



QUADERNO TECNICO PER IL PROFESSIONISTA
ISOLAMENTO TERMICO
IN EDILIZIA

Dicembre 2016

BigMat
HOME OF BUILDERS

www.bigmat.it



SOMMARIO

1. PRESTAZIONI TERMICHE

FLUSSI ENERGETICI ATTRAVERSO L'INVOLUCRO	4
COMPORAMENTO INVERNALE	6
· Trasmittanza termica.....	6
· Ponti termici.....	7
COMPORAMENTO ESTIVO	9
· Inerzia termica.....	10
· Diffusività termica.....	11
· Attenuare i carichi interni: la capacità termica interna periodica.....	14
· Rivestimenti a elevata riflettanza solare: ridurre le rientrate di calore.....	15
· Serramenti e schermature dal sole.....	18
PRESTAZIONI IGROMETRICHE E RISCHIO CONDENSA	20
· Muffa e condensa superficiale.....	21
· Rischio condensa interstiziale.....	22
· L'importanza della ventilazione degli ambienti.....	23

2. ISOLANTI E CARATTERISTICHE

SCEGLIERE L'ISOLANTE TERMICO	24
· Prestazioni meccaniche.....	26
· Influenza dell'acqua sulle prestazioni e sulla durabilità.....	27
· Comportamento acustico.....	29
· Reazione al fuoco.....	29
· Caratteristiche igrometriche.....	32
CONDUCIBILITÀ TERMICA DICHIARATA E DI PROGETTO	32

3. SOLUZIONI TECNICHE

ISOLAMENTO DALL'ESTERNO	34
· Cappotto termico.....	34
· Facciate ventilate.....	37
· Termointonaci.....	40
ISOLAMENTO DELLE COPERTURE PIANE	42
· Sistema tetto caldo.....	42
· Sistema tetto rovescio.....	45
ISOLAMENTO DALL'INTERNO	47
· Tecniche d'intervento.....	47
· Ponte termico parete-soletta.....	49
· Coibentazione con isolanti igroscopici.....	51
ISOLANTI INNOVATIVI A BASSO SPESSORE	53
· Pannelli isolanti in aerogel.....	53
· Isolanti a cambiamento di fase "PCM".....	55
· Termoriflettenti.....	58
ISOLAMENTO LOCALI CONTROTERRA	61
· Prestazioni termiche delle strutture controterra.....	63
BIBLIOGRAFIA	65

1.

PRESTAZIONI TERMICHE

Più del 60% degli edifici italiani (12,5 milioni in totale) è stato costruito prima del 1970 in assenza di leggi sul risparmio energetico. Analizzando i certificati energetici sulla base dell'anno di edificazione, si riscontra che la maggior parte del costruito italiano è classificato (o classificabile) in classe G. Solo una piccolissima percentuale, risalente a dopo il 2005, mostra un discreto livello qualitativo per effetto delle leggi 192/2005 e 311/2006. I livelli di efficienza energetica sono, tuttavia, ancora molto lontani dagli obiettivi di edificio a energia quasi zero (vedi Figura 1).

Le cause degli elevati consumi energetici sono riconducibili alla mancanza di isolamento termico, alla scarsa efficienza degli impianti termici e all'assenza di elementi di controllo passivo della radiazione solare che hanno fatto lievitare il numero degli impianti di condizionamento e i costi di raffrescamento estivo.

FLUSSI ENERGETICI ATTRAVERSO L'INVOLUCRO

Quando si eseguono interventi di efficienza energetica la maggior parte delle volte si interviene sull'impianto termico con la convinzione che la

sostituzione della vecchia caldaia, con una a condensazione di nuova generazione, possa portare a una buona riduzione dei consumi. L'involucro edilizio è un complesso sistema termodinamico che scambia energia sia con l'ambiente esterno sia con quello interno e che deve garantire un

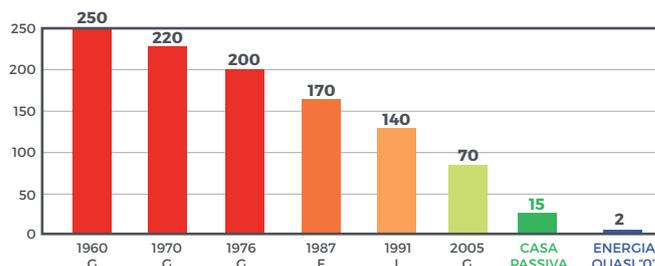
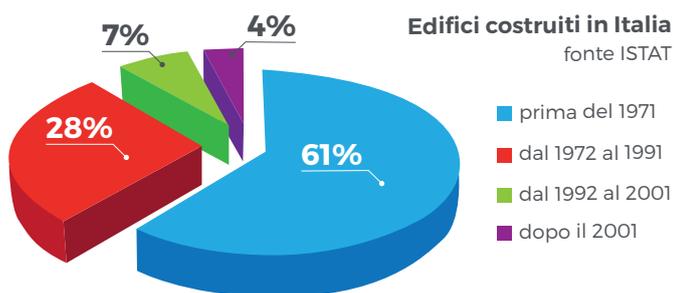


Figura 1 - Patrimonio edilizio italiano in funzione dell'anno di costruzione e classificazioni energetiche

adeguato comfort tanto nella stagione invernale quanto in quella estiva. Questo obiettivo è tuttavia da raggiungere ricorrendo il meno possibile alle tecnologie impiantistiche sia nelle nuove costruzioni sia in quelle esistenti.

Prima di decidere quale intervento effettuare è importante conoscere i flussi di energia attraverso l'involucro e i punti deboli di quest'ultimo. Intervenire in maniera poco oculata potrebbe risultare economicamente non vantaggioso a fronte dell'investimento realizzato. Per capire il funzionamento termodinamico dell'edificio si è soliti fare l'analogia con il "secchio bucato" (vedi Figura 2).

L'edificio è come un secchio bucato in cui si tenta di mantenere costante il livello d'acqua. Il livello d'acqua corrisponde alla temperatura interna di progetto, i buchi alle dispersioni (per trasmissione attraverso le superfici trasparenti e opache e per ventilazione dovute ai ricambi d'aria), il rubinetto e il tubo corrispondono all'impianto termico, mentre la pioggia rappresenta gli apporti gratuiti (radiazione solare, elettrodomestici e persone).



Figura 2 - Analogia edificio-secchio bucato

Se non si tappano i buchi, per mantenere costante il livello d'acqua bisogna lasciare sempre aperto il rubinetto, cioè attivo l'impianto. La Figura 3 mostra che le perdite per trasmissione attraverso l'involucro sono maggiori rispetto a quelle dell'impianto.

Minori saranno le perdite attraverso l'involucro, minore sarà la potenza dell'impianto per garantire le condizioni di comfort. Pertanto, **è sconsigliato intervenire sull'impianto quando l'involucro non è stato adeguatamente isolato. Peggior è la classe energetica, maggiore è la priorità di intervento sull'involucro.**

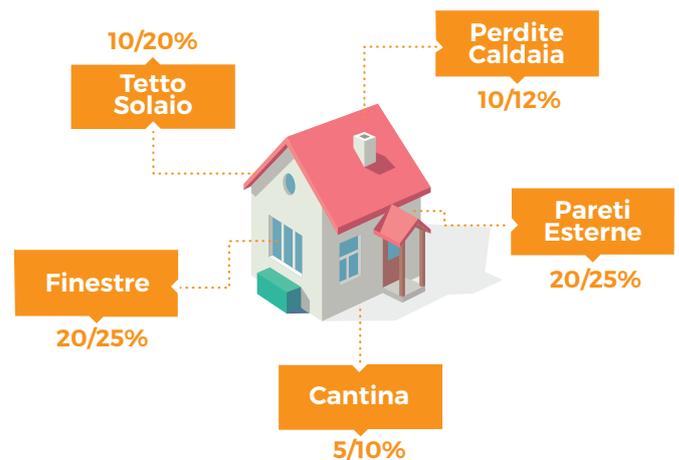
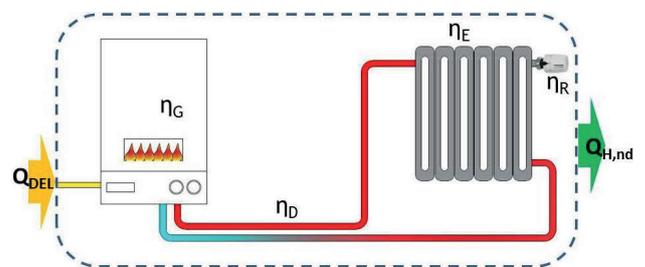


Figura 3 - Valori percentuali indicativi dei consumi energetici attraverso i componenti di un edificio



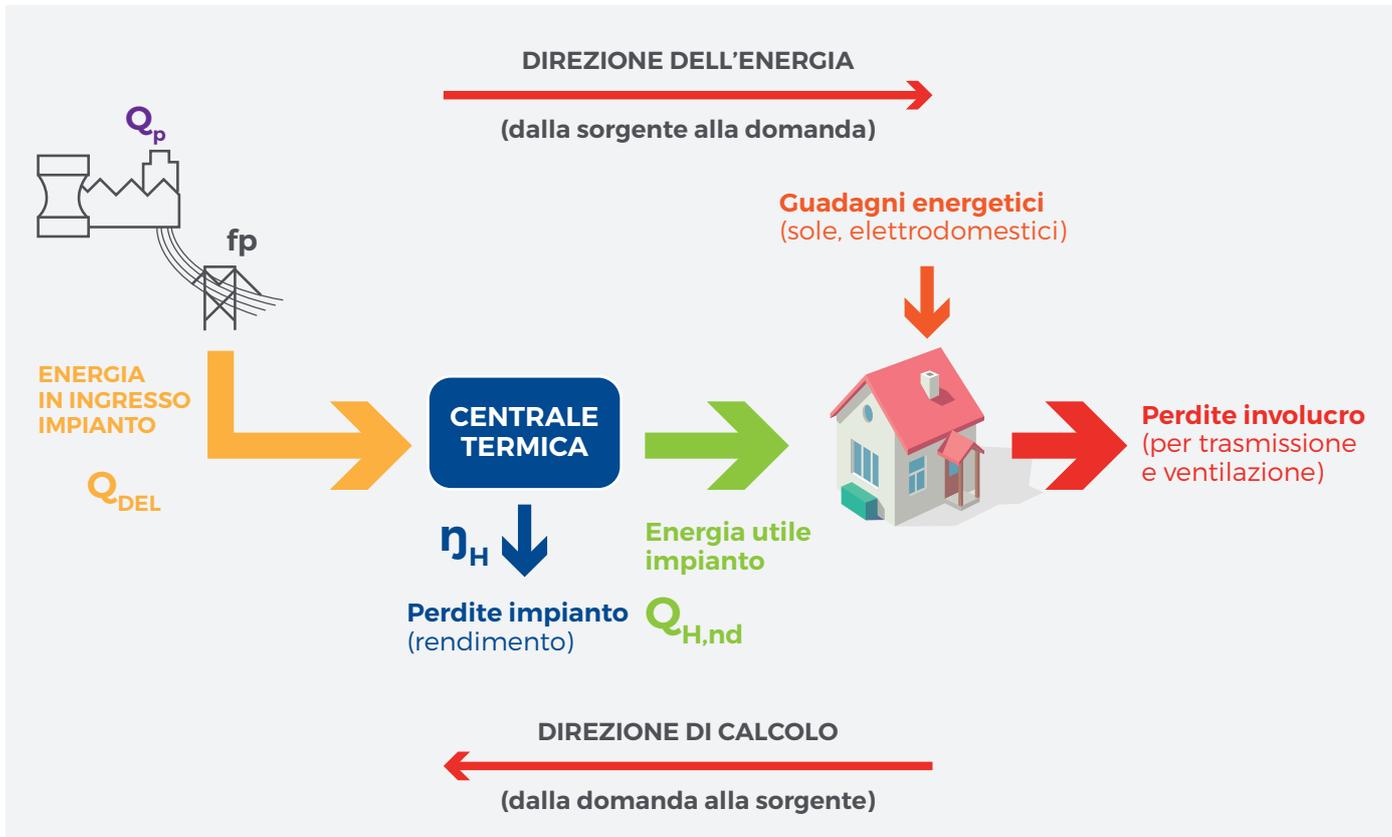
SOSTITUIRE IL GENERATORE DI CALORE?

Il sistema impiantistico viene concettualmente suddiviso in più sottosistemi (generatore di calore, rete di distribuzione e sottosistema di emissione del calore, sottosistema di regolazione della temperatura degli ambienti), ciascuno dei quali è caratterizzato da un proprio rendimento e insieme concorrono al rendimento globale η_H . **La sostituzione della caldaia consente di migliorare esclusivamente il rendimento di generazione lasciando invariati gli altri.**



$$Q_{DEL} = \frac{Q_{H,nd}}{\eta_H} = \frac{Q_{H,nd}}{\eta_G \cdot \eta_D \cdot \eta_R \cdot \eta_E}$$

NOTA - Sistema impiantistico e rendimento globale d'impianto ($Q_{H,nd}$ è il fabbisogno di calore utile per il riscaldamento che dovrà eguagliare le perdite attraverso l'involucro; Q_{DEL} è l'energia usata dalla centrale termica).



SCHEMA FLUSSO DI ENERGIA PER IL RISCALDAMENTO

L'energia primaria Q_p consumata dagli edifici si calcola partendo dal bilancio energetico attraverso l'involucro. Si valutano le perdite (per ventilazione e trasmissione) che rappresentano il fabbisogno di energia utile $Q_{H,nd}$ che l'impianto termico deve fornire per mantenere costante la temperatura interna (supposta in inverno a 20 °C). Al fabbisogno di energia utile per il riscaldamento si applica il rendimento totale dell'impianto η_H per ottenere l'energia consumata dall'impianto Q_{DEL} (chiamata energia in ingresso nell'edificio). In funzione del vettore energetico (gas, elettricità, biomassa, ecc.) si applica a Q_{DEL} il coefficiente correttivo fp (che tiene conto dei consumi per estrazione e trasporto) per convertire l'energia utilizzata dall'impianto in energia primaria effettivamente richiesta Q_p . L'indice di prestazione energetica EP_H è pari al rapporto Q_p/A dove A è la superficie utile riscaldata.

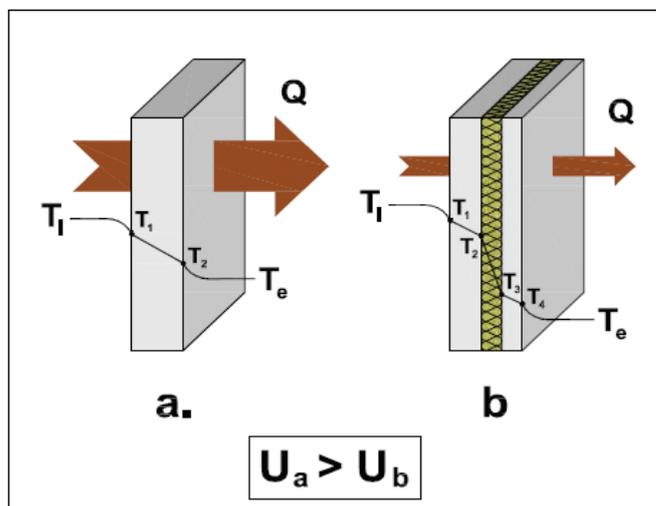
Il disegno è una rielaborazione dell'Ufficio Tecnico BigMat di quanto indicato nella UNI TS 11300.

COMPORTAMENTO INVERNALE

TRASMITTANZA TERMICA

Il parametro che definisce quanto sia disperdente una struttura edilizia è la trasmittanza termica U [W/mqK]. Essa è il flusso di calore che attraversa, in regime stazionario (invernale), 1 mq di struttura per effetto di una differenza di temperatura di 1 °C.

$$U = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_{si} + \sum_i \frac{s_i}{\lambda_i} + \sum_j R_j + R_{se}}$$



Dove:

- R_{si}, R_{se} = resistenze superficiali interne ed esterne che simulano gli scambi termici della struttura in esame con l'aria dell'ambiente rispettivamente interna ed esterna (sono dei valori tabulati in funzione dell'orientamento della struttura);
- S_r/λ_i = resistenza termica di uno strato omogeneo di materiale (intonaci, calcestruzzi, isolanti, ecc.) di spessore "s" e conducibilità termica " λ_i ";
- R_j = resistenze termiche dei materiali non omogenei (ad esempio laterizi, intercapedini d'aria, ecc.).

I materiali isolanti hanno un ruolo fondamentale per la riduzione della trasmittanza termica per gli edifici esistenti grazie ai bassi valori di conducibilità termica (vedi Capitolo 2).



LIMITI DI TRASMITTANZA

Secondo il Decreto Requisiti Minimi i limiti da rispettare sono:

- nuove costruzioni: $U < U_{ed,rif}$
- edifici esistenti: $U < U_{lim}$

Con il nuovo Decreto Requisiti Minimi la trasmittanza non può prescindere dal calcolo dei ponti termici e il valore da verificare è la trasmittanza media.

NOTA - Per approfondimenti sul nuovo Decreto Requisiti Minimi vedi, su bigmat.it, la "Normativa sull'efficienza energetica: le nuove regole del D.M. 26/06/2015".

PONTI TERMICI

I ponti termici sono definiti nella norma UNI EN 10211 come quelle parti dell'involucro dove la resistenza termica, altrove uniforme, cambia in modo significativo. In sostanza sono quei punti della struttura in cui si ha un incremento del flusso termico (e quindi un aumento delle dispersioni) con conseguente abbassamento della temperatura superficiale.

Generalmente sono dovuti a:

- variazioni della continuità del materiale costituente l'involucro edilizio;

- modifiche della geometria (ad esempio agli angoli);
- elementi passanti di fissaggio;
- presenza di elementi strutturali o di raccordo.

I principali effetti negativi dei ponti termici sono:

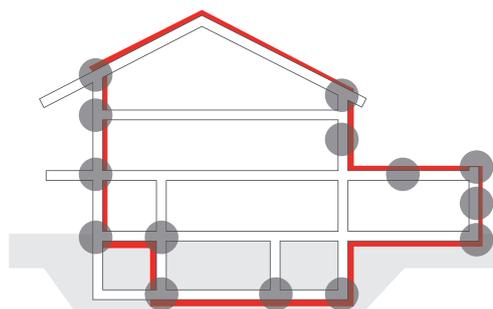
- perdite di calore: anche oltre 20% del calore totale disperso da un ambiente;
- condensazione superficiale;
- formazione delle muffe: un ponte termico, a causa della contemporanea presenza di alta umidità relativa (80%) e bassa temperatura, crea le condizioni ideali per la formazione di muffe;
- danni alla superficie: le variazioni cicliche della temperatura superficiale causano una polverizzazione dei materiali della struttura;
- diminuzione del comfort abitativo: quando la temperatura superficiale interna di una parte dell'involucro (parete, pavimento, ecc.) è inferiore di almeno tre gradi rispetto alla temperatura dell'ambiente si avverte una sensazione di disagio in prossimità di tale superficie.



PROGETTARE SECONDO LA REGOLA DEL "PENNARELLO ROSSO"

Per contenere le dispersioni il progettista dovrà, necessariamente, progettare secondo la "regola del pennarello rosso" garantendo la continuità dell'isolamento termico e la perfetta tenuta all'aria.

Più è isolato l'edificio tanto più i ponti termici influiscono negativamente!





COME CALCOLARE LA TRASMITTANZA TERMICA DI PROGETTO: L'INFLUENZA DEI PONTI TERMICI

La trasmittanza di progetto di un elemento disperdente (ad esempio una facciata) si ricava dalla seguente formula:

$$U = \frac{\sum_i A_i \cdot U_i + \sum_j \Psi_j \cdot L_j \cdot F_p}{\sum_i A_i}$$

Dove:

U_i [W/mqK] = trasmittanza termica dell'elemento i-esimo dell'involucro (serramenti, sottofinestre, ecc.);

A_i [mq] = area dell'elemento i-esimo dell'involucro;

Ψ_j [W/m] = trasmittanza termica lineica del ponte termico j-esimo basata sulle dimensioni esterne;

L_j [m] = lunghezza del ponte termico lineare j-esimo basata sulle dimensioni esterne;

F_p = fattore di ponderazione pari a 1 oppure 0,5 a seconda della competenza del ponte termico.

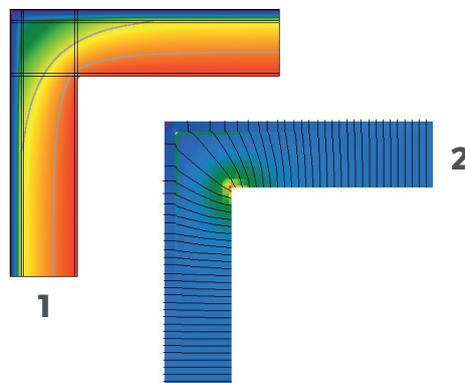
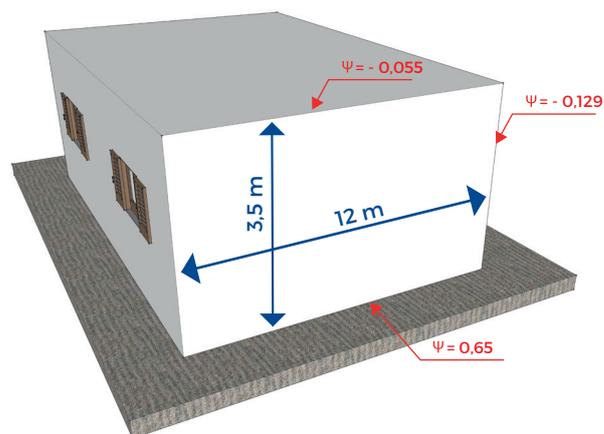
Per quantificare l'incidenza dei ponti termici, a titolo d'esempio, si consideri una parete isolata a cappotto di trasmittanza U pari a 0,34 W/mqK e superficie disperdente lorda (misurata dall'esterno) pari a 42 mq (3,5 m x 12 m). I ponti termici (nodo tetto/parete, spigoli verticali e attacco a terra) determinano una maggiorazione del 20% portando la trasmittanza media a 0,41 W/mqK:

$$U = \frac{0,34 \cdot 42 + 3,12}{42} = 0,42 \frac{W}{mqK}$$

NOTA

Secondo la normativa UNI TS 11300-1:2014 i coefficienti lineici dei ponti termici devono essere calcolati esclusivamente mediante analisi agli elementi finiti (non è più ammesso l'uso di abachi semplificativi).

Ponte termico	Ψ_j	L_j	F_p	$\Psi_j \cdot L_j \cdot F_p$
Tetto/parete 	- 0,055	12	0,5	- 0,33
Parete/parete (n. 2 volte) 	- 0,129	3,5	0,5	-0,225 · 2
Parete/solaio base 	0,65	12	0,5	3,9
TOTALE				3,12



Calcolo della trasmittanza termica lineica del nodo parete-tetto con software IRIS 3.1 agli elementi finiti. Il grafico 1 rappresenta l'andamento delle isoterme, il grafico 2 rappresenta l'andamento del flusso di calore nel nodo.

COMPORAMENTO ESTIVO

L'analisi del comportamento estivo degli edifici è piuttosto complessa, in quanto gli scambi di calore con l'ambiente esterno sono fortemente condizionati dall'irraggiamento solare. Una superficie opaca esposta al sole raggiunge temperature elevatissime, anche superiori ai 60 °C. È come se la struttura scambiasse calore con un ambiente esterno la cui temperatura non è quella dell'aria esterna, ma è una temperatura definita "fittizia aria-sole (T_{as})" che simula contemporaneamente gli effetti della convezione e dell'irraggiamento (vedi box).

A causa della variabilità dell'intensità della radiazione solare durante la giornata, la temperatura aria-sole non può essere considerata costante e la trasmittanza termica U non è in grado di descrivere il comportamento della struttura.

Gli elementi che, opportunamente valutati, possono garantire buone condizioni di comfort interno limitando l'uso di impianti di raffrescamento sono:

- l'inerzia termica dell'involucro;
- la diffusività termica dei materiali;
- l'attenuazione dei carichi interni;
- rivestimenti a elevata riflettanza solare;
- la schermatura dal sole;
- il controllo della ventilazione.



TEMPERATURA FITTIZIA ARIA-SOLE

Esempio:

Copertura con tegole con coefficiente di assorbimento $\alpha_c = 0,7$

Temperatura aria esterna $T_e = 35 \text{ °C}$

Radiazione solare incidente $I_i = 800 \text{ W/mq}$;

Coefficiente limitare esterno $h_e = 25 \text{ W/mqK}$

$$T_{as} = 35 + ((0,7 \times 800) / 25) = 57,4 \text{ °C}$$

$$T_{as} = T_e + \frac{(\alpha_c \cdot I_i)}{h_e} = T_e + \alpha_c \cdot I_i \cdot R_{se}$$

Dove

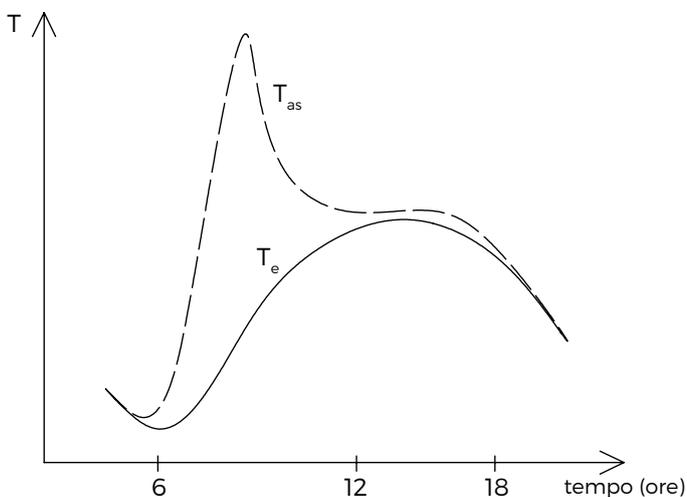
T_e = temperatura aria esterna

α_c = fattore di assorbimento solare del componente
 I_i [W/mq] = intensità della radiazione solare incidente, mediata nella giornata

h_e [W/mqK] = coefficiente di adduzione esterno

$$h_e = 1/R_{se}$$

R_{se} = Resistenza superficiale esterna



Esempio di andamento della temperatura aria-sole in funzione del tempo



INERZIA TERMICA

Quando la radiazione solare colpisce la struttura, si assiste a un progressivo riscaldamento degli strati interni. La struttura reagisce con un certo ritardo fino a quando non si raggiunge, al suo interno, l'equilibrio termico con una distribuzione lineare della temperatura (come rappresentato in Figura 4). Ai fini del surriscaldamento estivo, a parità di trasmittanza termica U , due strutture si comportano in maniera diversa in funzione del tempo necessario per arrivare a regime. **Maggiore è la durata del "transitorio" migliore è il comportamento della struttura.**

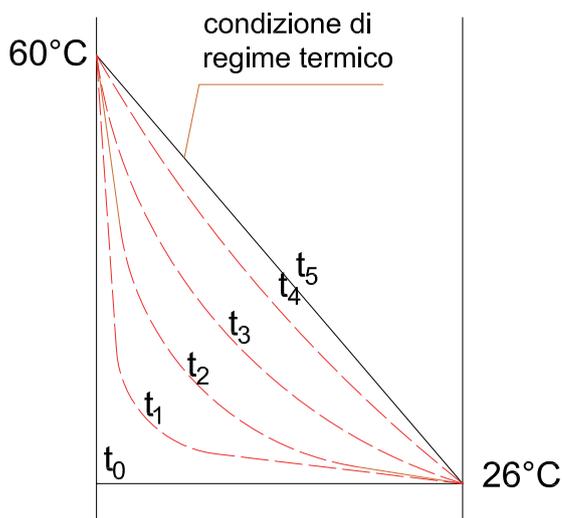


Figura 4 - Accumulo di calore nelle strutture e tempo di riscaldamento degli strati interni. Le linee tratteggiate rosse rappresentano l'evolvere della temperatura dallo strato esterno, a 60 °C, verso quello interno, mantenuta costante a 26 °C, al passare del tempo t . Quando si raggiunge l'equilibrio termico (istante t_5) l'andamento delle temperature è lineare come nel caso stazionario. Più lungo è il tempo (detto anche "transitorio") necessario per raggiungere l'equilibrio, migliore è il comportamento estivo. Il transitorio (istanti da t_0 a t_4) è direttamente correlato alla capacità termica e all'inerzia termica [fonte Anit].

Più i materiali che compongono la struttura sono in grado di accumulare calore, meno ne arriva sulla superficie interna. Pertanto, devono essere caratterizzati da elevata capacità termica che è, per definizione, la quantità di energia da fornire a un corpo di una certa massa per aumentare la sua temperatura di 1 °C. La massa, direttamente proporzionale alla capacità termica, fa da volano termico.

In edilizia l'inerzia termica, cioè la capacità del materiale di accumulare calore e cederlo in forma attenuata in un tempo successivo, viene descritta tramite due indicatori (vedi Figura 5):

- **sfasamento termico " Φ "** (misurato in ore) - ritardo con cui l'elemento rilascia, verso l'ambiente interno, il calore accumulato (ritardo tra il minimo/massimo della temperatura sole-aria esterna e il minimo/massimo della temperatura dell'aria interna);
- **l'attenuazione " f_a " (o fattore di decremento)** - rapporto fra l'ampiezza del flusso termico uscente dal componente edilizio (e quindi entrante nell'ambiente abitato) e l'ampiezza del flusso termico entrante nel medesimo componente edilizio (e quindi proveniente dall'ambiente esterno). Questo fattore può variare fra 0 (attenuazione massima, "inerzia infinita") e 1 (attenuazione minima, "inerzia nulla").

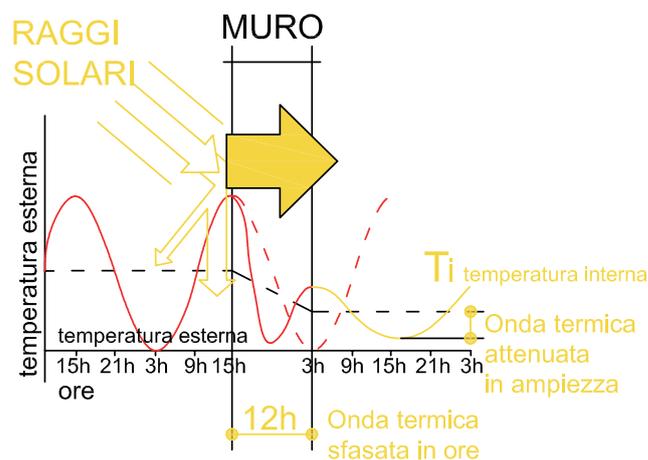


Figura 5 - Sfasamento termico e attenuazione termica

Maggiore è lo sfasamento termico migliore è il comfort interno!

Lo scopo è fare in modo che il flusso giunga nell'ambiente interno durante le ore serali più fresche quando la temperatura esterna è più bassa di quella interna e il calore può essere smaltito attraverso la ventilazione naturale degli ambienti.



VERIFICA NORMATIVA DELLE PRESTAZIONI ESTIVE

A livello normativo, il parametro che descrive il comportamento inerziale delle strutture è la trasmittanza termica periodica Y_{ie} .

Y_{ie} è definita come il rapporto tra l'ampiezza del flusso termico trasmesso all'interno e l'ampiezza della sollecitazione esterna nell'ipotesi che la temperatura dell'aria interna rimanga costante.

$$Y_{ie} = U \cdot f_a$$

Di seguito si riportano i limiti da rispettare ai sensi del Decreto Requisiti Minimi.

Limiti della trasmittanza termica periodica

Struttura orizzontale	$Y_{ie} < 0,10$
Struttura verticale	se $M_s > 230$ kg/mq verifica Y_{ie} non necessaria se $M_s < 230$ kg/mq allora $Y_{ie} < 0,18$

Note:

- la verifica è necessaria in caso di irradianza media superiore a 290 W/mq;
- le superfici esposte a nord non sono sottoposte a verifica;
- nel calcolo della massa frontale sono esclusi gli intonaci interni ed esterni;
- la trasmittanza non comprende i ponti termici.

Nella Tabella seguente sono indicate le classi prestazionali in funzione del valore di sfasamento termico e attenuazione. Secondo le linee guida nazionali per la certificazione la prestazione minima da perseguire dovrebbe corrispondere alla classe III.

Classi di prestazione in funzione dell'attenuazione e dello sfasamento (classe I la migliore, V la peggiore)

CLASSE	SFASAMENTO [ORE]	ATTENUAZIONE	PRESTAZIONI
I	$\Phi > 12$	$f_a < 0,15$	OTTIME
II	$10 < \Phi \leq 12$	$0,15 \leq f_a < 0,30$	BUONE
III	$8 < \Phi \leq 10$	$0,30 \leq f_a < 0,40$	MEDIE
IV	$6 < \Phi \leq 8$	$0,40 \leq f_a < 0,60$	SUFFICIENTI
V	$\Phi \leq 6$	$0,60 \leq f_a$	MEDIOCRI

DIFFUSIVITÀ TERMICA

Un isolante che isola dal freddo, isola anche dal caldo?

Per rispondere a questa domanda analizziamo due coperture in legno isolate una con un isolante

molto performante (bassa conducibilità, λ pari a 0,031 W/mK) e leggero (25 kg/mc), e l'altra con un isolante meno prestazionale (conducibilità medio-alta, λ pari a 0,039 W/mK) ma più massivo (160 kg/mc).

Come riportato in Tabella 1, si nota che, a parità di spessore, l'isolante leggero offre un miglior comportamento invernale. Tuttavia, sebbene la Y_{ie} sia verificata, la struttura non garantisce un buon livello di comfort interno in estate (solo 3 ore e 10 min di sfasamento). L'isolante massivo mostra sicuramente un comportamento invernale inferiore, ma nella stagione calda offre un comfort coerente

con le linee guida per la certificazione energetica rientrando nella classe III.

Infine nella Tabella 2 sono riportati l'aumento di spessore per l'isolante leggero al fine di avere lo stesso sfasamento termico dell'isolante leggero (ben 30 cm), e dell'isolante massivo (solo 4 cm) per avere la stessa trasmittanza termica dell'isolante leggero.

Tabella 1 - Confronto prestazioni inverno/estate tra isolanti leggeri e massivi

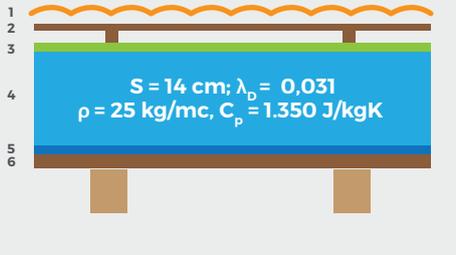
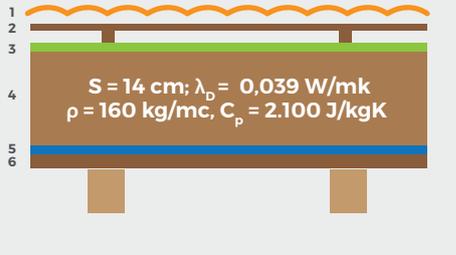
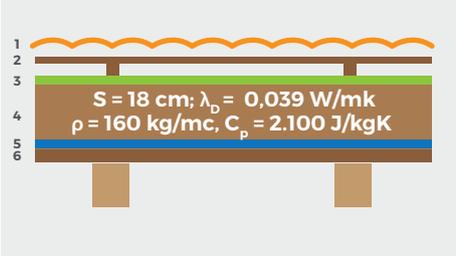
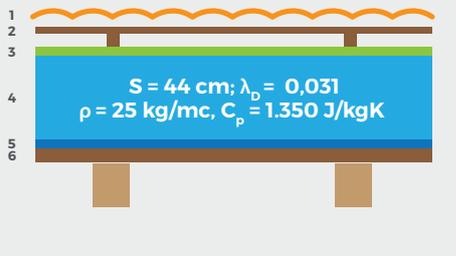
	<p>1 - TEGOLE</p> <p>2 - INTERCAPEDINE VENTILATA</p> <p>3 - MEMBRANA TRASPIRANTE</p> <p>4 - ISOLANTE</p> <p>5 - FRENO AL VAPORE</p> <p>6 - PERLINE LEGNO</p>	 <p>S = 14 cm; $\lambda_D = 0,031$ $\rho = 25 \text{ kg/mc}$, $C_p = 1.350 \text{ J/kgK}$</p>	 <p>S = 14 cm; $\lambda_D = 0,039 \text{ W/mk}$ $\rho = 160 \text{ kg/mc}$, $C_p = 2.100 \text{ J/kgK}$</p>
Trasmittanza U [W/mqK]	0,20	0,25	
Trasmittanza periodica Y_{ie} [W/mqK]	0,178	0,103	
Fattore di attenuazione	0,87	0,40	
Sfasamento termico	3h 10min	9h 23min	
Classe prestazione estiva	V	III	
Diffusività termica α [mq/s] isolante	$0,959 \cdot 10^{-6}$	$0,116 \cdot 10^{-6}$	

Tabella 2 - Aumenti di spessore dell'isolante massivo per ottenere la stessa U dell'isolante leggero e aumento dello spessore dell'isolante leggero per ottenere lo stesso sfasamento termico dell'isolante massivo

	<p>1 - TEGOLE</p> <p>2 - INTERCAPEDINE VENTILATA</p> <p>3 - MEMBRANA TRASPIRANTE</p> <p>4 - ISOLANTE</p> <p>5 - FRENO AL VAPORE</p> <p>6 - PERLINE LEGNO</p>	 <p>S = 18 cm; $\lambda_D = 0,039 \text{ W/mk}$ $\rho = 160 \text{ kg/mc}$, $C_p = 2.100 \text{ J/kgK}$</p>	 <p>S = 44 cm; $\lambda_D = 0,031$ $\rho = 25 \text{ kg/mc}$, $C_p = 1.350 \text{ J/kgK}$</p>
Trasmittanza U [W/mqK]	0,20	0,068	
Trasmittanza periodica Y_{ie} [W/mqK]	0,05	0,028	
Fattore di attenuazione	0,25	0,412	
Sfasamento termico	12h 10min	9h 34min	
Classe prestazione estiva	I	III	
Diffusività termica α [mq/s] isolante	$0,116 \cdot 10^{-6}$	$0,959 \cdot 10^{-6}$	

Il parametro che, nel complesso, valuta l'attitudine di un materiale alla riduzione dell'onda termica è la **diffusività termica α che rappresenta la velocità di propagazione dell'onda termica all'interno del materiale stesso**. Una struttura presenta smorzamento e sfasamento tanto più accentuato quanto più piccola è la sua diffusività termica (ciò spiega il differente comportamento degli isolanti in estate e in inverno).

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = \frac{\text{proprietà di conduzione}}{\text{proprietà di accumulo}} \left[\frac{\text{mq}}{\text{s}} \right]$$

In Tabella 3 sono riportati i valori di diffusività termica dei materiali comunemente usati in edilizia. È da notare che il calcestruzzo ha una diffusività confrontabile con quella dell'EPS. Ciò significa che, nonostante l'elevata densità, il suo comportamento

estivo non è ottimale. In effetti, il calcestruzzo ha un grande serbatoio di accumulo di energia (alta capacità termica), ma si riempie altrettanto velocemente per effetto della elevata conducibilità termica.

Il polistirene ha un piccolo serbatoio ma si riempie lentamente perché ha una bassa conducibilità. In definitiva i due comportamenti sono simili.

Riepilogando, i parametri da considerare per ogni strato al fine di avere una struttura con buon comportamento estivo sono:

- **spessore** s [m] => maggiore è meglio è!
- **densità** ρ [kg/mc] => maggiore è meglio è!
- **calore specifico** c [J/kgK] => maggiore è meglio è!
- **conducibilità termica** λ [W/mK] => minore è meglio è!

Tabella 3 - Diffusività termica materiali e isolanti termici (dal migliore in alto, al peggiore in basso)

MATERIALE	ρ [kg/mc]	c [J/kgK]	λ [W/mK]	α [mq/s]
Lana di legno mineralizzata	450	1.811	0,065	0,08·10 ⁻⁶
Legno OSB	650	1.700	0,13	0,12·10 ⁻⁶
Fibra di legno	150	2.000	0,040	0,13·10 ⁻⁶
Sughero espanso	100	1.560	0,040	0,26·10 ⁻⁶
Cartongesso in lastre	900	837	0,21	0,28·10 ⁻⁶
Calcestruzzo cellulare	300	1.000	0,089	0,30·10 ⁻⁶
Lana di roccia	100	1.030	0,035	0,34·10 ⁻⁶
Vetro cellulare	150	1.000	0,055	0,37·10 ⁻⁶
Lana di vetro	80	1.030	0,035	0,42·10 ⁻⁶
Poliuretano espanso	43	1.400	0,028	0,46·10 ⁻⁶
Vetro	2.500	750	1,0	0,53·10 ⁻⁶
Laterizio pieno	1.800	837	0,8	0,53·10 ⁻⁶
Laterizio forato	650	837	0,35	0,6·10 ⁻⁶
Polistirene espanso estruso XPS	35	1.450	0,035	0,70·10 ⁻⁶
Polistirene espanso sinterizzato EPS grigio	30	1.450	0,031	0,71·10 ⁻⁶
Calcestruzzo	2.400	1.000	2,16	0,90·10 ⁻⁶
Polistirene espanso sinterizzato EPS bianco	25	1.450	0,036	0,99·10 ⁻⁶
Aria ferma	1,23	1.008	0,025	20,2·10 ⁻⁶

ATTENUARE I CARICHI INTERNI: LA CAPACITÀ TERMICA INTERNA PERIODICA

La trasmittanza termica periodica è efficace nella riduzione del flusso termico proveniente dall'esterno, ma è poco indicativa, ai fini del comfort abitativo, quando al flusso proveniente dall'esterno si somma quello inevitabilmente prodotto nell'ambiente interno a causa della presenza di persone, dell'uso degli elettrodomestici, dell'illuminazione e della radiazione termica diffusa o per via dei guadagni solari attraverso gli elementi finestrati.

La struttura così come si oppone alle sollecitazioni esterne allo stesso modo deve opporsi a quelle interne. In particolare **gli apporti gratuiti (solari e interni) devono essere adeguatamente controllati al fine di evitare, per quanto possibile, variazioni importanti della temperatura operante, il cui valore, più che la temperatura dell'aria interna, è indice del comfort termico.** La struttura deve essere in grado di accumulare calore anche dal suo lato interno senza, di conseguenza, variare la temperatura superficiale.

Un parametro legato a tale fenomeno è **la capacità termica areica interna periodica (C_{ip})** cioè la quantità di calore per unità di superficie che la parete, in regime dinamico, è in grado di accumulare in seguito a una fluttuazione unitaria di temperatura interna agente sulla sua faccia esposta.

Maggiori sono i carichi interni - ad esempio nel caso di edifici ad alto indice di affollamento, o con elevato rapporto superficie vetrata/superficie utile di pavimento - tanto più importante sarà fissare un valore elevato di C_{ip} .

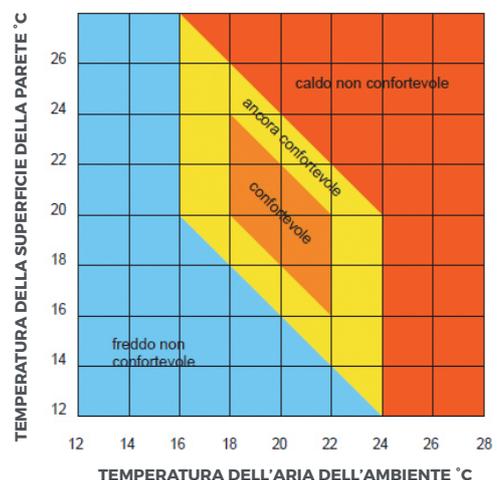
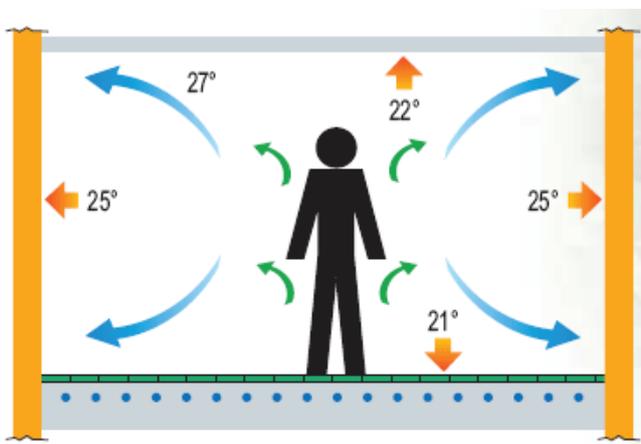
L'uso di un involucro leggero e fortemente coibente è controindicato, non tanto dal punto di vista del risparmio energetico, ma soprattutto dal punto di vista del comfort abitativo in quanto determina oscillazioni maggiori delle temperature interne, temperature superficiali più elevate (mediamente da 1,5 °C a 3 °C in più) e di conseguenza temperature operanti più alte.

Gli studi sui transitori termici delle pareti hanno mostrato che la posizione dell'isolante termico è fondamentale per il comportamento della parete come riassunto qui di seguito.



LA TEMPERATURA OPERANTE

La temperatura operante è data dalla media tra la temperatura dell'aria interna e la temperatura media radiante, dove la temperatura media radiante è la media pesata delle temperature delle superfici interne incluso l'effetto dell'irraggiamento solare incidente.



Parete isolata dall'esterno: è una struttura capacitiva per l'estate, ovvero l'ambiente può beneficiare di un serbatoio per accumulare il surplus energetico prodotto internamente.

Parete isolata dall'interno: la parete non partecipa all'accumulo, ma la struttura può beneficiare invece della velocità di reazione dell'ambiente in merito a condizionamento dell'aria oppure alla possibilità di raffrescamento attraverso la ventilazione notturna.

Parete isolata in intercapedine: ha un comportamento capacitivo intermedio in funzione della massa tra interno e isolante, tuttavia è penalizzante per i maggiori valori del coefficiente di attenuazione rispetto alla parete isolata dall'esterno.



PER UN BUON COMFORT ESTIVO



Bassi valori del fattore di decremento (f_a) congiuntamente ad alti valori della capacità termica areica interna (C_{ip}) e alti valori nello sfasamento della trasmissione termica periodica (ϕ) denotano migliori caratteristiche delle pareti nell'attenuazione degli effetti delle sollecitazioni termiche esterne e interne estive.

RIVESTIMENTI A ELEVATA RIFLETTANZA SOLARE: RIDURRE LE RIENTRATE DI CALORE

L'irraggiamento solare è una grossa risorsa energetica (fotovoltaico o solare termico), ma è anche causa di problemi di durabilità dei materiali, ambientali e non ultimo di comfort. Gli alti picchi diurni di temperatura e i cicli termici giornalieri causano l'indebolimento e accelerano l'invecchiamento dei materiali isolanti, delle membrane bituminose o di altri strati di rivestimento. Nei centri abitati la radiazione assorbita sia dalle superfici delle costruzioni sia dalle strade e riemessa, nelle ore serali, sotto forma di energia termica infrarossa,

è causa del cosiddetto fenomeno "isola di calore". Ciò si traduce in un aumento di temperatura rispetto alle zone di campagne fino a 3/6 °C. Infine, il surriscaldamento intensifica lo smog fotochimico e i picchi di carico sulla rete elettrica.

Per ridurre l'ingresso di calore si può aumentare la resistenza termica della struttura. Tuttavia un aumento dello spessore dell'isolante comporterebbe una temperatura superficiale (esterna) più elevata. Ciò porterebbe l'isolante a maggiori stress a fatica, dovuti alle continue dilatazioni e contrazioni termiche, e a un più rapido degrado chimico-fisico.

Quando il ricorso alla ventilazione dei tetti o all'aumento dell'inerzia termica (ad esempio aggiunta di isolanti a elevata capacità termica o aumento della massa della struttura portante) non è possibile o non risolve il problema, è opportuno ridurre le rientrate di calore tramite sistemi alternativi. Ecco di seguito delle soluzioni per le coperture piane e inclinate.

Tetti piani: Cool roof

L'energia termica irradiata dal sole e incidente sulla superficie esterna del tetto è in parte riflessa e in parte assorbita (vedi Figura 6). Per effetto dell'assorbimento, il tetto si riscalda e un certo flusso giunge all'interno dell'ambiente abitato.

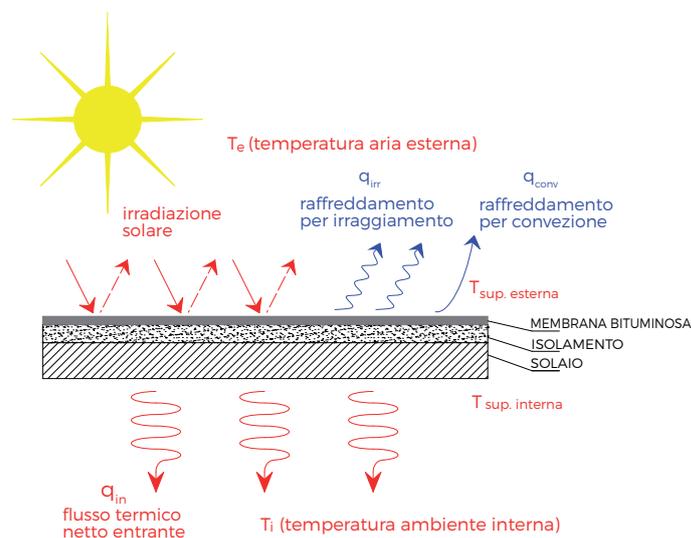


Figura 6 - Bilancio energetico attraverso la copertura

Seguendo una trattazione semplificata in regime stazionario, il calore Q assorbito dalla superficie esterna che attraversa per conduzione gli strati della copertura può essere valutato come rapporto tra la differenza di temperatura tra esterno e interno (considerando come temperatura esterna la temperatura aria-sole) e la resistenza termica totale della struttura in oggetto:

$$Q = \frac{T_{as} - T_i}{R_{tot}} = \frac{I_i \cdot \alpha_c \cdot R_{se} + (T_e - T_i)}{R_{tot}}$$

Dalla formula si evince che riducendo il coefficiente di assorbimento della superficie esterna della copertura diminuisce il flusso di calore che attraversa la copertura. I materiali con alta riflettanza solare, cioè con basso coefficiente di assorbimento α_c alle lunghezze d'onda corte ($\lambda < 4 \mu\text{m}$, corrispon-

dente all'infrarosso vicino responsabile degli aumenti di temperatura) sono in grado di ridurre il flusso di calore assorbito per irraggiamento solare. Questo spiega perché nell'Architettura Mediterranea le pareti esterne e le terrazze siano bianche e che questa sia caratterizzata dal bianco. In Tabella 4 sono riportati i coefficienti di assorbimento alle lunghezze d'onda corte α_c e lunghe α_L dei materiali di comune impiego in edilizia. Poiché tutti i corpi a temperatura al di sopra dello zero assoluto emettono radiazioni (alle temperature ordinarie sono radiazioni infrarosse di lunghezza d'onda lunga) anche la superficie esterna della copertura può irradiare verso l'atmosfera parte del calore assorbito. In effetti la superficie esterna scambia calore con l'ambiente esterno per convezione, trascurabile nelle giornate afose d'estate e in assenza di vento, ma soprattutto per irraggiamento contribuendo a

Tabella 4 - Coefficienti di assorbimento alle lunghezze d'onda corte α_c e lunghe α_L dei materiali di comune impiego in edilizia

MATERIALE	α_c	α_L
Intonaco bianco	0,12	0,91
Pittura bianca	0,20	0,91
Sabbia bianca	0,45	0,84
Pittura a olio verde	0,50	0,90
Mattoni rossi	0,55	0,92
Cemento amianto bianco	0,59	0,96
Marmo	0,60	0,90
Cemento rugoso	0,60	0,97
Pittura grigia	0,75	0,95
Pittura a olio rossa	0,74	0,90
Ardesia	0,81	0,96
Asfalto da copertura	0,93	0,96

ridurre la quantità di calore netta che attraversa la copertura. Maggiore è l'emissività del materiale nell'infrarosso lontano maggiore sarà la quantità di calore irradiata nell'atmosfera.

Un cool roof, in italiano "tetto freddo", è un rivestimento contraddistinto da un valore elevato di riflettanza solare combinato con un elevato valore dell'emissività nell'infrarosso. Pertanto è un rivestimento in grado di riflettere l'energia solare incidente e, allo stesso tempo, di cedere parte del calore assorbito nell'atmosfera per irraggiamento.

Nella pratica, un cool roof può essere ottenuto applicando alla superficie del tetto uno strato di ricoprimento esterno di colore molto chiaro, preferibilmente bianco, e con carattere non metallico (i metalli sono caratterizzati da bassi valori di emissività). Il principale svantaggio derivante dall'uso di vernici organiche o membrane è rappresentato dal degrado, talvolta molto rapido, a cui i valori di riflettanza solare sono soggetti a causa dell'azione combinata dell'invecchiamento dei materiali, dell'azione degli agenti atmosferici e dell'inquinamento dell'aria.



QUALI PRODOTTI PER I COOL ROOF?

Il mercato dei prodotti per cool roofing è oggi dominato da vernici (soprattutto acriliche) eventualmente contenenti biossido di titanio per abbattere anche lo smog. Alcune di esse vengono applicate come semplici rivestimenti, altre sono integrate in vere e proprie membrane impermeabilizzanti.

Possono offrire prestazioni notevoli arrivando a valori di riflettanza solare a nuovo intorno al 90%.

Il parametro impiegato dai produttori per descrivere le caratteristiche di tali prodotti è l'indice SRI (Solar Reflectance Index) in conformità alla norma ASTM E 1980:2011.

Esso tiene conto della riflessione solare e della emissività della superficie e descrive la capacità di una superficie irraggiata dal sole a non riscaldarsi. È definito dalla seguente relazione:

$$SRI = 100 \frac{T_b - T_s}{T_b - T_w}$$

Dove:

- T_w = temperatura stazionaria della superficie standard bianca (avente riflessione solare 80% ed emissività 0,9), espressa in K;
- T_b = temperatura stazionaria della superficie standard nera (avente riflessione solare 5% ed emissività 0,9), espressa in K;
- T_s = temperatura superficiale stazionaria, espressa in K.

Convenzionalmente vale 0 per una superficie di riferimento "nera" e 100 per una superficie di riferimento "bianca", ma può anche essere maggiore del 100%.

Più alto è il valore SRI, più bassa è la temperatura superficiale.



CARATTERISTICHE GENERALI DEI WHITE ROOFT

Verniciatura delle superfici:

- riflettanza solare > 0,8-0,9 per colore bianco
- emissività termica 0,5-0,9

Membrane polimeriche:

- riflettanza solare > 0,7 per colore bianco
- emissività termica elevata > 0,9

Granulati chiari su base asfaltata:

- riflettanza solare > 0,6 per colore bianco
- emissività termica elevata > 0,9

Piastrelle e pietre in lastra:

- riflettanza solare > 0,7-0,8
- emissività termica elevata > 0,9

Tetti metallici (alluminio, rame, ecc.) vernicati chiari:

- riflettanza solare > 0,7-0,8
- emissività termica 0,6-0,7



OCCHIO ALLA POSA, E UN PO' DI... MANUTENZIONE!

La tecnica del cool roof è utilizzata maggiormente sui tetti piani. Il principale inconveniente è rappresentato dai depositi di sporcizia a causa delle basse pendenze che non sempre garantiscono un facile scorrimento delle acque.

La scarsa velocità di deflusso, o addirittura il ristagno delle acque piovane, può degradare molto velocemente le prestazioni ottiche di una copertura a elevata riflettanza solare. Affinché un cool roof possa mantenersi pulito e conservare buone prestazioni ottiche è fondamentale che la sua superficie sia idrofobica.

Tuttavia, il problema va risolto adottando condizioni di posa che inibiscano il ristagno di acqua piovana (pendenze superiori all'1-2%, assenza di avvallamenti, ecc.) e programmando una regolare pulizia e manutenzione della copertura almeno ogni 2-3 anni.



Cool color

Nei tetti a falda la combinazione di rivestimenti in tegole o coppi di terracotta, caratterizzati da limitata capacità di riflettere l'irradiazione solare (α_c mediamente pari a 0,7), e strutture lignee, contraddistinte da ridotta inerzia termica, fa del surriscaldamento estivo di attici e ambienti mansardati un problema di non poco conto.

Ma mentre un tetto colorato di bianco non crea problemi estetici in caso di coperture piane, lo stesso non può dirsi per le coperture inclinate dominate dal rosso.

Oltre ai cool roof, di recente sviluppo sono i "cool colors", frutto dell'integrazione di pigmenti colorati nei materiali bianchi "cool", così da ottenere prodotti colorati, in grado di mantenere proprietà di elevata riflettanza ed emissività. Poiché è solo la parte di radiazione che rientra nello spettro del visibile a influenzare la risposta cromatica di una superficie, i cool colors possono avere lo stesso aspetto per l'occhio umano dei materiali tradizio-

nali, in particolare lo stesso colore, ma offrire una riflettanza solare molto più alta rispetto ai materiali comuni.

SERRAMENTI E SCHERMATURE DAL SOLE

Per limitare gli apporti gratuiti ed evitare l'effetto serra bisogna intervenire sulla parte trasparente dell'involucro.

Con lo scopo di ridurre i consumi di raffrescamento, il D.M. 26/06/2015 a seconda dell'ambito di intervento, obbliga la verifica del fattore solare equivalente e del fattore di trasmissione solare totale dei componenti finestrati.

Il progettista deve adottare opportuni sistemi di schermatura e scegliere vetrate di opportune caratteristiche energetiche specialmente per le superfici esposte a ovest dove si raggiungono le temperature più alte (per approfondimenti vedi, su bigmat.it, la "Normativa sull'efficienza energetica: le nuove regole del D.M. 26/06/2015".



IL D.M. 26/06/2015 E LE ATTENZIONI VERSO IL SURRISCALDAMENTO ESTIVO

Il Decreto Requisiti Minimi pone molta attenzione al problema del surriscaldamento estivo in particolare per le coperture.

Al fine di limitare i fabbisogni energetici per la climatizzazione estiva, di contenere la temperatura interna degli ambienti e di evitare il surriscaldamento a scala urbana, per le strutture di copertura degli edifici è obbligatoria la verifica dell'efficacia, in termini di rapporto costi-benefici, dell'utilizzo di:

- A.** Materiali a elevata riflettanza solare per le coperture (cool roof), assumendo per questi ultimi un valore di riflettanza solare non inferiore a:
 - 0,65 nel caso di coperture piane;
 - 0,30 nel caso di coperture a falde;
- B.** Tecnologie di climatizzazione passiva (a titolo esemplificativo e non esaustivo: intercapedine di ventilazione e coperture a verde).

Vetri basso emissivi e selettivi: caratteristiche energetiche del vetro

Il serramento è caratterizzato da due parametri energetici:

- **trasmittanza termica (U)**, che dà indicazione sulle dispersioni per trasmissione attraverso il serramento (più bassa è meglio è);
- **fattore solare (g) del vetro** (vedi Figura 7), che rappresenta la quota di energia solare che entra nell'ambiente rispetto all'energia incidente.

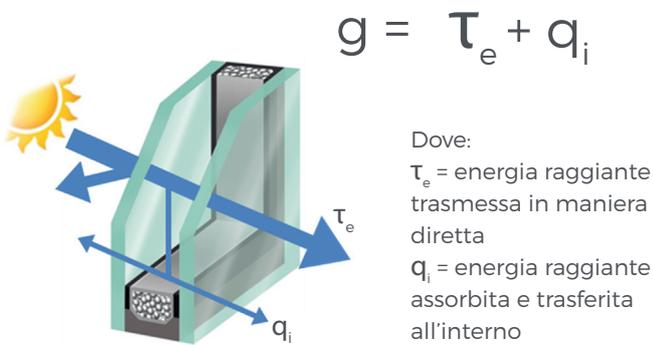


Figura 7 - Descrizione grafica del fattore solare g

Gli apporti solari gratuiti, favorevoli in inverno e penalizzanti in estate, crescono con l'aumentare di g.

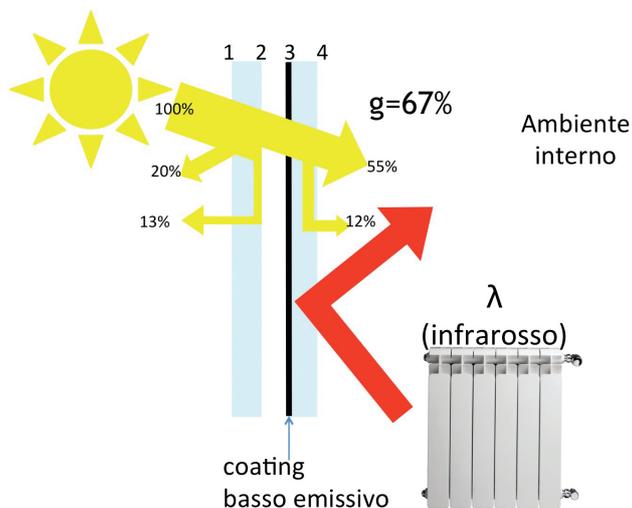


Figura 8 - Rappresentazione di un vetro basso emissivo

I serramenti basso emissivi a risparmio energetico sono caratterizzati dall'applicazione sulla faccia 3 di un trattamento basso emissivo (low-e) di ossidi metallici (argento, zinco, ecc.) che abbassa il valore dell'emissività del vetro dal 90% fino anche al 2%. In questo modo il serramento è trasparente alla radiazione solare ma opaco alla radiazione termica generata dai caloriferi (radiazione infrarossa di lunghezza d'onda lunga) che viene riflessa nell'ambiente interno (vedi Figura 8).

I vetri selettivi (vedi Figura 9) sono dei vetri basso emissivi riflettenti, in cui il trattamento low-e è applicato sulla faccia 2.

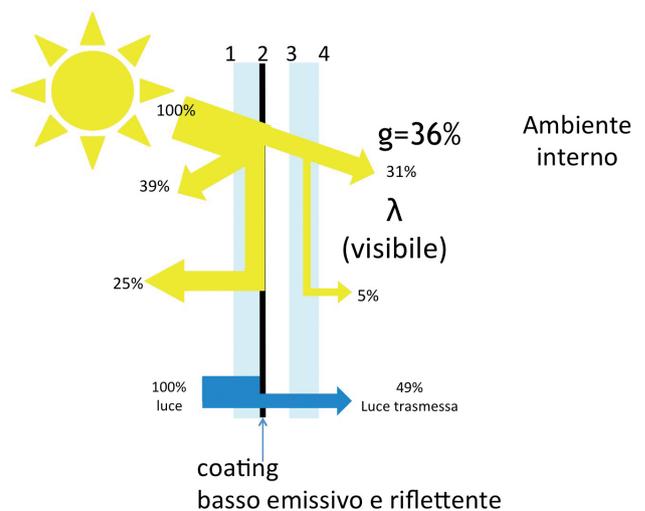


Figura 9 - Rappresentazione di un vetro basso selettivo

Sono caratterizzati da un fattore solare g più basso dei precedenti e inoltre il trattamento realizzato è in grado di intercettare le radiazioni dell'infrarosso vicino lasciando passare la lunghezza d'onda del visibile. In tal modo il calore rimane all'esterno senza penalizzare la luminosità degli ambienti.

Tutto ciò si traduce in una riduzione dei carichi termici estivi, in una buona trasmittanza termica e in un buon comfort visivo.

Schermature

Gli schermi orizzontali (ortogonali alla facciata), a soletta o a doghe come le brise soleil, sono ideali d'estate per le facciate esposte a sud, visto che il sole alle nostre latitudini, alle ore 12, ha un'altezza (angolo solare) tra i 70° e gli 80°. Garantiscono gli apporti gratuiti in inverno in quanto l'inclinazione dei raggi è bassa e non sono intercettati dallo schermo.



Schermatura orizzontale

Le schermature verticali sono più efficaci per le facciate esposte a est e a ovest in quanto la radiazione, che si manifesta rispettivamente al mattino e al pomeriggio, è caratterizzata da un'angolazione più bassa di quella a sud. Consentono inoltre una buona comunicazione visiva tra ambiente interno ed esterno. Al contrario le schermature orizzontali a doghe non sarebbero efficaci in quanto, comunque siano inclinate le doghe, creerebbero problemi di abbagliamento.



Schermatura verticale

PRESTAZIONI IGROMETRICHE E RISCHIO CONDENZA

Attraverso le strutture dell'involucro, oltre al passaggio di calore, si ha passaggio di vapore. I due fenomeni presentano delle analogie. Così come la differenza di temperatura è responsabile del flusso di calore e i materiali si oppongono per mezzo della loro resistenza termica, allo stesso modo il flusso di vapore è determinato dalla differenza di pressione di vapore (tra ambiente interno e ambiente esterno) e i materiali si oppongono in funzione del loro coefficiente di resistenza al passaggio del vapore (μ).

Il problema della condensazione del vapore, sia che avvenga sulle superfici delle strutture sia che avvenga all'interno delle stesse, rappresenta un rischio per la durabilità delle strutture stesse.

A contatto con l'umidità tutti i materiali peggiorano le loro caratteristiche termiche: più aumenta il contenuto d'acqua, più aumenta la conducibilità termica (vedi Capitolo 2).

Sono soggetti a variazioni dimensionali con rigonfiamenti e deformazioni fino ad arrivare a rottura o degrado organico.

Non è raro infatti imbattersi nella formazione di muffe, o assistere alla disgregazione di intonaci e murature proprio a causa dei fenomeni suddetti. Inoltre, le muffe sono dannose per la salute. L'inhalazione delle spore delle muffe possono essere la causa, in soggetti con basse difese immunitarie, di allergie, di infezioni delle vie respiratorie, di dolori articolari e provocare danni cerebrali (cambiamenti di umore, perdita di concentrazione, ansie, ecc.).

Inoltre sono tossiche e cancerogene in quanto emettono tossine pericolose a causa delle sostanze chimiche in esse contenute come i chetoni e gli alcoli che sono l'origine del tipico odore di muffa.



UMIDITÀ RELATIVA

L'aria contiene sempre vapore acqueo in quantità variabile fino a un valore massimo che dipende dalla temperatura. Più alta è la temperatura maggiore è la quantità di vapore che l'aria può contenere.

Il quantitativo (grammi) di vapore presente nell'ambiente (1 kg di aria secca) viene detto "umidità assoluta". Tuttavia, si è soliti esprimere l'umidità come Umidità Relativa (UR%), ovvero come rapporto percentuale tra il vapore presente e il massimo quantitativo che potrebbe essere contenuto a quella temperatura. L'umidità relativa può essere espressa, in maniera del tutto equivalente in termini di pressioni, come rapporto tra la pressione di vapore e la pressione di vapore saturo. Infatti, il vapore è un gas e come tale è caratterizzato da una certa pressione (pressione di vapore) che dipende dalla temperatura ed è massima in condizioni di saturazione (pressione di saturazione).

Il concetto dell'umidità relativa può essere facilmente spiegato ricorrendo a una analogia idraulica per mezzo di un recipiente contenente acqua.

Il recipiente rappresenta l'ambiente, mentre l'altezza la temperatura. Più è alto il recipiente più alta è la temperatura. Il livello di liquido rappresenta il vapore acqueo presente (umidità assoluta), che rapportato all'altezza del recipiente indica l'umidità relativa. Nella figura A, a parità di temperatura si avrà una maggiore UR laddove c'è un maggiore contenuto di vapore fino a raggiungere il massimo (UR 100%). Oltre tale valore un eccesso di umidità si trasforma in rugiada e condensa.

Considerando due recipienti di altezze differenti, quindi due diverse temperature, la stessa quantità di liquido occupa una percentuale differente del volume.

Overo, a parità di quantità assoluta di vapore se la temperatura dell'aria è diversa si ottiene una differente umidità relativa degli ambienti (nella figura B il 40% alla T1 e 90% alla T2).

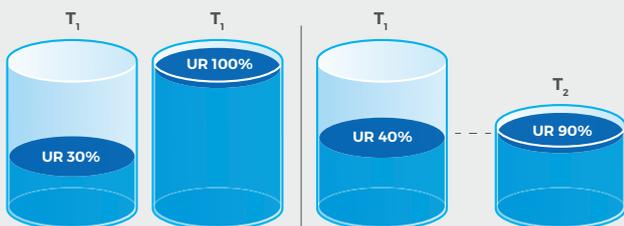


Fig. A

Fig. B



MUFFA E CONDENSA SUPERFICIALE

L'insorgere di muffa e la formazione di condensa superficiale sono due fenomeni che dipendono in maniera diversa dalla temperatura della parete. La muffa è un fenomeno che si sviluppa in tempi lunghi, mentre la condensa può essere anche solo occasionale e di breve durata.

Si ha **condensa** quando la temperatura della parete si abbassa fino a raggiungere il punto di rugiada tale per cui il vapore si trova in condizioni di saturazione. Un esempio tipico è la formazione di condensa sulle superfici vetrate nella stagione invernale.



La formazione di **muffa** dipende da quanto tempo la temperatura della parete rimane al di sotto di un certo valore limite.



Lo studio biologico del fenomeno e delle varie specie fungine e di muffe mostra che le condizioni ottimali per attecchire si hanno quando l'umidità relativa sulla superficie è, mediamente, dell'80% (vedi Tabella 5).

Tabella 5 - Condizioni ambientali per il proliferare di muffe e funghi [tratto da ANIT, "Muffa, condense e ponti termici"]

SPECIE MUFFA	UR MINIMA NECESSARIA PER LA CRESCITA
Alternaria alternata	85%
Aspergillus versicolor	75%
Penicillium chrysogenum	79%
Stachybotrys atra	94%
Mucor plumbeus	93%

Rischio condensa superficiale

e formazione muffa

La condensazione dell'aria sulla superficie di una parete può avvenire quando si verificano una delle seguenti condizioni:

1. la temperatura superficiale della struttura è inferiore alla temperatura di rugiada;
2. il quantitativo di vapore presente nell'ambiente aumenta fino ad arrivare a saturazione (UR 100%).

Con riferimento all'analogia idraulica, **per scongiurare il rischio condensa** si possono attuare due strategie:

1. alzare i bordi del recipiente, che significa aumentare la temperatura superficiale della struttura incrementando il livello di isolamento termico;
2. abbassare il livello del liquido, che vuol dire asportare il vapore tramite ventilazione naturale (ricambio d'aria dai serramenti) o tramite ventilazione meccanica controllata (VMC).

Per scongiurare il rischio di formazione della muffa è cautelativo supporre un limite al contenuto di UR sulle superfici delle strutture fredde pari all'80%.

Pertanto, negli edifici residenziali, fissando le condizioni ambientali interne di progetto a 20 °C e UR 65%, le condizioni di rischio per la condensa superficiale si presentano quando la temperatura scende al di sotto dei 13,2 °C, mentre per la formazione delle muffe al di sotto dei 16,7 °C (vedi box diagramma psicrometrico).

RISCHIO CONDENZA INTERSTIZIALE

La verifica di formazione della condensa all'interno della struttura viene effettuata confrontando la pressione di vapore nei materiali componenti la struttura con la corrispondente pressione di saturazione secondo il metodo grafico di Glaser ai sensi della norma UNI EN 13788 (vedi esempio in Figura 10). Noto l'andamento delle temperature nella struttura (inversamente proporzionale alle

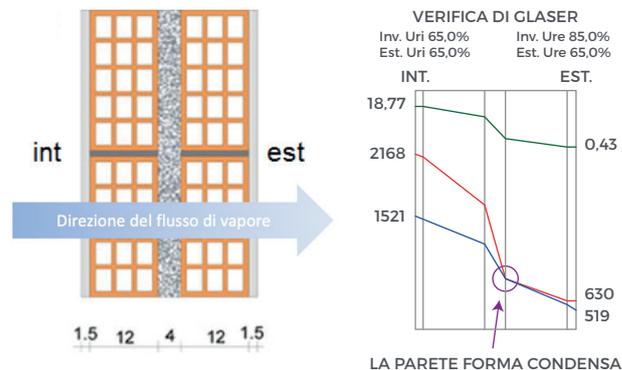


Figura 10 – Esempio di diagramma di Glaser

La spezzata di colore verde rappresenta l'andamento della temperatura (la pendenza è maggiore in corrispondenza dell'isolante in quanto ha una resistenza termica maggiore degli altri materiali). La spezzata rossa è la curva della pressione di vapore saturo, mentre quella blu è la pressione di vapore nei materiali. Il punto di intersezione della curva blu con quella rossa indica formazione di condensa. Come era prevedibile immaginare questa si forma sul lato freddo dell'isolante termico che causa il brusco abbassamento di temperatura.

resistenze termiche dei materiali), per mezzo dei diagrammi psicrometrici, è semplice ricavare l'andamento della pressione di saturazione (linea rossa).

La parete non presenterà fenomeni di condensa interstiziale se in ogni strato la pressione di vapore è sempre al di sotto di quella di saturazione.

Mentre con il DPR 59/09 era consentito un minimo di condensazione purché evaporasse nella stagione calda, con il nuovo D.M. Requisiti Minimi la verifica deve essere soddisfatta in tutti i mesi dell'anno.

Il rischio di formazione della condensa è legata al posizionamento nella stratigrafia dei materiali.

I materiali, e in particolare gli isolanti, si comportano in maniera differente nei confronti dell'umidità. Alcuni sono più traspiranti altri meno.

Una corretta progettazione dovrebbe prevedere sempre:

- **il posizionamento degli strati a maggiore resistenza al passaggio di vapore il più possibile verso l'interno.** In questo modo il vapore viene trattenuto all'inizio della stratigrafia dove le temperature sono più alte e quindi si riduce il rischio di raggiungimento delle condizioni di saturazione

- **il posizionamento degli strati a maggiore resistenza termica (e quindi dell'isolante) il più possibile verso l'esterno.** In questo modo la maggior parte degli strati restano nella zona calda e il vapore avrà meno possibilità di raggiungere la temperatura di rugiada. Nel caso in cui l'isolante debba essere necessariamente posto all'interno potrebbe essere prevista una barriera al vapore a protezione dell'isolante stesso.

L'IMPORTANZA DELLA VENTILAZIONE DEGLI AMBIENTI

Nella verifica igrometrica, la normativa non prende in esame i casi in cui si possono avere aumenti di produzione di vapore ma parte dal presupposto che le condizioni di progetto restino sempre costanti.

Tenendo presente che una famiglia produce mediamente 12/18 litri di vapore al giorno (igiene

personale, cottura cibi, sudorazione, bucato e piante) e che l'involucro è in grado di smaltirne solo una piccolissima quantità (circa il 2-3%), **la ventilazione degli ambienti è l'unico rimedio efficace nei confronti dei fenomeni di condensazione e formazione di muffe.**

Inoltre, l'adozione di elementi che garantiscono una perfetta tenuta all'aria (ad esempio le guarnizioni dei serramenti che annullano quegli spifferi che assicuravano un minimo di ricambio d'aria) associata alla cattiva abitudine degli abitanti, poco propensi all'apertura dei serramenti per evitare il raffreddamento degli ambienti, fa sì che anche nelle moderne case energeticamente efficienti, si riscontrino problemi di formazione di muffe. Ciò a causa non tanto di bassi valori della temperatura ma per eccesso di produzione di vapore.

In queste condizioni risulta imprescindibile il ricorso alla ventilazione meccanica controllata (VMC).

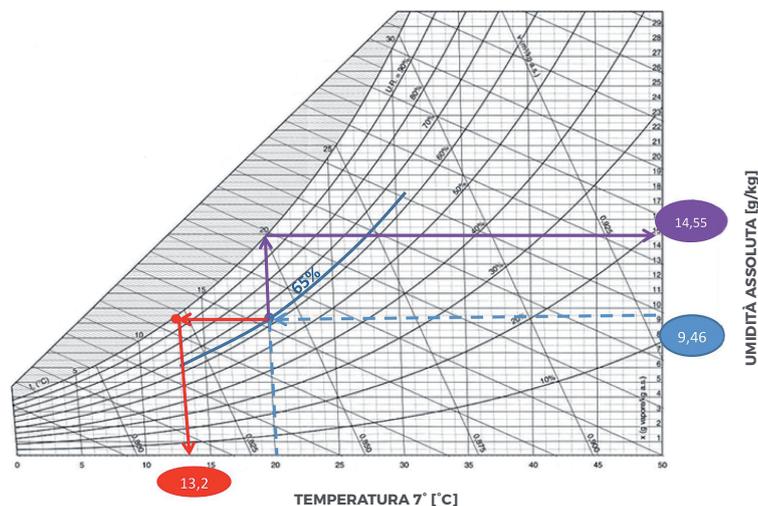


DIAGRAMMA PSICROMETRICO

Il diagramma psicrometrico è un diagramma che descrive le condizioni dell'aria correlando, in ascisse, le temperature, nelle ordinate, l'umidità assoluta e, infine, nelle curve l'umidità relativa.

Se ad esempio nell'aria sono presenti 9,46 g/kg di vapore (umidità assoluta), significa quanto segue.

- A 20 °C l'UR è del 65%. Sul diagramma è il punto corrispondente all'incrocio della retta orizzontale blu (tratteggiata) dell'umidità assoluta con quella blu verticale (tratteggiata) delle temperature e che giace su una e una sola curva di UR (quella del 65%). Matematicamente il valore lo si può calcolare conoscendo il valore del vapore a saturazione a 20 °C (punto di incrocio della retta viola delle temperature con la curva di saturazione che corrisponde al valore 14,55 g/kg sulle ordinate) e facendone il rapporto $9,46/14,55$.
- La temperatura di rugiada corrispondente è di 13,2 °C. La retta rossa del vapore 9,36 g/kg incontrerà la curva di saturazione in punto. Il valore sulle ascisse corrisponde alla temperatura di rugiada.



2.



ISOLANTI E CARATTERISTICHE

I materiali presentano caratteristiche e prestazioni funzionali molto diverse tra loro. Spesso accade che, per abitudine, limitata conoscenza, paura di non sbagliare o costi del materiale, si utilizzi lo stesso prodotto con le medesime modalità applicative.

Un buon progettista deve saper confrontare le peculiarità di materiali e isolanti per farne un uso appropriato e raggiungere così l'obiettivo del progetto: comfort e soddisfazione di chi abiterà quell'ambiente.

SCEGLIERE L'ISOLANTE TERMICO

La conducibilità termica λ [W/mK] esprime l'attitudine di un materiale a condurre il calore. Il potere isolante è tanto migliore quanto più basso è il valore di λ .

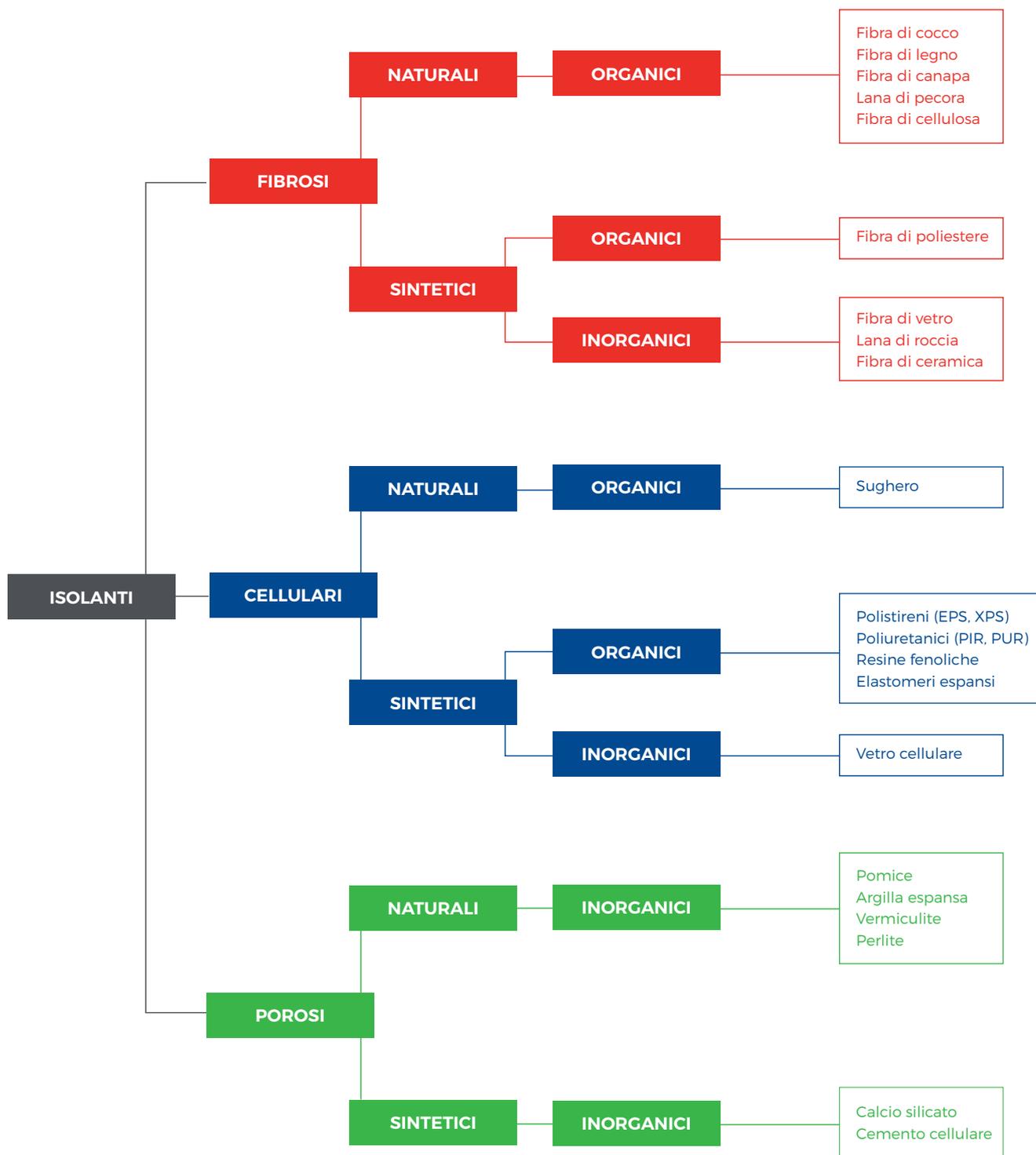
Tuttavia la scelta dell'isolante, oltre che dalla sua conducibilità, dipende dai requisiti funzionali che deve assolvere nella struttura. In certi contesti il requisito prevalente potrebbe essere la massa per privilegiare l'elevato sfasamento termico, in altri la reazione al fuoco, oppure la resistenza a compressione o una maggiore diffusione al vapore. **È di estrema importanza conoscere caratteristiche e dati tecnici dei materiali isolanti per poter effettuare le scelte più adeguate al contesto specifico di applicazione.**





TIPOLOGIA DEGLI ISOLANTI TERMICI

Gli isolanti possono essere distinti, in base alla materia prima usata, in organici e inorganici e, a loro volta, in base al processo di trasformazione, in naturali e sintetici, e, per finire, in relazione alla loro struttura in fibrosi, porosi e cellulari.



PRESTAZIONI MECCANICHE

La resistenza meccanica a compressione è uno dei principali requisiti da valutare. L'isolante schiacciandosi, per effetto dei carichi, offre una resistenza termica minore ($R=s/\lambda$) e può causare fessurazioni in altre parti della struttura.

Si pensi, ad esempio, agli impieghi sotto massetto e in copertura in cui l'uso di pannelli portanti è fondamentale per garantire la pedonabilità o carrabilità. O ancora alla zoccolatura dei sistemi a cappotto dove è richiesta una resistenza maggiore agli urti.

La resistenza a compressione al 10% di deformazione è un indice del carico diffuso che il prodotto è in grado di sopportare con una deformazione massima del 10%. In determinate applicazioni, come l'isolamento delle platee di fondazione o

nelle coperture adibite a parcheggio per automezzi, è importante conoscere la resistenza a compressione a lungo termine con deformazione (schiacciamento) del 2% in 50 anni. Questo perché, in relazione ai carichi permanenti agenti sulla struttura e alla vita utile della struttura, la sostituzione del pannello nel tempo non è cosa semplice.

Un terzo parametro che caratterizza il comportamento a compressione dell'isolante è **la resistenza al carico concentrato Fp** (a punzonamento) che può essere determinato dal carico pedonale, da assi e da altri materiali impiegati negli interventi di installazione.

Anche la resistenza a trazione assume una certa rilevanza, specialmente per le applicazioni a cappotto.



RESISTENZA MECCANICA: NORMATIVE UNI E CODICI DI DESIGNAZIONE

1. Resistenza a compressione al 10% di schiacciamento

La normativa di riferimento è la UNI EN 826 "Isolanti prodotti in fabbrica - Determinazione del comportamento a compressione". Fornisce come risultati della prova la sollecitazione alla quale il pannello si deforma con schiacciamento del 10%, o la resistenza a compressione massima raggiunta quando la deformazione a snervamento o rottura è minore del 10%. Nelle schede tecniche e nelle etichette CE deve essere riportato il più piccolo valore secondo le seguenti modalità:

- CS(10)100 = sollecitazione che provoca la deformazione del 10% è di 100 kPa (ed è minore della resistenza massima a compressione);
- CS(Y)100 = è la resistenza a compressione e vale 100 kPa (si tenga conto che non tutti gli isolanti arrivano elasticamente al 10% della deformazione ma possono rompersi prima);
- CS(10\Y)100 = non è possibile individuare il valore minimo tra i due sopra descritti ed entrambi valgono 100 kPa.

2. Resistenza a compressione a lungo termine con una deformazione massima del 2%

La normativa di riferimento è la UNI EN 1606 "Isolanti termici per edilizia - Determinazione dello scorrimento viscoso a compressione". Il metodo di calcolo permette in base alla durata della prova (122, 304, 608 giorni) di estrapolare il comportamento rispettivamente a 10, 25 e 50 anni e di valutare il livello di carico che il corrispondente

manufatto può sopportare nel periodo di vita mantenendo caratteristiche fisico-meccaniche e dimensionali sostanzialmente simili a quelle del campione iniziale e adeguate ai requisiti dell'applicazione.

Nelle schede tecniche e nelle etichette CE il comportamento viscoso viene indicato con la sigla $CC(i1/i2/y)\sigma_c$ dove $i1$ è la deformazione totale (espressa in % o mm), $i2$ è la deformazione viscosa (espressa in % o mm) dopo y anni e σ_c è il valore della pressione (in kPa) permanente costante. Esempio:

- CC(2/1,5/50)250 = durante un tempo di applicazione di 50 anni di un carico costante di 250 kPa, il pannello mostra una deformazione viscosa dell'1,5% con una riduzione complessiva di spessore del 2%.

3. Resistenza a carico concentrato

La normativa di riferimento è la UNI EN 12430 "Determinazione del comportamento sotto carico concentrato". Fornisce come risultati i millimetri di deformazione a seguito dell'applicazione di un carico concentrato (in Newton). Nelle schede tecniche e nell'etichetta CE viene indicato con la sigla:

- PL(i)s, dove i rappresenta la deformazione in mm e s il carico massimo in intervalli di 50 N.

4. Resistenza a trazione

La normativa di riferimento è la UNI EN 1607 "Determinazione della resistenza a trazione perpendicolare alle facce del prodotto". Viene riportata nelle schede tecniche e nell'etichetta CE con il codice:

- TR50, dove il numero rappresenta la sollecitazione espressa in kPa.

INFLUENZA DELL'ACQUA SULLE PRESTAZIONI E SULLA DURABILITÀ

L'acqua è il nemico numero uno degli isolanti. Con un lambda da 10 a 20 volte maggiore determina un peggioramento del potere isolante e delle prestazioni a lungo termine (durabilità e resistenza meccanica). Per questo motivo, nelle applicazioni quali zoccolature dei sistemi a cappotto, tetti rovesci o platee di fondazione, è fondamentale scegliere un isolante resistente all'umidità e all'acqua.

Nella Figura 1 si può notare come una piccolissima percentuale d'acqua (5-10% del volume complessivo) porti a un peggioramento della conducibilità termica che nel caso di materiali igroscopici tende a essere doppia rispetto a quella iniziale.

Quanto più l'assorbimento di umidità è basso, tanto minore è il degrado delle prestazioni isolanti. Gli isolanti a celle chiuse aiutano il materiale a resistere alla penetrazione di umidità.

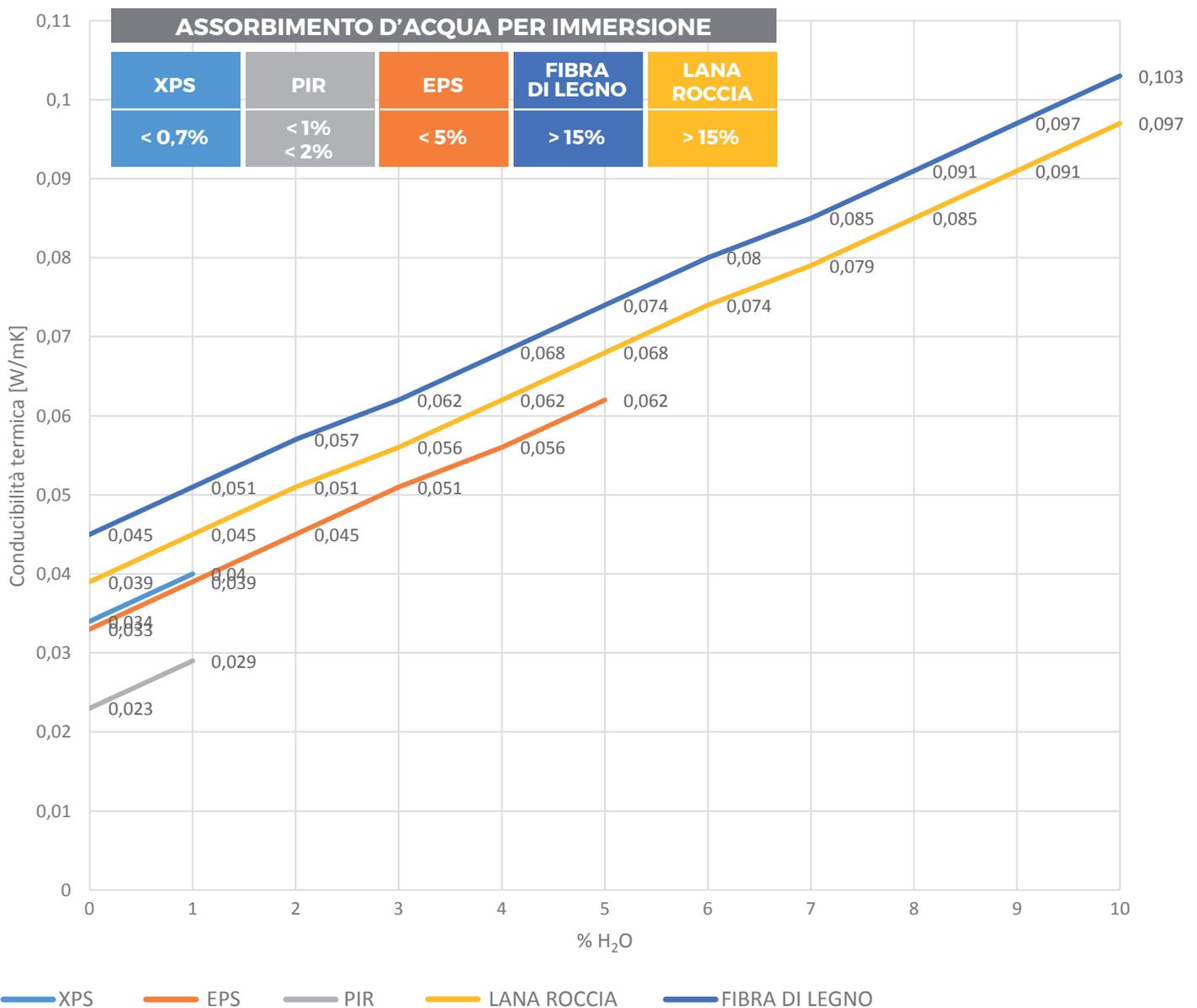


Figura 1 - Variazione della conducibilità termica in funzione dell'aumento del contenuto di umidità del materiale [fonte UNI 10456 - tratto da articolo di Andrea Ursini Casalena "Assorbimento d'Acqua e Conduttività Termica dei Materiali Isolanti"]



RESISTENZA ALL'ACQUA: NORMATIVE UNI E CODICI DI DESIGNAZIONE

1. Assorbimento d'acqua per immersione

La normativa di riferimento è la UNI EN 12087 "Determinazione dell'assorbimento d'acqua a lungo termine: prova attraverso immersione". Il parametro viene determinato misurando la massa dei provini prima e dopo immersione totale per 28 giorni e viene indicato come volume %. Il codice di designazione nelle schede tecniche e nell'etichetta CE è:

- **WL(T)i** dove "i" è l'assorbimento percentuale. Ad esempio WL(T)3 vuol dire che il materiale assorbe una quantità inferiore al 3% in volume di acqua.

2. Assorbimento d'acqua per diffusione

La normativa di riferimento è la UNI EN 12088 "Determinazione dell'assorbimento d'acqua a lungo termine: prova per diffusione". Il parametro indica la quantità di acqua che il prodotto è in grado di assorbire quando è esposto a umidità molto elevata (quasi il 100% su tutte e due le facce). Viene rappresentato, nelle schede tecniche e nell'etichetta CE, con il seguente codice:

- **WD(V)i** dove "i" è l'assorbimento percentuale. Ad esempio WL(V)5 vuol dire che il materiale assorbe una quantità inferiore al 5% in volume di acqua.

3. Resistenza ai cicli di gelo/disgelo

La normativa di riferimento è la UNI EN 12091 "Determinazione della resistenza al gelo-disgelo". È un parametro che fornisce indicazioni sulla riduzione della resistenza a compressione (al 10% di deformazione) a seguito dei cicli gelo/disgelo. Viene determinata come variazione della quantità di acqua assorbita e come variazione della resistenza a compressione dopo aver sottoposto l'isolante a 300 cicli successivi da condizioni di secco a -20 °C a condizioni di umido a +20 °C. Tale parametro viene indicato nelle schede tecniche e nell'etichetta CE attraverso i codici:

- **FTCDi** dove "CD" indica che la prova gelo/disgelo è avvenuta dopo la prova di assorbimento d'acqua per diffusione, e "i" è un numero che indica il livello raggiunto in funzione dell'assorbimento percentuale;
- **FTDIi** dove "DI" indica che la prova gelo/disgelo è avvenuta dopo la prova di assorbimento d'acqua per immersione, e "i" è un numero che indica il livello raggiunto in funzione dell'assorbimento percentuale.

Comparazione dei valori di assorbimento per immersione a lungo termine per alcuni isolanti (valori indicativi)

ASSORBIMENTO D'ACQUA PER IMMERSIONE (VALORI MASSIMI)	i [%]
XPS	< 0.7
EPS	3-5
PUR	2-3
Vetro cellulare	0

Comparazione dei valori di assorbimento per diffusione a lungo termine per alcuni isolanti (valori indicativi)

ASSORBIMENTO D'ACQUA PER DIFFUSIONE (VALORI MASSIMI)	i [%]
XPS	< 3
EPS	5-20
PUR	< 8
Vetro cellulare	0

Comparazione dei valori di variazione di assorbimento d'acqua e della resistenza a compressione dopo cicli di gelo/disgelo per alcuni isolanti (valori indicativi)

	ASSORBIMENTO D'ACQUA [%]	VARIAZIONE RESISTENZA A COMPRESSIONE [%]
XPS	< 1	< 10
EPS	< 10-20	< 20
PUR	< 15	< 20
Vetro cellulare	0	0

Più alto è il livello, migliore è il comportamento.

Ad esempio:

- FTCD1 indica che l'assorbimento è minore del 2% dopo prova per diffusione;
- FTCD2 indica che l'assorbimento è minore del 1% dopo prova per diffusione.

COMPORAMENTO ACUSTICO

Potrebbe essere necessario associare alle caratteristiche termiche quelle acustiche (ad esempio pareti di separazione tra diverse unità abitative, isolamento acustico di facciata, ecc.). In generale l'isolamento acustico presenta differenti necessità da quelle termiche: un ottimo isolante termico come il polistirene si comporta con il suono in modo d'amplificarlo. Gli isolanti acustici, che sono in generale materiali a cellule aperte, sono spesso pessimi isolanti termici e viceversa. Gli isolanti fibrosi come le fibre minerali, i poliuretani espansi a celle aperte, le fibre vegetali, le fibre di poliestere, sono materiali fonoassorbenti (cioè dissipano nelle loro cavità d'aria l'energia trasportata dal suono in attrito viscoso determinando un impercettibile aumento di temperatura).

Tra i parametri da prendere in considerazione la resistività al flusso d'aria dei materiali porosi, caratteristica intrinseca del materiale indipendente dalle dimensioni e dallo spessore, rappresenta la proprietà dei materiali di lasciarsi penetrare dall'aria e di impedirne il passaggio dal lato opposto e consente di valutare indirettamente le proprietà di assorbimento e attenuazione acustico.



VALORI DI RESISTIVITÀ AL FLUSSO D'ARIA

Per valori troppo bassi della resistività al flusso d'aria l'isolante non fornirebbe una attenuazione acustica sufficiente. Per valori troppo alti la trasmissione del rumore avverrebbe prevalentemente per via solida a causa dell'estrema compattezza del materiale.

I valori indicativi della resistività al flusso d'aria potrebbero essere compresi tra 5 e 10 kPa·s/mq.

REAZIONE AL FUOCO

La reazione al fuoco indica il comportamento dell'isolante quando è esposto direttamente a una fiamma di innesco.

È una proprietà molto complessa che dipende da vari parametri, di cui i principali sono:

- **infiammabilità:** intesa come capacità di un materiale di entrare e permanere in stato di combustione, con emissione di fiamme e/o durante l'esposizione a una sorgente di calore;
- **velocità di propagazione delle fiamme:** intesa come la velocità con la quale il fronte di fiamma si propaga in un materiale;
- **gocciolamento:** inteso come la capacità di un materiale di emettere gocce di materiale fuso dopo e/o durante l'esposizione a una sorgente di calore;
- **post-incandescenza:** presenza di zone incandescenti dopo lo spegnimento della fiamma (ad esempio brace) che potrebbero innescare nuovamente il fuoco;
- **sviluppo di calore nell'unità di tempo:** inteso come la quantità di calore emessa nell'unità di tempo da un materiale in stato di combustione (potere calorifico);
- **produzione di fumo:** intesa come la capacità di un materiale di emettere un insieme visibile di particelle solide e/o liquide in sospensione nell'aria risultanti da una combustione incompleta in condizioni definite;
- **produzione di sostanze nocive:** intesa come capacità di un materiale di emettere gas e/o vapori in condizioni definite di combustione.



POTERE CALORIFICO SUPERIORE

I prodotti a ridotto potere calorifico superiore permettono di limitare l'infiammabilità e la propagazione del fuoco.

In tabella sono riportati alcuni valori di potere calorifico superiore dei materiali [fonte ANIT - dati reperiti da letteratura tecnica].

MATERIALE	POTERE CALORIFICO [Mj/kg]
Lane minerali	1,25
Legno	17,5
Sughero	20
Poliuretano	23
Polistirene	32-42
Bitume	40



La prestazione di reazione al fuoco viene definita dal sistema delle Euroclassi (norma UNI EN 13501-01) sulla combinazione di diversi test armonizzati (UNI EN 11925-2 e UNI EN 13823). Secondo tale norma gli isolanti sono raggruppati in 7 classi (vedi Tabella 1) come qui di seguito descritto.

- **La classe al fuoco F** è attribuita a prodotti per i quali non si determina la reazione al fuoco. Possono appartenere a questa classe anche materiali che, pur essendo costituiti da prodotti che hanno un'ottima reazione al fuoco, sono accoppiati o rivestiti con materiali combustibili.
- **Le classi di reazione al fuoco dalla E alla B s(x) d(x)** sono attribuite a prodotti di natura organica o

test SBI è integrato con la misura del potere calorimetrico (UNI EN 1716) e la prova di incombustibilità (UNI EN 1182).

Oltre alla classe di reazione al fuoco, sono attribuiti ai materiali **il livello di produzione di fumo** (indicato con il simbolo "s" (smoke) seguito da un numero) e **l'attitudine a rilasciare gocce incandescenti** (indicata con la lettera "d" (drops) seguita da un numero vedi Tabella 2).

Così si potrà apprezzare la differenza tra due prodotti entrambi di classe B aventi il primo s1, d0 e il secondo s1, d1: il primo potrà essere applicato a soffitto nelle vie di esodo, il secondo no.

Tabella 1 - Euroclasse di reazione al fuoco e metodi di prova

		EUROCLASSE	METODO DI PROVA	METODI DI PROVA ALTERNATIVI O CLASSIFICAZIONI AGGIUNTIVE
INORGANICI	A1	Incombustibile	UNI EN ISO 1182 UNI EN ISO 1716	
	A2	Incombustibile	UNI EN ISO 1182	UNI EN ISO 1716 UNI EN ISO 13823 (SBI)
ORGANICI	B	Materiali combustibili non infiammabili o difficilmente infiammabili	UNI EN ISO 13823 (SBI) UNI EN ISO 11925 (esposizione 30")	Produzione di fumo (s) Gocce/particelle ardenti (d)
	C		UNI EN ISO 13823 (SBI) UNI EN ISO 11925 (esposizione 30")	Produzione di fumo (s) Gocce/particelle ardenti (d)
	D	Materiali combustibili normalmente infiammabili	UNI EN ISO 13823 (SBI) UNI EN ISO 11925 (esposizione 30")	Produzione di fumo (s) Gocce/particelle ardenti (d)
	E		UNI EN ISO 13823 (SBI) UNI EN ISO 11925 (esposizione 15")	Gocce/particelle ardenti (d)
	D	Prodotti non classificabili	Reazione non determinata	

inorganica a elevato contenuto organico. La classe al fuoco E si attribuisce eseguendo un test di piccola fiamma, mentre le classi dalla D alla B si attribuiscono sulla base del metodo di prova definito dalla norma armonizzata UNI EN 13823 (SBI), eseguendo un pre-test di piccola fiamma della durata di 30 secondi.

- **La classe di reazione al fuoco A1 e A** è attribuita a prodotti di natura inorganica. In questo caso il

Tabella 2 - Classificazione accessoria per la reazione al fuoco

CLASSE ACCESSORIA		DEFINIZIONE LIVELLO	
Livello emissioni di fumo durante la combustione	s	1	Quantità e velocità di emissioni assenti o deboli
		2	Quantità e velocità di emissioni di media intensità
		3	Quantità e velocità di emissioni elevate
Livello emissioni di gocciolamento durante la combustione	d	0	Nessun gocciolamento
		1	Lento gocciolamento
		2	Elevato gocciolamento

Ciò è importante poichè le prescrizioni legislative per le attività sottoposte a prevenzione incendi prevedono, sia per i prodotti da costruzione sia per i materiali isolanti, diversi livelli prestazionali in funzione della destinazione d'uso dell'edificio, del tipo di ambiente dove sono installati (vie di esodo o

altri ambienti) e del tipo di applicazione (pavimento, parete o copertura). Nel caso degli isolanti è prevista un'ulteriore differenziazione sulla base delle modalità di installazione: a vista (applicazione poco comune nella normale pratica edilizia) o protetti da altri materiali. In Tabella 3 si riportano le

Tabella 3 - Euroclassi di reazione al fuoco di isolanti combustibili installati in attività sottoposte a prevenzione incendi (D.M. 15/3/2005 e D.M. 16/2/2009)

		APPLICAZIONE	EUROCLASSE DEL MATERIALE PROTETTIVO	EUROCLASSE DEL MATERIALE ISOLANTE
PRODOTTI ISOLANTI PROTETTI DA ALTRI MATERIALI	VIE DI ESODO	Pavimenti e pareti	(A _{2,FL} -s1), (B _{FL} -s1), (C _{FL} -s1) (A2-s1;s2-d0), (A2-s1-d1), (B-s1;s2-d0), (B-s1-d1)	(A2-s1;s2-d0), (A2-s1-d1), (B-s1;s2-d0), (B-s1-d1)
		Soffitti	(A _{2,FL} -s1), (B _{FL} -s1), (C _{FL} -s1) (A2-s1;s2-d0), (A2-s1-d1), (B-s1;s2-d0), (B-s1-d1)	(A2-s1;s2-d0), (B-s1;s2-d0)
		Tutti gli impieghi	Classe di resistenza al fuoco EI30	(A2-s1;s2;s3- d0;d1;d2), (B-s1;s2;s3- d0;d1;d2), (C-s1;s2;s3- d0;d1;d2), (D-s1;s2-d0;d1)
	ALTRI AMBIENTI	Pavimenti e pareti	(A _{2,FL} -s1), (B _{FL} -s1), (C _{FL} -s1) (A2-s1;s2-d0), (A2-s1-d1), (B-s1;s2-d0), (B-s1-d1)	(A2-s1;s2-d0), (A2-s1-d1), (B-s1;s2-d0), (B-s1-d1)
			Almeno (A2-s3-d0) o (A _{2,FL} -s2) esclusi i materiali metallici	(A2-s1;s2;s3- d0;d1;d2), (B-s1;s2;s3- d0;d1;d2), (C-s1;s2- d0;d1)
			(A1), (A _{1,FL}) esclusi i materiali metallici	(A2-s1;s2;s3- d0;d1;d2), (B-s1;s2;s3- d0;d1;d2), (C-s1;s2;s3- d0;d1;d2), (D-s1;s2-d0;d1)
		Soffitti	(A2-s1;s2-d0;d1), (B-s1;s2;s3-d0)	(A2-s1;s2-d0;d1), (B-s1;s2;s3-d0)
			Almeno (A2-s3-d0) esclusi i materiali metallici	(A2-s1;s2-d0;d1), (B-s1;s2;s3-d0;d1), (C-s1;s2;s3-d0)
			(A1) esclusi i materiali metallici	(A2-s1;s2;s3-d0;d1), (B-s1;s2;s3-d0;d1), (C-s1;s2;s3- d0;d1), (D-s1;s2-d0)
	Tutti gli impieghi	Classe di resistenza al fuoco EI30	(E)	
PRODOTTI ISOLANTI A VISTA	VIE DI ESODO	Pavimenti e pareti		(A2-s1;s2-d0), (A2-s1-d1), (B-s1;s2-d0), (B-s1-d1)
		Soffitti		(A2-s1;s2-d0), (B-s1;s2-d0)
	ALTRI AMBIENTI	Pavimenti e pareti		Ex Classe 1: (A2-s1;s2;s3-d0;d1), (B-s1;s2-d0;d1) Ex Classe 2: (A2-s1;s2;s3- d0;d1;d2), (B-s1;s2;s3- d0;d1;d2), (C-s1;s2-d0;d1)
		Soffitti		ex Classe 1: (A2-s1;s2;s3-d0;d1), (B-s1;s2;s3-d0) ex Classe 2: (B-s1;s2;s3-d1), (C-s1;s2;s3-d0)

prescrizioni italiane per gli edifici sottoposti a prevenzione incendi previste dal D.M. 15/3/2005, parzialmente modificato dal D.M. 16/2/2009.

Si segnala che negli ambienti diversi dalle vie di esodo, possono essere installati materiali isolanti in Euroclasse E purché siano protetti da materiali aventi resistenza al fuoco EI30, come ad esempio i laterizi forati da 8 cm e il cartongesso.

Infine, le norme armonizzate per la marcatura CE degli isolanti prevedono la possibilità di valutare la reazione al fuoco di strutture contenenti isolanti termici nelle reali condizioni d'impiego (end use condition). Nel caso dell'applicazione dell'isolamento a cappotto i benestare tecnici europei ETA prevedono, ad esempio, il test dell'intero kit applicato a una parete campione.

CARATTERISTICHE IGROMETRICHE

Alcuni isolanti sono più traspiranti di altri. Il parametro che definisce la capacità di resistere al flusso di vapore è il coefficiente μ "fattore di resistenza al vapore". Più basso è μ , più traspirante è il materiale.

Per confrontare materiali diversi si utilizza lo spessore equivalente d'aria S_d pari al prodotto di μ per lo spessore.



NORMA UNI 11470:2013

Secondo la UNI 11470 (norma sugli schermi e membrane traspiranti di origine sintetica), i materiali si distinguono in funzione del valore di S_d :

- barriere vapore $S_d \geq 100$ m
- freni vapore $20 < S_d < 100$ m
- membrane traspiranti $0,1 < S_d < 20$ m
- membrane altamente traspiranti $S_d \leq 0,1$ m

Esempio:

polistirene estruso

$d = 10$ cm = 0,1 m; $\mu = 150 \rightarrow S_d = 150 \times 0,1 = 15$ m

Significato: 10 cm di estruso frenano il vapore come 15 m d'aria.

CONDUCIBILITÀ TERMICA DICHIARATA E DI PROGETTO

Per tutti gli isolanti soggetti a marcatura CE, vedi elenco in Tabella 4, il produttore deve riportare il valore di conducibilità termica, detta "conducibilità dichiarata (λ_D)", ottenuta mediante una prova di laboratorio a una temperatura media di riferimento di 10 °C con campioni stagionati in un ambiente a 23 °C e 50% di umidità relativa e testati in condizioni di invecchiamento (vedi Figura 2).

Tabella 4 - Elenco delle principali norme armonizzate per la marcatura CE degli isolanti e isolanti non ancora soggetti a marcatura

ISOLANTE	NORMA DI PRODOTTO
Lana minerale/roccia/vetro	UNI EN 13162
EPS (bianco/grigio)	UNI EN 13163
XPS	UNI EN 13164
Poliuretani espansi rigidi	UNI EN 13165
Schiume fenoliche	UNI EN 13166
Vetro cellulare	UNI EN 13167
Lana di legno mineralizzata	UNI EN 13168
Perlite espansa	UNI EN 13169
Sughero tostato espanso	UNI EN 13170
Fibra di legno	UNI EN 13171
Isolanti termoriflettenti	UNI EN 16012
Idrati silicato di calcio, lana di pecora, fibra di canapa, fibra di poliestere, fibra di cellulosa, sughero compresso	Nessuna (possibile marcatura volontaria ETA)

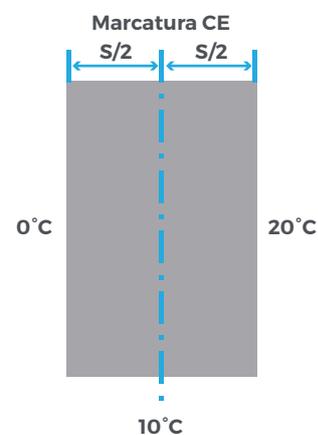


Figura 2 - Temperatura di riferimento per la valutazione della conducibilità termica dichiarata nelle prove di laboratorio (s è lo spessore del provino).

In linea generale le condizioni di laboratorio rispecchiano il comportamento dell'isolante nella stagione invernale (in una parete con cappotto, l'isolante, in mezzera, si troverà a una temperatura circa pari a quella di prova).

Poiché la conducibilità è influenzata sia dalla temperatura sia dall'umidità, qualora il progettista preveda condizioni di esercizio diverse da quelle di laboratorio, il valore λ_D deve essere corretto e trasformato in conducibilità di progetto (λ_d), per tener conto delle reali condizioni d'uso dell'isolante.

I fattori di correzione della temperatura (f_T) e dell'umidità (f_m) sono riportati, in funzione della natura dell'isolante, nella norma UNI EN 10456.

La conducibilità di progetto (λ_d) riferita alla nuova condizione 2 di temperatura T_2 e umidità relativa u_2 (se espressa come rapporto massa su massa) oppure ψ_2 (se espressa come rapporto volume su volume) si ricava dalla λ_D riferita alla condizione 1, caratterizzata da temperatura T_1 e umidità relativa u_1 o ψ_1 attraverso la formula:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot F_T \cdot F_m$$

dove

$$F_T = e^{f_T \cdot (T_2 - T_1)} \quad F_m = e^{f_u \cdot (u_2 - u_1)} \quad F_m = e^{f_\psi \cdot (\psi_2 - \psi_1)}$$

Ad esempio, nell'isolamento dall'interno con isolanti igroscopici, il contenuto di umidità porta a un peggioramento della conducibilità termica. In Figura 3 un esempio di calcolo di λ_d per una lana di legno il cui valore dichiarato 0,065 W/mK (relativo alle condizioni 10 °C e UR 50%) diventa 0,069 W/mK di progetto ipotizzando una condizione di esercizio di 10 °C e UR 80%.

Per quanto riguarda gli isolanti non soggetti a una norma armonizzata, il progettista deve conoscere le condizioni di prova effettuate dal fabbricante per capire se il dato riportato nella scheda tecnica possa essere assimilato a una conducibilità termica dichiarata o meno. In caso negativo, attraverso la formula sopra riportata deve riportarsi prima a un valore "dichiarato" e da questo a quello di "progetto".

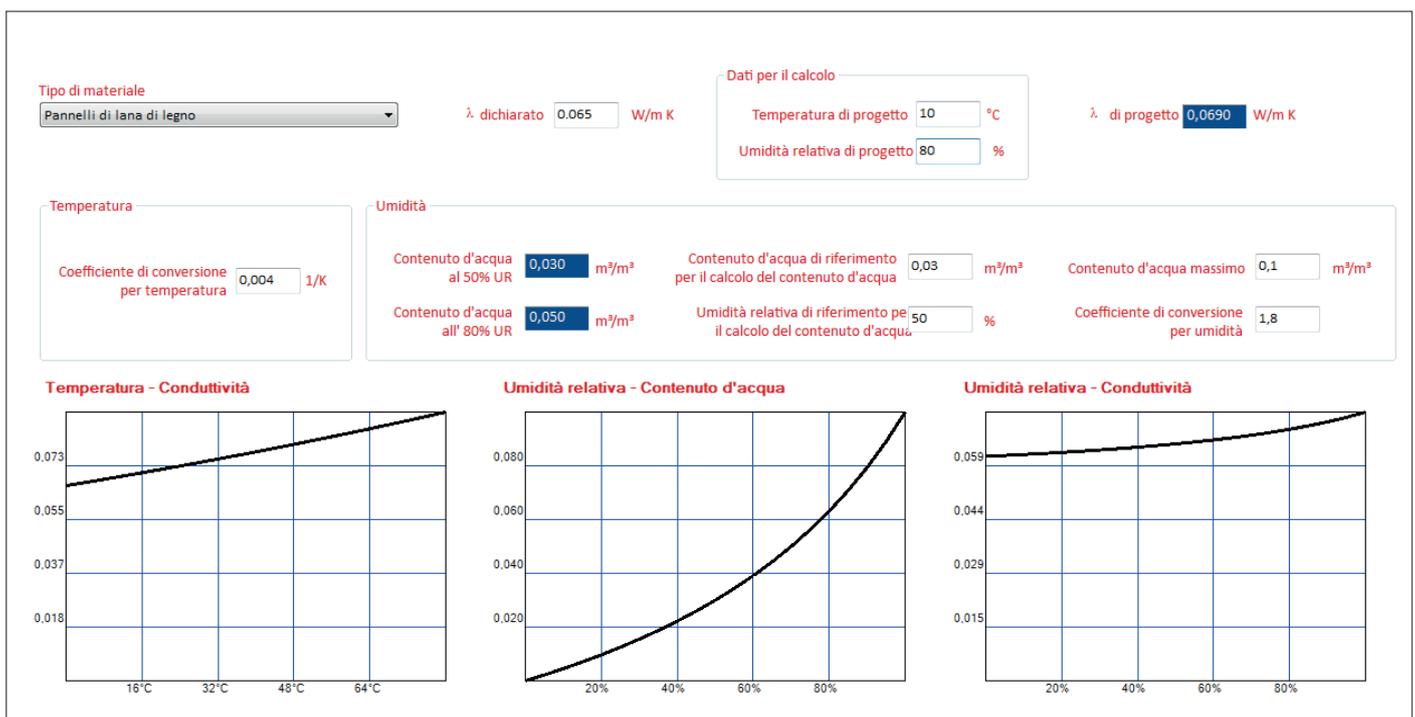


Figura 3 - Conversione della conducibilità dichiarata in conducibilità di progetto per diversa condizione di umidità relativa (calcolo effettuato con il software KliMat v.3)

3.

SOLUZIONI TECNICHE

Un involucro efficiente deve essere curato in tutti i suoi dettagli. L'isolamento, gli elementi di tenuta all'aria e all'acqua, l'assenza di ponti termici, i trattamenti superficiali, i sistemi di schermatura dal sole e gli impianti ad alto rendimento sono fondamentali per raggiungere l'obiettivo di edificio a energia quasi zero.

In questo terzo capitolo daremo indicazioni sulle tecniche e soluzioni di isolamento termico dell'involucro.

ISOLAMENTO DALL'ESTERNO

CAPPOTTO TERMICO

Il cappotto termico, anche noto con la sigla ETICS (External Thermal Insulation Composite System), è la tecnica di isolamento termico più utilizzata sia nelle nuove costruzioni sia nelle riqualificazioni (vedi Figure 1 e 2) in quanto è il sistema ideale per correggere i ponti termici, sfruttare al meglio l'inerzia termica delle murature e mettere in quiete termica le pareti che presentano quadri fessurativi dovuti alle differenti dilatazioni termiche dei materiali.

Rimandando a Gli Speciali di UP! "Degrado dei cappotti termici" per la corretta posa in opera, riportiamo qui di seguito gli elementi costituenti il cappotto.

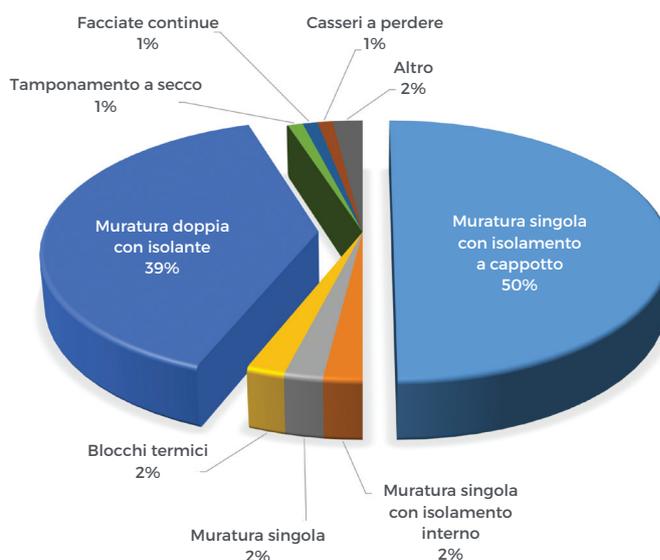


Figura 1 - Diffusione percentuale delle tecniche di isolamento termico per le nuove costruzioni in Italia [fonte dati ANIT - Convegno Roma, 15 febbraio 2015]

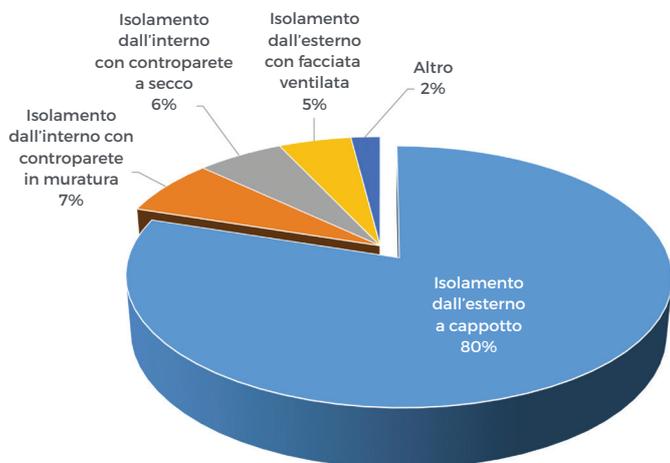


Figura 2 - Diffusione percentuale delle tecniche di isolamento termico per le ristrutturazioni in Italia [fonte dati ANIT - Convegno Roma, 15 febbraio 2015]

• Adesivo

Oltre a fissare il pannello al supporto murario ha la funzione di assorbire le sollecitazioni termiche che si instaurano sul pannello stesso a causa della differenza di temperatura tra faccia esterna e interna e che tendono a deformarlo determinando il cosiddetto "effetto materasso".

L'incollaggio dell'isolante può avvenire secondo la tecnica "a piena superficie" o "cordolo perimetrale e punti centrali".

Fondamentale, nella posa, è evitare che tra pannello e supporto si instauri una circolazione d'aria per effetto camino che possa portare al distacco dell'isolante (vedi Figura 3).

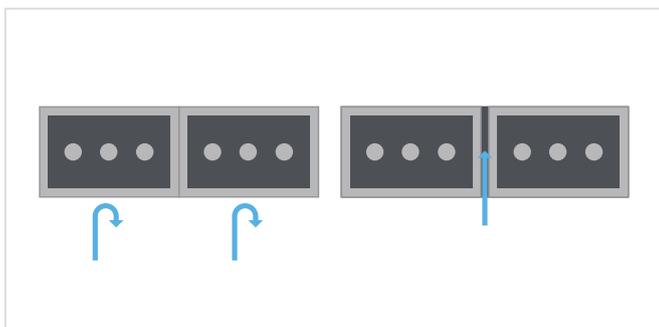


Figura 3 - Incollaggio pannelli. A sinistra posa corretta con cordoli perimetrali ben accostati. A destra posa non corretta con cordoli perimetrali non adiacenti. In questo caso si può instaurare una circolazione d'aria per effetto camino a causa dell'ingresso d'aria dal profilo di partenza. La pressione del vento può essere inoltre causa del distacco dei pannelli isolanti.

• Tasselli

Distribuiscono in maniera idonea il peso sul supporto e contrastano l'azione di "risucchio", spesso sottovalutata, esercitata dal vento (fino anche a 100 kg/mq) che tende a staccare il pannello. Ciascuna tipologia di supporto murario necessita di un suo particolare tassello che deve essere conforme ai requisiti delle linee guida ETAG 014 (vedi Tabella 1).

Tabella 1 - Conformità dei tasselli per cappotti termici in relazione al supporto murario [norma ETAG 014]

CATEGORIA TASSELLO	SUPPORTO
Categoria A	Calcestruzzo normale
Categoria B	Mattoni pieni
Categoria C	Mattoni vuoti e forati
Categoria D	Calcestruzzo alleggerito
Categoria E	Calcestruzzo cellulare o porizzato

• Isolante

I pannelli isolanti devono presentarsi con superfici regolari e con adeguate caratteristiche di resistenza meccanica (compressione, trazione, ecc.) e di comportamento in presenza di acqua (ad esempio la zoccolatura).

Oltre a essere marcati CE devono essere conformi alle linee guida ETAG 004.

Si segnala che per i polistireni e le lane minerali esistono due norme armonizzate che ne attestano l'idoneità nei sistemi a cappotto:

- **EN 13499** "Isolanti termici per edilizia - Sistemi compositi di isolamento termico per l'esterno (ETICS) a base di polistirene espanso - Specifiche";

- **EN 13500** "Isolanti termici per edilizia - Sistemi compositi di isolamento termico per l'esterno (ETICS) a base di lana minerale - Specifiche".

In Figura 4 si riportano gli isolanti maggiormente impiegati.

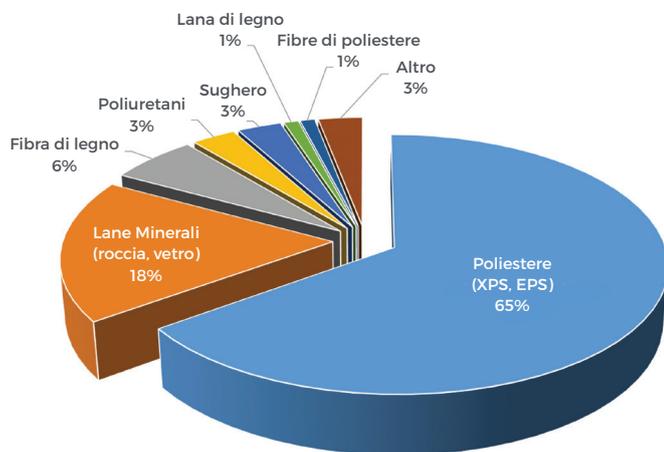


Figura 4 - Percentuale di impiego delle varie tipologie di isolanti nei cappotti [fonte ANIT dati relativi al Nord Italia]

• Rasatura armata

È della stessa natura dell'adesivo e viene applicata in due mani, in uno spessore complessivo di 5-7 mm, per proteggere l'isolante dagli agenti atmosferici e dall'irraggiamento. All'interno di questo strato viene annegata la rete di armatura che conferisce la resistenza agli urti e ai movimenti dovuti alle escursioni termiche o ai fenomeni di ritiro. È una rete in fibra di vetro, di grammatura 145-180 g/mq, trattata con appretto antialcali contro l'aggressione del pH basico del rasante. Reti più pesanti, fino a 300 g/mq, offrendo una maggiore resistenza meccanica, vengono utilizzate nelle zoccolature degli edifici specialmente in prossimità di traffico veicolare.

• Sottofondo stabilizzante (o primer fissativo)

Viene utilizzato per ottenere migliori condizioni di adesione e compatibilità dello strato di finitura con lo strato di intonaco sottile armato già realizzato.

• Rivestimento di finitura

Si tratta di un rivestimento o di una particolare pittura a base sintetica o minerale che si può realizzare con varie finiture: rustico, rasato, graffiato, spugnato o spruzzato. Non ha solo funzione estetica, ma protegge gli strati sottostanti dalle intemperie

e dalle radiazioni solari. Per evitare il surriscaldamento dell'isolante è bene prendere in considerazione un indice di riflessione IR non inferiore al 20-30%. Il rivestimento deve, inoltre, possedere una buona elasticità alle sollecitazioni meccaniche ed essere sufficientemente permeabile al vapore acqueo.

• Accessori

Elementi utilizzati per realizzare giunzioni con strutture diverse (ad esempio finestre) e proteggere, o sostenere, il sistema in punti particolarmente critici (profili paraspigoli, profili di partenza, giunti elastici, ecc.).

Prestazioni del cappotto termico

Lo spessore dell'isolante dipende dagli obiettivi di trasmittanza termica. Nella Figura 5 viene fatto un confronto tra gli isolanti di impiego comune per riqualificare una muratura in laterizio con trasmittanza termica U_{in} pari a 1,73 W/mqK (Resistenza termica R_{in} pari a 0,58 mqK/W) fino a un valore di trasmittanza U_{riq} pari a 0,23 (Resistenza termica R_{riq} pari a 4,35 mqK/W).

L'isolante dovrà fornire una resistenza termica R_{is} pari alla differenza tra il valore riqualificato e quello iniziale, ovvero R_{is} pari a 3,77 mqK/W.

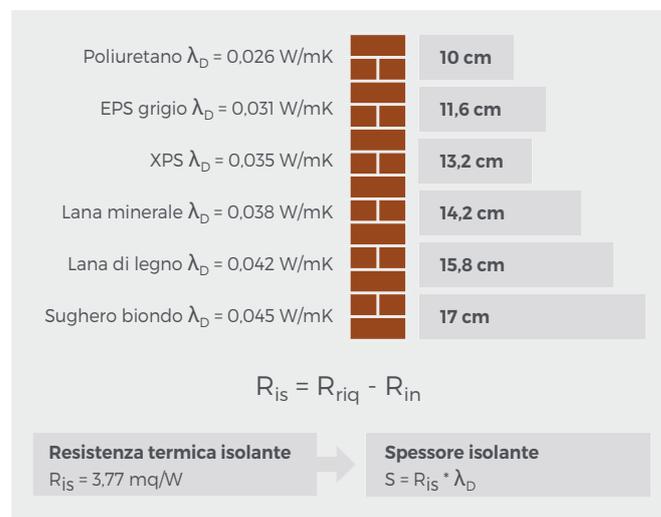
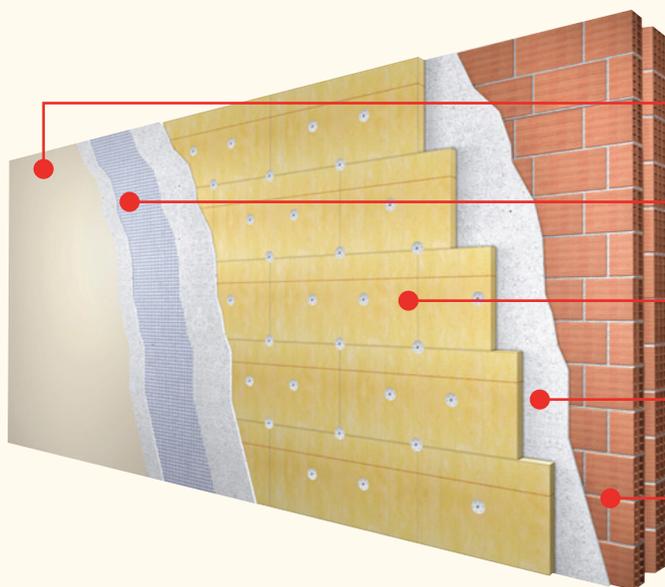


Figura 5 - Confronto spessori tra diverse tipologie di isolanti d'impiego comune

Esempio di cappotto su muratura esistente Calcoli Performance eseguiti con Klimat v.3



Finitura silossanica a grana media

Sp. 1.5 mm, ρ 1.800 kg/mc, λ 1.1 W/mK, μ 90

Rasante cementizio con rete di rinforzo

Sp. 5 mm, ρ 1.450 kg/mc, λ 0,48 W/mK, μ 30

Isolante rigido in lana minerale

Sp. 14 cm, ρ 90 kg/mc, λ_D 0,037 W/mK, μ 1

Adesivo cementizio

ρ 1.450 kg/mc, λ 0,48 W/mK, μ 30

Muratura doppio UNI intonacata

Sp. 2 + 25 + 2 cm

Resistenze Termiche

R_{se} = 0,04

R = 0,002

R = 0,001

R = 3,784

R = 0,003

R = 0,867

R_{si} = 0,13

R_{tot} = 4,38

INIZIALE

Muratura doppio UNI 25 intonacata 2 + 2 cm

S = 29 cm | U_{in} = 1,73 | Y_{ie} = 0,7 | Fa = 0,405 | Φ = 7 h 46 min

RIQUALIFICATA

S = 44 cm | U_{riq} = 0,227 | Y_{ie} = 0,028 | Fa = 0,121 | Φ = 12 h 25 min

FACCIAE VENTILATE

La norma UNI 11018 definisce la facciata ventilata come "un tipo di facciata a schermo avanzato in cui l'intercapedine tra il rivestimento e la parete è progettata in modo tale che l'aria in essa presente possa fluire per effetto camino in modo naturale o in modo artificialmente controllato, a seconda delle necessità stagionali o giornaliere, al fine di migliorarne le prestazioni energetiche complessive".

La **facciata ventilata** prevede l'applicazione a secco mediante staffe e ancoraggi, sulla superficie esterna dell'edificio, del rivestimento di finitura che non aderisce alla parete ma ne risulta distanziato per creare un'intercapedine in cui si ha il moto convettivo dell'aria dato dalla presenza di aperture disposte alla base e alla sommità della facciata. L'origine di tale tecnica costruttiva è legata all'esigenza di proteggere l'edificio dalla

pioggia battente e dall'ingresso dell'acqua. Occorre un vero e proprio strato di sacrificio, generalmente in legno, che, tramite un'intercapedine consentiva di convogliare all'esterno l'acqua piovana. L'abbinamento di un strato di isolamento termico con un rivestimento di finitura di qualunque natura e formato (ceramica, pietra, alluminio, zinco, legno, pannelli in calcestruzzo, ecc.) oggi è una soluzione innovativa molto apprezzata dai progettisti perché consente la massima libertà di espressione architettonica, esaltando l'aspetto estetico e di design dell'intero edificio, nel rispetto delle direttive sul risparmio energetico nonché superando alcuni limiti tecnici dei cappotti termici. L'intercapedine attua una separazione fisica del rivestimento dall'isolante, evitando di scegliere materiali che siano compatibili tra loro dal punto di vista delle variazioni dimensionali dei componenti.

Dall'esterno verso l'interno, sono presenti **quattro strati funzionali** (vedi Figura 6):

1. rivestimento esterno (ceramica, pietra, ecc.);
2. sottostruttura metallica, generalmente in alluminio o acciaio inox, di supporto al rivestimento;
3. intercapedine di ventilazione (> 2-3 cm);
4. strato isolante (eventualmente protetto da una membrana traspirante al vapore e impermeabile all'acqua).



Figura 6 - Strati funzionali facciata ventilata

Gli elementi da prendere in considerazione nella progettazione sono:

- forza del vento (zona geografica e altezza dell'edificio);
- zona sismica;
- altezza piano e dimensioni finestre;
- spessore totale della parete (per la scelta del tassello);
- tipo e spessore dell'isolante (determinato da esigenze di trasmittanza per il ridimensionamento delle staffe di fissaggio);
- tipologia di aggancio del rivestimento (a vista o scomparsa);
- raccordi (partenze, angoli, imbotti, ecc.).

In funzione dell'intercapedine, le facciate ventilate si dividono in "microventilate" e "ventilate".

Nei **sistemi microventilati**, solitamente non dotati di griglie di immissione ed espulsione dell'aria, la circolazione dell'aria è molto limitata e dipende dall'area libera dei giunti verticali e/o orizzontali del rivestimento. Lo scopo primario del rivestimento è la protezione della parete dalle condizioni meteoriche avverse.

In caso di piogge di una certa entità, una parte può infiltrarsi tra i giunti ma solo una piccolissima percentuale raggiunge l'isolante (vedi Figura 7). Ciò non è causa di degrado, ma di un leggero calo delle performance fino a quando l'acqua o umidità assorbita non sarà rievaporata.

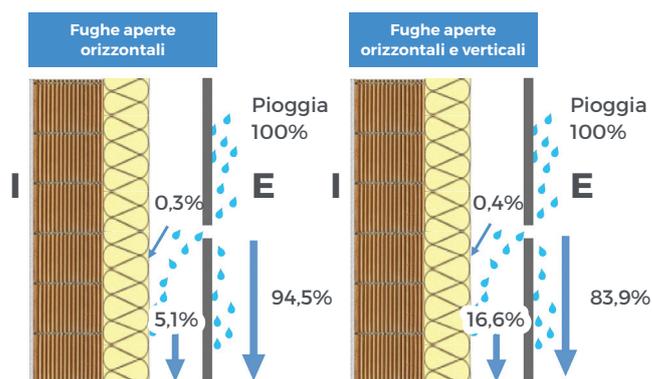


Figura 7 - Quantitativo di acqua che può bagnare l'isolante in una parete microventilata con fughe aperte solo orizzontali e con fughe orizzontali e verticali [fonte UNI 11018]

Nelle **pareti ventilate** la portata d'aria dipende dalle dimensioni delle griglie di apertura ed espulsione dell'aria stessa. Possono essere debolmente o fortemente ventilate in relazione al rapporto tra l'area delle aperture superiori e inferiori e la lunghezza delle pareti. Gli isolanti possono essere utilizzati come pannelli rigidi o semirigidi oppure come materassini. Fondamentale è che siano idrorepellenti o caratterizzati da un basso assorbimento d'acqua e umidità.

In alternativa sarà possibile proteggere l'isolante con una membrana traspirante al vapore e impermeabile all'acqua fissata alla sottostruttura di supporto con bandelle adesive.

Vantaggi della facciata ventilata

La facciata ventilata migliora il comportamento estivo della struttura riducendo i carichi termici grazie all'effetto della ventilazione e del rivestimento. Quest'ultimo infatti si comporta da schermatura solare respingendo parte della radiazione incidente e contribuisce, seppure in maniera ridotta, allo sfasamento termico (vedi Figura 8). L'effetto della ventilazione è apprezzabile con intercapedini di spessore tra 3 e 7 cm.

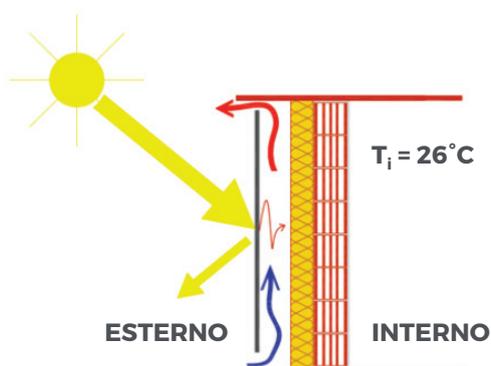


Figura 8 - Funzionamento della facciata ventilata in regime estivo

Il rivestimento esterno contribuisce all'isolamento acustico. L'intero sistema è assimilabile a una "trappola acustica". L'onda incidente viene in parte riflessa dal rivestimento e in parte smorzata dalle vibrazioni delle lastre (possibili grazie a particolari modalità di fissaggio della sottostruttura). Ulteriori dissipazioni di energia si hanno attraverso l'intercapedine e l'isolante fibroso.

Con la facciata ventilata si possono realizzare elevati spessori di isolamento. La posa dell'isolante può essere effettuata agevolmente anche in

doppio strato, con sfalsamento dei giunti. Ricorrendo a differenti densità, con materiali fibrosi, si possono ottenere maggiori livelli di comfort acustico. Tuttavia all'aumentare della distanza del rivestimento dalla parete aumentano le sollecitazioni sulle staffe. Inoltre si avrà un incremento della profondità delle imbotti dei serramenti che potrebbe causare una riduzione dell'illuminazione degli ambienti interni.

Fissaggi del rivestimento

Possono essere a vista o nascosti. Alla prima tipologia appartengono mollette, clips e ganci, generalmente in acciaio, agenti direttamente sui bordi del rivestimento. Sono caratterizzate da ingombri molto ridotti e sono difficilmente riconoscibili a distanza se non per una eventuale differenza cromatica. La seconda tipologia comprende squadrette o clips da inserire in opportune fessure ricavate nello spessore del rivestimento. Questo sistema di fissaggio non risulta visibile nemmeno da distanza ravvicinata (vedi Figura 9).

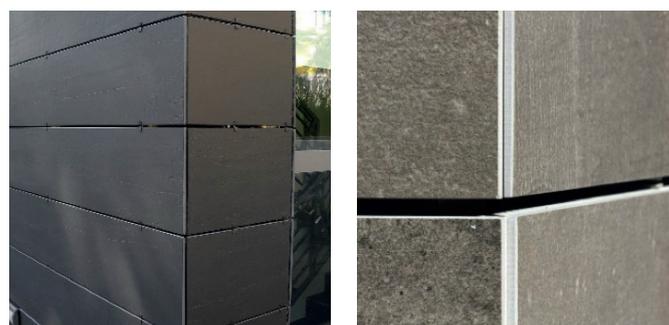


Figura 9 - Sistema di aggancio a vista (a sinistra), sistema di aggancio nascosto (a destra)



LA TRASMITTANZA TERMICA DELLE PARETI VENTILATE

Nel calcolo della trasmittanza termica delle facciate ventilate l'intercapedine d'aria da considerare sarà:

- non ventilata nel caso di facciate microventilate;
- debolmente ventilata o fortemente ventilata a seconda delle dimensioni delle aperture delle griglie d'aria;
- per le facciate fortemente ventilate viene trascurato l'effetto del rivestimento e l'intercapedine rappresenta, di fatto, l'ultimo strato utile con cui la struttura scambia calore. Come da normativa UNI EN 6949, l'intercapedine ventilata viene caratterizzata da una resistenza termica pari alla resistenza superficiale interna.

TERMOINTONACI

Un'alternativa al cappotto è rappresentata dall'isolamento con termointonaco impiegato negli interventi di riqualificazione quando, per motivi di spazio o per il valore architettonico, non è consentita l'applicazione di pannelli coibentanti.

La norma UNI EN 998-1 definisce l'intonaco termico come malta a prestazione garantita con proprietà isolanti termiche fissandone le caratteristiche essenziali affinché possa riportare il marchio CE sull'imballaggio.

Viene indicato con l'abbreviazione T (THERMAL) e si distingue dalle altre malte per il basso valore della conduttività termica:

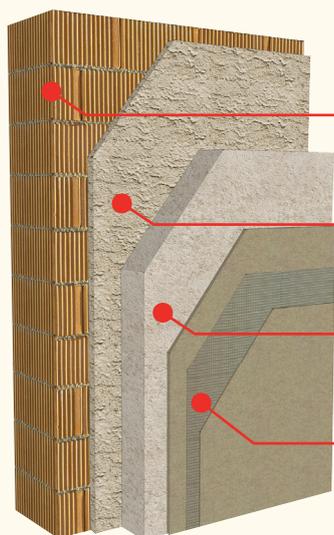
- malta T2: $\lambda < 0,2 \text{ W/mK}$
- malta T1: $\lambda < 0,1 \text{ W/mK}$

L'impasto degli intonaci termoisolanti T, sempre in forma di polvere, si differenzia da quello degli intonaci tradizionali in virtù della sostituzione di parte dell'inerte classico (sabbia o ghiaia) con aggregati

leggeri (ad esempio perle di polistirene espanso, argilla, perlite, vermiculite, vetro espanso riciclato, ecc.) o per l'aggiunta di additivi che creano delle bolle d'aria all'interno dell'impasto.

In definitiva, il termointonaco ha proprietà termofisiche derivanti dalla miscela dei materiali di cui è composto e la conducibilità termica media varia da 0,05 a 0,13 W/mK in relazione alla densità. Il coefficiente di resistenza al passaggio di vapore (μ) è generalmente molto basso (compreso tra 5 e 20) e ciò consente la realizzazione di strutture traspiranti. Migliora inoltre il comportamento estivo della struttura grazie al basso valore di diffusività termica con benefici in termini di aumento d'inerzia termica. Un intervento di riqualificazione con 7 cm di intonaco su una muratura esistente in laterizio da 35 cm (U_{in} pari a 0,79 W/mqK) consente di ottenere una trasmittanza pari a 0,37 W/mqK e un aumento dello sfasamento di ben 3 ore (vedi esempio di riqualificazione).

Esempio di riqualificazione con intonaco termico Calcoli Performance eseguiti con Klimat v.3



Muratura intonacata in laterizio alveolato

Sp. 1,5 + 35 + 1,5 cm, $\alpha = 0,456 \text{ mq}/10^{-6}\text{s}$

Malta da rinzafo

Sp. 5 mm, $\rho 1.900 \text{ kg/mc}$, $\lambda 0,8 \text{ W/mK}$, $\mu 35$, $\alpha = 0,419 \text{ mq}/10^{-4}\text{s}$

Isolante termico

Sp. 7 cm, $\rho 150 \text{ kg/mc}$, $\lambda_d 0,0493 \text{ W/mK}$, $\mu 5$, $\alpha = 0,328 \text{ mq}/10^{-6}\text{s}$

Rasante cementizio idrofugato con rete di rinforzo

Sp. 5 mm, $\rho 1.500 \text{ kg/mc}$, $\lambda 0,48 \text{ W/mK}$, $\mu 30$, $\alpha = 0,345 \text{ mq}/10^{-5}\text{s}$

Resistenze Termiche

R_{si} = 0,13

R = 1,088

R = 0,006

R = 1,419

R = 0,001

R_{se} = 0,04

R_{tot} = 2,68

Nota - Si noti il basso valore di diffusività termica dell'intonaco termico, minore anche della diffusività del laterizio. Nel calcolo della riqualificazione non è stato preso in considerazione l'intonaco esterno esistente.

INIZIALE

Muratura laterizio alveolato 35 cm intonacata 1,5 + 1,5 cm
S = 38 cm | $U_{in} = 0,795$ | $Y_{ie} = 0,196$ | Fa = 0,225 | $\Phi = 11 \text{ h } 41 \text{ min}$

RIQUALIFICATA

S = 44,5 cm | $U_{riq} = 0,374$ | $Y_{ie} = 0,028$ | Fa = 0,078 | $\Phi = 14 \text{ h } 34 \text{ min}$



CONDUCEBILITÀ DI PROGETTO PER GLI INTONACI TERMOISOLANTI

Se nella scheda tecnica dell'intonaco la conducibilità è indicata con il simbolo $\lambda_{10,dry}$, si tratta di un valore di "base" riferito allo stato secco e alla temperatura di 10 °C. Ovvero è un valore tabulato ai sensi della norma UNI 1745 (tabella A12) in cui è possibile determinare la conducibilità in funzione della massa.

Da questo valore, il progettista deve riportarsi a quello di progetto secondo la UNI 10456 applicando gli opportuni coefficienti di correzione.

In riferimento all'esempio precedentemente descritto:

$$\lambda_1 = \lambda_{10,dry} = 0,042 \text{ W/mK a } 10 \text{ °C e allo stato secco}$$

$$\lambda_2 = \lambda_{10,50\%} \text{ nelle condizioni } 10 \text{ °C e UR } 50\% \text{ (lambda di progetto } \lambda_d)$$

Dalla Tabella 4 della UNI 10456 si ricava che:

$$f_\Psi = 4 \text{ (coefficiente di conversione dell'umidità espresso come rapporto di volumi)}$$

$$\Psi_2 = 0,04 \text{ (contenuto di umidità al 50\% di UR)}$$

$$\Psi_1 = 0 \text{ (contenuto di umidità allo stato secco)}$$

Applicando la formula:

$$\lambda_2 = 0,042 \cdot e^{(4 \cdot (0,04 - 0))} = 0,042 \cdot 1,17351 = 0,0493 \text{ W/mK}$$



LA POSA IN OPERA



Il termointonaco si impasta con acqua e si stende come un comune intonaco o mediante apposite pompe a spruzzo ponendo attenzione che non si formino fessurazioni.

Il supporto ideale è un fondo grezzo perché facilita l'adesione. Su un supporto liscio, infatti, non è garantita la presa. In tal caso, per migliorare l'aggrappo, si può effettuare un "intonaco di fondo" (rinzaffo).

A maturazione avvenuta si procede con rasatura in due mani con interposta rete d'armatura in fibra di vetro alcali resistente per garantire una maggiore resistenza alle sollecitazioni meccaniche.

Quindi si può procedere al rivestimento decorativo ai silicati o ai silossani.

Lo spessore massimo realizzabile è 6-8 cm da fare non in un'unica mano. Superato questo valore, non è competitivo economicamente rispetto al cappotto e potrebbe non essere garantita la tenuta strutturale con possibili e probabili fenomeni di distacco e fessurazioni.



ISOLAMENTO DELLE COPERTURE PIANE

Nell'isolamento delle coperture piane l'isolante può essere posizionato sia sotto l'impermeabilizzazione ("tetto caldo") sia al di sopra ("tetto rovescio").

SISTEMA TETTO CALDO

La soluzione "tetto caldo", in particolare con manto a vista, è la soluzione più diffusa e più economica, ma è anche quella che espone il pacchetto isolamento-manto a maggiori sollecitazioni poiché direttamente esposto alle intemperie e alle brusche variazioni di temperatura stagionali (vedi Figura 10).

I principali fenomeni provocati da queste ultime

sono la reptazione e le fessurazioni in corrispondenza delle linee di accostamento tra gli isolanti.

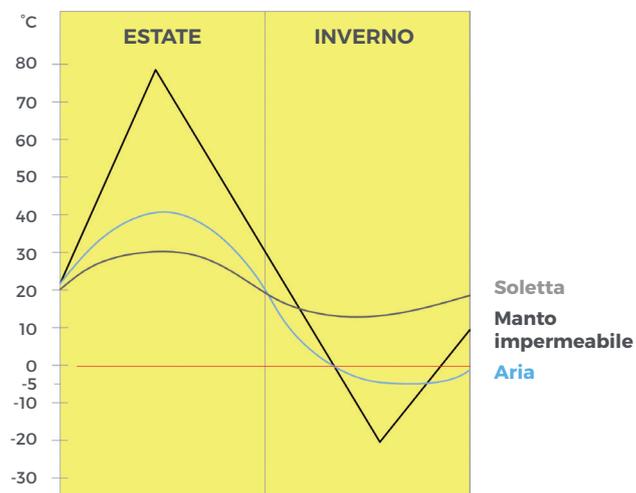


Figura 10 - Oscillazioni di temperatura stagionali dei costituenti la copertura

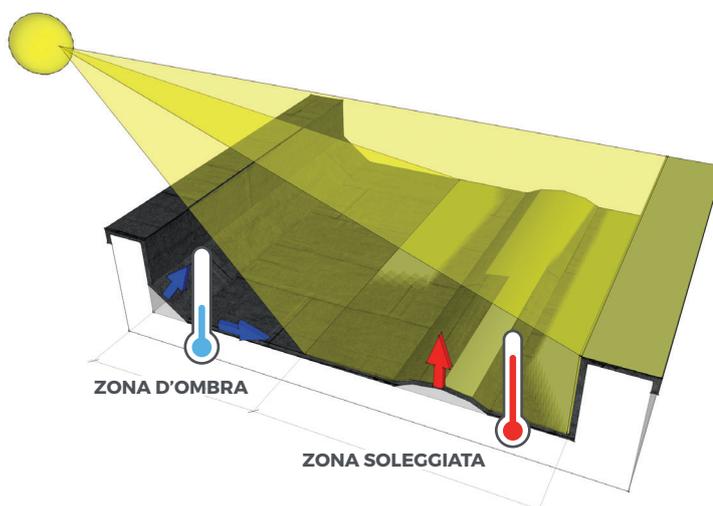


LA REPTAZIONE

La reptazione è un fenomeno di "ritiro a freddo" legato al movimento del manto impermeabile che, con le fredde temperature invernali, tende ad accorciarsi formando delle pieghe che dagli angoli del tetto vanno verso il centro geometrico della copertura. Durante la contrazione il manto tende a trascinare con sé anche i pannelli isolanti su cui è incollato. Se i pannelli sono ben incollati al supporto e accostati tra loro non si muoveranno, mentre se l'incollaggio non è saldo e i pannelli non sono bene accostati la forza di trascinamento del manto li trascinerà verso il centro del tetto staccandoli dai rilievi perimetrali e formando delle pieghe lungo le linee di accostamento dei pannelli.

Il problema è che, nella stagione estiva, la mescola bituminosa diventa molle e non ha più la forza di far tornare nella posizione iniziale il manto, che resta deformato (il punto di rammollimento del bitume varia tra gli 80 e i 100 °C).

Anche l'ombreggiamento prodotto dal cordolo perimetrale è causa di differenti temperature di esercizio che determina il corrugamento della guaina.



La guaina a vista dovrà essere di tipo autoprotetta (ardesiata), ma al fine di evitare questi inconvenienti è importante che:

- i manti che costituiscono il pacchetto siano stabili al variare della temperatura;
- i pannelli isolanti siano saldamente incollati al supporto;
- l'armatura delle guaine sia in fibra di vetro poichè più resistente al ritiro rispetto al poliestere;
- l'esecuzione dei dettagli, specie quelli che costituiscono i punti fissi della copertura (muretti, camini, scarichi, ecc.) sia fatta a regola d'arte.

In alternativa, il manto può essere protetto da un ricoprimento in ghiaietto o con un massetto.

La resistenza al fuoco degli isolanti termici condiziona le tecniche di posa sia dell'isolante sia della guaina. La resistenza a compressione non è un parametro vincolante nel caso di guaina a vista, al contrario è determinante nel caso in cui il tetto sia adibito a parcheggio (vedi pagina 46).

Perlite, poliuretano espanso, sughero, lane minerali possono essere incollati a caldo (a fiamma o con

bitume fuso) sulla barriera al vapore ed è possibile incollarvi, a caldo, la guaina impermeabilizzante.

I materiali isolanti di natura cellulare sono preferibili perché, in caso di perdite del manto, assorbono meno acqua. L'impermeabilizzazione a doppio strato offre maggiori garanzie in caso di perforazioni. Tuttavia i pannelli in polistirene sono termoplastici e vanno incollati a freddo con opportuni mastici bituminosi. Allo stesso modo la successiva guaina di tenuta all'acqua va incollata a freddo. In alternativa si possono usare guaine autoadesive. Si segnala inoltre che in commercio si trovano pannelli isolanti in polistirene accoppiati a guaine bituminose per consentire la sfiammatura del successivo strato d'impermeabilizzazione.

I poliuretani, al contrario, essendo termoindurenti sono più resistenti alle alte temperature e i problemi di instabilità dimensionale dipendono dalle caratteristiche dei rivestimenti.

Il vetro cellulare, grazie alle sue caratteristiche di insensibilità al vapore e all'acqua (μ infinito), può essere posato senza barriera al vapore.



VERIFICA IGROMETRICA DEI TETTI CALDI

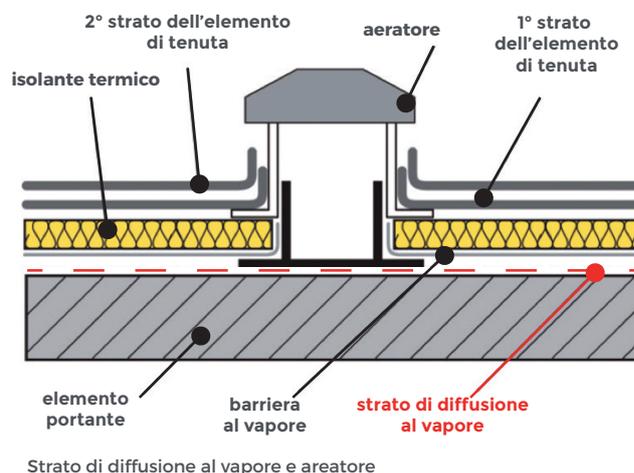
Quando la resistenza al vapore della barriera è dello stesso ordine di grandezza di quella del manto d'impermeabilizzazione quasi sempre la verifica igrometrica secondo il modello di Glaser evidenzia formazione di condensa nello strato coibente. La barriera al vapore dovrebbe essere più efficace dell'impermeabilizzazione da 5 a 7 volte.

Se si vuole eliminare il rischio è necessario che il vapore, che giunge sotto l'impermeabilizzazione, possa essere smaltito verso l'esterno senza attraversarla. Ciò si può ottenere in tre modalità:

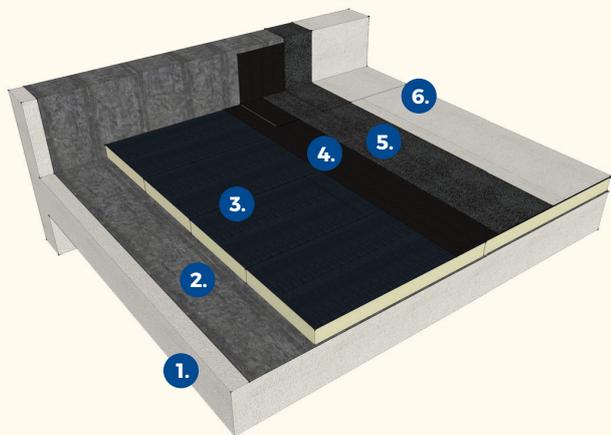
- realizzando una intercapedine ventilata tra manto di copertura e isolante;
- realizzando un tetto rovescio;
- realizzando uno **strato di diffusione** al vapore drenante al di sotto della guaina e inserendo dei caminetti areatori.

Lo strato di diffusione al vapore è costituito, in generale, da una membrana bituminosa multiferata (fori di 4 cm di diametro), posata sul solaio di copertura prima della barriera al vapore. Quest'ultima si salderà, pertanto, alla

soletta solo in corrispondenza dei fori e si formerà una sorta di "camera d'aria" (vedi figura). Ciò consente al vapore acqueo, di migrare verso i dispositivi di areazione per essere smaltito verso l'esterno impedendo la formazione di pressioni anomale che causerebbero, conseguentemente, sacche e bolle d'aria negative alla resistenza nel tempo dell'opera realizzata.



Esempio di stratigrafie di tetto piano caldo Calcoli Performance eseguiti con Klimat v.3



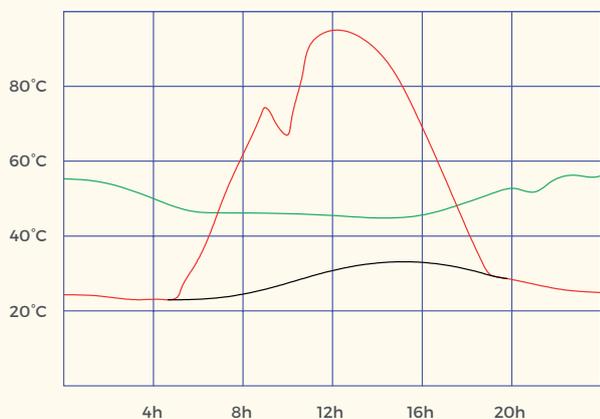
PERFORMANCE SISTEMA TETTO PIANO CALDO

▶ U 0,186 W/mqK	▶ F _a 0,142
▶ Sfasamento 11 ore	▶ No condensa
▶ Y _{ie} 0,026	▶ No muffa

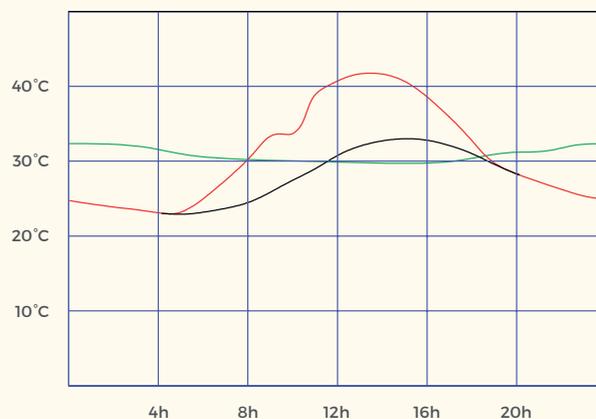
	Spessore [m]	Fattore di resistenza al vapore	Spessore equivalente d'aria [m]	Conducibilità termica	Resistenza termica
Superficie interna	-	-	-	-	0,1
1. Solaio laterocemento intonacato con massetto delle pendenze (2+20+4 cm)	0,26	-	4,1	-	0,379
2. Barriera al vapore	0,0035	570.000	1.995	0,5	0,07
3. Isolante termico resistente al calore	0,14	50	6	0,025	4,8
4. Guaina bituminosa (primo strato)	0,004	20.000	80	0,2	0,02
5. Guaina bituminosa autoprotetta	0,004	20.000	80	0,2	0,02
6. Trattamento ad alta riflettanza solare (*) (es. riflettanza solare > 86%, emissività > 90%, indice SRI > 100)	-	-	-	-	-
Superficie esterna	-	-	-	-	0,04

(*) Il trattamento ad alta riflettanza solare non dà alcun contributo in termini di resistenza termica ma determina, grazie al suo basso valore di assorbimento solare, una minore temperatura superficiale come mostrato nei grafici sottostanti dove a sinistra è il caso della copertura senza trattamento, a destra con il trattamento riferito all'esempio.

α FATTORE DI ASSORBIMENTO SOLARE 0.9



α FATTORE DI ASSORBIMENTO SOLARE 0.14



— Temperatura dell'aria esterna (°C) — Temperatura superficiale esterna (°C) — Temperatura attenuata (°C)

SISTEMA TETTO ROVESCIO

Il tetto rovescio prevede lo strato isolante sopra l'impermeabilizzazione. Questa configurazione presenta indubbi vantaggi rispetto al tetto caldo. È più coerente, ed efficace, dal punto di vista igrometrico in quanto la guaina, fungendo da barriera al vapore, è correttamente posizionata sul lato caldo dell'isolante. Inoltre l'isolante protegge termicamente e meccanicamente l'elemento di tenuta che, di conseguenza, avrà una vita più lunga.

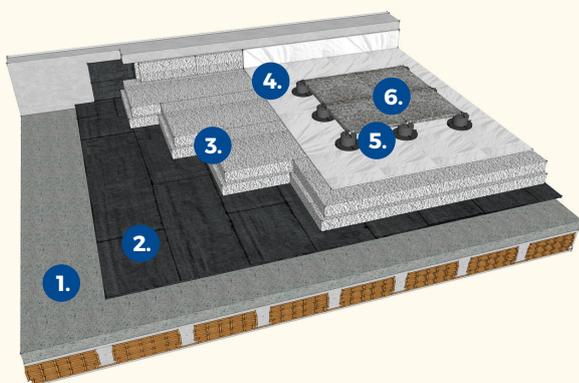
I tempi di cantiere sono più rapidi poiché l'isolante potrà essere posato a secco prevedendo un opportuno zavorramento per contrastare l'azione di sollevamento del vento.

Si rende necessario, invece, un elemento separatore (geotessuto, polietilene, ecc.) tra pannello

coibente e ricoprimento al fine di impedire l'insinuazione, tra i giunti del pannello, di particelle di terreno che potrebbero ridurre l'efficacia e la durabilità dell'isolamento.

Non tutti gli isolanti sono idonei per questa applicazione: essendo più esposti alle intemperie dovranno essere preferibilmente a celle chiuse e insensibili all'azione dell'acqua e del gelo al fine di mantenere inalterate nel tempo le caratteristiche di resistenza meccanica e di resistenza termica (vedi capitolo 2). Il tetto rovescio è una soluzione particolarmente indicata per gli interventi di riqualificazione nei casi in cui la guaina esistente sia ancora in buono stato. Si possono realizzare tetti pedonabili e non, (zavorrati con ghiaia, con pavimentazione flottante prefabbricata o su massetto), tetti carrabili e tetti giardino.

Esempio di stratigrafie di tetto rovescio Calcoli Performance eseguiti con Klimat v.3



PERFORMANCE SISTEMA TETTO ROVESCIO CON PAVIMENTAZIONE FLOTTANTE

▶ U 0,217 W/mqK	▶ F _a 0,129
▶ Sfasamento 12 ore 24 min	▶ No condensa
▶ Y _{ie} 0,028	▶ No muffa

	Spessore [m]	Fattore di resistenza al vapore	Spessore equivalente d'aria [m]	Conducibilità termica	Resistenza termica
Superficie interna	-	-	-	-	0,1
1. Solaio laterocemento intonacato con massetto delle pendenze (2+20+4 cm)	0,26	-	4,1	-	0,379
2. Barriera al vapore (guaina esistente)	0,004	45.000	144	0,2	0,016
3. Isolante termico con profili battentati, CS (10/Y) >300 kPa, λ _D 0,036 W/mK (posa a secco)	0,14	150	21	0,034	3,889
4. Strato separatore (geotessuto 300 g/mq)	-	-	-	-	-
5. Intercapedine d'aria in quiete	0,03	1	0,03	-	0,162
6. Pavimentazione in CLS prefabbricata (*)	0,04	60	2,4	1,5	0,027
Superficie esterna	-	-	-	-	0,04

(*) Nel caso delle pavimentazioni flottanti, è importante scegliere un piedino con una superficie di appoggio pari almeno a 250-300 cmq per non provocare una rottura a punzonamento dell'isolante.



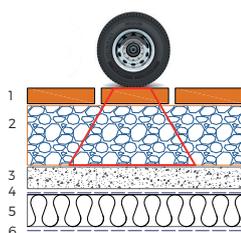
TETTI DESTINATI A PARCHEGGIO

La progettazione di una copertura destinata a parcheggio, sia nel caso di tetti caldi sia in quelli rovesci, è piuttosto complessa in quanto è soggetta ad azioni statiche e dinamiche particolarmente gravose. La scelta dell'isolante dovrà tener conto del carico concentrato trasmesso dagli automezzi e dalla tipologia di parcheggio (flessibile con autobloccanti o rigida su massetto in calcestruzzo) che determina una diversa distribuzione delle sollecitazioni nella stratigrafia della copertura stessa. La caratteristica da considerare è quella relativa alla resistenza a compressione a lungo termine con una deformazione massima del 2%.

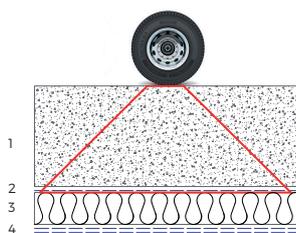
La distribuzione del carico (P) dovuto all'automezzo in movimento, e quindi con sollecitazione dinamica e di urto, avviene in caso di struttura non compatta (strato di sabbia ed elementi autobloccanti) con un angolo di 60° rispetto all'orizzontale e con un angolo di 45° in caso di pavimentazione rigida. Ciò significa che l'area (B) dell'isolante soggetta a compressione è maggiore dell'impronta di carico (A) ed è funzione dello spessore h degli strati posti tra pavimentazione e isolante.

Si dovrà pertanto verificare che la sollecitazione di compressione agente sull'isolante $\sigma = P/B$ sia minore della resistenza a compressione a lungo termine con una deformazione massima del 2%.

Generalmente si preferiscono pannelli con una resistenza a compressione (al 10% di deformazione) di 500 kPa per i parcheggi con traffico veicolare leggero e superiore a 700 kPa per quelli con traffico pesante.



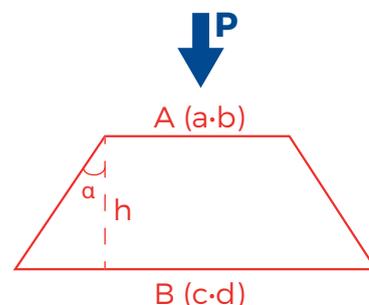
Stratigrafia pavimentazione autobloccante - pavimentazione in autobloccanti (1), strato di sabbia (2), massetto armato (3), elemento separatore (4), isolante termico (5), impermeabilizzazione copertura (6). Lo spessore h da considerare è $h = (1)+(2)$



Stratigrafia pavimentazione rigida - pavimentazione in CLS armato (1), strato separatore (2), isolante termico (3), impermeabilizzazione (4). Lo spessore h da considerare è $h = (1)$

P = carico trasmesso dal pneumatico
 A = area di carico sulla pavimentazione del pneumatico
 B = area di carico sull'isolante
 $\sigma = P/B$ sollecitazione di compressione sull'isolante

$c = b + 2 \cdot (h \times \text{tg}\alpha)$
 $d = a + 2 \cdot (h \times \text{tg}\alpha)$
 $\alpha = 45^\circ$ pavimentazione rigida in CLS
 $\alpha = 30^\circ$ pavimentazione autobloccante



Carichi relativi ad alcuni autoveicoli

TIPO DI CARICO	CARICO ASSIALE PER RUOTA "P" [KG]	SUPERFICIE DI CARICO PER RUOTA "A X B" [CM]
Autovettura leggera	400	14 x 14
Autovettura pesante	700	18 x 18
Autotreno classe 3 t	1.000	20 x 20
Autotreno classe 9 t	3.000	26 x 20
Autotreno classe 16 t	5.500	40 x 20

Esempio di verifica

Autovettura pesante 700 kg per ruota
 $A = a \cdot b = 18 \cdot 18 \text{ cm}$
 Pavimentazione autobloccante 8 cm
 Strato di sabbia 6 cm



$h = 6 + 8 = 14 \text{ cm}$
 $B = 1.168 \text{ cm}^2$
 $\sigma = 700/1168 = 0,6 \text{ kg/cm}^2 = 60 \text{ kPa}$



L'isolante dovrà avere un valore $CC(2/1,5/50) > 60 \text{ kPa}$

ISOLAMENTO DALL'INTERNO

L'isolamento dall'interno è la soluzione per le riqualificazioni energetiche di edifici sottoposti a tutela architettonica o di singole unità abitative in condomini pluripiano.

Come anticipato nel primo capitolo a pagina 15, la posizione dell'isolante nella struttura non cambia il valore della sua trasmittanza ma ne influenza il comportamento.

La massa della struttura non partecipa all'accumulo termico ma la struttura può beneficiare di una maggiore velocità di reazione dell'ambiente in merito all'uso degli impianti.

Ciò significa che, ad esempio, all'accensione dell'impianto termico, gli ambienti si riscaldano prima rispetto a quelli isolati dall'esterno, ma si raffreddano altrettanto rapidamente allo spegnimento (analogo comportamento con gli impianti di condizionamento estivo).

In generale il ricorso all'isolamento dall'interno è consigliato per ambienti vissuti saltuariamente e che quindi devono essere riscaldati/raffreddati rapidamente (ad esempio uffici e seconde case).

Nella Tabella 2 sono sintetizzati i vantaggi e gli svantaggi di un isolamento dall'interno.

Tabella 2 - Vantaggi e svantaggi dell'isolamento dall'interno

VANTAGGI

- Può essere effettuato su una singola parete
- Tempi brevi di realizzazione
- Non sono necessari i ponteggi
- L'intercapedine della controparete realizzata su orditura metallica consente l'alloggiamento degli impianti tecnici senza dover eseguire tracce a parete
- Miglioramento del comfort abitativo

SVANTAGGI

- Riduzione della superficie interna utile
- Riduzione dell'altezza di interpiano in caso di isolamento a soffitto
- Rischio di formazione di condensa interstiziale all'interfaccia isolante-parete
- La parete non contribuisce al clima interno in forma di volano termico (riduce l'inerzia termica della struttura)
- Non elimina i ponti termici del nodo solaio-parete

TECNICHE D'INTERVENTO

Le tecniche realizzative consistono in cappotti interni o contropareti come qui di seguito descritto.

• Cappotto interno

Avviene come nel caso del cappotto esterno mediante incollaggio e successiva rasatura dell'isolante termico con rete di rinforzo. Il fissaggio meccanico, quando necessario, sarà dato da un minor numero di tasselli al metro quadro rispetto al cappotto esterno in quanto il vento non esercita la propria azione.

• Controparete per incollaggio di pannelli preaccoppiati

Avviene mediante incollaggio di pannelli isolanti (fibrosi o sintetici) preaccoppiati a lastra in cartongesso (vedi Figura 11).



Figura 11 - Esempi di pannelli preaccoppiati

L'isolante viene addossato alla parete, mentre la lastra rimane a vista e può essere rifinita e tinteggiata secondo le proprie necessità. Per quanto semplice sia la realizzazione di una tale contropa-

rete, quasi da “fai-da-te”, in fase di posa è opportuno prestare attenzione ad alcuni particolari onde vanificare l’efficacia dell’intervento (vedi Figura 12).

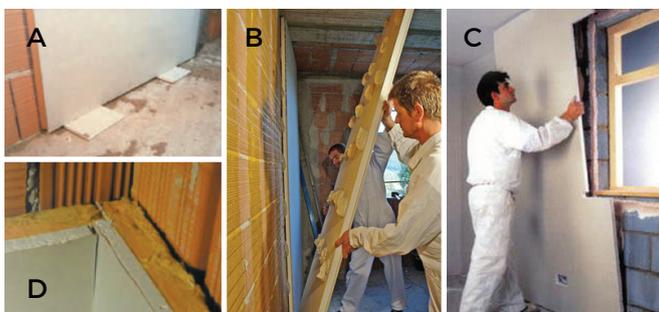


Figura 12 - Indicazioni per la posa dei pannelli preaccoppiati

A) Tenere la lastra sollevata dal pavimento di un centimetro (usando appositi alza-lastre o sfridi di lastre di cartongesso).

B) Incollare le lastre per punti evitando la fuoriuscita di malta tra le linee di accostamento dei pannelli.

C) Effettuare i giunti a bandiera in corrispondenza delle aperture (porte e finestre).

D) Avere cura negli angoli di rimuovere da un pannello una striscia di lastra di rivestimento pari allo spessore dell’isolante per evitare i ponti acustici e limitando le trasmissioni laterali.

• Contropareti e/o controsoffitti su orditure metalliche

Si realizza una orditura metallica ancorata alla struttura da isolare con ganci distanziatori oppure autoportante posizionandola su guide fissate sia a soffitto sia a parete.

Sull’orditura metallica vengono fissate una o due lastre di rivestimento in gesso rivestito (cartongesso) o gesso fibra. L’isolante inserito nelle intercapedini è, solitamente, di natura fibrosa in modo da

offrire un valido contributo all’isolamento acustico per effetto del principio massa-molla-massa dove le masse sono rappresentate dalla struttura esistente (parete o solaio) e dalle lastre di rivestimento, mentre la molla dall’isolante.

La verifica dei limiti di trasmittanza ai sensi nel Decreto Requisiti Minimi, anche se nel caso di riqualificazioni energetiche dall’interno e nelle intercapedini sono maggiorati del 30% (vedi Tabella 3), impone l’uso di elevati spessori di isolante che possono provocare la formazione di condensa interstiziale.

Per evitare tale rischio si dovrà ricorrere a un freno al vapore da posizionare sul lato caldo dell’isolante oppure a lastre preaccoppiate a barriera al vapore. In alternativa si può realizzare un cappotto interno con isolanti igroscopici e traspiranti (vedi pag. 51).

Tabella 3 - Limiti di trasmittanza per riqualificazione dall’interno e in intercapedine

ZONA CLIMATICA	RISTRUTTURAZIONI ISOLAMENTO DALL’INTERNO/INTERCAPEDINE	
	Da 01.10.15	Da 01.01.19/21
A e B	$0,45 + 30\% = 0,585$	$0,40 + 30\% = 0,52$
C	$0,40 + 30\% = 0,52$	$0,36 + 30\% = 0,468$
D	$0,36 + 30\% = 0,468$	$0,32 + 30\% = 0,416$
E	$0,30 + 30\% = 0,39$	$0,28 + 30\% = 0,364$
F	$0,28 + 30\% = 0,364$	$0,26 + 30\% = 0,338$



MEMBRANA FRENO AL VAPORE A DIFFUSIONE VARIABILE

In linea generale il vapore procede dall’interno verso l’esterno. In alcuni casi, nella stagione estiva, il flusso può essere invertito.

Se è presente una barriera al vapore, l’umidità non potrebbe essere smaltita e asciugata nell’ambiente interno in quanto sarebbe bloccata dalla barriera.

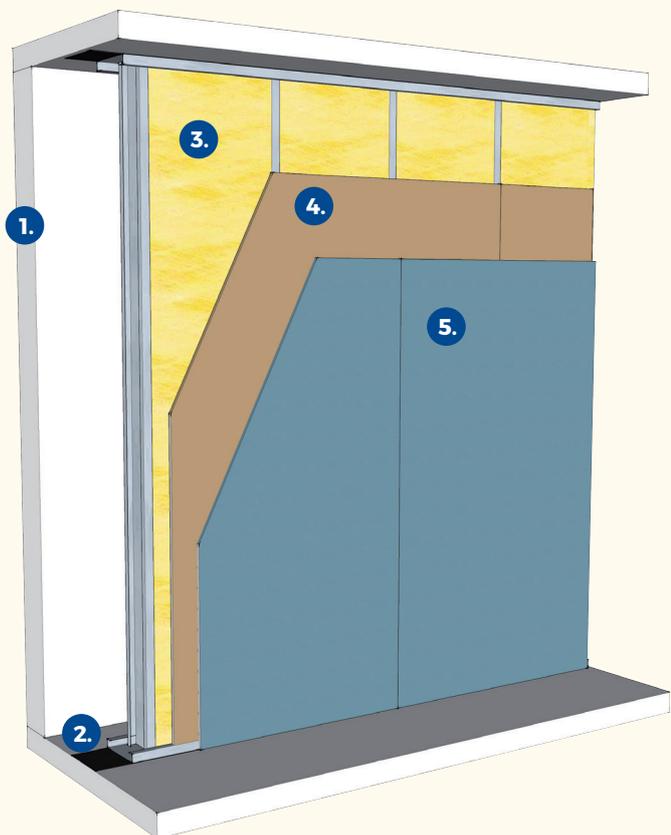
Per consentire alla parete di scambiare l’umidità sia verso l’esterno sia verso l’interno, al posto della tradizionale barriera al vapore può essere applicata una **guaina freno al vapore a diffusione variabile**.

Questa è in grado di modulare il passaggio dell’umidità in relazione alle condizioni ambientali.

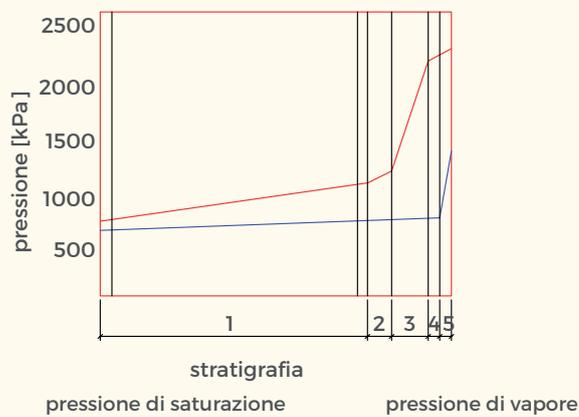
In inverno la membrana è chiusa alla diffusione del vapore per proteggere l’isolante, in estate si apre alla diffusione consentendo al materiale di asciugare anche verso l’interno.



Esempio di stratigrafia di controparete interna Calcoli Performance eseguiti con Klimat v.3



Verifica di Glaser (mese gennaio)



PERFORMANCE DI CONTROPARETE INTERNA	
▶ U 0,369 W/mqK	▶ F _a 0,138
▶ Sfasamento 11 ore 57 min	▶ No condensa
▶ Y _{ie} 0,051	▶ No muffa
▶ Spessore controparete 10 cm	▶ Spessore totale parete 43 cm

	Spessore [m]	Fattore di resistenza al vapore	Spessore equivalente d'aria [m]	Conducibilità termica	Resistenza termica
Superficie esterna	-	-	-	-	0,04
1. Muratura intonacata in laterizio alveolato (1,5 + 30 + 1,5 cm)	0,33	-	6,45	-	0,808
2. Intercapedine d'aria ferma	0,015	1	0,015	-	0,183
3. Isolante fibroso 21 kg/mc	0,05	1	0,05	0,035	1,429
4. Lastra in gesso rivestito	0,0125	4	0,05	0,21	0,06
5. Lastra in gesso rivestito accoppiata a barriera al vapore	0,0125	-	46,25	0,2	0,063
Superficie interna	-	-	-	-	0,13

PONTE TERMICO PARETE-SOLETTA

La coibentazione interna della parete va abbinata preferibilmente a un intervento più ampio che riguarda **l'intradosso del solaio**.

Le analisi agli elementi finiti in Figura 13 mostrano,

a titolo esemplificativo, come cambiano le temperature nei punti critici (spigoli) nelle diverse situazioni di una parete non isolata, isolata o isolata con isolamento esteso a parte del solaio.

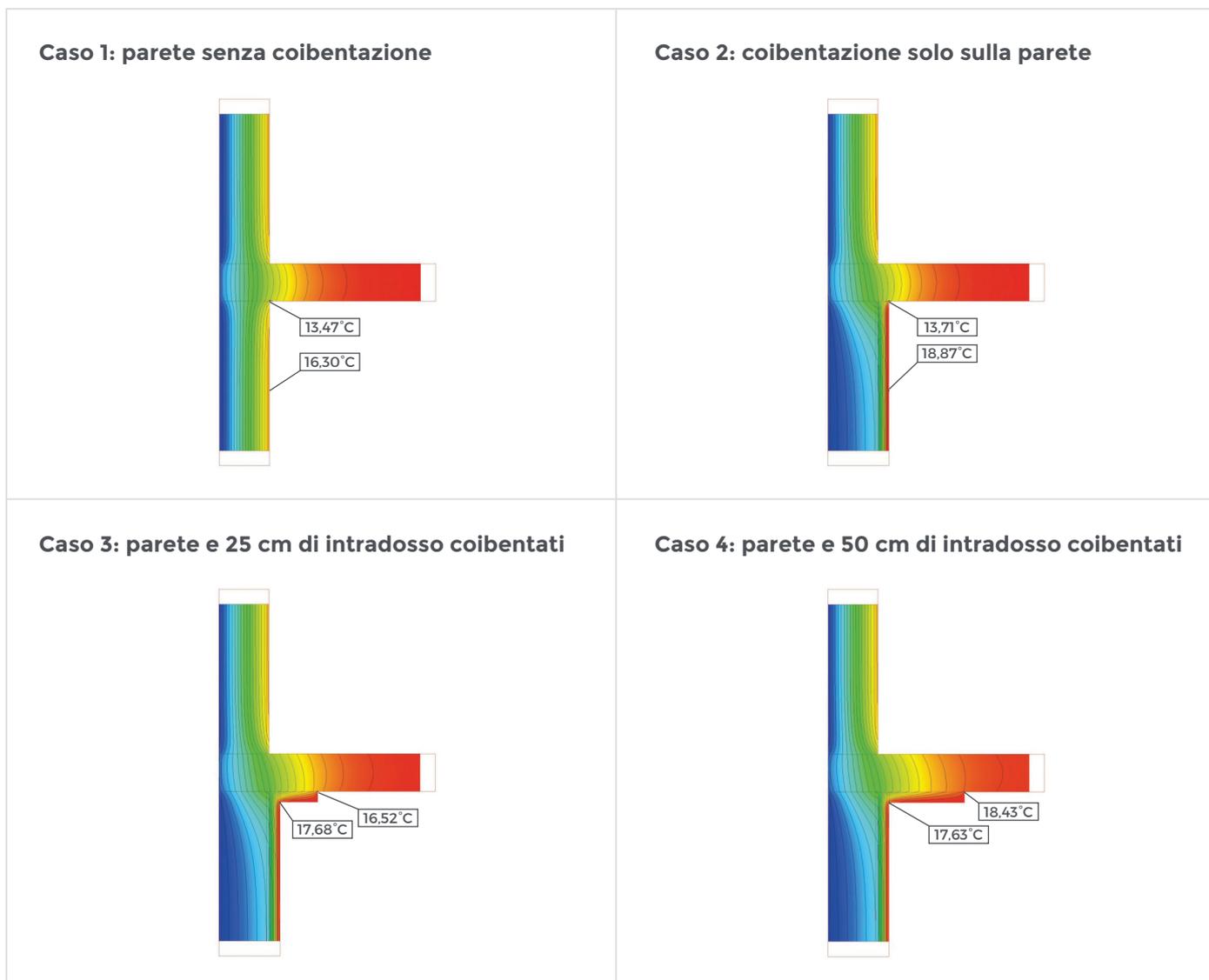


Figura 13 - Analisi di un cappotto interno [fonte Tecnosugheri, approfondimento n. 2 - maggio 2014 a cura di ing. Franco Piva]

Prendendo in esame il caso 1 (parete non isolata) e il caso 2 (coibentazione solo sulla parete), sebbene la temperatura superficiale interna sia notevolmente aumentata rispetto al caso 1 senza isolamento a beneficio del comfort (18,87 °C nel caso 2 contro i 16,30 °C nel caso 1), la differenza di temperatura negli spigoli è invece minima (13,47 °C nel caso 1 contro i 13,71 °C nel caso 2).

Risvoltando di 25 cm l'isolante (caso 3) la temperatura allo spigolo si porta a 17,68 °C mentre il punto più freddo del solaio si trova a 16,52 °C. Prolungando ulteriormente l'isolamento di altri 25 cm (caso 4) l'andamento delle temperature risulta pressoché

uniforme e il ponte termico può ritenersi corretto.

Per ridurre l'effetto negativo del ponte termico causato dalla soletta in cemento armato si raccomanda pertanto d'isolare l'intradosso del solaio per almeno 50 cm.

Dal punto di vista estetico, questa soluzione crea un gradino in corrispondenza del pannello a soffitto, ma non per forza questo rappresenta un problema. Un bravo architetto o interior-designer saprà certamente trasformare il dislivello in qualcosa di creativo in grado di caratterizzare e valorizzare l'ambiente.

COIBENTAZIONE CON ISOLANTI IGROSCOPICI

Gli isolanti igroscopici sono caratterizzati da una elevata capacità di accumulo di umidità grazie alla struttura molto porosa che consente il trasporto di umidità sia per diffusione sia per capillarità. Fungono pertanto da volano igrometrico della struttura regolando l'umidità dell'ambiente.

Quelli più usati sono i pannelli in idrato di silicato di calcio, in silicato di calcio e in fibra di legno.

La **lastra in idrato di silicato di calcio** è una lastra a base di polvere di quarzo, idrato di calce, cemento, anidrite, inerti minerali, polvere di alluminio come agente porizzante, e successivamente invecchiata in autoclave mediante un bagno di vapore ad alta pressione (5-12 ore a 190 °C a 12 bar). I pori hanno un diametro variabile tra 0,5 e 1,5 mm e sono riempiti solo di aria conferendo elevata traspirabilità (μ pari a 3), igroscopicità e buone doti di assorbimento acustico.

Tuttavia non esiste una norma armonizzata di riferimento e la marcatura CE è basata su Benestare Tecnico Europeo.

La posa in opera avviene incollando il pannello, eventualmente tassellandolo (con un numero di tasselli inferiori al cappotto esterno) e successivamente proteggendolo con un sottile strato dirasatura armata (vedi Figura 14).



Figura 14 - Rasatura su cappotto interno

Essendo un materiale incombustibile è ideale nell'isolamento di solai freddi, su cantine e garage (vedi Figura 15).



Figura 15 - Isolamento di cantine fredde

Il **pannello in silicato di calcio** (detto anche calcio silicato) è prodotto a partire da calce e silice in quantità predominanti e una minima di cellulosa, ma a differenza del precedente non contiene cemento.

La principale caratteristica del calcio silicato è la porosità, pari al 90%, che lo rende altamente traspirante. Inoltre, il pH è talmente alcalino (circa 10-10,5) da impedire la formazione di muffe e batteri che non trovano un terreno adatto alla loro crescita.

Infine il calcio silicato ha un ottimo comportamento al fuoco essendo in classe A1.



PRODOTTI ANTIMUFFA

I prodotti antimuffa sono dei detergenti e igienizzanti in grado di pulire la parete dalle muffe ma non eliminano il problema. Terminata l'efficacia del principio attivo la muffa potrebbe ripresentarsi.

Le possibilità per evitare le muffe, come detto nel primo capitolo (vedi pag. 22), sono:

- tenere basso il tasso di umidità dell'aria (attraverso i ricambi d'aria naturale o con la VMC);
- avere una temperatura superficiale interna alta.

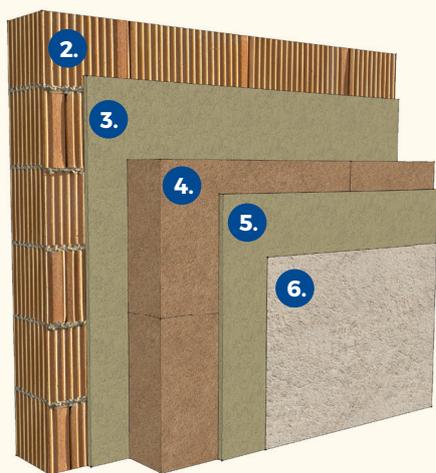


Scegliendo la **fibra di legno** è importante verificare che la superficie della parete esistente sia in grado di assorbire umidità; in caso contrario si dovrà realizzare un strato di intonaco assorbente e igroscopico ad esempio alla calce o all'argilla.

Anche la successiva rasatura dovrà essere igroscopica e traspirante (alla calce o all'argilla).

Per prevenire la formazione di muffa il ciclo pittorico dovrà avere un elevato valore di pH come per esempio una pittura alla calce.

Esempio di stratigrafia di cappotto interno in fibra di legno Calcoli Performance eseguiti con KliMat v.3



PERFORMANCE CAPPOTTO INTERNO IN FIBRA DI LEGNO

▶ U 0,421 W/mqK	▶ F _a 0,101
▶ Sfasamento 13 ore 51 min	▶ Per la formazione di condensa è necessaria la verifica in regime dinamico
▶ Y _{ie} 0,051	▶ Spessore totale parete 40 cm

	Spessore [m]	Fattore di resistenza al vapore	Spessore equivalente d'aria [m]	Conducibilità termica	Resistenza termica
Superficie esterna	-	-	-	-	0,04
1. Intonaco esterno	0,015	20	0,3	0,9	-
2. Muratura in laterizio alveolato	0,30	-	6,45	-	0,77
3. Intonaco assorbente a base argilla	0,02	5	0,1	1,1	0,018
4. Isolante fibra di legno 6 cm, 175 kg/mc	0,06	-	0,75	0,043	1,395
5. Rasatura armata a base argilla	0,005	4	0,05	0,21	0,005
6. Intonachino base argilla	0,0015	-	-	-	-
Superficie interna	-	-	-	-	0,13



VERIFICA IGROMETRICA IN REGIME DINAMICO

La verifica igrometrica secondo la UNI 13788 avviene in condizioni stazionarie supponendo valori medi di temperatura interna ed esterna. Secondo Glaser, due materiali che hanno lo stesso coefficiente di resistenza al vapore (μ) si comportano allo stesso modo. Infine non vengono prese in esame le caratteristiche che possono influenzare il trasporto di vapore sia a livello di materiale (igroscopicità) sia di condizioni meteorologiche (pioggia, vento, irraggiamento e variabilità della temperatura). Con buona probabilità in caso di isolamento interno con materiali igroscopici senza barriera al vapore la verifica non è soddisfatta anche se poi la realtà non mostrerebbe problematiche di alcun tipo.

Per superare questi limiti, il nuovo Decreto Requisiti Minimi ammette la verifica in regime dinamico, ai sensi della norma UNI EN 15026, per mezzo di opportuni software (il più noto è il WUFI).

In definitiva si può ammettere che il metodo stazionario fornisce risultati più cautelativi, e sarà opportuno rifarsi al regime dinamico per un'analisi più qualitativa e reale del fenomeno.

ISOLANTI INNOVATIVI A BASSO SPESSORE

Negli ultimi anni hanno cominciato ad affermarsi sul mercato dell'edilizia prodotti già noti nel campo aerospaziale, medico e nella produzione dei frigoriferi. L'innovazione tecnologica ha dimostrato di svolgere un ruolo determinante nello sviluppo di materiali altamente isolanti con spessori molto bassi.

PANNELLI ISOLANTI IN AEROGEL

L'aerogel è stato originariamente impiegato dalla Nasa per l'isolamento termico delle tute spaziali. È un solido nanoporoso rivoluzionario, una nanoschiuma, che si ottiene per gelificazione della silice. È composto per la quasi totalità da aria (circa il 95-98%) e silice (principale componente del vetro) e si caratterizza per la sua estrema leggerezza, trasparenza e bassissima conducibilità termica (i valori variano da 0,017 W/mK a 0,0042 W/mK). La dimensione dei pori è talmente piccola che al suo interno sono praticamente annullati i fenomeni di scambio termico per convezione.

Poiché l'aerogel per natura è idrofilo, per evitare il processo di degradamento strutturale causato dall'assorbimento di umidità, deve essere reso idrofobo non solo esternamente ma, per maggiore sicurezza, anche internamente.

Applicazioni dell'aerogel

• Pannelli compositi

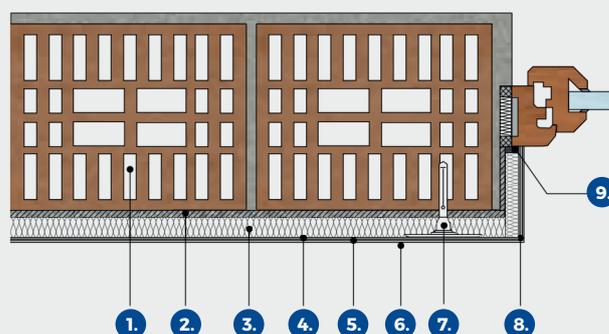
Nelle applicazioni a cappotto si usano pannelli compositi di nuova concezione formati da aerogel accoppiato ad altri materiali come membrane traspiranti in polipropilene armato con fibra di vetro, poliuretano, lana di roccia, polietilene tereftalato (PET), fibra di vetro a filamento continuo e cartongesso. Sono particolarmente indicati in tutti quegli interventi che necessitano del massimo livello di coibentazione nel minor spazio

possibile (riqualificazione dall'interno e recuperi edilizi di edifici storici sottoposti a vincoli architettonici).



POSA DEL CAPPOTTO IN AEROGEL

La modalità di posa del cappotto in aerogel è pari a quella di qualsiasi altro sistema a cappotto interno. Non sono quindi necessarie particolari e specifiche istruzioni. Si tagliano facilmente su misura e sono abbastanza flessibili da essere montati su parti di edificio a sezione non costante. In corrispondenza degli imbotti di porte e finestre, la larghezza delle aperture (luce) diminuisce in maniera del tutto trascurabile.



Particolare dettaglio del risvolto del cappotto in aerogel in corrispondenza del serramento. Elementi del sistema:

- 1) Parete perimetrale, 2) Adesivo alla calce, 3) Pannello isolante aerogel, 4) Primo strato di rasatura alla calce con rete di rinforzo, 5) Secondo strato di rasatura, 6) Finitura a spessore tipo tonachino, 7) Tassello di fissaggio, 8) Paraspigoli di rinforzo angolare con rete preaccoppiata in fibra di vetro, 9) Guarnizione.



• Intonaci isolanti

L'aerogel, in forma di granulato, viene utilizzato come inerte isolante nell'intonaco alla calce Idraulica. Il prodotto è un intonaco altamente isolante, con valori di conducibilità termica pari a 0,028 W/mK, adatto per la ristrutturazione di edifici storici adattandosi a qualunque forma delle superfici (come ad esempio soffitti a volta). Si possono realizzare spessori di 3-5 cm; per conferire una maggiore resistenza meccanica è necessario il successivo strato di rasatura armata.

• Isolamento termico delle tubazioni

In feltro, dello spessore di 1-2 cm, si prestano bene per l'isolamento delle tubazioni degli impianti di riscaldamento. Può trovare utilizzo anche nel campo solare termico come isolante termico delle connessioni tra pannelli solari termici e accumuli.

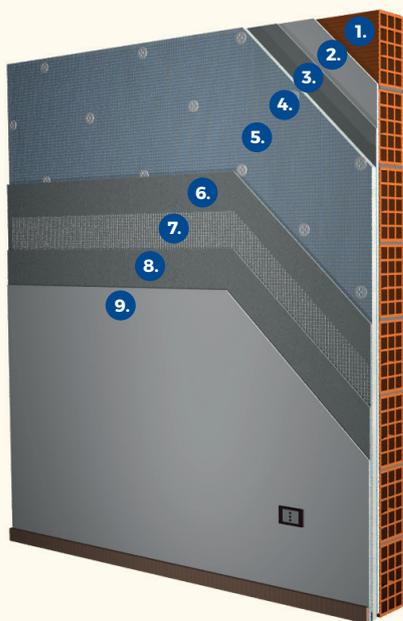
• Isolamento termico di superfici trasparenti

L'aerogel viene usato sia in forma granulare, di microsferiche di diametro variabile, per riempire

l'intercapedine del vetrocamera, sia come lastra monolitica, di spessore variabile da 8 a 20 mm, da inserire come isolante tra due vetri.

La presenza di aerogel nell'intercapedine delle finestre comporta, rispetto a un vetrocamera tradizionale, una riduzione della trasmissione luminosa e del fattore solare (pur isolando termicamente in maggior misura, penalizza l'illuminazione naturale degli ambienti).

Esempio di stratigrafia di cappotto interno con pannello in aerogel Calcoli Performance eseguiti con KliMat v.3



PERFORMANCE CAPPOTTO INTERNO IN AEROGEL

- ▶ Spessore complessivo cappotto 5 cm
- ▶ $U_{in} = 1,022 \text{ W/m}^2\text{K}$
- ▶ $U_{riq} = 0,289 \text{ W/m}^2\text{K}$
- ▶ $Y_{ie(riq)} = 0,036$
- ▶ $f_{a(riq)} = 0,124$
- ▶ Sfasamento 12 ore 23 min
- ▶ No condense
- ▶ No muffe

	SPESSORE [m]	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE	SPESSORE EQUIVALENTE D'ARIA [m]	CONDUCIBILITÀ TERMICA	RESISTENZA TERMICA
Superficie interna	-	-	-	-	0,04
Intonaco esterno	0,015	20	0,3	0,9	0,017
Muratura esistente in laterizio alveolato 30 cm (1)	0,30	20	16		0,77
Intonaco interno (2)	0,015	10	0,15	0,7	0,021
Pannello isolante composito in aerogel (5)	0,04	13	2,5	0,016	2,5
Rasante alla calce (6), (8) con interposta Rete antialcali (7)	0,006	12	0,072	0,7	0,009
Finitura per interni alla calce (9)	-	-	-	-	-
Superficie esterna	-	-	-	-	0,13

Nota - Elementi non presi in considerazione ai fini del calcolo: Adesivo alla calce (3), Tasselli (4)

ISOLANTI A CAMBIAMENTO DI FASE “PCM”

I materiali a cambiamento di fase PCM, Phase Change Materials, chiamati anche materiali accumulatori di calore latente, sono in grado di assorbire e cedere notevoli quantità di energia mantenendo costante la propria temperatura per effetto del fenomeno fisico della transizione di fase passando dallo stato solido a quello liquido e viceversa. A temperatura ambiente il PCM è solido, ma quando questa sale e supera una certa soglia, che varia a seconda della natura del PCM stesso, esso si liquefa accumulando calore (latente di liquefazione) che viene sottratto all'ambiente (vedi Figura 16). Allo stesso modo, quando la temperatura scende, il materiale si solidifica e cede calore (latente di solidificazione).

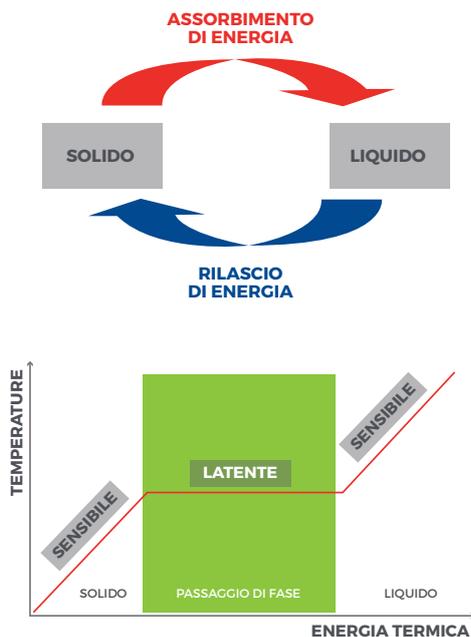


Figura 16 - Schema di funzionamento dei PCM ed energia accumulata

Il PCM per essere usato deve essere inglobato in un contenitore in grado di contenere gli aumenti di volume conseguenti al passaggio di fase da solido a liquido. I sistemi di contenimento utilizzati sono l'immersione e l'incapsulamento.

• **Immersione del PCM fuso in matrici porose come blocchi di cemento o gesso** - In questo modo è possibile convertire pannelli di rivestimento ordinari

in pannelli di rivestimento con PCM. Lo svantaggio è il calo delle prestazioni e l'instabilità nel tempo.

• **Microincapsulamento** - Ciascuna particella solida (di diametro minore di 1 mm) o liquida è circondata da un film continuo di polimeri.

• **Macroincapsulamento** - Permette il confezionamento in contenitori singoli (ad esempio tubi, sfere, pannelli e altri recipienti) di dimensioni dell'ordine del centimetro che vengono poi incorporati negli elementi da costruzione.

I requisiti dei PCM

I requisiti che un PCM deve possedere per poter essere impiegato in edilizia sono:

- temperatura di fusione pari alle condizioni di comfort abitativo (nelle applicazioni in interno, variabile tra 23 e 26 °C); il vantaggio energetico si riduce sempre più all'aumentare della differenza tra temperatura di fusione e di esercizio;
- elevato calore latente di liquefazione per unità di massa per massimizzare l'accumulo termico;
- elevata densità per minimizzare gli ingombri;
- elevato calore specifico per minimizzare l'eventuale variazione di temperatura;
- elevata conducibilità termica per migliorare la cinetica del processo;
- ridotte variazioni di volume conseguenti agli aumenti di temperatura e al passaggio di fase;
- stabilità chimico-fisica per limitare il degrado delle prestazioni nel tempo;
- compatibilità chimica con i materiali da costruzione coinvolti (ad esempio non deve provocare fenomeni di corrosione);
- igroscopicità nulla (non deve accumulare umidità nella ricristallizzazione);
- basso costo;
- disponibile sul mercato in quantità tali da poter essere incorporato nei normali materiali edilizi.



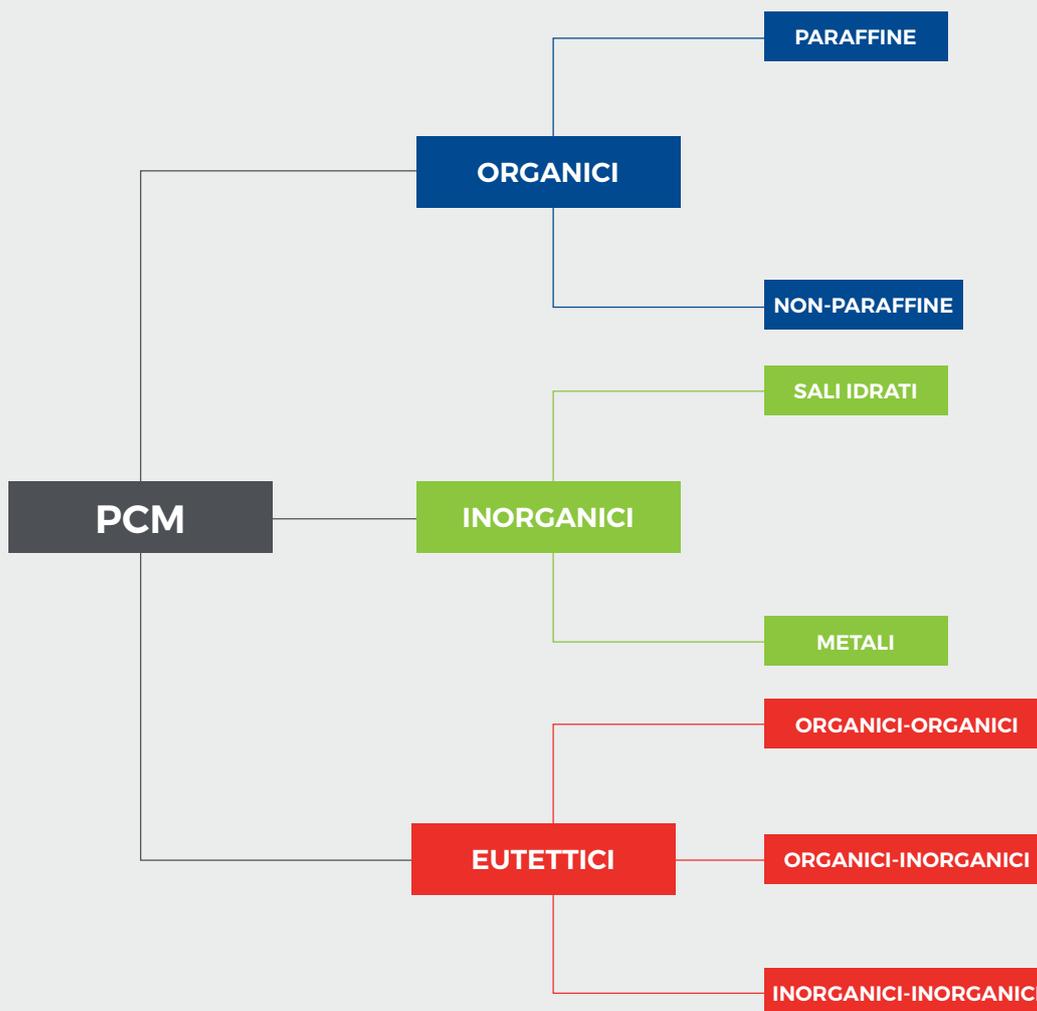
NATURA E CLASSIFICAZIONE DEI PCM

I materiali PCM sono classificati in organici, inorganici ed eutettici (questi ultimi hanno proprietà intermedie ai due). Attualmente i PCM più sperimentati in edilizia, in quanto rispondono meglio alle caratteristiche precedentemente citate, sono i composti organici paraffinici e alcuni inorganici come i sali idrati.

Le **paraffine cere** sono dei composti organici (alcani) derivati degli idrocarburi che a temperatura ambiente si presentano con una consistenza simile a quella della cera di colore biancastra. La temperatura di fusione e il calore latente di fusione aumentano all'aumentare del numero di atomi di carbonio. Le sostanze aventi alcani con 14-40 atomi di carbonio presentano punti di fusione da 6 a 80 °C. Sono affidabili, stabili chimicamente e caratterizzati da ridotte variazioni di volume. Tra gli svantaggi hanno una bassa conducibilità termica, una moderata infiammabilità e sono incompatibili con i contenitori in plastica.

I **sali idrati** sono più economici delle paraffine sono caratterizzate da una maggior conducibilità termica. Tuttavia hanno lo svantaggio di fondere in maniera non uniforme, di non essere compatibili con alcuni materiali da costruzione e necessitano di addensanti per garantire una maggiore stabilità nel tempo.

Tra i sali idrati (inorganici) il più comune è il **sale di Glauber** (solfato di sodio decaidrato) con punto di fusione di 32,4 °C.





QUALI PRODOTTI PER I PCM?

- Lastre di gesso contenenti 3 kg/mq di PCM in microcapsule (PCM Micronal dalla BASF Italia nella lastra Smartboard in gesso rivestito della KANUF), utilizzate per il rivestimento d'interni e per pareti divisorie.
- Superfici vetrate pluristrato (a tre strati) nelle quali l'intercapedine più interna è occupata da un pannello trasparente di 24 mm contenente PCM.
- Speciali intonaci caricati con una piccola quantità di microcapsule contenenti paraffina il cui cambiamento di fase avviene a una temperatura compresa tra 23 °C e 26 °C; tali intonaci hanno una capacità termica maggiore di un normale intonaco per unità di superficie (vedi Tabella).

Effetto dell'inserimento di percentuali variabili di microcapsule paraffine cera in un intonaco a base gesso

INTONACO DI GESSO	DENSITÀ [kg/mc]	CALORE SPECIFICO [kJ/kgK]	CONDUCIBILITÀ [W/mK]	CALORE LATENTE [kJ/kg]
Convenzionale	696	1.089	0,173	0
10% PCM	720	1.215	0,187	19,3
16% PCM	760	1.299	0,192	31
20% PCM	800	1.341	0,204	38,9
30% PCM	998	1.467	0,232	58,3



Vantaggi dei PCM

I PCM costituiscono un volano inerziale con l'impiego di un materiale circa 40 volte più leggero rispetto a uno tradizionale.

Per esempio una lastra in gesso di 15 mm di spessore, rivestita con PCM a base di paraffina, ha le stesse prestazioni in termini di capacità termica di un blocco di calcestruzzo pieno di 100 mm di spessore e di 150 mm di laterizio.

L'uso dei PCM è particolarmente vantaggioso nei rivestimenti interni delle strutture leggere a secco "a bassa inerzia termica", in quanto determina:

- l'aumento dell'inerzia termica dell'edificio;
- la riduzione delle oscillazioni di temperatura superficiale e quindi della temperatura operante;
- la riduzione dei rischi di surriscaldamento dovuto

ai carichi interni e alla radiazione solare estiva;

- il controllo della variazione termica tra interno ed esterno dell'ambiente.

Il loro apporto può essere allo stesso modo positivo anche per l'edilizia pesante, alleggerendo l'impegno inerziale dei componenti massivi.

Studi sperimentali hanno dimostrato che **l'applicazione dei PCM in contesti climatici caldi, come il centro sud italiano, consente di ridurre il consumo energetico e le emissioni di anidride carbonica di circa il 20% e di migliorare il comfort abitativo sia in estate sia in inverno.**

Il risparmio energetico potrebbe raggiungere valori fino al 70% abbinando il PCM a un ulteriore strato di isolamento termico.

TERMORIFLETTENTI

I materiali termoriflettenti agiscono per riduzione dell'energia trasmessa per irraggiamento grazie al rivestimento basso emissivo delle loro superfici. Più che materiali sarebbe opportuno definirli sistemi riflettenti in quanto la loro capacità di riflettere il calore si può attuare solo in presenza di una intercapedine d'aria.

La maggior parte dei materiali usati in edilizia è caratterizzata da un valore di emissività del 90%, pertanto emettono quasi tutta l'energia associata alla loro temperatura, e assorbono la maggior parte dell'energia incidente (vedi Figura 17A).

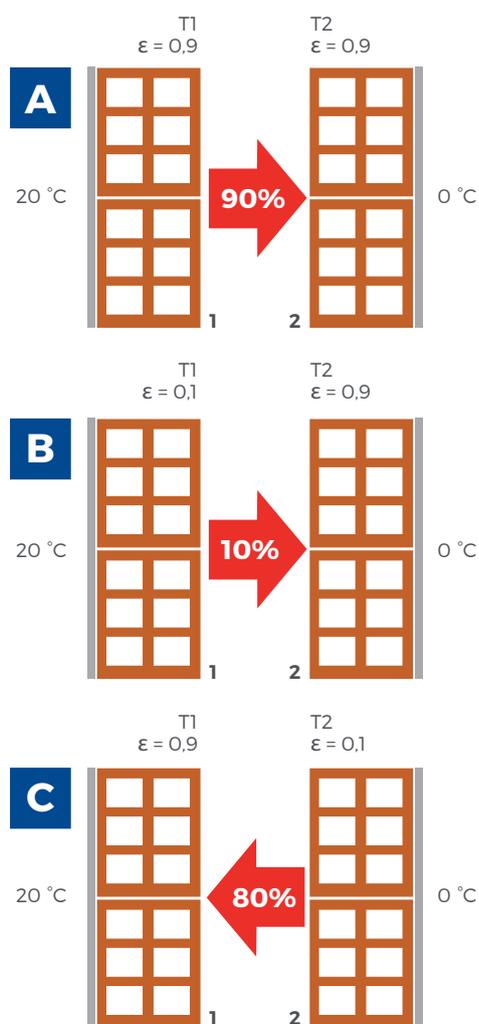


Figura 17 - A) Parete a cassa vuota senza rivestimenti basso emissivi; B) Rivestimento basso emissivo applicato sulla faccia 1 (la superficie emette una piccola percentuale di energia); C) Rivestimento basso emissivo applicato sulla faccia 2 (la superficie si comporta da riflettente).

Se la parete viene rivestita internamente sulla faccia 1 con materiale basso emissivo, il calore trasmesso per irraggiamento si riduce sensibilmente in funzione di ϵ (vedi Figura 17B).

Se invece il rivestimento basso emissivo viene applicato sulla faccia 2, questa si comporterà come altamente riflettente (vedi Figura 17C).

Il termoriflettente mostra la sua maggior efficacia quando si trova tra due intercapedini funzionando contemporaneamente da riflettente e basso emissivo (vedi Figura 18).

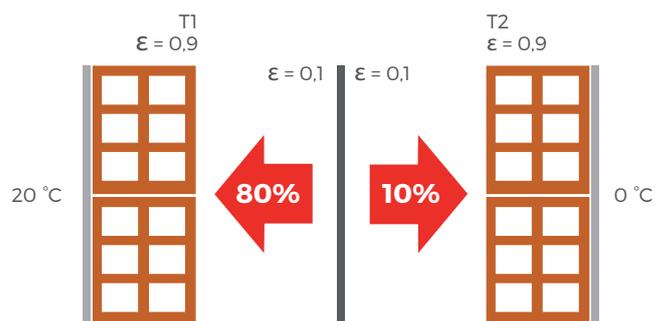


Figura 18 - Corretto posizionamento del materiale termoriflettente [immagini tratte da ANIT "corretta progettazione con materiali isolanti termoriflettenti"]

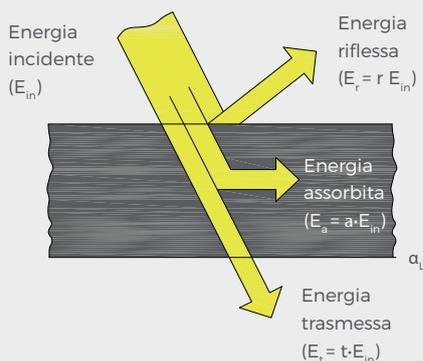
Poiché lo scambio per irraggiamento è proporzionale alla differenza tra le quarte potenze delle temperature delle due facce delle intercapedini e poiché le resistenze termiche delle intercapedini sono maggiori in caso di flusso discendente, la migliore applicazione dei termoriflettenti è quella in copertura in estate per ridurre le rientrate di calore.

Un materiale basso emissivo a contatto con un altro materiale non è in grado di ridurre la trasmissione del calore in quanto il calore si propaga per conduzione e non irraggiamento. In tal caso si comporterebbe come un comune isolante termico.



EMISSIVITÀ, ASSORBIMENTO E RIFLESSIONE DELL'ENERGIA TERMICA

Tutti i corpi emettono energia in funzione della loro temperatura. Questa proprietà è rappresentata dall'emissività termica ϵ [adimensionale] che è un numero compreso tra 0 e 1. $\epsilon = 1$ vuol dire che il corpo emette il 100% dell'energia che può irradiare. Viceversa $\epsilon = 0$ vuol dire che il corpo non emette energia. Minore è il valore di emissività minore è l'energia irradiata dalla sua superficie. Alle temperature ordinarie, tipiche dell'edilizia (0-60 °C), i materiali emettono energia termica sotto forma di radiazioni infrarosse. In tale campo spettrale l'emissività dei materiali coincide con il coefficiente di assorbimento (α_L) e il coefficiente di riflessione (r) è il complementare dell'emissività poiché per i materiali opachi (non il vetro) il coefficiente di trasmissione (t) è nullo.



$$E_{in} = E_r + E_a + E_t$$

$$1 = r + \alpha_L + 0$$

$$r = 1 - \epsilon$$



Prestazioni termiche dei termoriflettenti

La normativa di riferimento è la norma UNI EN 16012 del 2012, che descrive un insieme di procedure per determinare in laboratorio la resistenza termica di prodotti isolanti riflettenti. I metodi utilizzati possono essere:

- piastra calda in accordo con la norma UNI EN 12667:2002;
- Hot-Box in accordo con la norma UNI EN ISO 8990:1999.

La norma suddivide gli isolanti riflettenti in 4 tipologie:

- **tipo 1)** prodotti con superfici piane e parallele, come ad esempio gli isolanti tradizionali rivestiti con un film riflettente;
- **tipo 2)** prodotti con superfici non piane ma con cavità inferiori a 5 mm come ad esempio gli isolanti a bolle con superfici riflettenti;
- **tipo 3)** prodotti aventi uno spessore non uniforme come i multistrato provvisti di cuciture o saldature;
- **tipo 4)** prodotti costituiti da film riflettenti di spessore inferiore a 2 mm che incorporano una o più intercapedini d'aria; in questa tipologia la resistenza termica dei film è trascurabile e la resistenza termica del sistema isolante è dovuta interamente alle intercapedini d'aria delimitate dai film.

I produttori nelle loro schede tecniche devono riportare i seguenti dati:

- valore della resistenza termica complessiva del sistema (prodotto riflettente e intercapedini);
- valore delle emissività delle superfici;
- spessori delle intercapedini associate (generalmente 20-25 mm).

Se i produttori eseguono esclusivamente misure "in situ" bisognerebbe conoscere le condizioni climatiche di prova (estate o inverno) oltre che la direzione del flusso.



PRODOTTI

I termoriflettenti presenti in commercio sono fondamentalmente di due famiglie: **isolanti a base di bolle** di spessore 8-10 mm (ai fogli riflettenti viene accoppiato uno strato d'aria incapsulata in cuscinetti realizzati con polietilene rinforzato) e **isolanti multistrato** di spessore circa 30 mm, costituiti dall'unione di pellicole di materiale riflettente ed elementi isolanti combinati (ovatta, schiume, lana di pecora, ecc.).



Termoriflettente a bolle



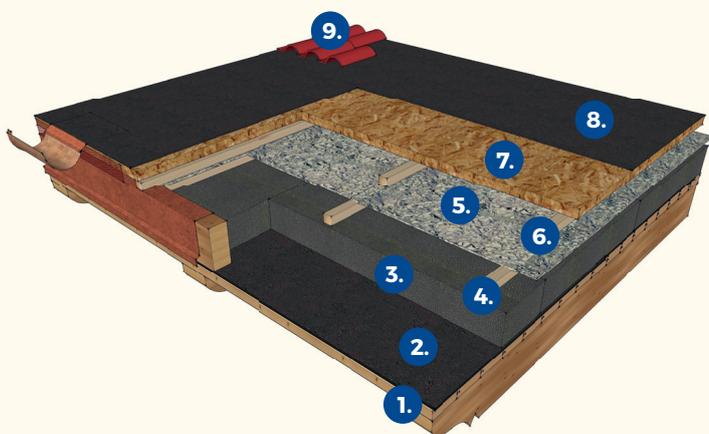
Termoriflettente multistrato



Esempio di stratigrafia tetto in legno isolato con termoriflettente Calcoli Performance eseguiti con KliMat v.3

Il calcolo che segue valuta la trasmittanza termica di un tetto a falde in legno coibentato con EPS e termoriflettente. Per ipotesi, si è considerata una emissività ϵ pari a 0,03 e una resistenza dichiarata (R_D) di 1,90 mqK/W (con flusso orizzontale e intercapedini di 25 mm). Attraverso il software KliMat v.3 è stata calcolata la resistenza termica dell'intercapedine d'aria (R_{aria}) di 25 mm impostando un valore di emissività pari a 0,03 e l'altro pari a 0,09 (vedi Figura 18 pag. 58). Il valore ottenuto è pari a 0,712 mqK/W.

La resistenza del sistema riflettente è $R_D = R_{aria} + R_{isolante} + R_{aria}$, da cui si ricava che la resistenza termica da attribuire al solo materiale isolante ($R_{isolante}$) è pari a 0,476 mqK/W.



PERFORMANCE TETTO IN LEGNO ISOLATO CON TERMORIFLETTENTE

▶ Spessore totale 20 cm	▶ F_g 0,657
▶ U 0,233 W/mqK	▶ No condensa
▶ Y_{ie} 0,153	▶ No muffa

	SPESSORE [m]	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE	SPESSORE EQUIVALENTE D'ARIA [m]	CONDUCIBILITÀ TERMICA	RESISTENZA TERMICA
Superficie interna	-	-	-	-	0,1
1. Perline in legno sp. 25 mm	0,025	20	0,5	0,12	0,208
2. Barriera al vapore	0,004	500.000	2.000	0,2	0,01
3. Isolante in EPS additivato a grafite	0,08	50	4	0,031	2,581
4. Intercapedine d'aria non ventilata	0,025	1	0,025	-	0,453
5. Termoriflettente multistrato con emissività pari a 0,03%	0,009	30.789	277	-	0,474
6. Intercapedine debolmente ventilata	0,04	1	0,04	-	0,256
7. Pannello in OSB3	0,012	30	0,36	0,13	0,092
8. Guaina bituminosa sottotegola autoadesiva	0,003	20.000	60	0,17	0,018
9. Tegole	0,012	60	0,72	-	0,008
Superficie esterna	-	-	-	-	0,04

Note

- Il valore dell'emissività delle superfici dell'isolante è stato impostato nelle intercapedini d'aria.
- La resistenza termica dell'intercapedine debolmente ventilata è stata calcolata considerando un'area delle aperture pari a 1.000 mmq/mq.

ISOLAMENTO LOCALI CONTROTERRA

Nella scelta del coibente per l'isolamento delle strutture controterra, si deve tener conto della spinta del terreno, che aumenta con la profondità, della presenza di umidità di risalita, dell'acqua di falda e/o di infiltrazione dal terreno, dell'eventuale presenza del radon e, non ultimo, dei carichi trasmessi da tutto l'edificio.

Solo materiali di elevata resistenza meccanica a compressione a lungo termine, con basso assorbimento d'acqua sia per immersione sia per diffusione, con un'ottima resistenza al gelo, disgelo e agli acidi può essere idoneo per applicazioni interrato. Saranno quindi privilegiati pannelli isolanti a celle chiuse (ad esempio XPS e vetro cellulare).

La platea è la tipologia di fondazione che consente di rispettare la regola del "pennarello rosso" garantendo la continuità dell'isolamento termico (vedi Figura 19).

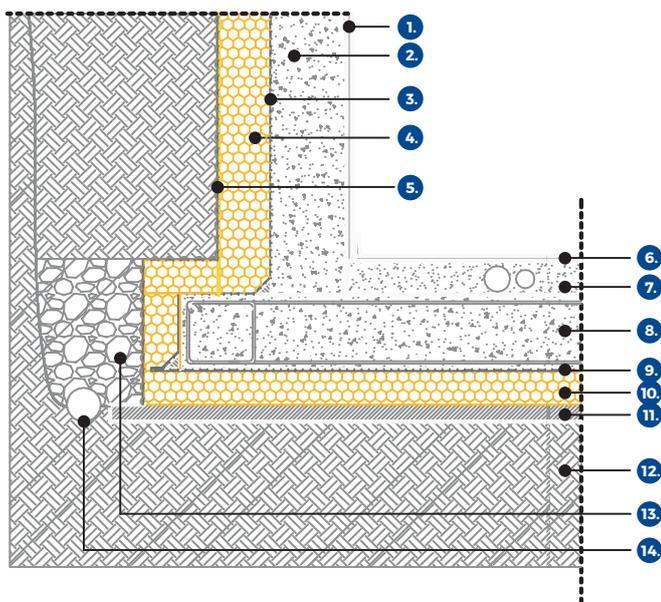


Figura 19 - Isolamento sotto platea di fondazione con pannello isolante (nuova costruzione): 1) Intonaco, 2) Parete controterra, 3) Impermeabilizzazione, 4) XPS/Vetro cellulare, 5) Membrana protettiva e drenante con TNT, 6) Pavimentazione, 7) Massetto alleggerito, 8) Platea di fondazione, 9) Geotessuto, 10) XPS/Vetro cellulare, 11) Magrone, 12) Terreno, 13) Ricoprimento drenante, 14) Tubo di raccolta acque.

Quando l'isolamento è al di sopra della platea o della soletta armata (come nei vespai controterra) la continuità dell'isolante può essere ottenuta sostituendo il primo corso di mattoni con un elemento a taglio termico (vedi Figura 20).

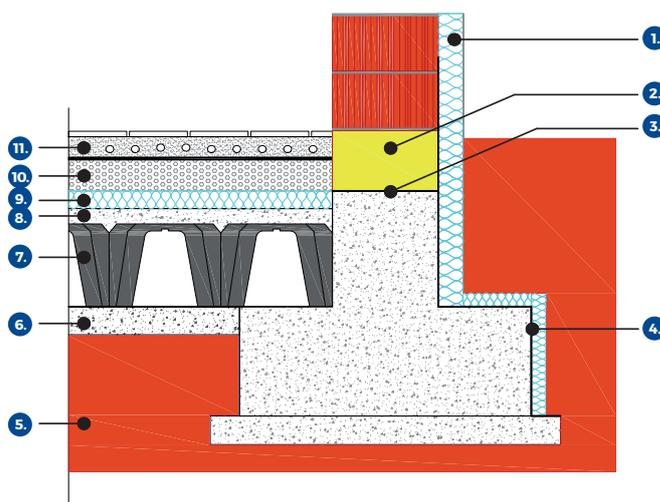


Figura 20 - Taglio termico primo corso muratura. Fondamentale è la posa preventiva della guaina tagliamuro per la risalita di umidità. Elementi della stratigrafia: 1) Cappotto (zoccolatura), 2) Taglio termico, 3) Tagliamuro, 4) Impermeabilizzazione, 5) Terreno, 6) Magrone, 7) Vespaio, 8) Getto in CLS, 9) Isolamento termico, 10) Sottofondo, 11) Massetto finitura.

Si può impiegare un pannello in vetro cellulare o un mattone in calcestruzzo aeroclavato idrofugato che possiede, in virtù della sua isotropia, lo stesso valore di conducibilità termica sia in senso orizzontale sia in quello verticale (vedi Figura 21).



Figura 21 - Taglio termico del primo corso di mattoni realizzato con calcestruzzo cellulare idrofugato in una muratura non portante

Questa soluzione non è applicabile nel caso di muratura portante o armata, poichè la fragilità di questi elementi comprometterebbe il funzionamento strutturale della muratura. Un'alternativa, vedi Figura 22, riempire il primo corso di mattoni con dell'isolante sfuso, ad esempio la perlite, o usare un blocco in muratura portante a taglio termico. Secondo la Direttiva tecnica CasaClima il taglio termico dovrebbe garantire una $\lambda < 0,15 \text{ W/mK}$ in senso orizzontale e una $\lambda < 0,25 \text{ W/mK}$ in senso verticale.



Figura 22 - Fase di riempimento del primo corso della muratura con perlite [fonte Consorzio Poroton]

Un'altra modalità di isolamento delle strutture controterra prevede l'uso di materiali isolanti in forma granulare sfusa come l'argilla espansa e il vetro cellulare. Sono materiali molto resistenti a compressione, insensibili all'acqua, all'umidità di risalita e con elevata capacità drenante. Possono essere convenientemente usati in caso di nuova costruzione per isolamento sotto la platea di fondazione (vedi Figura 23), oppure di pareti interrate allocati in apposite "bag" di contenimento (vedi Figura 24). Sono di agevole applicazione anche nei casi di ristrutturazione (vedi Figura 25).

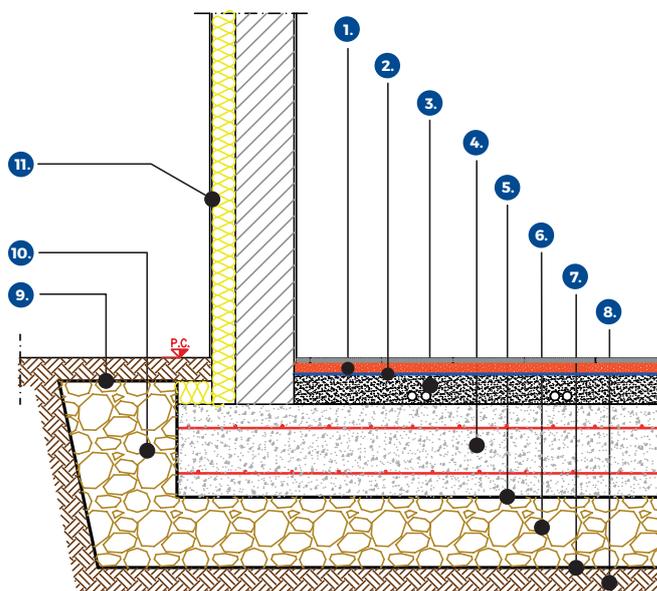


Figura 23 - Isolamento sotto platea di fondazione con materiali granulari (argilla espansa o vetro cellulare): 1) Massetto di finitura, 2) Eventuale barriera al vapore, 3) Sottofondo alleggerito, 4) Platea di fondazione, 5) Tessuto non tessuto, 6) Vespaio isolato (argilla espansa o vetro cellulare), 7) Tessuto non tessuto, 8) Terreno livellato e cilindrato, 9) Tessuto non tessuto, 10) Strato isolante (argilla espansa o vetro cellulare), 11) Isolante.



Figura 24 - Isolamento continuo in forma granulare (argilla espansa) sulla porzione di parete (nelle comode "bag" di contenimento). Impermeabilizzare preventivamente la parete controterra.

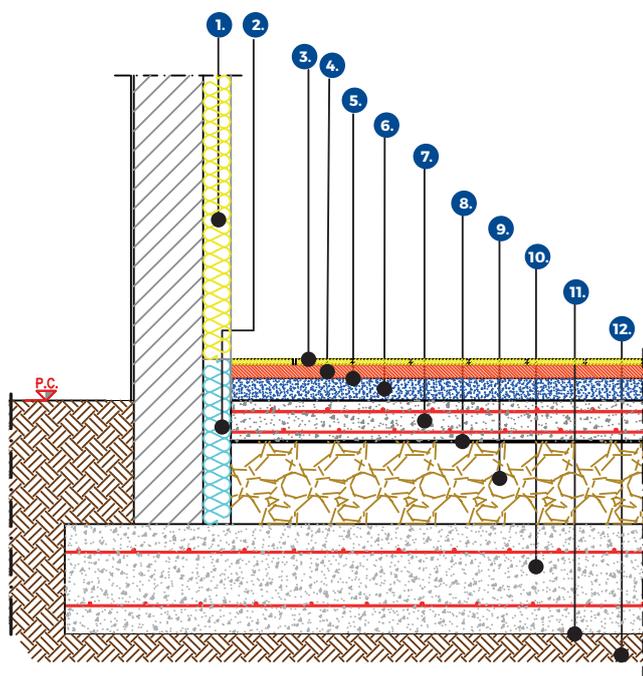


Figura 25 – Riqualficazione solaio controterra, isolamento sopra platea di fondazione: 1) Cappotto interno, 2) Taglio termico, 3) Pavimentazione, 4) Massetto di finitura, 5) Eventuale barriera al vapore, 6) Strato di compensazione, 7) Soletta in C.A., 8) Tessuto non tessuto o barriera vapore, 9) Sottofondo isolato in argilla espansa o vetro cellulare, 10) Platea di fondazione, 11) Barriera al vapore, 12) Terreno livellato e cilindrato.

PRESTAZIONI TERMICHE DELLE STRUTTURE CONTROTERRA

Le prestazioni termiche delle strutture a contatto con il terreno devono essere valutate in conformità alla norma UNI EN ISO 13370. Mentre la ISO 6946 fornisce metodi di calcolo della trasmittanza termica degli elementi di edificio a contatto con l'aria esterna, la UNI EN ISO 13370 valuta le dispersioni distinguendo tra quattro possibili configurazioni:

- pavimento controterra;
- piano interrato riscaldato;
- pavimento su intercapedine;
- pavimento su piano interrato non riscaldato.

In maniera molto sintetica, si calcola la trasmittanza secondo la UNI 6949 della struttura come se non fosse a contatto con il terreno; a seconda delle

casistiche sopra citate, il terreno viene schematizzato come uno strato aggiuntivo di materiale verso cui la struttura scambia calore.

Tale strato è caratterizzato da una conducibilità pari a quella del terreno e da uno "spessore equivalente" che dipende dalla geometria della struttura in esame e dallo spessore delle pareti perimetrali (vedi Esempio di stratigrafia a pag. 64). Per approfondimenti in merito si consiglia di consultare la norma UNI 13370. Nelle Tabelle 4 e 5 sono riportati i limiti di trasmittanza da rispettare stabiliti dal Decreto Requisiti Minimi per le nuove costruzioni e per le ristrutturazioni.

Tabella 4 - Limiti di trasmittanza delle strutture controterra di nuove costruzioni e ristrutturazioni di 1° livello

Zona climatica	2015	2019/2021 (*)
A e B	0,46	0,44
C	0,40	0,38
D	0,32	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

(*) 2019 per gli edifici di Pubblica Amministrazione, 2021 per gli edifici residenziali.

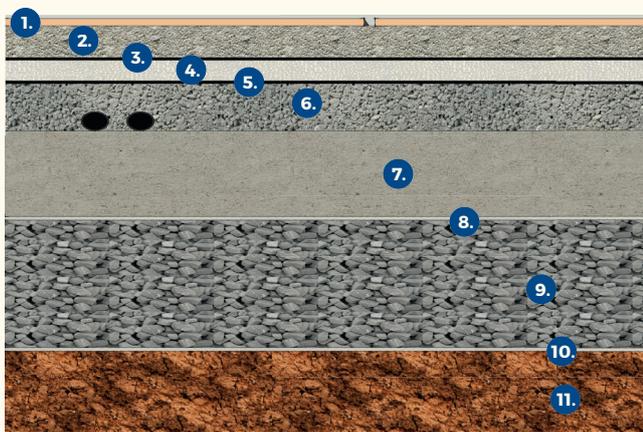
Tabella 5 - Limiti di trasmittanza delle strutture controterra per ristrutturazioni importanti di 2° livello e riqualficazioni energetiche

Zona climatica	2015	2019/2021 (*)
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

(*) 2019 per gli edifici di Pubblica Amministrazione, 2021 per gli edifici residenziali.

Le **verifiche igrotermiche** devono essere svolte ai sensi della UNI EN ISO 13788 che per gli elementi controterra ipotizza un ambiente esterno con UR 100% e temperatura pari alla media mensile del terreno.

Esempio stratigrafia solaio controterra isolato con materiale granulare Calcoli Performance eseguiti con KliMat v.3

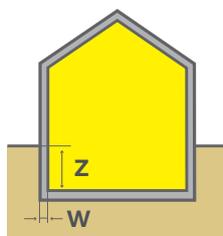


PERFORMANCE SOLAIO CONTROTERRA ISOLATO

▶ Spessore 51,3 cm	▶ $Y_{ie} = 0,003$
▶ U 0,231 W/mgk (non accoppiato al terreno)	▶ Sfasamento 15 ore 30 min
▶ U 0,178 W/mgk trasmittanza sistema solaio-terreno (*)	▶ No muffe, no condense

(*) Le ipotesi per il calcolo (misure del solaio, tipologia di terreno e quota di riferimento) sono riportate nell'immagine in fondo

	SPESSORE [m]	FATTORE DI RESISTENZA AL VAPORE	SPESSORE EQUIVALENTE D'ARIA [m]	CONDUCIBILITÀ TERMICA	RESISTENZA TERMICA
Superficie interna	-	-	-	-	0,17
1. Pavimentazione ceramica	0,01	200	2	1	0,01
2. Massetto sabbia e cemento BigMat	0,05	60	3	1,06	0,047
3. Foglio separatore in polietilene	0,0016	50.000	80	1,5	0,011
4. Isolante termico BigMat Neodur 030	0,03	70	2,1	0,30	1
5. Foglio separatore in polietilene	0,0016	50.000	80	1,5	0,011
6. BigCem Classic sottofondo alleggerito	0,06	6	0,36	0,144	0,403
7. Platea di fondazione in CLS 2.300 kg	0,16	80	12,8	2,3	0,07
8. Tessuto non tessuto	-	-	-	-	-
9. Granulato in vetro cellulare costipato	0,20	1	0,2	0,078	2,564
10. Tessuto non tessuto	-	-	-	-	-
Superficie esterna	-	-	-	-	0,04



Area del pavimento m²

Perimetro del pavimento m

Dimensione caratteristica B' m

z - Altezza della parete interrata m

w - Spessore della parete m

Spessore equivalente di terreno m

Tipo di terreno

Conducibilità termica del terreno W/mk

Trasmittanza sistema solaio-terreno W/m²k

BIBLIOGRAFIA

COLLANA “L’ISOLAMENTO TERMICO E ACUSTICO - I MATERIALI ISOLANTI (VOLUME 1)”

a cura di ANIT (Associazione Nazionale per l’Isolamento Termico e acustico), seconda edizione, 2013.

COLLANA “L’ISOLAMENTO TERMICO E ACUSTICO - MUFFA, CONDENSA E PONTI TERMICI (VOLUME 4)”

a cura di ANIT (Associazione Nazionale per l’Isolamento Termico e acustico), seconda edizione, 2014.

“RIQUALIFICAZIONE ENERGETICA EDIFICI ESISTENTI”

a cura di P. Erlacher, Padovani Editrice.

“MANUALE DEL COLLAUDO E DEI CONTROLLI TECNICI PER OPERE EDILI, CIVILI E IMPIANTISTICHE”

a cura di M. Antonini e F. Re Cecconi, Maggioli Editore 2012.

“PARETI VENTILATE AD ALTE PRESTAZIONI TEORIA E SOLUZIONI”

a cura di A. Lucchini del dipartimento ABC del Politecnico di Milano, pubblicazione della RockWool.

“CORRETTA PROGETTAZIONE CON I MATERIALI ISOLANTI RIFLETTENTI”

pubblicazione ANIT (Associazione Nazionale Isolamento Termico e acustico).

“SVILUPPO DI MATERIALI AD ELEVATA RIFLESSIONE SOLARE PER L’OTTIMIZZAZIONE DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE DEGLI EDIFICI DURANTE LA STAGIONE ESTIVA”

a cura di A. Muscio, A. Libbra, C. Siligardi, P. Tartarini, pubblicazione ENEA, Report RdS/2011/146.

“LE VERNICI IN LABORATORIO”

articolo di F. Tamanti dell’Istituto Giordano pubblicato sulla rivista Eubios n. 48, giugno 2014.

“L’ATTIVAZIONE DELLA MASSA E I MATERIALI A CAMBIAMENTO DI FASE PER L’INVOLUCRO EDILIZIO OPACO: PRESENTAZIONE DI RISULTATI DI SIMULAZIONI NUMERICHE E ANALISI CRITICA DI ESITI SPERIMENTALI”

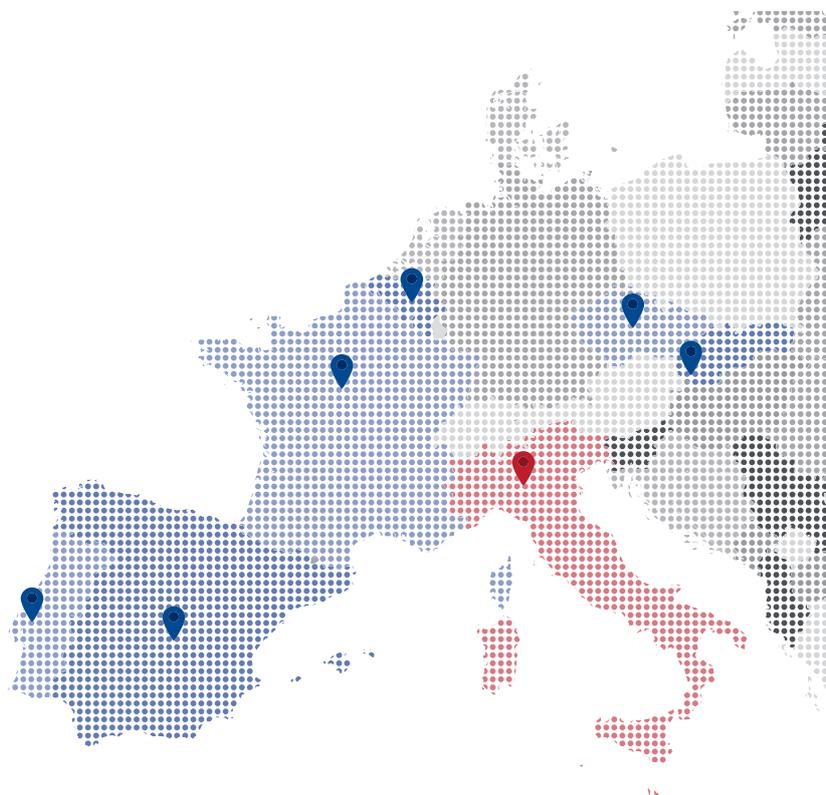
a cura di P. Principi (Università delle Marche).

“STUDIO DI SISTEMI DI ACCUMULO A CAMBIAMENTO DI FASE NEL SOLAR COOLING”

a cura di R. Lazzarin, M. Noro, F. Busato, pubblicazione ENEA, Report RdS/2011/256.

PUNTI VENDITA DI MATERIALE PER COSTRUIRE, RISTRUTTURARE E RINNOVARE.

BigMat è un Gruppo che conta in Europa 892 Punti Vendita di prodotti e soluzioni per la costruzione, la ristrutturazione e la manutenzione della casa. Nei Punti Vendita BigMat trovi personale esperto che può valutare le esigenze specifiche dei tuoi progetti e individuare le migliori soluzioni presenti sul mercato.



BIGMAT IN ITALIA

190 PUNTI VENDITA CON
85 SHOWROOM DI INTERNI

BIGMAT IN EUROPA

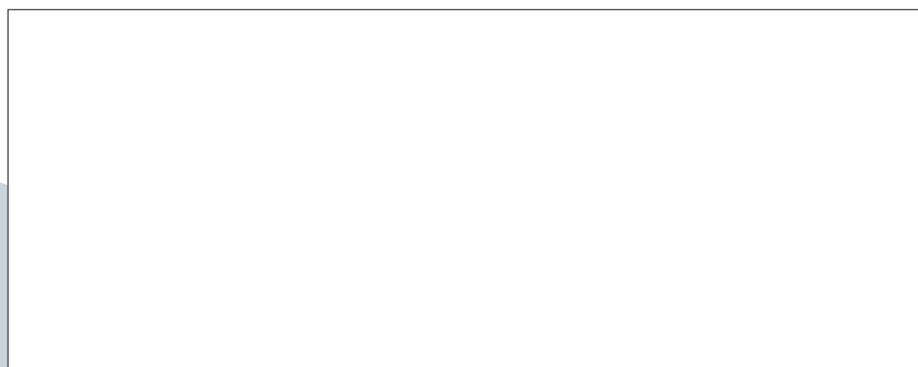
BELGIO | FRANCIA | ITALIA | MALTA
REPUBBLICA CECA | PORTOGALLO
SLOVACCHIA | SPAGNA

892 PUNTI VENDITA

BigMat

HOME OF BUILDERS

190 Punti Vendita in Italia di materiali per costruire,
ristrutturare e rinnovare casa.



Spazio riservato per il timbro del Punto Vendita.

www.bigmat.it

