

# **CENNI DI FISICA TECNICA**

## **1.1 Trasmissione del calore**

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 , in assenza di altri fenomeni.

La trasmissione del calore può avvenire in tre diversi modi: per conduzione, per convezione e per irraggiamento.

Per quanto nei tre casi l'effetto finale sia uguale, cioè porti sempre ad un aumento dell'energia totale del corpo che riceve calore a spese di una diminuzione dell'energia del corpo che lo cede, questi fenomeni sono nettamente diversi tra di loro.

Nella **conduzione** attraverso i solidi la trasmissione del calore è in parte causata dalle interazioni tra molecole adiacenti, oscillanti nell'intorno della loro posizione media nel reticolo cristallino ed in parte è dovuta a scambi radiativi. Nei fluidi invece le singole molecole possono compiere

notevoli spostamenti, entrando anche in collisione con le altre molecole, ed a questi processi elementari è dovuta la propagazione termica per conduzione nel fluido.

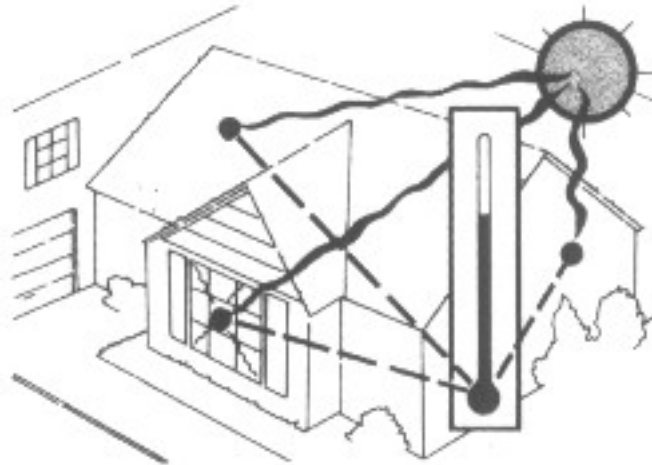


Nella **convezione**, caratteristica dei liquidi e dei gas, la trasmissione del calore avviene invece attraverso un movimento macroscopico di alcune parti della massa del fluido rispetto ad altre, cioè si ha trasporto di materia. La convezione può essere naturale o forzata: quest'ultima si ha quando si attiva, con ventilatori o pompe, il moto dei fluidi.



## Nell'irraggiamento

infine la trasmissione del calore avviene sotto forma di radiazione elettromagnetica indipendentemente dalla presenza di molecole. Si tratta cioè di una trasmissione di energia dello stesso tipo dell'energia luminosa, che quindi può propagarsi anche nel vuoto.



## 1.2 Conduttività termica, Resistenza termica e Trasmittanza termica

Da punto di vista termico ogni materiale è caratterizzato da un "coefficiente di conduttività", rappresentato dalla lettera greca  $\lambda$ .

Il coefficiente  $\lambda$  serve per comprendere in quale proporzione il materiale conduce il calore: i "materiali isolanti", che conducono male il calore, sono caratterizzati da valori di  $\lambda$  molto bassi, al contrario invece i materiali cosiddetti conduttori.

Ciò premesso e con riferimento a quanto precisato al paragrafo 1.1, il termine  $\lambda$ , per un materiale isolante, può essere espresso come somma di un termine " $\lambda_c$ " e di un termine " $\lambda_r$ ".

" $\lambda_c$ " è dovuto alla conduzione nella matrice solida dell'isolante (approssimativamente proporzionale alla massa

volumica del materiale stesso) e alla conduttività del gas racchiuso, che costituisce il contributo conduttivo preponderante.

" $l_r$ " rappresenta il contributo dato dall'irraggiamento e dovuto agli scambi radiativi della matrice solida.

Generalmente il contributo fornito dalla convezione della fase gassosa è trascurabile, in quanto il gas si trova racchiuso in celle di piccolissime dimensioni, all'interno delle quali i moti convettivi sono praticamente impediti.

Consideriamo ora una parete omogenea, a facce piane e parallele, di spessore  $s$  che separa due ambienti a differente temperatura: per i principi fisici sopra esposti si avrà un trasferimento di calore dall'ambiente più caldo a quello più freddo.

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 conduttività termica del materiale costituente la parete stessa e inversamente proporzionale al suo spessore  $s$ .

In formula:

(1)

$$q = \frac{\lambda}{s} \Delta T \quad [ \text{W/m}^2 ]$$

Ponendo nella formula (1)  $\Delta T = 1\text{K}$ ,  $s = 1\text{m}$ , si ha  $q = \lambda$ , da cui deriva la seguente definizione di  $\lambda$ .

La **conduttività termica** di un materiale è definita come:

**Il flusso di calore, nell'unità di tempo e per metro quadrato, che si determina quando esiste una differenza di temperatura di un grado K tra una faccia e l'altra e per lo spessore di un metro del materiale stesso.**

Il coefficiente  $\lambda$  si esprime dunque in **Wm/m<sup>2</sup>K** e dopo semplificazione in **W/mK**.

Nel sistema tecnico  $\lambda$  era espresso in kcal/mh°C e, tenuto conto dell'equivalenza tra le unità di misura della potenza (1kcal/h = 1.16 W), si deduce che i valori di  $\lambda$  nel Sistema Internazionale (S.I.) sono superiori di circa il 16% ai valori forniti dal precedente sistema tecnico.

La definizione fornita per la conduttività relativa ad una lastra di materiale omogeneo, può essere usata per caratterizzare anche materiali non omogenei, ma composti da elementi le cui dimensioni medie siano inferiori di uno o più ordini di grandezza allo spessore della lastra stessa e omogeneamente mescolati tra di loro.

Esempi tipici sono i calcestruzzi, i materiali isolanti cellulari e quelli in fibra minerale.

In questo caso si parla di *conduttività termica apparente* poiché in realtà la trasmissione del calore, specialmente se uno dei componenti del materiale isolante è gassoso, come nei materiali fibrosi, avviene in maniera più complessa, in quanto intervengono anche gli altri modi di trasmissione del calore.

L'espressione (1) sopra riportata dice inoltre che l'andamento della temperatura all'interno dello spessore del divisorio è lineare se i salti di temperatura sono modesti e la conduttività termica può, in tal caso, essere considerata indipendente dalla temperatura stessa.

La conduttività termica dei materiali si misura in laboratorio e le normative tecniche di riferimento per la determinazione del suddetto coefficiente sono la UNI 7745 (Metodo della piastra calda) e la UNI 7891 (Metodo dei termoflussimetri).

Nella formula (1) del flusso di calore che attraversa una parete omogenea compaiono la conduttività termica  $\lambda$  del materiale costituente il divisorio e lo spessore  $s$  del divisorio stesso.

Ora, poiché la resistenza termica di una parete omogenea è data proprio dal rapporto  $s/\lambda$ , risulta evidente che per ridurre il flusso di calore occorre intervenire su detta resistenza, incrementandone il valore.

Per migliorare la resistenza termica di una parete si può agire o sullo spessore, aumentandolo, oppure sulla conduttività termica del materiale scegliendo un materiale con un adeguato, ovvero basso, valore di  $\lambda$ .

Le unità di misura della resistenza termica sono  $m^2K/W$  oppure, utilizzando il vecchio sistema tecnico,  $m^2h^\circ C/kcal$ .

Prima di esprimere la resistenza termica globale di una parete multistrato, vediamo ora di introdurre il significato di "coefficiente di scambio termico superficiale".

La trasmissione del calore tra due ambienti dipende, oltre che dal fenomeno di conduzione attraverso il divisorio, dalle modalità di trasferimento del calore dall'aria dell'ambiente interno, a temperatura maggiore, verso la superficie interna della parete e dalla superficie esterna della stessa verso l'ambiente esterno, supposto a temperatura minore.

Le suddette modalità avvengono secondo i fenomeni di convezione e di irraggiamento già trattati.

Per l'insieme degli effetti della convezione e dell'irraggiamento, la quantità di calore  $Q$  che passa dall'ambiente interno alla superficie interna della parete è direttamente proporzionale alla superficie stessa ( $m^2$ ), al salto di temperatura tra aria e superficie ( $^\circ C$ ) e ad un coefficiente di scambio termico liminare interno " $h_i$ " ( $W/m^2K$ ), 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 dal divisorio all'ambiente esterno, si avrà il coefficiente di scambio termico liminare esterno " $h_e$ ".

In edilizia, **hi** si riferisce ad ambienti chiusi, dove generalmente sono modesti i moti convettivi dell'aria (non è questo il caso, ad esempio, degli impianti aeraulici), **he** agli ambienti esterni dove i moti dovuti alla convezione sono più forti.

Sempre in edilizia, mentre nella precedente normativa tecnica i valori di **hi** e **he** variavano in funzione della giacitura della parete (se orizzontale o verticale) e della direzione del flusso di calore (se ascendente o discendente), recentemente gli stessi sono stati codificati dalla norma UNI-CTI 10344-93 e, per strutture opache, valgono:

$$- \mathbf{h_i} = 7.7 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$- \mathbf{h_e} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Tornando all'esempio del divisorio, se questo risulta costituito da più strati in serie, ognuno caratterizzato da un proprio spessore  $s$  e da una propria conduttività termica  $l$ , la resistenza termica complessiva del divisorio è data dalla somma dei contributi dovuti ai coefficienti liminari interno ed esterno e dei rapporti  $s/l$  di ogni singolo strato.

In formule, avremo che:

**(2)**

$$\mathbf{R} = 1/h_i + \sum s/\sum s/l + 1/h_e \quad [\text{m}^2\text{K/W}]$$

Non ci resta ora che definire un ultimo termine, ricorrente nella pratica della progettazione termica e cioè la *trasmissione termica K*.

Per trasmissione termica si intende l'inverso della resistenza termica globale **R**, ossia:

**(3)**

$$K = 1/R$$

$$[W/m^2K]$$

Tale parametro viene spesso definito anche come "coefficiente di trasmissione termica superficiale" ed è strettamente legato al complesso di condizioni emergenti dalla natura, dallo stato dei due fluidi e delle pareti circostanti, così come dalla natura e dagli spessori costituenti la parete.

### 1.3 La conduttività termica dei materiali isolanti a temperature superiori a quella ambiente

La risoluzione dei vari problemi connessi con l'isolamento termico delle condotte, delle tubazioni e degli apparecchi degli impianti aereali, con temperature a volte più elevate di quella ambiente, richiede **la conoscenza dei valori delle conduttività termiche degli isolanti impiegati nelle effettive condizioni di esercizio.**

In particolare, occorre poter valutare con sufficiente precisione i valori della conduttività dell'isolante in funzione delle temperature delle sue due superfici, di norma definite rispettivamente *faccia calda* e *faccia fredda*.

Per raggiungere il suddetto obiettivo, si parte dai valori della conduttività determinata presso laboratori autorizzati, ponendo il materiale isolante tra due piastre (una calda e l'altra fredda) di una speciale apparecchiatura e adottando opportune modalità in esame.

Per i materiali che si presentano sotto forma di manicotti e coppelle l'apparecchiatura suddetta non è evidentemente utilizzabile ed in tal caso si fa ricorso ad impianti che utilizzano come superficie calda quella di tubazioni di vario diametro sulle quali viene posto il materiale in prova.

Per determinare la variazione della conduttività al variare della temperatura di prova, le misure vengono effettuate facendo variare la temperatura della superficie calda in modo da coprire il *range* di tale parametro nel quale si prevede di utilizzare l' isolante in prova.

La temperatura della piastra fredda ha invece di norma valori non lontani da quelli dell' ambiente (generalmente tra 10 e 50 °C).

Per dedurre dai dati sperimentali la conduttività per tutte le possibili combinazioni di temperatura della faccia calda ***T<sub>fc</sub>*** e di quella fredda ***T<sub>fe</sub>***, occorre adottare particolari e complessi algoritmi.

Ricordiamo ora che negli impianti aeraulici, destinati alla termoventilazione ed al condizionamento, interessa conoscere quella che potremmo definire la conduttività termica in *condizioni normali*, cioè con ***T<sub>fe</sub>*** di poco superiore alla temperatura dell' ambiente ***T<sub>e</sub>***

Il termine *condizioni normali* sta a significare che l' isolante è praticamente in contatto con l' ambiente ed è dimensionato in modo da avere una temperatura della faccia fredda ***T<sub>fe</sub>*** molto prossima a quella ***T<sub>e</sub>*** dell' ambiente stesso.

La presenza di sottili strati di finitura molto conduttori (quali ad esempio carta - alluminio retinata) non influenza in modo rilevante la temperatura ***T<sub>fe</sub>***.

Di norma, nei certificati di prova e nella documentazione tecnica dei produttori, i valori della conduttività termica sono dati sotto forma di tabelle (vedi ad esempio tabella 1) oppure di grafici (fig. 2) *in funzione della temperatura media ***T<sub>m</sub>*** data da:*

(4)

$$T_m = \frac{T_{fc} + T_{fe}}{2} \quad [K]$$

TEMPERATURA LIMITE DI IMPIEGO (° C)	TEMPERATURA MEDIA DI MISURA (° C)	CONDUTTIVITA' TERMICA (W/mK)
<b>125</b>	<b>25</b>	<b>0.04</b>
<b>125</b>	<b>50</b>	<b>0.047</b>

**Tab 1.1 - Esempio di classificazione dei valori di conduttività termica**

Ad esempio per l' isolante di cui sopra, abbiamo per la (4) e per

$$T_{fc} = 80 \text{ °C e } T_{fe} = 20 \text{ °C} :$$

$$T_m = \frac{80+20}{2} = 50 \text{ °C}$$

$$\text{e quindi } \lambda = 0,047 \text{ [ W/m K]}$$

Per temperature medie comprese tra quelle riportate dai certificati di prova, è ammessa l'interpolazione lineare, mai l'estrapolazione.

Per completezza di informazione va detto che nelle applicazioni industriali dell' isolamento termico, la temperatura della faccia fredda **T<sub>fe</sub>** può risultare molto più elevata di quella ambiente nel caso di superfici da coibentare ad alta temperatura e spessori isolanti relativamente esigui.

Inoltre la temperatura **T<sub>fe</sub>** può risultare molto elevata anche quando la superficie più fredda dell' isolante risulti esposta alla radiazione termica di sorgenti ad elevata temperatura.

Esistono molti metodi di calcolo per passare dai valori della conduttività termica, dedotti dai dati sperimentali dei certificati, a quelli del materiale *in condizioni gravose* in cui cioè la temperatura **Tfe** della faccia fredda è nettamente superiore ai 100 °C.

Al di sotto di tale temperatura, l'errore che si commette *in condizioni normali* nella valutazione delle potenze termiche disperse è di norma inferiore al 5% e pertanto non si ritiene utile riportare i metodi di calcolo citati, poiché temperature superficiali **Tfe** superiori a 100 °C non interessano gli impianti aerulici destinati alla termoventilazione o al condizionamento.

In relazione a quanto sopra possiamo trarre le conclusioni qui di seguito riportate.

I produttori di materiali isolanti per alte temperature forniscono di norma, sotto forma di tabelle, di grafico o di polinomio di vario grado, i valori della conduttività termica di questi manufatti in funzione della temperatura media **Tm**, così come risulta dai certificati di prova.

In questi documenti, partendo dai dati sperimentali, si dà  $\lambda = f(T_m)$  nell'ipotesi di condizioni *normali*, cioè ipotizzando la temperatura della faccia fredda **Tfe** pari a circa 20 - 50 °C.

Alcune applicazioni, che potremmo definire *gravose*, richiedono invece la determinazione della conduttività con **Tfe** nettamente superiore a 100°C.

Per condizioni *normali*, cioè con temperatura della faccia fredda **Tfe** di circa 20 - 50 °C, la conduttività termica può essere invece calcolata direttamente per interpolazione lineare, *ma mai per estrapolazione*, partendo dai valori forniti dal produttore o dal certificato di prova.

Le condotte per termoventilazione e aria condizionata rientrano nelle "condizioni normali".

## 1.4 La conduttività termica nella normativa

Inizieremo col ricordare che in sede CEN verranno, in una futura norma, definiti i seguenti importantissimi parametri:

❶ *conduttività termica di laboratorio*, che sulla scorta di controlli statistici della qualità, deve essere garantita dal produttore.

Questo valore viene misurato in laboratorio ed è in genere espresso in funzione delle temperature medie ad intervalli di 20, 50 o 100 K.

La conduttività può essere, come precedentemente precisato, effettuata sia su superfici piane che cilindriche ed è espressa in W/m K.

❷ *conduttività termica pratica*, che tiene cioè conto delle temperature di esercizio sia normali che gravose e non solo della temperatura media.

I relativi valori sono espressi in W/m K.

❸ *conduttività termica di progetto* che deve essere garantita dall' installatore del materiale isolante, in base ai due precedenti valori della conduttività ed in base al sistema di posa utilizzato, cioè valutando accuratamente l'influenza

che hanno i ponti termici sul risultato finale.

I relativi valori sono espressi in W/m K.

In Italia la nuova normativa in vigore sull'isolamento termico delle reti di distribuzione del calore negli impianti termici (DPR 26 Agosto 1993 n. 412) fa riferimento alla "conduttività termica utile degli isolanti", parametro al quale occorre fare ricorso per determinare gli spessori isolanti degli impianti aeraulici (vedi Capitolo 2 paragrafo 2.4)

## 1.5 Ponti termici

I supporti delle condotte, eventuali anelli distanziatori, ecc possono essere considerati dei "ponti termici" che non possono essere calcolati con metodi semplici.

Per le condotte degli impianti aeraulici, si può valutare l'influenza dei ponti termici, maggiorando *la conduttività termica pratica* dell'isolante utilizzato (vedi Capitolo 2 paragrafo 2.2.2)

## 1.6 Temperature limiti di esercizio

Occorre in primo luogo distinguere tra :

 temperatura di utilizzo in regime continuo

### temperatura di utilizzo di punta

Per i vari materiali isolanti la determinazione dei due parametri suddetti può fare riferimento a specifiche norme DIN e precisamente:

### temperatura di utilizzo in regime continuo

La norma DIN da prendere in considerazione è la 52271 b in base alla quale occorre stabilizzare ad una determinata temperatura il lato caldo dell' isolante per 24 ore.

La temperatura di utilizzo per il regime continuo è quella che provoca un cedimento del 5% dello spessore iniziale dopo 24 ore, essendo il materiale isolante sottoposto, contemporaneamente al trattamento termico, ad un carico di 1 kPa (100 kg/m<sup>2</sup>).

### temperatura di utilizzo di punta

La temperatura di utilizzo di punta è invece determinata, in base alla norma DIN 52271 b, provocando un aumento della temperatura del lato caldo dell' isolante di 5 °C ogni minuto, partendo dalla temperatura ambiente e sino ad avere il 5 % di cedimento dello spessore iniziale del prodotto, sempre sottoposto, contemporaneamente al trattamento termico, ad un carico di 1 kPa (100 kg/m<sup>2</sup>)

Per i prodotti rivestiti, la temperatura superficiale **T<sub>fe</sub>** non deve superare gli 80 °C, temperatura che corrisponde a quella massima sopportabile dalla maggior parte delle colle utilizzate per fissare i rivestimenti.

Per temperature molto elevate infine, occorre valutare per alcuni coibenti anche il fenomeno della esotermicità che provoca un aumento della temperatura all' interno degli isolanti al momento dell' avvio dell' impianto ad una temperatura molto più elevata di quella di esercizio.

Il fenomeno è dovuto alla combustione dei componenti di natura organica di alcuni coibenti, combustione che, producendo calore, innalza la temperatura all' interno dello

strato isolante fino a valori molto superiori a quelli della superficie coibentata, con conseguenti alterazioni del manufatto.

**E' bene chiarire che il fenomeno descritto può interessare solo range di temperature molto più elevate (cioè maggiori dei 250 °C ) di quelle di esercizio degli impianti aeraulici di nostro interesse.**

