi obiettivi di sostenibilità e decarbonizzazione. Tra questi si annoverano:

- Green Deal Europeo e Fit for 55: l'UE mira a ridurre le emissioni di gas serra del 55% entro il 2030, con edifici a zero emissioni entro il 2050;
- Direttiva sul rendimento energetico degli edifici (in aggiornamento): prevede che, entro il 2030, tutti i nuovi edifici siano a zero emissioni, mentre entro il 2050 tutti gli edifici esistenti dovranno essere ristrutturati per ridurre il consumo energetico;
- Strategia Renovation Wave: l'UE intende raddoppiare i tassi di ristrutturazione degli edifici entro il 2030, promuovendo interventi di efficientamento energetico e inclusione di materiali sostenibili;
- PNRR (Italia): uno degli obiettivi del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza è migliorare la sostenibilità del parco edilizio, destinando ingenti risorse per l'efficientamento energetico.

Questi obiettivi testimoniano un impegno congiunto a lungo termine, puntando a una transizione verso un'edilizia totalmente sostenibile e a basso impatto ambientale.

## Chapter 2 – Materiali

In questo lavoro di tesi sono stati selezionati quattro materiali in collaborazione con l'azienda Safitech S.r.l., PMI piemontese con un'esperienza ultratrentennale nella produzione e commercializzazione di tessuti non tessuti in fibre vegetali biodegradabili.

Ognuno di essi è stato selezionato poiché ritenuto potenzialmente idoneo ad apportare un significativo miglioramento nell'isolamento termico ed acustico.

Su questi quattro materiali sono successivamente state eseguite caratterizzazioni a livello chimico-fisico, acustico, meccanico e termico, al fine di esplorare le loro potenziali applicazioni tese a migliorare le prestazioni energetiche in ambito edilizio.

### 2.1 Canapa-Wave™



Figura 2.1 Materiale Canapa-Wave™.

Il Canapa-Wave™, composto al 50% da canapa blandamente macerata e al 50% da canapa con una macerazione più prolungata. Inizialmente progettato come imballaggio da trasporto per assorbire gli urti e mantenere integri prodotti confezionati.

La canapa è una fibra estremamente versatile e sostenibile con numerosi pregi che la rendono ideale per molte applicazioni. Innanzitutto, è una fibra naturale e biodegradabile, il che significa che si decompone facilmente senza inquinare l'ambiente, contribuendo a ridurre l'accumulo di rifiuti. La coltivazione della canapa, inoltre, richiede meno acqua rispetto ad altre colture tessili, non necessita di pesticidi o fertilizzanti chimici e viene considerata una coltivazione rigenerativa in quanto migliora la qualità del suolo, contribuisce alla rotazione delle colture e assorbe notevoli quantità di CO<sub>2</sub> dall'atmosfera.

Queste caratteristiche la rendono una risorsa ecologicamente sostenibile ad impatto ambientale positivo.

Questa fibra è, infine, molto resistente e duratura, con una capacità meccanica elevata ed una significativa resistenza alla muffa e alla decomposizione, ulteriore vantaggio potenziale per materiali da costruzione impiegati in ambienti umidi o soggetti a variazioni climatiche.

In linea con la sua funzione principale risulta particolarmente voluminoso e con una bassa densità, presentando una grammatura di soli 800 grammi per metro quadrato per 1 cm di spessore.

## 2.2 JKI™



*Figura 2.2 Materiale JKI™.*

Il JKI™ è un materiale utilizzato per le calzature con la funzione di isolare, riempire e rinforzare le soles. È composto al 95% da juta e da un 5% di carta Kraft. La massa areica per uno spessore di 1 cm è pari a 2.4 kg/m<sup>2</sup>.

La juta è una fibra naturale conosciuta per la sua robustezza e sostenibilità. Essendo completamente biodegradabile si decompone facilmente senza lasciare residui nocivi, questo la rende una scelta ecologica per varie applicazioni. Ha un'ottima resistenza meccanica, che le permette di mantenere forma e struttura anche dopo un uso prolungato e offre buone capacità di isolamento termico e acustico, caratteristiche che ne ampliano le possibili applicazioni nell'edilizia sostenibile e nel design d'interni. La sua produzione, inoltre, richiede meno risorse rispetto ad altre fibre tessili, contribuendo a ridurre l'impatto ambientale.

La carta kraft, invece, è un tipo di carta robusta e versatile, prodotta da fibre di legno e trattata per ottenere un'elevata resistenza alla trazione e agli strappi. Questa carta è ampiamente utilizzata per imballaggi, grazie alla sua capacità di sopportare pesi e tensioni considerevoli, garantendo durabilità e protezione del contenuto. Anche la carta kraft è biodegradabile e per questo risulta scelta sostenibile per ridurre l'uso di materiali plastici e promuovere un'economia circolare.

## 2.3 Euroteck™



*Figura 2.3 Materiale Euroteck™.*

L'Euroteck™ è stato progettato per essere utilizzato per la pacciamatura, al fine di contrastare la crescita di piante infestanti particolarmente aggressive come le rizomatose. È composto al 63% da juta, al 18,5% da Sisal™ e al 18,5% da un biopolimero (Acido Poli Lattico, PLA). Il lato che espone il PLA viene termofissato per incrementare la resistenza sul lato a contatto con il terreno. Il risultato è un tappeto completamente biodegradabile con una densità areica per uno spessore di 0.5 cm pari a 1.6 kg/m<sup>2</sup>.

La fibra di Sisal, biodegradabile e naturale, si ottiene dalle foglie dell'agave e presenta un'elevata resistenza all'usura, agli agenti atmosferici e alle temperature elevate cosa che la rende ideale per utilizzi all'aperto o in ambienti esposti. Inoltre, grazie alla sua struttura rigida, mantiene la forma nel tempo e offre anche proprietà antistatiche naturali, impedendo l'accumulo di elettricità statica.

L'Acido Poli Lattico, infine, è un materiale innovativo derivante dalla polimerizzazione di zuccheri di piante ed è per questo biodegradabile, compostabile e riciclabile. Questo biopolimero offre flessibilità e versatilità, potendo essere lavorato per ottenere proprietà simili a quelle della plastica convenzionale, ma presentando un ciclo di vita molto più sostenibile. Inoltre, questi materiali possono essere progettati per avere resistenza meccanica e stabilità termica adeguate a una varietà di applicazioni, dall'imballaggio alimentare a componenti per l'industria tessile e automobilistica.

## 2.4 Resil MAC W™



Figura 2.4 Materiale Resil MAC W™.

Il Resil MAC W™ è composto al 43% da fibra di lana, al 43% da modacrilico e al 4% da Mater-Bi™. L'utilizzo primario è in qualità di sotto moquette ignifuga nel settore edile e industriale.

La lana possiede molte caratteristiche positive che la rendono una fibra naturale altamente versatile e apprezzata. In primo luogo, è un eccellente isolante termico: alla capacità di mantenere il calore in condizioni fredde, si aggiungono elevate capacità traspiranti, garantendo un ambiente fresco e asciutto anche in condizioni di temperature elevate e considerevoli capacità di assorbimento dell'umidità, fino al 30% del suo peso, senza risultare bagnata. In secondo luogo, presenta un'ottima resistenza agli odori, ha proprietà antibatteriche ed è ignifuga, con un punto di accensione elevato e la capacità di auto estinguersi, garantendo maggiore sicurezza, grazie alla struttura delle sue fibre e alla cheratina. Infine, è naturalmente elastica e resiliente, riuscendo a mantenere la sua forma originale anche dopo molte pieghe e compressioni ed è biodegradabile.

Il modacrilico è, invece, una fibra sintetica derivata da polimeri acrilici e costituita da una percentuale variabile di unità acrilonitriliche (acrilico) in peso, tra il 35% e l'85%, combinate con altri monomeri per conferire al materiale determinate proprietà. Una delle qualità più rilevanti di questo materiale è la resistenza al fuoco, con un alto punto di accensione e la capacità di auto estinguersi. Il Resil MAC W™, inoltre, offre un'ottima stabilità dimensionale, mantenendo la forma e le dimensioni anche dopo esposizioni ripetute al calore o dopo lavaggi frequenti, assicurando la durabilità e la qualità dei prodotti realizzati. Un altro aspetto positivo è la sua resistenza alle sostanze chimiche come oli e solventi e la sua resistenza alla luce solare e ai raggi UV, rendendolo un materiale che mantiene struttura e colore anche dopo esposizioni prolungate all'aperto, l'insieme di queste caratteristiche ne facilitano il suo uso in contesti industriali.

Il Mater-Bi, infine, è una bioplastica ottenuta principalmente da risorse rinnovabili come l'amido di mais e altri componenti vegetali. Il Mater-Bi è progettato per avere proprietà simili alle plastiche tradizionali, ma con l'importante differenza di essere completamente biodegradabile e compostabile, rendendolo una soluzione più ecologica e sostenibile rispetto ai polimeri di origine fossile.

## Chapter 3 – Caratterizzazione Dei Materiali

### 3.1 Caratterizzazione Fisica

La caratterizzazione fisica dei materiali è stata effettuata attraverso una serie di prove sperimentali mirate a misurare diverse proprietà fondamentali, tra cui la densità e la capacità di assorbimento dell'acqua a breve e lungo termine.

Questi parametri sono cruciali per comprendere la resistenza dei materiali all'umidità e le loro prestazioni nel tempo, in quanto influiscono sulla stabilità strutturale e sulle proprietà termiche.

La densità è stata misurata utilizzando la bilancia di Archimede, un metodo che consente di stabilire la massa volumica dei materiali.

La microstruttura ed i pori sono stati misurati utilizzando la tomografia computerizzata (CT Scan) per ottenere una visione tridimensionale della struttura interna dei campioni.

La capacità di assorbimento d'acqua a breve, per valutare la reattività immediata dei materiali in condizioni di umidità, e a lungo termine, per ottenere informazioni sulla stabilità del materiale nel tempo e sulla sua durabilità in ambiente umido, è stata misurata lasciando i campioni in immersione, o semi immersione, a 24 h e a 672 h (28 gg).

### 3.1.1 Bilancia Di Archimede - Densità

La bilancia di Archimede è uno strumento utilizzato per determinare la densità di un materiale sfruttando il principio di Archimede, che afferma che un corpo immerso in un fluido subisce una spinta verso l'alto pari al peso del fluido spostato. In pratica, la bilancia consente di misurare il peso di un campione sia a secco che immerso in un liquido per calcolarne la densità.

Il procedimento prevede, inizialmente, la misurazione del peso del campione a secco, ovvero fuori dal liquido. Successivamente, il campione viene immerso nel liquido, e si misura il peso apparente, che risulta ridotto a causa della spinta idrostatica esercitata dal liquido stesso. La differenza tra il peso a secco e il peso immerso permette di calcolare il volume del campione, poiché corrisponde al volume del liquido spostato.

Una volta noto il volume del campione, la densità può essere calcolata dividendo la massa ottenuta dalla pesata a secco per il volume. Questo metodo è particolarmente preciso e utile per materiali solidi irregolari o porosi, in quanto permette di misurare la densità senza dover calcolare direttamente il volume geometrico del campione.

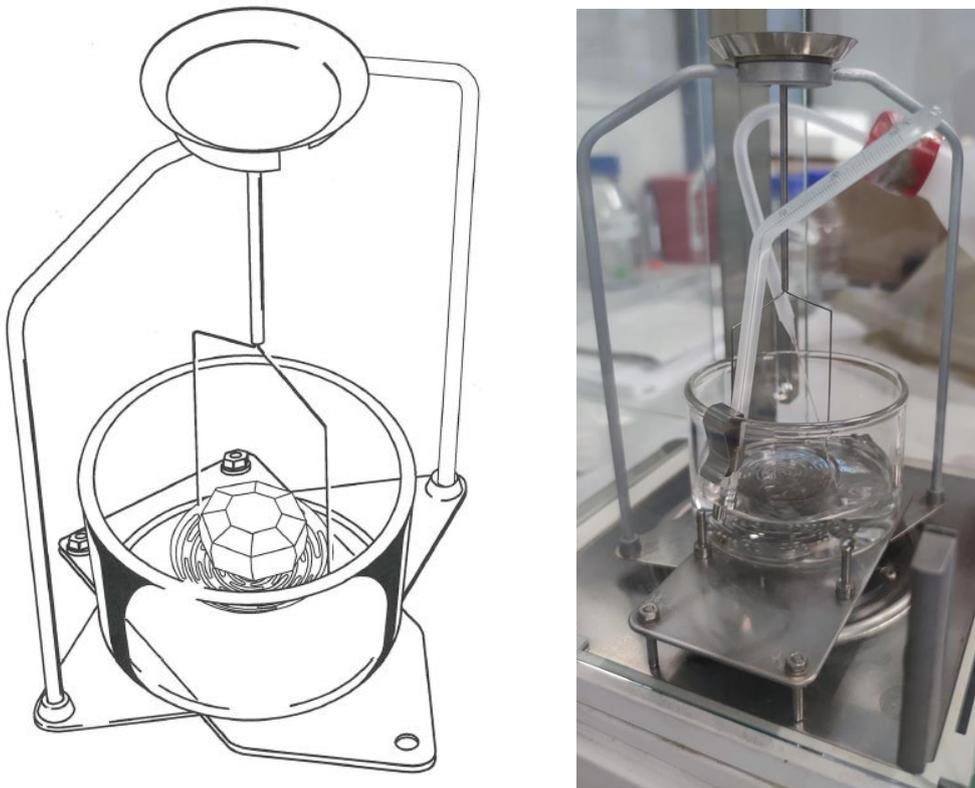


Figura 3.1 Bilancia di Archimede fonte YDK01LP User Manual.

### 3.1.1.1 Prova Sperimentale

Per lo svolgimento di questa prova, effettuata nel Laboratorio dei Biomateriali del DISAT presso il Politecnico di Torino, sono stati preparati quattro campioni per ciascun materiale, tutti di forma rettangolare con lati inferiori a 3 cm ed è stato selezionato come liquido l'alcool isopropilico, con densità di  $786 \text{ kg/m}^3$ , poiché i campioni risultavano troppo leggeri per essere misurati accuratamente in un fluido con una densità alta, come quella dell'acqua. L'alcool isopropilico, invece, essendo meno denso ha consentito di amplificare la differenza tra il peso a secco e il peso immerso, migliorando la precisione della misurazione.

Dopo aver misurato il peso a secco di ciascun campione, che rappresenta la massa del materiale fuori dal liquido, ogni campione è stato immerso nell'alcool isopropilico e ne è stato registrato il peso apparente, ridotto dalla spinta verso l'alto esercitata dal liquido.



Figura 3.2 Provini pesati in aria.

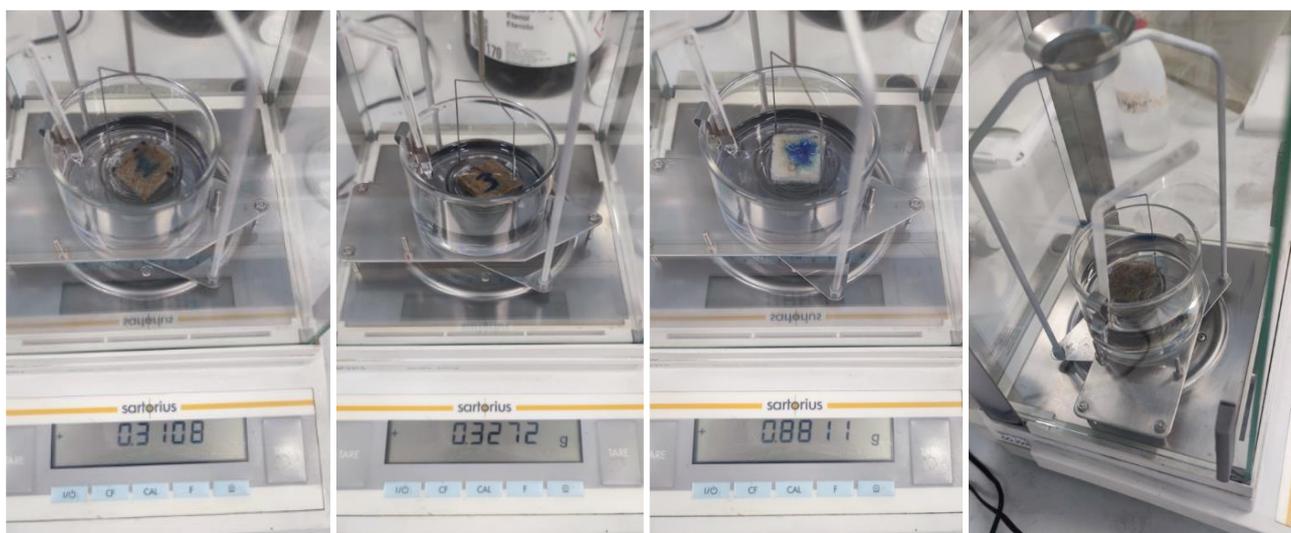


Figura 3.3 Provini pesati in alcool isopropilico.

Calcolando la differenza tra il peso a secco e il peso immerso, è stata determinata la spinta di Archimede. Dividendo questa forza per la densità dell'alcool isopropilico è stato possibile

determinare il volume spostato dal campione. Infine, dividendo la massa a secco del campione per il volume ottenuto, è stata calcolata la densità del materiale con maggiore precisione.

In ultimo, sono state eseguite analisi statistiche sui dati raccolti, includendo il calcolo della propagazione dell'errore per garantire una valutazione accurata e precisa delle misurazioni.

MASSA [g], T=20°C				
N° provini	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
1	0.5435	0.7747	0.9547	1.4131
2	0.6374	0.7655	1.4318	1.479
3	0.5964	0.8144	1.6534	1.615
4	0.9881	0.7706	1.3284	1.6014
<b>MEDIA</b>	0.69135	0.7813	1.342075	1.527125
<b>DEV. STANDARD</b>	<b>0.201532702</b>	<b>0.022385263</b>	<b>0.291673463</b>	<b>0.097564521</b>

Tabella 3.1 Massa dei campioni in aria.

PESO A SECCO [N]				
N° provini	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
1	0.005331735	0.007599807	0.009365607	0.013862511
2	0.006252894	0.007509555	0.014045958	0.01450899
3	0.005850684	0.007989264	0.016219854	0.01584315
4	0.009693261	0.007559586	0.013031604	0.015709734
<b>MEDIA</b>	0.006782144	0.007664553	0.013165756	0.014981096
<b>DEV.STANDARD</b>	<b>0.001977036</b>	<b>0.000219599</b>	<b>0.002861317</b>	<b>0.000957108</b>

Tabella 3.2 Peso dei campioni in aria.

MASSA [g], T=20°C				
N° provini	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
1	0.2434	0.316	0.5355	0.6122
2	0.3585	0.3101	0.5751	0.7504
3	0.3025	0.3272	0.9401	1.1992
4	0.6243	0.3104	0.8811	1.2593
<b>MEDIA</b>	0.382175	0.315925	0.73295	0.955275
<b>DEV. STANDARD</b>	<b>0.168118636</b>	<b>0.007991402</b>	<b>0.207173575</b>	<b>0.322286016</b>

Tabella 3.3 Massa dei campioni in alcool isopropilico.

PESO BAGNATO [N]				
N° provini	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
1	0.002387754	0.00309996	0.005253255	0.006005682
2	0.003516885	0.003042081	0.005641731	0.007361424
3	0.002967525	0.003209832	0.009222381	0.011764152
4	0.006124383	0.003045024	0.008643591	0.012353733
<b>MEDIA</b>	0.003749137	0.003099224	0.00719024	0.009371248
<b>DEV.STANDARD</b>	<b>0.001649244</b>	<b>7.83956E-05</b>	<b>0.002032373</b>	<b>0.003161626</b>

Tabella 3.4 Peso dei campioni in alcool isopropilico.

SPINTA DI ARCHIMEDE [N]				
N° provini	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
1	0.002943981	0.004499847	0.004112352	0.007856829
2	0.002736009	0.004467474	0.008404227	0.007147566
3	0.002883159	0.004779432	0.006997473	0.004078998
4	0.003568878	0.004514562	0.004388013	0.003356001
<b>MEDIA</b>	0.003033007	0.004565329	0.005975516	0.005609849
<b>DEV.STANDARD</b>	<b>0.000367762</b>	<b>0.000144084</b>	<b>0.002076422</b>	<b>0.002223873</b>

Tabella 3.5 Valori della Spinta di Archimede.

VOLUME [m³]				
N° provini	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
1	3.74552E-06	5.725E-06	0.000005232	9.99597E-06
2	3.48093E-06	5.68381E-06	1.06924E-05	9.0936E-06
3	3.66814E-06	6.0807E-06	8.90264E-06	5.18956E-06
4	4.54056E-06	5.74372E-06	5.58271E-06	4.26972E-06
<b>MEDIA</b>	3.85879E-06	5.80831E-06	7.60244E-06	7.13721E-06
<b>DEV.STANDARD</b>	<b>4.6789E-07</b>	<b>1.83313E-07</b>	<b>2.64176E-06</b>	<b>2.82935E-06</b>

Tabella 3.6 Volume dei campioni.

DENSITA' [kg/m³]				
N° provini	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
1	145.1065751	135.3188675	182.4732416	141.3670324
2	183.112117	134.6808062	133.9081869	162.6419399
3	162.58916	133.9318982	185.720245	311.2014274
4	217.616461	134.1639787	237.9487937	375.0596022
<b>MEDIA</b>	177.1060783	134.5238876	185.0126168	247.5675005
<b>DEV.STANDARD</b>	<b>31.154843</b>	<b>0.615522106</b>	<b>42.5082374</b>	<b>113.7166111</b>

Tabella 3.7 Densità dei campioni.

Di seguito un'immagine dei provini una volta misurati:

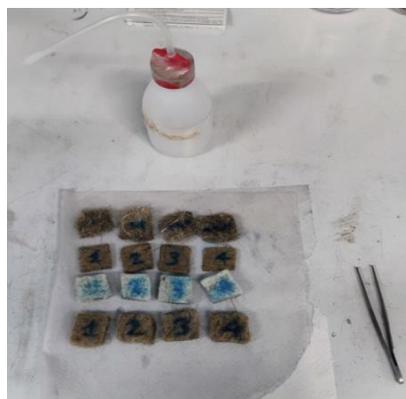


Figura 3.4 Insieme dei campioni di cui è stata calcolata la densità.

### 3.1.2 Assorbimento Acqua A Breve Termine

Questo test è particolarmente importante per materiali destinati all'uso edilizio, poiché fornisce indicazioni sulla loro stabilità e sulla resistenza iniziale all'acqua, caratteristiche che influenzano la durabilità e la performance in ambienti umidi.

#### 3.1.2.1 Prova Sperimentale

In questa prova sperimentale, effettuata nel Laboratorio dei Biomateriali del DISAT presso il Politecnico di Torino, seguendo le indicazioni delle British Standard EN12087, sono stati analizzati quattro campioni di prova per ogni materiale, con forma rettangolare e lati inferiori a 3 cm, al fine di garantire omogeneità e ripetibilità nelle misurazioni.

Essi sono stati tagliati in modo da non includere i bordi del prodotto e senza modificare la struttura originale e sono stati condizionati per almeno 6 ore a  $(23 \pm 5)$  °C.

La prova è stata effettuata a  $(23 \pm 5)$  °C.

È stato scelto di utilizzare il METODO 2A per campioni completamente immersi.

Inizialmente è stato pesato il campione di prova con una precisione di 0,1 g per determinarne la massa iniziale  $M_0$ [g].

N° provini	M <sub>0</sub> [g]			
	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
1	0.7102	0.7797	1.3105	1.7666
2	0.8071	0.706	1.0355	1.7918
3	0.6613	0.7584	1.3363	1.6412
4	0.8048	0.679	1.4453	1.8173
<b>MEDIA</b>	0.74585	0.730775	1.2819	1.754225
<b>DEV.STANDARD</b>	<b>0.072217934</b>	<b>0.046372576</b>	<b>0.174346246</b>	<b>0.07814117</b>

Tabella 3.8 Massa dei campioni prima dell'immersione in acqua.

Per ogni campione è stato misurato il volume geometrico.

N° provini	VOLUME [cm <sup>3</sup> ]			
	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
1	4,375	3,12	7,5	7,5
2	4,32	3,125	5,29	6,25
3	4,375	3,125	6,25	6,25
4	3,75	3	6,75	7,8
<b>MEDIA</b>	4,205	3,0925	6,4475	6,95
<b>DEV.STANDARD</b>	<b>0,304439375</b>	<b>0,061711695</b>	<b>0,927015822</b>	<b>0,817516565</b>

Tabella 3.9 Volume geometrico dei campioni.

Ogni campione è poi stato posizionato in un becher vuoto ed è stato applicato un carico sufficiente per mantenerlo in posizione. È stata aggiunta l'acqua distillata fino a quando la faccia superiore del campione si trovava a  $(50 \pm 2)$  mm sotto la superficie dell'acqua.

Il livello dell'acqua è rimasto costante durante il test e, dopo ventiquattro ore, è stato rimosso il campione di prova ed è stato lasciato drenare per  $(10 \pm 0,5)$  minuti su una piastra inclinata a 45°.

Successivamente è stato misurato accuratamente il peso finale M24 [g]

N° provini	M <sub>24</sub> [g]			
	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
1	3.4856	3.9331	8.4543	8.4423
2	3.7545	3.5363	6.9951	8.4996
3	2.6705	4.419	7.9767	8.3495
4	3.4844	3.4749	8.4424	9.5447
<b>MEDIA</b>	3.34875	3.840825	7.967125	8.709025
<b>DEV.STANDARD</b>	<b>0.469675409</b>	<b>0.435674797</b>	<b>0.685115583</b>	<b>0.560539023</b>

Tabella 3.10 Massa dei campioni dopo 24 ore di immersione in acqua.

Infine, è stato calcolato l'assorbimento d'acqua dopo ventiquattro ore espresso come rapporto in percentuale tra la differenza dei pesi M24 e M0 e il volume del campione e la rispettiva incertezza.

$$W_p = \frac{m_{24} - m_0}{V} \times \frac{100}{\rho_w}$$

Equazione 3.1 Formula per il calcolo dell'assorbimento a breve termine.

$$u_D = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

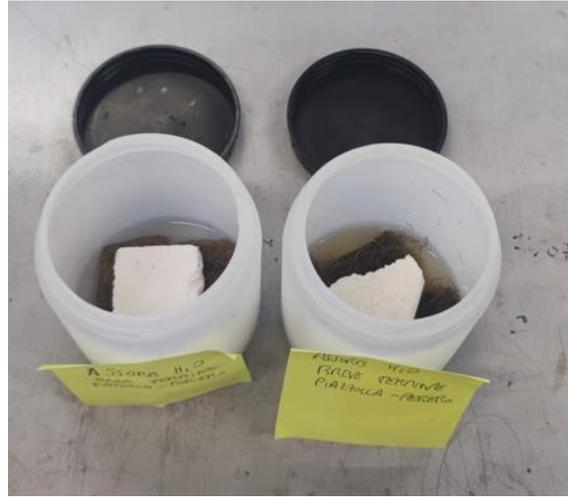
Equazione 3.2 Formula propagazione errore del numeratore.

$$\frac{u_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{u_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{u_B}{B}\right)^2}$$

Equazione 3.3 Formula propagazione errore del rapporto.

	W[kg/m <sup>2</sup> ]			
	Canapa-wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
	30,95005945	55,66085011	108,3066019	100,0690647
<b>incertezza numeratore</b>	0,475195139	0,438135761	0,706951183	0,565959396
<b>incertezza rapporto</b>	6,078451894	9,434537565	12,57270665	14,31323382

Tabella 3.11 Risultati assorbimento a breve termine.



*Figura 3.5 Becher con campioni parzialmente immersi.*



*Figura 3.6 Lastra di drenaggio inclinata a 45° - frontale.*



*Figura 3.7 – Lastra di drenaggio inclinata a 45° - laterale.*

### 3.1.3 Assorbimento Acqua A Lungo Termine

Le prove di assorbimento d'acqua a lungo termine, condotte su un periodo di 28 giorni, servono a valutare la resistenza dei materiali all'esposizione prolungata all'umidità, simulando condizioni realistiche tipiche dell'ambiente edilizio. L'obiettivo è osservare se il materiale si degrada nel tempo, un aspetto cruciale per determinare la sua idoneità in applicazioni edili a lungo termine, identificando i materiali che possono offrire maggiore durabilità in condizioni critiche.

#### 3.1.3.1 Prova Sperimentale

In questa prova sperimentale, effettuata nel Laboratorio dei Biomateriali del DISAT presso il Politecnico di Torino, sono state seguite le normative British Standard EN12087 e sono stati preparati quattro campioni. Il metodo scelto è stato il metodo 2A, che prevede l'immersione totale del campione.

I campioni sono stati conservati per 6 ore a una temperatura di  $(23 \pm 5)$  °C, e la prova è stata condotta a temperatura costante. Per determinare la massa iniziale dei campioni  $M_0$  [g], questi sono stati pesati con una precisione di 0,1 grammi.

N° provini	M <sub>0</sub> [g]			
	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
1	0.8252	0.705	1.5916	1.9655
2	0.956	0.6989	1.2843	2.1103
3	0.74	0.804	1.484	1.4425
4	0.6637	0.666	1.6106	1.4326
<b>MEDIA</b>	0.796225	0.718475	1.492625	1.737725
<b>DEV.STANDARD</b>	<b>0.125288637</b>	<b>0.059534045</b>	<b>0.149652762</b>	<b>0.351640274</b>

Tabella 3.12 Massa dei campioni prima dell'immersione in acqua.

Per ogni campione è stata calcolato il suo volume geometrico.

N° provini	VOLUME [cm <sup>3</sup> ]			
	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
1	4.375	3.12	7.5	7.5
2	4.32	3.125	5.29	6.25
3	4.375	3.125	6.25	6.25
4	3.75	3	6.75	7.8
<b>MEDIA</b>	4.205	3.0925	6.4475	6.95
<b>DEV.STANDARD</b>	<b>0.304439375</b>	<b>0.061711695</b>	<b>0.927015822</b>	<b>0.817516565</b>

Tabella 3.13 Volume geometrico dei campioni.

È stato posizionato il campione di prova nel becher vuoto ed è stato applicato un carico sufficiente per mantenerlo in posizione. È stata aggiunta l'acqua distillata fino a quando la faccia superiore del campione si trovava a  $(50 \pm 2)$  mm sotto la superficie dell'acqua.

L'assorbimento d'acqua è stato calcolato misurando la variazione di massa dei campioni completamente immersi in acqua per 28 giorni. Prima di ogni misurazione, l'acqua in eccesso sulla superficie dei campioni è stata rimossa tramite drenaggio.

Il livello dell'acqua è rimasto costante durante il test e dopo 28 giorni, è stato rimosso il campione di prova ed è stato lasciato drenare per  $(10 \pm 0,5)$  minuti su una piastra inclinata a  $45^\circ$ .

Successivamente è stato misurato accuratamente il peso finale  $M_{28}$  [g]

N° provini	$M_{28}$ [g]			
	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
1	4.8819	3.4664	9.3974	12.231
2	5.8277	3.291	7.0317	12.7848
3	5.5202	3.5085	8.1072	9.2702
4	2.3749	2.9575	8.598	9.0947
<b>MEDIA</b>	4.651175	3.30585	8.283575	10.845175
<b>DEV.STANDARD</b>	<b>1.567809239</b>	<b>0.250606976</b>	<b>0.989573707</b>	<b>1.934542586</b>

Tabella 3.14 Massa dei campioni dopo 28 giorni di immersione in acqua.

$$w_{it} = \frac{m_{28} - m_0}{V} \times \frac{100}{\rho_w}$$

Equazione 3.4 Formula per il calcolo dell'assorbimento a lungo termine.

$$u_D = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

Equazione 3.5 Formula propagazione errore del numeratore.

$$\frac{u_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{u_A}{A}\right)^2 + \left(\frac{u_B}{B}\right)^2}$$

Equazione 3.6 Formula propagazione errore del rapporto.

Infine, è stato calcolato l'assorbimento d'acqua espresso come rapporto in percentuale tra la differenza dei pesi  $M_{28}$  e  $M_0$  e il volume del campione e la rispettiva incertezza.

Di seguito i valori ottenuti:

	W [%]			
	Canapa-wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
Assorbimento	91,67538644	83,66612773	105,3268709	131,042446
incertezza numeratore	1,572807379	0,257581364	1,000825695	1,966241567
incertezza rapporto	37,98759469	8,494912169	21,68614363	32,21793219

Tabella 3.15 Risultati assorbimento a lungo termine.



Figura 3.8 – Becher con campioni totalmente immersi in acqua.



Figura 3.9 Lastra di drenaggio inclinata a 45° - laterale.

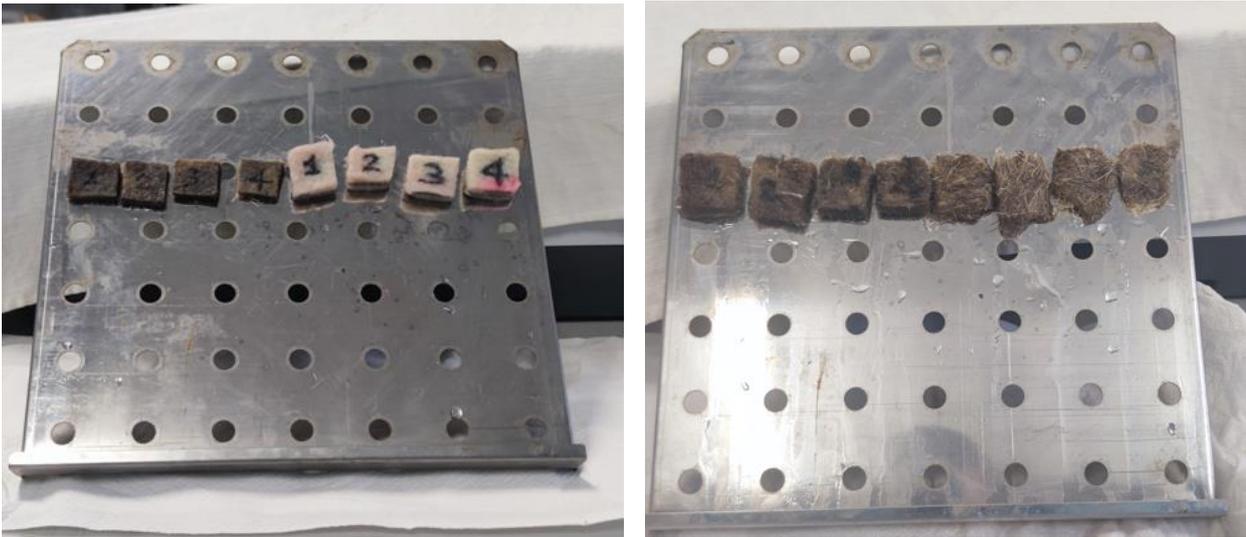


Figura 3.10 Lastra di drenaggio inclinata a 45° - frontale.

Per completare l'analisi sia i valori di assorbimento a breve termine sia quelli a lungo termine devono essere comparati con le densità dei materiali.

Nel caso dell'assorbimento a breve termine si ottiene che:

	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
r[kg/m <sup>3</sup> ]	164,411415	252,6434923	208,1543234	219,7302158
W	30,95005945	55,66085011	108,3066019	100,0690647

Tabella 3.16 Valori di densità e assorbimento a breve termine dei materiali.

Nel caso dell'assorbimento a lungo termine si ottiene che:

	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™
r[kg/m <sup>3</sup> ]	164,411415	252,6434923	208,1543234	219,7302158
W	91,67538644	83,66612773	105,3268709	131,042446

Tabella 3.17 Valori di densità e assorbimento a lungo termine dei materiali

Da questi dati si può dedurre che tutti i materiali presentano un elevato grado di assorbimento sia a breve sia a lungo termine.

Di conseguenza, siccome l'efficacia di un materiale isolante risulta compromessa dall'umidità, in quanto un materiale impregnato d'acqua perde gran parte della sua efficacia, e inoltre può acuire il degrado del materiale stesso e originare marcescenza queste caratteristiche di elevato assorbimento risultano in questo contesto sconvenienti e poco competitive.

### 3.1.4 CT Scan – Analisi morfologica tridimensionale

La CT Scan, o tomografia computerizzata, è una tecnica di imaging molto avanzata che permette di analizzare, senza danneggiarli, la microstruttura interna di materiali complessi. Questa caratteristica viene analizzata in quanto influenza in modo determinante le proprietà fisico-chimiche dei materiali aumentandone o diminuendone la resistenza meccanica e la conducibilità.

Se la microstruttura di un materiale non contiene o contiene pochissimi vuoti al suo interno esso viene definito compatto o denso.

Se, al contrario, un materiale presenta una microstruttura discontinua e caratterizzata da spazi vuoti al suo interno esso viene definito poroso, dal latino *porosus*, pieno di pori o aperture. Ne segue che la porosità può essere considerata come una componente non solida della microstruttura del materiale. Questi pori vengono, inoltre, classificati in due categorie: di tipo interconnesso, se appaiono collegati tra essi e con l'ambiente esterno, o isolati se sono dispersi, ma non connessi, all'interno della struttura.

#### 3.1.4.1 Prova Sperimentale

Questa prova sperimentale è stata svolta presso il laboratorio J-Tech@PoliTO Advanced Joining Technologies con il macchinario:

<b>MACHINE FEATURES</b>	
<b>Constructor</b>	Fraunhofer IKTS
<b>High voltage X-ray tube</b>	Open microfocus x-ray tube max operating voltage 300 kV
<b>X-Ray Detector</b>	2048 x 2048 pixels, size 400 x 400 mm, resolution 200 µm
<b>Manipulator stage</b>	4-axis manipulation system allowing: <ul style="list-style-type: none"><li>- sample manipulation xyz;</li><li>- sample rotation full range 0-360° and continuous rotation</li></ul>
<b>X-ray image resolution</b>	5 µm (under most favorable conditions)
<b>Sample size</b>	Max. 500 mm x 500 mm x 500 mm (L x W x H)
<b>Sample mass</b>	Max 100 kg
<b>Mechanical test</b>	Tensile, compression and bending test up to 10 kN of load during x-ray inspection

Tabella 3.18 Caratteristiche del macchinario per CT Scan, fonte J-Tech Polito.



Figura 3.11 Camera CT Scan.

Come disposto nella tabella 3.x sono stati preparati dei campioni quadrati di misura 2.5 cm per 2.5 cm con spessore variabile a seconda del materiale, compreso fra 0.5 e 1 cm, nel seguente ordine: Euroteck™, Canapa-Wave™, JKI™, Resil MAC W™.

I quattro campioni sono poi stati bloccati con del nastro adesivo ed è stato interposto, tra un campione e l'altro, del polistirene che risulta trasparente alle lunghezze d'onda impiegate e permette quindi una netta distinzione dei materiali nella scansione.

Successivamente sono stati posti su di un piedistallo ed il macchinario ha effettuato una serie di scansioni a raggi X sotto diverse angolazioni. Le immagini sono state poi elaborate con il Software MyVGL che ha generato una rappresentazione tridimensionale della loro struttura interna. Ogni campione, infine, è stato ricostruito in 3D e analizzato attraverso sezioni trasversali per visualizzare i dettagli della sua microstruttura.

Dall'analisi della microstruttura di ognuno dei campioni sono state rilevate discontinuità e vuoti, sia interconnessi sia isolati, e di conseguenza sono risultati tutti materiali porosi.

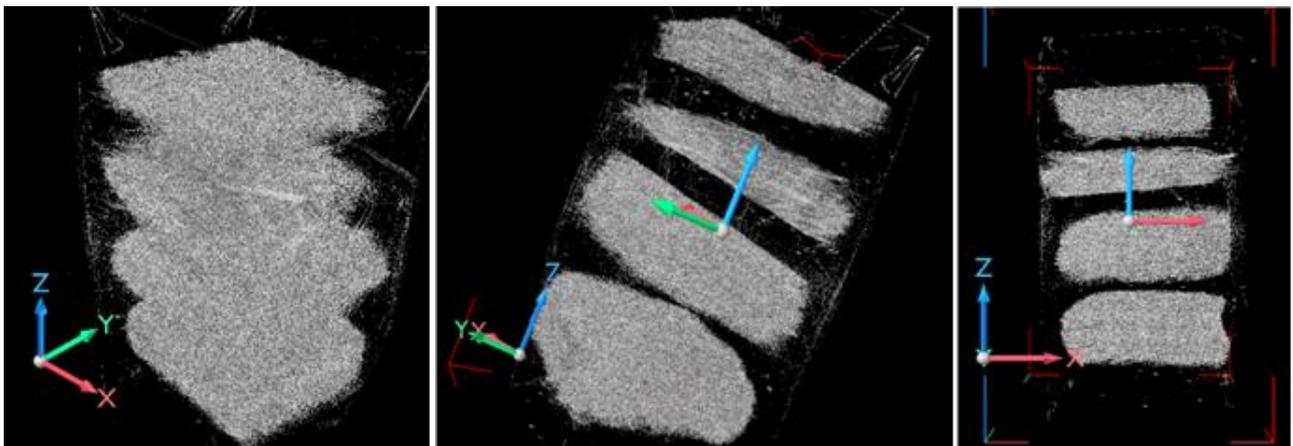


Figura 3.12 Risultati CT Scan.

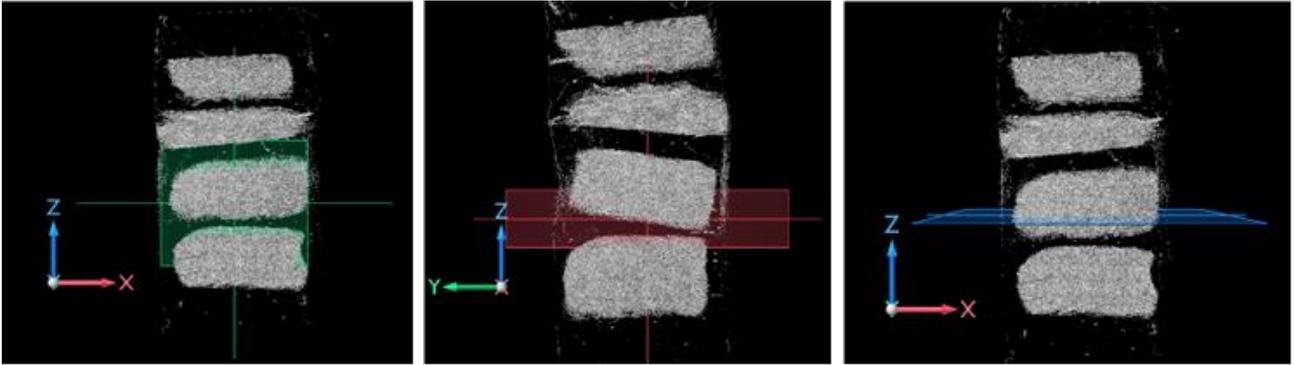


Figura 3.13 Piani di sezione lungo i tre assi principali.

In queste tre immagini si può notare come, scorrendo in direzione verticale, sono stati tagliati con un piano perpendicolare alle direzioni principali tutti e quattro i provini al fine di fare zoom-in sui quattro materiali allo scopo di osservare visivamente la microstruttura.

È stata, in conclusione, effettuata una misurazione del diametro dei pori, mostrata nelle immagini seguenti, secondo lo schema proposto da Everett nel 1972, che li ha classificati come macro, aventi cioè diametro maggiore di 50 nm.

### Euroteck™

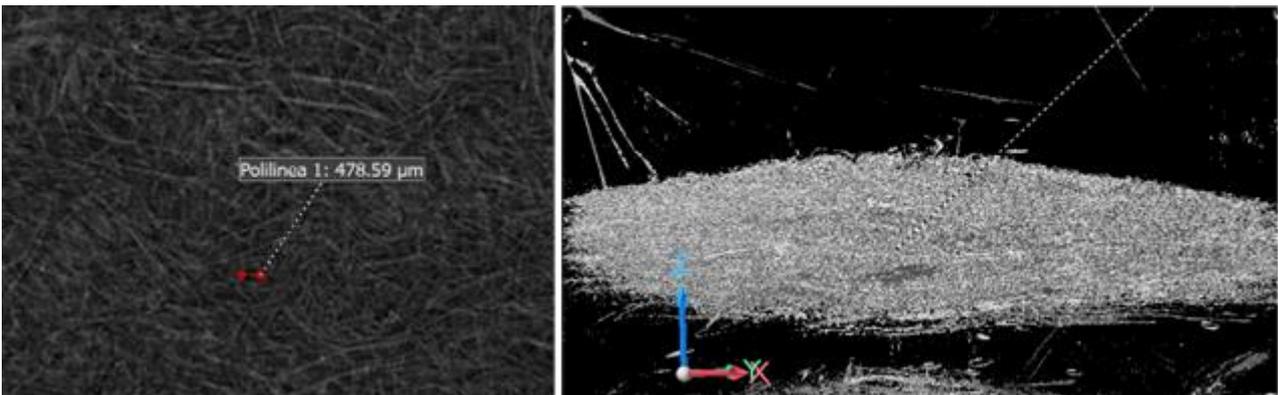


Figura 3.14 Zoom sui pori – Euroteck™.

### Canapa-Wave™

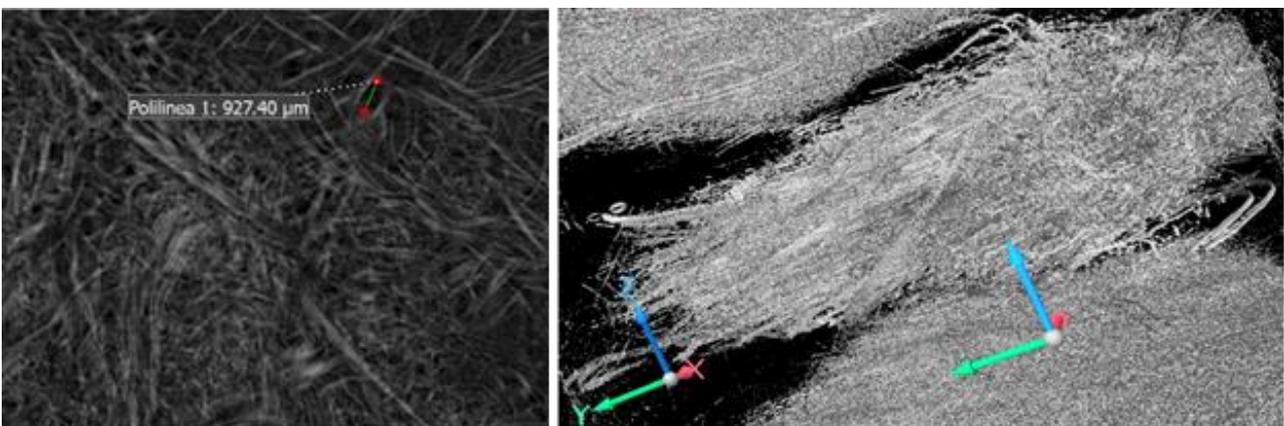


Figura 3.15 Zoom sui pori – Canapa-Wave™.

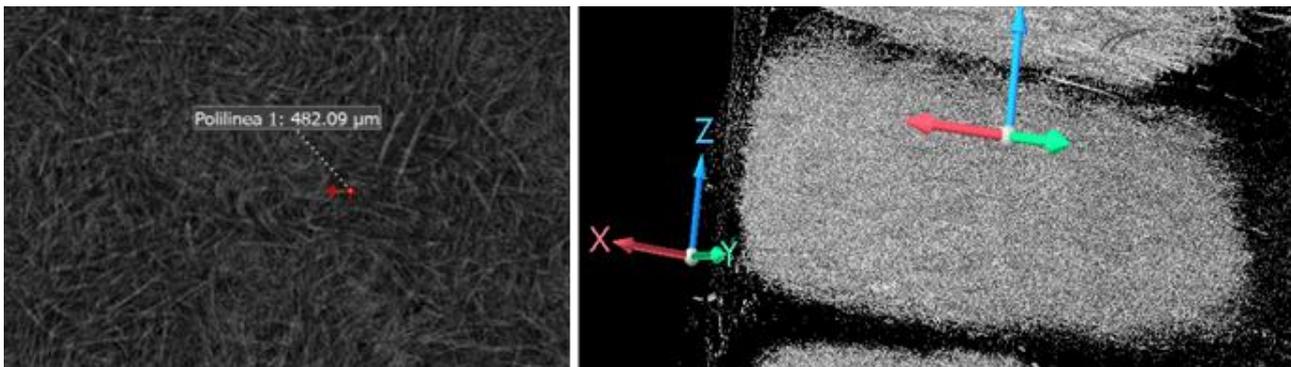


Figura 3.16 Zoom sui pori – JKI™.

### Resil MAC W™

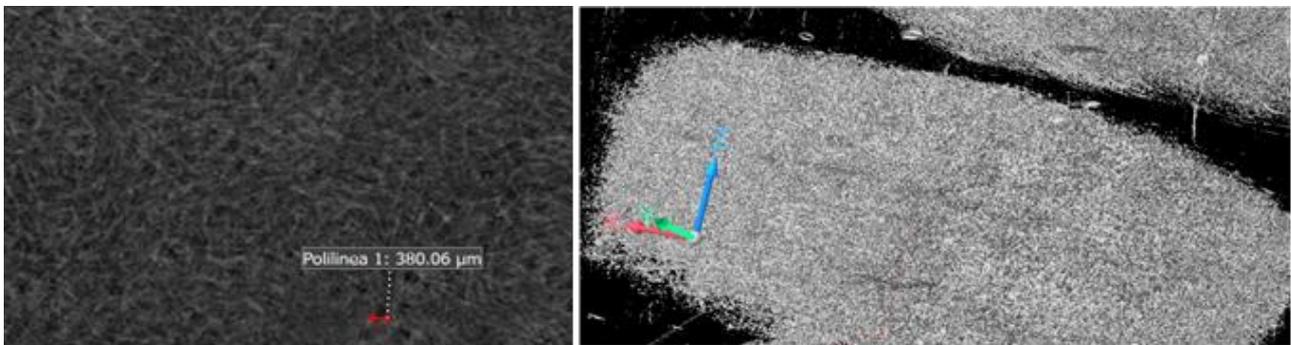


Figura 3.17 Zoom sui pori – Resil MAC W™.

Risultanti delle misurazioni dei pori:

- Euroteck™: 478.59 μm
- Canapa-Wave™: 927.40 μm
- JKI™: 482.09 μm
- Resil MAC W™: 380.06 μm

Guardando le immagini si può notare che i quattro materiali hanno le dimensioni dei pori molto diverse tra loro e quindi hanno una distribuzione eterogenea.

La canapa wave si distingue rispetto agli altri materiali per le dimensioni dei suoi pori molto elevate dell'ordine quasi di 1 mm. Invece Euroteck™, Resil MAC W™ e JKI™ hanno all'incirca le stesse dimensioni.

Sia la microstruttura sia le dimensioni dei pori, come precedentemente accennato, sono caratteristiche che influenzano direttamente le proprietà meccaniche e termiche dei materiali, per questo è necessario integrare queste informazioni con ulteriori prove sperimentali, al fine di ottenere un quadro completo per ogni materiale.

## 3.2 Caratterizzazione Acustica

Questa caratterizzazione è stata effettuata con un duplice scopo. Da un lato, visto l'obiettivo di studiare i materiali selezionati al fine di poterli utilizzare come pannelli esterni termicamente isolanti in ambito edilizio, è risultato interessante ampliare la caratterizzazione dei materiali al fine di comprendere se le loro componenti potessero comportare parallelamente all'isolamento termico anche un isolamento acustico. Il secondo motivo per cui è stato scelto di effettuare questa caratterizzazione deriva dalla possibilità che le caratterizzazioni termiche non risultassero adeguate e di conseguenza questa potrebbe comportare un eventuale sviluppo potenzialmente più interessante rispetto al primo per i materiali in analisi.

A tal fine è stata utilizzata la norma ISO 12354-1:2017 che stabilisce le linee guida per l'assorbimento acustico tra ambienti confinati, includendo requisiti tecnici per la misurazione del coefficiente di fonoassorbimento e specifiche di installazione dei materiali assorbenti in modo da minimizzare la trasmissione del suono. Questa normativa classifica gli indici di riduzione sonora e i valori di isolamento richiesti, garantendo che le strutture acustiche degli edifici rispondano a standard di assorbimento acustico e isolamento per un'ampia gamma di frequenze.

Riassumendo, dalla prospettiva analizzata in questo elaborato, La norma richiede che la misurazione del coefficiente di fonoassorbimento venga valutato in bande di frequenza standardizzate (come bande terziarie tra 100 Hz e 3.150 Hz), con la possibilità di estendere la gamma fino a 50 Hz per situazioni specifiche.

A partire dalle prescrizioni della norma si è proseguito nella caratterizzazione acustica effettuando una misurazione del coefficiente di fonoassorbimento utilizzando il tubo di Kundt.

Il fonoassorbimento è la capacità di un materiale di assorbire e trattenere parte dell'energia sonora che lo colpisce. Questo fenomeno è legato alla struttura fisica dei materiali fonoassorbenti, che sono spesso spugnosi o porosi, con una notevole presenza di cavità rispetto alle parti solide e dense.

All'interno di queste cavità, l'aria presente viene messa in movimento dalle onde sonore che colpiscono la superficie del materiale. Questo movimento trasforma l'energia sonora in calore, convertendola in un'altra forma di energia. Se un materiale permettesse il passaggio dell'aria senza alcuna resistenza, non si avrebbe alcuna trasformazione delle onde sonore in calore. Un buon materiale fonoassorbente deve quindi bilanciare queste esigenze, facilitando il passaggio dell'aria attraverso una rete continua e interconnessa di cavità, ma offrendo anche una resistenza sufficiente al flusso.

Di conseguenza, materiali che sono troppo densi, rigidi o sottili tendono a essere meno efficaci nell'assorbire il suono. Le prestazioni di un materiale fonoassorbente vengono misurate tramite un coefficiente chiamato  $\alpha_w$ , il cui valore varia da 0 a 1. Valori superiori a 1 non sono possibili, poiché rappresentano la percentuale di energia sonora assorbita rispetto a quella che lo colpisce.

### 3.2.1 Tubo di Kundt - Fonoassorbimento

La determinazione delle proprietà di fonoassorbimento di un materiale avviene sperimentalmente utilizzando il tubo ad impedenza ad onde piane, noto anche come tubo di Kundt. Questo strumento permette l'analisi della propagazione di onde acustiche incidenti e riflesse, poiché l'onda sonora incidente viene in parte riflessa, in parte trasmessa e in parte assorbita dal materiale.



Figura 3.18 Tubo di Kundt.

L'onda sonora incidente può essere descritta tramite una funzione cosinusoidale o sinusoidale, che rappresenta la pressione sonora, mentre l'onda riflessa ha una forma simile, ma con diverse caratteristiche. Le espressioni per le due onde sono le seguenti:

$$p_i = A \cos(2\pi f t)$$

Equazione 3.7 Onda sonora incidente.

$$p_r = B \cos\left(2\pi f \left(t - \frac{2x}{c}\right)\right)$$

Equazione 3.8 Onda sonora riflessa.

dove:

- A è l'ampiezza dell'onda incidente;
- B è l'ampiezza dell'onda riflessa;
- f è la frequenza;
- t è il tempo;
- x è la distanza dalla superficie del campione che si sta testando;
- c è la velocità della luce.

La pressione totale all'interno del tubo, rilevabile tramite un microfono, è data dalla somma delle due componenti, ossia l'onda incidente e quella riflessa. Il coefficiente di assorbimento, ovvero il

parametro di interesse nello studio delle proprietà fonoassorbenti dei materiali, si calcola attraverso una formula specifica:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2$$

*Equazione 3.9 Coefficiente di fonoassorbimento.*

Lo stesso coefficiente, in situazioni differenti, si può calcolare anche mediante il sistema di punti minimi e massimi. Il tubo di impedenza è costituito da un cilindro chiuso, con il campione del materiale da testare posizionato ad un'estremità e un altoparlante all'altra, che genera il suono. Questo metodo richiede che i campioni abbiano dimensioni ridotte, generalmente cilindriche con un diametro preciso di 3,47 cm, così da poter essere inseriti nel tubo.

È importante inoltre fare riferimento alla procedura standardizzata descritta nella norma ISO 10534, che regola la misurazione del coefficiente di assorbimento. Questa procedura prevede la generazione di un'onda piana e la misurazione della pressione sonora massima e minima nei punti in cui sono posizionati i microfoni. Quando l'onda incidente generata dall'altoparlante colpisce il campione, parte di essa viene riflessa, creando un pattern di onde stazionarie all'interno del tubo. Misurando la pressione nei punti massimi e minimi si può quindi determinare il coefficiente di assorbimento tramite un'espressione matematica appropriata:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{\rho_{max}/\rho_{min} - 1}{\rho_{max}/\rho_{min} + 1}\right)^2$$

*Equazione 3.10 Coefficiente di fonoassorbimento calcolata mediante punti minimi e massimi.*

Viene proposta di seguito una tabella che converte i valori del coefficiente di assorbimento acustico dipendenti dalle varie frequenze in un unico indice di valutazione di facile lettura.

$\alpha_w$	Classe di fonoassorbimento
0.95 - 0.90	A (altamente assorbente)
0.85 - 0.80	B (altamente assorbente)
0.75 - 0.70 - 0.65 - 0.60	C (molto assorbente)
0.55 - 0.50 - 0.45 - 0.40 - 0.35 - 0.30	D (assorbente)
0.25 - 0.20 - 0.15	E (poco assorbente)
0.10 - 0.05 - 0.00	Non classificato (riflettente)

*Tabella 3.19 Classifica valori di fonoassorbimento.*

### 3.2.1.1 Prova Sperimentale

Al fine di effettuare questa prova sperimentale di fonoassorbimento è stato utilizzato, come precedentemente illustrato, il tubo di Kundt situato nel Laboratorio di Acustica Applicata (LAA) DENERG presso il Politecnico di Torino.

Prima di procedere all'esame di materiali selezionati per le prove sperimentali è stato necessario effettuare una misurazione con un campione di tipo anecoico al fine di visualizzare dei valori di riferimento.

Successivamente sono stati preparati tre campioni per ognuno dei quattro materiali selezionati di forma circolare e diametro 3,47 cm. È stato scelto di produrre tre campioni per materiale a fine statistico.

I risultati del coefficiente di assorbimento sono presentati attraverso grafici che illustrano l'andamento del valore in funzione della frequenza per ciascun campione testato, incluso il campione anecoico.

La prova sperimentale è stata condotta secondo le seguenti fasi:

1. Posizionamento del campione: Il materiale fonoassorbente (campione) viene posizionato all'estremità di un tubo rigido (il tubo di Kundt), in cui viene generata un'onda sonora da un altoparlante o da un trasduttore. Questa configurazione permette di studiare l'interazione tra l'onda sonora e la superficie del materiale.
2. Generazione dell'onda stazionaria: Un altoparlante produce un'onda sonora a una frequenza specifica, che si propaga lungo il tubo. Quando l'onda sonora incontra l'estremità con il campione, parte dell'onda viene riflessa, e si crea un'onda stazionaria all'interno del tubo. Il materiale assorbe parte dell'energia sonora, riducendo l'intensità delle riflessioni.
3. Misura della pressione acustica: Microfoni o sensori di pressione acustica vengono posizionati lungo il tubo per misurare i massimi e i minimi di pressione, che rappresentano rispettivamente i nodi e i ventri dell'onda stazionaria.
4. Calcolo del coefficiente di assorbimento: Dai valori di pressione acustica raccolti, è possibile calcolare il coefficiente di assorbimento del materiale. Questo coefficiente rappresenta la frazione di energia sonora assorbita dal campione rispetto a quella incidente. Un materiale anecoico ideale avrebbe un coefficiente di assorbimento prossimo a 1, indicando che assorbe quasi tutta l'energia sonora.

Di seguito i risultati derivanti dai vari materiali ed i grafici mostranti il coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza.

#### **Materiale Anecoico**

Un materiale anecoico, dal greco "senza eco", è un materiale progettato per limitare al massimo i fenomeni di eco e la riflessione dei segnali.

Nel tubo di Kundt è stato necessario effettuare una prova sperimentale iniziale utilizzando questo materiale quasi completamente fonoassorbente per caratterizzare le proprietà acustiche di un

materiale ideale e poter successivamente effettuare una comparazione dei coefficienti di fonoassorbimento e dei relativi grafici.



Figura 3.19 Campioni Anecoico.

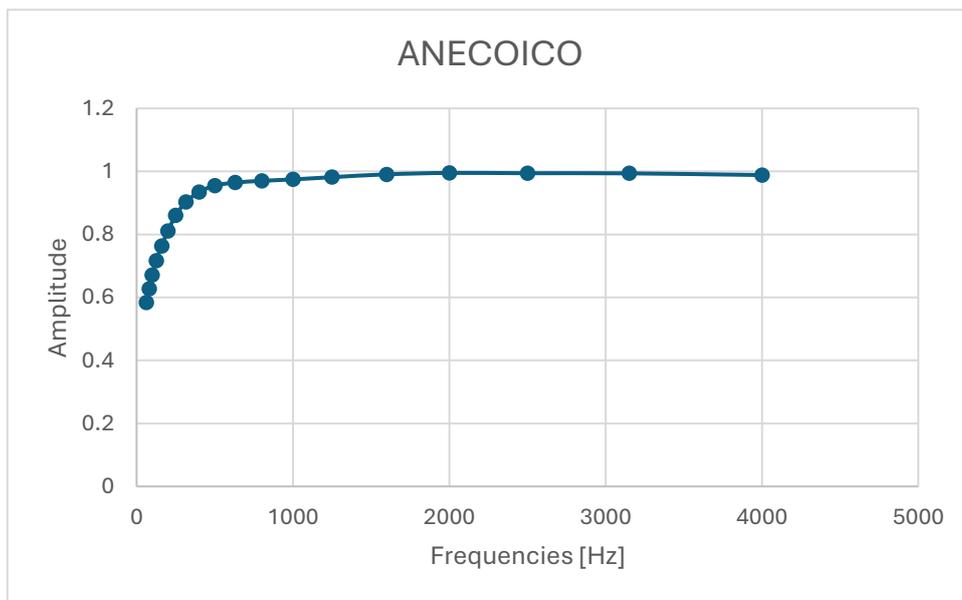


Figura 3.20 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione Anecoico.

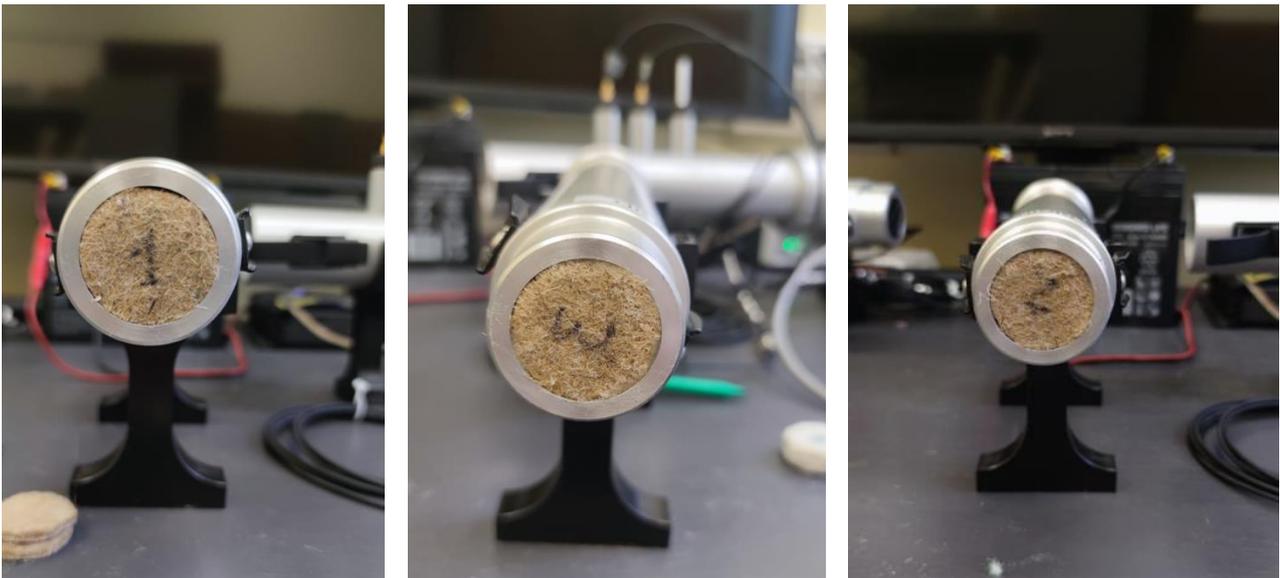


Figura 3.21 Campioni Euroteck™.

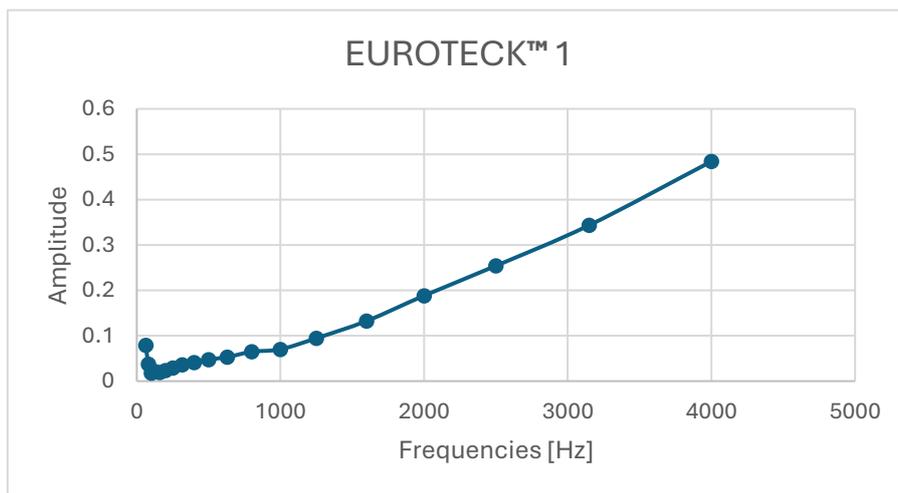


Figura 3.22 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 1.

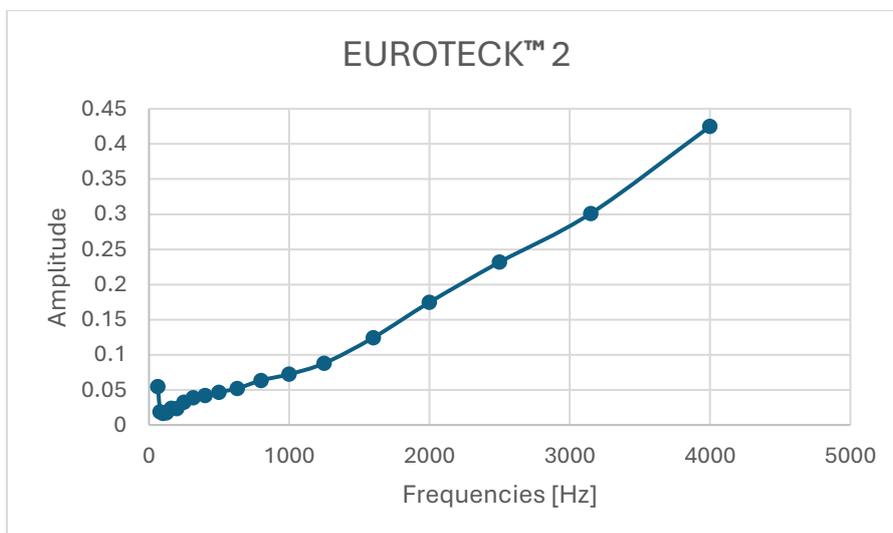


Figura 3.23 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 3.

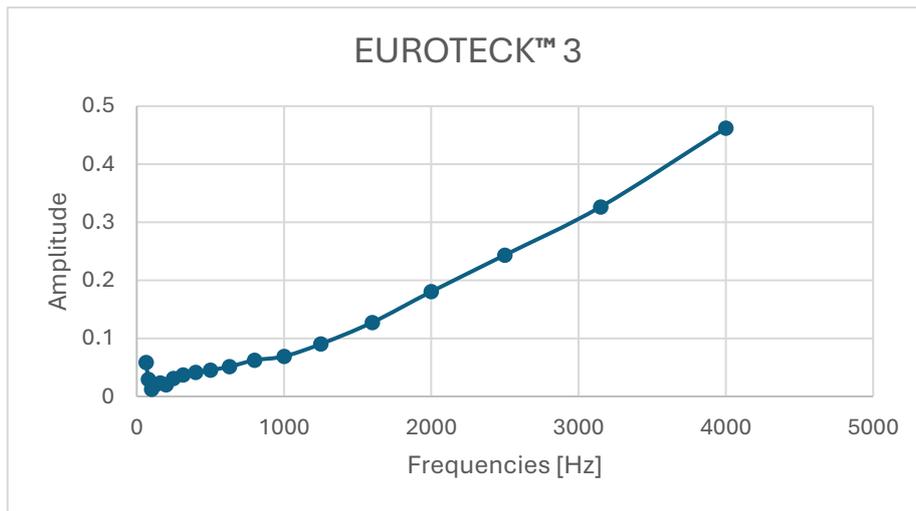


Figura 3.24 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 3.

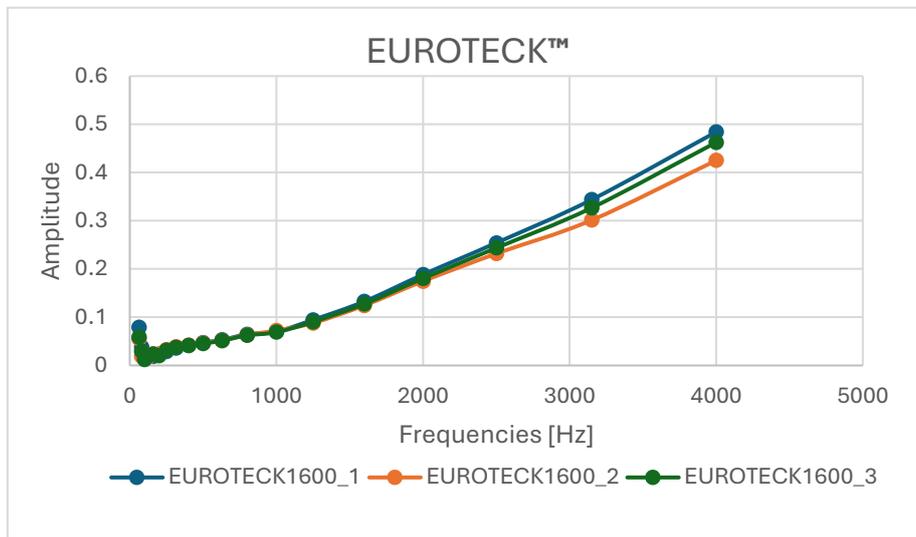


Figura 3.25 Coefficienti di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campioni 1,2,3.

## Resil MAC W™

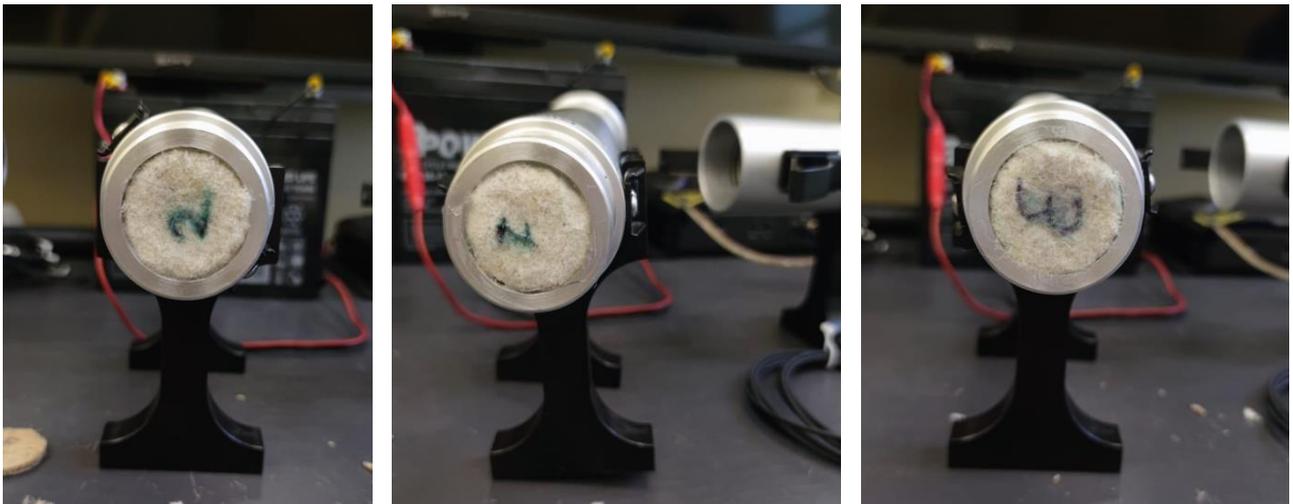


Figura 3.26 Campioni Resil MAC W™.

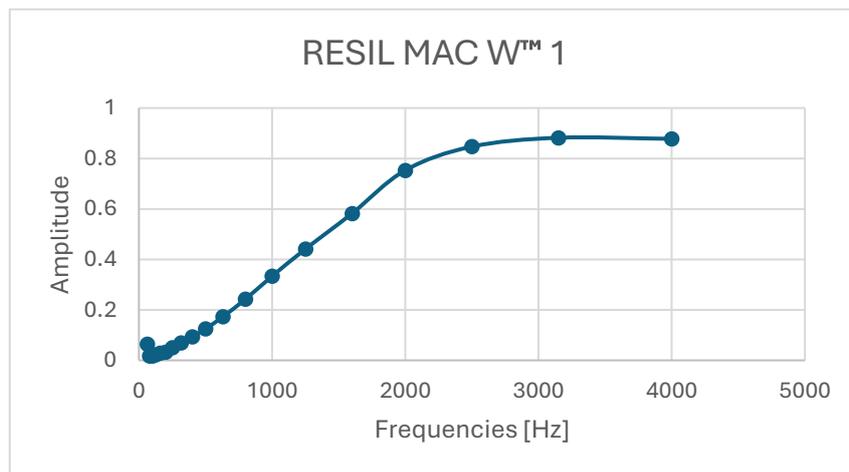


Figura 3.27 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 1.

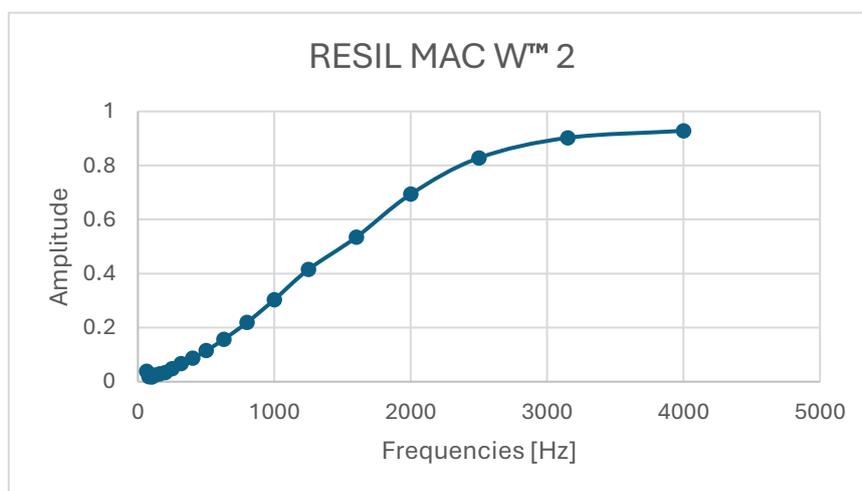


Figura 3.28 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 2.

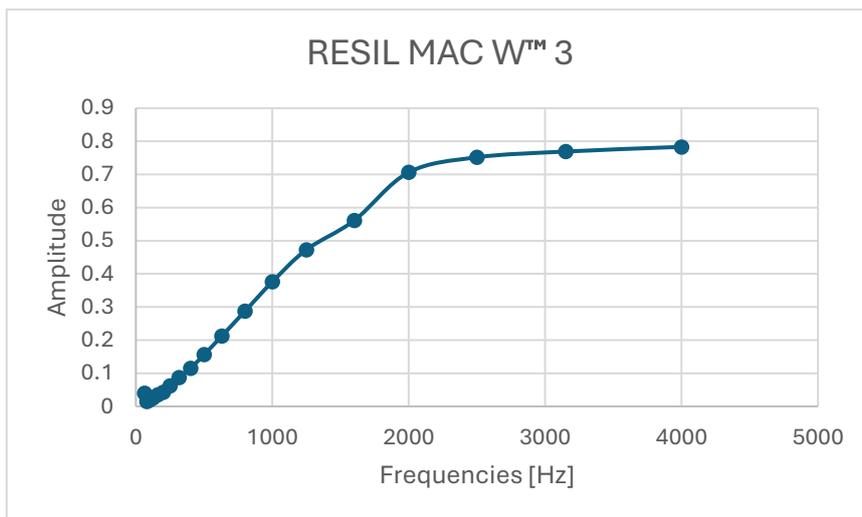


Figura 3.29 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 3.

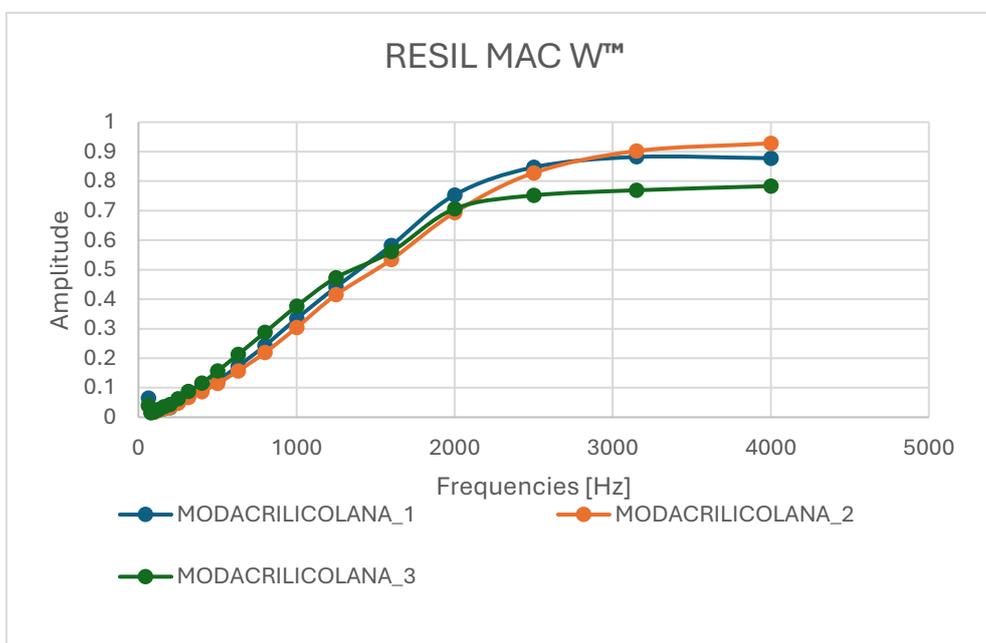


Figura 3.30 Coefficienti di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campioni 1,2,3.

## Canapa-Wave™

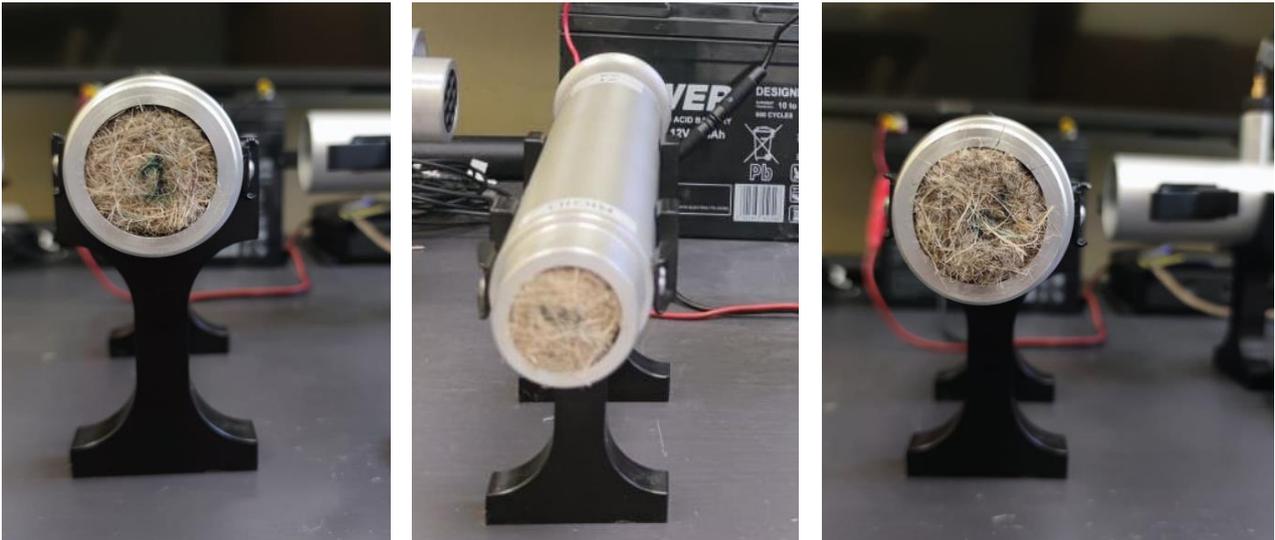


Figura 3.31 Campioni di Canapa-Wave™.

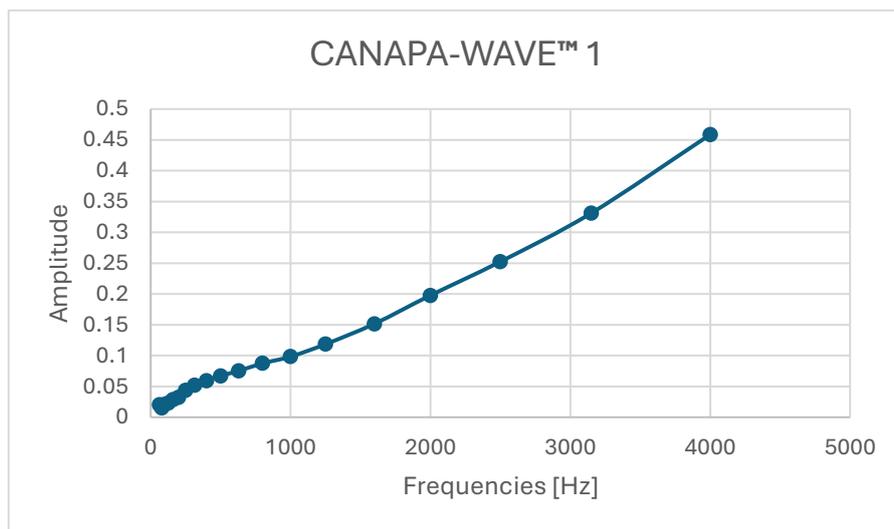


Figura 3.32 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 1.

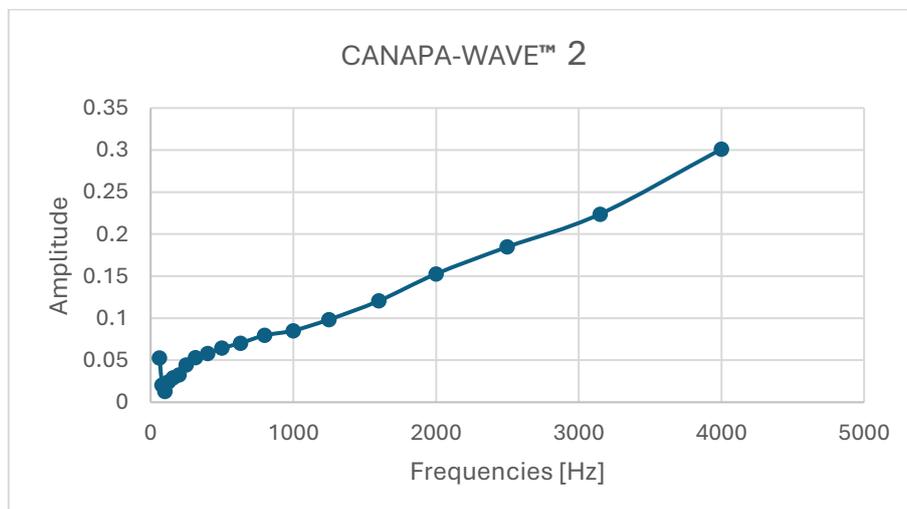


Figura 3.33 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 2.

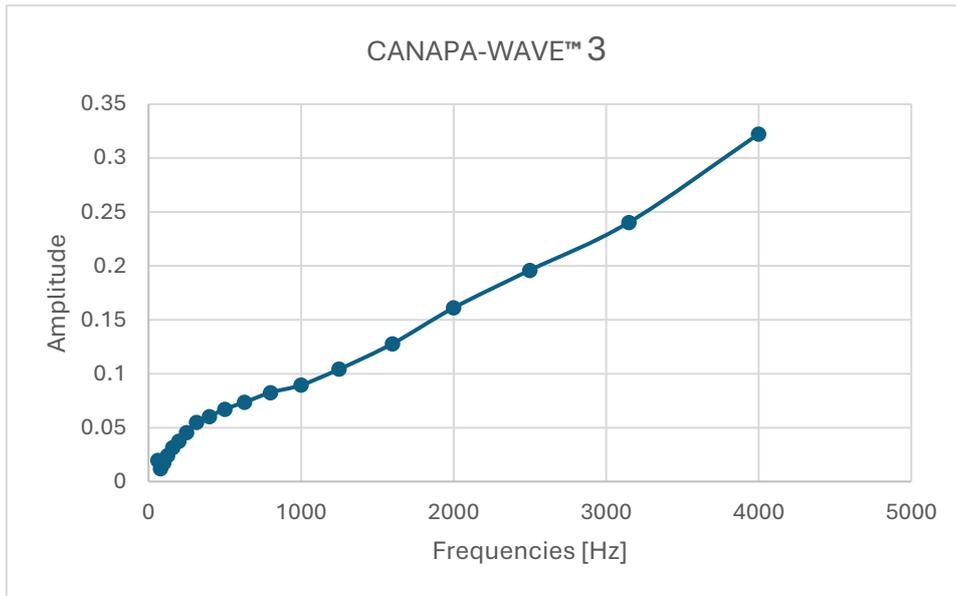


Figura 3.34 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 3.

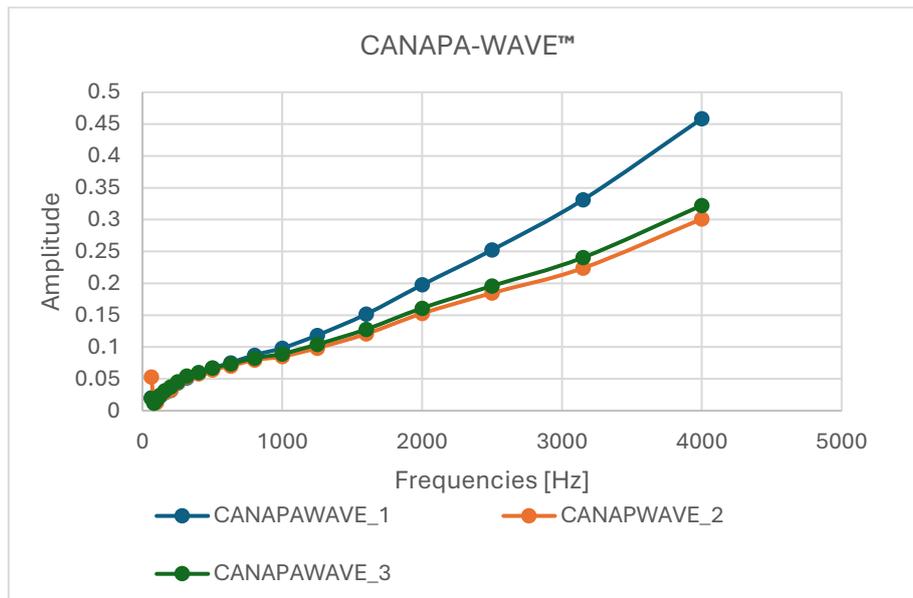


Figura 3.35 - Coefficienti di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campioni 1,2,3.

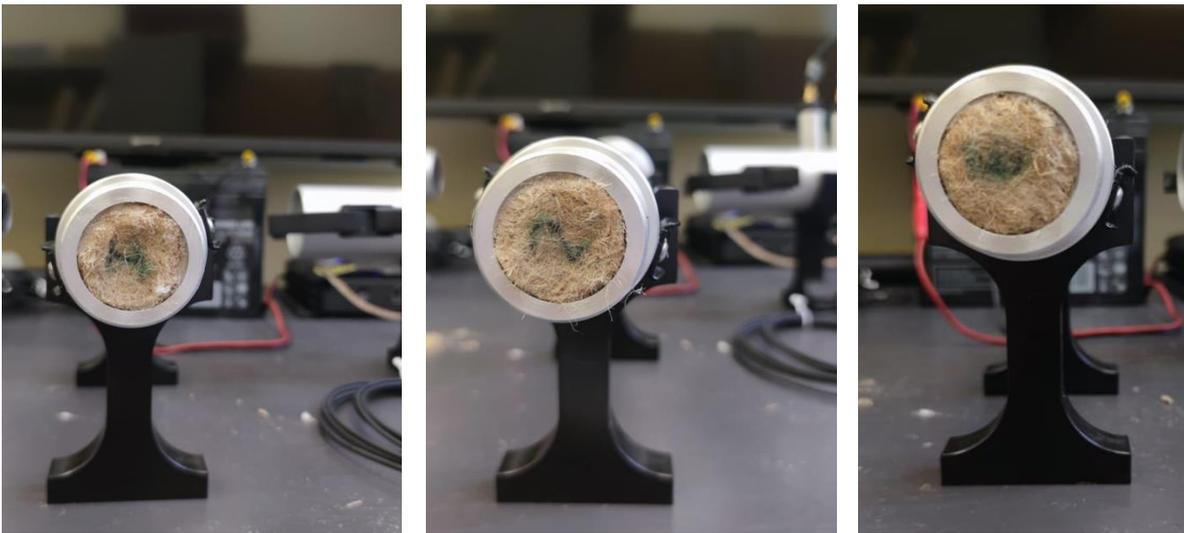


Figura 3.36 Campioni JKI™.

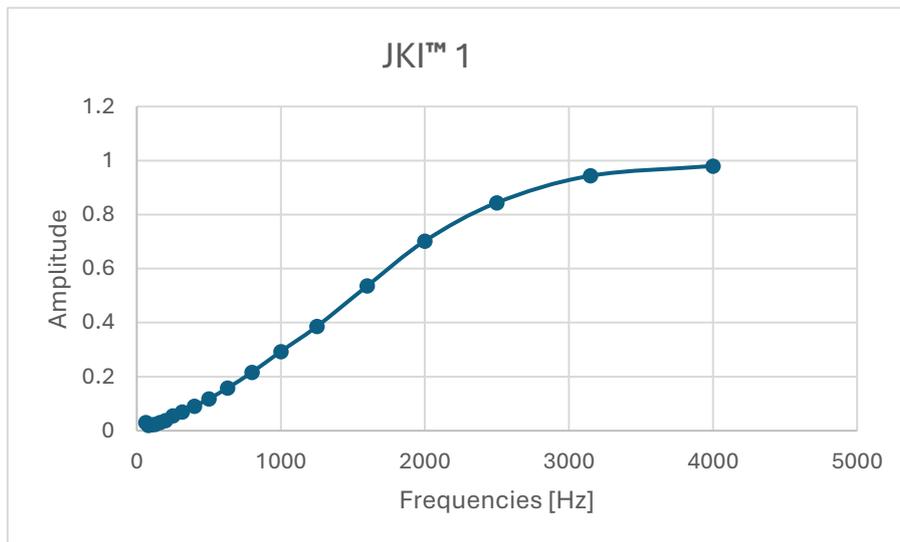


Figura 3.37 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 1.

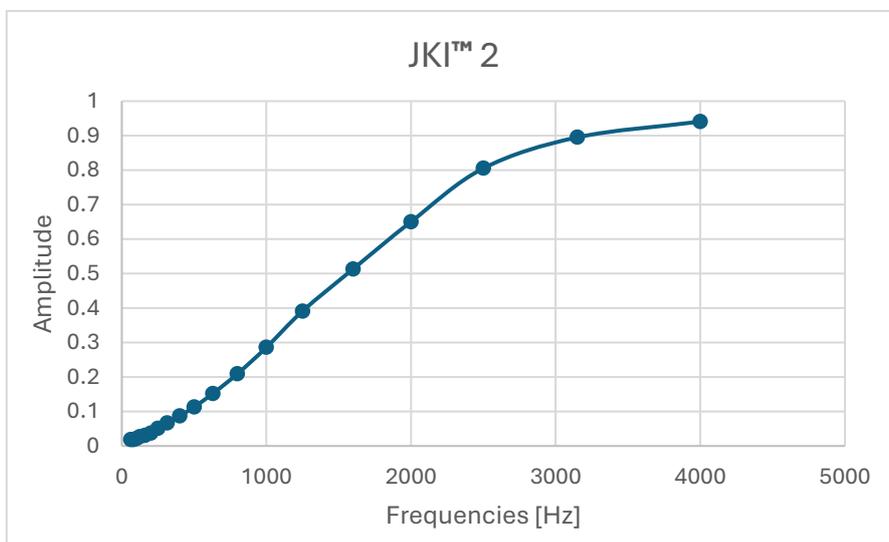


Figura 3.38 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 2.

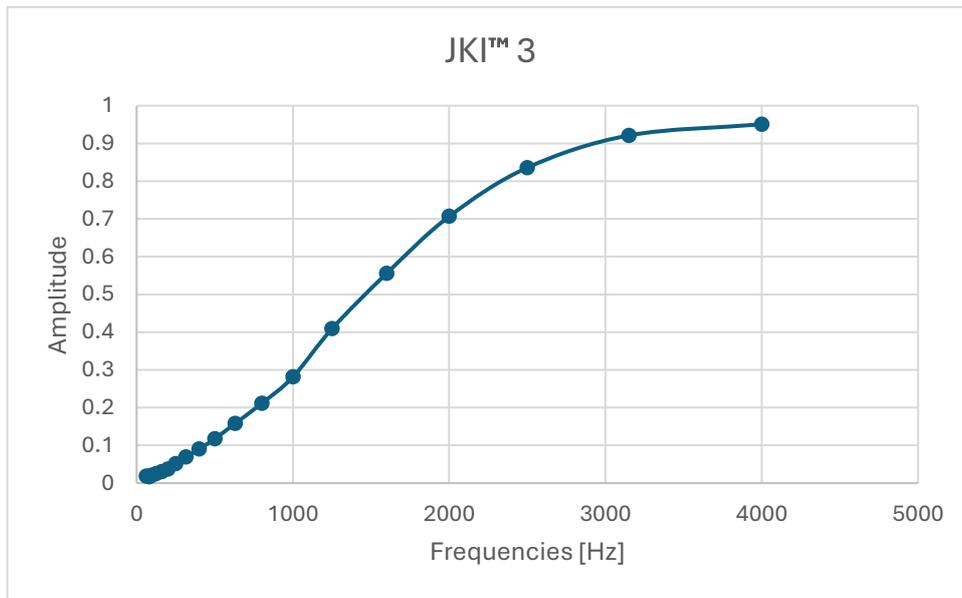


Figura 3.39 Coefficiente di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campione 3.

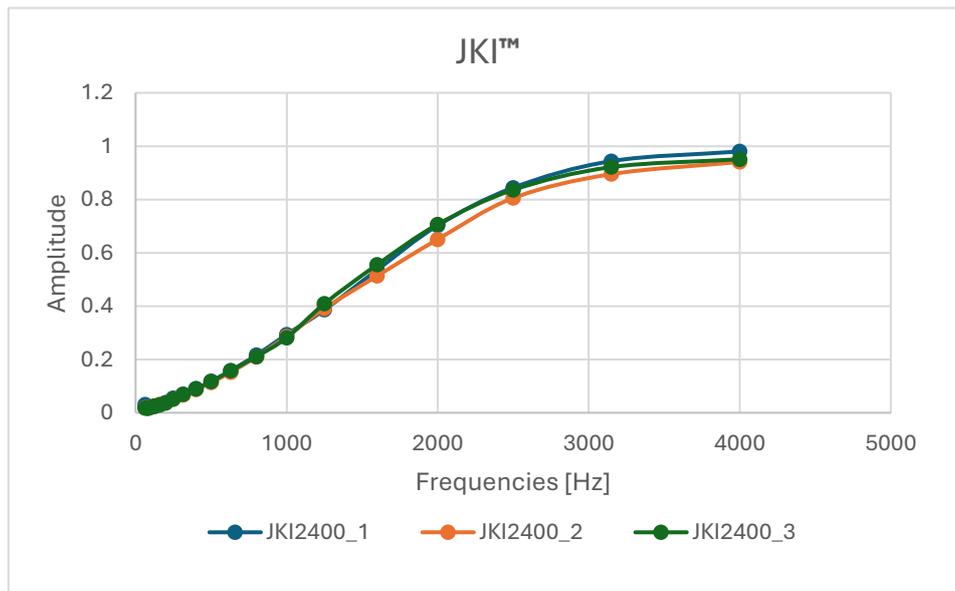


Figura 3.40 Coefficienti di fonoassorbimento in funzione della frequenza – Campioni 1,2,3.

## Risultati

Di seguito si mostra un grafico complessivo che rappresenta l'andamento del coefficiente di assorbimento di tutti i campioni testati in funzione della frequenza.

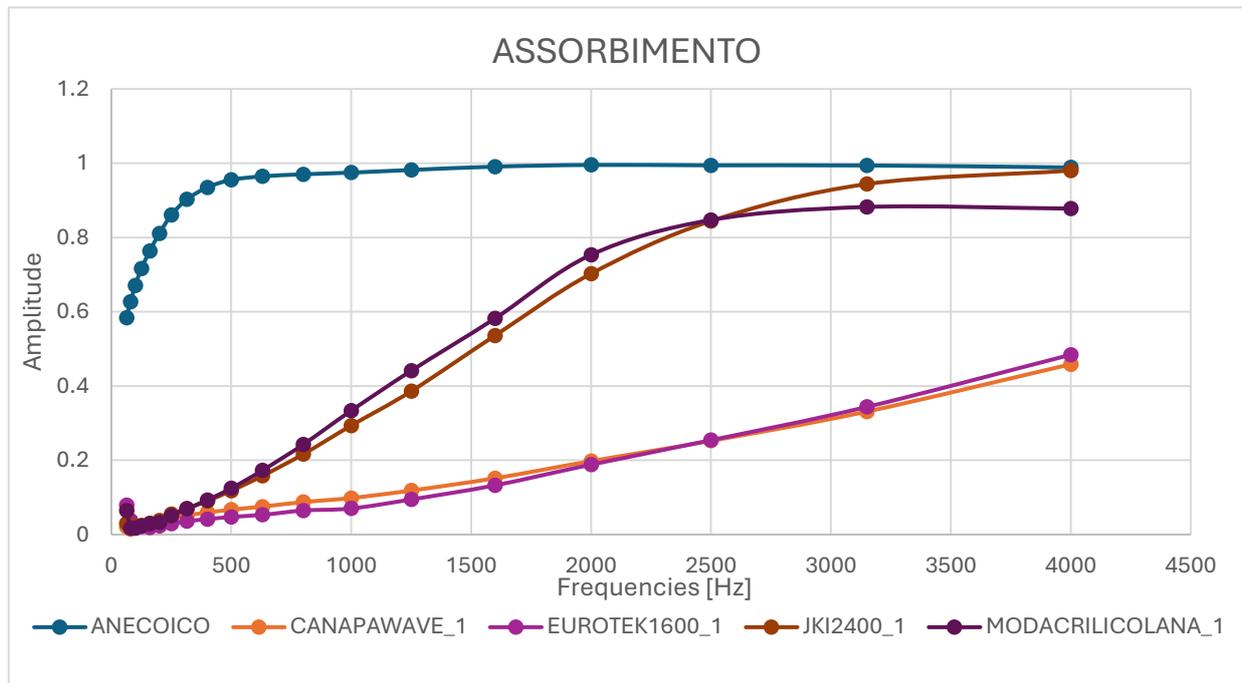


Figura 3.41 Andamento dei coefficienti di fonoassorbimento in funzione della frequenza dei materiali testati.

Alla luce dei risultati ottenuti e illustrati nei grafici, emergono diversi aspetti significativi riguardo al comportamento dei quattro materiali analizzati.

In primo luogo, si osserva che i campioni di Euroteck™ e Canapa-Wave™ testati mostrano valori del coefficiente di assorbimento compresi tra 0,3 e 0,5 in un intervallo di frequenze 2500 Hz – 4000 Hz.

Invece per quanto riguarda il Resil MAC W™ e il JKI™ sono stati raggiunti valori del coefficiente di assorbimento prossimi a 1 per lo stesso range di frequenze.

Il sistema di classificazione è utilizzato per applicazioni a banda larga e viene utilizzato il valore a numero singolo per calcolare la classe di assorbimento acustico.

Sound absorption class	$\alpha_w$
A	0,90; 0,95; 1,00
B	0,80; 0,85
C	0,60; 0,65; 0,70; 0,75
D	0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55
E	0,25; 0,20; 0,15
Not classified	0,10; 0,05; 0,00

Tabella 3.20 Classi di assorbimento, fonte BS EN ISO 11654:1997.

I valori corrispondenti alle varie classi di assorbimento sono illustrati nella figura 3.42 della BS EN ISO 11654:1997 e sono anche rappresentati graficamente:

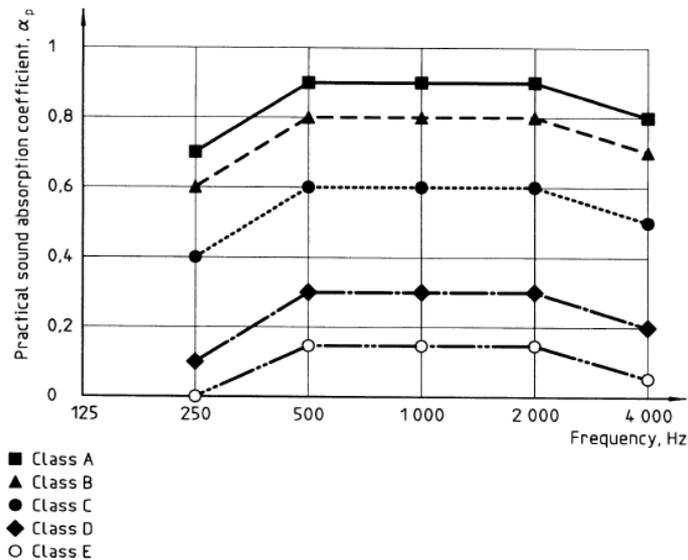


Figura 3.42 Curve limite delle classi di assorbimento, fonte acustico.com.

Quindi si può dire che Euroteck™ e Canapa-Wave™ ricadono in classe di assorbimento D, “materiale assorbente” mentre Resil MAC W™ e JKI™ ricadono rispettivamente in classe di assorbimento B e A, quindi sono materiali “altamente assorbenti”.

È da notare come i valori massimi di assorbimento di questi quattro materiali si raggiungono con l’aumento pressoché lineare della frequenza.

Per comprendere meglio il significato e il valore numerico dei risultati ottenuti, è utile confrontarli con valori di assorbimento noti per materiali ampiamente testati e utilizzati nel settore edile e civile.

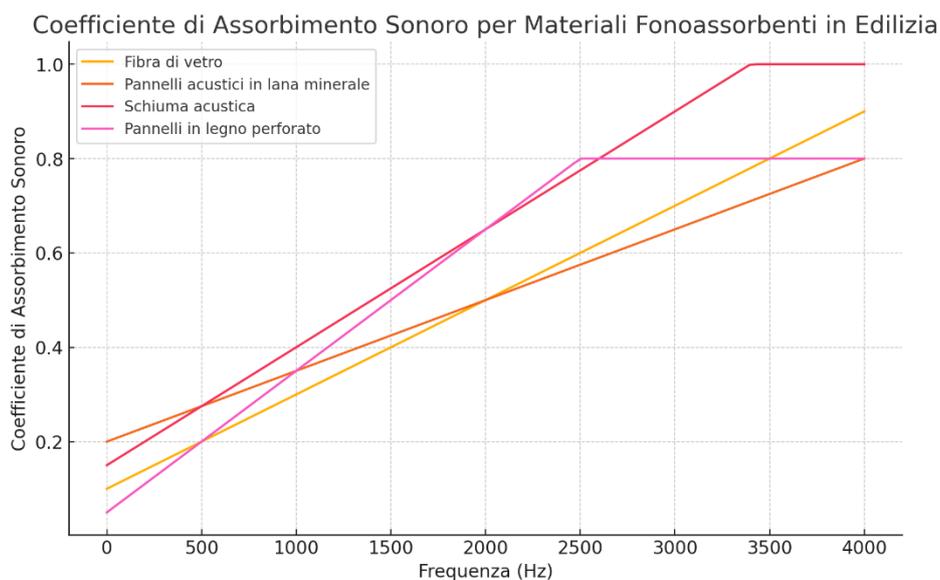


Figura 3.43 Valori dei coefficienti di fonoassorbimento in funzione della frequenza di materiali tradizionali usati in edilizia, fonte BS EN ISO 11654:1997.

Il grafico in Figura 3.43 mostra il coefficiente di assorbimento  $a_w$  per vari materiali fonoassorbenti in edilizia in funzione della frequenza, da 0 Hz a 4000 Hz. Ogni linea rappresenta un materiale diverso e il suo comportamento lungo lo spettro delle frequenze.

Si nota, confrontando i grafici che il JKI™ e il Resil MAC W™ hanno caratteristiche fonoassorbenti paragonabili alle schiume acustiche poliuretatiche che sono, al momento, i più prestanti materiali in uso in ambito edilizio, mentre lo stesso non si può affermare per la Canapa-Wave™ e l'Euroteck™.

## 3.3 Caratterizzazione Meccanica

La caratterizzazione meccanica è stata effettuata attraverso una prova di trazione, utilizzando un macchinario chiamato Zwick / Roell Z050, il cui obiettivo è misurare la resistenza meccanica a trazione dei materiali.

### 3.3.1 Resistenza A Trazione

Le prove di trazione sono essenziali per determinare le proprietà meccaniche dei materiali, in particolare la resistenza alla trazione, il modulo elastico e l'allungamento a rottura. I provini a forma di osso di cane sono progettati in modo che la rottura avvenga nella parte centrale, riducendo al minimo gli effetti dei bordi, garantendo una distribuzione uniforme dello sforzo e migliorando l'accuratezza dei risultati.

Le prove di trazione vengono effettuate per valutare la capacità dei materiali di resistere a carichi tensionali. Nel caso di un possibile pannello isolante per l'edilizia, le prove di trazione sono fondamentali per i seguenti motivi:

- Resistenza meccanica: i pannelli isolanti devono resistere a diverse sollecitazioni meccaniche, come quelle dovute al peso degli strati superiori o alle forze esercitate dal vento. Conoscere la resistenza alla trazione permette di valutare se il materiale è adeguato a sopportare tali sollecitazioni senza rompersi.
- Durabilità e affidabilità: materiali con buone prestazioni meccaniche sotto trazione tendono ad essere più resistenti nel tempo, anche in condizioni climatiche variabili. Questo è particolarmente importante in edilizia, dove l'isolante deve mantenere le sue proprietà per anni.
- Ottimizzazione dei materiali: valutando le proprietà meccaniche, è possibile migliorare e ottimizzare le composizioni dei materiali per ottenere pannelli con un miglior rapporto tra leggerezza e resistenza, garantendo al contempo un'efficace prestazione termica e acustica.

Le prove di trazione, quindi, non solo confermano l'idoneità di un materiale per l'uso previsto, ma aiutano anche a migliorarlo e adattarlo alle esigenze specifiche dell'edilizia moderna.

### 3.3.1.1 Prova sperimentale

Questa prova sperimentale è stata effettuata presso il laboratorio J-Tech@PoliTO Advanced Joining Technologies con il seguente macchinario:

<b>MACHINE FEATURES</b>	
<b>Constructor</b>	Zwick/Roell
<b>Model</b>	Z050 THW
<b>Load <math>F_N</math> in tensile / compression direction</b>	50 kN
<b>Load cells</b>	- XForce HP 5 kN accuracy class 1 (from 0,2% of $F_N$ ): 10 N - XForce HP 50 kN accuracy class 1 (from 0,2% of $F_N$ ): 100 N
<b>Test area width</b>	640 mm
<b>Height of lower test area, without accessories</b>	1325 mm
<b>Height of upper test area, without accessories</b>	1365 mm
<b>Crosshead speed up to 110% of test load (<math>V_{min}</math> ... <math>V_{Nom}</math>)</b>	0.0005 ... 600 mm/min
<b>Increased crosshead return speed(at reduced force)</b>	1000 mm/min
<b>Drive system's travel resolution</b>	0,31789 nm
<b>Testing temperature</b>	RT up to 1200 °C
<b>Non-contact strain measurement without marking</b>	<b>laserXtens 2-220 HP</b> - Class 0,5 EN ISO 9513 - Resolution 0,07 $\mu$ m according to EN ISO 9513 under real testing conditions - Gauge length 3 – 200 mm - Max. following speed on the specimen 500 mm/min
<b>Furnace specifications</b>	<b>MAYTECH HTO-39-DSO Double slot furnace up to 1200 °C</b> - Max. heating rate: 20 °C/min - Protective gas: Argon - Inner heating area: diameter 100 mm, height 300 mm - 3 Termocouples: Type N to measure the temperature of sample in the upper, middle and lower part

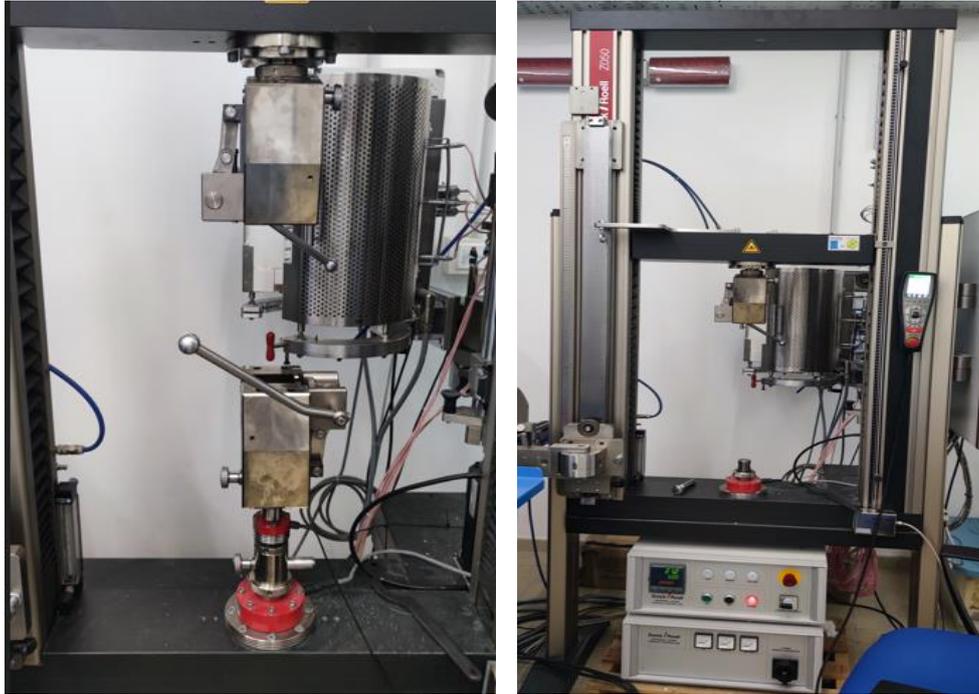
Tabella 3.21 Caratteristiche del macchinario Zwick Roell Z050, fonte J-Tech Polito.

I provini sono stati realizzati, come da manuale, a forma di osso di cane, con larghezza 1 cm, con lo stampo standard montato sulla pressa messa a disposizione dal laboratorio, ma è stato possibile realizzarli solo per tre materiali, Euroteck™, Resil MAC W™ e JKI™, mentre il quarto, Canapa-Wave™, è stato scartato a causa della sua eccessiva sfaldabilità.



*Figura 3.44 Pressa per realizzazione provini a forma di “osso di cane”.*

Successivamente sono state eseguite le prove di trazione con il macchinario Zwick / Roell Z050, precedentemente illustrato. Mediante gli opportuni afferraggi e accessori è stata configurata per eseguire le prove di caratterizzazione quasi statiche a trazione seguendo le norme ISO 527, ISO 6892, ISO 783.



*Figura 3.45 Macchina di prova universale Zwick / Roell Z050.*

È stata impostata una fase di prearico fino al raggiungimento di una forza di 0,5 N, a cui ha fatto seguito l'avvio della fase di trazione del provino. La prova è stata eseguita mantenendo una velocità costante e si è arrivati al raggiungimento della forza massima.

La prova si è conclusa nel momento in cui la forza è diminuita dell'80% rispetto al picco massimo registrato.

Per ragioni statistiche e per una questione di affidabilità dei risultati sono stati selezionati 17 provini:

- Cinque provini per il Resil MAC W™
- Cinque provini per l'Euroteck™
- Sette provini per JKI™

Di seguito vengono illustrate le foto e i grafici costruiti con i valori ottenuti dalle prove di trazione per ognuno dei materiali.

## Canapa-Wave™

Non è stato possibile creare la forma a “osso di cane” per questo materiale a causa della sua sfaldabilità.



*Figura 3.46 Provino sfaldato di Canapa-Wave™.*

## Resil MAC W™

Per questa tipologia di materiale sono state eseguite le prove per fini statistici su cinque provini:

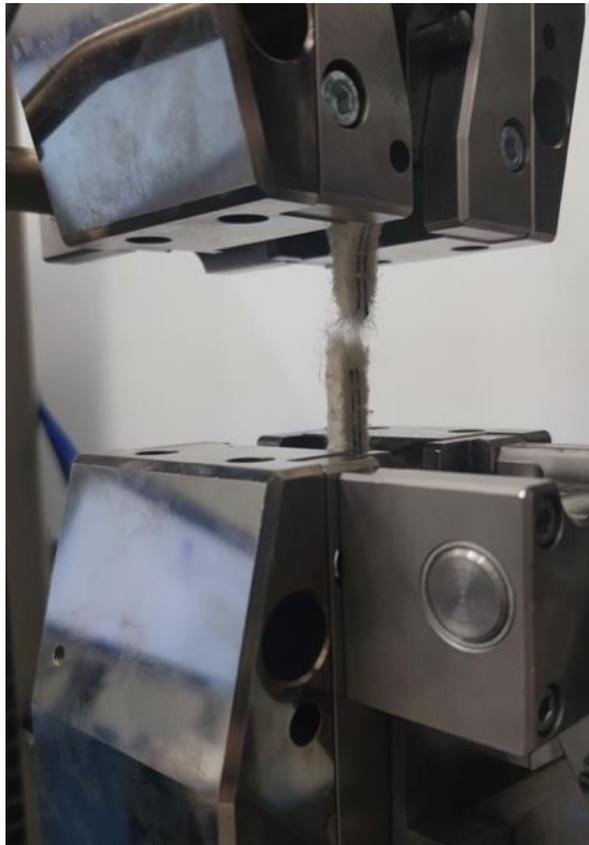


Figura 3.47 Rottura per trazione del provino Resil MAC W™.

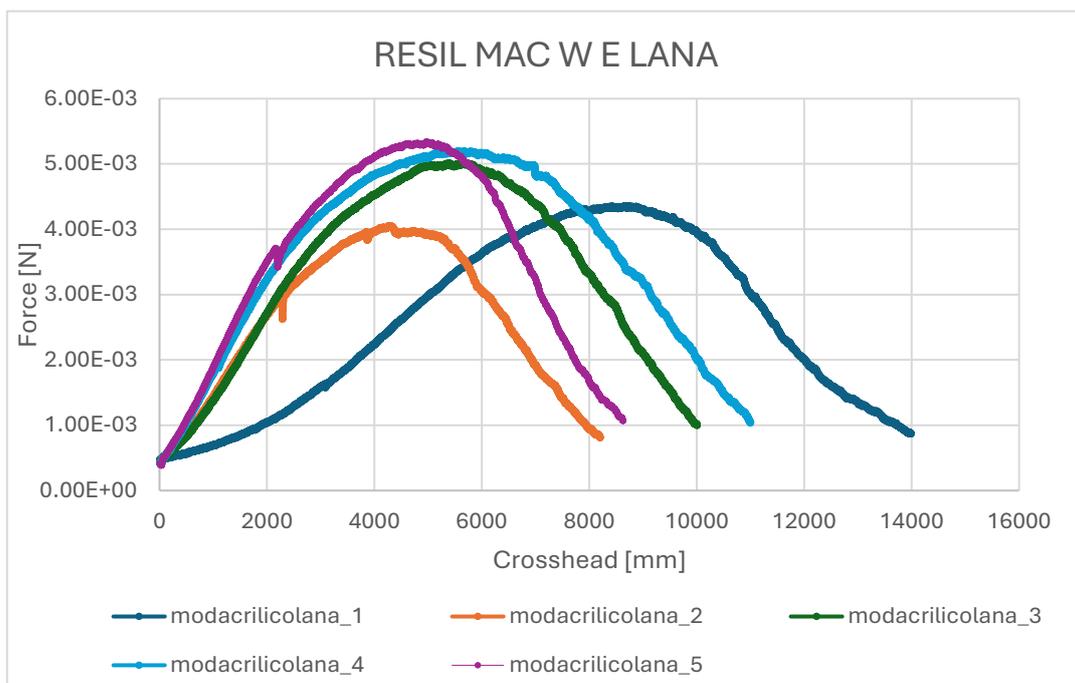


Figura 3.48 Risultati prove di trazione Resil MAC W™.

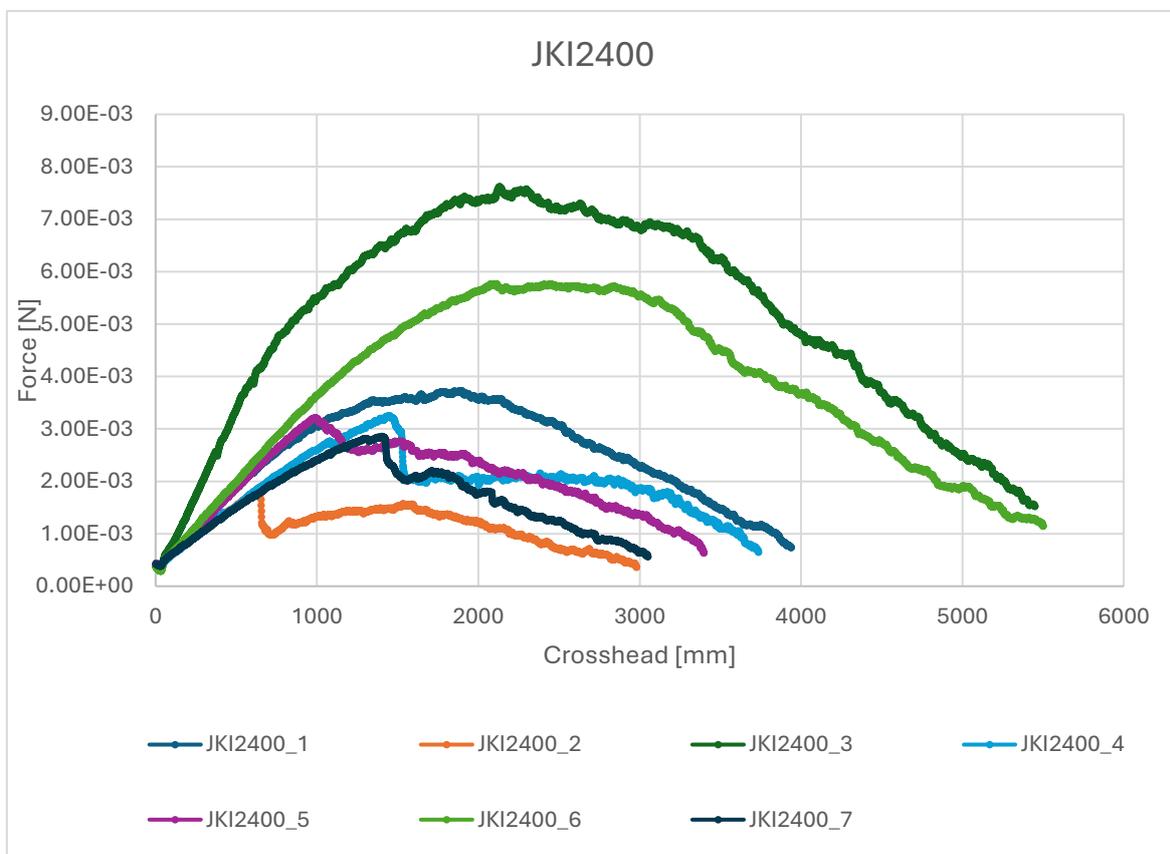
<b>N° campione</b>	<b>FBREAK [N]</b>	<b>a0[mm]</b>	<b>b0[mm]</b>	<b>S0 [mm2]</b>
<b>1</b>	0.872	13.08	10	130.8
<b>2</b>	0.812	12.33	10	123.3
<b>3</b>	0.998	12.71	10	127.1
<b>4</b>	1.04	13.41	10	134.1
<b>5</b>	1.07	12.8	10	128
<b>MEDIA</b>	<b>0.9584</b>			<b>128.66</b>
<b>DEVIAZIONE STANDARD</b>	<b>0.111332</b>			<b>4.054997</b>
<b>SBREAK [Mpa]</b>	<b>0.007449</b>			
<b>ERRORE</b>	<b>0.031524</b>			

Tabella 3.22 Calcolo della tensione di rottura (Resil MAC W™).

Per questa tipologia di materiale sono state eseguite le prove per fini statistici su sette provini:



*Figura 3.49 Rottura per trazione del provino JKI™.*



*Figura 3.50 Risultati prove di trazione JKI™.*

<b>N° campione</b>	<b>F<sub>BREAK</sub> [N]</b>	<b>a<sub>0</sub>[mm]</b>	<b>b<sub>0</sub>[mm]</b>	<b>S<sub>0</sub> [mm<sup>2</sup>]</b>
<b>1</b>	0.746	14.1	10	141
<b>2</b>	0.443	15.22	10	152.2
<b>3</b>	1.53	16.69	10	166.9
<b>4</b>	0.942	16.04	10	160.4
<b>5</b>	0.683	13.22	10	132.2
<b>6</b>	1.15	14.06	10	140.6
<b>7</b>	0.596	14.15	10	141.5
<b>MEDIA</b>	<b>0.87</b>			<b>147.8285714</b>
<b>DEVIAZIONE STANDARD</b>	<b>0.371244304</b>			<b>12.41003818</b>
<b>S<sub>BREAK</sub> [Mpa]</b>	<b>0.005885195</b>			
<b>ERRORE</b>	<b>0.083963627</b>			

Tabella 3.23 Calcolo della tensione di rottura ( $JKI^{\text{TM}}$ ).



Figura 3.51 Rottura per trazione del provino Euroteck™.

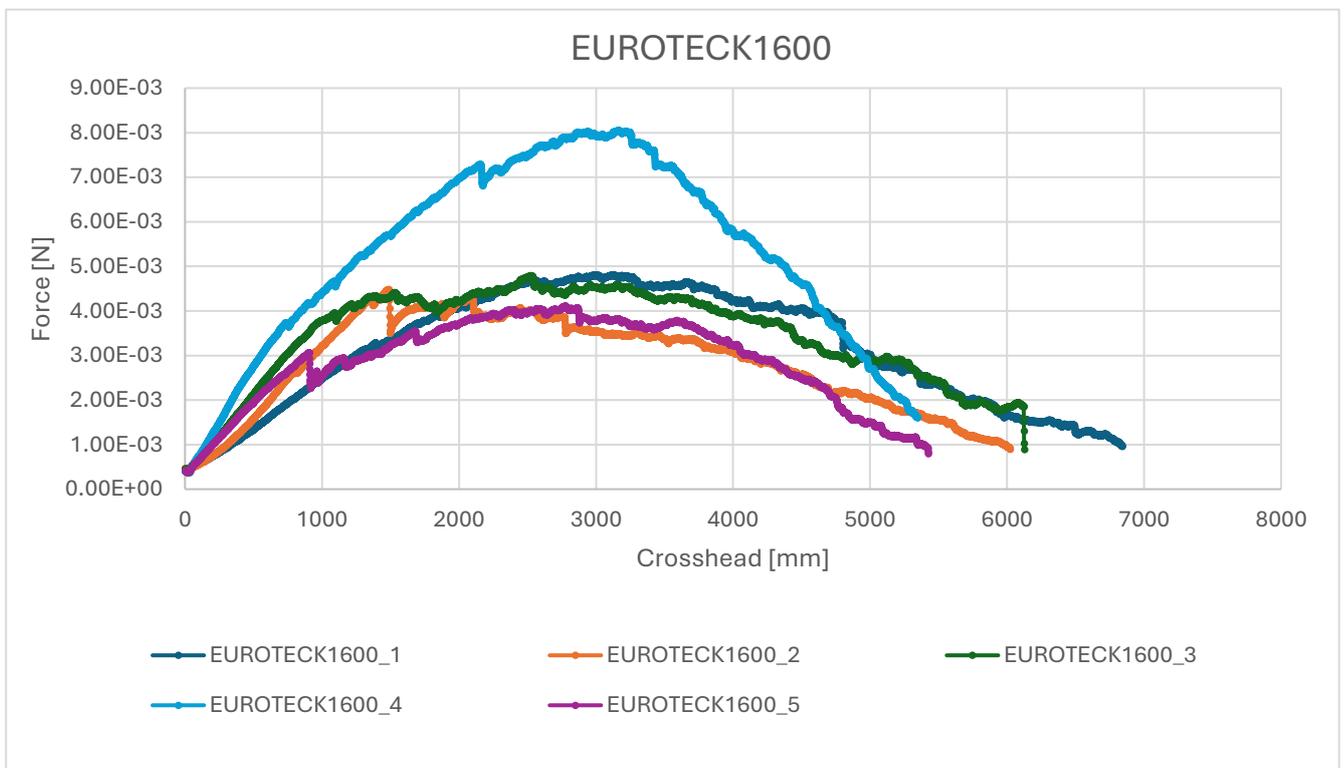


Figura 3.52 Risultati prove di trazione Euroteck™.

Per questa tipologia di materiale sono state eseguite le prove per fini statistici su sette provini:

<b>N° campione</b>	<b>F<sub>BREAK</sub> [N]</b>	<b>a<sub>0</sub>[mm]</b>	<b>b<sub>0</sub>[mm]</b>	<b>S<sub>0</sub> [mm<sup>2</sup>]</b>
<b>1</b>	0.959	5.55	10	55.5
<b>2</b>	0.897	5.51	10	55.1
<b>3</b>	1.86	5.11	10	51.1
<b>4</b>	1.61	4.94	10	49.4
<b>5</b>	0.926	5.13	10	51.3
<b>MEDIA</b>	<b>1.2504</b>			<b>52.48</b>
<b>DEVIAZIONE STANDARD</b>	<b>0.45165396</b>			<b>2.681790447</b>
<b>S<sub>BREAK</sub> [Mpa]</b>	<b>0.02382622</b>			
<b>ERRORE</b>	<b>0.011314163</b>			

*Tabella 3.24 Calcolo della tensione di rottura (Euroteck™).*

## Analisi dei Risultati

Di seguito viene riportata una rappresentazione grafica di tutti i provini portati a rottura per trazione:



Figura 3.53 Provini testati.

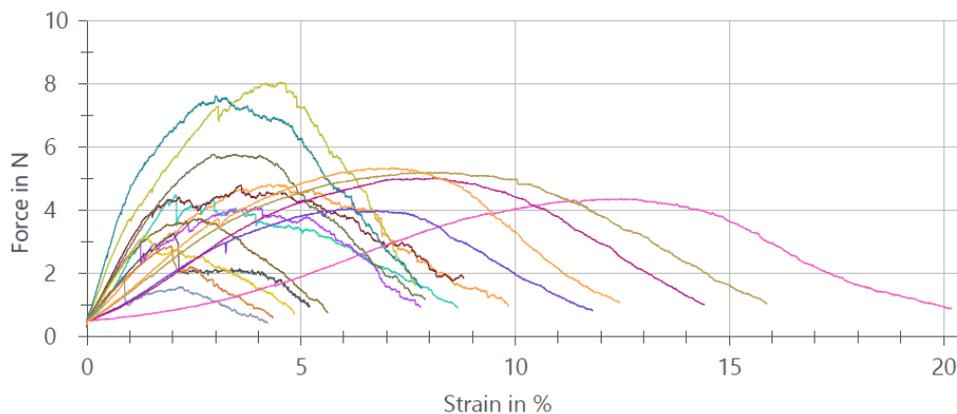


Figura 3.54 Andamento dell'insieme dei provini testati con la percentuale delle deformazioni in funzione della forza in Newton.

Series	F <sub>max</sub>	dL at F <sub>max</sub>	F <sub>Break</sub>	dL at break	a <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	S <sub>0</sub>
n = 17	N	mm	N	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>
x	4.62	5.1	1.01	10.7	4	10	40.00
s	1.57	3.5	0.364	5.1	0.000	0.000	0.00
v [%]	33.89	68.97	36.14	47.88	0.00	0.00	0.00

Tabella 3.25 Considerazioni statistiche.

Dall'analisi dei risultati, emerge chiaramente che tutti e tre i materiali mostrano una limitata resistenza a trazione, un aspetto del tutto comprensibile considerando la loro natura composita, costituita da fibre. Tuttavia, Euroteck™ si distingue per la sua maggiore resistenza a trazione, attribuito che può essere ricondotto sia alla sua specifica composizione sia all'impiego di un trattamento termofissato durante la produzione, eseguito tramite calandra. Questa lavorazione conferisce al materiale caratteristiche meccaniche superiori, rendendolo più idoneo per applicazioni che richiedono una certa robustezza.

## 3.4 Caratterizzazione Termica

per ottenere la caratterizzazione termica sono state effettuate tre prove sperimentali per misurare la conducibilità termica, la diffusività termica ed il calore specifico.

Al fine di comprendere meglio le tipologie di misure effettuate e i risultati che ne sono conseguiti, è opportuno introdurre alcuni concetti base relativi al calore che verranno illustrati di seguito: la conducibilità termica [W/m K]; la diffusività termica [ $m^2/s$ ]; la capacità termica [J/K] e calore specifico [J/kgK]; la resistenza termica [ $m^2 K/W$ ]; la trasmittanza termica [W/ $m^2K$ ]; inerzia termica: sfasamento [h] e la trasmittanza termica periodica [W/ $m^2K$ ].

### 3.4.1 Conducibilità Termica

La conducibilità termica rappresenta una caratteristica fisica dei materiali, che determina la loro capacità di trasferire il calore. In altre parole, essa descrive la rapidità con cui il calore si sposta attraverso un materiale quando esiste una differenza di temperatura tra le sue due superfici.

Il calore trasferito tra le due superfici di un corpo, supponendo che siano piane e parallele, sotto l'ipotesi di regime stazionario, viene espresso tramite la seguente formula, conosciuta come legge di Fourier:

$$P = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

*Equazione 3.11 Legge di Fourier.*

Dove:

- P in [W] è la potenza termica;
- $\lambda$  in [W/m K] è la conducibilità termica del materiale;
- A in [ $m^2$ ] è la superficie attraversata dal calore;
- $dT/dx$  in [K/m] è la variazione di temperatura in un tratto infinitesimo del corpo.

Dividendo entrambi i membri dell'Equazione 3.11 per la superficie attraversata dal calore si ottiene il flusso termico diretto, perpendicolarmente alle due facce del corpo, dalla parete a temperatura più alta verso quella a temperatura più bassa, cioè la potenza scambiata per unità di area in [W/ $m^2$ ]:

$$\Phi = -\lambda \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

*Equazione 3.12 Flusso termico.*

Invertendo l'Equazione 3.12 si ottiene l'equazione della conducibilità termica  $\lambda$  in [W/mK]:

$$\lambda = -\frac{P \cdot \Delta x}{A \cdot \Delta T}$$

*Equazione 3.13 Conducibilità termica.*

Di seguito è riportata una tabella riepilogativa con i valori di conducibilità termica dei materiali isolanti utilizzati nelle costruzioni:

<b>Materiale</b>	<b>Conducibilità Termica (W/m·K)</b>	<b>Densità (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Lana di roccia</b>	0.033	40
<b>Lana di vetro</b>	0.032	20
<b>Polistirene espanso (EPS)</b>	0.035	15
<b>Polistirene estruso (XPS)</b>	0.029	35
<b>Poliuretano espanso (PU)</b>	0.022	30
<b>Fibra di legno</b>	0.038	50
<b>Sughero</b>	0.04	120
<b>Aerogel</b>	0.014	80

*Tabella 3.26 Valori di conducibilità termica e densità di materiali isolanti.*

### 3.4.2 Diffusività Termica

La diffusività termica è una proprietà termofisica di un materiale che descrive la sua abilità di assorbire e immagazzinare calore. Viene definita come

$$d = \frac{\lambda}{\rho c}$$

*Equazione 3.14 Diffusività termica.*

Dove:

- $d$  in [m<sup>2</sup>/s] è la diffusività termica del materiale;
- $\lambda$  in [W/m K] è la conducibilità termica del materiale;
- $\rho$  in [kg/m<sup>3</sup>] è la densità del materiale;
- $c$  in [J/kg K] è il calore specifico del materiale.

Diversamente dalla legge della conducibilità, che si applica in condizioni stazionarie, la diffusività termica descrive la propagazione del calore in situazioni non stazionarie, ossia quando le condizioni al contorno, come la temperatura esterna di una delle facce della lastra, cambiano nel tempo.

Di seguito sono stati riportati i valori di diffusività termica per i principali isolanti in edilizia:

<b>Materiale Isolante</b>	<b>Diffusività Termica (m<sup>2</sup>/s)</b>
<b>Polistirene Espanso (EPS)</b>	1.20E-07
<b>Polistirene Estruso (XPS)</b>	1.50E-07
<b>Lana di Vetro</b>	5.00E-07
<b>Lana di Roccia</b>	6.00E-07
<b>Poliuretano Espanso (PUR)</b>	1.00E-07
<b>Fibra di Legno</b>	7.00E-07
<b>Sughero</b>	9.00E-07

*Tabella 3.27 Risultati diffusività termica di materiali isolanti.*

### 3.4.3 Capacità Termica E Calore Specifico

La capacità termica è una proprietà termofisica che indica la quantità di calore necessaria per aumentare la temperatura di un corpo di 1 K. Essa è strettamente correlata al concetto di calore specifico, definito come la quantità di calore richiesta per innalzare di 1 K la temperatura di 1 kg di una determinata sostanza. A differenza della capacità termica, il calore specifico è una proprietà intrinseca del materiale, non dipendente dalla sua massa.

Di seguito sono stati riportati i valori di capacità termica e calore specifico dei principali isolanti usati in edilizia

<b>Materiale Isolante</b>	<b>Capacità Termica (J/m<sup>3</sup>·K)</b>
<b>Polistirene Espanso (EPS)</b>	1300000
<b>Polistirene Estruso (XPS)</b>	1400000
<b>Lana di Vetro</b>	800000
<b>Lana di Roccia</b>	840000
<b>Poliuretano Espanso (PUR)</b>	1500000
<b>Fibra di Legno</b>	2100000
<b>Sughero</b>	1600000

*Tabella 3.28 Risultati capacità termica di materiali isolanti.*

<b>Materiale Isolante</b>	<b>Calore Specifico (J/kg·K)</b>
<b>Polistirene Espanso (EPS)</b>	1300
<b>Polistirene Estruso (XPS)</b>	1400
<b>Lana di Vetro</b>	800
<b>Lana di Roccia</b>	840
<b>Poliuretano Espanso (PUR)</b>	1500
<b>Fibra di Legno</b>	2100
<b>Sughero</b>	1600

*Tabella 3.29 Risultati calore specifico di materiali isolanti.*

### 3.4.4 Resistenza Termica

La resistenza termica rappresenta l'abilità di un corpo nel contrastare il flusso di calore, ed è influenzata sia dallo spessore del materiale che dalla sua conducibilità termica. È possibile esprimerla attraverso la seguente formula

$$R = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

*Equazione 3.15 Resistenza termica.*

Dove:

- $R [m^2 K/W]$ , è la resistenza termica;
- $\Delta x [m]$ , è lo spessore del materiale;
- $\lambda [W/m k]$ , conducibilità termica del materiale.

### 3.4.5 Trasmittanza Termica

Il calore disperso attraverso le superfici opache, siano esse verticali o orizzontali, avviene a causa della differenza di temperatura tra il fluido a contatto con la superficie interna della parete e quello a contatto con la superficie esterna. In edilizia, le strutture opache sono considerate sistemi in cui una dimensione è molto più piccola rispetto alle altre due, permettendo di approssimare il flusso termico come perpendicolare alle superfici della parete. Inoltre, assumendo una temperatura costante, si può ipotizzare un regime stazionario, dove non vi è generazione di calore interno e la distribuzione della temperatura è lineare. Sulla base di queste ipotesi, il flusso termico per unità di superficie è determinato come segue:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_i} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}$$

Equazione 3.16 Flusso termico.

Con  $T_1 > T_2$ .

Dove:

- $q$  in  $[\text{W}/\text{m}^2]$  è il flusso termico per unità di superficie;
- $\frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{s}{\lambda}}$  in  $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$  è la Trasmittanza Termica;
- $T_1 - T_2$  in  $[\text{K}]$  è la differenza di temperatura.

La trasmittanza termica è un parametro che permette di calcolare il flusso di calore attraverso una superficie a causa di una differenza di temperatura. Valori bassi di trasmittanza indicano una maggiore resistenza al passaggio del calore nell'elemento considerato. Nel sistema internazionale, l'unità di misura è espressa in  $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ . La trasmittanza termica può essere calcolata assumendo che il trasferimento di calore avvenga in regime stazionario, con temperatura e flusso costanti, utilizzando l'equazione seguente:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{s}{\lambda}}$$

Equazione 3.17 Trasmittanza termica.

dove:

- $h_i$  e  $h_e$  in  $[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$  rappresentano i coefficienti di adduzione interna ed esterna;
- $s$  in  $[\text{m}]$  è lo spessore del materiale
- $\lambda$  in  $[\text{W}/\text{mK}]$  è la conducibilità termica del materiale

Per il calcolo dei consumi energetici è possibile impiegare valori convenzionali delle adduttanze, indipendentemente dall'orientamento dell'elemento in esame:

- $h_i = 8$  nel caso di pareti interne oppure pareti esterne o con la presenza di un'intercapedine d'aria;
- $h_e = 23$  nel caso di aria in condizione di trasporto convettivo.

La trasmittanza termica è inversamente correlata alla conducibilità termica e direttamente correlata allo spessore del materiale impiegato. Pertanto, si può dedurre che la trasmittanza aumenta quando lo spessore (s) diminuisce e cresce con l'aumentare della conducibilità termica ( $\lambda$ ).

In caso di interventi di ristrutturazione o riqualificazione energetica, le strutture opache verticali, orizzontali e inclinate devono rispettare valori di trasmittanza inferiori ai limiti prescritti dal Decreto Ministeriale Requisiti Minimi del 26 giugno 2015.

I valori variano in base alla zona climatica dell'edificio, definita dal D.P.R. 26 agosto 1993 n. 412.

Zona climatica	U (W/m <sup>2</sup> K)	
	2015 <sup>(1)</sup>	2021 <sup>(2)</sup>
A e B	0,45	0,40
C	0,40	0,36
D	0,36	0,32
E	0,30	0,28
F	0,28	0,26

Tabella 3.30 Trasmittanza termica U massima delle strutture opache verticali, fonte Decreto Ministeriale Requisiti Minimi 2015.

Zona climatica	U (W/m <sup>2</sup> K)	
	2015 <sup>(1)</sup>	2021 <sup>(2)</sup>
A e B	0,34	0,32
C	0,34	0,32
D	0,28	0,26
E	0,26	0,24
F	0,24	0,22

Tabella 3.31 Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, fonte Decreto Ministeriale Requisiti Minimi 2015.

Zona climatica	U (W/m <sup>2</sup> K)	
	2015 <sup>(1)</sup>	2021 <sup>(2)</sup>
A e B	0,48	0,42
C	0,42	0,38
D	0,36	0,32
E	0,31	0,29
F	0,30	0,28

Tabella 3.32 Trasmittanza Termica U massima delle strutture opache orizzontali di pavimento, fonte Decreto Ministeriale Requisiti Minimi 2015.

La norma UNI EN ISO 6946:2018 illustra il metodo per calcolare la trasmittanza termica e la resistenza termica. In particolare, stabilisce che, per un elemento costituito da più strati, la trasmittanza termica è pari all'inverso della resistenza termica totale  $R_t$ .

$$U = \frac{1}{R_t}$$

*Equazione 3.18 Trasmittanza termica.*

$$R_t = R_{si} + \sum_{i=1}^n R_i + R_{se}$$

*Equazione 3.19 Resistenza termica per più strati.*

Dove:

- $R_{si}$  e  $R_{se}$  in  $[m^2K / W]$  sono le Resistenze termiche Superficiali interna ed esterna;
- $\sum_{i=1}^n R_i$  in  $[m^2K / W]$  è la sommatoria delle resistenze termiche utili relative ai diversi strati componenti la partizione.

### 3.4.6 Inerzia Termica

L'inerzia termica rappresenta la capacità di un materiale o di una struttura di cambiare la propria temperatura in modo più o meno lento in risposta a variazioni della temperatura esterna o a una fonte di calore/raffreddamento interna. È legata direttamente alla capacità termica del materiale e inversamente alla sua conducibilità termica e alla differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno. L'inerzia termica è misurata attraverso due indicatori: lo sfasamento termico e il fattore di attenuazione, come mostrato graficamente nella Figura 3.55.

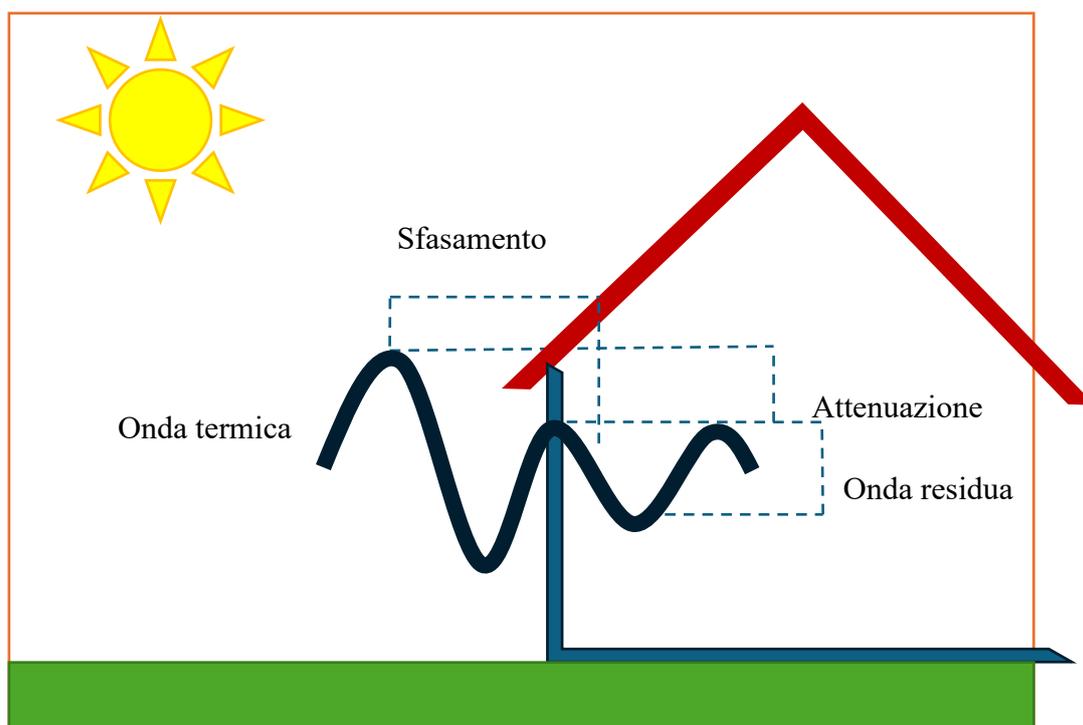


Figura 3.55 Rappresentazione grafica delle caratteristiche per l'isolamento estivo.

Lo sfasamento termico, indicato con il simbolo  $S$ , è espresso in ore [h] e si riferisce al ritardo con cui un'onda termica (o un flusso di calore) passa attraverso un elemento costruttivo rispetto alla variazione di temperatura esterna. In altre parole, indica il tempo che intercorre tra il momento in cui la temperatura esterna raggiunge il suo picco (massimo o minimo) e il momento in cui si verifica il picco corrispondente della temperatura interna o sulla superficie interna dell'elemento.

Un elevato sfasamento è generalmente desiderabile nei climi caldi, poiché consente di spostare il picco di calore verso le ore notturne, quando la temperatura esterna è più bassa e vi è minore bisogno di raffrescamento.

Lo sfasamento dipende dalle proprietà del materiale, in particolare dalla massa termica, dalla conducibilità termica e dallo spessore dell'elemento. Materiali pesanti e densi, come il calcestruzzo o i mattoni, tendono ad avere un elevato sfasamento.

Il fattore di attenuazione, indicato con  $f_a$ , è una grandezza adimensionale che misura il rapporto tra l'ampiezza del flusso termico ridotto (uscente) e l'ampiezza del flusso termico entrante. I suoi valori variano tra 0 e 1: 0 indica la massima attenuazione dell'onda termica, ovvero un'inerzia termica

infinita, mentre 1 rappresenta un'attenuazione minima dell'onda, corrispondente a un'inerzia termica nulla della struttura.

Il calcolo degli indicatori di sfasamento e attenuazione segue le linee guida della norma tecnica UNI EN ISO 13786:2007. I valori ottenuti permettono di valutare le prestazioni su una scala da 1 a 5, dove 1 rappresenta prestazioni eccellenti e 5 prestazioni scarse. La classificazione, illustrata nella tabella della figura seguente, è estratta dal D.M. 10/07/2009 n.158 Allegato A (Art. 3, comma 1) ed è applicabile a tutte le tipologie di utilizzo.

Di seguito sono stati riportati i valori di sfasamento dei materiali isolanti usati in edilizia:

<b>Sfasamento (ore)</b>	<b>Attenuazione</b>	<b>Prestazioni</b>	<b>Qualità prestazionale</b>
$S > 12$	$Fa < 0,15$	ottime	I
$12 \geq S > 10$	$0,15 \leq fa < 0,30$	buone	II
$10 \geq S > 8$	$0,30 \leq fa < 0,40$	medie	III
$8 \geq S > 6$	$0,40 \leq fa < 0,60$	sufficienti	IV
$6 \geq S$	$0,60 \leq fa$	mediocri	V

*Tabella 3.33 Classificazione dello sfasamento e attenuazione.*

<b>Materiale Isolante</b>	<b>Sfasamento (ore)</b>
<b>Polistirene Espanso (EPS)</b>	4
<b>Polistirene Estruso (XPS)</b>	5
<b>Lana di Vetro</b>	8
<b>Lana di Roccia</b>	9
<b>Poliuretano Espanso (PUR)</b>	6
<b>Fibra di Legno</b>	10
<b>Sughero</b>	12

*Tabella 3.34 Valori di sfasamento di materiali isolanti.*

### 3.4.7 Trasmittanza Termica Periodica $Y_{IE}$

La trasmittanza termica periodica è un parametro che misura la capacità di una parete opaca di attenuare e ritardare il flusso di calore che la attraversa nell'arco di un ciclo giornaliero di 24 ore. Viene espressa in unità di misura  $[W/m^2K]$  ed è indicata con il simbolo  $Y_{IE}$ . Questo parametro è calcolato come il prodotto tra la trasmittanza termica statica ( $U$ ) e il fattore di attenuazione ( $f_a$ ), considerando la temperatura interna costante.

$$Y_{IE} = U * f_a$$

*Equazione 3.20 Trasmittanza termica periodica.*

La funzione principale della trasmittanza termica periodica è quella di valutare le prestazioni energetiche estive degli edifici, fornendo un'indicazione della capacità dell'involucro edilizio di proteggere gli ambienti interni dal calore esterno e di ridurre l'impatto delle variazioni termiche esterne. In pratica, un basso valore di trasmittanza termica periodica implica una maggiore capacità dell'involucro di smorzare e ritardare l'ingresso del calore all'interno dell'edificio, migliorando così il comfort termico estivo.

Dal punto di vista normativo, la trasmittanza termica periodica è regolata dal Decreto Ministeriale "Requisiti Minimi" del 26 giugno 2015 in Italia, che la considera uno dei parametri chiave per determinare la qualità della prestazione estiva dell'involucro edilizio. La norma stabilisce i criteri per il calcolo e i limiti che le strutture edilizie devono rispettare per garantire un adeguato isolamento termico estivo.

Di seguito sono stati riportati i valori di trasmittanza termica periodica dei principali materiali isolanti usati in edilizia:

Prestazione estiva dell'involucro		Qualità	Indicatore
$A_{sol,est}/A_{sup\ utile} \leq 0,03$	$Y_{IE} \leq 0,14$	alta	
$A_{sol,est}/A_{sup\ utile} \leq 0,03$	$Y_{IE} > 0,14$	media	
$A_{sol,est}/A_{sup\ utile} > 0,03$	$Y_{IE} \leq 0,14$		
$A_{sol,est}/A_{sup\ utile} > 0,03$	$Y_{IE} > 0,14$	bassa	

*Tabella 3.35 Indicatore della prestazione energetica estiva dell'involucro senza considerare gli impianti.*

Materiale Isolante	Trasmittanza Termica Periodica ( $W/m^2K$ )
<b>Polistirene Espanso (EPS)</b>	0.02
<b>Polistirene Estruso (XPS)</b>	0.03
<b>Lana di Vetro</b>	0.05
<b>Lana di Roccia</b>	0.06
<b>Poliuretano Espanso (PUR)</b>	0.025
<b>Fibra di Legno</b>	0.07
<b>Sughero</b>	0.08

*Tabella 3.36 Valori trasmittanza termica periodica di materiali isolanti.*

### *3.4.8 Relazione Tra Sfasamento E Trasmittanza Termica Periodica*

Lo sfasamento e la trasmittanza termica periodica sono strettamente correlati, in quanto entrambi descrivono il comportamento dinamico dell'involucro edilizio sotto sollecitazioni termiche periodiche.

Un elevato sfasamento e una bassa trasmittanza termica periodica sono entrambi segni di un sistema costruttivo che ha buone proprietà di isolamento termico e inerzia termica. Questi elementi costruttivi sono efficaci nel ritardare e ridurre la trasmissione del calore, mantenendo più stabile la temperatura interna.

Sono particolarmente rilevanti nei contesti climatici con grandi escursioni termiche giornaliere, dove è necessario mantenere un comfort termico senza ricorrere eccessivamente a sistemi di raffrescamento o riscaldamento attivi.

### 3.4.9 TPS – Conducibilità, Diffusività e Calore Specifico

Il metodo Transient Plane Source (TPS), ad oggi considerato una delle tecniche più precise e convenienti per lo studio delle proprietà di trasporto termico, disponibile in laboratorio è stato selezionato per condurre le prove sperimentali. Questo metodo consiste in una tecnica assoluta che fornisce informazioni sulla conducibilità termica, la diffusività termica e il calore specifico per unità di volume del materiale in esame, in conformità alla norma ISO 22007-2.

Il metodo TPS si basa sull'utilizzo di un sensore piano riscaldato in modo transitorio, e nella sua versione più comune è noto come Hot Disk Thermal Constants Analyser. Il sensore Hot Disk è costituito da un motivo conduttore a doppia spirale, inciso su una sottile lamina metallica di Nichel. Questa spirale è racchiusa tra due sottili strati di un materiale isolante che nel nostro caso è il Kapton™.

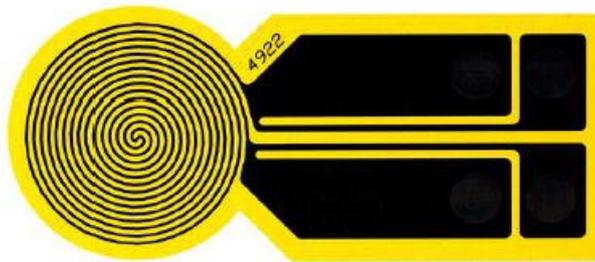


Figura 3.56 Sensore Hot Disk, fonte User Manual.

Durante una misurazione, un sensore Hot Disk piano viene posizionato tra due pezzi del campione, ciascuno con una superficie piana a contatto con il sensore. Facendo passare una corrente elettrica abbastanza intensa da aumentare la temperatura del sensore da una frazione di grado fino a diversi gradi e, allo stesso tempo, registrando l'aumento di resistenza (che corrisponde alla temperatura) in funzione del tempo, il sensore Hot Disk viene utilizzato sia come sorgente di calore sia come sensore di temperatura dinamico.

La soluzione dell'equazione di conducibilità termica si basa sull'assunzione che il sensore Hot Disk sia collocato in un mezzo infinito, il che significa che la registrazione transitoria deve essere interrotta non appena il sensore rileva qualsiasi influenza dai confini esterni dei due pezzi del campione.

Le dimensioni tipiche dei campioni vanno da 1 a 10 cm<sup>3</sup>, ma in situazioni particolari possono essere ridotte fino a 0,01 cm<sup>3</sup>. La preparazione del campione richiede solo il taglio di una superficie piana su ciascuno dei due pezzi del campione.

È importante notare che la dimensione delle superfici piane del campione deve essere considerevolmente maggiore del diametro del sensore Hot Disk, per consentire una registrazione transitoria sufficientemente lunga.

L'Hot Disk Thermal Constants Analyser è stato utilizzato per studiare un'ampia varietà di materiali, tra cui metalli, leghe, minerali, ceramiche, vetri, polveri, plastiche, materiali da costruzione, biomateriali in vivo o in vitro, liquidi.

Gli elementi Hot Disk disponibili in commercio consentono misurazioni a temperature che vanno da quelle criogeniche fino a 1000 K. I sensori appositamente progettati hanno raggiunto temperature comprese tra 1700 K e 1800 K.

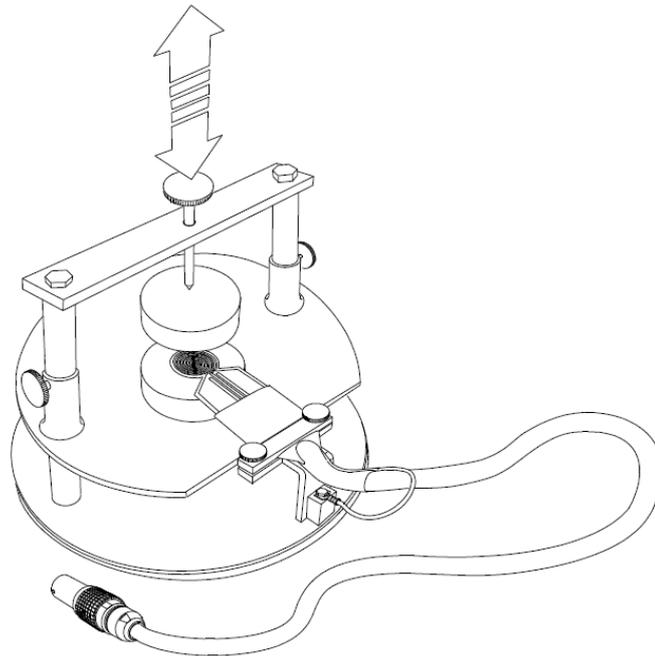


Figura 3.57 Macchinario di misurazione Hot Disk Thermal Constants Analyser, fonte User Manual.

Dopo aver completato una misurazione, è importante ispezionare attentamente il transitorio. La curva transitoria deve mostrare un incremento continuo della temperatura e deve essere priva di salti improvvisi o discontinuità. Se si osserva un comportamento negativo della temperatura, un salto, un urto o altri artefatti, la misurazione deve essere scartata. L'incremento iniziale spesso marcato della temperatura deriva dall'isolamento del sensore, nonché dalla resistenza di contatto tra sensore e campione, e varia da campione a campione. Spesso si osserva un cambiamento netto della pendenza nella parte iniziale della curva transitoria quando si testano campioni duri e ad alta conducibilità, mentre una transizione più graduale è comune per materiali morbidi e a bassa conducibilità.

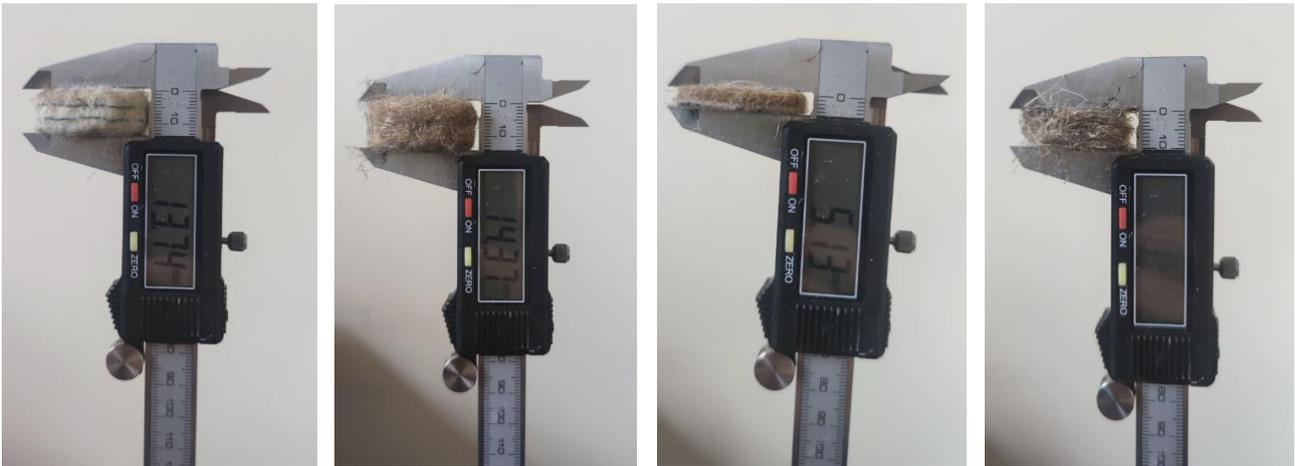
Il grafico dei residui mostra la differenza tra i dati misurati e i dati adattati. Nel caso ideale, il grafico dei residui dovrebbe mostrare una dispersione casuale attorno a una linea orizzontale. Quando ciò avviene, il modello si adatta bene ai dati di misurazione e i risultati sono affidabili.

#### 3.4.9.1 Prova Sperimentale

Questa prova sperimentale è stata effettuata presso il Laboratorio del DIMEAS secondo il metodo TPS sono stati preparati due provini per ogni materiale di forma circolare con diametro di 3,5 cm e di spessore rispettivamente:

- Canapa-Wave™: 10.49 mm
- Euroteck™: 5.13 mm
- Resil MAC W™: 13.74 mm
- JKI™: 14.37 mm

Gli spessori sono stati misurati con il calibro elettronico come indicato nelle immagini seguenti:



*Figura 3.58 Misure dello spessore con calibro elettronico.*

Dopo aver stabilito gli spessori dei vari materiali essi sono stati inseriti nel software dell'Hot Disk Thermal Constants Analyser. Successivamente i due campioni circolari sono stati posti uno sopra e l'altro al di sotto della piastra che misura la conducibilità, diffusività e calore specifico e sono stati bloccati meccanicamente.

Preparato il macchinario è stata avviata la prova sperimentale, di seguito le immagini rappresentanti il macchinario pronto per l'analisi e i relativi grafici sui valori restituiti.



*Figura 3.59 Posizionamento campioni su Hot Disk Thermal Constants Analyser.*

CANAPA-WAVE™

	<i>Temperature</i>	<i>Th. Conductivity</i>	<i>Th. Diffusivity</i>	<i>Spec. Heat</i>
	26.6 °C	0.101 W/mK	0.79 mm <sup>2</sup> /s	0.1277 MJ/m <sup>3</sup> K
	26.6 °C	0.100 W/mK	0.68 mm <sup>2</sup> /s	0.1470 MJ/m <sup>3</sup> K
	26.5 °C	0.102 W/mK	0.87 mm <sup>2</sup> /s	0.1166 MJ/m <sup>3</sup> K
	26.5 °C	0.098 W/mK	0.59 mm <sup>2</sup> /s	0.1664 MJ/m <sup>3</sup> K
MEDIA	26.6 °C	0.100 W/mK	0.734 mm <sup>2</sup> /s	0.139 MJ/m <sup>3</sup> K
DEV.STANDARD	0.024287754	0.001326615	0.107394732	0.018994922

Tabella 3.37 Risultati conducibilità termica, diffusività termica e calore specifico Canapa-Wave™.

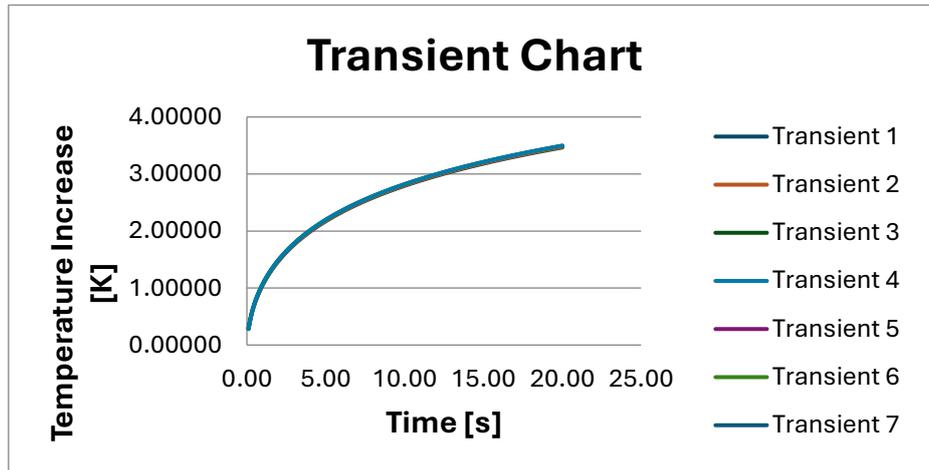


Figura 3.60 Curva transitoria Canapa-Wave™.

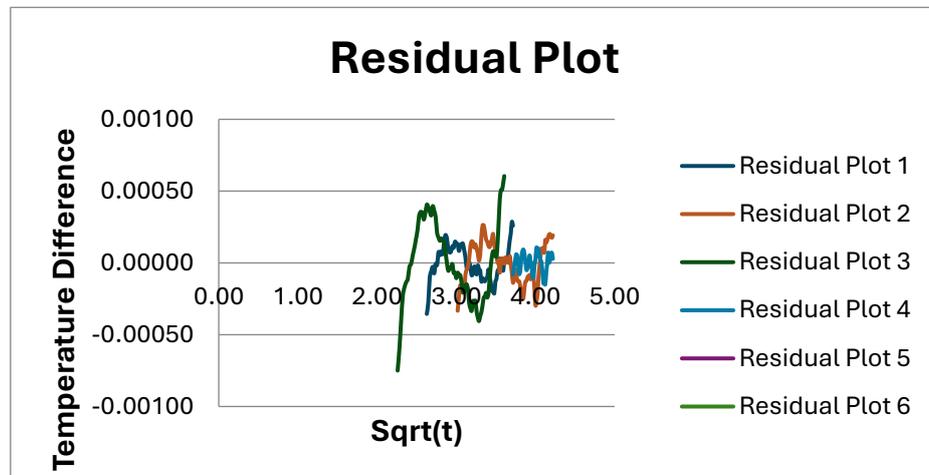


Figura 3.61 Residuo Canapa-Wave™.

EUROTECK™

	Temperature	Th. Conductivity	Th. Diffusivity	Spec. Heat
	26.7 °C	0.104 W/mK	0.31 mm <sup>2</sup> /s	0.3313 MJ/m <sup>3</sup> K
	26.8 °C	0.104 W/mK	0.31 mm <sup>2</sup> /s	0.3320 MJ/m <sup>3</sup> K
	26.8 °C	0.103 W/mK	0.31 mm <sup>2</sup> /s	0.3375 MJ/m <sup>3</sup> K
	26.9 °C	0.103 W/mK	0.31 mm <sup>2</sup> /s	0.3359 MJ/m <sup>3</sup> K
MEDIA	26.8 °C	0.104 W/mK	0.310 mm <sup>2</sup> /s	0.334 MJ/m <sup>3</sup> K
DEV.STANDARD	0.047774747	0.000384947	0.003721192	0.003009743

Tabella 3.38 Risultati conducibilità termica, diffusività termica e calore specifico Euroteck™.

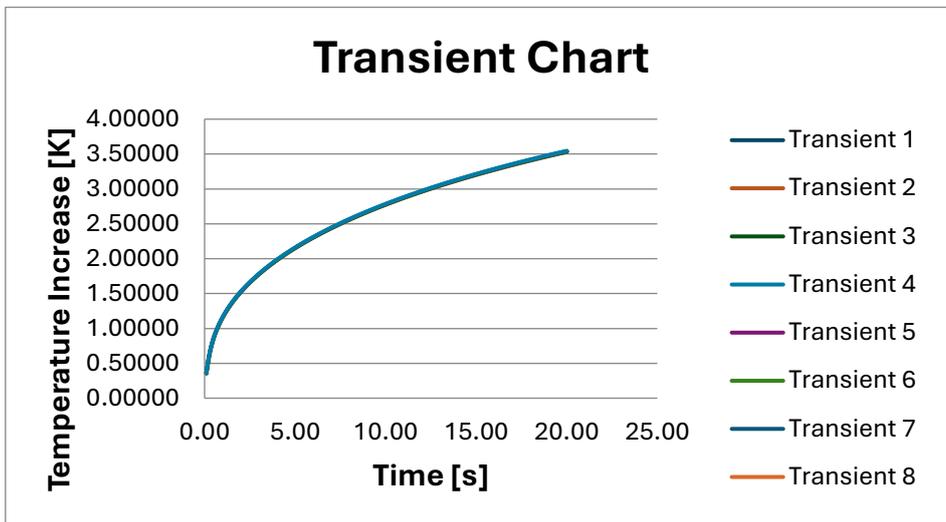


Figura 3.62 Curva transitoria Euroteck™.

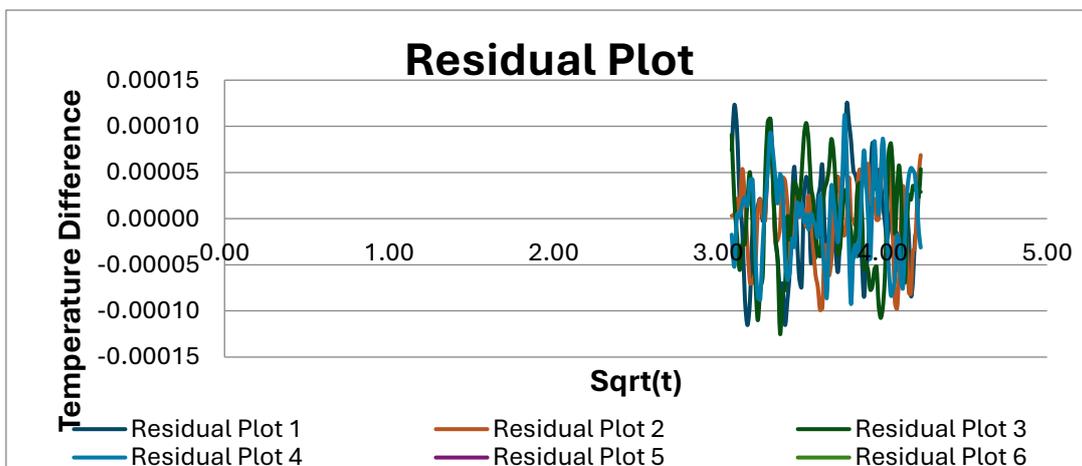


Figura 3.63 Residuo Euroteck™.

	<i>Temperature</i>	<i>Th. Conductivity</i>	<i>Th. Diffusivity</i>	<i>Spec. Heat</i>
	26.6 °C	0.099 W/mK	0.41 mm <sup>2</sup> /s	0.2423 MJ/m <sup>3</sup> K
	26.6 °C	0.100 W/mK	0.42 mm <sup>2</sup> /s	0.2389 MJ/m <sup>3</sup> K
	26.6 °C	0.100 W/mK	0.41 mm <sup>2</sup> /s	0.2416 MJ/m <sup>3</sup> K
	26.6 °C	0.100 W/mK	0.41 mm <sup>2</sup> /s	0.2440 MJ/m <sup>3</sup> K
MEDIA	26.6 °C	0.100 W/mK	0.412 mm <sup>2</sup> /s	0.242 MJ/m <sup>3</sup> K
DEV.STANDARD	0.024308666	0.000165108	0.003561275	0.002114515

Tabella 3.39 Risultati conducibilità termica, diffusività termica e calore specifico JKI™.

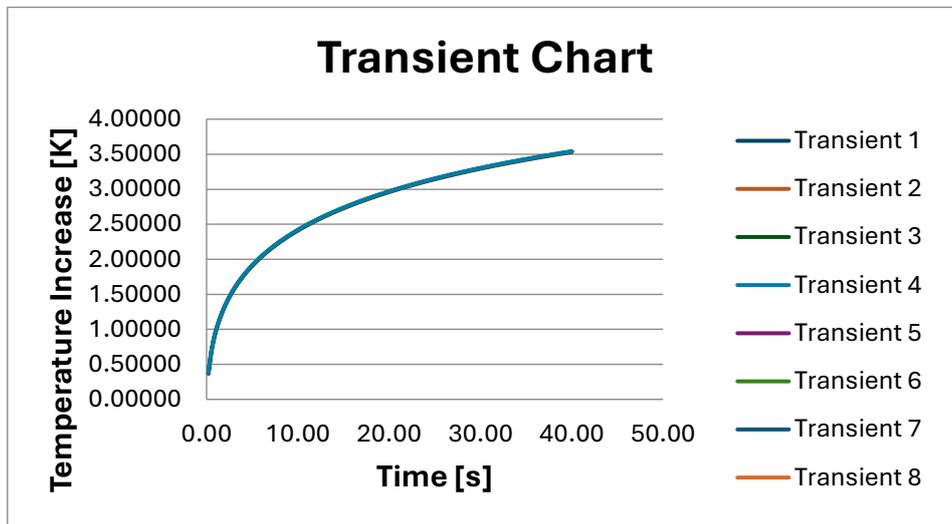


Figura 3.64 Curva transitoria JKI™.

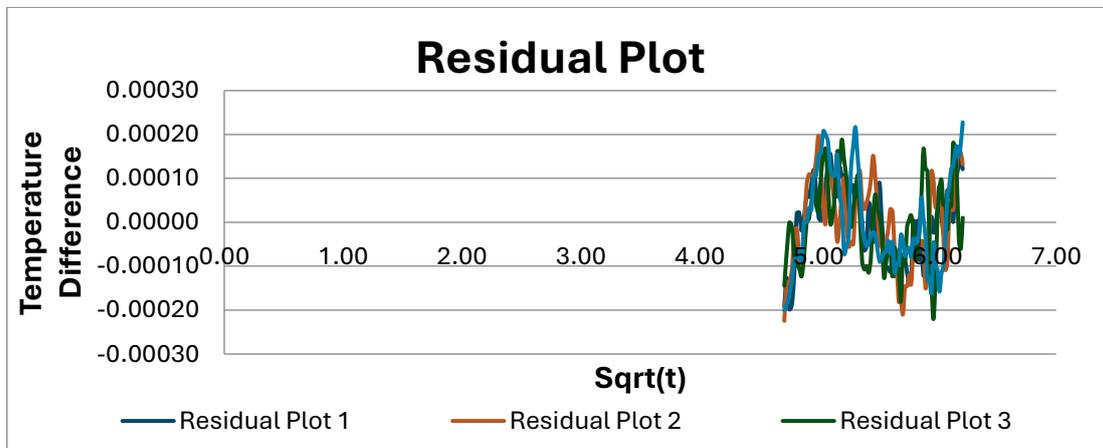


Figura 3.65 Residuo JKI™.

RESIL MAC W™

	Temperature	Th. Conductivity	Th. Diffusivity	Spec. Heat
	26.4 °C	0.063 W/mK	3.36 mm <sup>2</sup> /s	0.0189 MJ/m <sup>3</sup> K
	26.4 °C	0.063 W/mK	3.36 mm <sup>2</sup> /s	0.0189 MJ/m <sup>3</sup> K
	26.4 °C	0.064 W/mK	3.24 mm <sup>2</sup> /s	0.0197 MJ/m <sup>3</sup> K
	26.4 °C	0.063 W/mK	3.36 mm <sup>2</sup> /s	0.0188 MJ/m <sup>3</sup> K
	26.4 °C	0.063 W/mK	3.35 mm <sup>2</sup> /s	0.0189 MJ/m <sup>3</sup> K
MEDIA	26.4 °C	0.063 W/mK	3.333 mm <sup>2</sup> /s	0.019 MJ/m <sup>3</sup> K
DEV.STANDARD	0.029940455	0.000249025	0.052676291	0.000377361

Tabella 3.40 Risultati conducibilità termica, diffusività termica e calore specifico Resil MAC W™.

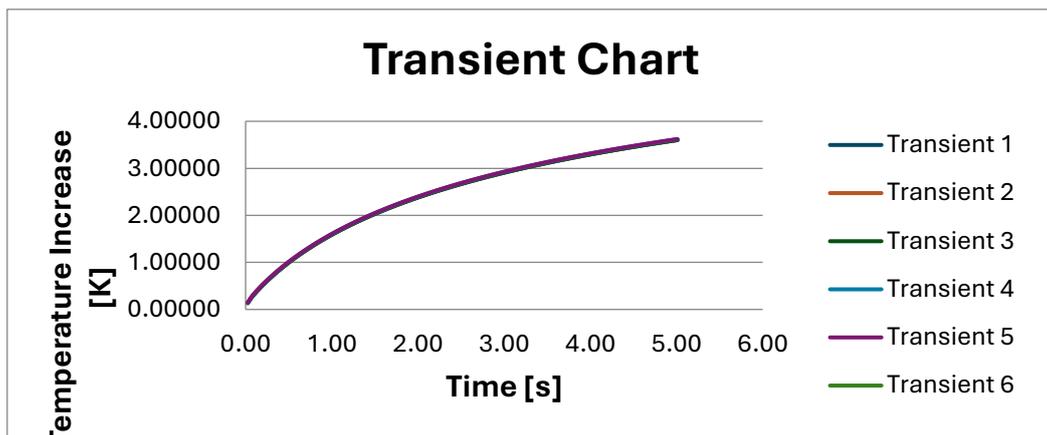


Figura 3.66 Curva transitoria Resil MAC W™.

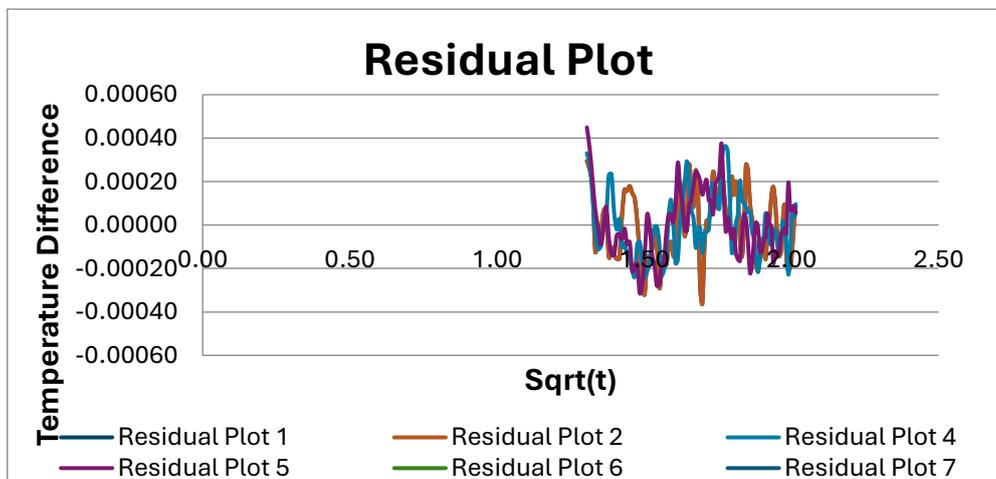


Figura 3.67 Residuo Resil MAC W™.

Dall'analisi dei quattro materiali emergono alcune considerazioni significative in merito alle loro proprietà termiche, in particolare conducibilità termica, diffusività termica e calore specifico. Il materiale Resil MAC W™ si distingue positivamente rispetto agli altri per la sua conducibilità termica, che risulta essere abbastanza bassa da poter competere con i materiali tradizionali sul mercato. Questo dato è cruciale, poiché una bassa conducibilità termica è essenziale per garantire un buon isolamento termico e ridurre le dispersioni di calore, sia in inverno che in estate.

Al contrario, i materiali Canapa-Wave™, Euroteck™ e JKI™ presentano valori di conducibilità termica troppo elevati per poter essere considerati competitivi rispetto agli isolanti termici comunemente utilizzati. Questi valori indicano una limitata capacità di bloccare il flusso di calore attraverso il materiale, rendendoli meno efficienti nel garantire l'isolamento termico. Tuttavia, nonostante la conducibilità termica elevata, l'Euroteck™ presenta un calore specifico relativamente alto, il che rappresenta un aspetto positivo per quanto riguarda l'isolamento estivo. Un calore specifico elevato significa che il materiale può assorbire e accumulare una maggiore quantità di energia termica senza aumentare rapidamente la sua temperatura, contribuendo così a mantenere più stabile il clima interno dell'edificio durante i periodi di caldo.

Di conseguenza, materiali con un alto calore specifico, come l'Euroteck™, sono vantaggiosi perché possono ritardare e attenuare l'ingresso del calore, riducendo così l'onere sul sistema di raffreddamento e migliorando il comfort termico.

L'isolamento estivo rappresenta una grande sfida, poiché il flusso termico da cui bisogna proteggersi è molto intenso: il sole colpisce continuamente la superficie dell'edificio durante tutto il giorno, e l'ambiente interno è relativamente piccolo rispetto all'esterno. Questo rende difficile mantenere un'efficace barriera termica. Al contrario, in inverno, il flusso di energia termica che si disperde dall'interno verso l'esterno è molto più contenuto rispetto all'ambiente circostante, rendendo più semplice mantenere l'isolamento termico e conservare il calore all'interno dell'edificio.

### 3.5 Analisi dei Risultati

Di seguito riassunti nella tabella 3.41 i valori delle caratterizzazioni:

	Canapa-Wave™	Euroteck™	Resil MAC W™	JKI™	EPS
<b>Densità</b>					
[kg/m <sup>3</sup> ]	164,411	252,643	208,154	219,730	30,000
<b>Assorbimento a lungo termine</b>					
W	91,675	83,666	105,326	131,042	2,000
<b>Assorbimento a breve termine</b>					
W	30,950	55,660	108,306	100,069	2,000
<b>Conducibilità termica</b>					
W/mK	0,100	0,104	0,063	0,100	0,035
<b>Diffusività termica</b>					
mm <sup>2</sup> /s	0,730	0,310	3,333	0,412	0,200
<b>Calore Specifico</b>					
J/kgK	787,184	2484,056	1029,381	976,379	1340,000
<b>Resistenza a trazione</b>					
KPa	-	23,826	7,449	5,885	300,000
<b>Fonoassorbimento</b>					
Alfa a Hz 2000	0,152	0,180	0,706	0,706	0,100

Tabella 3.41 Valori risultanti dalle caratterizzazioni.

## Chapter 4 – Applicazioni dei materiali studiati in ambito edilizio

### 4.1 Isolamento Termico In Edilizia

L'isolamento termico delle pareti esterne è una delle tecniche più efficaci per migliorare l'efficienza energetica di un edificio residenziale. La sua funzione principale è quella di ridurre le dispersioni termiche, mantenendo l'ambiente interno a una temperatura costante e ottimizzando il consumo energetico. L'applicazione di pannelli isolanti esterni, conosciuta anche come sistema a cappotto, prevede la copertura delle pareti perimetrali con strati di materiali isolanti come il polistirene espanso, la lana di roccia o il poliuretano, che creano una barriera continua.

Questo sistema, se correttamente installato, riveste l'involucro dell'edificio, minimizzando le perdite di calore. Tuttavia, il cappotto termico presenta punti critici che, se non trattati adeguatamente, possono compromettere l'efficacia dell'isolamento. Uno dei principali punti di dispersione si trova nelle connessioni tra le pareti e i serramenti, come finestre e porte. Questi punti sono spesso soggetti a perdite di calore se non viene garantita una perfetta sigillatura e continuità tra il pannello isolante e il telaio della finestra. Il rischio è quello di creare fessure o spazi vuoti che permettono il passaggio dell'aria e la formazione di ponti termici, riducendo così l'efficacia dell'intero sistema.

Un altro punto vulnerabile è costituito dalle intersezioni tra le pareti e il tetto o i solai. Queste giunzioni sono spesso complesse da isolare perfettamente, poiché coinvolgono diverse superfici con materiali differenti. Se il cappotto non copre uniformemente queste zone o se i materiali utilizzati per raccordare le superfici non sono sufficientemente isolanti, si verificano dispersioni di calore significative. In particolare, il passaggio tra le pareti verticali e il tetto richiede una cura particolare, poiché è qui che il calore interno tende naturalmente a salire e disperdersi.

Anche i balconi rappresentano un altro punto di debolezza per il sistema a cappotto. Essendo elementi strutturali che sporgono dall'edificio, interrompono la continuità dell'isolamento esterno. Se il cappotto non viene esteso anche sotto la soletta del balcone e se non vengono utilizzati elementi di raccordo isolanti per coprire le giunzioni, si creano inevitabilmente ponti termici che permettono al calore di fuoriuscire. La presenza di tali punti critici può essere visivamente identificata attraverso termografie, che mostrano come il calore si disperde in queste aree.

Infine, anche i giunti tra i pannelli stessi possono rappresentare un punto di dispersione. Se i pannelli non sono posati correttamente, o se l'adesione non è perfetta, si formano piccole fessure che possono diventare vie di fuga per il calore. L'applicazione di sigillanti o l'utilizzo di reti rinforzate e strati di rasante serve proprio per minimizzare questi rischi, ma l'installazione deve essere eseguita con precisione per garantire la continuità dell'isolamento.

## 4.2 Isolamento termico delle superfici disperdenti opache (cappotto termico)

L'isolamento termico delle superfici disperdenti opache, noto comunemente come "cappotto termico" si basa su un principio semplice, cioè quello di "chiudere" l'edificio su tutti i lati, idealmente anche copertura e contro terra, in uno strato isolante, esattamente come farebbe un "cappotto" su una persona.

La sua progettazione e installazione richiedono grande cura e attenzione, data la complessità del processo. È composto da otto strati, chiamati "funzionali" perché ognuno ha una funzione specifica e un ruolo ben definito. Ogni strato è indispensabile per il corretto funzionamento dell'intero sistema. La struttura di un cappotto termico prevede otto fasi successivamente illustrate.

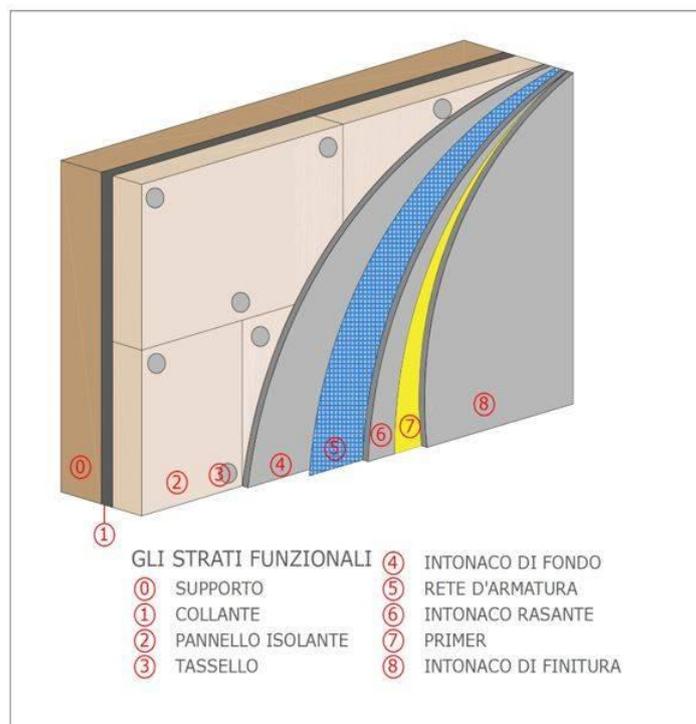


Figura 4.1 Strati cappotto termico, fonte Ingenio.

### ***4.2.1 Parete di Appoggio o Supporto***

La parete di appoggio rappresenta la base su cui viene installato il cappotto termico. Può essere realizzata in diversi materiali, come mattoni, blocchi di cemento, calcestruzzo armato, o altre tipologie di muratura. La qualità e lo stato della parete di supporto sono fondamentali per la corretta adesione del sistema di isolamento e per la sua durabilità nel tempo. Prima dell'applicazione del cappotto, è essenziale verificare l'integrità della parete, rimuovendo eventuali parti deteriorate e riparando crepe o difetti superficiali.

Questa superficie deve essere pulita, asciutta e priva di sostanze che potrebbero compromettere l'adesione, come polvere, muffa o grasso. Un supporto adeguatamente preparato garantisce che gli strati successivi si fissino saldamente e che il sistema a cappotto rimanga stabile nel tempo, anche in condizioni climatiche avverse.

### ***4.2.2 Colla di Adesione o Collante***

La colla di adesione è il materiale utilizzato per fissare i pannelli isolanti alla parete di supporto. Viene applicata in modo uniforme per garantire che il pannello aderisca perfettamente alla superficie muraria. La colla, generalmente un prodotto a base cementizia, è studiata per offrire una presa iniziale rapida e una resistenza meccanica elevata una volta indurita.

Durante l'applicazione, la colla può essere distribuita a punti o a strisce per garantire un'adesione uniforme e per evitare la formazione di vuoti d'aria tra il pannello e la parete, che potrebbero causare problemi di condensa e ridurre l'efficacia dell'isolamento. La scelta della colla dipende anche dal tipo di pannello isolante utilizzato e dalle condizioni climatiche della zona in cui si trova l'edificio, poiché deve resistere a variazioni di temperatura e umidità.

### ***4.2.3 Pannello Isolante***

Il pannello isolante è il cuore del sistema a cappotto e il componente principale responsabile dell'isolamento termico. Esistono diverse tipologie di pannelli isolanti ciascuno con caratteristiche specifiche in termini di conducibilità termica, resistenza meccanica e resistenza al fuoco.

I pannelli vengono posati sulla parete di supporto, incollati con il collante e, successivamente, fissati con i tasselli. La scelta del tipo di pannello dipende dall'obiettivo di isolamento, che può essere termico o acustico e dalle specifiche dell'edificio. La posa deve essere effettuata con estrema precisione per evitare ponti termici e garantire una continuità nell'isolamento su tutta la superficie.

### ***4.2.4 Tasselli***

I tasselli sono elementi di fissaggio meccanico che assicurano l'ancoraggio dei pannelli isolanti alla parete. Sono realizzati in materiali resistenti agli agenti atmosferici, come il nylon o l'acciaio zincato, e vengono inseriti attraverso i pannelli per aumentarne la stabilità, soprattutto in presenza di condizioni climatiche avverse, come vento forte o dilatazioni termiche.

La scelta e il posizionamento dei tasselli dipendono dal tipo di pannello e dal materiale della parete di supporto. In genere, vengono applicati seguendo un pattern prestabilito per garantire che ogni pannello sia adeguatamente fissato in più punti, evitando deformazioni o distacchi nel tempo. La corretta installazione dei tasselli è fondamentale per la longevità e l'efficacia del sistema di isolamento.

#### ***4.2.5 Intonaco di Fondo***

L'intonaco di fondo è uno strato applicato sopra i pannelli isolanti per creare una superficie uniforme e resistente. Questo strato serve anche come base per la rete di armatura e contribuisce a proteggere il pannello dagli agenti esterni. Solitamente, l'intonaco di fondo è a base di malta cementizia e contiene additivi specifici per migliorare l'aderenza e la resistenza.

Lo scopo dell'intonaco di fondo è quello di creare una base solida e uniforme per gli strati successivi. Deve essere applicato con attenzione per garantire che aderisca correttamente ai pannelli e che copra completamente le giunture tra di essi, evitando fessure che potrebbero diventare punti di infiltrazione di acqua.

#### ***4.2.6 Rete di Armatura in Fibra di Vetro***

La rete di armatura è un componente essenziale per la resistenza meccanica del cappotto termico. Realizzata in fibra di vetro, viene annegata nell'intonaco di fondo per rinforzare lo strato superficiale e prevenire fessurazioni dovute a movimenti strutturali o agli sbalzi termici. La rete contribuisce anche a distribuire uniformemente le sollecitazioni meccaniche, migliorando la stabilità e la durabilità dell'intero sistema.

La rete di armatura è applicata seguendo le linee guida specifiche del produttore e deve essere completamente integrata nell'intonaco per garantire una protezione efficace. La corretta posa della rete è fondamentale per evitare che si formino crepe nel rivestimento finale, compromettendo l'efficacia isolante del cappotto.

#### ***4.2.7 Intonaco Rasante***

L'intonaco rasante è un ulteriore strato applicato sopra la rete di armatura per lisciare la superficie e creare una base compatta e omogenea per gli strati successivi. Questo strato serve a coprire e proteggere la rete di armatura, integrandosi completamente con essa per formare un corpo unico e resistente.

L'intonaco rasante deve essere applicato con cura per evitare imperfezioni superficiali che potrebbero compromettere l'aspetto estetico finale del cappotto. Inoltre, la sua formulazione deve garantire una buona elasticità per assorbire eventuali micromovimenti dell'edificio senza fessurarsi.

#### ***4.2.8 Primer***

Il primer è un prodotto che si applica sulla superficie del cappotto prima di stendere l'intonaco di finitura. La sua funzione principale è migliorare l'adesione dello strato finale e garantire una maggiore

durabilità e resistenza agli agenti atmosferici. Il primer forma una barriera che riduce l'assorbimento d'acqua e uniforma l'adesione tra l'intonaco rasante e quello di finitura.

L'applicazione del primer deve essere uniforme e coprire tutta la superficie in modo da preparare adeguatamente la base per la finitura, evitando irregolarità che potrebbero compromettere l'aspetto estetico e la protezione del sistema.

#### ***4.2.9 Intonaco di Finitura con Pittura Finale***

L'intonaco di finitura è lo strato esterno del cappotto termico, quello che conferisce l'aspetto estetico finale all'edificio e che protegge l'intero sistema dagli agenti atmosferici, come pioggia, vento e raggi UV. Può essere a base di calce, acrilico, o silossanico, a seconda delle caratteristiche richieste in termini di traspirabilità, resistenza e resa estetica.

Questo strato può essere ulteriormente personalizzato con la pittura finale, che fornisce colore e finitura estetica, oltre a un'ulteriore protezione superficiale. È fondamentale che l'intonaco di finitura sia applicato in modo uniforme per garantire non solo una buona resa estetica ma anche una copertura continua e resistente.

## 4.3 Prestazione energetica

### 4.3.1 Classe Energetica

L'Attestato di Prestazione Energetica (APE) di un immobile è un documento redatto da un tecnico qualificato e indipendente, il quale certifica l'efficienza energetica dell'edificio utilizzando specifici indicatori. L'APE include anche suggerimenti per migliorare tale efficienza. Nella pagina iniziale, viene indicata la classe energetica dell'edificio, determinata in base all'indice di prestazione energetica globale non rinnovabile ( $EP_{gl,nren}$ ). Questo indice deve essere accompagnato da una lettera che ne rappresenta la classe; in mancanza di entrambi i parametri, il certificato non è valido, come previsto dall'articolo 4, comma 4, del DM 26 giugno 2015. In seguito, è riportata un'immagine della scala delle classi energetiche.

La classe energetica di un edificio è rappresentata da una lettera: la lettera G indica il livello più alto di consumo energetico, associato a un indice di prestazione maggiore, mentre la lettera A segnala la classe più efficiente, con consumi energetici più bassi. La lettera A può essere accompagnata da un numero da 1 a 4, che specifica ulteriormente i livelli di efficienza energetica in ordine crescente. L'indice di prestazione energetica viene valutato confrontando i risultati ottenuti con quelli di un edificio di riferimento, che presenta un "Indice di prestazione globale non rinnovabile dell'edificio di riferimento" ( $EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21)$ ). Questo edificio di riferimento ha caratteristiche identiche a quello analizzato in termini di posizione, geometria, orientamento e uso, ma con elementi edilizi e impiantistici predefiniti secondo le specifiche dell'Allegato 1, capitolo 3 del "Decreto requisiti minimi". Il valore dell'indice  $EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21)$  stabilisce il limite tra la classe A1 e la classe B e, quindi, i margini di prestazione delle altre classi, calcolati applicando all'indice di riferimento coefficienti di riduzione o incremento, come riportato nella Tabella 4.37.

	<b>Classe A4</b>	$\leq 0,40 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21)$
$0,40 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21) <$	<b>Classe A3</b>	$\leq 0,60 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21)$
$0,60 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21) <$	<b>Classe A2</b>	$\leq 0,80 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21)$
$0,80 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21) <$	<b>Classe A1</b>	$\leq 1,00 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21)$
$1,00 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21) <$	<b>Classe B</b>	$\leq 1,20 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21)$
$1,20 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21) <$	<b>Classe C</b>	$\leq 1,50 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21)$
$1,50 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21) <$	<b>Classe D</b>	$\leq 2,00 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21)$
$2,00 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21) <$	<b>Classe E</b>	$\leq 2,60 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21)$
$2,60 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21) <$	<b>Classe F</b>	$\leq 3,50 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21)$
	<b>Classe G</b>	$> 3,50 EP_{gl,nren,rif,standard}(2019/21)$

Tabella 4.1 Classi energetiche con limiti, fonte dall'Appendice B del DM 26/06/2015.

In aggiunta al parametro precedentemente descritto, la prima pagina dell'APE include una rappresentazione grafica della prestazione energetica dell'involucro edilizio per le stagioni invernale ed estiva. L'indice di prestazione energetica dell'involucro in inverno è correlato all'Indice di prestazione termica utile per il riscaldamento ( $EP_{H,nd}$ ), il quale dipende dalla qualità dell'isolamento delle superfici opache e trasparenti e dall'efficienza di un eventuale sistema di ventilazione. Questo parametro viene determinato partendo dall'indice di prestazione termica necessario per riscaldare l'edificio di riferimento ( $EP_{H,nd,limite}(2019/21)$ ), calcolato in conformità con l'allegato 1, capitolo 3 del Decreto requisiti minimi, e consente di definire, tramite un fattore costante, i limiti che distinguono gli involucri edilizi di alta, media e bassa qualità. Di seguito è riportata la tabella 4.1 tratta dall'Appendice B del DM 26/06/2015.

Per quanto riguarda la prestazione energetica estiva dell'involucro edilizio, l'indice di riferimento è calcolato considerando la trasmittanza termica periodica ( $Y_{IE}$ ), sfasamento e trasmittanza termica periodica, e il rapporto tra l'area equivalente estiva e l'area per unità di superficie utile dell'edificio ( $[A_{sol,est}/A_{sup\ utile}]$ ).

### 4.3.2 Indice Di Prestazione Energetica Globale

L'indice di prestazione energetica viene espresso in kWh/m<sup>2</sup> ed esprime, in relazione alla superficie utile di riferimento, il fabbisogno di energia primaria globale all'anno.

Da questo indice dipende, quindi, la classe energetica di appartenenza dell'edificio e di conseguenza la qualità energetica ed il consumo dello stesso.

Nei parametri che influenzano questo indice sono inclusi: i gradi giorno della località in cui si trova, la forma dell'edificio, il rapporto tra la superficie disperdente e il volume riscaldato ( $S/V$ ), l'orientamento e le caratteristiche termiche.

L'EPgl o indice di prestazione energetica globale si calcola sommando tutti i vari indici di prestazione dei diversi servizi energetici:

$$EPgl = EPH + EPW + EPV + EPC + EPL + EPT$$

*Equazione 4.1 Indice di prestazione energetica globale.*

- EPH – climatizzazione invernale;
- EPW – produzione acqua calda sanitaria;
- EPV – ventilazione;
- EPC – climatizzazione estiva;
- EPL – energia per l'illuminazione;
- EPT – energia per i trasporti interni all'edificio, come ascensori e scale mobili.

### 4.3.3 Indice Di Prestazione Termica Utile Per Riscaldamento EPH,nd

L'Indice di prestazione termica utile per riscaldamento (EPH,nd) fa riferimento esclusivamente alla prestazione dell'involucro dell'edificio rendendo del tutto indifferenti tipologia di impianto e di generatore. La prestazione che caratterizza EPH,nd sarà sempre tale al netto degli impianti di climatizzazione invernale e si misura in kWh/m<sup>2</sup>.

EPH,nd è dato dal rapporto fra  $Q_{h,nd}$  e  $Area_N$ , dove  $Area_N$  rappresenta l'Area netta calpestabile dell'Unità mentre  $Q_{h,nd}$  è il Fabbisogno di energia termica utile costituito dagli elementi illustrati nella seguente formula:

$$Q_{h,nd} = (Q_{hTR} + Q_{hVE}) - [EtaU * (Q_{solT} + Q_{hInt})]$$

*Equazione 4.2 Fabbisogno di energia termica utile.*

dove:

- $Q_{hTR}$  = Dispersione per trasmissione in riscaldamento.
- $Q_{hVE}$  = Dispersione termica invernale per ventilazione.

- $\text{EtaU}$  = Fattore di utilizzazione degli apporti gratuiti (il fattore, calcolato mensilmente, fa parte dei risultati mensili della subunità per i mesi che ricadono nel periodo di riscaldamento)
- $\text{QsolT}$  = Energia termica da apporti solari delle superfici trasparenti.
- $\text{QhInt}$  = Energia termica da apporti interni.

#### ***4.3.4 Indice Di Prestazione Termica Utile Per Raffrescamento EPC, nd***

Tale indice tiene conto esclusivamente dell'involucro e deriva da una formulazione semplificata delle UNI/TS 11300-1 che non considera molti aspetti del reale comportamento delle strutture edilizie, quali ad esempio lo sfasamento o la trasmittanza termica periodica e l'escursione termica giornaliera.

Sostanzialmente la formulazione delle UNI/TS 11300 vede come carico estivo la differenza tra la somma dei carichi interni, gli apporti per ventilazione e gli apporti solari tramite le strutture opache e vetrate e la somma delle dispersioni verso l'esterno dovuto all'isolamento dell'involucro edilizio.

#### ***4.3.5 Indice Di Prestazione Energetica Per Acs EPacs***

L'Indice di Prestazione Energetica per la produzione di acqua calda sanitaria (ACS), indicato spesso come EPacs (EP per "energia primaria"), rappresenta la quantità di energia necessaria annualmente per produrre acqua calda sanitaria in un edificio. Viene calcolato in kWh per metro quadrato all'anno ( $\text{kWh/m}^2 \text{ anno}$ ) e fornisce un indicatore dell'efficienza energetica dell'impianto per la produzione di ACS.

## 4.4 Modellazione BIM

Al fine di esplorare i risvolti concreti di questi materiali è stato sviluppato un modello di una villetta bifamiliare sul quale sono poi state svolte delle analisi termotecniche secondo il calcolo previsto dalle attuali norme vigenti UNI/TS 11300.

Il modello BIM è stato sviluppato come una villetta bifamiliare situata a Palermo.

L'analisi termotecnica è stata infine condotta in due fasi distinte: la prima ha previsto l'inserimento dei valori delle proprietà termiche dei materiali in esame: il Canapa-Wave™, il JKI™, il Resil MAC W™ e l'Euroteck™ risultanti dalle prove sperimentali precedentemente svolte di conducibilità, densità e calore specifico. Nella seconda fase, invece, sono stati inseriti i valori che caratterizzano i materiali attualmente in uso, EPS e lana di roccia, i cui valori di densità, conducibilità termica e calore specifico sono stati ottenuti consultando tabelle online, che riportano dati già determinati da precedenti ricerche effettuate da esperti del settore

La finalità di questa analisi termotecnica è stata improntata alla valutazione dei materiali in esame per stabilire se essi potevano offrire un'alternativa sostenibile ed efficiente agli isolanti comunemente utilizzati nell'edilizia.

#### 4.4.1 Descrizione dell'edificio oggetto di calcolo

Il software impiegato per le simulazioni illustrate nei capitoli successivi è Termus™, sviluppato dall'azienda italiana ACCA Software™. Nato nel 1996 in risposta alle disposizioni della Legge 10 del 1991, Termus è rapidamente diventato uno dei principali strumenti di calcolo per la certificazione energetica degli edifici in Italia. Questo programma è certificato dalla Commissione Tecnica Termica italiana e rispetta gli standard della normativa UNI TS 11300, oltre a essere conforme alle leggi nazionali e regionali. Il software consente la modellazione completa delle strutture e degli impianti dell'edificio oggetto di studio, per eseguire i calcoli necessari a determinare i parametri richiesti dalle normative vigenti.

L'edificio analizzato è stato preso da un modello esempio di questo Software e i calcoli svolti sono riferiti al sito del comune di Palermo, poiché dalle analisi pregresse ci si aspettava che la maggior efficacia dei materiali analizzati fosse in regime di isolamento estivo piuttosto che in quello invernale; pertanto, si è cercato di simulare una condizione in cui fosse maggiormente critico l'aspetto estivo.

Il comune di Palermo si trova in zona climatica B e presenta un numero di gradi giorno pari a 751

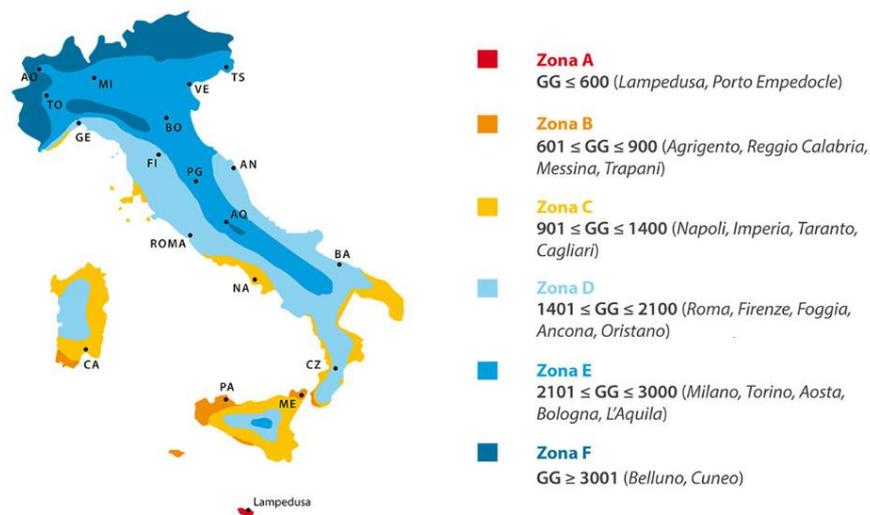


Figura 4.2 Zone climatiche, fonte ResearchGate.net.

COMUNE	
Comune	<b>PALERMO</b> CAP 90100
Provincia	<b>PALERMO</b> Sigla PA
Regione	<b>SICILIA</b>
Dati geografici	Latitudine: 38°7'0" Longitudine: 13°21'43" Altitudine:14 m
DATI INVERNALI DI PROGETTO	
<b>Zona Climatica B</b>	
Temperatura esterna [°C]	5.00
Umidità relativa esterna [%]	59.80
Gradi Giorno	751
Velocità Vento [m/s]	0.90
DATI ESTIVI DI PROGETTO	
Temperatura esterna [°C]	32.6
Umidità relativa esterna [%]	60.0
Escursione termica giornaliera [°C]	6.5
Riduzione irrad. TOT per foschia [%]	0.0

Tabella 4.2 Caratteristiche del sito dove è locato il modello.

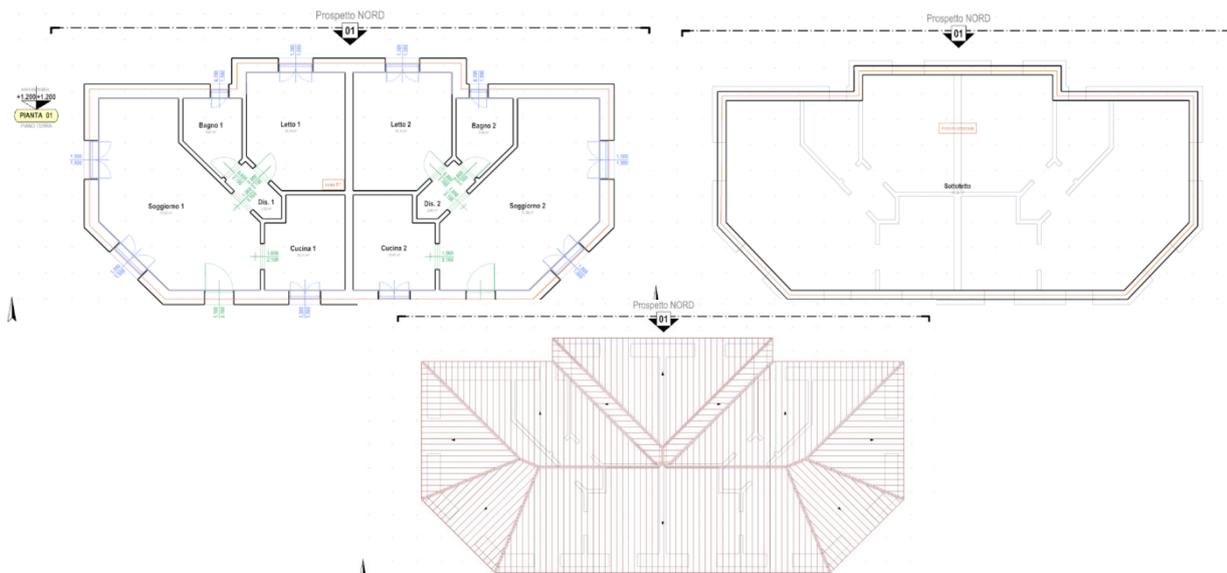


Figura 4.3 Pianta del piano terra, sottotetto e tetto del modello.

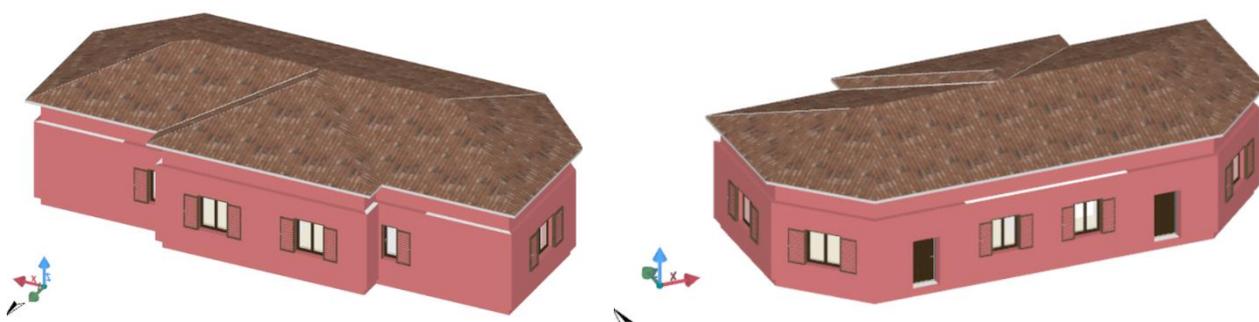


Figura 4.4 Visuale 3D del modello.

Sono presenti finestre a due ante in legno con montante mobile e due finestre rettangolari a singola anta.

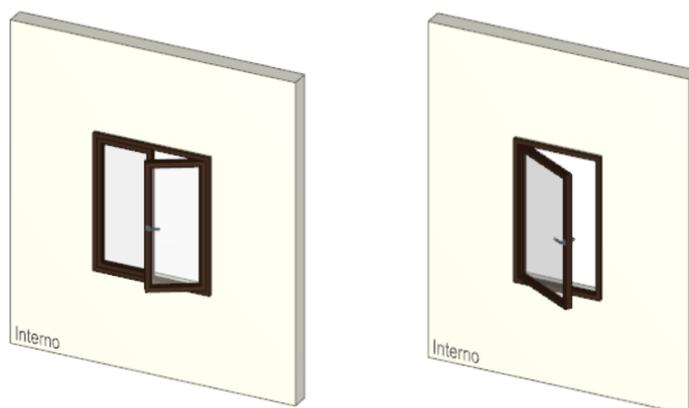


Figura 4.5 Finestra in legno noce a doppia anta a sinistra e finestra in legno noce a singola anta a destra.

Su ogni infisso è stato applicato un doppio-vetro basso emissivo:



Figura 4.6 Doppio vetro con rivestimento basso-emissivo.

Sono state utilizzate persiane per finestre rettangolari con una e con due ante battenti.

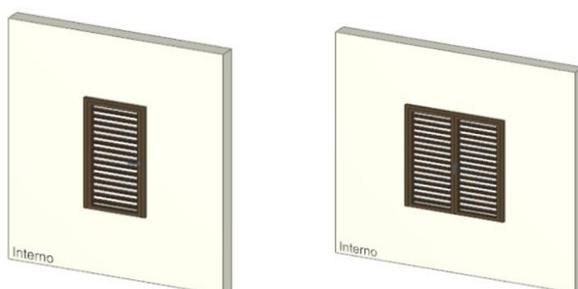


Figura 4.7 Persiana in legno noce a singola anta a sinistra e persiana in legno noce a doppia anta a destra.

Di seguito vengono riportati i valori di trasmittanza degli infissi a doppia anta e a singola anta:

⤴ Infisso interno		⤵ Infisso interno	
Aw	2.25 m²	Aw	2.31 m²
Af	0.84 m²	Af	0.97 m²
Ag	1.41 m²	Ap	1.34 m²
Ap	0.00 m²	Cw	1.2256 W/m²K
Cw	3.0939 W/m²K	Lg	0.0000 m
Lg	7.2800 m		

Tabella 4.3 Risultati trasmittanze delle due tipologie di infissi.

Sono stati utilizzati un generatore di calore a combustione e due pompe di calore, una invertibile e una aria-acqua:

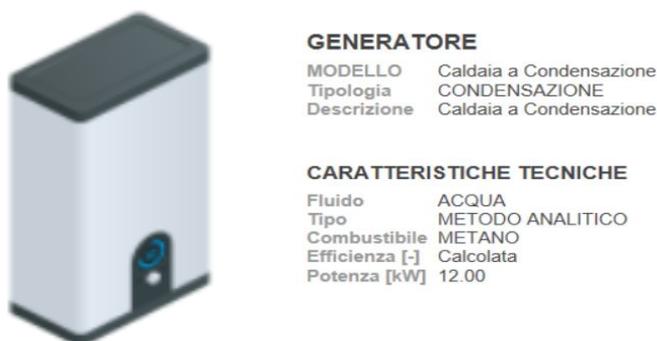


Figura 4.8 Caldaia a condensazione.



#### GENERATORE

MODELLO Pompa di Calore aria-acqua 16kW  
 Tipologia POMPA DI CALORE  
 Descrizione Pompa di Calore aria-acqua 16kW

#### CARATTERISTICHE TECNICHE

Fluido ACQUA  
 Tipo COMPRESSIONE ELETTRICA  
 Combustibile ELETTRICITA'  
 Efficienza [-] Calcolata  
 Potenza [kW] 16.00

Figura 4.9 Pompa di calore aria-acqua.



#### GENERATORE

MODELLO PdC Invertibile  
 Tipologia POMPA DI CALORE  
 Descrizione PdC Invertibile

#### CARATTERISTICHE TECNICHE

Fluido ACQUA  
 Tipo COMPRESSIONE ELETTRICA  
 Combustibile ELETTRICITA'  
 Efficienza [-] Calcolata  
 Potenza [kW] 5.00

Figura 4.10 Pompa di calore invertibile.

### 4.4.2 Stratigrafie

I principali parametri considerati per le proprietà del materiale isolante in esame includono la conducibilità termica, la densità dei materiali e il loro calore specifico, elementi fondamentali per avviare le analisi necessarie e determinare lo spessore adeguato a conformarsi alle normative vigenti, garantendo così le prestazioni isolanti dell'involucro edilizio. È importante notare che la copertura è stata trattata come non isolata. Nello specifico, questa analisi ha tenuto conto delle stratigrafie dei materiali utilizzati, insieme alle condizioni climatiche della località in cui si trova il progetto.

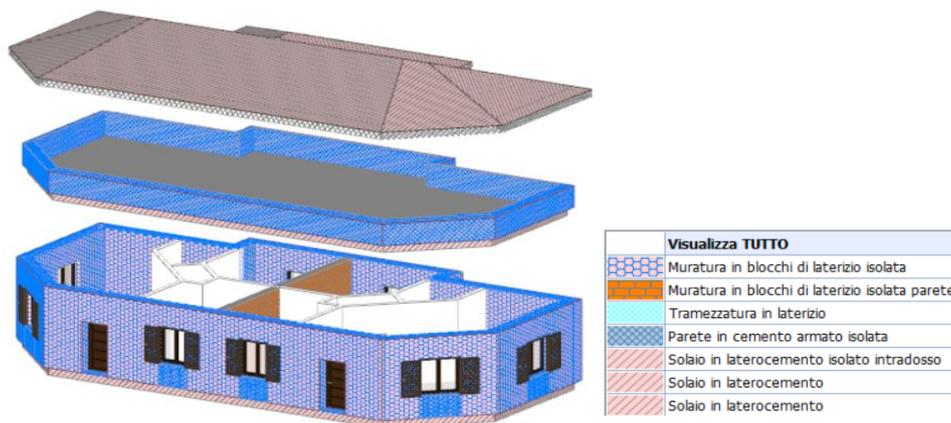


Figura 4.11 Stratigrafia del modello con legenda.

## Canapa-Wave™

In seguito, è stato integrato il materiale Canapa-Wave™ come pannello isolante nel muro esterno, e si è calcolato che uno spessore di 30 cm fosse necessario per garantire il rispetto dei requisiti minimi stabiliti dalle normative vigenti.

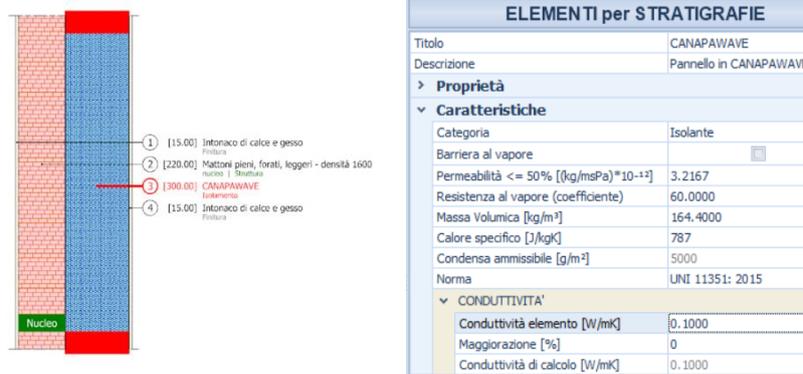


Tabella 4.4 Stratigrafia e caratteristiche con Canapa-Wave™ 30 cm.

### PRESTAZIONE ENERGETICA GLOBALE E DEL FABBRICATO

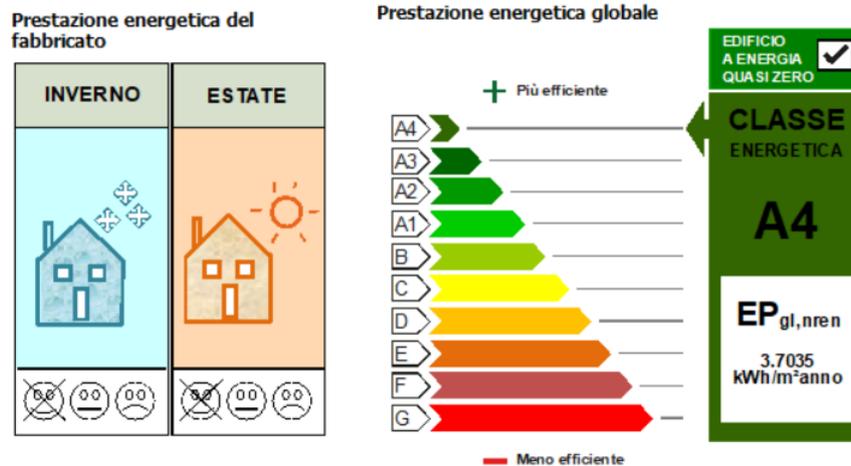


Figura 4.12 Prestazione energetica con Canapa-Wave™ 30 cm.

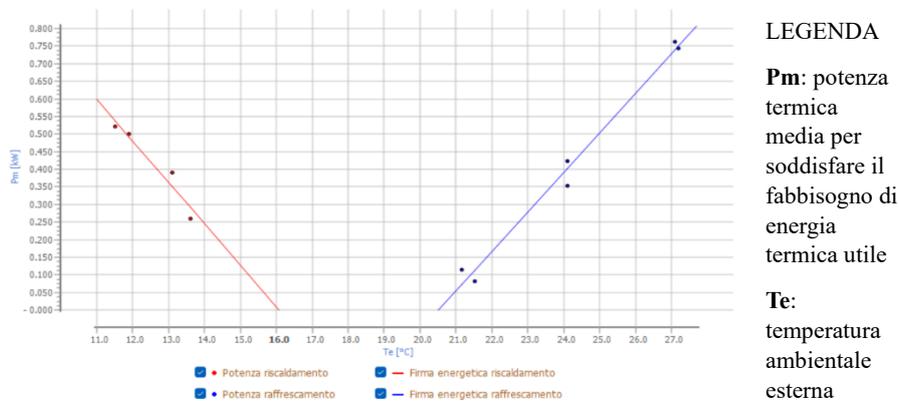


Figura 4.13 Firma energetica con Canapa-Wave™ 30 cm.

<b>INDICI DI PRESTAZIONE</b>	
<b>Classe energetica</b>	A4
<b>Indice di prestazione energetica globale [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	44.27
<b>Indice di prestazione termica utile per riscaldamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	18.243
<b>Indice di prestazione termica utile per raffrescamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	26.67
<b>Indice di prestazione energetica per riscaldamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	20.56
<b>Indice di prestazione energetica per raffrescamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	6.7
<b>Indice di prestazione energetica per ACS [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	17.01

*Tabella 4.5 Indici di prestazione con Canapa-Wave™ 30 cm.*

In seguito, è stato integrato il materiale Euroteck™ come pannello isolante nel muro esterno, e si è calcolato che uno spessore di 30 cm fosse necessario per garantire il rispetto dei requisiti minimi stabiliti dalle normative vigenti.

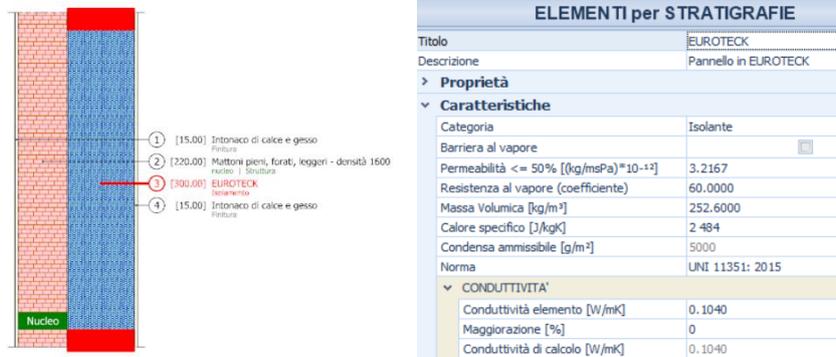


Tabella 4.6 Stratigrafia e caratteristiche con Euroteck™ 30 cm.

PRESTAZIONE ENERGETICA GLOBALE E DEL FABBRICATO

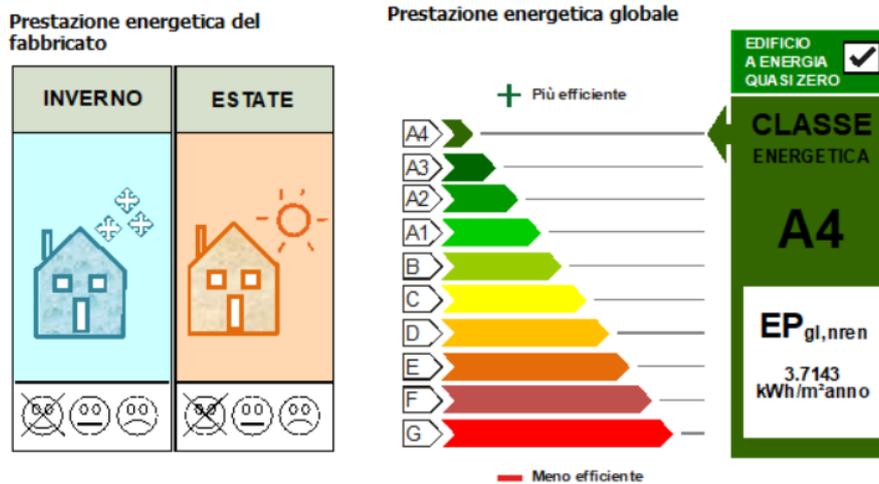
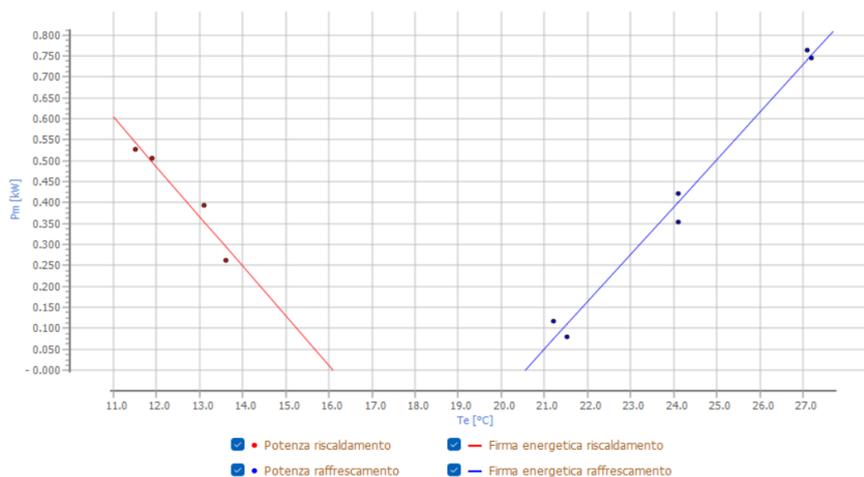


Figura 4.14 Prestazioni energetiche con Euroteck™ 30 cm.



LEGENDA

**Pm:** potenza termica media per soddisfare il fabbisogno di energia termica utile

**Te:** temperatura ambientale esterna

Figura 4.15 Firma energetica con Euroteck™ 30 cm.

<b>INDICI DI PRESTAZIONE</b>	
<b>Classe energetica</b>	A4
<b>Indice di prestazione energetica globale [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	44.49
<b>Indice di prestazione termica utile per riscaldamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	18.453
<b>Indice di prestazione termica utile per raffrescamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	26.626
<b>Indice di prestazione energetica per riscaldamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	20.79
<b>Indice di prestazione energetica per raffrescamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	6.69
<b>Indice di prestazione energetica per ACS [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	17.01

*Tabella 4.7 Indici di prestazione con Euroteck™ 30 cm.*

In seguito, è stato integrato il materiale JKI™ come pannello isolante nel muro esterno, e si è calcolato che uno spessore di 30 cm fosse necessario per garantire il rispetto dei requisiti minimi stabiliti dalle normative vigenti.

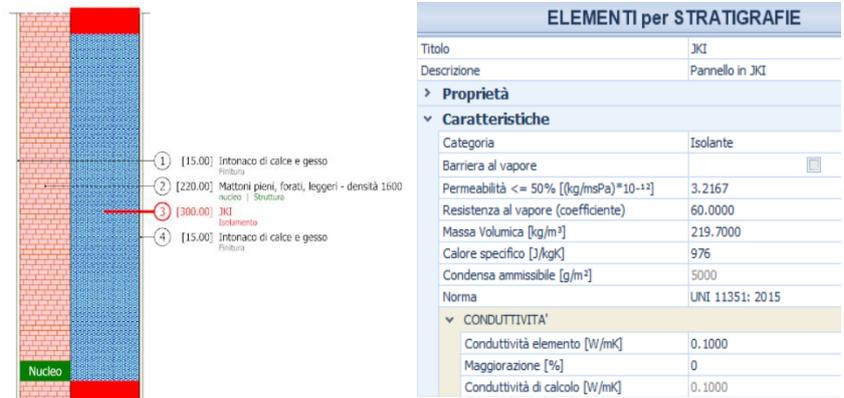


Tabella 4.8 stratigrafie e caratteristiche con JKI™ 30 cm.

**PRESTAZIONE ENERGETICA GLOBALE E DEL FABBRICATO**

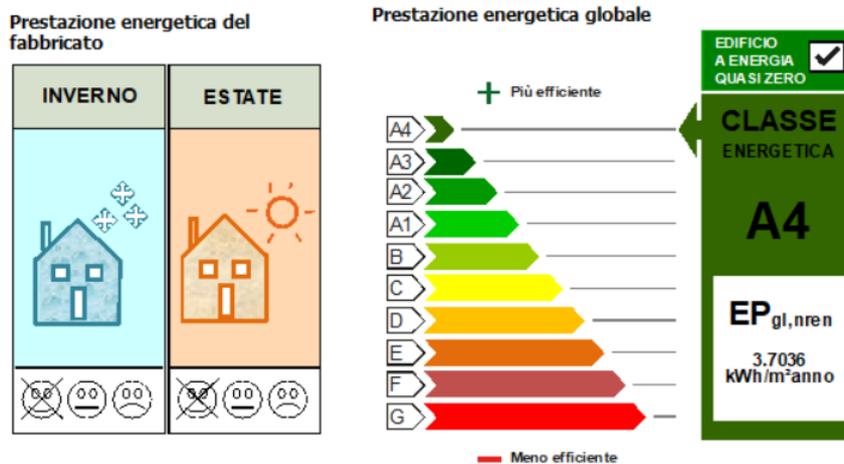


Figura 4.16 – Prestazioni energetiche con JKI™ 30 cm.

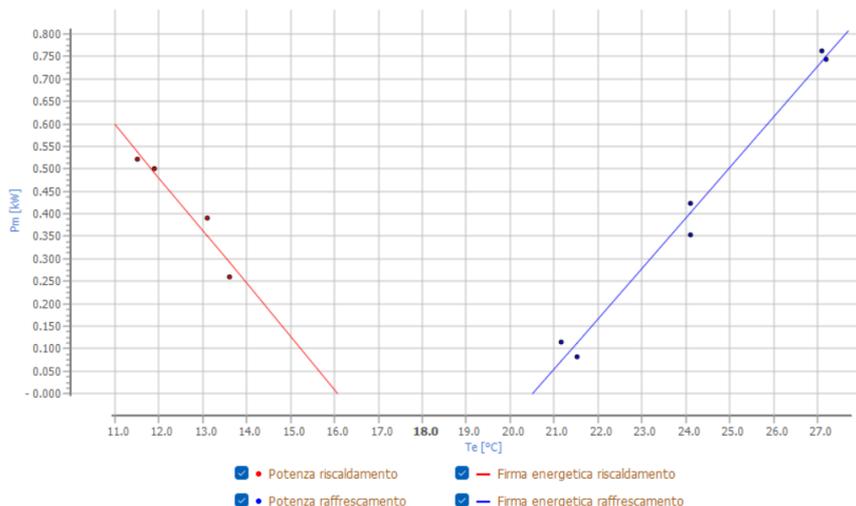


Figura 4.17 Forma energetica con JKI™ 30 cm.

<b>INDICI DI PRESTAZIONE</b>	
<b>Classe energetica</b>	A4
<b>Indice di prestazione energetica globale [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	44.28
<b>Indice di prestazione termica utile per riscaldamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	18.245
<b>Indice di prestazione termica utile per raffrescamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	26.67
<b>Indice di prestazione energetica per riscaldamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	20.57
<b>Indice di prestazione energetica per raffrescamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	6.7
<b>Indice di prestazione energetica per ACS [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	17.01

*Tabella 4.9 Indici di prestazione con JKI™ 30 cm.*

## Resil MAC W™

In seguito, è stato integrato il materiale Resil MAC W™ come pannello isolante nel muro esterno, e si è calcolato che uno spessore di 30 cm fosse necessario per garantire il rispetto dei requisiti minimi stabiliti dalle normative vigenti.

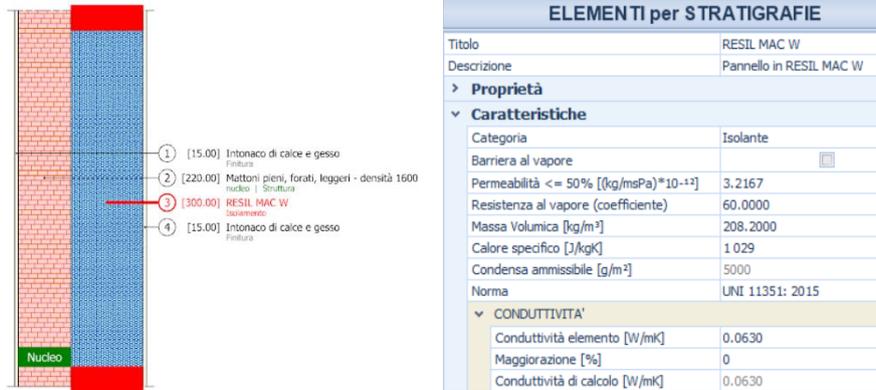


Tabella 4.10 stratigrafia e caratteristiche con Resil MAC W™ 30 cm.

### PRESTAZIONE ENERGETICA GLOBALE E DEL FABBRICATO

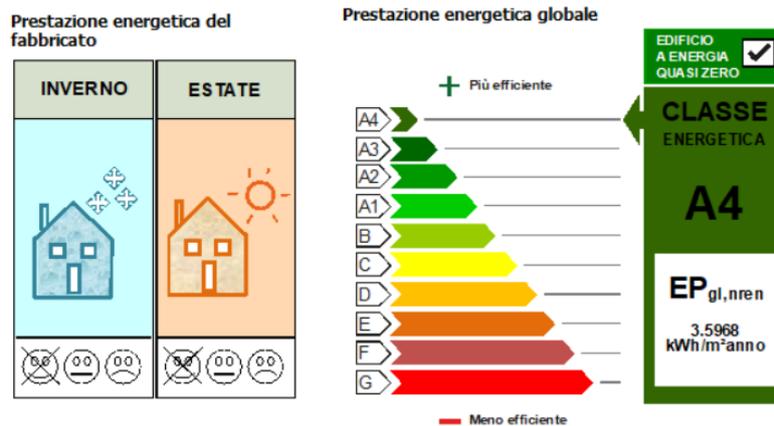


Figura 4.18 Prestazione energetica con Resil MAC W™ 30 cm.

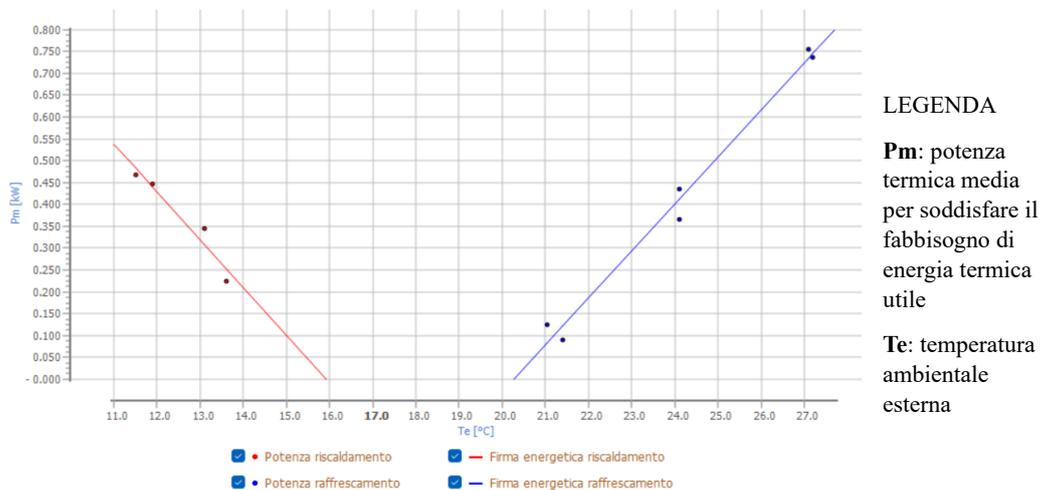


Figura 4.19 Indici di prestazione con Resil MAC W™ 30 cm.

<b>INDICE DI PRESTAZIONE</b>	
<b>Classe energetica</b>	A4
<b>Indice di prestazione energetica globale [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	42.12
<b>Indice di prestazione termica utile per riscaldamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	16.187
<b>Indice di prestazione termica utile per raffrescamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	27.075
<b>Indice di prestazione energetica per riscaldamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	18.36
<b>Indice di prestazione energetica per raffrescamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	6.75
<b>Indice di prestazione energetica per ACS [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	17.01

*Tabella 4.11 Firma energetica con Resil MAC W™ 30 cm.*

## Lana Di Roccia

Di seguito è stato inserito il materiale comunemente utilizzato come isolante Lana Di Roccia. È stato impostato sia lo spessore necessario a verificare i requisiti minimi del materiale stesso (8 cm) sia lo spessore individuato nei materiali sperimentali (30 cm).

Come in precedenza il materiale è stato inserito come pannello isolante nel muro esterno.

## Lana Di Roccia 30 cm



Tabella 4.12 Stratigrafia e caratteristiche con Lana di Roccia 30 cm.

### PRESTAZIONE ENERGETICA GLOBALE E DEL FABBRICATO

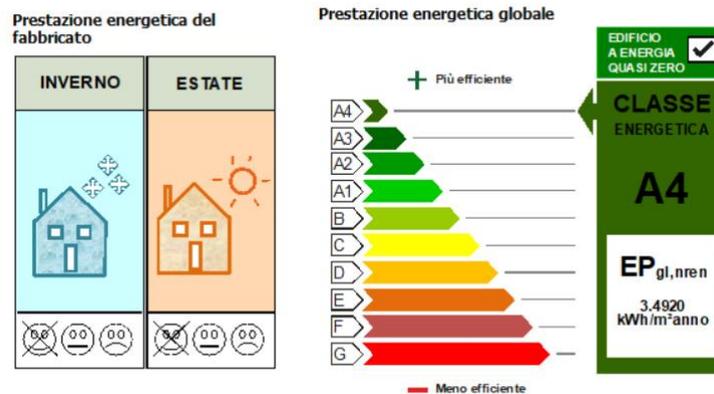
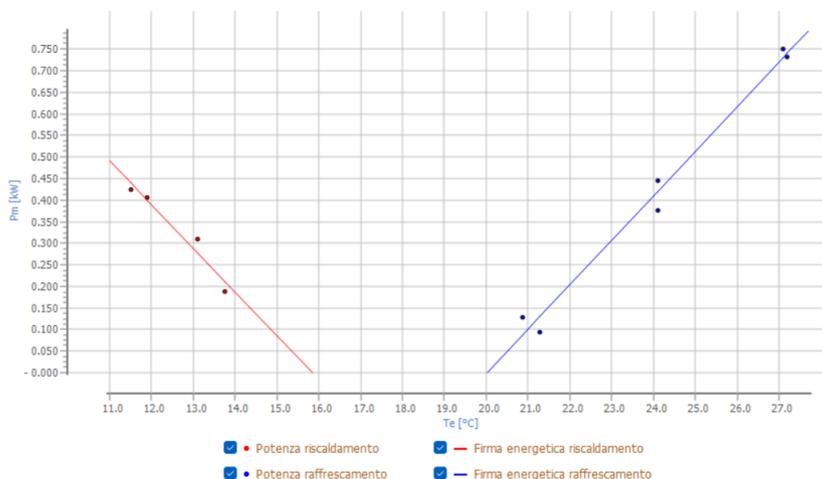


Figura 4.20 Prestazione energetica con Lana di Roccia 30 cm.



### LEGENDA

**P<sub>m</sub>**: potenza termica media per soddisfare il fabbisogno di energia termica utile

**T<sub>e</sub>**: temperatura ambientale esterna

Figura 4.21 Firma energetica con Lana di Roccia 30 cm.

INDICE DI PRESTAZIONE	
Classe energetica	A4
Indice di prestazione energetica globale [kWh/m <sup>2</sup> anno]	40.28
Indice di prestazione termica utile per riscaldamento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	14.431
Indice di prestazione termica utile per raffrescamento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	27.44
Indice di prestazione energetica per riscaldamento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	16.46
Indice di prestazione energetica per raffrescamento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	6.81
Indice di prestazione energetica per ACS [kWh/m <sup>2</sup> anno]	17.01

Tabella 4.13 Indici di prestazione energetica con Lana di Roccia 30 cm.

### Lana Di Roccia 8 cm

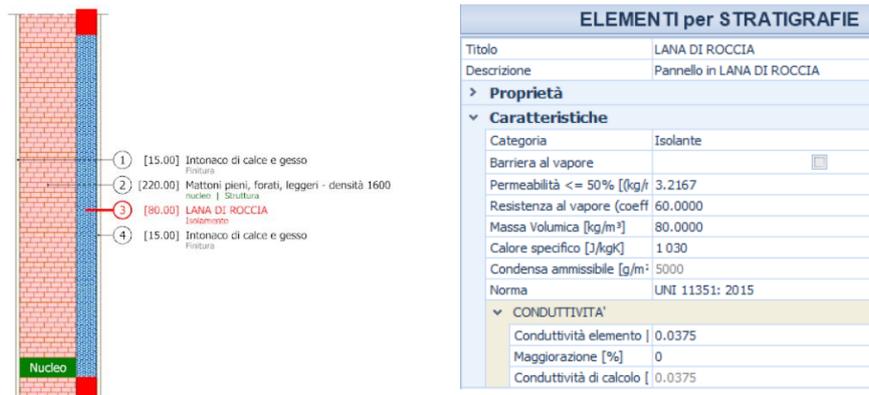


Tabella 4.14 Stratigrafia e caratteristiche con Lana di Roccia 8 cm.

### PRESTAZIONE ENERGETICA GLOBALE E DEL FABBRICATO

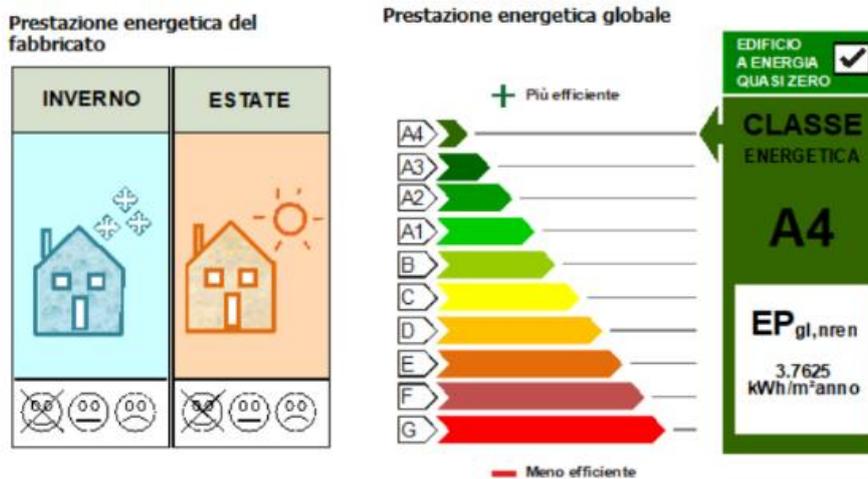
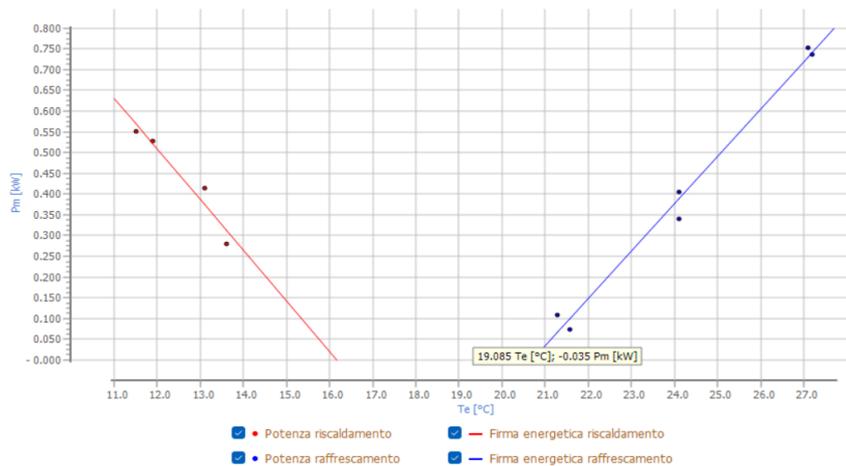


Figura 4.22 Prestazioni energetiche con Lana di Roccia 8 cm.



**LEGENDA**

**Pm:** potenza termica media per soddisfare il fabbisogno di energia termica utile

**Te:** temperatura ambientale esterna

Figura 4.23 Firma energetica con Lana di Roccia 8 cm.

<b>INDICE DI PRESTAZIONE</b>	
<b>Classe energetica</b>	A4
<b>Indice di prestazione energetica globale [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	45.41
<b>Indice di prestazione termica utile per riscaldamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	19.384
<b>Indice di prestazione termica utile per raffrescamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	25.94
<b>Indice di prestazione energetica per riscaldamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	21.79
<b>Indice di prestazione energetica per raffrescamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	6.61
<b>Indice di prestazione energetica per ACS [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	17.01

Tabella 4.15 Indici di prestazione con Lana di Roccia 8 cm.

## EPS (Expanded Sintered Polystyrene)

Di seguito è stato inserito il materiale comunemente utilizzato come isolante EPS. È stato impostato sia lo spessore necessario a verificare i requisiti minimi del materiale stesso (8 cm) sia lo spessore individuato nei materiali sperimentali (30 cm).

Come in precedenza il materiale è stato inserito come pannello isolante nel muro esterno.

### EPS 30 cm



Tabella 4.16 Stratigrafia e caratteristiche con l'EPS 30 cm.

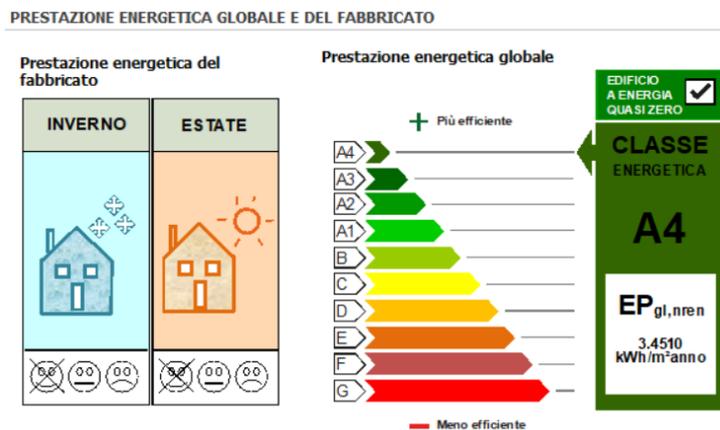


Figura 4.24 Prestazione energetica con l'EPS 30 cm.

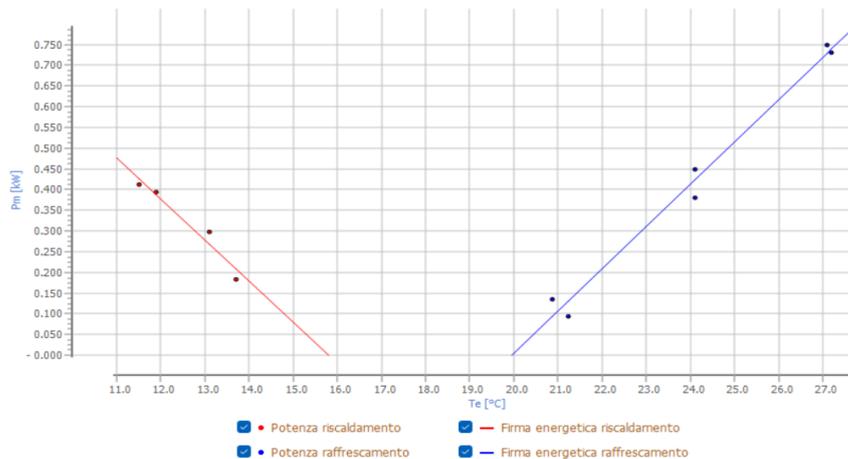
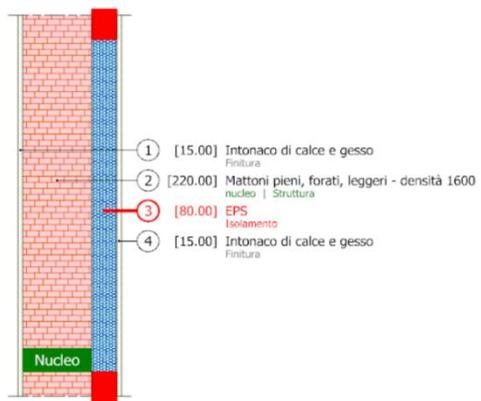


Figura 4.25 Firma Energetica con l'EPS 30 cm.

INDICE DI PRESTAZIONE	
Classe energetica	A4
Indice di prestazione energetica globale [kWh/m <sup>2</sup> anno]	39.72
Indice di prestazione termica utile per riscaldamento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	13.909
Indice di prestazione termica utile per raffrescamento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	27.557
Indice di prestazione energetica per riscaldamento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	15.89
Indice di prestazione energetica per raffrescamento [kWh/m <sup>2</sup> anno]	6.82
Indice di prestazione energetica per ACS [kWh/m <sup>2</sup> anno]	17.01

Tabella 4.17 Indici di prestazione con l'EPS 30 cm.

### EPS 8 cm



ELEMENTI per STRATIGRAFIE	
Titolo	EPS
Descrizione	Pannello in EPS
> Proprietà	
▼ Caratteristiche	
Categoria	Isolante
Barriera al vapore	<input type="checkbox"/>
Permeabilità <= 50% [(kg/msPa)*10 <sup>-12</sup> ]	3.2167
Resistenza al vapore (coefficiente)	60.0000
Massa Volumica [kg/m <sup>3</sup> ]	30.0000
Calore specifico [J/kgK]	1.340
Condensa ammissibile [g/m <sup>2</sup> ]	5000
Norma	UNI 11351: 2015
▼ CONDUTTIVITA'	
Conduktività elemento [W/mK]	0.0350
Maggiorazione [%]	0
Conduktività di calcolo [W/mK]	0.0350

Tabella 4.18 Stratigrafia e caratteristiche con l'EPS 8 cm.

### PRESTAZIONE ENERGETICA GLOBALE E DEL FABBRICATO

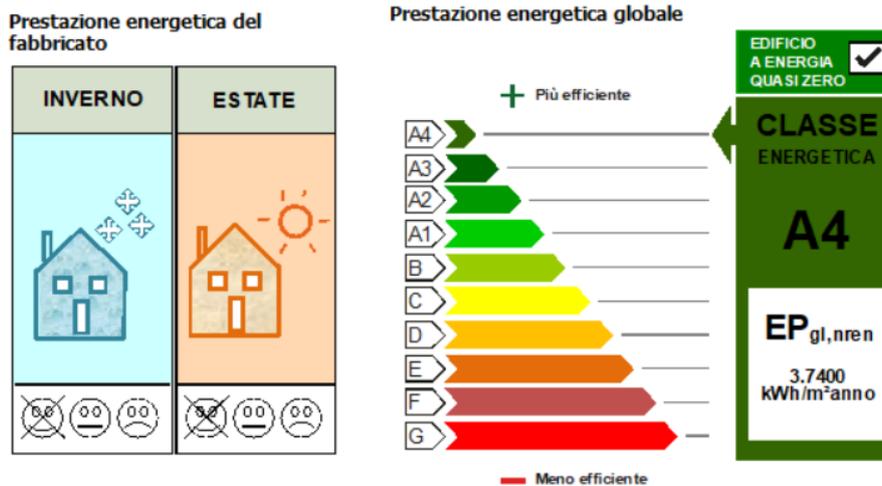
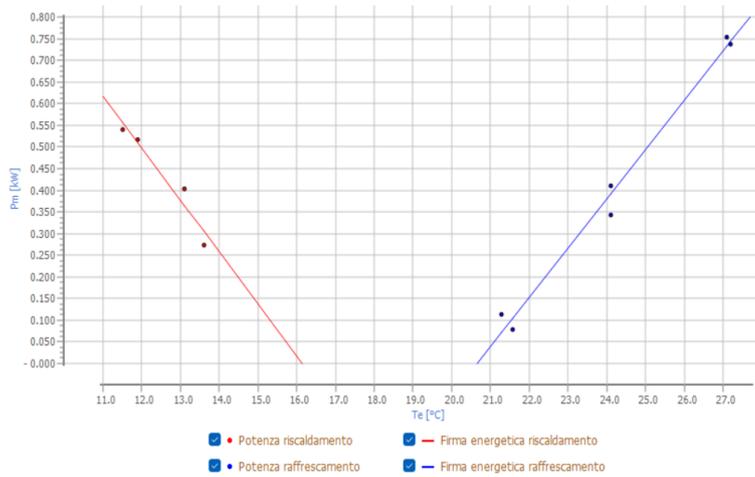


Figura 4.26 Prestazione energetica con l'EPS 8 cm.



LEGENDA

**Pm:** potenza termica media per soddisfare il fabbisogno di energia termica utile

**Te:** temperatura ambientale esterna

Figura 4.27 Firma Energetica con l'EPS 8 cm.

<b>INDICE DI PRESTAZIONE</b>	
<b>Classe energetica</b>	A4
<b>Indice di prestazione energetica globale [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	44.96
<b>Indice di prestazione termica utile per riscaldamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	18.948
<b>Indice di prestazione termica utile per raffrescamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	26.107
<b>Indice di prestazione energetica per riscaldamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	21.32
<b>Indice di prestazione energetica per raffrescamento [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	6.63
<b>Indice di prestazione energetica per ACS [kWh/m<sup>2</sup> anno]</b>	17.01

Tabella 4.19 Indici di Prestazione con l'EPS 8 cm.

### 4.4.3 Conduttanze

Canapa-Wave™, Euroteck™, JKI™

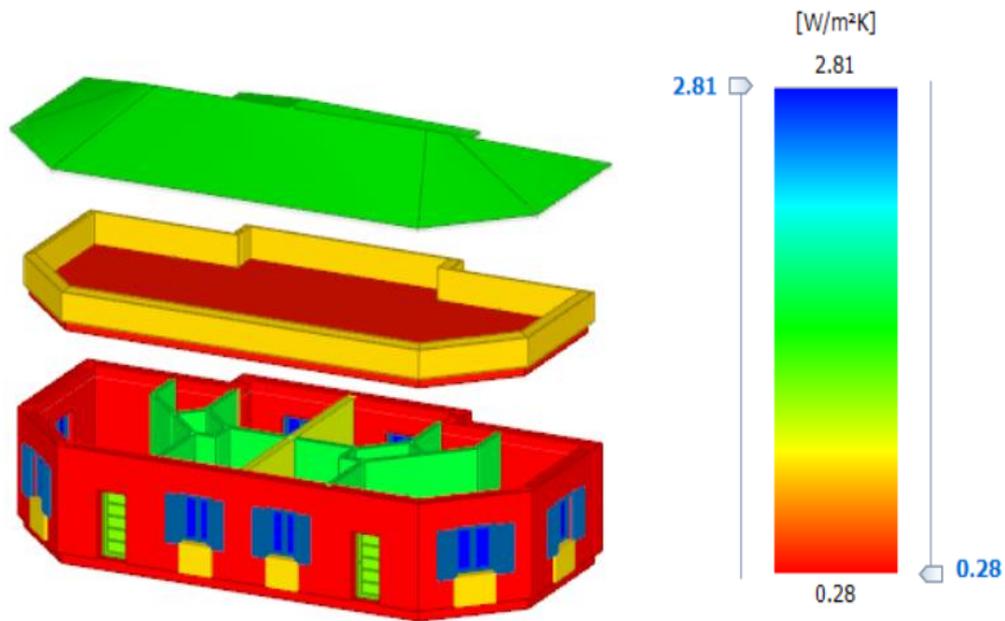


Figura 4.28 Progressione cromatica delle conduttanze dei materiali Canapa-Wave™, Euroteck™, JKI™ 30 cm.

Resil MAC W™

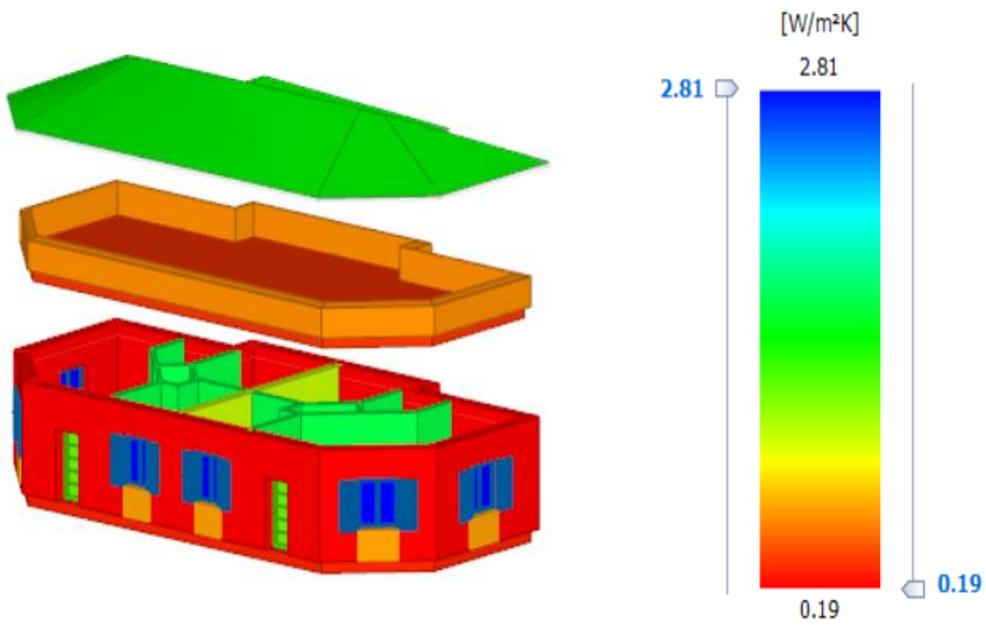


Figura 4.29 Progressione cromatica delle conduttanze del materiale Resil MAC W™ 30 cm.

### 4.3.7.3 Lana Di Roccia

Lana Di Roccia 30 cm

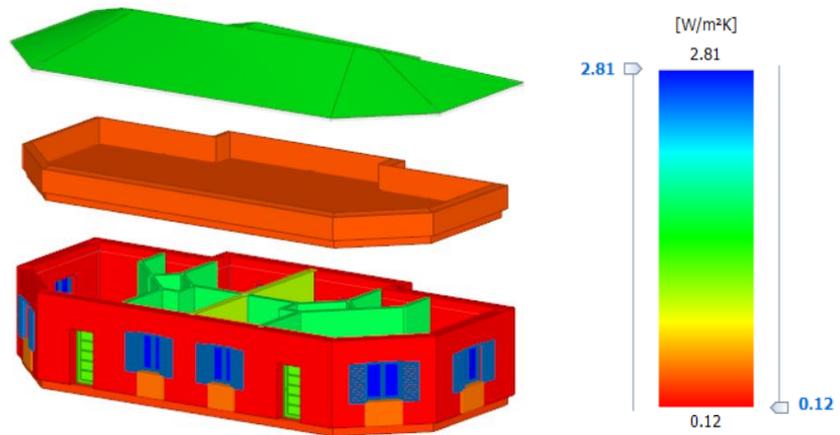


Figura 4.30 Progressione cromatica delle conduttanze del materiale lana di roccia 30 cm.

Lana Di Roccia 8 cm

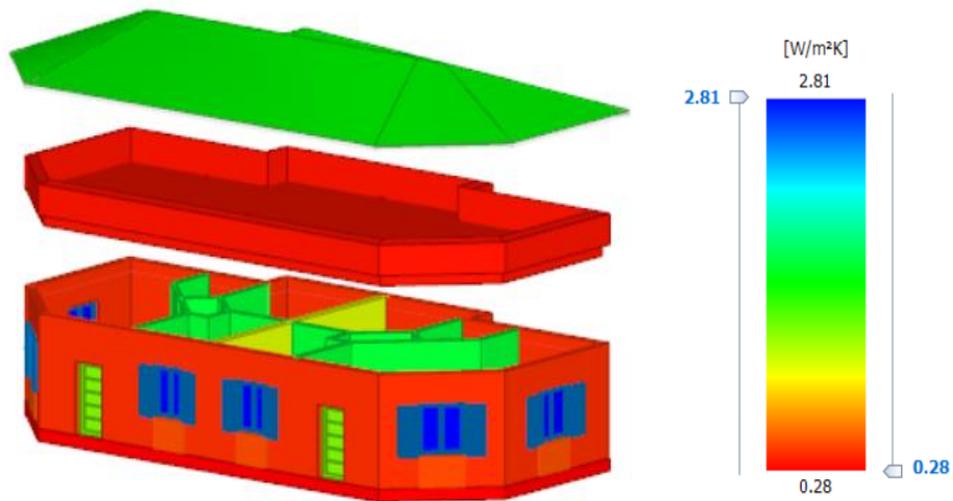


Figura 4.31 Progressione cromatica delle conduttanze del materiale lana di roccia 8 cm.

## EPS (Expanded Sintered Polystyrene)

EPS 30 cm

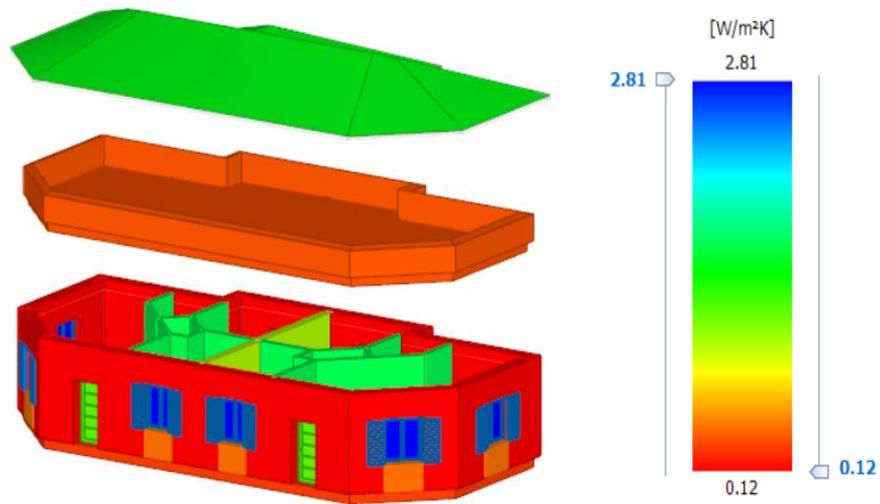


Figura 4.32 Progressione cromatica delle conduttanze del materiale EPS 30 cm.

EPS 8 cm

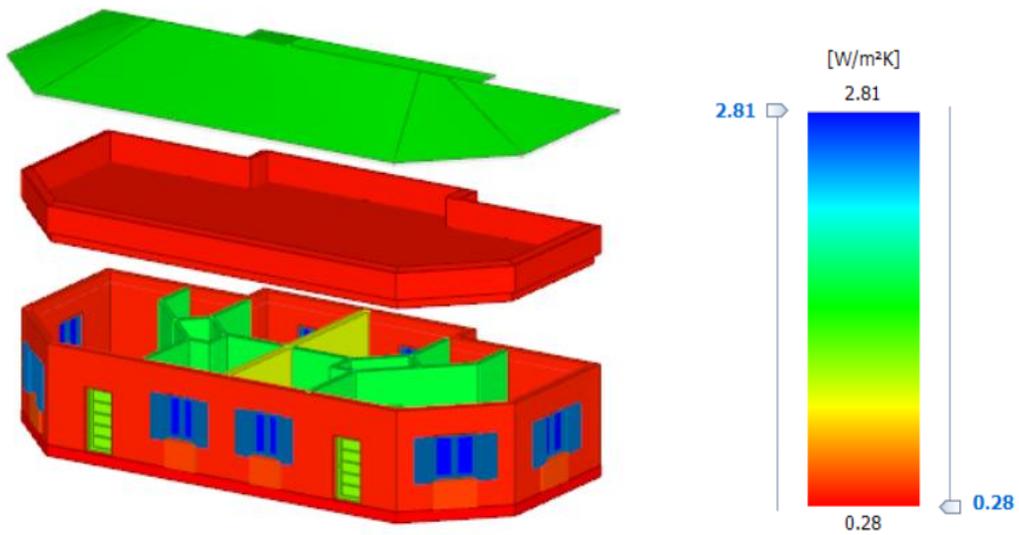


Figura 4.33 Progressione cromatica delle conduttanze del materiale EPS 8 cm.

Dall'analisi delle figure emerge che, ad eccezione del Resil MAC W™, per gli altri materiali esaminati le conduttanze aumentano nel piano di sottotetto, indicando un notevole passaggio di calore attraverso le pareti esterne. Al contrario, nel caso delle pareti isolate con Resil MAC W™, le conduttanze minime risultano inferiori, anche rispetto ai materiali tradizionali, pari a 0.19 W/m<sup>2</sup>K rispetto ai materiali in uso sui 0.12 W/m<sup>2</sup>K a parimenti spessore. Questo genera un miglioramento dell'isolamento termico nel sottotetto. Tuttavia, nonostante questi risultati favorevoli, i materiali studiati non possono competere con i materiali isolanti convenzionali, sotto il profilo meramente termico, poiché per ottenere prestazioni simili in termini di isolamento invernale è necessario impiegare uno spessore tre volte superiore.

#### 4.4.4 Analisi dei Risultati

Il confronto tra i risultati delle verifiche termotecniche ha rivelato significative differenze in termini di isolamento termico.

I risultati hanno messo in evidenza che, nella villetta bifamiliare situata nel Comune di Palermo, l'uso di materiali isolanti innovativi richiederebbe spessori significativamente elevati, dell'ordine di 30 cm, per raggiungere la classe energetica A4, e spessori ancora superiori in zone climatiche di tipo C, D, E e F.

In particolare, il Resil MAC W<sup>TM</sup>, confrontandolo con i materiali tradizionali, ha dimostrato una modesta conducibilità termica e una buona capacità isolante, contribuendo a un'elevata efficienza energetica.

	FIRMA ENERGETICA			
	riscaldamento		raffrescamento	
	Temperatura	kW	Temperatura	kW
<b>CANAPA-WAVE<sup>TM</sup></b>	11°	0.6	27°	0.73
<b>EUROTECK<sup>TM</sup></b>	11°	0.6	27°	0.74
<b>JKI<sup>TM</sup></b>	11°	0.6	27°	0.74
<b>RESIL MAC W<sup>TM</sup></b>	11°	0.54	27°	0.73
<b>LANA DI ROCCIA</b>	11°	0.49	27°	0.74
<b>EPS</b>	11°	0.48	27°	0.73
<b>LANA DI ROCCIA 8 CM</b>	11°	0.63	27°	0.73
<b>EPS 8 CM</b>	11°	0.62	27°	0.72

Tabella 4.20 Firma energetica dei materiali.

Nella firma energetica, sono state adottate temperature esterne di riferimento di 11°C e 27°C per valutare la potenza necessaria a riscaldare e raffrescare la villetta bifamiliare. Analizzando i risultati, si osserva che, per quanto riguarda il riscaldamento invernale, la potenza richiesta in kW è pressoché identica per tutti e quattro i materiali esaminati. Tuttavia, per i materiali tradizionali come la Lana di Roccia e l'EPS, notiamo che essi contribuiscono a un isolamento termico superiore; pertanto, il generatore necessiterà di meno potenza per riscaldare gli ambienti, raggiungendo valori intorno a 0,6 kW con spessori circa tre volte inferiori.

Per quanto riguarda il raffrescamento estivo, i valori di potenza richiesta, considerando una temperatura di riferimento di 27°C, sono pressoché equivalenti per tutti i materiali utilizzati. Questo indica che la tipologia degli impianti installati gioca un ruolo cruciale nell'efficienza del raffrescamento.

## Chapter 5 – Conclusioni

La ricerca di una maggior sostenibilità nelle costruzioni civili si sta rivelando via via più necessaria a causa della sempre maggiore consapevolezza umana del proprio impatto sull'ambiente e delle condizioni critiche in cui esso versa.

Il tentativo, dunque, di porre rimedio alla sventatezza delle generazioni precedenti grava sulle generazioni future e sugli organi istituzionali che detengono ad oggi il potere regolamentare nei vari settori.

Tra questi, come precedentemente analizzato, svolge un ruolo di primo piano nel settore edile e civile l'Unione Europea che incentiva, da un lato, ricerche e studi tesi a sviluppare nuovi materiali ecosostenibili e, dall'altro, promulgando norme che stabiliscono, mediante parametri e valori, i requisiti minimi che devono essere soddisfatti nelle nuove costruzioni per evitare il reiterarsi delle erronee scelte passate.

L'elemento cardine che ha guidato questo elaborato è, dunque, stato la ricerca della sostenibilità ambientale nell'edilizia e con questo obiettivo ci si è soffermati su tutta la catena di produzione di questo settore, a partire dallo sviluppo dei materiali attualmente usati.

La sostenibilità, infatti, non riguarda solo la quantità di emissioni di un edificio nell'arco della sua vita utile, ad oggi ampiamente regolarizzata, ma anche e soprattutto la produzione dei materiali utilizzati per gli edifici ed il loro successivo smaltimento, territorio ancora poco regolamentato e improntato a soluzioni che presentano tanto un basso costo economico quanto un alto costo ambientale.

Con questa intenzione si è cercato di trovare un sostituto per i diffusissimi pannelli di EPS, che essendo derivati del petrolio hanno un impatto ambientale non trascurabile sia in fase di produzione sia in fase di smaltimento.

A tal fine sono stati selezionati, con la collaborazione di un'azienda piemontese di ultratrentennale esperienza nel campo dei tessuti non tessuti in fibre vegetali, quattro materiali di originale naturale e su questi sono state eseguite caratterizzazioni chimico fisiche, meccaniche, termiche e acustiche per valutarne le potenziali applicazioni.

In primo luogo, è doveroso trarre le dovute conclusioni riguardo la caratterizzazione termica, aspetto al quale sono stati dedicati il maggior numero di prove sperimentali e risorse.

Le due caratteristiche termiche più indicative ai fini dell'analisi svolta sono la conducibilità ed il calore specifico.

Per quanto riguarda la prima l'unico materiale che ha restituito delle prestazioni termiche accettabili è stato il Resil MAC W<sup>TM</sup>, con dei valori pari a 0.06 W/m<sup>2</sup>K contro i valori dei materiali attualmente in uso pari a 0.035-0.04 W/m<sup>2</sup>K. La diminuzione di prestazioni unita al maggior costo di produzione di questi materiali però rendono attualmente sconveniente e inattuabile la sostituzione. Gli altri materiali hanno invece restituito valori fuori mercato pari a 0.1 W/m<sup>2</sup>K.

Anche per la seconda i risultati sono stati per lo più poco interessanti, sull'ordine dei 800-1000 J/kgK, ad eccezione fatta per l'Euroteck™ che ha restituito un valore di 2484 J/kgK rivelando di possedere un calore specifico elevato, direttamente proporzionale allo sfasamento, caratteristiche che lo rendono potenzialmente adatto per l'isolamento termico estivo.

Infine, i valori di conducibilità termica, densità e calore specifico di ogni materiale sono stati inseriti nel modello BIM, sviluppato per valutare l'applicabilità dei materiali in ambito edilizio, a partire da uno spessore pari a 8 cm, dei materiali ad oggi utilizzati. Questo spessore è stato successivamente aumentato fino a soddisfare i requisiti minimi previsti dalla norma.

Per quanto riguarda i materiali Euroteck™, JKI™, Resil MAC W™ e Canapa-Wave™ lo spessore necessario affinché venisse verificata l'analisi è risultato pari a 30 cm. Ne segue che, per l'isolamento termico invernale questi tre materiali non forniscono un valido sostituto rispetto a quelli attualmente in uso, EPS e lana di roccia che richiedono uno spessore di soli 8 cm per verificare l'analisi, né a livello di economicità né tantomeno a livello di praticità.

Concludendo, sulla base dei risultati esaminati, risulta poco conveniente approfondire i materiali JKI Canapa-Wave™, Euroteck™ e Resil MAC W™ per quanto riguarda sia l'isolamento termico estivo sia quello invernale.

Dato l'elevato calore specifico dell'ultimo materiale, Euroteck™, si ritiene interessante provare ad accoppiarlo con una fibra che presenti bassi valori di conducibilità in modo da combinare al meglio le prestazioni termiche dei due materiali e ottenere un isolamento termico ottimale sia in ambienti caldi sia freddi.

Dal punto di vista acustico, invece, la prova sperimentale ha restituito dei valori particolarmente interessanti per i materiali JKI™ e Resil MAC W™. Entrambi hanno presentato un'ottima predisposizione all'assorbimento acustico, con un coefficiente di assorbimento  $\alpha$  prossimo al 90% risultando competitivi rispetto ai materiali attualmente in uso.

A questo proposito si ritiene che lo sviluppo più conveniente consista nel sapere ulteriori analisi al fine di completare la caratterizzazione acustica di questi materiali secondo le norme attualmente vigenti.

In conclusione, i risultati delle varie prove sperimentali effettuate hanno rivelato interessanti aspetti di queste fibre, hanno restituito valori fondamentali per una successiva selezione più consapevole e mirata dei materiali stessi a seconda della destinazione d'uso e soprattutto hanno posto le basi per una ricerca di reale sostenibilità ambientale in questo vasto settore.

## Chapter 6 – Bibliografia e Sitografia

### Bibliografia

1. **E. E. Agency**, Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016, EU publications, 2017.
2. **L. n. 1. d. 9. g. 1991**, Norme per l'attuazione del Piano energetico nazionale in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio, Gazzetta Ufficiale , 1991.
3. **W. C. R. R. A. Boriani**, Guida Pratica alla ristrutturazione e riqualificazione energetica degli edifici, Agenzia Nazionale Efficienza Energetica - ENEA, 2020.
4. **G. Fracastoro**, «Fisica tecnica ambientale, Dispense di Fisica Tecnica,» Otto Editore, Torino, 2003.
5. **UNI EN ISO 6946:2018** “Componenti ed elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica – Metodi di calcolo”.
6. **D.M. 26 giugno 2015** LINEE GUIDA APE "Linee guida nazionali per l'attestazione energetica degli edifici".
7. **D. P. d. R. 4. d. 26/8/1993**, Regolamento recante norme per la progettazione, l'installazione, l'esercizio e la manutenzione degli impianti termici degli edifici ai fini del contenimento dei consumi di energia, in attenuazione dell'Art.4, comma 4, della L. 9 gennaio 1991, n. 10, 1993.
8. **UNI EN ISO 6946:2018** “Componenti ed elementi per edilizia – Resistenza termica e trasmittanza termica – Metodi di calcolo”.
9. **I. m. d. s. economico**, «D.M. Requisiti Minimi del 26/06/2015,» 2015.
10. **Decreto. 26 giugno 2015**. "Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici".
11. **UNI EN 10211:2008** “Ponti termici in Edilizia – Flussi termici e temperature superficiali – Calcoli dettagliati”, 2008.
12. **UNI TS 11300-1:2014** “Prestazioni energetiche degli edifici – Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell’edificio per la climatizzazione estiva ed invernale”, 2014.
13. **UNI 10349-1:2016** “Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici", 2016.
14. **UNI EN UNI 12831-1:2018** “Prestazione energetica degli edifici - Metodo per il calcolo del carico termico di progetto - Parte 1: Carico termico per il riscaldamento degli ambienti”, 2018.
15. **UNI EN ISO 10349-1:2016** “Riscaldamento e raffrescamento degli edifici – Dati climatici", 2016.

16. **D. P. d. Repubblica**, Regolamento di esecuzione alla Legge 30 aprile 1976 n. 373, relativa al consumo energetico per usi termici negli edifici, 28 Giugno 1977 n. 1052.
17. **Decreto Legislativo 19 agosto 2005**, n. 192 "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia".
18. **D.Lgs. 29 dicembre 2006 n. 311**. Disposizioni correttive e integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192.
19. **Decreto . 26 giugno 2015**. "Adeguamento del decreto del Ministro dello sviluppo economico, 26 giugno 2009 - Linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici".
20. **Decreto. 26 giugno 2015**. "Schemi e modalità di riferimento per la compilazione della relazione tecnica di progetto ai fini dell'applicazione delle prescrizioni e dei requisiti minimi di prestazione energetica negli edifici".
21. **ANIT** Associazione nazionale per l'Isolamento Termico e Acustico. "Dal lambda dichiarato al lambda di progetto", ANIT, 2015.
22. **UNI EN ISO 16536:2019** "Isolanti termici in edilizia – Determinazione dell'assorbimento d'acqua per diffusione su lungo periodo", 2019.
23. **UNI EN 12091:2013** "Isolanti termici per edilizia – Determinazione della resistenza a gelo-disgelo", 2013.
24. **ANIT**, XPS- Polistirene Espanso Estruso Manuale ANIT di approfondimento tecnico, ANIT, 2017.
25. **ANIT**, «XPS - Polistirene Espanso Estruso - "MANUALE ANIT DI APPROFONDIMENTO TECNICO",» 2017.
26. **UNNI TS 11300** "Prestazioni energetiche degli edifici" 2019.
27. **ANIT**, «Potere fonoisolante apparente - R'w - Estratto da <https://www.anit.it/potere-fonoisolante-apparente-rw/> - [Consultato il 29/07/2022]».
28. **UNI EN 826:2013** "Isolanti termici per edilizia – Determinazione del comportamento a compressione".
29. **UNI EN 10211:2008** "Ponti termici in Edilizia – Flussi termici e temperature superficiali – Calcoli dettagliati", 2008.
30. **V. Lattanzi**, LA VERIFICA TERMOIGROMETRICA "Valutazione del rischio di formazione di muffe sulla superficie interna dell'involucro edilizio con esempio applicativo", Roma: Legislazione Tecnica S.r.l., 2016.

## Sitografia

31. **ISSMC CNR.** (n.d.). *Laboratorio di proprietà meccaniche e tribologiche - Zwick Roell Z050*. Retrieved from <https://www.issmc.cnr.it/ricerca/risorse/laboratorio-di-proprietà-meccaniche-e-tribologiche/zwick-roell-z050>
32. **Liceo Cuneo.** (n.d.). *Bilancia idrostatica*. Retrieved from [https://liceocuneo.it/lsf/fluidi/bilancia-idrostatica/#:~:La%20bilancia%20idrostatica%20%C3%A8%20un,volume\)%20di%20solidi%20e%20liquidi%20di%20solidi%20e%20liquidi%20di%20solidi%20e%20liquidi%20di%20solidi%20e%20liquidi%20di%20solidi%20e%20liquidi](https://liceocuneo.it/lsf/fluidi/bilancia-idrostatica/#:~:La%20bilancia%20idrostatica%20%C3%A8%20un,volume)%20di%20solidi%20e%20liquidi%20di%20solidi%20e%20liquidi%20di%20solidi%20e%20liquidi%20di%20solidi%20e%20liquidi)
33. **Museo di Fisica, Università di Roma La Sapienza.** (n.d.). *Tube di Kundt*. Retrieved from <https://web.uniroma1.it/museofisica/tubo-di-kundt>
34. **Orton Ceramic.** (n.d.). *Hot disk TPS*. Retrieved from <https://www.ortonceramic.com/copy-of-hotdisk-tps>
35. **Parlamento Europeo.** (n.d.). *Politica ambientale: principi generali e quadro di riferimento*. Retrieved from <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/it/sheet/71/politica-ambientale-principi-general-e-quadro-di-riferimento>
36. **Università di Napoli.** (n.d.). *Politica UE*. Retrieved from <http://wpage.unina.it/cicia/PoliticaUE.pdf>
37. **Wikipedia.** (n.d.). *Trasmittanza termica*. Retrieved from [https://it.wikipedia.org/wiki/Trasmittanza\\_termica](https://it.wikipedia.org/wiki/Trasmittanza_termica)
38. **ZwickRoell.** (n.d.). *Macchine per prove di trazione usate Z010, Z020, Z050, Z100*. Retrieved from <https://www.zwickroell.com/it/prodotti/macchine-usate/macchine-per-prove-di-trazione-usate-z010-z020-z050-z100/>
39. *A review of the Hot Disk method.* (2016). Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169409X16301028>
40. **J-Tech Polito.** (n.d.). *CT scan*. Retrieved from [https://www.j-tech.polito.it/facilities/technical\\_data/ct\\_scan](https://www.j-tech.polito.it/facilities/technical_data/ct_scan)
41. **Casnedi, M.** (2015). *Tesi di Laurea*. Università degli Studi di Cagliari. Retrieved from [https://iris.unica.it/retrieve/e2f56ed8-00c1-3eaf-e053-3a05fe0a5d97/Tesi\\_Casnedi.pdf](https://iris.unica.it/retrieve/e2f56ed8-00c1-3eaf-e053-3a05fe0a5d97/Tesi_Casnedi.pdf)
42. **J-Tech Polito.** (n.d.). *Universal Testing Machine*. Retrieved from [https://www.j-tech.polito.it/facilities/technical\\_data/universal\\_testing\\_machine](https://www.j-tech.polito.it/facilities/technical_data/universal_testing_machine)
43. **J-Tech Polito.** (n.d.). *CT scan*. Retrieved from [https://www.j-tech.polito.it/facilities/technical\\_data/ct\\_scan](https://www.j-tech.polito.it/facilities/technical_data/ct_scan)
44. **Ministero delle Imprese e del Made in Italy.** (2015). *Decreto interministeriale 26 giugno 2015*. Retrieved from <https://www.mimit.gov.it/index.php/it/normativa/decreti-interministeriali/decreto-interministeriale-26-giugno-2015-applicazione-delle-metodologie-di-calcolo-delle-prestazioni-energetiche-e-definizione-delle-prescrizioni-e-dei-requisiti-minimi-degli-edifici>

45. **TeamSystem.** (2024). *Decreto Requisiti Minimi 2024: quando entra in vigore e a chi interessa?* Retrieved from <https://www.teamsystem.com/magazine/construction/decreto-requisiti-minimi-2024-quando-entra-in-vigore-e-a-chi-interessa/>
46. **Gallo, P.** (2013). *Sistemi costruttivi e prodotti: una risposta alle normative per l'efficienza energetica.* Retrieved from [https://flore.unifi.it/bitstream/2158/822793/1/PS%2032\\_Gallo.pdf](https://flore.unifi.it/bitstream/2158/822793/1/PS%2032_Gallo.pdf)
47. **Confindustria Firenze.** (2024). *Efficienza Energetica: la Raccomandazione della Commissione Europea.* Retrieved from <https://www.confindustriafirenze.it/efficienza-energetica-la-raccomandazione-della-commissione-europea/>
48. **Crimi, J., & Tavoni, M.** (2014). *Agire per far fronte alla sfida del clima.* Retrieved from <https://www.rivisteweb.it/doi/10.1406/78602>
49. **Cellai, G., Secchi, S., Carletti, C., Raffellini, G., & Scurpi, F.** (2004). *Materiali isolanti ecosostenibili a prestazioni termo-acustiche.* Retrieved from <https://flore.unifi.it/handle/2158/10184>
50. **Brunoro, S.** (2008). *I materiali plastici in edilizia. Efficienza energetica, soluzioni architettoniche, tecniche e costruttive.* Retrieved from <https://sfera.unife.it/handle/11392/1435923>
51. **Oberti, I.** (2004). *Materiali isolanti e fibre in edilizia.* Retrieved from <https://re.public.polimi.it/handle/11311/261001>