



paolo carlizza (paolo.carlizza)

PARETI, FINESTRE, PAVIMENTI E SOFFITTI: COME IL CALORE SI DISPERDE

18 December 2014

E' utile ogni tanto fare un bilancio termico ed energetico di un ambiente particolare o degli ambienti di una casa, per sapere quanto calore si disperde, specialmente durante la stagione invernale. Se i bilanci dovessero risultare negativi, si possono prendere misure per il reintegro dell'energia persa, come il trattamento delle pareti, dei pavimenti e dei soffitti, con materiali che siano il piu' possibile isolanti oppure integrare sorgenti di calore che ristabiliscano un certo equilibrio termico (termosifoni ed opportune stufe). La teoria del calore ci viene in aiuto con i suoi molteplici aspetti, assieme alla conoscenza di qualche semplice fondamento di edilizia (conoscenza dei materiali, isolanti, ed altro). Incominceremo con una rassegna sui fenomeni e le leggi che regolano il calore e poi entreremo negli argomenti piu' specifici, che sono proprio della fisica tecnica, dell'architettura e dell'ingegneria civile, fino ad avere una trattazione soddisfacente di tutti gli elementi fondamentali. Questo articolo non deve dare l'illusione di esaminare in toto tutti gli aspetti possibili e immaginabili dell'argomento in questione, ma verrranno certamente toccati i punti fondamentali, che ci permetteranno di fare delle valutazioni abbastanza affidabili e soddisfacenti per gli scopi preannunciati

I modi di trasferimento del calore

Il calore si propaga in tre modalità:

- Conduzione (quello che abbiamo visto sino ad ora)
- Convezione (con spostamento di materia, di solito gassosa)
- Irraggiamento (un corpo caldo emette energia elettromagnetica infrarossa)

Brevi cenni di trasmissione del calore per conduzione

Ci sono delle equazioni e delle formule che sono i capisaldi della teoria del calore.

1). Equazione di Fourier.

Questa equazione fa calcolare l'andamento della temperatura nello spazio a partire da certi parametri caratteristici della trasmissione del calore, come la densita' del mezzo, il calore specifico a pressione costante e la conducibilita' termica. Queste tre grandezze sono legate nel parametro, detto diffusivita'. La relazione, che lega le derivate parziali della temperatura e la sua derivata rispetto al tempo assume la forma seguente:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha_c} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

con

$$\alpha_c = \frac{\sigma}{\rho \cdot c_p}$$

dove:

σ è la conducibilità termica in W/(m°C) ρ è la densità del mezzo in Kg/mc c_p il calore specifico a pressione costante in W/(Kg°C)

Dalla equazione di Fourier discende la relazione sul flusso di calore, che rimane costante in ogni sezione trasversale alla direzione, in cui si propaga. 2) Essa e':

$$\frac{Q}{\tau} = -\sigma S \cdot \frac{dT}{dx}$$

ed esprime che la quantita' di calore nell'unita' di tempo (quindi la potenza in Watt) e' proporzionale in negativo alla conducibilità ed al gradiente di temperatura secondo una coordinata. Il segno meno deriva dal fatto che il calore si trasferisce da temperatura più alta ad una più bassa.

3) Inoltre vale:

$$Q = C_p \cdot m \cdot (T_2 - T_1)$$

che enuncia che la quantita' di calore in grado di portare un corpo di massa m e di calore specifico c_p da una temperatura T_1 ad una T_2 è data dalla relazione appena impostata.

Dall'equazione di Fourier del punto 1), se ci mettiamo in regime stazionario, annullando la derivata rispetto al tempo del secondo membro, nel caso di una parete, che ha ai suoi lati temperature T_2 e T_1 , ne deriva che la distribuzione della temperatura all'interno della parete stessa è lineare, poiché'

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \text{ nel caso unidimensionale. Integrando } \frac{dT}{dx} = K_1, \text{ dove } K_1 \text{ è una costante arbitraria.}$$

Integrando ancora si ha:

$$T(x) = K_2 + k_1 x$$

dove K_2 è una nuova costante. Quindi imponendo per $x=0$, $T=T_2$ e per $x=L$ (spessore della parete) $T=T_1$, si ottiene la relazione lineare:

$$T(x) = \frac{-(T_2 - T_1)}{L} x + T_2,$$

il che dimostra che l'andamento della temperatura è lineare.

Se consideriamo in due direzioni, x e y , la relazione puntuale della temperatura sul piano (x,y) diventa notevolmente più complicata. In questo caso si pensa la $T(x,y)$ come prodotto $T(X)*T(y)$ e si risolvono due equazioni differenziali legate da una stessa costante. Il risultato è una funzione che lega le funzioni seno, coseno, seno iperbolico, coseno iperbolico. Facciamo un passo avanti. Se ci mettiamo nel caso di una parete multistrato con per esempio tre strati (vedi Fig.1) con i limiti a temperature T_1, T_2, T_3 e T_4 , per ogni strato possiamo, applicare la relazione canonica di Fourier indicata nel punto 2), avendosi, ponendo con s_1, s_2 ed s_3 gli spessori dei tre strati, con λ_1, λ_2 e λ_3 i coefficienti di conducibilità ed S la superficie trasversale della parete multistrato:

$$T_1 - T_2 = \frac{s_1}{\lambda_1 S} Q$$

$$T_2 - T_3 = \frac{s_2}{\lambda_2 S} Q$$

$$T_3 - T_4 = \frac{s_3}{\lambda_3 S} Q$$

In Figura 1 è riportato l'andamento in temperatura di una parete in tre strati, in regime stazionario.

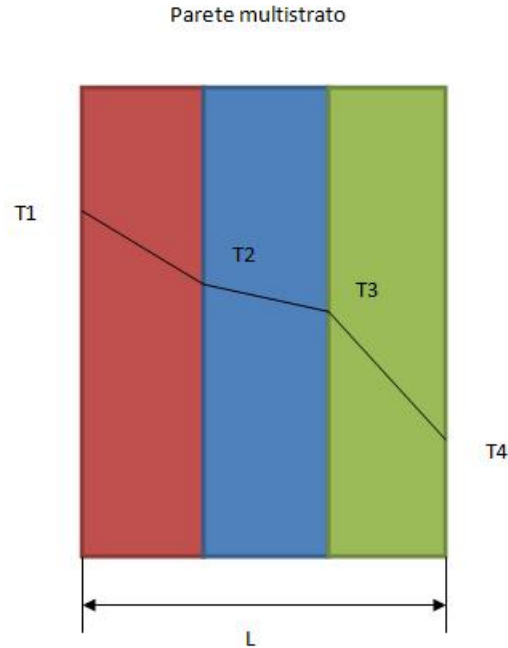


Figura 1. Andamento in temperatura per una parete multistrato a tre strati

Sommando a membro a membro si ottiene:

$$T1 - T4 = \left(\frac{s1}{\lambda_1 S} + \frac{s2}{\lambda_2 S} + \frac{s3}{\lambda_3 S} \right) Q$$

Si notano due cose:

a) Si è ottenuto per la temperatura $T(x)$ naturalmente da $T1$ a $T4$ una spezzata di tre segmenti lineari, uno per ogni strato, da $T1$ a $T2$, da $T2$ a $T3$ e da $T3$ a $T4$.

b) Le tre relazioni sopra sono simili al legame tra la differenza di potenziale (differenza di temperatura), corrente (quantità di calore) ed il termine $\frac{s_i}{\lambda_i S}$, con $i=1,2,3$ può assimilarsi ad una resistenza elettrica, poiché λ_i è vista come una conduttanza (inverso della resistività e poiché compare i termini di lunghezza S_i e di superficie trasversale S . Quindi la parete multistrato viene trattata termicamente, come una somma di resistenze termiche, su cui cade una tensione (temperatura) totale $T1-T4$, attraverso le quali scorre una corrente pari a Q . Quindi per trattare una parete multistrato in serie, basta sommare le resistenze termiche ed applicare una differenza di temperatura pari a quella all'esterno del primo strato meno quella all'esterno dell'ultimo strato, mentre la quantità di calore che fluisce rimane sempre la stessa per i tre strati. Ricapitolando,

se si hanno n strati, la relazione tra la differenza di temperatura delle facce estreme della parete multistrato e la quantità di calore è data da:

$$T_{N+1} - T_1 = \left(\sum_{i=1}^N R_i \right) Q$$

$$\text{dove } R_i = \frac{s_i}{\lambda_i S}$$

Chiaramente esiste anche il caso del parallelo tra resistenze termiche e accade quando si considerano stavolta due flussi di calore differenti Q_1 e Q_2 , che scorrono tra due stesse temperature T_1 e T_2 . Nel caso pratico cioè avviene quando si considera un flusso di calore attraverso una parete ed un'altro attraverso una finestra, una porta, un ponte termico od altro, caratterizzati ovviamente da resistenze termiche differenti, perché le proprietà dei mezzi attraverso i quali il calore fluisce hanno prima di tutto caratteristiche diverse di conducibilità λ differenti, oltre per superficie e spessore.

Detto questo introduciamo il concetto di trasmittanza. La trasmittanza è la quantità di calore che fluisce, tra due temperature che differiscono di un grado, considerando una superficie trasversale unitaria. La sua espressione generale è data da:

$$\frac{1}{\left(\sum_{i=1}^N R_i \right)}$$

$$\text{dove } R_i = \frac{s_i}{\lambda_i}$$

Quindi per sapere la quantità di calore che fluisce, per una differenza di temperatura $\Delta T_2 - T_1$ e per una superficie trasversale S , basta moltiplicare la trasmittanza per queste due grandezze. I data sheet di solito danno come dato la trasmittanza, che dovrà essere adattata, come detto ad una superficie ed ad una certa differenza di temperatura.

Trasmissione del calore per convezione

Caratterizzare questo fenomeno è cosa molto complesso, in quanto coinvolge lo spostamento di fluido con le differenze di temperatura. La convezione è dovuta ad un continuo rimescolamento delle molecole, dove quelle più calde tendono a salire, rispetto a quelle più fredde, creandosi in regimi più spinti, dei vortici. La convezione può essere a regime laminare, dove strati adiacenti di fluido si spostano parallelamente uno rispetto all'altro, nelle vicinanze di un corpo solido o a regime turbolento, quando il rimescolamento del fluido è molto irregolare. La convezione può essere naturale, quando non eccitata o forzata, quando c'è una causa che la genera e la sostiene. Per risolvere matematicamente le situazioni di convezione, si usa l'analisi adimensionale, che mette in gioco vari parametri dei fluidi e dei solidi circostanti la zona, dove si sviluppano i fenomeni. Non tratteremo affatto l'analisi dimensionale, perché esula dagli scopi di questo articolo, ma daremo

la formula della quantità di calore scambiata tra le temperature T_1 e T_2 , che si esprime nel modo seguente:

$$Q = hcS(T_2 - T_1)$$

dove hc è il coefficiente di convezione; Q è la quantità di calore scambiata nell'unità di tempo ed S la superficie trasversale rispetto alla direzione preferenziale in cui si sviluppa il fenomeno.

La quantità $hc \cdot S$ può essere vista come conduttanza termica, in analogia al caso di conduzione dove trovavamo $\frac{\lambda S}{l}$

Il coefficiente hc di solito vale per le applicazioni pratiche edilizie 5, per aria statica e 25, per aria che si muove ad una velocità più sostenuta.

Trasmissione per irraggiamento

Come detto un corpo caldo emette energia elettromagnetica e la maggior parte di questa cade nell'infrarosso. Per le leggi associate alla trattazione del corpo nero si può dare una formula della quantità di calore scambiata tra una temperatura T_1 di un corpo caldo e la temperatura dell'aria a regime, fuori dai fenomeni di convezione. Essa è la seguente:

$$Q = \sigma_0 \epsilon S (T_1^4 - T_2^4) = hr S (T_1^2 - T_2^2),$$

con σ_0 coefficiente derivante dalla legge di Stephen-Boltzmann pari a $5.67 \cdot 10^{-8}$ per il corpo nero, con ϵ l'emittanza o coefficiente di assorbimento per un corpo grigio e con S la superficie trasversale alla direzione dell'irraggiamento del corpo che irradia.

dove hr , coefficiente d'irraggiamento è dato appunto da

$$hr = \sigma_0 \epsilon (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)$$

Anche $hr \cdot S$ analogamente al caso della conduzione e convezione può essere visto come una conduttanza termica.

Trasmissione del calore per adduzione

La trasmissione per adduzione non è altro che tenere conto della somma dei contributi di convezione ed irraggiamento, che di solito avvengono insieme. Il coefficiente di adduzione è dato da $h_a = hc + hr$. Questo coefficiente sarà considerato nella trasmissione del calore nelle vicinanze delle superfici limite di una parete verticale od orizzontale.

Bilancio termico per stanze o appartamenti costituiti da pareti verticali, soffitto, pavimenti, porte, finestre e ponti termici.

Fatte queste preliminari considerazioni, si può passare al calcolo della dispersione del calore, considerando un ambiente, tipo una stanza di un appartamento. Opereremo, senza introdurre complicazioni dovute alla latitudine ed alle temperature medie caratteristiche di una città in particolare. Esamineremo tre casi:

- a. il caso di una parete mista
- b. il caso di dispersione di calore da una finestra
- c. il caso di un solaio-lastrico, di un solaio interpiano e di un solaio sul terreno. d. il caso dei ponti termici.

Combinando questi elementi a seconda come è costituita una stanza o un appartamento si può calcolare la dispersione di calore, in positivo ed in negativo sommando i vari contributi. Quindi, si sommeranno i contributi, dovuti a pareti diverse, pavimenti soffitti, ed in più si considereranno le dispersioni degli infissi e dei ponti termici. Anche le finestre ed i ponti termici sono costituiti da vari elementi termici diversi ed all'interno di essi i vari contributi saranno sommati.

Costituzione di una parete

Per una parete esterna si considera un modello a “Cappotto”, che produce un buon isolamento.

Descrizione.

Il sistema di isolamento termico dall'esterno ad intonaco sottile, comunemente noto come “cappotto” consiste nell'applicazione, sull'intera superficie esterna verticale dell'edificio, di pannelli isolanti che vengono poi coperti da uno spessore sottile, protettivo, di finitura realizzato con particolari intonaci. Si tratta di un sistema di isolamento che ha preso piede in Europa negli ultimi 30 anni. L'isolamento a cappotto viene utilizzato nelle diverse tipologie d'uso degli edifici: residenziali, commerciali, ospedalieri, scolastici, militari, produttivi, di stoccaggio. È una soluzione particolarmente indicata nel caso di ripristino di superfici verticali, il cui rivestimento sia in fase di avanzato degrado. La coibentazione risulta economicamente conveniente ed impedisce il naturale processo di degrado degli edifici.

Vantaggi.

I vantaggi principali dell'isolamento a cappotto sono:

- isola in modo continuo e uniforme, consente l'eliminazione totale dei *ponti termici* ovvero quei punti che favoriscono la dispersione del calore. Si possono così conseguire un maggiore risparmio energetico (legato anche alla maggiore capacità dell'edificio di trattenere il calore), un maggiore comfort termico e l'eliminazione di muffe sulle superfici interne delle abitazioni, originate dalla condensa in corrispondenza dei ponti termici;

- protegge le pareti esterne dagli agenti atmosferici; rende stabili le condizioni termoisometriche della struttura degli edifici;
- consente di ridurre lo spessore delle pareti perimetrali con il conseguente aumento delle aree abitative; **migliora il volano termico delle pareti perimetrali. Nel caso di interventi di ripristino, il sistema a cappotto comporta una serie di vantaggi non indifferenti, dal lato organizzativo e del risparmio;
- non richiede l'allontanamento degli inquilini durante l'esecuzione dei lavori; rallenta il processo di degrado degli edifici offrendo una protezione totale;
- risolve il problema delle crepe e delle infiltrazioni di acqua meteorica; permette la realizzazione, in un'unica fase, dell'isolamento e della finitura con evidenti risparmi

Requisiti.

Per ottenere un sistema a cappotto efficace, bisogna prestare la massima attenzione alle caratteristiche dei singoli componenti, in particolare del materiale isolante. La lana di roccia risulta essere un materiale particolarmente idoneo, in quanto presenta i seguenti requisiti:

- stabilità dal punto di vista dimensionale al variare della temperatura e dell'umidità;
- eventuali dilatazioni originate da variazioni termoisometriche potrebbero provocare delle fessurazioni sull'intonaco, nel caso in cui il materiale isolante non sia stabile;
- stabilità nel tempo;
- lavorabilità;
- bassa elasticità compatibilmente con la resistenza meccanica dell'insieme; questo permette di rendere relativamente indipendenti le due strutture rigide costituite dalla parete e dall'intonaco esterno;
- sicurezza in caso di incendio dovuta alla natura inorganica del materiale isolante

Stratigrafia della parete.

- 1 Rivestimento interno con intonaco a gesso e tinteggiatura a pittura a tempera
- 2 Strato di supporto con elementi di laterizio semipieno per murature portanti di spessore cm 25, peso compreso tra 1000 e 1600 kg/mc. Foratura compresa tra il 15% e il 45%.
- 3 Legante con malta adesiva.
- 4 Protezione angolare in acciaio o alluminio.
- 5 Strato isolante con pannello rigido in lana di roccia resinato ad alta densità.
- 6 1° strato di rasatura con malta rasante per la formazione del primo strato di intonaco.
- 7 Armatura in rete o fibra di vetro.
- 8 Fissaggio Meccanico con tasselli a disco ad espansione.
- 9 2° Strato di rasatura con malta rasante a copertura della rete,
- 10 Strato di finitura ad intonaco isolante.

In Figura 2 è evidenziato questo tipo di stratificazione.

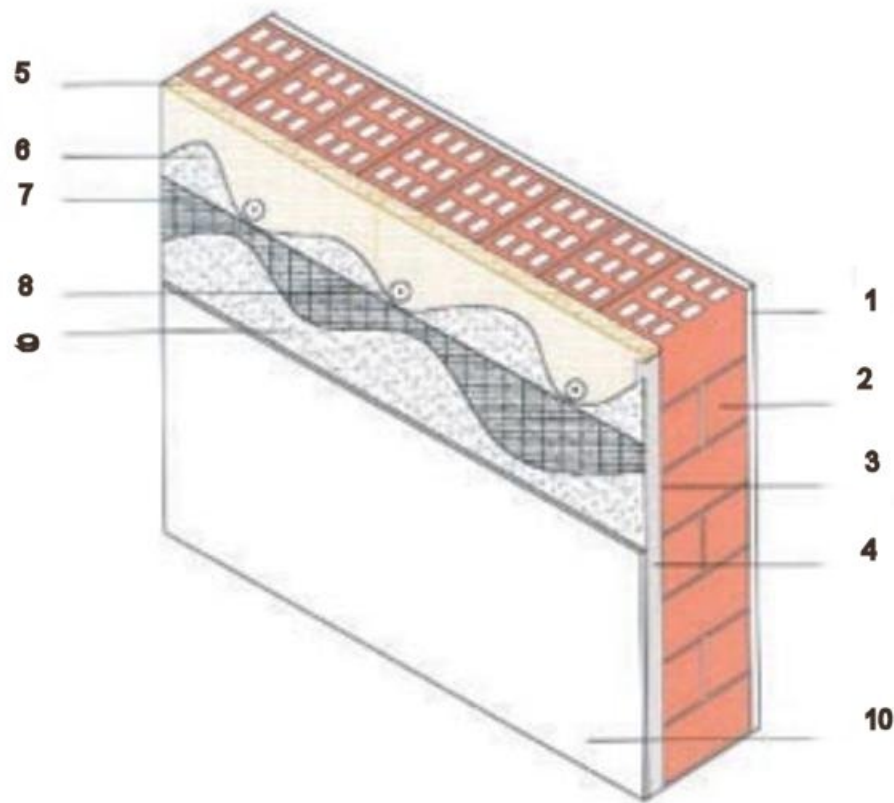


Figura 2. Stratificazione di una parete a "cappotto".

Si tratta quindi di una parete multistrato composta da 10 elementi che avranno i loro caratteristici parametri termici. Una volta consultate le relative tabelle, è facile trovare la trasmittanza della parete o quantità di calore persa per unità di superficie. I valori dei parametri termici per i vari materiali si trovano in un buon manuale d'ingegneria edile o di architettura.

Serramenti

Per le finestre e le porte-finestre la trasmittanza termica è pesata risulta essere una media pesata della trasmittanza del telaio U_f e di quella della vetrata U_g , più un contributo aggiuntivo la trasmittanza termica lineare ψ_g , dovuto all'interazione tra due componenti e alla presenza del distanziatore, applicato lungo il perimetro visibile della vetrata. La trasmittanza di un infisso è data dalla seguente formula:

$$U_w = \frac{A_G U_G + A_F U_F + L_G \Psi_l}{(A_G + A_F)}$$

dove

- AG e' l'area della vetrazione
- UG la trasmittanza termica dell'elemento vetrato (che puo' essere composto da piu' vetri ed intercapedini)
- UF la trasmittanza termica del telaio
- Ψ_l la trasmittanza lineare dei sistanziatori metallici del vetrocamera
- LG perimetro della vetrazione
- AF l'area del telaio.

Inf Figura 3 sono riportati i parametri di calcolo in funzione della geometria del serramento.

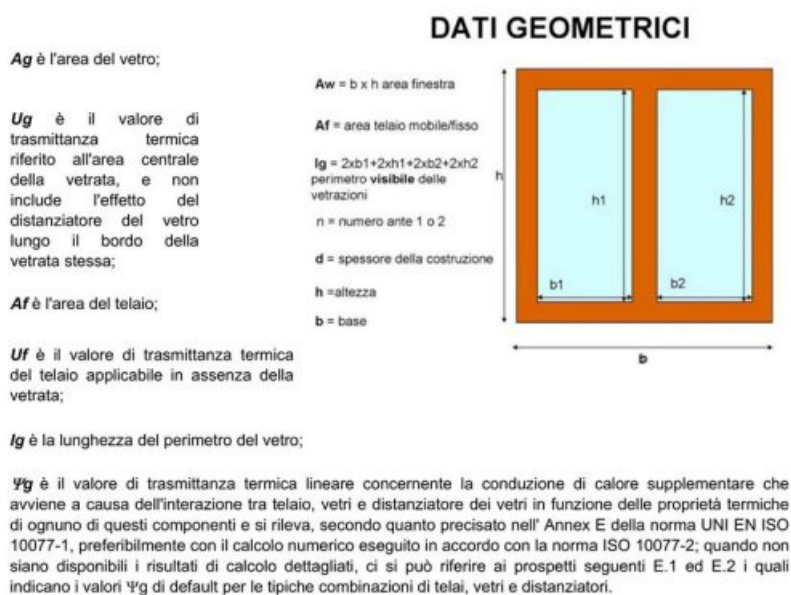


Figura 3. Dati per misurare la trasmittanza di un infisso.

Vi sono delle tabelle (Tabelle 4,5,6,7) che facilitano o abbreviano i calcoli e che danno rispettivamente:

- il valore di Ψ_l per distanziatori metallici non isolati per vetrocamera nel caso di doppio e triplo vetro con rivestimenti e con gas
- il valore di Ψ_l per distanziatori metallici isolati per vetrocamera nel caso di doppio vetro senza rivestimenti
- il valore di U_f del telaio, per tipi di materiali e spessori e con gas
- i valori di $U_{ge}U_w$ per tipo di vetro (semplice, doppio e triplo)

Materiale del telaio	Vetro doppio o triplo, con vetro senza rivestimento, intercapedine con aria o gas.	Vetro doppio con un rivestimento bassoemissivo o triplo con due rivestimenti bassoemissivi, intercapedine con aria o gas.
Metallo con taglio termico	0,08	0,11
Metallo senza taglio termico	0,02	0,05
Legno o plastica	0,06	0,08

Tabella 4. Tabella per trasmittanza lineare di distanziatori metallici non isolati - Fonte UNI EN ISO 10077-1, finestre, porte e schermi, Parte 1 - Metodo di calcolo semplificato - Ed Marzo 2007.

Materiale del telaio	Vetro doppio o triplo, con vetro senza rivestimento, intercapedine con aria o gas.	Vetro doppio con un rivestimento bassoemissivo o triplo con due rivestimenti bassoemissivi, intercapedine con aria o gas.
Metallo con taglio termico	0,06	0,08
Metallo senza taglio termico	0,01	0,04
Legno o plastica	0,05	0,06

Tabella 5. Tabella per trasmittanza lineare di distanziatori metallici isolati - Fonte UNI EN ISO 10077-1, finestre, porte e schermi, Parte 1 - Metodo di calcolo semplificato - Ed Marzo 2007.

Tipo di materiale del telaio		Valore Uf del telaio
Legno duro (rovere, mogano, iroko)	spessore mm 50	2,4
"	spessore mm 60	2,2
"	spessore mm 70	2,1
Legno tenero (pino, abete, larice, douglas, hemlock)	spessore mm 50	2,0
"	spessore mm 60	1,9
"	spessore mm 70	1,8
PVC a due camere		2,2
PVC a tre camere		2,0
PVC (telai da 58-80 mm)		compreso tra 1,7 e 1,2
Alluminio senza taglio termico		7,0
Alluminio a taglio termico		compreso tra 2,2 e 3,8

Tabella 6. Tabella per valori di trasmittanza termica dell'elemento vetrato, in funzione del materiale del telaio e del suo spessore - Fonte UNI EN ISO 10077-1, prospetti F1 e F2, allegato F.

Tipo di vetrata	Ug	Uw con area del telaio pari al 20% rispetto all'area dell'intera finestra in rapporto ai differenti valori Uf del telaio.								Uw con area del telaio pari al 30% rispetto all'area dell'intera finestra in rapporto ai differenti valori Uf del telaio.							
		1,8	2,0	2,2	2,6	3,0	3,4	3,8	7,0	1,8	2,0	2,2	2,6	3,0	3,4	3,8	7,0
Singola	5,7	4,9	5,0	5,0	5,1	5,2	5,2	5,3	6,0	4,5	4,6	4,6	4,8	4,9	5,0	5,1	6,1
4-6-4	3,3	3,2	3,2	3,3	3,4	3,5	3,5	3,6	4,1	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	4,5
4-9-4	3,1	3,0	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,9	2,9	2,9	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	4,3
4-12-4	2,9	2,8	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,8	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	4,2

Tabella 7. Tabella per valori di trasmittanza termica dell'infisso e dell'elemento vetrato, in funzione della vetratura - Fonte UNI EN ISO 10077-1 prospetti F1 e F2, allegato F.

Una aggiunta al caso notturno.

Nel caso "notturno" i serramenti, vengono protetti da tapparelle o serrande per cui la trasmittanza globale diminuisce. La formula che da' la nuova trasmittanza globale con i serramenti protetti e' la seguente:

$$U_{ws} = \frac{1}{\frac{1}{U_w} + \Delta R}$$

dove U_w e' la trasiottanza diurna, mentre ΔR e' la resistenza termica della tapparella.

La tabella 8 da' i valori di resistenza termica della tapparella a seconda del materiale impiegato.

Tipo di schermo	Resist. termica Rsh in m2K/W
Avvolgibile in alluminio	0,01
Avvolgibile in legno o plastica senza riempimento di materiale isolante	0,10
Avvolgibile in legno o plastica con riempimento di materiale isolante	0,15
Persiane in legno 25-30mm	0,20
Persiane in alluminio -interpretazione UNCSAAL	0,02
Avvolgibile in alluminio coibentato -interpretazione UNCSAAL	0,10
Persiane in alluminio coibentato -interpretazione UNCSAAL	0,20

Tabella 8. Resistenza termica di una tapparella e/o serranda per serramento a seconda del materiale impiegato.

Si conclude mostrando la formula conclusiva del valore medio di trasmittanza, derivato da uso diurno e notturno, dipendente delle ore di apertura e chiusura della protezione termica. Questo valore medio e' dato da':

$$U_{wm} = \frac{U_w * t_w + U_{ws} * t_{ws}}{t_w + t_{ws}}$$

con U_w, t_w , trasmittanza a protezione aperta e con U_{ws}, t_{ws} , trasmittanza a protezione chiusa.

Solai di copertura tetto.

Di solito si dividono in solai a tetto umido o a tetto caldo e di gran lunga i più usati sono i secondi.

E' il tipo di copertura piana più comunemente usata. Come si può rilevare dalla Fig.4 il manto impermeabile è posizionato sul materiale isolante e quindi sottoposto a gravose condizioni di esercizio: notevoli sbalzi di temperatura, esposizione ai raggi solari, pioggia, vento, sole, neve e sollecitazioni meccaniche (calpestio, carrabilità, ecc.). Analizzando il comportamento termico di questa copertura, si riscontra che in fase d'esercizio, il manto impermeabile può raggiungere temperature di $70 \div 80^\circ\text{C}$ in estate e di -15°C in inverno. Il manto impermeabile deve essere progettato per difficili condizioni di esercizio, prevedendo l'impiego di materiali di qualità e posa in opera a perfetta regola dell'arte: può essere posato in opera in modo indipendente dal supporto o aderente allo stesso. Il sistema di posa indipendente (quindi con strato di separazione), si utilizza in coperture piane prefabbricate, per consentire il libero movimento della struttura senza comportare danni al manto impermeabile; il sistema di posa aderente si utilizza invece in coperture leggere nelle quali, per ragioni di peso, non si può stendere lo strato di zavorra oppure la pavimentazione.

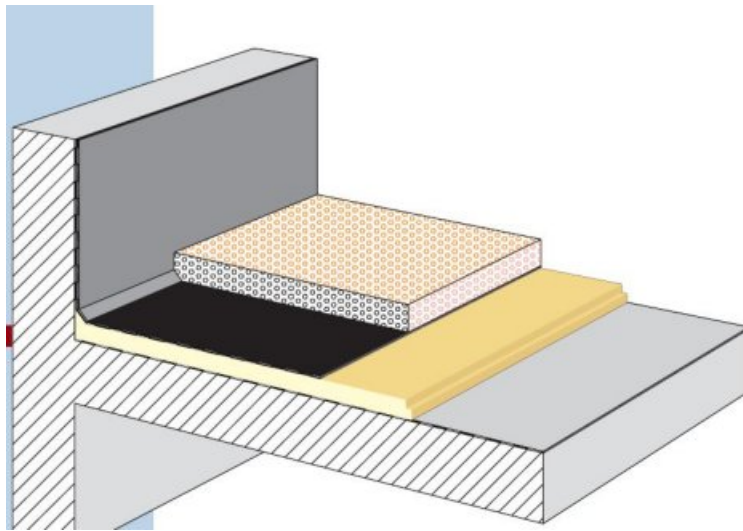
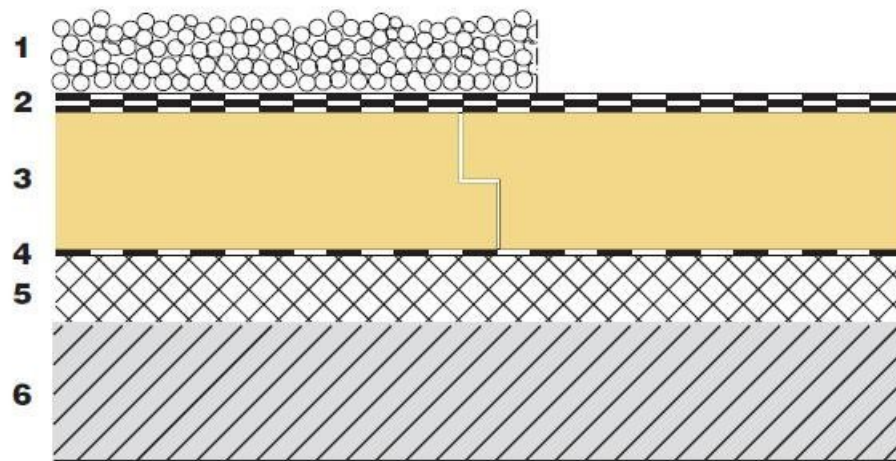


Figura 4. Rappresentazione sommaria di un solaio a tetto caldo.



- | | |
|-----------------------------|-------------------------------|
| 1 protezione finale | 4 barriera al vapore |
| 2 manto impermeabile | 5 massetto di pendenza |
| 3 isolante | 6 solaio |

Figura 4. Definizioni strati di un solaio a tetto caldo.

COPERTURE PIANE A TETTO CALDO		spessore solaio cm	Spessore pannelli d'isolamento					
stratigrafia copertura	schema copertura		30	40	50	60	80	100
zavorra / pavimento impermeabilizzazione Isolante barriera al vapore pendenze solaio calcestruzzo* intonaco		*						
		15	0,86	0,69	0,58	0,50	0,39	0,32
		20	0,84	0,68	0,57	0,49	0,39	0,32
		25	0,82	0,67	0,56	0,49	0,38	0,32
zavorra / pavimento impermeabilizzazione Isolante barriera al vapore pendenze solaio laterocemento* intonaco		20	0,72	0,60	0,51	0,45	0,36	0,30
		24	0,69	0,58	0,50	0,44	0,35	0,29
		28	0,66	0,56	0,49	0,43	0,35	0,29
zavorra / pavimento impermeabilizzazione Isolante barriera al vapore pendenze solaio predalles* intonaco		20	0,67	0,56	0,49	0,43	0,35	0,29
		24	0,63	0,54	0,47	0,42	0,34	0,28
		28	0,60	0,52	0,45	0,40	0,33	0,28
zavorra / pavimento impermeabilizzazione Isolante barriera al vapore pendenze copponi C.A.P.*		5	0,90	0,72	0,60	0,51	0,40	0,33
		7	0,89	0,71	0,60	0,51	0,40	0,33

Figura 5. Tipi di coperture a tetto caldo e trasmittanze.

Solaio interpiano

E' costituito di solito da:

- Intonaco interno
- Solaio in laterocemento
- strato isolante in fibra minerale, o con schiume poliuretaniche con espandenti non lesive della fascia di ozono, o con nuove schiume polyiso, mirate per migliori performance applicative, o con pannelli con rivestimenti gastight per garantire la stabilità nel tempo delle prestazioni isolanti, o con i pannelli per le applicazioni “a cappotto”, o con sistemi sviluppati per le coperture ventilate, fino a nuovi pannelli con eccellenti caratteristiche di reazione al fuoco
- Strato separatore costituito da un foglio di polietilene
- Separatore verticale in polietilene espanso a cellule chiuse, spessore 5-10 mm, posto sui perimetri ed alla base dei corpi in elevazione
- Massetto di pavimentazione

Il DLgs. 311 prevede che i divisori tra alloggi abbiano una trasmittanza termica massima di $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Questa applicazione consente inoltre di realizzare un pavimento galleggiante in grado di attenuare la trasmissione di rumori da calpestio o percussione impattivi, in combinazione con l'adeguata formazione dei risvolti sino al battiscopa per la configurazione di un'unità autonoma sotto l'aspetto acustico.

In Fig. 6 uno schema di questo tipo di solaio.

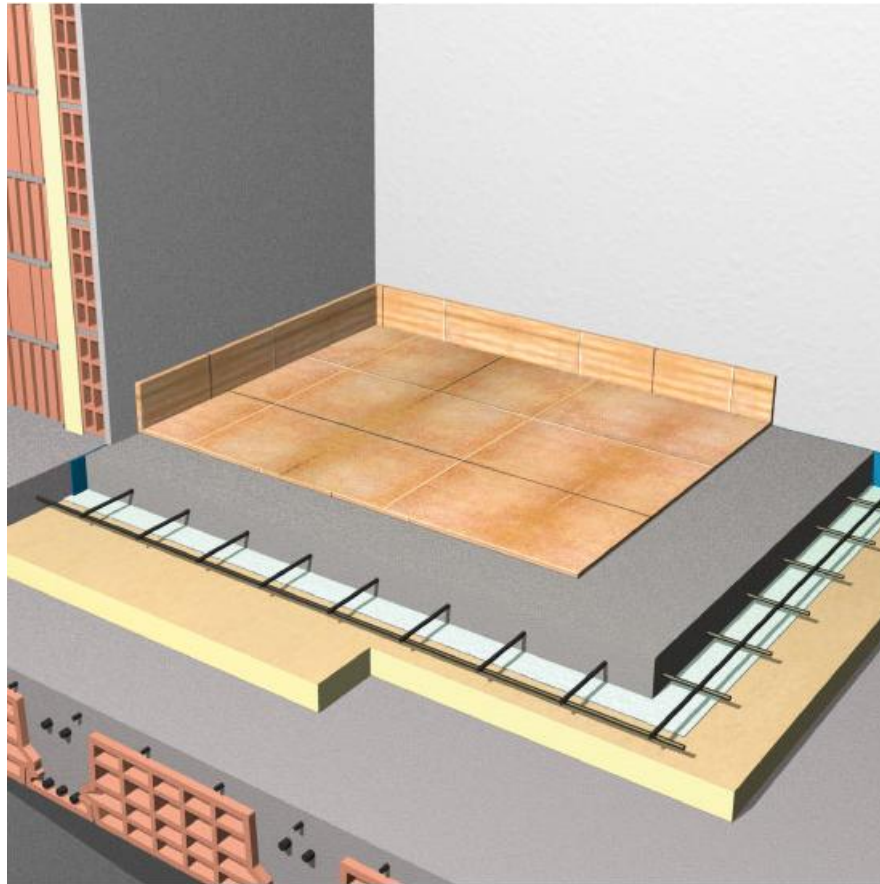


Figura 6. Tipica struttura di solaio interpiano.

Solaio direttamente sul terreno

Non ci sono molte parole da spendere. Assumiamo il caso che la struttura poggi direttamente sul terreno e non ci siano cavità o vuoti. In Fig. 7 è mostrata la composizione dei vari strati prima del terreno, mentre la tabella 9, aiuta a calcolare la trasmittanza.

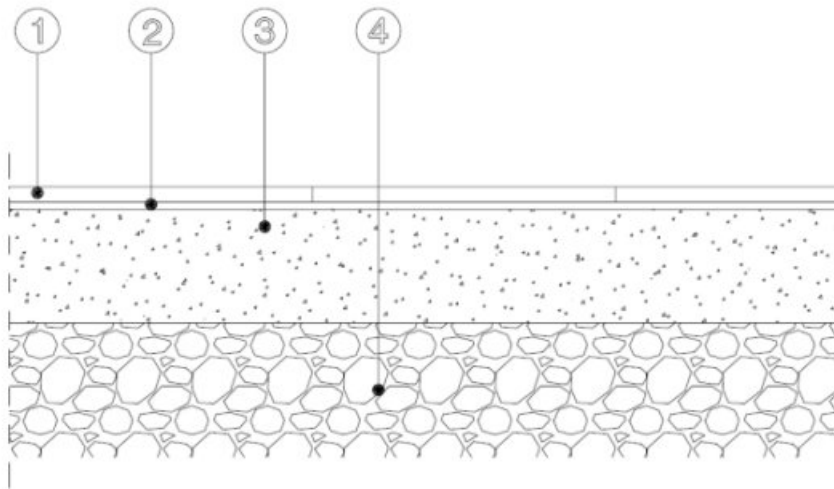


Figura 6. Solaio poggiato su terreno.

	Descrizione	spessore (m)	conducibilità λ , W/mK	conduttanza C W/m ² K	resistenza termica R m ² K/W	Riferimento normativo
R_{si}	Resistenza termica superf. interna				0,17	UNI 6946
1	Piastrine in ceramica	0,012	1,000		0,0120	UNI 10351
2	Sottofondo in cemento magro	0,040	0,73		0,0548	UNI 10351
3	C.i.s. di perlite e vermiculite	0,20	0,15		1,3333	UNI 10351
4	Conduttività termica del terreno		2,00			UNI 13370

Tabella 9. Calcolo trasmittanza solai su terra.

Resistenza totale della struttura	$R = \sum d/\lambda$	1,4001	m ² K/W
Trasmittanza termica di pavimenti non isolati secondo UNI 13370	$U = \frac{2\lambda}{\pi B^2 + d^2} \ln \left(\frac{\pi B^2}{d^2} + 1 \right)$	0,3133	W/m ² K

Tabella 10. Calcolo solai non isolati da terra.

Per la determinazione della trasmittanza termica del pavimento appoggiato sul terreno U_0 (in questo caso costituito da sabbia e ghiaia), si utilizzano i prospetti della UNI 13370, che tiene conto della conduttività termica del pavimento.

I ponti termici

IL ponte termico consiste in una configurazione strutturale o geometrica che produce una deviazione del flusso termico dalla condizione monodimensionale. Un esempio tipico di quanto detto si vede in Figura 7.



Figura 7. Deviazione flusso calore dovuto ad un ponte termico

Nella Figura 8 si vede che discontinuità nella struttura variano l'andamento di temperatura, mostrato dalla linea continua, mentre nella linea tratteggiata viene rappresentata la situazione ideale, senza distorsioni.

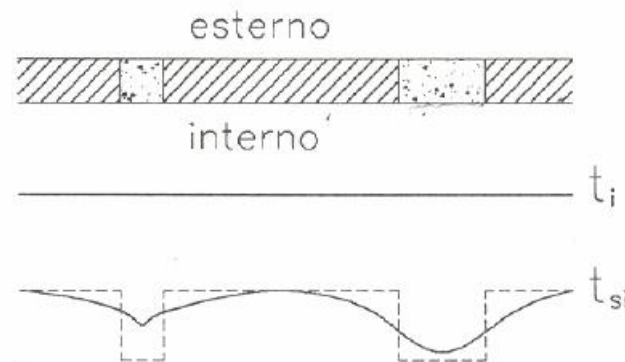


Figura 8. Andamento in temperatura reale in un ponte termico lineare

Alla luce di queste considerazioni risulta evidente che le discontinuità di forma e di materiale comportano la necessità di disporre di un metodo di calcolo diverso da quello espresso dalla relazione e che la loro presenza comporta una differenza nei valori dei flussi termici e delle temperature superficiali rispetto a quelli calcolati con la medesima relazione.

Per valutare l'incremento del flusso termico disperso si sono fatte opportune sperimentazioni. La curva di ripartizioni delle temperature permette di caratterizzare il ponte termico. Gli elementi più importanti da tenere in considerazione sono: l'andamento della curva di temperatura, che determina la larghezza del ponte termico e il punto a temperatura più fredda. E' necessaria l'introduzione di un coefficiente che caratterizza le eterogeneità delle temperature superficiali interne ed il suo valore è:

$$\rho = \frac{(T_i - T_{pi}^*)}{T_i - T_{pi}}$$

dove T_i è la temperatura dell'aria interna e T_{pi}^* la temperatura superficiale interna di un punto del ponte termico e dove T_{pi} la temperatura superficiale interna in corrispondenza della parete corrente. Questo valore di ρ ha un valore massimo ρ_m che evidenzia quanto il punto più freddo

sia a temperatura inferiore rispetto alla parete omogenea con riferimento alla temperatura interna dell'ambiente. In corrispondenza di ponte termico le linee isoterme non sono più parallele tra di loro, né alla superficie disperdente ed hanno un andamento curvilineo, tanto più accentuato, quanto più è presente il ponte termico stesso (vedere Figura 9).

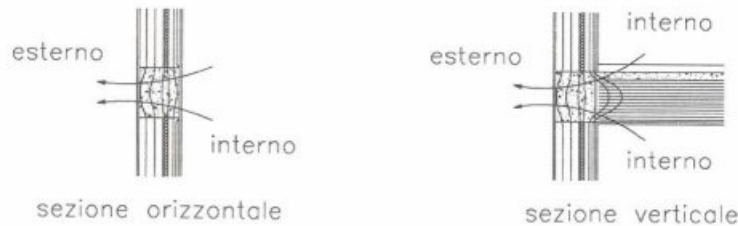


Figura 9. Linee di flusso su ponti termici

Le zone di concentrazione del flusso termico danno luogo sia al raffreddamento delle superfici prossime al ponte termico sia alla riduzione del grado di isolamento complessivo della parete con conseguenti variazioni del bilancio termico.

Le conseguenze della presenza di ponti termici danno luogo a due svantaggi: la dispersione del calore e al peggioramento di condizioni igienico-sanitarie, provocando situazioni di non confort termico, oltre a provocare l'insorgenza di macchie di umidità e di muffe e tensioni dei materiali. I ponti termici si suddividono in due categoria:

- di struttura, con materiale diverso dalle pareti circostanti
- di forma, costituito invece dallo stesso materiale dei muri circostanti.

Per i calcoli termici, il metodo proposto consiste nel calcolo di coefficienti di trasmissione lineici (k), esprimenti il flusso termico disperso che compete alle zone singolari per ogni metro di lunghezza e per una differenza di temperatura unitaria fra interno ed esterno. Attraverso l'uso di tale coefficiente, le dispersioni caratterizzate da flusso termico bidimensionale risultano concentrate su una linea, mentre le pareti concomitanti vengono trattate come "zone correnti". Le dispersioni di calore per trasmissione attraverso una parete, per una determinata differenza di temperatura tra gli ambienti che essa separa, possono quindi essere espresse da:

$$q = (\Sigma(kA) - \Sigma(kl)) * \Delta T$$

dove

- K ed A sono rispettivamente la trasmittanza termica unitaria [$W/mq\ K$] e l'area ($mq.$) di ogni elemento di parete, misurata all'interno dell'ambiente;
- k ed i sono rispettivamente la trasmittanza termica lineica ($W / m\ K$) e la lunghezza ($mt.$) di ogni giunto, misurata all'interno dell'ambiente.

Nel caso di una parete con finestra (vedi Fig. 10), al centro, nell'ipotesi di flusso stazionario monodimensionale, si può scrivere:

$$q = (K_p \cdot A_p + K_v \cdot A_v) \cdot \Delta T$$

Δt differenza tra le temperature dell'aria interna ed esterna [K]

dove:

K_p è la trasmittanza termica unitaria della parete opaca (E/ mq K)

K_v è la trasmittanza termica unitaria del vetro (E/ mq K)

A_p è la superficie della parete opaca (E/ mq K)

A_v è la superficie lorda della finestra (E/ mq K)

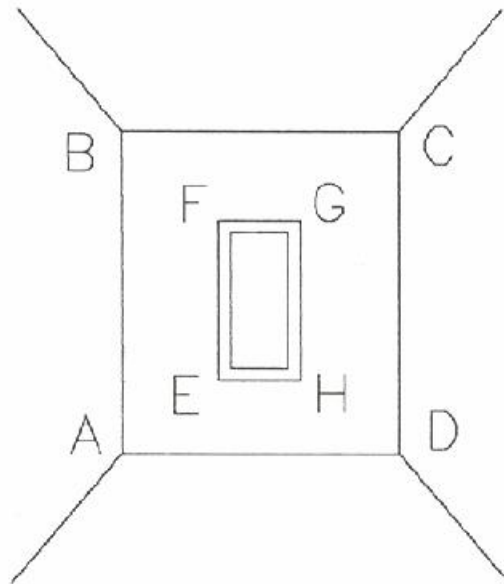


Figura 10. Flusso di calore per parete con finestra

Questo flusso non è quello reale, che è superiore, in quanto non si tiene conto del calore disperso tra le giunzioni delle pareti e della finestra; per avere il flusso reale, si deve calcolare:

$$q_{reale} = q + \sum_{i=1}^N k_i l_i \Delta T$$

con

q flusso termico stazionario monodimensionale [W]

k_i trasmittanza termica lineica della giunzione i-ma [W/m K] l_i lunghezza della giunzione i-ma [m]

n numero delle giunzioni

La trasmittanza termica lineica o coefficiente lineico k è in definitiva funzione dello spessore degli elementi che individuano la giunzione e della loro resistenza termica.

Riassumendo la valutazione dei ponti termici dovrà essere così condotta:

- individuazione del ponte termico stesso
- analisi degli elementi strutturali che lo identificano
- determinazione del valore di k attraverso formule e/o tabelle sperimentali
- determinazione della lunghezza l del giunto interessato
- calcolo del coefficiente k , per la lunghezza interessata l .

Di modo che, infine, si può definire un coefficiente di scambio termico K_g , pari a:

$$K_g = \frac{(\sum_{j=1}^m K_j A_j - \sum_{i=1}^n k_i l_i)}{A_{tot}}$$

dove la prima sommatoria è la somma delle dispersioni termiche monodimensionali della parete j , la seconda la somma delle dispersioni termiche dei ponti termici dovuti alla parete, n il numero dei ponti termici ed A_{tot} la superficie totale delle pareti.

Un certo numero di esempi sui vari casi di ponti termici, si trovano nel sito "Università politecnica delle Marche" con indirizzo http://www.univpm.it/Entra/Engine/RAServeFile.php/f/.../Ponti_termici.pdf, dal quale e' stato preso un estratto di questa trattazione.

Estratto da "<http://www.electroyou.it/mediawiki/index.php?title=UsersPages:Paolo.carlizza:pareti-finestre-pavimenti-e-soffitti-come-il-calore-si-disperde>"