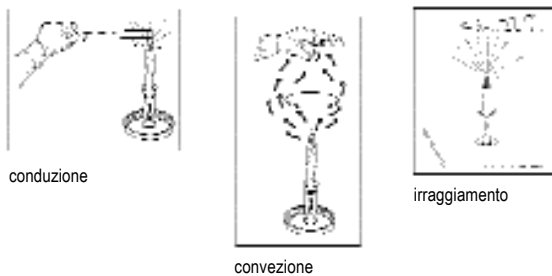


# Trasmittanza dell'involucro nell'edificio

Paola Caputo\*  
Simone Ferrari\*\*  
Arturo Romer

## Meccanismi di trasmissione del calore

La trasmissione del calore è quella branca della fisica tecnica il cui studio consente di calcolare le quantità di calore scambiato tra corpi a diversa temperatura, la rapidità con cui avviene tale scambio e la distribuzione di temperatura all'interno di un sistema, corpo, materiale. Sulla base del Secondo Principio della Termodinamica, è noto che, in assenza di altri fenomeni, tra due corpi a diversa temperatura, il calore si trasmette da quello a temperatura maggiore a quello a temperatura minore, sino a raggiungere la condizione di equilibrio termico. La trasmissione del calore può avvenire secondo tre diverse modalità: per conduzione, per convezione e per irraggiamento. Come già detto, tutte e tre le modalità richiedono l'esistenza di una differenza di temperatura e hanno una direzione «naturalmente preferenziale» (flusso di calore da regioni a temperatura più alta a regioni a temperatura più bassa).



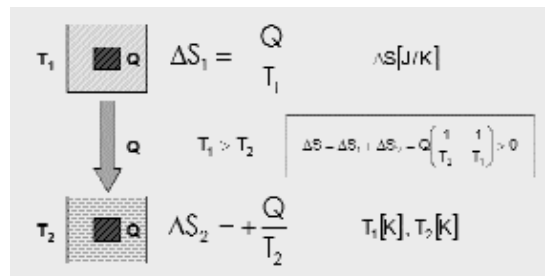
1 – La propagazione del calore

## La conduzione del calore

Nella *conduzione* la trasmissione del calore è riconducibile alle interazioni tra molecole adiacenti, (scambi tra molecole a diversi livelli di energia); si potrebbe definire la conduzione come il verificarsi di microvibrazioni che si ripercuotono da una molecola all'altra. La conduzione può avvenire sia nei solidi che nei fluidi in perfetto stato di quiete. In base all'equazione di Fourier, autore del postulato per la conduzione del calore (1822), possiamo scrivere:

$$\dot{Q} = (\lambda/s) \cdot A \cdot (T_1 - T_2), \text{ dove:}$$

- $\dot{Q}$  è la potenza termica [W]
- $\lambda$  è il coefficiente di trasmissione del calore per conduzione [W/m<sup>2</sup>·K]
- A è la superficie di scambio di calore [m<sup>2</sup>]
- T<sub>1</sub> è la temperatura interna della parete [K, oppure °C]
- T<sub>2</sub> è la temperatura esterna della parete [K, oppure °C]
- s è lo spessore della parete [m]



3 – Conduzione termica ed entropia S

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{q}}{c \cdot \rho}$$

T = temperatura [K]  
 t = tempo [s]  
 λ = conduttività termica [W/(m·K)]  
 ρ = densità [kg / m<sup>3</sup>]  
 c = calore specifico [kJ/(kg · K)]  
 q̇ = sorgente di calore [W/m<sup>3</sup>]

2 – La conduzione termica (equazione di Fourier)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Sia:  $\frac{\partial T}{\partial t} = 0, \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0, \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$

Risulta:  $\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \Leftrightarrow T''(x) = 0$   
 $\frac{dT}{dx} = K_1 \Leftrightarrow T'(x) = K_1$   
 $T(x) = K_1 x + K_2$

Tenendo conto delle condizioni ai limiti ( $T(0) = T_1$  e  $T(s) = T_2$ )

$$T = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{s} x$$

4 – Applicazione dell'equazione di Fourier nel calcolo della temperatura in conduzione pura

Nella figura 4, si riporta l'equazione di Fourier; in tale equazione, il rapporto  $dT/dx$  è detto gradiente di temperatura.

$$T_K = 273,15 + t_c = \frac{5}{9} \cdot T_R$$

$$T_R = 459,67 + t_f = 1,8 \cdot T_K$$

$$t_c = \frac{5}{9} \cdot (t_f - 32) = T_K - 273,15$$

$$t_f = 1,8 \cdot t_c + 32 = T_K + 459,67$$

Con: K = Kelvin [K]  
R = Rankine [°R]  
F = Fahrenheit [°F]  
C = Celsius [°C]

°C	K	°F	°R
100 °C	373,15 K	212 °F	671,67 °R
0 °C	273,15 K	32 °F	491,67 °R
-273,15 °C	0 K	-459,67 °F	0 °R

5 – Le scale di temperatura

### Conducibilità termica

Per la valutazione delle caratteristiche termiche di un materiale, in relazione al meccanismo di conduzione del calore, si fa riferimento alla conducibilità termica, indicata con la lettera greca  $\lambda$  (lambda). I «materiali isolanti» sono caratterizzati da bassi valori di conducibilità; al contrario, i «materiali conduttori» sono caratterizzati da alti valori di conducibilità (vedere anche la tabella 3 e la figura 8). Se si considera una parete omogenea, a facce piane e parallele, di spessore  $s$  che separa due ambienti a differente temperatura (vedere anche figura 6), il flusso di calore che attraversa nell'unità di tempo un metro quadrato della parete è direttamente proporzionale alla differenza  $\Delta T$  di temperatura tra le superfici del divisorio, alla conducibilità termica del materiale costituente la parete stessa e inversamente proporzionale al suo spessore  $s$ , ovvero:

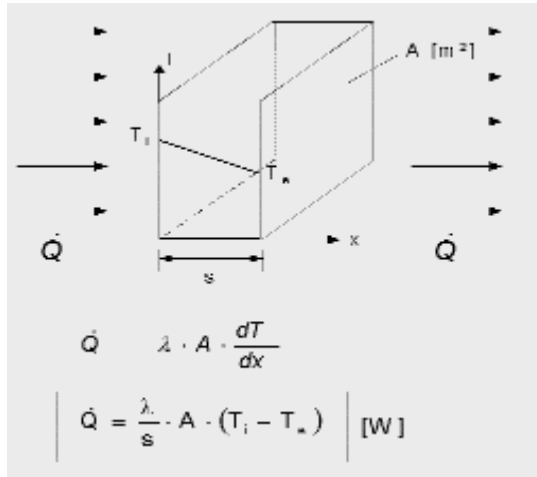
$$\Phi = \Delta T \cdot (\lambda/s)$$

Ponendo nella formula  $\Delta T = 1 [K]$ ,  $s = 1 [m]$ , si può ricavare la definizione di  $I$ : flusso di calore, nell'unità di tempo e per metro quadrato, che si determina quando esiste una differenza di temperatura di un  $K$  tra una faccia e l'altra e per lo spessore di un metro del materiale stesso. Il coefficiente  $I$  si esprime dunque in  $[W/mK]^1$ . La definizione di conducibilità fornita è valida per materiali omogenei. Per migliorare la resistenza termica alla conduzione di uno strato di materiale omogeneo ( $s/\lambda$ , in

$[m^2K/W]$ ) si può aumentare lo spessore e/o scegliere un materiale con un minore valore di conducibilità termica.

SOSTANZA	$\lambda$ W/(K · m)
Acqua (27 °C)	0,609
Aria (27 °C)	0,026
Ghiaccio	0,592
Acciaio	48
Acciaio inossidabile (18/8)	17
Alluminio	237
Argento	429
Ferro	80,1
Oro	318
Piombo	35,3
Rame	401
Aceiro	0,16
Pino bianco	0,11
Quercia	0,15
Calcestruzzo	0,8 : 1,3
Calcestruzzo armato	1,0 : 1,6
Intonaco	0,3 : 0,7
Lana di roccia	0,039
Lana di vetro	0,042
Marmo	3
Masonite	0,048
Mattone	0,4 : 0,8
Sughero	~0,23
Sughero espanso	0,06
Sabbia asciutta	0,38
Sabbia umida	1,16
Vetro	0,7 : 0,9

Tab. 3 – Conducibilità termica  $\lambda$  di alcuni materiali



6 – Potenza termica scambiata ed andamento della temperatura per una parete monostrato; dall'espressione sopra riportata, discende che l'andamento della temperatura all'interno dello spessore è lineare.

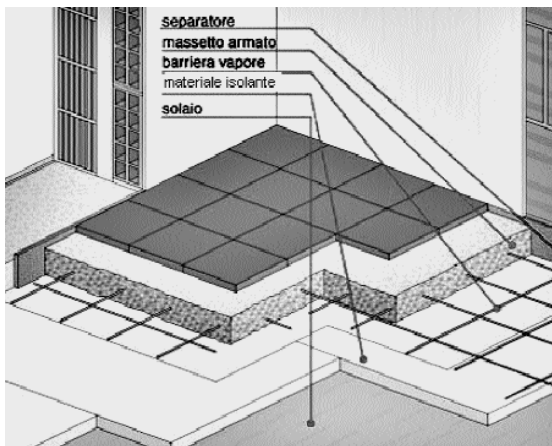
$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \approx A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt} = \dot{Q}$$

Con  $\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{T_1 - T_2}{s}$  si ottiene:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_1}{s}$$

$$Q = \int_0^l \lambda \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{s} \cdot dt = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{s} \int_0^l dt = \lambda \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{s} \cdot t$$

7 – La conduzione di calore attraverso una parete di spessore  $s$



8 – Esempio di isolamento di un pavimento  
(immagine trovata sul sito [http://www.stiferite.it/cgi-bin/stimamiglio/ALT\\_001.jsp](http://www.stiferite.it/cgi-bin/stimamiglio/ALT_001.jsp))

### La convezione

Nella convezione, caratteristica dei fluidi, la trasmissione del calore avviene attraverso un movimento macroscopico di alcune parti della massa del fluido rispetto ad altre; si ha quindi trasporto di materia. La convezione può essere naturale o forzata: quest'ultima si ha quando il moto dei fluidi viene «forzato» mediante dispositivi meccanici come ventilatori o pompe. In edilizia si può parlare di convezione nel descrivere il fenomeno di trasmissione del calore che si ha tra la superficie di un corpo solido (di un muro) e l'aria dell'ambiente verso cui il corpo si affaccia (l'ambiente esterno dell'involucro edilizio o quello interno «abitato»).

1. Conduttività termica (0 °C; 1,0132 bar)	$\lambda$	= 0,0243 [W/(m·K)]
2. Massa molare	$M$	= 28,964 [kg/kmole]
3. Volume molare (0 °C; 1,0132 bar)	$V_m$	= 22,40 [m³/kmole]
4. Costante specifica dei gas	$R_1$	= 0,287 [kJ/(kg·K)]
5. Densità (0 °C; 1,0132 bar)	$\rho$	= 1,2928 [kg/m³]
6. Calore specifico (0 °C)	$c_p$ $c_v$	$c_p = 1,006$ [kJ/(kg·K)] $c_v = 0,719$ [kJ/(kg·K)]
7. Rapporto $\gamma = c_p / c_v$	$\gamma$	= 1,407
8. Costante universale dei gas	$R$	= 0,314 [kJ/(kmole·K)]

9 – Alcuni dati tecnico-fisici dell'aria

La potenza termica scambiata per convezione si esprime mediante la legge di Newton per la convezione:

$$\dot{Q} = h_c \cdot A \cdot (T_s - T_f), \text{ dove:}$$

$h_c$  è il coefficiente di scambio convettivo in [W/m²·K]  
 $A$  è la superficie di scambio di calore [m²]  
 $T_s$  è la temperatura superficiale del corpo [K oppure °C]  
 $T_f$  è la temperatura del fluido in cui il corpo si trova e con cui scambia calore, a distanza sufficientemente grande dalla superficie medesima [K oppure °C]

### Il coefficiente convettivo

Il coefficiente  $h$  dipende da fattori di carattere fluidodinamico come:

- differenza di temperatura fra la superficie e l'aria (oltre lo strato limite);
- velocità e direzione della massa d'aria che lambisce la superficie;
- forma e rugosità della superficie.

Nel calcolo dell'influenza di tali fattori, si fa riferimento a numeri, come quello di Nusselt (Nu), Reynolds (Re), Prandtl (Pr) e Grashof (Gr).

In generale, è possibile impiegare espressioni di calcolo semplificate.

### L'irraggiamento

Nell'irraggiamento, infine, la trasmissione del calore avviene indipendentemente dalla presenza di molecole. Si tratta cioè di una trasmissione di energia elettromagnetica, che può propagarsi anche nel vuoto. Tutti i corpi a temperatura superiore allo 0 [K] (il *Kelvin* è l'unità di misura della scala assoluta delle temperature dove 0 [K] = -273.15°C e ogni unità [K] equivale ad una unità [°C], dunque 0[°C] = 273.15 [K]) emettono energia per irraggiamento, prevalentemente nella banda del lontano infrarosso; la potenza termica emessa per irraggiamento si esprime mediante la legge di Stefan Boltzmann:

$$\dot{Q} = \sigma AT_s^4, \text{ dove:}$$

$\sigma$  è la costante di Stefan – Boltzmann ( $5.7 \cdot 10^{-8}$  [W/m²·K⁴])  
 $A$  è la superficie del corpo nero [m²]  
 $T_s$  è la temperatura superficiale del corpo [K]

Nel caso dei corpi reali, non neri, ma «grigi», la formula diventa:

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma AT_s^4, \text{ dove:}$$

$\epsilon$  è il coefficiente di emissione (emissività) caratteristico della superficie esterna del corpo grigio considerato

Se è vero che ogni corpo emette energia sotto forma di onde elettromagnetiche, è altrettanto vero che ogni corpo riceve (ed assorbe) l'energia elettromagnetica emessa dai corpi che lo circondano. Infatti nel considerare le quantità di calore trasmesse per irraggiamento da un corpo ad un altro si deve necessariamente fare riferimento alle quantità di calore «scambiate» tra i corpi in entrambe le direzioni. Per la maggior parte dei materiali di uso comune in edilizia è lecito affermare, con errore trascurabile, che il coefficiente di emissione caratteristico di un corpo corrisponde anche al suo coefficiente di assorbimento delle radiazioni, emesse da altri corpi, che raggiungono la superficie del corpo in esame. Per fare un bilancio

dello scambio energetico sarebbe necessario mettere in relazione l'energia emessa da ciascun corpo del sistema esaminato con i «fattori di vista» che legano un corpo all'altro. I fattori di vista danno misura percentuale di quanta della superficie di un corpo viene «vista», in una sorta di proiezione prospettica, da un altro corpo e viceversa: preso un corpo immerso in un ambiente, la sommatoria dei fattori di vista che esso ha rispetto a tutti i corpi che delimitano detto ambiente è pari a 1 (100%).

Rispetto ad un corpo contenuto in un ambiente delimitato da altri corpi, l'energia scambiata dipende dalle temperature superficiali, del corpo in esame e dei corpi che delimitano l'ambiente in cui questo è contenuto, poste in relazione ai diversi fattori di vista che legano il corpo con gli altri. È così definibile la temperatura media radiante di un ambiente rispetto ad un punto P:

$$t_{mr} = \sum_i F_{i,P} \cdot t_i, \text{ dove:}$$

$F_{i,P}$  è il fattore di vista tra il punto P e la i superfici che delimitano l'ambiente e

$t_i$  sono le rispettive temperature superficiali

Sulla base di una teoria la cui trattazione risulterebbe piuttosto complicata e comunque esuberante rispetto agli obiettivi del presente articolo, si ricava che la potenza termica netta di calore scambiata per irraggiamento

$$\dot{Q} = h_r \cdot A \cdot (T_s - T_{mr}), \text{ dove:}$$

$h_r$  è il coefficiente di scambio radiativo in [W/m<sup>2</sup>·K]

$A$  è la superficie di scambio di calore [m<sup>2</sup>]

$T_s$  è la temperatura della superficie considerata [K oppure °C]

$T_{mr}$  è la temperatura media radiante dell'ambiente «visto dalla superficie in esame [K oppure °C]

<b>1. Neve</b>			
· neve fresca (< 30 mm)	:	$\lambda$	= 0,06 [W/(m · K)], $\rho = 100$ [kg/m <sup>3</sup> ], $c_p = 2$ [kJ/(kg · K)]
· neve leggera (30 – 70 mm)	:	$\lambda$	= 0,12 [W/(m · K)], $\rho = 200$ [kg/m <sup>3</sup> ], $c_p = 2$ [kJ/(kg · K)]
· neve leggermente indurita (70 – 100 mm)	:	$\lambda$	= 0,23 [W/(m · K)], $\rho = 300$ [kg/m <sup>3</sup> ], $c_p = 2$ [kJ/(kg · K)]
· neve indurita (> 200 mm)	:	$\lambda$	= 0,70 [W/(m · K)], $\rho = 500$ [kg/m <sup>3</sup> ], $c_p = 2$ [kJ/(kg · K)]
<b>2. Ghiaccio</b>			
· conduttività termica specifica (-10 °C)	:	$\lambda$	= 2,50 [W/(m · K)]
· densità (-10 °C)	:	$\rho$	= 900 [kg/m <sup>3</sup> ]
· calore specifico (-10 °C)	:	$c_p$	= 2 [kJ/(kg · K)]
· energia di fusione (0 °C)	:	$c_{fusione}$	= 334 [kJ/kg]
<b>3. Acqua</b>			
· conduttività termica specifica (20 °C)	:	$\lambda$	= 0,608 [W/(m · K)]
· densità (20 °C)	:	$\rho$	= 1000 [kg/m <sup>3</sup> ]
· calore specifico (20 °C)	:	$c_p$	= 4,182 [kJ/(kg · K)]
· energia di evaporazione (1,013 bar, 100 °C)	:	$c_{evaporazione}$	= 2256 [kJ/kg]
<b>4. Vapore</b>			
· conduttività termica specifica (1,013 bar, 100 °C)	:	$\lambda$	= 0,025 [W/(m · K)]
· densità (1,013 bar, 100 °C)	:	$\rho$	= 0,598 [kg/m <sup>3</sup> ]
· calore specifico (1,013 bar, 100 °C)	:	$c_p$	= 2,020 [kJ/(kg · K)]

10 – Dati fisico-tecnici di H<sub>2</sub>O

### L'adduzione

Abbiamo visto che la trasmissione del calore tra due ambienti avviene oltre che per conduzione all'interno della parete considerata, anche per convezione e irraggiamento dall'aria dell'ambiente a temperatura maggiore verso la superficie adiacente della parete e dall'altra superficie della stessa verso l'ambiente a temperatura minore.

Si supponga che l'aria interna si trovi a temperatura superiore rispetto all'aria esterna. Per l'insieme degli effetti della convezione e dell'irraggiamento, si può affermare che la quantità di ca-

lore  $Q$  che passa dall'ambiente interno alla superficie interna della parete è direttamente proporzionale alla superficie stessa [m<sup>2</sup>], al salto di temperatura tra aria e superficie

[°C] e ad un coefficiente di scambio termico di adduzione interno « $\alpha_i$ » [W/m<sup>2</sup>K], che esprime la quantità di calore ceduta nell'unità di tempo ad ogni unità di area, per ogni grado di differenza di temperatura. Analogamente, per quanto riguarda il calore ceduto dalla parete all'ambiente esterno, si avrà il coefficiente di scambio termico di adduzione esterno « $\alpha_e$ ».

I coefficienti di adduzione  $\alpha$

Il calore scambiato per convezione ed irraggiamento può essere espresso, in forma semplificata, come:

$$\dot{Q} = (h_c + h_r) * A * (T_s - T_a), \text{ dove:}$$

$T_a$  è la temperatura ambiente [K oppure °C]  
 $(h_c + h_r) = \alpha$  è il coefficiente di adduzione [W/(m<sup>2</sup>\*K)]

Abituali valori di  $\alpha_i$  e  $\alpha_e$  per materiali opachi, sono (vedi anche letteratura):

$$\alpha_i = 7.7 \text{ [W/m}^2\text{K]} \\ \alpha_e = 25 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

**Calcolo della trasmittanza U**

Se la parete, come abitualmente accade, è costituita da più strati in serie, ognuno caratterizzato da un proprio spessore  $s_i$  e da una propria conducibilità termica  $\lambda_i$ , la resistenza termica complessiva del divisorio è data dalla somma dei contributi dovuti ai coefficienti di adduzione interno ed esterno e dei rapporti  $s_i/\lambda_i$  di ogni singolo strato. In formule:

$$R = 1/\alpha_i + \sum_i (s_i/\lambda_i) + 1/\alpha_e \text{ [m}^2\text{K/W]}$$

A questo punto, è possibile definire la trasmittanza termica U, ovvero l'inverso della resistenza termica globale R, ossia:

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{1/\alpha_i + \sum_i (s_i/\lambda_i) + 1/\alpha_e} \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Tale parametro<sup>2</sup> è strettamente legato allo stato dei due fluidi e delle pareti circostanti, così come alla natura e dagli spessori costituenti la parete (vedere anche la figura 11).

**Conservazione: Lambda, Resistenza termica R, Alfa (α)**

**DEFINIZIONE:** conducibilità termica (λ)

La resistenza termica di un elemento è l'opposizione del suo spessore e della sua conducibilità termica al calore.

Il coefficiente di adduzione (α) = spessore (s) / lambda [W/m²K]

Un materiale è caratterizzato in base a questi tre parametri: α, λ e s.

**DEFINIZIONE:** coefficiente di adduzione (α)

La resistenza di scambio termico di un elemento è data dalla somma di quella di ogni strato che lo compone (semplice, composto, multiplo) e quella di ogni strato che lo circonda.

Esso è quantificato dal coefficiente di adduzione (α)

Resistenza per unità di superficie (R) [m²K/W]

Una superficie unitaria con spessore unitario (1) e conducibilità unitaria (1) ha una resistenza (R) di 1.

11 – Conducibilità, adduzione e resistenza termica tratto da DIAS, CUEPE

La trasmittanza termica U del muro deve essere più bassa possibile per limitare i consumi energetici nelle abitazioni (per far funzionare a minore potenza e per minor tempo gli impianti di riscaldamento) e, conseguentemente, l'inquinamento ambientale dei centri abitati. Inoltre, la trasmittanza termica influenza anche i fenomeni di condensa. È allora importante conoscere, in funzione della temperatura invernale esterna della zona in cui si realizza l'abitazione, la trasmittanza termica massima di sotto alla quale si evita l'insorgere sul muro dei pregiudizievole fenomeni di condensa. In Svizzera, la SIA ha proposto, in passato, i seguenti valori per la trasmittanza dei componenti edilizi (tabella 4).

In Svizzera, la normativa SIA di riferimento in materia è la 380/1.

	1990	2000	2010	2020
Uvetri	2	1,4	0,7	0,7
Ucornici	1,9	1,6	1	1
Umuri	0,5	0,3	0,2	0,2
Utetti	0,4	0,3	0,2	0,2
Upavimenti	0,5	0,35	0,3	0,3
Ricambi d'aria [h <sup>-1</sup> ]	0,6	0,5	0,4	0,3

tab. 2 – Proposta SIA per i valori U dall'anno 1990 all'anno 2020

Nella figura successiva (fig. 12), si veda l'effetto dell'impiego di materiali isolanti in termini di riduzione della dispersione di calore e abbassamento della trasmittanza di parete.

**Isolamento termico.**

La tabella dell'evoluzione tecnica dei 20 m<sup>2</sup> di isolamento termico è all'incirca la stessa. Ma la differenza è nei costi, che sono molto più bassi, e nel fatto che oggi si può avere un isolamento termico di questo tipo a un costo molto inferiore a quello che si aveva nel 1960.

1,4 W/m²K (1960)    0,4 W/m²K (1970)    0,35 W/m²K (1980)    0,12 W/m²K (Eco-muratura)

1. Isolamento  
2. Isolamento  
3. Isolamento  
4. Isolamento

1. Isolamento  
2. Isolamento  
3. Isolamento  
4. Isolamento

1. Isolamento  
2. Isolamento  
3. Isolamento  
4. Isolamento

1. Isolamento  
2. Isolamento  
3. Isolamento  
4. Isolamento

12 – L'effetto dell'impiego di materiali isolanti tratto da DIAS, CUEPE

Il vetro è un materiale dotato di un alto valore di conducibilità termica ed è dotato di piccoli spessori; pertanto, i valori di trasmittanza del vetro sono molto alti. Così è stato per molto tempo, quando venivano impiegati i vetri singoli. Proprio a causa delle alte dispersioni connesse con le superficie trasparenti, attualmente, si adottano vetri doppi o

tripli, con intercapedini di aria (di diverso spessore) o gas inerti più isolanti.

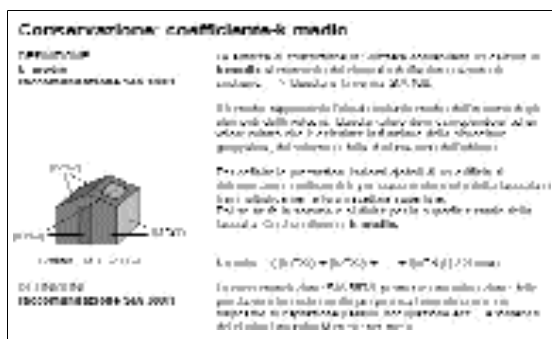
Per valutare la performance energetica degli edifici si adoperano indicatori come la trasmittanza media dell'intero edificio e il consumo di energia per un particolare scopo (ad esempio, per il riscaldamento) per m<sup>2</sup> di superficie e per anno [MJ/(m<sup>2</sup> anno)].

In Svizzera, le norme SIA di riferimento in materia sono la 180/1 e la 380/1.

A livello qualitativo, si può definire l'U medio di un edificio come quel valore di U che avrebbe un edificio dotato della medesima superficie e caratterizzato da pareti omogenee tutte identiche tra loro. In termini quantitativi, si tratta di fare una media ponderata dei vari U relativi alle diverse superficie che compongono l'edificio (vedere la figura 13 e tabella 6).

oggetto	valori limite		valori mirati	
	riscaldamento	acqua sanitaria	riscaldamento	acqua sanitaria
Case uni- e bifamigliari	330	60	280	60
Case multifamigliari	300	100	250	100
Edifici amministrativi	270		220	
Scuole	270	25	220	25
Empori	250	25	200	25
Ospedali	330	100	330	100

tab. 3 – Indici energetici per costruzioni nuove (MJ/(m<sup>2</sup> · a))



13 – Calcolo della trasmittanza media. In questa figura si adoperava ancora la notazione «k», ormai obsoleta, invece di quella «U» tratto da DIAS, CUEPE

Parte	Superficie Ai [m <sup>2</sup> ]	Valore Ui [W × m <sup>2</sup> × K <sup>-1</sup> ]	Ai × Ui [W × K <sup>-1</sup> ]
Pareti	323,38	0,3	97,01
Finestre	111,66	1,3	145,16
Tetto	180,14	0,25	45,04
Soffitto cantina	180,14	0,45	81,06
	795,32	0,46	368,27

tab. 4 – Esempio di calcolo dell'U medio

Attualmente, tutti i dibattiti ed i provvedimenti in campo energetico-ambientale vanno nella direzione dell'aumento dell'efficienza energetica e nella riduzione dei consumi energetici. Da un lato, la progettazione di edifici nuovi ritrova ed aggiorna alla luce dei nuovi progressi tecnologici i principi dell'architettura bioclimatica e sostenibile, tende alla concezione di edifici a basso consumo energetico, «passivi» o addirittura a zero consumo energetico; dall'altro, l'ambiente costruito viene parzialmente recuperato e riqualificato a livello energetico. A tali tendenze corrisponde la proposta di nuovi strumenti normativi e standard e marchi di certificazione (come, ad esempio il *Minergie* svizzero) in cui l'involucro dell'edificio assume fondamentale importanza. Tra gli strumenti normativi più recenti si ricorda la Direttiva CE 98/2001 sulla performance energetica degli edifici, che invita tutti gli stati membri a ridefinire i propri standard anche nel tentativo di uniformare la metodologia di progettazione e valutazione degli edifici (concetto di *integrated minimum energy performance standard*).

Per quanto riguarda gli indici di riferimento, il valore di trasmittanza di un edificio nel suo complesso dovrebbe essere sempre molto minore di 1 [W/(m<sup>2</sup> K)]; in particolare, i valori suggeriti per edifici «passivi», sono pari a:

- U < 0,15 [W/(m<sup>2</sup> K)] per pareti opache e
- U < 0,8 [W/(m<sup>2</sup> K)] per pareti trasparenti

MATERIALE	DENSITÀ [kg / m <sup>3</sup> ]	CONDUTTIVITÀ [W / (m · K)]
Calcestruzzo in argille espanso	1'800	0,67
Calcestruzzo	1'700	0,47
Muro a mattoni	2'000	0,75
Fibre di vetro (pannelli rigidi)	100	0,038
Intonaco di gesso puro	1'200	0,35
Polistirene	30	0,042
Poliuretani	40	0,032
Legno (taglio)	800	0,2
Legno (secco)	600	0,13

tab. 5 – Densità e conduttività di alcuni materiali

## Alcuni esercizi per comprendere meglio

### Trasmittanza

Si calcoli il calore che attraversa in una giornata una parete siffatta:

spessore  $L = 40$  [cm]  
superficie  $S = 10$  [m<sup>2</sup>]  
conducibilità termica  $\lambda = 0,9$  [W/(m<sup>2</sup>K)]

sapendo che la temperatura esterna è pari a 3 [°C] e quella interna è pari a 23 [°C].  
Si consideri la sola conduzione.

L'equazione del flusso termico<sup>3</sup>,  $(dQ/dt) = \lambda * A * (dT/dx)$ , ottenuta in seguito a diverse ipotesi semplificative, riferita ad un intervallo di tempo finito  $\Delta t$  diviene:

$$(\Delta Q/\Delta t) = \lambda * A * (\Delta T/\Delta x)$$

dove  $\lambda$  è la conducibilità termica e  $x$  è la coordinata spaziale lungo la quale avviene lo scambio di calore. Pertanto, applicando dei comuni valori come dati di temperatura, spessore e conducibilità:

$\Delta t = 24 * 3'600 = 86'400$  [s]  
 $\Delta x = L = 40$  cm = 0,4 [m]  
 $S = 10$  [m<sup>2</sup>]  
 $\lambda = 0,9$  [W/(m<sup>2</sup>K)]  
 $\Delta T = (3 - 23)^\circ\text{C} = 20^\circ\text{C} = [20$  K]

si ottiene:

$$(\Delta Q/\Delta t) = 0,9 \text{ [W/(m}^2\text{K)]} * 10 \text{ [m}^2\text{]} * 20 \text{ [K]} / 0,4 \text{ [m]} = 450 \text{ [W]}$$

pertanto, il calore che attraversa la parete in una giornata è pari a:

$$450 * 24 * 3'600 \text{ [W} * \text{s]} = 38'880 \text{ [kJ]} = 10,8 \text{ [kWh]}$$

### Parete multistrato

Si calcolino la trasmittanza e la potenza termica che attraversa una parete multistrato siffatta:

superficie  $A = 10$  [m<sup>2</sup>]  
spessore  $s_1 = 2$  [cm]  
spessore  $s_2 = 25$  [cm]  
spessore  $s_3 = 5$  [cm]  
conducibilità termica  $\lambda_1 = 0,6$  [W/(m<sup>2</sup>K)]  
conducibilità termica  $\lambda_2 = 0,9$  [W/(m<sup>2</sup>K)]  
conducibilità termica  $\lambda_3 = 0,04$  [W/(m<sup>2</sup>K)]  
coefficiente di adduzione  $\alpha_{int} = 7$  [W/(m<sup>2</sup>K)]  
coefficiente di adduzione  $\alpha_{est} = 12,5$  [W/(m<sup>2</sup>K)]

sapendo che la differenza tra la temperatura esterna e quella interna è pari a 32 °C.

Si calcoli il salto termico corrispondente a ciascuno strato e se ne dia una rappresentazione grafica.

a) Ciascuno strato è caratterizzato da un coefficiente  $\lambda$ .

Si hanno inoltre i valori relativi alle resistenze laminari interna ed esterna.

A partire dalla definizione del coefficiente  $U$  per pareti a più strati, possiamo scrivere:

$$U = [0,14 \text{ [(m}^2\text{K)/W]} + 0,02 \text{ [m]} / 0,6 \text{ [W/(m}^2\text{K)]} + 0,25 \text{ [m]} / 0,9 \text{ [W/(m}^2\text{K)]} + 0,05 \text{ [m]} / 0,04 \text{ [W/(m}^2\text{K)]} + 0,08 \text{ [(m}^2\text{K)/W]}]^{-1} = 0,56 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

dove gli addendi in grassetto sono le resistenze laminari e gli addendi in corsivo le resistenze termiche conduttive; il valore trovato è decisamente buono (confrontare con gli standard sIA).

b) L'equazione di partenza è sempre quella del flusso termico, il quale si conserva nel passaggio attraverso i diversi strati della parete. L'equazione del flusso termico stabilisce un rapporto di proporzionalità tra la potenza termica scambiata, l'area di scambio,  $U$  e la differenza di temperatura tra i due punti dove avviene il passaggio:

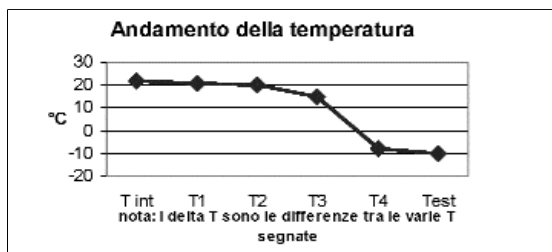
$$\dot{Q} = A * U * \Delta T ;$$

nel nostro caso sarà:

$$\dot{Q} = 10 \text{ [m}^2\text{]} * 0,56 \text{ W/(m}^2\text{K)} * 32 \text{ [K]} = 179,2 \text{ [W]}$$

Per rappresentare il profilo di temperatura all'interno della parete, va tenuto presente che, assunto un coefficiente  $\lambda$  costante per ciascun materiale, l'andamento della temperatura all'interno di ciascuno strato è rappresentato da una linea retta, la cui pendenza è proporzionale alla resistenza termica del materiale stesso al passaggio del calore.

Pertanto, l'andamento qualitativo sarà il seguente:



Pertanto, applicando i dati del testo, si possono calcolare le pendenze dei diversi tratti di retta.

$$1/U_1 = R_1 = s_1/l_1 = 0,02/0,6 = 0,03 \text{ [(m}^2 \cdot \text{K)/W]}$$

$$1/U_2 = R_2 = s_2/l_2 = 0,25/0,9 = 0,28 \text{ [(m}^2 \cdot \text{K)/W]}$$

$$1/U_3 = R_3 = s_3/l_3 = 0,05/0,04 = 1,25 \text{ [(m}^2 \cdot \text{K)/W]}$$

Essendo il terzo strato quello isolante, è ovvio che la  $R_3$  sia maggiore delle altre due.

Il flusso di calore per unità di superficie risulta essere pari a:

$$U \cdot \Delta T_{\text{totale}} = 0,56 \cdot 32 = 17,9 \text{ [W/m}^2\text{]},$$

dove il  $\Delta T_{\text{totale}}$  si compone nella somma di cinque termini: quelli conduttivi, relativi a ciascuno dei tre strati e quelli convettivi, relativi all'avvezione:

$$\Delta T_{\text{totale}} = \Delta T_{\text{int}} + \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 + \Delta T_{\text{Test}}$$

$$\Delta T_{\text{int}} = q \cdot R_{\text{int}} = 17,9 / \alpha_{\text{int}} = 2,5$$

$$\Delta T_1 = q \cdot R_1 = 17,9 \cdot 0,03 = 0,5$$

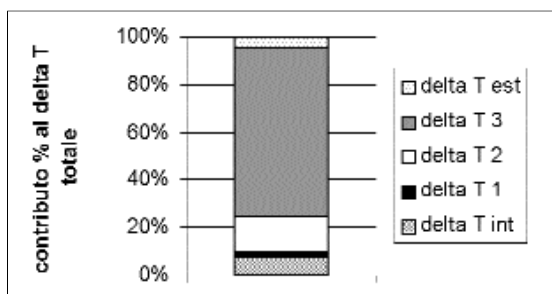
$$\Delta T_2 = q \cdot R_2 = 17,9 \cdot 0,28 = 5,0$$

$$\Delta T_3 = q \cdot R_3 = 17,9 \cdot 1,25 = 22,4$$

$$\Delta T_{\text{Test}} = q \cdot R_{\text{est}} = 17,9 / \alpha_{\text{est}} = 1,4$$

La somma è pari a 32°C, a meno di errori di approssimazione delle cifre decimali, cvd.

Come si nota, lo strato che più frena il passaggio del calore è quello isolante.



Come considerazione generale, essendo la somma dei vari  $\Delta T$  soggetta alla proprietà commutativa, si ha che l'ordine dei vari strati non ha influenza sulla trasmissione globale del calore e che il risultato finale, in termini di differenza tra  $T_{\text{esterna}}$  e  $T_{\text{interna}}$ , non cambia. Diversamente accade se non si considerano solo gli aspetti termodinamici, ma anche quelli pratici: ad esempio, la posizione dello 0°C all'interno della parete è molto importante, in quanto, nel caso di presenza di umidità potrebbe formarsi del ghiaccio con conseguente sviluppo di crepe.

#### Riferimenti

- Yunus A. Çengel, *Termodinamica e trasmissione del calore*, McGraw-Hill Libri Italia srl, Milano
- CD ROM DIAS, CUEPE
- [www.caveriunite.com/tecn.html](http://www.caveriunite.com/tecn.html)
- [www.azzurroframes.it/sezioni/tecnologia/controllo\\_term1.htm](http://www.azzurroframes.it/sezioni/tecnologia/controllo_term1.htm)
- [www.asapia.it/guid2cap-1.htm](http://www.asapia.it/guid2cap-1.htm)
- [www.sia.ch](http://www.sia.ch)
- [www.380-4.ch](http://www.380-4.ch)
- [www.heizplan.ch](http://www.heizplan.ch)
- [www.empa.ren.ch](http://www.empa.ren.ch)
- [www.en-bau.ch](http://www.en-bau.ch)
- [www.brenet.ch](http://www.brenet.ch)
- [www.are.ch](http://www.are.ch)
- [www.vip-bau.ch](http://www.vip-bau.ch)
- [www.minergie.ch](http://www.minergie.ch)
- [www.aicarr.it](http://www.aicarr.it)
- [www.cnpi.it](http://www.cnpi.it)
- [www.flumroc.ch](http://www.flumroc.ch)
- [www.ti.ch/dT](http://www.ti.ch/dT)
- [www.bund-bauen-energie.de/altbau.htm](http://www.bund-bauen-energie.de/altbau.htm)
- [www.energie.ch/themen/bautechnik/minergie](http://www.energie.ch/themen/bautechnik/minergie)

#### Note

1. A volte, in letteratura, si può trovare espressa in [kcal/(m<sup>2</sup> x h x °C)].
2. Si ricorda la seguente conversione:  
1 [W/(m<sup>2</sup> x K)] = 0,86 [kcal/(m<sup>2</sup> x h x °C)] e, viceversa:  
1 [kcal/(m<sup>2</sup> x h x °C)] = 1,164 [W/(m<sup>2</sup> x K)].
3. Vedere anche equazione di Laplace e di Fourier sulle dispense.

- \* ingegnere e ricercatrice presso il dipartimento BEST del Politecnico di Milano
- \*\* architetto e ricercatore presso il dipartimento BEST del Politecnico di Milano