

I perché di un'indagine sperimentale

Temperatura e acqua: fattori di rischio per un isolamento efficiente

Commissione Tecnica ANPE

L'isolamento termico delle strutture opache è riconosciuto come uno degli interventi di efficientamento energetico che offre il miglior rapporto tra costo e benefici. Questo grazie soprattutto alla durata della sua efficacia, stimata dalle analisi in 30 anni, ma che per molte applicazioni, e per alcune tipologie di materiali, può considerarsi di gran lunga superiore - 50 anni e oltre - tanto da coincidere con la vita utile degli edifici stessi.

Per sfruttare appieno le potenzialità degli interventi di isolamento termico è necessario che le fasi di progettazione e, ancora di più, quelle di realizzazione valutino sia le peculiarità dell'edificio (morfologia, orientamento, condizioni climatiche, destinazione d'uso, ecc.) e sia le caratteristiche fisiche e prestazionali dei materiali in relazione alle loro condizioni di impiego.

Per tutti i materiali isolanti marcati CE le norme armonizzate prevedono l'indicazione, in etichetta e nella DoP (Dichiarazione di Prestazione), della conducibilità termica dichiarata (λ_D), rappresentativa del 90% della produzione con il 90% di confidenza statistica, valutata alla temperatura di 10 °C e con Umidità Relativa pari al 50%. Sono presupposti rappresentativi delle normali condizioni di esercizio, soprattutto invernali (0°C esterno, 20°C interno), dei materiali isolanti utilizzati in edilizia, ma che potrebbero - in casi

Ecobonus: costo efficacia per comma (€/kWh) media anni 2014-2022 cfr. ENEA - Rapporto Annuale 2023 "Le detrazioni fiscali per l'efficienza energetica e l'utilizzo delle fonti rinnovabili di energia negli edifici esistenti"		
Intervento	Vita utile	€/kWh
Condomini	30	0,13
Comma 344 - Riqualficazione globale	30	0,11
Comma 345a - Coibentazione involucro	30	0,08
Comma 345b - Sostituzione serramenti	30	0,12
Comma 345c - Schermature solari	10	1,38
Comma 346 - Pannelli solari per ACS	15	0,09
Comma 347 - Climatizzazione invernale	15	0,16
Building automation	10	0,35

abbastanza rari - non corrispondere a delle specifiche esigenze progettuali.

Per adeguare il valore di λ_D a condizioni termoigrometriche che si discostano in modo significativo dall'ipotesi normativa, i progettisti possono utilizzare i fattori correttivi indicati, per i materiali isolanti di comune impiego, dalla norma ISO EN UNI 10456. La norma, per cui è stato da poco avviato il processo di revisione, specifica i metodi per determinare la conducibilità termica con temperature ambiente di progetto comprese tra -30°C e +60°C e temperature medie tra 0°C e 30°C e con contenuti di umidità espressi in kg/kg o in m³/m³.

Se, per valutare le prestazioni dei materiali isolanti in diverse condizioni di esercizio e in diverse situazioni di migrazione del vapore, la progettazione può contare su un robusto supporto normativo (Metodo stazionario con il Modello di Glaser - UNI EN

ISO 13788 o Analisi igrotermica dinamica - UNI EN 15026), pochi dati sono disponibili per valutare il comportamento dei materiali isolanti nel caso, che non dovrebbe mai verificarsi, di un loro contatto prolungato con l'acqua.

Tutti i materiali isolanti (con poche e ben individuate eccezioni) sono infatti progettati e valutati per essere utilizzati in ambienti asciutti.

Quando l'acqua c'è

Nella realtà dei cantieri, e a volte anche nelle condizioni d'uso degli edifici, l'acqua può essere presente per cause diverse:

- elementi di copertura o manti impermeabili danneggiati possono favorire l'ingresso di acqua piovana.
- pareti che presentano fessure o crepe consentono la penetrazione di acqua
- perdite da tubature o guasti agli scarichi
- umidità di risalita



Nelle immagini alcuni casi di probabili danni da acqua.

Il soffitto marcio di una casetta SAE, destinata ai terremotati delle Marche, dove pare che, per ragioni di urgenza, fosse stata installata lana di roccia stoccata all'aperto e già impregnata d'acqua.

Uno dei - purtroppo frequenti - crolli di controsoffitti di piscine. Nell'immagine quello della piscina di Asti, avvenuto fortunatamente ad impianto chiuso.

Infiltrazioni d'acqua e rigonfiamenti in corrispondenza di fessurazioni di un sistema a cappotto



- difetti estetici con macchie di umidità, efflorescenze saline, distacchi dell'intonaco
- possibili danni agli impianti elettrici che comportano il rischio di pericolosi corto circuiti.

Perché una campagna di misure

Proprio la scarsità di dati di letteratura sul comportamento dei materiali isolanti in condizioni estreme per temperature o presenza di acqua ha motivato l'affidamento, al Laboratorio di Fisica Tecnica Ambientale dello IUAV di Venezia, di una campagna di misure su alcune tipologie di materiali isolanti di comune impiego soprattutto nelle applicazioni a cappotto.

Questa applicazione è stata selezionata non solo per la sua grande rilevanza nelle opere di efficientamento energetico del patrimonio edilizio esistente, ma anche per le condizioni di esercizio particolarmente severe a cui sono sottoposti i materiali isolanti.



- condensazione interstiziale
- acqua o umidità da costruzione che rimane all'interno di materiali come malte, intonaci o calcestruzzo e che non viene eliminata con corretti tempi o procedure di asciugatura

È importante ricordare che la presenza di acqua nelle strutture edilizie non solo compromette le prestazioni dello strato isolante, con conseguente aumento dei consumi energetici per riscaldamento e raffrescamento, ma può determinare anche seri danni di difficile e costosa riparazione. Tra i più rilevanti:

- i danni strutturali che possono causare crepe nelle murature, marciume delle strutture lignee, danni alle fondamenta
- la formazione di muffe e funghi che possono determinare un rischio per la salute causando allergie e problemi respiratori

Va sottolineato peraltro che proprio le applicazioni a cappotto, grazie all'intensa attività del Consorzio Cortexa, sono tra quelle che godono di un più dettagliato supporto normativo che regola sia la parte progettuale (UNI/TR 11715:2018 "Progettazione e posa in opera di sistemi di isolamento termico a cappotto") che quella applicativa (norma UNI 11716:2018 "Attività professionali non regolamentate – Figure professionali che eseguono la posa dei sistemi compositi di isolamento termico per esterno (ETICS) – Requisiti di conoscenza, abilità e competenza") e che molti sistemi a cappotto forniti come kit sono dotati di marcatura volontaria CE assegnata sulla base del Benessere Tecnico Europeo, EAD (EAD 040083-00-0404).

Gli strumenti e le indicazioni per evitare difetti e danni sono quindi disponibili e liberamente accessibili tramite il sito del Consorzio Cortexa che mette a disposizione sia il Manuale del Sistema a Cappotto e sia strumenti di formazione per progettisti e applicatori.

Isolanti diversi, diversi comportamenti

La campagna di misure realizzata ha coinvolto solo alcune tipologie di materiali isolanti e si è limitata ad un numero esiguo di campioni che non può considerarsi rappresentativo del mercato.

I dati raccolti, sia pure parziali, descrivono bene, e quantitativamente, il comportamento, prevedibile e ampiamente riscontrato nella realtà applicativa, dei materiali isolanti a contatto con l'acqua in funzione della loro natura fibrosa o cellulare.

Alcuni dati riportati nella ricerca appaiono particolarmente critici per l'importante aumento di massa di alcuni materiali sottoposti a immersione totale di lungo

periodo e dovrebbero essere attentamente valutati in fase progettuale per il corretto dimensionamento di elementi di sostegno o fissaggio.

Come note positive, oltre all'ottimo comportamento all'acqua dei poliuretani, è importante evidenziare come tutti i materiali isolanti, quando asciugati in stufa - intervento difficilmente realizzabile in cantiere - ritornino ai valori di massa e di conducibilità termica iniziali. Questo testimonia sia la validità e la durabilità degli interventi di isolamento termico e sia la necessità di un'attenta realizzazione e manutenzione che non ne comprometta l'efficacia.

Alcuni spunti di riflessione...

NORMATORI		<ul style="list-style-type: none"> aggiornamento della norma UNI EN ISO 10456 con disponibilità di dati sperimentali, aggiornati e statisticamente rappresentativi, sul comportamento dei materiali a diverse condizioni di temperatura, umidità relativa e contenuto d'acqua obbligo per tutti i materiali isolanti di dichiarare l'assorbimento d'acqua per immersione parziale e totale nel breve e nel lungo periodo
PROGETTISTI		<ul style="list-style-type: none"> all'aumentare della temperatura tutti i materiali isolanti subiscono un aumento della conducibilità termica. Durante l'estate la temperatura esterna di una parete, e di conseguenza, nelle applicazioni a cappotto, dell'estradosso del materiale isolante, può raggiungere i 60-80° C in funzione della zona climatica e del colore della parete. Sarebbe opportuno considerare questo aspetto nella valutazione dello spessore necessario ad ottenere il valore di trasmittanza atteso anche durante la stagione estiva. Il maggiore spessore necessario a garantire un adeguato isolamento termico estivo contribuirà a ridurre ulteriormente i consumi energetici per il riscaldamento invernale qualora l'applicazione prevista possa comportare il rischio di presenza di acqua, selezionare attentamente il materiale isolante privilegiando l'impiego di quelli meno soggetti ad assorbimento effettuare un'attenta valutazione del comportamento termoigrometrico della struttura per scongiurare il rischio di condense interstiziali
APPLICATORI		<ul style="list-style-type: none"> rispettare scrupolosamente le indicazioni relative ai tempi di asciugatura di strati che richiedono l'impiego di acqua evitando che questa possa rimanere a contatto del materiale isolante. Secondo le stime i tempi di asciugatura di un massetto cementizio sono di circa 7-10 giorni per centimetro di spessore. Per il software WUFY, uno dei più utilizzati per l'analisi termoigrometrica dinamica, un materiale che abbia assorbito acqua all'interno di una struttura edilizia può impiegare anni prima di raggiungere la completa asciugatura. stoccare i materiali isolanti in ambienti coperti e asciutti in caso di pioggia improvvisa durante le fasi di posa proteggere il materiale isolante con teli impermeabili qualora non fosse possibile proteggere dall'acqua piovana il materiale isolante applicato attendere la sua completa asciugatura prima di posare strati successivi che potrebbero ostacolare l'evaporazione.
PRODUTTORI		<ul style="list-style-type: none"> verificare che l'imballo del materiale isolante offra una protezione adeguata alla pioggia se possibile, utilizzare per il trasporto mezzi dotati di teloni protettivi evidenziare nella documentazione tecnica e nelle istruzioni di posa la necessità di proteggere dall'acqua il materiale isolante

Campagna di misure

Determinazione della resistenza termica di alcuni materiali isolanti per l'edilizia in differenti condizioni di temperatura e contenuto di acqua

IUAV - Dipartimento di culture del progetto - Direttore del Dipartimento Prof. Piercarlo Romgnoni
Laboratorio di Fisica Tecnica Ambientale - FisTec - Direttore tecnico Prof. Fabio Peron

Introduzione

Scopo della campagna di misure oggetto del presente rapporto di prova è quello di analizzare il comportamento termico di diversi materiali isolanti termici a partire dalla misura della loro conducibilità al variare della temperatura e con diversi contenuti di acqua. La conducibilità è stata misurata utilizzando una doppia piastra con anello di guardia in dotazione al Laboratorio di Fisica Tecnica Ambientale dell'Università IUAV di Venezia. Come spiegato meglio nel seguito i campioni sono stati caratterizzati alle temperature medie pari a 10°C, 20°C, 30°C, 40°C. Sono stati caratterizzati anche in tre diverse condizioni rispetto al contenuto di acqua:

- campione condizionato a temperatura di 23 °C e umidità relativa del 50%;
- campione umido dopo essere stato immerso parzialmente in acqua secondo quanto proposto da EN 29767 (24 ore a contatto con l'acqua e sgocciolato per 10 minuti);
- campione umido dopo essere stato immerso totalmente in acqua secondo quanto proposto da EN 16535 (28 giorni immerso in acqua e sgocciolato per 10 minuti).

I campioni dopo immersione e sgocciolatura sono stati inseriti in un involucro a tenuta e caratterizzati utilizzando la doppia piastra. I campioni caratterizzati

in stato umido sono stati successivamente asciugati a 60°C fino a costanza di massa e caratterizzati ancora una volta in termini di conducibilità.

Caratteristiche dei campioni esaminati

Si è concentrata l'attenzione sui materiali isolanti presenti sul mercato maggiormente utilizzati nelle applicazioni in sistemi a cappotto (ETICS). Sono i seguenti:

1. Polistirene espanso, EPS;
2. Poliuretano espanso, PU;
3. Resina fenolica espansa, PF;
4. Fibra di legno, WF;
5. Lana minerale, MW.

Sono stati reperiti sul mercato alcuni campioni rappresentativi delle diverse tipologie scelte. A lato le foto dei diversi provini prima di sottoporli a test così come ricevuti. Tutti i campioni utilizzati avevano uno spessore pari a 10 cm.

Caratteristiche apparecchiatura di prova

La determinazione della conducibilità termica è stata effettuata grazie a una doppia piastra con anello di guardia secondo quanto previsto dalla norma EN 12667. Nel seguito sono riportate le principali caratteristiche dell'apparecchiatura Taurus TPL 800 S in dotazione al Laboratorio di Fisica Tecnica di Università IUAV.



EPS



PF



PU



WF



MW

Intervallo di misura	
spessore [m]	0,02-0,15
conducibilità [W/ (m·K)]	0,01-0,50
temperatura [°C]	0-60
Dimensioni zona di misura	
larghezza [m]	0,50
lunghezza [m]	0,50
Sensori di temperatura	
termocoppie di tipo T	

Configurazione prova	
configurazione provino:	singolo
disposizione apparato:	orizzontale
posizione piastra calda:	superiore

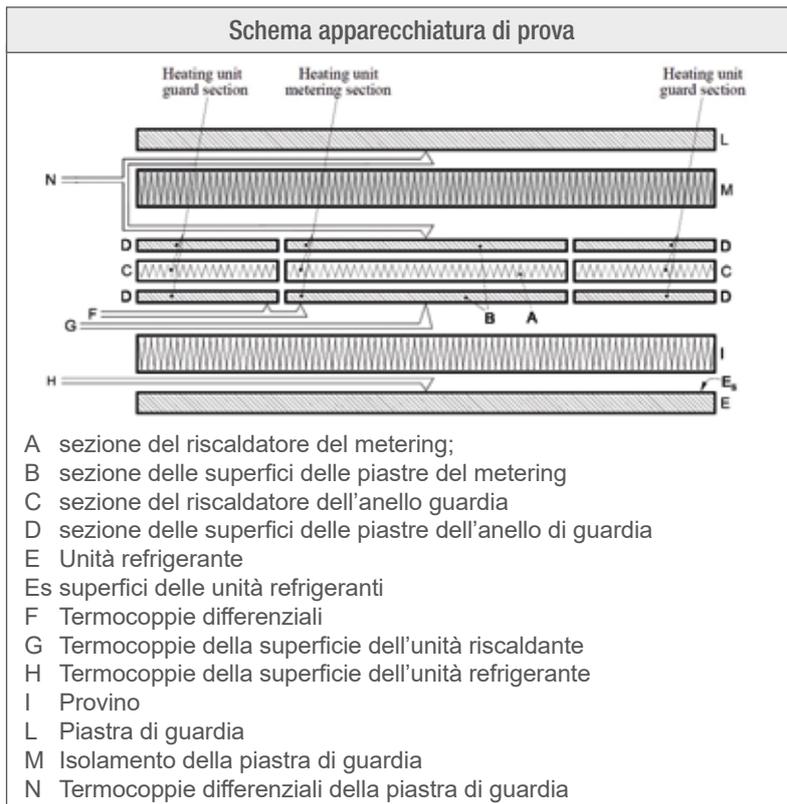


Foto dell'apparecchiatura di prova e di un provino inserito nel vano di misura.



Conducibilità dei provini condizionati

In prima battuta per ogni tipo di materiale 3 provini sono stati caratterizzati dopo condizionamento per 15 giorni in un ambiente alla temperatura di 23 ± 2 °C e alla umidità relativa pari $50 \pm 10\%$. Queste condizioni sono rappresentative essenzialmente di quelle del materiale secco in equilibrio con un possibile ambiente di utilizzo. In tabella 1 sono riportati i risultati delle misure con una temperatura media del campione pari a 10°C, 20°C, 30°C, 40°C.

Tabella 1.

**Valori di conducibilità termica [W/(m K)]
dopo condizionamento a temperatura di 23°C
e umidità relativa pari a 50%.**

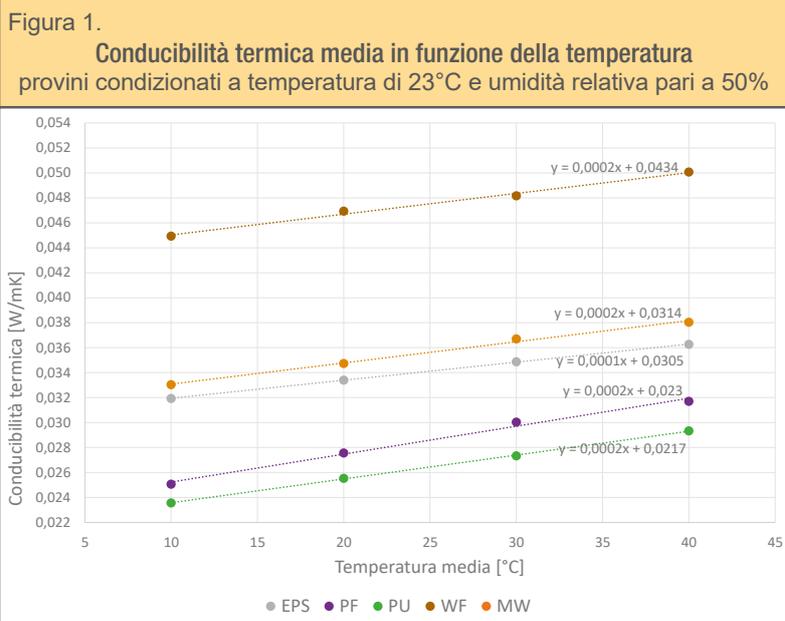
Temperatura media	10°C	20°C	30°C	40°C
EPS media 3 provini	0,0319	0,0334	0,0349	0,0363
PF media 3 provini	0,0251	0,0276	0,0300	0,0317
PU media 3 provini	0,0236	0,0255	0,0273	0,0293
WF media 3 provini	0,0449	0,0469	0,0482	0,0501
MW media 3 provini	0,0330	0,0347	0,0367	0,0380

Tabella 2.

Equazioni delle rette temperatura-conducibilità termica

EPS	$Y = 0,0001x + 0,0305$
PF	$Y = 0,0002x + 0,0230$
PU	$Y = 0,0002x + 0,0217$
WF	$Y = 0,0002x + 0,0434$
MW	$Y = 0,0002x + 0,0314$

Tutti i materiali presentano una correlazione lineare tra conducibilità termica e temperatura. L'inclinazione della retta che rappresenta la correlazione è pari a 0,0001 W/(m K) per °C per il polistirene espanso, mentre per gli altri materiali risulta pari a 0,0002 W/(m K) per °C. Si può concludere che l'andamento è omogeneo nel gruppo di materiali isolanti analizzati. In figura 1 sono riportati i dati e le rette interpolatrici.



Conducibilità dei provini dopo assorbimento per immersione parziale di breve periodo

I provini sono stati immersi in acqua per 1 cm per 24 ore utilizzando l'apparato descritto nelle foto. Sono stati successivamente sgocciolati per 10 minuti e chiusi in un involucro di polietilene per evitare l'evaporazione dell'acqua. L'assorbimento di acqua porta un aumento della conducibilità per tutti i materiali: contenuto per PU e EPS elevato per WF, MW e PF.

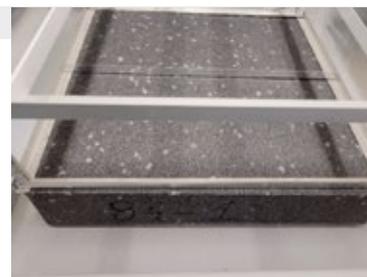
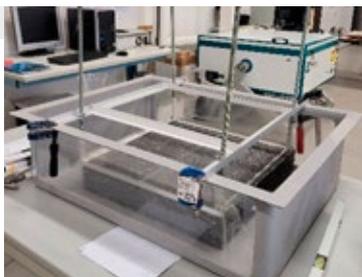
Tabella 3.
Valori di conducibilità termica [W/(m K)] dopo immersione parziale

Temperatura media	10°C	20°C	30°C	40°C
EPS media 3 provini	0,0347	0,0369	0,0389	0,0415
PF media 3 provini	0,0356	0,0409	0,0449	0,0461
PU media 3 provini	0,0243	0,0267	0,0303	0,0330
WF media 3 provini	0,0586	0,0609	0,0632	0,0675
MW media 3 provini	0,0526	0,0571	0,0569	0,0656

Tabella 4.
Equazioni delle rette temperatura-conducibilità termica

EPS	$Y = 0,0002x + 0,0324$
PF	$Y = 0,0004x + 0,0330$
PU	$Y = 0,0003x + 0,0211$
WF	$Y = 0,0003x + 0,0553$
MW	$Y = 0,0004x + 0,0484$

Foto del provino in EPS in immersione parziale

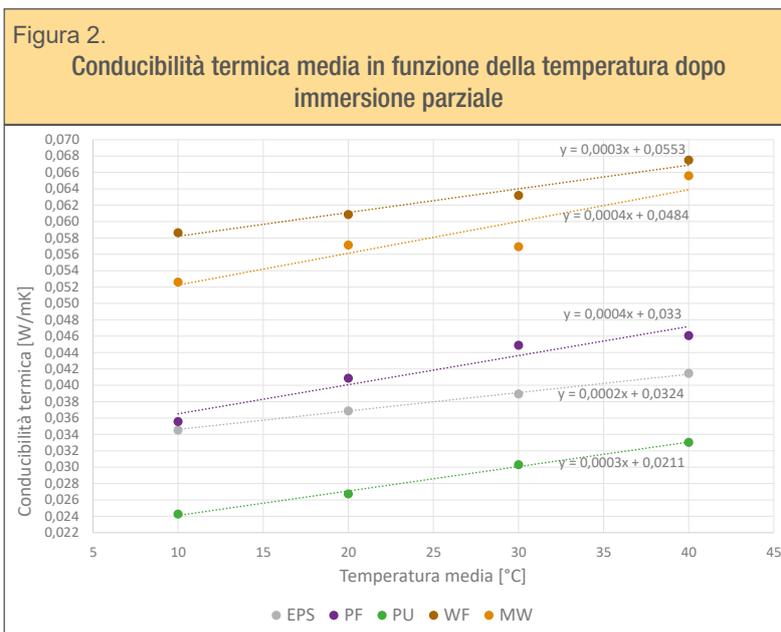


In tabella 5, oltre ai valori assoluti di conducibilità, sono riportati gli incrementi percentuali della conducibilità ottenuti dal rapporto tra la differenza dei valori dopo immersione e prima dell'immersione e il valore prima dell'immersione.

Pur essendoci una maggiore dispersione dei dati per i materiali più assorbenti, le correlazioni tra conducibilità termica e temperatura sono ancora lineari. L'inclinazione della retta che rappresenta la correlazione è pari a 0,0002 W/(m K) per °C per il polistirene espanso, mentre per gli altri materiali risulta compresa tra 0,0003 W/(m K) per °C e tra 0,0004 W/(m K) per °C. Si può concludere che l'andamento è omogeneo nel gruppo di materiali isolanti analizzati. In figura 2 sono riportati i dati e le rette interpolatrici.

Tabella 5.
Valori di conducibilità termica alla temperatura di 10°C [W/(m K)] prima e dopo immersione parziale di breve periodo

materiale media 3 provini	Conducibilità prima dell'immersione	Conducibilità dopo immersione	Conducibilità Incremento percentuale	Incremento di massa
PU	0,0236	0,0243	3,0%	5,7%
EPS	0,0319	0,0347	8,8%	9,5%
PF	0,0251	0,0356	41,8%	10,9%
WF	0,0449	0,0586	30,5%	4,1%
MW	0,0330	0,0526	59,4%	7,5%



Conducibilità dei provini dopo assorbimento per immersione totale di lungo periodo

I provini sono stati immersi totalmente in acqua per 28 giorni utilizzando l'apparato riprodotto nelle foto. Sono stati successivamente sgocciolati per 10 minuti e inseriti in un sacchetto di polietilene per evitare l'evaporazione dell'acqua

L'assorbimento di acqua dopo immersione di lungo periodo porta un aumento della conducibilità notevole per tutti i materiali.



Foto del provino in EPS in immersione totale

Tabella 6.
Valori di conducibilità termica [W/(m K)] dopo immersione totale

Temperatura media	10°C	20°C	30°C	40°C
EPS media 3 provini	0,0382	0,0417	0,0459	0,0515
PF media 3 provini	0,0435	0,0528	0,0662	0,0864
PU media 3 provini	0,0266	0,0305	0,0348	0,0410
WF media 3 provini	0,1393	0,1750	0,1927	0,2198
MW media 3 provini	0,0890	0,1212	0,1659	0,2335

Le correlazioni tra conducibilità termica e temperatura sono ancora lineari (v. Tabella 7).

L'inclinazione della retta che rappresenta la correlazione per la lana di minerale diventa 0,0048 W/(m K) per °C e per la fibra di legno diventa 0,0026 W/(m K) per °C.

Per poliuretano e polistirene aumentano di poco attestandosi sui 0,0004/0,0005 W/(m K).

La resina fenolica rimane in una condizione intermedia con un valore pari a 0,0014 W/(m K) per °C.

Anche in questo caso gli incrementi percentuali (ottenuti dal rapporto tra la differenza dei valori dopo immersione e prima dell'immersione e il valore prima dell'immersione) sono più contenuti per poliuretano e polistirene, mentre sono elevati per resina fenolica ed elevatissimi per lana minerale e fibra di legno (Tabella 8).

Tabella 7.
Equazioni delle rette temperatura-conducibilità termica

EPS	$Y = 0,0004x + 0,0333$
PF	$Y = 0,0014x + 0,0267$
PU	$Y = 0,0005x + 0,0333$
WF	$Y = 0,0026x + 0,1169$
MW	$Y = 0,0048x + 0,0329$

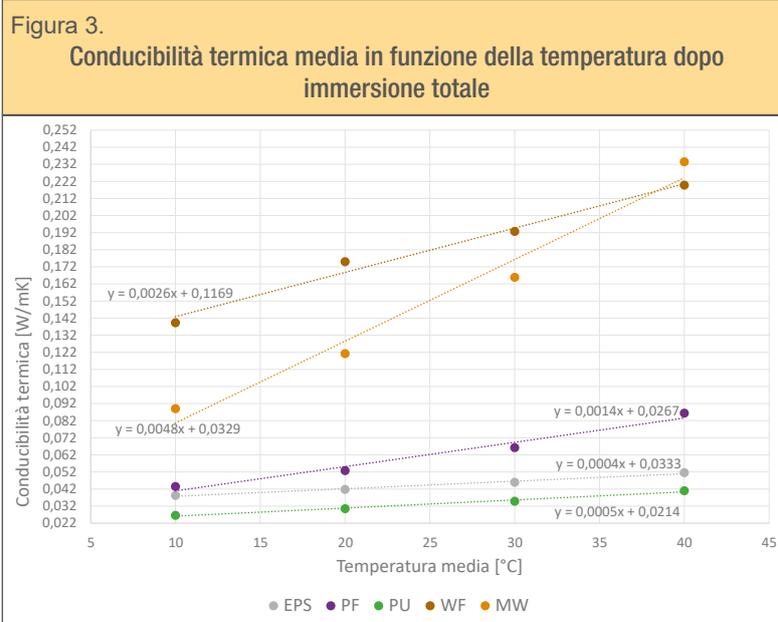


Tabella 8.
Valori di conducibilità termica alla temperatura di 10°C [W/(m K)] prima e dopo immersione totale di lungo periodo

materiale media 3 provni	Conducibilità prima dell'immersione	Conducibilità dopo immersione	Conducibilità Incremento percentuale	Incremento di massa
PU	0,0236	0,0266	12,7%	31%
EPS	0,0319	0,0380	19,1%	121%
PF	0,0251	0,0435	73,3%	110%
MW	0,0330	0,0890	169,7%	204%
WF	0,0449	0,1393	210,2%	293%

Conducibilità dei provini dopo assorbimento e asciugatura

I provini, dopo immersione totale, una volta sottoposti a prova sono stati asciugati in muffola a 60°C fino a costanza di massa. Si è proceduto a una nuova determinazione della conducibilità.

Essenzialmente tutti i materiali dopo asciugatura ritornano dal punto di vista termico nelle condizioni iniziali.

I valori di conducibilità misurati sono molto simili a quelli dopo condizionamento a 23 °C di temperatura e 50% di umidità relativa (Tabella 9).

Anche le correlazioni con la temperatura sono essenzialmente dello stesso tipo di quelle osservate nelle prime misure effettuate (Figura 4).

Alla vista i campioni di fibra di legno sono quelli che appaiono più degradati e che hanno subito piccole perdite di materiale. Anche la lana minerale presenta delle alterazioni di colore e aloni. La resina fenolica presenta limitate modificazioni. I campioni di poliuretano e polistirene presentano un aspetto del tutto simile a quello iniziale.

Tabella 9.
Valori di conducibilità termica [W/(m K)] dopo asciugatura

Temperatura media	10°C	20°C	30°C	40°C
EPS media 3 provini	0,0319	0,0335	0,0349	0,0363
PF media 3 provini	0,0255	0,0284	0,0301	0,0315
PU media 3 provini	0,0243	0,0260	0,0279	0,0292
WF media 3 provini	0,0420	0,0454	0,0512	0,0532
MW media 3 provini	0,0327	0,0353	0,0369	0,0377

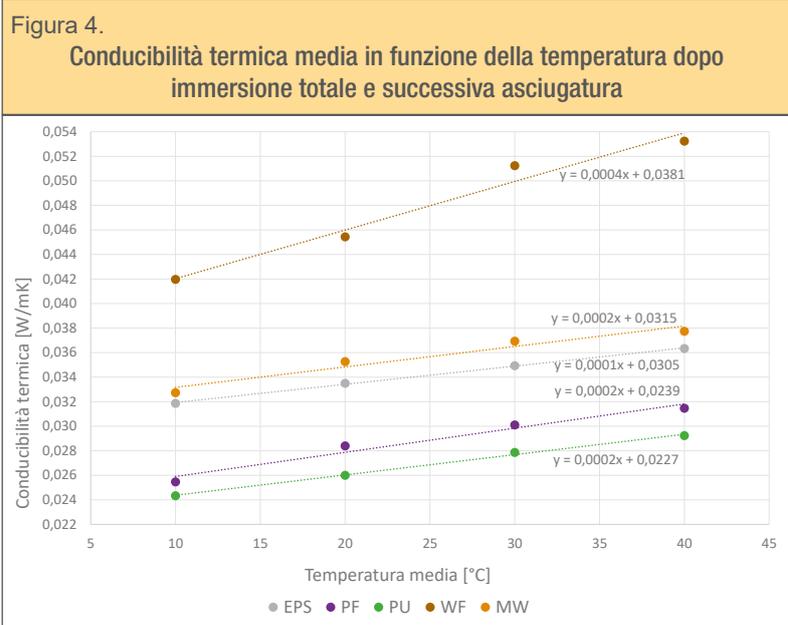
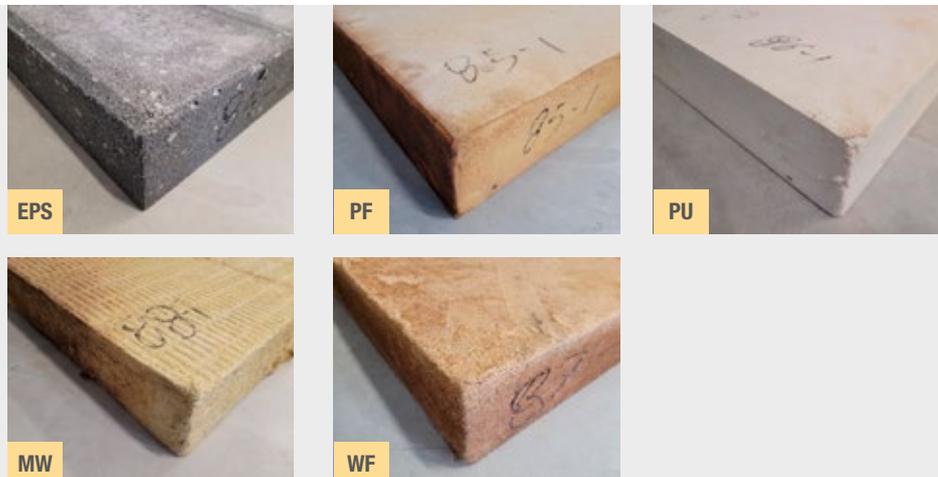


Tabella 10.
Equazioni delle rette temperatura-conducibilità termica

EPS	$Y = 0,0001x + 0,0305$
PF	$Y = 0,0002x + 0,0239$
PU	$Y = 0,0002x + 0,0227$
WF	$Y = 0,0004x + 0,0381$
MW	$Y = 0,0002x + 0,0315$

Foto dei provini testati dopo immersione ed essiccamento



Conducibilità dei provini in funzione del contenuto di acqua

Si è considerato anche la variazione della conducibilità in funzione del contenuto di acqua. I punti a disposizione in questo caso sono limitati, ma permettono di avere una prima indicazione del legame tra le due grandezze. Le variazioni di massa per immersione parziale per 24 ore e per immersione completa per 28 giorni sono riportate in figura 5 e figura 6.

Le quantità di acqua assorbite per immersione parziale di breve periodo sono dell'ordine dei grammi e vanno da circa 30 g per l'EPS a circa 160 g per la lana di legno.

L'immersione totale di lungo periodo comporta assorbimento di quantità di acqua molto maggiore. Il PU è il materiale che assorbe meno e molto limitato è anche il quantitativo di acqua assorbito da EPS. I materiali fibrosi assorbono quantità importanti di acqua. Circa 4 kg e circa 12 kg rispettivamente per MW e WF.

In tabella 11 sono riportate le variazioni di massa dei provini dopo immersione parziale di breve periodo e dopo immersione totale di lungo periodo.

A partire da questi dati si sono calcolati i parametri indicati dalle norme EN ISO 29767 e EN ISO 16535, anche se i campioni utilizzati sono di dimensioni maggiori (500mm x 500mm x 100 mm) rispetto a quelle indicate dalle norme (200mm x 200mm). Di questo è da tenere conto nel confronto con i valori riportati nelle schede tecniche per gli stessi parametri. In figura 7, riferita all'assorbimento di breve periodo, sono riportati i valori di assorbimento d'acqua espressi con il parametro W_p , water absorption by partial immer-

Figura 5. Variazione di massa dopo immersione parziale di breve periodo

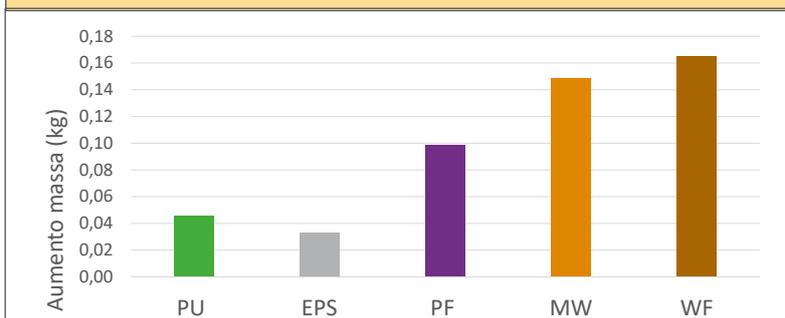


Figura 6. Variazione di massa dopo immersione totale di lungo periodo

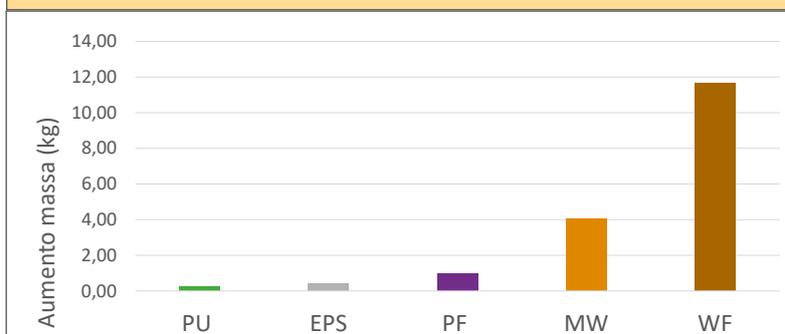
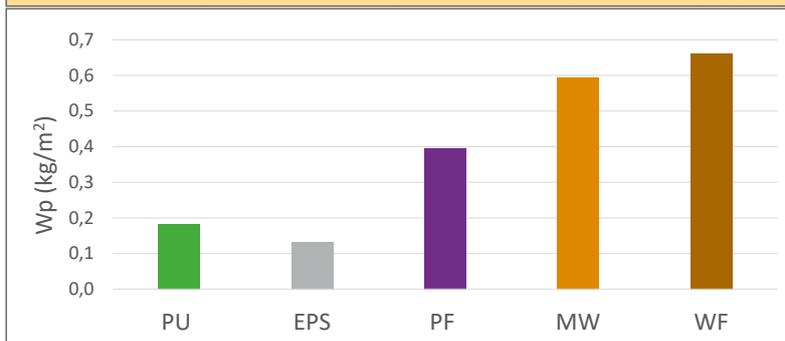


Tabella 11. Aumento di massa dei provini dopo immersione parziale di breve periodo e dopo immersione totale di lungo periodo [kg]

	Assorbimento parziale di breve periodo	Assorbimento totale di lungo periodo
EPS media 3 provini	0,033	0,415
PF media 3 provini	0,099	1,004
PU media 3 provini	0,046	0,252
MW media 3 provini	0,149	4,028
WF media 3 provini	0,165	11,647

Figura 7. Assorbimento d'acqua per immersione parziale valori del parametro W_p (kg/m²)



sion (kg/m²), calcolati seguendo la norma EN ISO 29767.

$$Wp = \frac{m_{24} - m_0}{A_p}$$

Dove m₂₄ e m₀ sono le masse prima e dopo immersione e Ap è l'area del provino

In figura 8, riferita all'assorbimento di lungo periodo, sono riportati i valori di assorbimento d'acqua espressi con il parametro Wlt, water absorption by long total immersion (%), calcolati seguendo la norma EN ISO 16535.

$$Wlt = \frac{(m_{28} - m_0)}{V} \left(\frac{100}{\rho_w} \right)$$

Dove m₂₈ e m₀ sono le masse prima e dopo immersione e V è il volume del provino, ρ_w la densità dell'acqua.

In figura 9 sono riportati gli andamenti della conducibilità in funzione del contenuto d'acqua in termini percentuali di massa per i diversi materiali.

Il poliuretano espanso assorbe una quantità molto limitata di acqua, anche dopo immersione totale i valori di conducibilità, compreso quello corrispondente al campione asciutto, si dispongono lungo una retta.

Il polistirene assorbe una quantità d'acqua maggiore ma sempre limitata, appare una lieve discontinuità tra il comportamento in condizioni secche e in condizioni umide.

Figura 8. Assorbimento d'acqua per immersione totale valori del parametro Wlt (%)

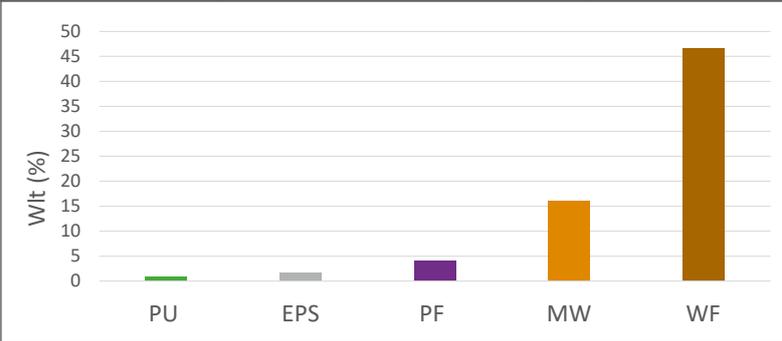
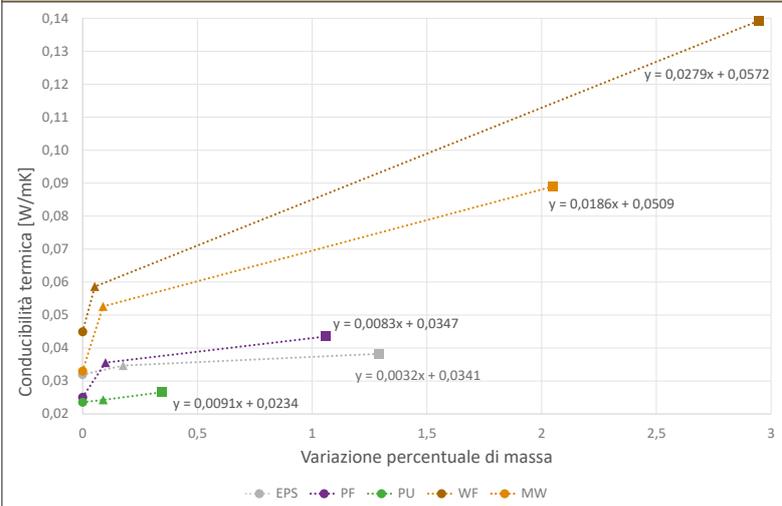


Figura 9. Conducibilità termica al variare della massa percentuale in condizioni secche (cerchio) dopo immersione di 24 h (triangolo) e di 28 gg (quadrato).



La discontinuità diviene più significativa per la resina fenolica pur restando contenuto l'assorbimento di acqua.

Per i materiali fibrosi considerati, fibra di legno e lana minerale, si ha un assorbimento molto più elevato di acqua dopo immersione e si ha una notevole discontinuità tra il comportamento in condizioni asciutte e bagnate.

La pendenza delle rette di correlazione risulta simile e bassa per resina fenolica, poliuretano espanso e polistirene.

Le pendenze delle rette di correlazione per fibra di legno e lana minerale sono più elevate.

Conclusioni

Dopo la presentazione dei risultati e l'analisi delle diverse misure di conducibilità effettuate, si possono trarre le seguenti considerazioni:

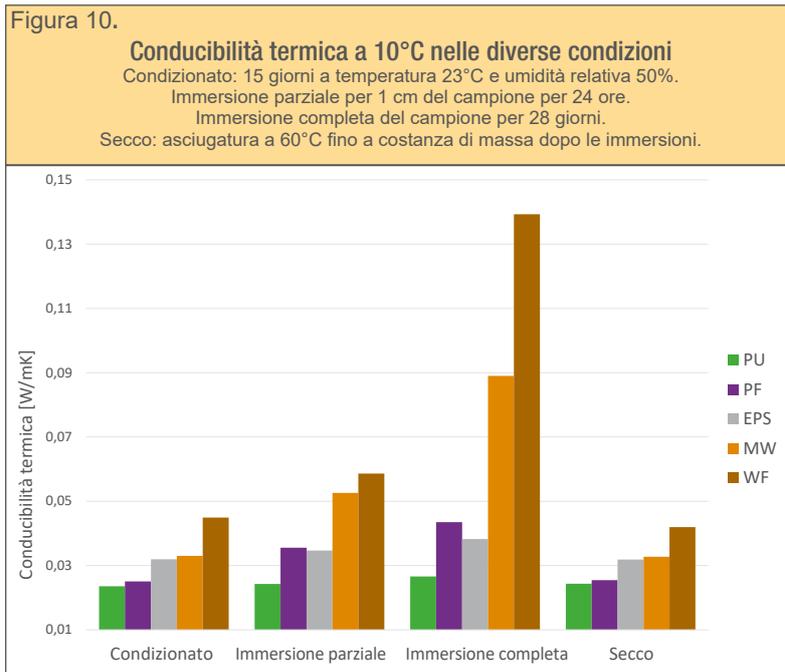
1. I valori di conducibilità a 10°C misurata in questa attività sperimentale per i campioni condizionati alla temperatura di 23 °C e alla umidità relativa pari a 50% si sono dimostrati cautelativi rispetto ai valori dichiarati per poliuretano e lana minerale; per tali prodotti, le schede tecniche riportano valori superiori al valore misurato rispettivamente del 5,6% e del 3%.

2. Come si può vedere in figura 9, la conducibilità aumenta per tutti i materiali al variare del contenuto di acqua come è normale aspettarsi. In realtà tale variazione risulta molto contenuta per il poliuretano, contenuta per il polistirene mentre è consistente per i materiali fibrosi. La resina fenolica ha un comportamento intermedio.

3. Come si può vedere in figura 5 e tabella 11, tutti i materiali dopo contatto per breve periodo (24 h) assorbono una limitata quantità di acqua. Dopo immersione per lungo periodo (28 giorni) le quantità di acqua presente nei campioni aumentano e si evidenziano maggiori differenze tra i materiali (vedi figura 6 e tabella 11).

I materiali fibrosi arrivano ad assorbire acqua da 2 a 3 volte la loro massa. La quantità di acqua assorbita dal poliuretano è molto limitata. Il comportamento di polistirene e resina fenolica espansa risulta intermedio rispetto agli altri campioni esaminati.

4. Tutti i materiali dopo condizionamento e dopo essiccazione presentano una correlazione lineare tra conducibilità termica e tempe-



ratura. L'inclinazione della retta che rappresenta la correlazione è pari a 0,0001 W/(m K) per °C per il polistirene espanso, mentre per gli altri materiali risulta pari a 0,0002 W/(m K) per °C. L'andamento è omogeneo nel gruppo di materiali isolanti analizzati.

5. Dopo immersione di breve periodo, pur verificando una maggiore dispersione dei dati per i materiali più assorbenti, le correlazioni tra conducibilità termica e temperatura sono ancora lineari. L'inclinazione della retta che rappresenta la correlazione è pari a 0,0002 W/(m K) per °C per il polistirene espanso, mentre per gli altri materiali risulta compresa tra 0,0003 W/(m K) per °C e tra 0,0004 W/(m K) per °C.

6. Le correlazioni tra conducibilità termica e temperatura dopo immersione di lungo periodo, quindi in presenza di più elevati contenuti di acqua, sono ancora lineari. L'inclinazione della retta che rappresenta la correlazione per la lana minerale diventa 0,0048 W/(m K) per °C e per la fibra di legno diventa 0,0026 W/(m K) per °C. Per poliuretano e polistirene

aumentano di poco attestandosi sui 0,0004/0,0005 W/(m K). La resina fenolica espansa rimane in una condizione intermedia con un valore pari a 0,0014 W/(m K) per °C.

7. Le correlazioni tra conducibilità termica e contenuto di acqua dopo immersione presentano diverse pendenze. Si evidenzia una maggiore variazione per i materiali fibrosi e variazioni più contenute per i polimeri espansi. Per il poliuretano il contenuto di acqua assorbita è molto limitato e non appare discontinuità con il comportamento in condizioni secche.

È infine da considerare come le relazioni viste siano state ottenute a partire da insiemi di dati limitati. E' auspicabile, almeno per qualcuno dei materiali considerati, sottoporre a prova un numero più elevato di campioni che garantisca una maggior rappresentatività statistica dei risultati. Sarebbe parimenti utile considerare alcuni ulteriori contenuti intermedi di acqua tra lo stato secco e quello completamente imbibito dei campioni.