

## LA TRASMISSIONE DEL CALORE

### I MECCANISMI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

- **per contatto in assenza di moto relativo tra due corpi**; l'osservazione sperimentale del fenomeno segnala che le temperature dei due corpi cambiano nel tempo fino a quando entrambi raggiungono la stessa temperatura, il cui valore risulta intermedio tra quelli delle loro temperature iniziali;
- **per contatto in presenza di moto relativo tra un corpo ed un fluido**; si osserva che, dopo un certo tempo, il corpo assume la stessa temperatura del fluido;
- **senza contatto tra corpi separati dallo spazio vuoto**; anche in questo caso l'osservazione sperimentale del fenomeno evidenzia il fatto che diminuisce la temperatura dei corpi caldi (raffreddamento) e contemporaneamente aumenta la temperatura di quelli freddi (riscaldamento).

1

## LA TRASMISSIONE DEL CALORE

Lo scambio termico è un fenomeno complesso che, in generale, è costituito dalla sovrapposizione degli effetti di più fenomeni elementari ognuno dei quali può avere un ruolo prevalente o marginale secondo le proprietà del mezzo di trasmissione del calore.

I problemi di Trasmissione del Calore si distinguono tre diversi meccanismi di trasmissione detti rispettivamente:

- **Conduzione:**
- **Convezione**
- **Irraggiamento**

2

## Conduzione

- La conduzione termica, da un punto di vista macroscopico, si manifesta come scambio di energia termica all'interno di corpi o tra corpi *solidi, liquidi o gassosi, in contatto* tra di loro, *senza movimento macroscopico di materia*.
- Lo scambio termico è dovuto alla *cessione di energia cinetica molecolare (rotazionale e vibrazionale) da zone ad alta temperatura verso zone adiacenti a più bassa temperatura (meccanismo fononico)*.
- Nel caso particolare dei solidi metallici (conduttori elettrici), oltre a tale meccanismo si deve considerare anche la componente di energia trasportata grazie al moto degli elettroni (meccanismo elettronico)

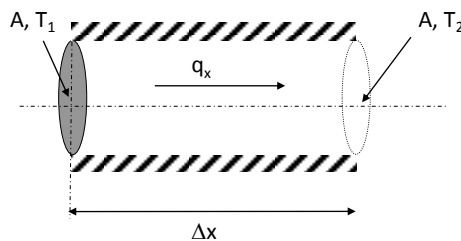
3

## Il postulato di Fourier

Barretta cilindrica di materiale omogeneo (struttura del materiale uniforme in ogni punto) ed isotropo (proprietà termofisiche indipendenti dalla direzione). Le estremità della barretta siano costituite da due superfici piane parallele a distanza  $\Delta x$ , mantenute a temperature diverse ed uniformi  $T_1$  e  $T_2$ :

$$T_1 > T_2 \quad T_1 - T_2 = \Delta T$$

Si consideri il corpo ben isolato lungo tutto l'involuppo in modo che il flusso termico abbia luogo solo lungo il suo asse.



4

La differenza di temperatura causa un flusso di potenza termica attraverso la sezione A. Sperimentalmente si trova che:

$$Q_x \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Ossia si osserva la proporzionalità tra flusso termico, differenza di temperatura, lunghezza della barra e superficie della sezione A. Tale proporzionalità è esprimibile tramite un fattore **detto conducibilità termica** del materiale  $\lambda$ . Tale coefficiente, che è una proprietà fisica del materiale, si misura in W/(m·K).

Allora la relazione precedente può essere riscritta come:

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

Questa relazione è nota come **postulato di Fourier**.

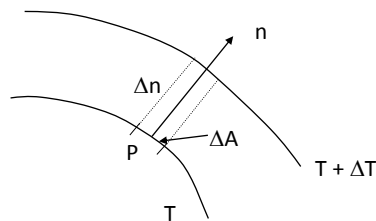
5

Nel corpo considerato si avranno delle superfici a temperatura costante che approssimativamente possono essere individuate nei piani perpendicolari all'asse del cilindro (superfici isoterme).

Si osserva quindi che il flusso termico si propaga in direzione perpendicolare alle superfici isoterme ossia, in termini matematici, lungo la direzione del vettore *gradiente di temperatura*:

$$\frac{\partial T}{\partial x}$$

Tale situazione ha una validità generale, ossia su di un corpo qualsiasi una volta individuata una superficie isoterma il flusso di calore si propagherà in ogni punto in direzione perpendicolare a tale superficie.



6

## Conducibilità o conduttività termica, $\lambda$

- $\lambda$  corrisponde ad una **proprietà del materiale considerato che viene detta conducibilità termica e si misura in [W/ (m K)]**
- Essa descrive il comportamento del materiale per quanto riguarda la sua **attitudine a trasmettere il calore**
- Il valore della *conducibilità termica*  $\lambda$  delle diverse sostanze varia entro limiti larghissimi, dipende dallo stato del materiale e può variare con la temperatura, la pressione e gli eventuali trattamenti termici che il materiale ha subito.
- In generale:

$$\lambda_{\text{gas}} < \lambda_{\text{liquidi}} < \lambda_{\text{solidi}}$$

$$\lambda_{\text{organici}} < \lambda_{\text{inorganici}}$$

$$\lambda_{\text{non metalli}} < \lambda_{\text{metalli}}$$

$$\lambda_{\text{solidi amorfi}} < \lambda_{\text{solidi cristallini}}$$

9

## Conduttività termica per alcuni materiali $\lambda$ [W/(m K)]

Acqua		
liquido	0,6	W/ (m K)
ghiaccio	1,8	W/ (m K)
<b>Legno</b>	0,15	W/ (m K)
<b>Balsa</b>	0,055	W/ (m K)
<b>Aria</b>	0,026	W/ (m K)
Materiali isolanti		
Polistirolo espanso	0,024	W/ (m K)
Sughero espanso	0,036	W/ (m K)
<b>Lana di vetro</b>	<b>0,04</b>	<b>W/ (m K)</b>
<b>Fibra di vetro</b>	<b>0,035</b>	<b>W/ (m K)</b>
Materiali da costruzione		
Calcestruzzo	0,8 ÷ 1,4	W/ (m K)
Mattoni di argilla	1,0 ÷ 1,2	W/ (m K)
Marmo	2,8	W/ (m K)
Sabbia	0,27	W/ (m K)
Terreno	0,52	W/ (m K)
<b>Alluminio</b>	200	W/ (m K)
<b>Vetro</b>	1,4	W/ (m K)
<b>Grafite</b>	1950	W/ (m K)]
<b>Diamante</b>	2300	W/ (m K)

10

## I materiali per l'isolamento termico

- Per isolante si intende un materiale caratterizzato da una **ridotta capacità di conduzione del calore**, convenzionalmente con coefficiente di conducibilità termica,  $\lambda$ , **inferiore a 0.12 W/(m K)**.
- L'isolante perfetto dovrebbe avere conducibilità termica nulla, ovviamente esso non esiste, ma si hanno materiali con elevatissima resistenza alla propagazione del calore e con valori di conducibilità molto bassi.
- Un materiale isolante deve possedere oltre ad un elevato potere isolante altre caratteristiche che lo rendono adatto all'uso in specifici ambiti

11

## Caratteristiche di un materiale isolante per l'edilizia

- durabilità, deve mantenere invariate nel tempo le sue caratteristiche;
- capacità di resistere a sbalzi termici senza alterazioni strutturali;
- bassa permeabilità al vapore d'acqua
- inattaccabilità da parte di batteri e insetti e imputrescibilità
- inerzia all'azione dell'acqua e basso assorbimento di acqua
- incombustibilità o almeno autoestinguibilità
- resistenza meccanica per garantire la permanenza in posizione di posa e se sottoposti a carichi buona resistenza a compressione
- assenza di cedimenti sensibili sotto l'azione del peso proprio e di vibrazioni
- facilità di lavorazione

12

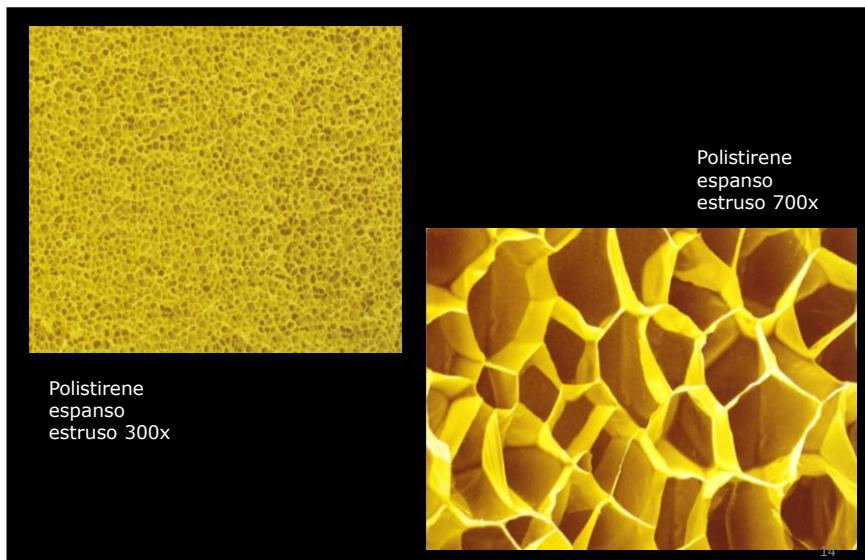
## Caratteristiche di un materiale isolante per l'edilizia

Le principali caratteristiche di questi materiali e di altri materiali edilizi, vengono riportate nella **norma UNI 10351**. Per ogni materiale si riporta:

- **densità** del materiale secco  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] legata a peso del materiale e a resistenza a compressione;
- **permeabilità al vapore** acqueo [kg/(msPa)] determinata nell'intervallo di umidità 0-50% e nell'intervallo 50-90% (rispettivamente campo asciutto e campo umido);
- **conduttività termica** indicativa di riferimento  $\lambda_m$  [W/(mK)];
- **maggiorazione percentuale**  $m$  [%]: tiene conto del contenuto di umidità in condizioni medie di esercizio, dell'invecchiamento, della manipolazione e dell'installazione;
- **conduttività termica utile di calcolo**  $\lambda$  [W/(mK)]: ricavata applicando la maggiorazione  $m$  alla conduttività di riferimento  $\lambda_m$ .

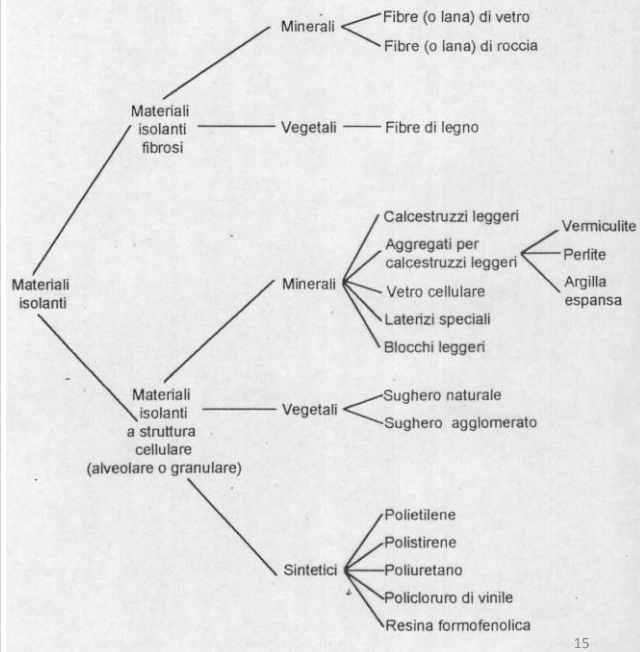
13

## Caratteristiche di un materiale isolante per l'edilizia



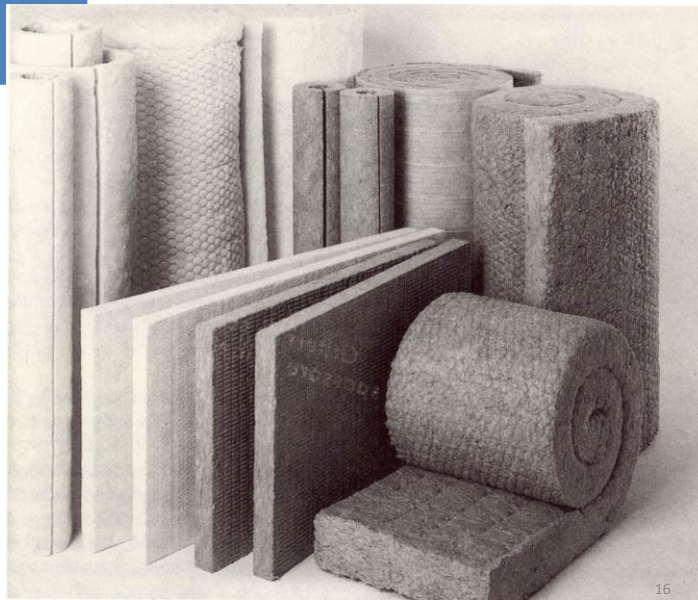
14

## Classi di materiali isolanti



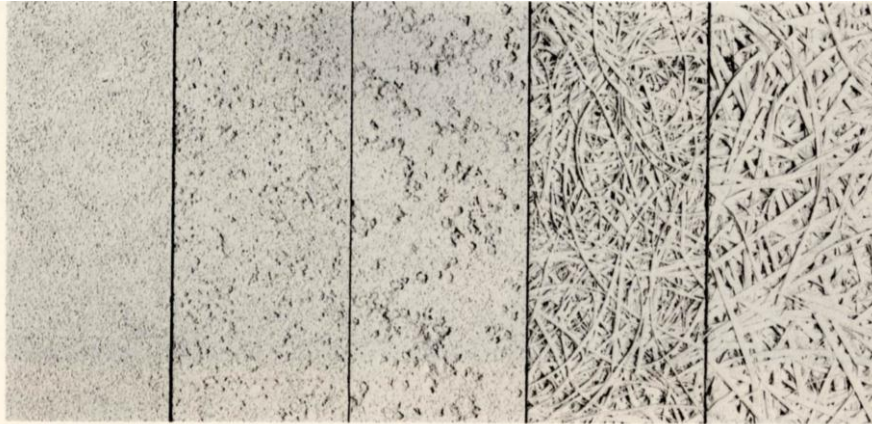
15

## La lana di vetro



16

## Legno mineralizzato



17

## Il sughero



18

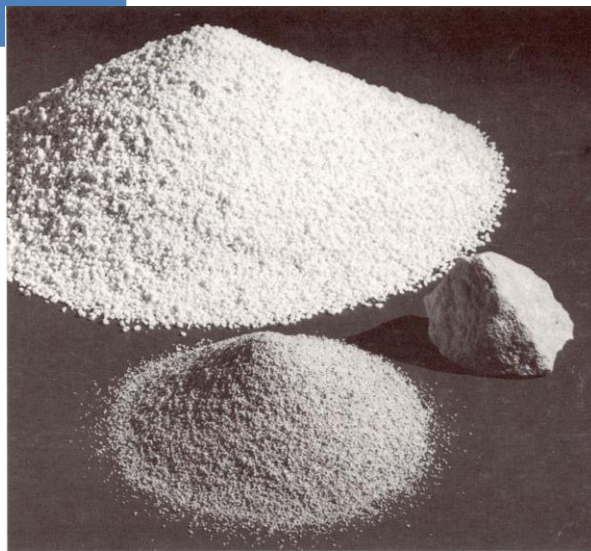


vermiculite



argilla espansa

perlite





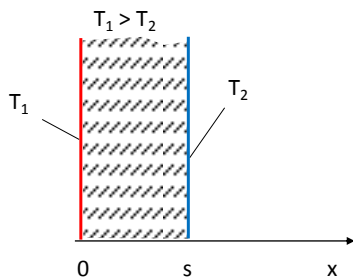


Materiale	$\lambda$ [W/(m K)]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Lana di roccia	0,035 – 0,05	20 – 140
Lana di vetro	0,035 – 0,05	20 – 140
Perlite espansa	0,05 -0,055	90 - 100
Vetro cellulare	0,045 – 0,06	125 - 150
Argilla espansa	0,130 – 0,25	400 - 1800
Fibra di cellulosa	0,045	35 – 60
Sughero espanso	0,04 – 0,05	120
Fibra di legno (pannello)	0,050 -0,06	130 - 270
Fibra di legno mineralizzato	0,09	360 - 570
Paglia e giunco	0,06 – 0,130	-
Lana di pecora	0,04	-
EPS pol. Espanso	0,035 – 0,04	15 – 30
XPS pol. estruso	0,030 - 0,04	20 - 50
PUR poliuretano	0,020 – 0,035	30 - 35

25

### ***Strato piano semplice: applicazione della Legge di Fourier per determinare il flusso termico attraverso lo strato***

Il flusso termico specifico  $q$ , per la Legge di Fourier, è valutabile da:



$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{\lambda}{s} \cdot (T_1 - T_2)$$

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{s}{\lambda}} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{t,cond}} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

32

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{s}{\lambda}} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{t,cond}} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$R_{t,cond}$  è chiamata indicata, in analogia con la legge di OHM per le reti resistive elettriche, la **resistenza termica di conduzione**:

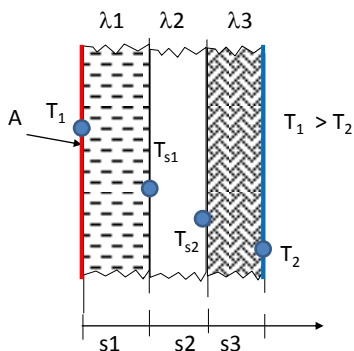
$$R_{t,cond} = \frac{s}{\lambda} \quad [K m^2 / W]$$

- Minore risulta la conducibilità termica del materiale  $\lambda$ , maggiore risulta la resistenza termica dello strato.
- Maggiore risulta lo spessore dello strato maggiore risulta la resistenza termica dello strato.

33

### Strato piano multiplo

sistema costituito da più strati piani di area A



Ipotesi:

- regime stazionario, senza generazione interna di calore
- strati di spessore  $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$  [m], con conducibilità  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$
- temperature  $T_1$  e  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ) sulle due facce estreme;

Non essendovi generazione interna di energia termica, il flusso termico  $q$  che attraversa i singoli strati piani è lo stesso e si ha:

$$q = \frac{(T_1 - T_{s1})}{\frac{s_1}{\lambda_1}} = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{\frac{s_2}{\lambda_2}} = \frac{(T_{s2} - T_2)}{\frac{s_3}{\lambda_3}} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

34

Sommando membro a membro ciascun termine si ha:

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{\sum_{i=1}^3 \frac{s_i}{\lambda_i}} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{totale}} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (2)$$

in cui la resistenza totale di conduzione dei tre (o N) strati è calcolabile come:

$$R_{totale} = \sum_{i=1}^3 \frac{s_i}{\lambda_i} \quad \left[ \frac{m^2 K}{W} \right]$$

Di utile applicazione è la determinazione delle temperature di interfaccia  $T_{s1}$  e  $T_{s2}$ .

Facendo il rapporto tra le due relazioni (1) e (2) si ricava  $T_{s1}$ :

$$\frac{(T_1 - T_{s1})}{(T_1 - T_2)} = \frac{\frac{s_1}{\lambda_1}}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3}} = \frac{R_{t,cond,1}}{R_{totale}}$$

$$(T_1 - T_{s1}) = (T_1 - T_2) \cdot \frac{\frac{s_1}{\lambda_1}}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3}}$$

$$T_{s1} = T_1 - \left[ (T_1 - T_2) \cdot \frac{\frac{s_1}{\lambda_1}}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3}} \right]$$

E analogamente:

$$T_{s2} = T_{s1} - \left[ (T_1 - T_2) \cdot \frac{\frac{s_2}{\lambda_2}}{\frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3}} \right]$$

In generale, per ciascuno strati i-esimo, si può ricavare la relazione:

$$\frac{\Delta T_i}{\Delta T_{tot}} = \frac{R_{t,cond,i}}{R_{totale}}$$

- se la resistenza di un singolo strato è elevata (ad esempio se il materiale è un isolante), la differenza tra le temperature alle estremità dello strato risulta elevata;
- Al contrario là dove la resistenza termica di conduzione è bassa, la differenza tra le temperature superficiali è ridotta.

