

## LA TRASMISSIONE DEL CALORE

Il **calore** è una forma di energia trasferita tra corpi a temperatura differente. Non è un fluido misterioso contenuto nei corpi ma energia in transito.

Possiamo interpretare i fenomeni termici attraverso le conoscenze sulla struttura atomica e particellare della materia: i corpi possiedono un'energia cinetica distribuita tra le molecole o atomi che lo compongono; questo movimento casuale e' genericamente indicato come **agitazione termica**, e determina la temperatura del corpo stesso. Riscaldare un corpo vuol dire aumentare l'energia cinetica media (movimento) dei suoi atomi o delle sue molecole; raffreddarlo significa ridurla.

La somma delle energie cinetiche degli atomi e delle molecole e di quelle dei loro rispettivi legami interatomici o intermolecolari costituisce la cosiddetta **energia termica**, che è direttamente trasferibile sotto forma di calore.

L'energia termica di un sistema può variare anche in seguito a processi che comportano la conversione di energia interna (potenziale) dei legami chimici o nucleari in energia di agitazione termica o viceversa: questo avviene, ad esempio, durante le reazioni chimiche o durante le reazioni nucleari. Oltre alla dilatazione termica, gli effetti più notevoli del trasferimento di calore sono l'innalzamento della temperatura ed i cambiamenti di stato.

Essendo una forma di energia, il calore, nel SI, viene misurato in **joule** (J). Per lungo tempo è stata però utilizzata come unità di misura la **caloria** (cal), definita come la quantità di calore necessaria a portare la temperatura di 1 g di acqua distillata da 14.5°C a 15.5°C (a pressione standard). Il fattore di conversione tra le due unità di misura è il seguente:

$$1 \text{ cal} = 4.1855 \text{ J}$$

$$1 \text{ J} = 0.2388 \text{ cal}$$

Riepiloghiamo infine le principali grandezze che definiscono **quantità di calore**:

- **calore specifico**: quantità di calore da fornire all'unità di massa di un corpo per variare di 1°C la sua temperatura. Per i gas, sappiamo che il calore specifico ha un valore diverso se misurato a pressione costante ( $c_p$ ) o a volume costante ( $c_v$ ). Il prodotto tra calore specifico di un corpo e massa del corpo stesso prende il nome di **capacità termica** del corpo;
- **calore latente**: quantità di calore da fornire all'unità di massa di un corpo dall'inizio alla fine di un suo passaggio di stato (fusione, evaporazione/ebollizione, sublimazione). E' anche la quantità di calore estraibile dall'unità di massa durante il passaggio di stato opposto: ad esempio, il calore latente di fusione ha lo stesso valore assoluto (mentre il segno è opposto) del calore latente di solidificazione;
- **calore di reazione**: quantità di calore sviluppata o assorbita durante una reazione chimica. Esso ha un valore diverso se misurato a pressione costante o a volume costante. Un caso particolare è il **calore di combustione**, che è la quantità di calore sviluppata dalla combustione completa dell'unità di massa di una sostanza.

## PREMESSA ALLA TRASMISSIONE DI CALORE

La **trasmissione di calore** avviene quando esiste un gradiente di temperatura all'interno di un sistema oppure quando due sistemi a temperatura diversa vengono posti in contatto. La grandezza in transito è il **calore** che come il lavoro, produce una variazione dell'energia interna di un sistema.

La branca della scienza che si occupa delle relazioni tra il calore e le altre forme di energia è la **termodinamica**, basata su due principi:

- il **primo principio della termodinamica** afferma sostanzialmente che l'energia non può essere creata né distrutta, ma solo trasformata da una forma all'altra: questo principio governa quantitativamente ogni trasformazione di energia, ma non pone alcuna restrizione al verso della trasformazione;
- il **secondo principio della termodinamica** afferma invece che non è possibile alcuna trasformazione il cui unico risultato sia il passaggio di calore da una regione a temperatura minore verso una regione a temperatura maggiore.

Tutti i processi di trasmissione del calore comportano lo scambio e la conversione di energia e devono quindi obbedire al primo ed al secondo principio della termodinamica.

### Il limite della termodinamica classica

La termodinamica classica non si occupa dei dettagli di un processo, ma degli stati di equilibrio e delle loro relazioni; i procedimenti di analisi usati in termodinamica sono puramente ideali, utili solo per dare informazioni sugli stati di equilibrio. Facciamo un esempio concreto: da un punto di vista termodinamico, la quantità di calore scambiata durante un processo è semplicemente uguale alla differenza tra la variazione di energia del sistema ed il lavoro compiuto (primo principio della termodinamica). E' evidente come, in questo tipo di analisi, non si consideri né il meccanismo di scambio termico né il tempo da esso richiesto. Il motivo è uno solo:

l'assenza del **tempo** tra le variabili.

Da un punto di vista pratico-ingegneristico, il problema principale, in presenza di trasmissione di calore, è la determinazione della **potenza termica trasmessa** per una determinata differenza di temperatura  $\Delta T$ : infatti, ad esempio, le dimensioni delle caldaie dipendono non solo dalla quantità di calore scambiata, ma principalmente dalla velocità con la quale il calore deve essere scambiato nelle condizioni assegnate. E' dunque fondamentale la variabile **tempo**.

Il corretto funzionamento dei componenti di un impianto dipende spesso dalla possibilità di raffreddare alcune parti metalliche, asportando continuamente e velocemente calore dalla superficie; ciò mostra che in quasi tutti i campi dell'ingegneria sia incontrano problemi di scambio termico che non possono essere risolti dalla sola termodinamica, ma richiedono uno studio basato sulla trasmissione del calore.

Nella trasmissione del calore, poiché è molto complesso descrivere esattamente i fenomeni fisici, occorre fare alcune approssimazioni per tradurre un problema in una equazione risolvibile.

## MODALITÀ DI TRASMISSIONE DEL CALORE

Lo “**scambio termico**” può essere semplicemente definito come la trasmissione di energia da una regione ad un'altra, dovuta ad una differenza di temperatura. Lo scambio termico non è regolato da un'unica relazione, ma piuttosto da una combinazione di diverse leggi fisiche indipendenti.

In genere, consideriamo tre differenti modalità di trasmissione del calore:

- **conduzione**
- **irraggiamento**
- **convezione**

Solo i primi due dovrebbero essere classificati come processi di scambio termico, in quanto dipendono dalla semplice esistenza di una differenza di temperatura. La convezione, invece, dipende anche dal trasporto di materia: d'altra parte, dato che la convezione comporta comunque la trasmissione di energia da regioni a temperatura superiore verso regioni a temperatura inferiore, si usa l'espressione “scambio termico per convezione”. Nella maggior parte dei fenomeni naturali, il calore fluisce secondo più meccanismi contemporaneamente. E' dunque molto importante saper valutare l'importanza relativa delle varie forme di trasmissione del calore, poiché nella pratica, quando un meccanismo è predominante, possono effettuarsi utili approssimazioni trascurando gli altri.

### Conduzione

La **conduzione** è un processo mediante il quale il calore fluisce da una regione a temperatura maggiore verso una regione a temperatura minore attraverso un solo mezzo (solido, liquido o aeriforme) o attraverso mezzi diversi posti a diretto contatto fisico. Nella conduzione, l'energia si trasmette per contatto diretto tra le molecole, senza che queste si spostino sensibilmente (moto oscillatorio).

Quando le molecole di una regione acquistano energia cinetica media maggiore di quella delle molecole di una regione adiacente, le molecole ad energia maggiore cedono parte di questa energia alle molecole della regione a temperatura minore.

Uno scambio di energia di questo tipo può avvenire in vari modi: ad esempio, nei fluidi avviene per urto elastico, mentre nei metalli avviene per diffusione (cioè movimento) degli elettroni più veloci da regioni a temperatura maggiore verso regioni a temperatura minore. Ad ogni modo, a prescindere dall'esatto meccanismo, l'effetto rilevabile della conduzione è sempre un livellamento della temperatura. Ovviamente, se, con addizioni o sottrazioni di calore in punti diversi, vengono mantenute delle differenze di temperatura, si stabilisce un flusso continuo di calore dalla regione più calda a quella più fredda. La conduzione è il solo meccanismo con cui il calore può propagarsi nei solidi opachi. Esso è anche importante nei fluidi, ma, nei mezzi non solidi in generale, essa è solitamente associata alla convezione e, in alcuni casi, anche all'irraggiamento.

### Irraggiamento

L'**irraggiamento** è un processo mediante il quale il calore fluisce da un corpo a temperatura maggiore verso un corpo a temperatura minore, quando i due corpi non sono a contatto, anche se tra di essi c'è il vuoto. Notiamo subito una differenza con la conduzione: in quel caso c'era il contatto diretto tra i corpi a diversa temperatura, mentre in questo caso non c'è contatto, ma esiste un mezzo di separazione (anche il vuoto). E' bene sottolineare che il

termine irraggiamento si riferisce, in generale, ad un qualunque fenomeno di propagazione di onde elettromagnetiche. Dal punto di vista dello scambio termico, interessano invece solo quei fenomeni dipendenti dalla temperatura, i quali consentono il trasporto di energia attraverso un mezzo trasparente o attraverso il vuoto. L'energia così scambiata prende il nome di **calore irraggiato**. Tutti i corpi emettono continuamente calore per irraggiamento e l'intensità dell'emissione dipende dalla temperatura e dalla natura della superficie. L'energia radiante viaggia alla velocità della luce e presenta una fenomenologia simile a quella delle radiazioni luminose: infatti, secondo la **teoria elettromagnetica**, la luce e l'irraggiamento termico differiscono solo per le rispettive lunghezze d'onda. Il calore irraggiato è emesso da un corpo sotto forma di quantità discrete di energia dette **quanti**. La trasmissione del calore irraggiato è simile alla propagazione della luce e può essere perciò descritta mediante la **teoria delle onde**; quando le radiazioni incontrano un altro corpo, la loro energia resta assorbita in prossimità della superficie. Lo scambio termico per irraggiamento diventa sempre più importante al crescere della temperatura di un corpo: nei problemi ingegneristici in cui le temperature siano prossime a quella atmosferica, l'irraggiamento può spesso essere trascurato.

### **Convezione**

La **convezione** è un processo di trasporto di energia che avviene mediante l'azione combinata della conduzione, dell'accumulo di energia e del mescolamento. Si tratta del più importante meccanismo di scambio di energia tra una superficie solida ed un liquido o un gas (in generale, quindi, un fluido).

La **trasmissione di energia per convezione** da una superficie, la cui temperatura sia superiore a quella del fluido (liquido o gas) circostante, avviene in diversi stadi:

- dapprima il calore passa per conduzione dalla superficie alle particelle di fluido adiacenti, in modo tale che l'energia così trasmessa faccia aumentare l'energia interna e la temperatura delle particelle;
- tali particelle vanno poi a muoversi verso una regione del fluido a temperatura minore e si mescolano con esso cedendo parte della propria energia ad altre particelle.

Deduciamo dunque che la convezione consta sia di un flusso di energia sia di un flusso di materia: l'energia è cioè effettivamente immagazzinata nelle particelle ed è trasportata dal loro moto. Questo meccanismo non dipende solo da una differenza di temperatura ed è per questo che, come già osservato, non è strettamente conforme alla definizione di trasmissione del calore. Tuttavia, l'effettiva conseguenza è sempre un trasporto di energia che, avvenendo secondo la direzione del gradiente di temperatura, è comunque classificato come un meccanismo di scambio termico, detto appunto **trasmissione del calore per convezione**.

E' possibile classificare due tipi di processi di trasmissione di calore per convezione, in base alla causa che determina il moto di particelle:

- si parla di **convezione libera** (o anche **naturale**) quando il moto dipende unicamente da differenze di densità dovute a gradienti di temperatura;
- si parla invece di **convezione forzata** quando il moto è indotto da qualche agente esterno (come una pompa o un ventilatore).

Sottolineiamo infine che l'efficacia dello scambio termico per convezione dipende, in gran parte, dal moto del fluido a contatto con la superficie.

## REGIME STAZIONARIO E NON STAZIONARIO

Nella soluzione di problemi di trasmissione del calore, non basta individuare i meccanismi di scambio termico in gioco, ma è anche necessario stabilire se il processo avviene o meno in **regime stazionario** (detto anche **regime permanente**):

- quando la potenza termica in un sistema non varia nel tempo, la temperatura in ciascun punto non cambia e si parla perciò di **regime stazionario**: in qualsiasi punto del sistema, la potenza termica entrante è pari esattamente a quella uscente e non si ha alcuna variazione dell'energia interna;
- quando, invece, la temperatura in qualche punto varia nel tempo, allora si dice che la trasmissione del calore nel sistema avviene in condizioni di **regime non stazionario** (detto anche **regime transitorio**): poiché una variazione di temperatura sta ad indicare una variazione di energia interna, è evidente che l'accumulo di energia è tipico del flusso non stazionario.

Un caso particolare di flusso termico transitorio si ha quando un sistema è sottoposto a variazioni cicliche della temperatura dell'ambiente che lo circonda: in questi problemi, la temperatura di ciascun punto del sistema assume periodicamente lo stesso valore ed anche la potenza termica e l'energia accumulata subiscono variazioni periodiche. Si parla in questo caso di trasmissione del calore in **regime periodico** (o anche in **regime quasi stazionario**). Noi ci occupiamo solo del regime stazionario.

### Leggi fondamentali dello scambio termico

Nei problemi di trasmissione del calore, bisogna esaminare le leggi fisiche e le relazioni che governano i vari meccanismi di scambio termico. Vogliamo allora effettuare un esame preliminare delle equazioni fondamentali che regolano ciascuna delle tre modalità di trasmissione del calore. Di seguito indicheremo con  $Q$  l'energia termica trasmessa e con  $\dot{Q}$  la potenza trasmessa (energia termica trasmessa nell'unità di tempo).

### CONDUZIONE: POSTULATO DI FOURIER

La relazione fondamentale della **trasmissione del calore per conduzione** fu proposta da J.B.J. **Fourier** nel 1822. Il **postulato di Fourier** afferma allora che la **potenza termica trasmessa per conduzione** in un materiale è data dalla seguente relazione:

$$\dot{Q}_k = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad \frac{kcal}{h}$$

Su questa relazione, che non dimostriamo, vanno fatte varie considerazioni:

- in primo luogo, il pedice “k” che compare a primo membro sta solo ad indicare che la potenza termica è trasmessa per “conduzione”, mentre vedremo che si usano altri pedici per indicare l’irraggiamento o la convezione;
- a secondo membro di quella equazione compaiono i seguenti termini:
  1.  $\lambda$  è la cosiddetta **conducibilità termica** del materiale, ed è un parametro

caratteristico del materiale considerato;

2.  $A [m^2]$  è l'area della sezione attraverso la quale il calore fluisce per conduzione, misurata perpendicolarmente alla direzione del flusso (coordinata  $x$ );
  3.  $\Delta T/\Delta x [^\circ C/m]$  è infine il gradiente di temperatura nella sezione, ossia la variazione di  $T$  rispetto alla distanza, nella direzione del flusso  $x$ .
- il segno "-" a secondo membro deriva dalla necessità di adottare una convenzione sui segni:  
si conviene che il verso delle  $x$  crescenti sia il verso positivo per il flusso termico, il quale risulterà perciò negativo quando è diretto verso le  $x$  decrescenti; allora, con riferimento alla figura, poiché (in base al 2° principio della termodinamica) il calore fluisce spontaneamente dai punti a temperatura maggiore verso quelli a temperatura minore, la potenza termica è negativa quando il gradiente di temperatura è positivo e viceversa.

La **conducibilità termica** si ricava direttamente dall'espressione di prima:

$$\lambda = \frac{-\dot{Q}_k}{A \frac{\Delta T}{\Delta X}}$$

Essa è una proprietà del materiale e, in base all'espressione appena scritta, rappresenta evidentemente la potenza termica che passa attraverso una superficie di area unitaria con un gradiente di temperatura unitario. Le unità di misura della conducibilità termica sono le seguenti:

$$\frac{kcal}{hm^\circ C}$$

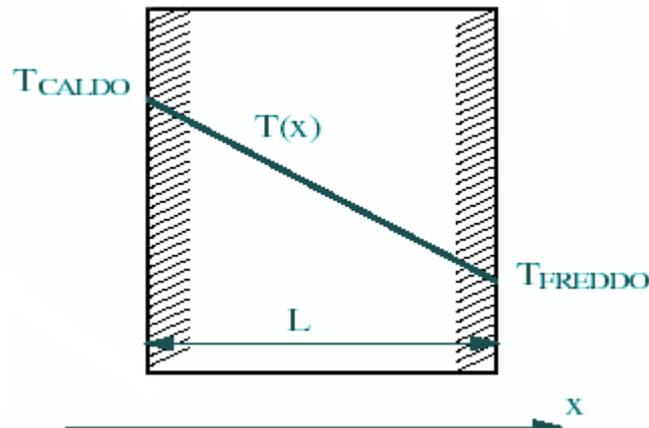
nel Sistema Internazionale:  $\frac{W}{m^\circ K}$

Le conducibilità termiche dei materiali industriali, alla pressione atmosferica, variano da un minimo di 0.006 nei gas a 0.15 nei liquidi e fino a 350 per il rame.

In base al valore di  $\lambda$  si adotta la seguente classificazione: i materiali aventi un'elevata conducibilità termica sono dei **conduttori termici**, mentre quelli con bassa conducibilità termica sono **isolanti termici**. In generale, ricordiamo inoltre che la conducibilità termica varia con la temperatura. Tuttavia, in molti problemi la variazione è talmente piccola da poter essere trascurata.

## Esempio: flusso stazionario attraverso una parete piana

Vediamo subito un caso semplice di trasmissione di calore per conduzione. Consideriamo il caso di flusso a regime stazionario attraverso una parete piana:



Da qui possiamo dunque concludere che:

$$\dot{Q}_k = -\lambda A \frac{T_{freddo} - T_{caldo}}{L} = \lambda A \frac{T_{caldo} - T_{freddo}}{L}$$

L'equazione mostra in pratica che la differenza  $\Delta T$  tra la temperatura maggiore e quella minore è il potenziale che determina il flusso di calore:

$$\dot{Q}_k = \frac{\Delta T}{\frac{L}{\lambda A}} = \frac{\Delta T}{R_k}$$

In questo senso, data l'analogia con la legge di Ohm valida per le correnti stazionarie, il termine  $R_k = \frac{L}{\lambda A}$  rappresenta una **resistenza termica** (misurata in  $\text{h}^\circ\text{C}/\text{kcal}$  oppure in

$\text{W}/^\circ\text{C}$  nel sistema SI) che la parete oppone al flusso per conduzione.

L'inverso di questa resistenza è chiaramente una **conduttanza termica** (misurata in  $\text{kcal}/\text{h}^\circ\text{C}$ ):  $G_k = \frac{A\lambda}{L}$

In particolare,  $\lambda/L$  è la cosiddetta **conduttanza termica unitaria per il flusso termico conduttivo, in quanto rappresenta la conduttanza termica per unità di area.**

Vedremo che i concetti di resistenza e conduttanza sono di grande utilità nello studio di sistemi in cui si hanno contemporaneamente diverse modalità di scambio termico.

## **IRRAGGIAMENTO**

La quantità di energia che lascia una superficie, sotto forma di **calore irraggiato**, dipende dalla temperatura assoluta e dalla natura della superficie stessa. Per esempio, un **radiatore perfetto**, detto anche **corpo nero** (oggetto ideale che assorbe il 100% delle radiazioni che lo colpiscono), emette dalla sua superficie una potenza termica  $q_I$  data da:

$$\dot{Q}_I = \sigma A_I T_I^4 \quad \frac{kcal}{h}$$

In questa relazione compaiono i seguenti termini:

- $A_I$  è l'area della superficie (misurata in  $m^2$ )
- $T_I$  è la temperatura della superficie (misurata in gradi Kelvin K)
- $\sigma$  è una costante adimensionale (costante di Stefan-Boltzmann) che vale:

$$4,88 \cdot 10^{-8} \text{ kcal/h m}^2 \text{ K}^4$$

oppure:

$$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 \text{ nel Sistema Internazionale}$$

L'equazione appena riportata mostra dunque che la superficie di un corpo nero, a temperatura superiore allo zero assoluto ( $0^\circ\text{K}$ ), irraggia una potenza termica proporzionale, secondo il coefficiente  $\sigma A_I$ , alla quarta potenza della temperatura assoluta. Quindi, l'intensità dell'emissione è indipendente dalle condizioni dell'ambiente circostante.

Al contrario, lo scambio di calore netto per irraggiamento richiede una differenza tra le temperature superficiali dei corpi tra i quali avviene lo scambio. Per esempio, se il corpo nero irraggia in una cavità chiusa che lo circonda completamente e la cui superficie è completamente nera (cioè assorbe tutta l'energia raggiante su essa incidente), la potenza termica scambiata per irraggiamento vale:

$$\dot{Q}_I = \sigma A_I (T_1^4 - T_2^4)$$

dove  $T_2$  è la temperatura superficiale della cavità (sempre in K).

I corpi reali non godono delle proprietà dei corpi neri, in quanto emettono radiazioni in misura minore rispetto ad essi: nel caso in cui un corpo reale, per ogni lunghezza d'onda, emette, ad una temperatura uguale a quella del corpo nero, una frazione costante dell'energia emessa dal corpo nero, lo si definisce **corpo grigio**. La potenza termica scambiata tra un corpo grigio a temperatura  $T_1$  ed un corpo nero, che lo circonda, a temperatura  $T_2$ , è data da:

$$\dot{Q}_I = \sigma A_I \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

dove  $\varepsilon_1$  è la cosiddetta **emittenza della superficie grigia**, definita come il rapporto tra l'energia emessa dal corpo grigio e l'energia emessa dal corpo nero alla stessa temperatura. Se nessuno dei due corpi è un radiatore perfetto e i due corpi stessi stanno in una qualche relazione geometrica, la potenza termica netta che essi si scambiano per irraggiamento è

data da:

$$\dot{Q}_I = \sigma A_I \Sigma_{1-2} (T_1^4 - T_2^4)$$

dove  $\Sigma_{1-2}$  è evidentemente un fattore che modifica la relazione dei radiatori perfetti per tenere conto delle emittenze dei corpi in esame e della relazione geometrica tra loro.

In pratica, quindi, dalle ultime relazioni si deduce che la descrizione analitica del fenomeno, in presenza di almeno un corpo che non sia nero, è formalmente analoga a quella che si ha in presenza di soli corpi neri, ma differisce per la presenza di opportuni coefficienti moltiplicativi, che tengono appunto conto della non-idealità di almeno uno dei corpi coinvolti.

In molti problemi ingegneristici, l'irraggiamento è presente insieme ad altre modalità di trasmissione del calore: in questi casi, la soluzione del problema può essere semplificata utilizzando la cosiddetta "conduttanza termica per l'irraggiamento" o il suo reciproco, cioè la "resistenza termica per l'irraggiamento". Per definire uno qualsiasi di questi due parametri, il discorso è assolutamente analogo a quello seguito per definire gli analoghi parametri per la conduzione. Infatti, se scriviamo l'equazione dello scambio termico per irraggiamento nella forma:

$$\dot{Q}_I = K_I (T_I - T'_2)$$

(dove  $T'_2$  è una opportuna temperatura di riferimento, suggerita, come vedremo, dall'equazione della convezione che sarà in seguito discussa) e la confrontiamo con l'equazione:

$$\dot{Q}_I = \sigma A_I \Sigma_{1-2} (T_1^4 - T_2^4)$$

deduciamo che la **conduttanza termica per l'irraggiamento** (misurata in **kcal/h°C**) è data da:

$$K_I = \frac{\sigma A_I \Sigma_{1-2} (T_1^4 - T_2^4)}{T_I - T'_2}$$

Osserviamo immediatamente una cosa: mentre nella conduzione la conduttanza termica  $K_k$  si poteva ritenere con buona approssimazione indipendente dalla temperatura, adesso la dipendenza di  $K_I$  da  $T$  è molto più forte e non può quindi essere trascurata. Questa è una ulteriore differenza tra conduzione ed irraggiamento.

Ovviamente, il reciproco della  $K_I$  sarà una **resistenza termica per l'irraggiamento** (misurata in **h°C/kcal**):

$$R_I = \frac{T_I - T'_2}{\sigma A_I \Sigma_{1-2} (T_1^4 - T_2^4)}$$

## **CONVEZIONE**

Come già detto in precedenza, lo **scambio termico per convezione** consiste in pratica nella trasmissione di calore tra la superficie di contorno di un solido e un fluido adiacente ed in movimento. La potenza termica scambiata per convezione tra la suddetta superficie ed il fluido adiacente è data dalla seguente relazione:

$$\dot{Q}_C = \bar{h}_C A \Delta T \quad \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

Compaiono qui i seguenti termini:

- $\dot{Q}_C$  è appunto la **potenza termica scambiata per convezione**, misurata in **kcal/h** nel sistema Tecnico e in W (o J/s) nel Sistema Internazionale;
- A è l'area della superficie di scambio (misurata in m<sup>2</sup>)
- $\Delta T$  è la differenza (misurata in gradi centigradi °C nel Sistema Tecnico ed in °K nel Sistema Internazionale) tra la temperatura T<sub>s</sub> della superficie e la temperatura T<sub>∞</sub> del fluido in un punto specificato; tale punto è di solito lontano dalla superficie, in quanto si assume di considerare sempre una zona del fluido in cui il regime di temperatura NON risente della presenza della superficie di contorno del solido;
- $\bar{h}_C$  è il valore medio della conduttanza termica unitaria per la convezione (spesso chiamata **coefficiente superficiale di scambio termico** o anche **coefficiente di scambio termico per convezione**); la sua unità di misura è kcal/hm<sup>2</sup> °C nel sistema Tecnico oppure W/m<sup>2</sup> °K nel Sistema Internazionale.

La valutazione del coefficiente  $\bar{h}_C$  è piuttosto complessa in quanto complesso è in generale il fenomeno della convezione.

Infine, così come abbiamo fatto anche per conduzione e irraggiamento, è possibile definire una **conduttanza termica per convezione**, usando la relazione

$$\dot{Q}_C = \bar{h}_C A \Delta T$$

possiamo definire tale parametro come:

$$K_C = \bar{h}_C A$$

mentre il suo reciproco:

$$R_C = \frac{1}{\bar{h}_C A}$$

sarà una “**resistenza termica per convezione**”.

## Coefficiente globale di scambio termico

Consideriamo ancora l'equazione

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{tot}} = \frac{T_C - T_F}{R_1 + R_1 + .. + R_N}$$

In questa equazione, la potenza termica scambiata è espressa solo in funzione della differenza globale di temperatura e delle caratteristiche termiche dei singoli elementi nei quali passa il calore. Ci sono alcuni problemi, in particolare nel progetto degli **scambiatori di calore**, nei quali conviene semplificare la scrittura di quella relazione; tale semplificazione si ottiene semplicemente combinando le singole resistenze o conduttanze del sistema in un'unica grandezza, che prende il nome di **coefficiente globale di scambio termico** (simbolo:  $U \cdot A$ ): usando questo coefficiente, l'espressione della potenza termica scambiata diventa:

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T = U \cdot A \cdot (T_C - T_F)$$

dove A è l'area della superficie attraverso la quale avviene lo scambio termico e dove si è evidentemente posto

$$U \cdot A = \frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1 + R_1 + .. + R_N}$$

Come già detto in precedenza, la valutazione numerica delle diverse resistenze o conduttanze di un sistema termico rappresenta, in genere, la parte più difficoltosa di ogni problema di trasmissione del calore. Una volta valutate, con i metodi che vedremo, le singole resistenze o conduttanze, può essere ricavato il coefficiente globale di scambio termico e, a regime stazionario, può determinarsi la potenza termica scambiata per una certa differenza di temperatura.

## ANALOGIA TRA FLUSSO TERMICO E FLUSSO ELETTRICO

Due sistemi si dicono **analoghi** quando sono retti da equazioni simili ed hanno condizioni ai limiti simili. Questo significa che l'equazione che descrive il comportamento di un sistema può essere trasformata nell'equazione dell'altro sistema cambiando semplicemente i simboli delle variabili.

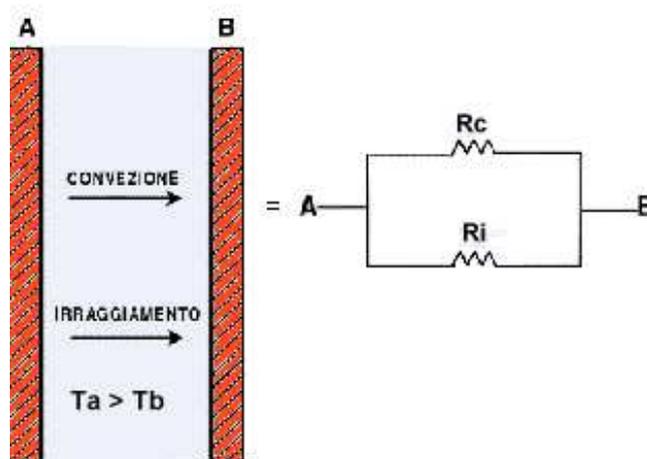
Per esempio, il flusso di calore attraverso una resistenza termica è del tutto analogo al flusso di corrente attraverso una resistenza elettrica, poiché i due tipi di flusso obbediscono ad equazioni simili: se si sostituisce, nell'equazione della potenza termica  $q = \Delta T/R$ , al simbolo del **potenziale termico** T il simbolo del potenziale elettrico, ossia la differenza di potenziale elettrico  $\Delta V$ , al simbolo della **resistenza termica** R il simbolo della resistenza elettrica R, si ottiene l'equazione del flusso di corrente  $I = \Delta V/R$  (legge di Ohm).

Avendo allora stabilito questa analogia fondamentale, si possono applicare ai problemi di trasmissione del calore, alcuni concetti della teoria della corrente continua: ogni circuito elettrico ha un **circuito termico corrispondente** e viceversa. Ad esempio, tre elementi attraversati dalla stessa potenza termica  $\dot{Q}$ , si dicono **in serie**; lo scambio di calore dovuti alla stessa differenza di temperatura, si dicono **in parallelo**.

## Equivalente termico della legge di Ohm

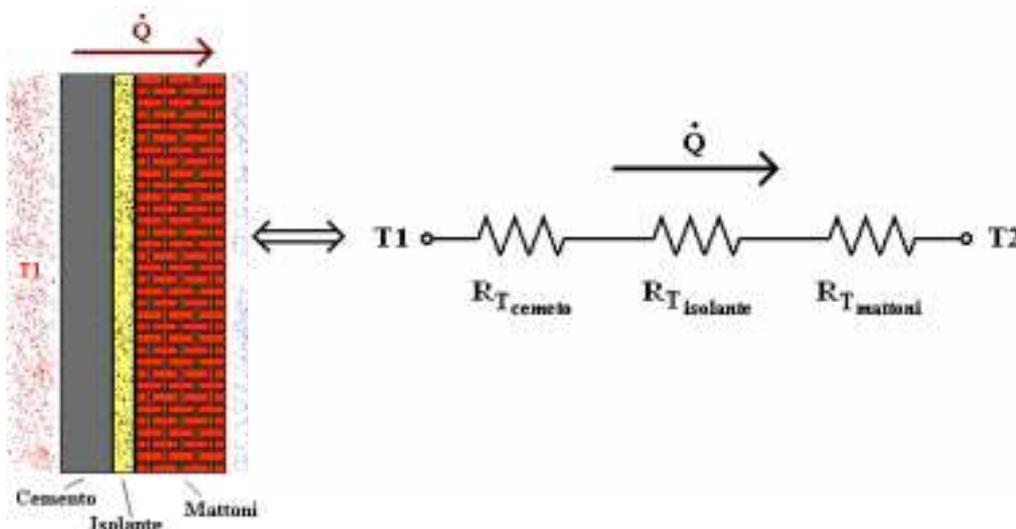
Come abbiamo detto, quasi sempre non esiste un solo modo di scambiare calore. Tra due corpi separati da uno strato di aria, come ad esempio possono essere due pareti, che si trovano a temperature differenti (figura sottostante), il calore viene scambiato sia per irraggiamento che per convezione in quanto tra le due pareti non c'è il vuoto, bensì un fluido come l'aria. Questi due fenomeni, quindi, in questo caso si sommano con il risultato che il calore scambiato in totale è dato dalla semplice addizione dei due singoli apporti;

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{tot}} \quad \text{dove} \quad R_{tot} = \frac{1}{R_{convezione}} + \frac{1}{R_{convezione}}$$



Il sistema può essere visto, per analogia, come un collegamento in parallelo di due resistenze (vedi figura) in cui alla potenza termica si sostituisce la corrente circolante nei due rami del circuito. Infatti la corrente totale è data dalla somma delle singole correnti, quella passante per  $R_C$  dovuta alla convezione e quella passante per  $R_I$  dovuta all'irraggiamento. Prima di generalizzare, passiamo ad un altro semplice esempio.

Consideriamo un tipico muro di una casa, costituito da tre strati di materiale differente, in cui le due superfici sono a temperature diverse:



Il calore in questo caso è scambiato unicamente per conduzione, e la legge di Ohm è la seguente:

$$i = \frac{\Delta V}{R_{tot}}$$

In maniera analoga possiamo definire:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{tot}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{T\text{ cemento}} + R_{T\text{ isolante}} + R_{T\text{ mattoni}}}$$

dove

$$R_{T\text{ cemento}} = \frac{L_{\text{strato cemento}}}{\lambda_{\text{cemento}} \cdot A}$$

$$R_{T\text{ isolante}} = \frac{L_{\text{strato isolante}}}{\lambda_{\text{isolante}} \cdot A}$$

$$R_{T\text{ mattoni}} = \frac{L_{\text{strato mattoni}}}{\lambda_{\text{mattoni}} \cdot A}$$

da ciò otteniamo

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{tot}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{T\text{ cemento}} + R_{T\text{ isolante}} + R_{T\text{ mattoni}}} = \frac{A}{\frac{L_{\text{strato cemento}}}{\lambda_{\text{cemento}}} + \frac{L_{\text{strato isolante}}}{\lambda_{\text{isolante}}} + \frac{L_{\text{strato mattoni}}}{\lambda_{\text{mattoni}}}} \cdot (T_1 - T_2)$$

è allora chiaro che il calore dissipato è minore in questo caso rispetto ad un sistema simile al precedente, e questo è appunto il principio seguito dai costruttori edili per minimizzare le perdite di calore. Giunti a questo punto, possiamo generalizzare il nostro ragionamento.

Esiste dunque una corrispondenza tra fenomeni termici e fenomeni elettrici; questa analogia è una vera e propria legge fisica e prende il nome di *equivalente termico della legge di Ohm*. Essa afferma che la quantità di calore scambiata nell'unità di tempo, ossia la potenza termica, è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura che causa lo scambio di calore. Traducendo in simboli otteniamo:

$$\Delta T = R_T \cdot \dot{Q}$$

in cui per  $\Delta T$  intendiamo la differenza di temperatura misurata in **Kelvin (K)**. Di conseguenza, definiamo  $R_T$  come *resistenza termica*, ovvero l'analogo della resistenza elettrica vista per i circuiti; la sua unità di misura quindi è:

$$[R_T] = \frac{[K]}{[W]}$$

diversamente dalla resistenza elettrica, quindi, la resistenza termica non ha una unità di misura propria, ma svolge lo stesso compito della resistenza elettrica nella legge di Ohm. Giunti a questo punto, però, dobbiamo fare un'importante considerazione: la legge di Ohm si basa sulla proporzionalità tra caduta di potenziale e corrente, ovvero la resistenza elettrica è una costante; la stessa cosa però non si può dire della resistenza termica, in quanto essa dipende dalla temperatura, e questo comporta non pochi problemi. Per porvi rimedio ci sono due possibili strade: la prima, detta a *temperature imposte*, è quella di lavorare con temperature iniziali e finali costanti, in modo da poter ritenere costante la resistenza termica e non avere problemi matematici; la seconda, detta a *flusso imposto*, è una strada "per tentativi": infatti il dato iniziale non sono le temperature ma la potenza termica scambiata e questo non garantisce che la resistenza termica sia costante; si deve così procedere imponendo una temperatura e, alla fine dei calcoli, controllare il risultato; se esso è accettabile il compito è svolto, se non lo è si deve ricominciare cambiando il valore imposto alla temperatura e così di seguito. Purtroppo, i problemi di questo tipo sono molto frequenti in termocinetica e questo fa capire perché questa branca della fisica sia tutt'oggi considerata una materia inesatta e approssimata!

Concludendo, abbiamo introdotto una nuova legge che regola gli scambi di calore, ma essa non ci deve sembrare strana in quanto non è altro che la trasposizione, con le dovute attenzioni e le approssimazioni che il caso impone, di una tra le più famose leggi fisiche, quella di Ohm, in ambito termocinetico. Riassumendo:

#### Fenomeni termici

#### Fenomeni elettrici

$$\Delta T = R_T \cdot \dot{Q}$$

→

$$\Delta V = R \cdot I$$

Potenza termica ( $\dot{Q}$ )

→

Corrente (I)

Differenza di temperatura ( $\Delta T$ )

→

Differenza di potenziale ( $\Delta V$ )

Resistenza termica ( $R_T$ )

→

Resistenza elettrica (R)

### Coefficienti di conducibilità termica interna a temperatura ambiente

| Materiale                           | $\lambda = \text{Kcal} / (\text{h} \times \text{m} \times ^\circ\text{C})$ |
|-------------------------------------|--|
| Acciaio al 5% Ni                    | 25   |
| Acciaio al 30% Ni                   | 9  |
| Acqua                               | 0.55   |
| Alluminio                           | 178  |
| Amianto                             | ca. 0.2  |
| Argentana o Alpacca (lega Cu-Ni-Zn) | 25   |
| Argento                             | 360  |
| Argilla secca                       | 0.8  |
| Aria secca                          | 0.021  |

|                          |               |
|--------------------------|---------------|
| Asfalto                  | 0.55          |
| Basalto                  | 1.1 ÷ 2.4     |
| Bronzo                   | 50            |
| Calcestruzzo secco       | 0.7           |
| Calcestruzzo umido       | 1.2           |
| Carbone                  | 0.13          |
| Cartone                  | 0.12 ÷ 0.25   |
| Caucciù                  | 0.1 ÷ 0.2     |
| Cemento in pasta         | 0.8           |
| Cellulosa compressa      | 0.21          |
| Farina fossile sciolta   | 0.038         |
| Ferro                    | 70            |
| Fibra di vetro           | 0.028         |
| Gesso                    | 0.34          |
| Glicerolo                | 0.25          |
| Grafite                  | 4.2           |
| Granito                  | 2.7 ÷ 3.5     |
| Intonaco a calce         | 0.7           |
| Lana                     | 0.041         |
| Lana minerale            | 0.03          |
| Lava                     | 0.7           |
| Legno di abete e pino    | 0.11 ÷ 0.14   |
| Legno di quercia         | 0.18          |
| Linoleum                 | 0.16          |
| Marmo                    | 20            |
| Mattoni pieni asciutti   | 0.4 ÷ 0.6     |
| Mattoni forati asciutti  | 0.3 ÷ 0.7     |
| Mercurio                 | ca. 6.5       |
| Mica                     | 0.30          |
| Muratura in pietra       | 1.2 ÷ 2.5     |
| Nichel                   | 50            |
| Olio lubrificante        | 0.10 ÷ 0.15   |
| Oro                      | 257           |
| Ottone                   | 65 ÷ 95       |
| Pietra arenaria          | 1.1 ÷ 1.5     |
| Pietra calcarea compatta | 0.6           |
| Piombo                   | 30            |
| Platino                  | 60            |
| Polistirolo espanso      | 0.026 ÷ 0.028 |
| Poliuretano espanso      | 0.0020        |
| Porcellana               | 0.7 ÷ 0.9     |
| Resine fenoliche espanse | 0.020         |

|                 |           |
|-----------------|-----------|
| Sabbia asciutta | 0.28      |
| Sabbia umida    | 1 ÷ 1.5   |
| Stagno          | 55        |
| Sughero espanso | 0.035     |
| Vetro comune    | 0.4 ÷ 0.8 |
| Zinco           | 95        |
| Zolfo           | 0.2       |