

**LEZIONI DI FISICA TECNICA**

*Volume secondo: Trasmissione del Calore, Energia Solare,  
Ambiente Globale.*

**INDICE SINTETICO**

**Trasmissione del Calore, Energia Solare, Ambiente Globale**

Capitolo Primo: <i>Modalità di trasmissione del calore</i> .....	pag. 1
Capitolo Secondo: <i>Conduzione</i> .....	pag. 9
Capitolo Terzo: <i>Convezione</i> .....	pag. 75
Capitolo Quarto: <i>Irraggiamento</i> .....	pag. 117
Capitolo Quinto: <i>Applicazioni: ingegneria civile</i> .....	pag. 167
Capitolo Sesto: <i>Applicazioni: ingegneria industriale</i> .....	pag. 209
Capitolo Settimo: <i>Energia solare</i> .....	pag. 249
Capitolo Ottavo: <i>Ambiente Globale</i> .....	pag. 333
Indice dei contenuti .....	pag. 371
Elenco delle figure .....	pag. 377
Elenco delle tabelle .....	pag. 385
Indice analitico dei soggetti .....	pag. 387
Elenco generale dei simboli .....	pag. 395
Bibliografia generale, ordine alfabetico .....	pag. 401
Bibliografia generale, ordine cronologico.....	pag. 409
Tavole a colori .....	pag. 417

---

## Capitolo 1

# MODALITÀ DI TRASMISSIONE DEL CALORE

### 1.1 Il calore.

Durante lo studio della Termodinamica si è osservato come non sia del tutto corretto, pur se accettato nella consuetudine, classificare il calore come una forma di energia; a rigore, si dovrebbe definire il calore come un modo che hanno i corpi di scambiare energia, dato che il calore esiste soltanto durante il corso di una trasformazione: non appena la trasformazione è terminata, il calore cessa di esistere: il calore non è una grandezza di stato. Altre grandezze sono chiamate a caratterizzare lo stato di un sistema termodinamico dal punto di vista termico, ed in primo luogo l'energia interna e la temperatura. La Termodinamica, peraltro, considera soltanto le quantità di calore che il sistema scambia con l'esterno, come pure gli effetti che questo scambio di calore produce sul sistema; non considera però le modalità attraverso le quali il calore può essere scambiato: lo studio di queste modalità forma l'oggetto principale di questa parte del corso.

L'argomento è di notevole rilievo dal punto di vista ingegneristico: rispetto alla trattazione termodinamica del calore, qui si considera una variabile assai importante e che soltanto di sfuggita era comparsa in termodinamica: *il tempo*. La Termodinamica si occupa della quantità di calore scambiata dal sistema con l'esterno e dei suoi effetti sul sistema, ma non di stabilire in quanto tempo questo calore è scambiato. In verità, in alcuni esempi di calcolo riportati nel Volume Primo, era emersa la necessità, ai fini della valutazione dei parametri fondamentali di alcune macchine, di introdurre la grandezza tempo. Ciò sta in relazione col fatto che nei calcoli d'ingegneria la *potenza* è spesso più significativa dell'*energia*. Ad esempio, l'individuazione di tutte le macchine e motori, apparecchiature diverse e impianti, di qualunque genere essi siano, meccanici, elettrici, elettronici, chimici, nucleari, avviene fondamentalmente per mezzo della potenza; non

avrebbe senso, evidentemente, caratterizzare un sistema compreso fra quelli elencati per mezzo dell'energia, poiché non sarebbe possibile fissare un'indicazione univoca: ogni macchina consuma o produce una maggiore o minore quantità di energia a seconda del tempo durante il quale la si mantiene in funzione.

Negli studi termodinamici di base si fissa l'attenzione sulle trasformazioni energetiche e quindi sul concetto di *rendimento*; le analisi energetica ed exergetica per i diversi sistemi termodinamici si concludono spesso con la valutazione numerica di questi parametri, assunti come indici della convenienza e funzionalità del sistema. Questo approccio metodologico è utile per costruire un panorama comparativo chiaro fra le diverse possibilità offerte dai sistemi tecnici ed anche dai sistemi naturali. Dopo, quando si voglia passare al progetto di un sistema, il solo concetto di rendimento non è più sufficiente: un sistema ingegneristico deve fornire prestazioni *nel tempo* e diventa indispensabile caratterizzarlo con un ulteriore parametro, appunto la *potenza*.

Dal punto di vista dello scambio di calore, tutte le valutazioni inerenti alla potenza termica richiedono in via preliminare lo studio fenomenologico delle diverse possibilità che hanno i corpi di scambiare calore. Nel seguito si fornisce una descrizione qualitativa delle modalità di scambio termico, utile per meglio affrontare lo studio dei successivi Capitoli.

## **1.2 Conduzione.**

La trasmissione di calore per *conduzione* si verifica all'interno dei corpi, fra elementi di materia contigui e che mantengono inalterata nel tempo la loro posizione. Dunque la trasmissione di calore per conduzione è tipica dei corpi solidi, ma può avvenire anche nei liquidi o negli aeriformi, purché si verifichi la condizione dianzi esposta; ciò accade soltanto in circostanze molto particolari: altrimenti, nei liquidi e negli aeriformi, prevale un diverso meccanismo di trasmissione del calore, la *convezione* (vedi par. 1.3), ed il contributo della conduzione diventa trascurabile.

Condizione necessaria e sufficiente affinché avvenga la trasmissione

di calore per conduzione è che all'interno del corpo in esame la temperatura non sia uniforme; a parità di distribuzione spaziale della temperatura, il calore si trasmette in modo diverso a seconda della natura fisica del corpo. La grandezza che caratterizza un corpo dal punto di vista della trasmissione del calore per conduzione prende il nome di *conducibilità termica* del corpo, si indica con la lettera greca  $\lambda$  e si misura in W/m K.

Si possono considerare tre categorie di corpi: corpi fortemente conduttori del calore, attraverso i quali cioè il calore fluisce con facilità, come i metalli, ai quali competono valori assai elevati di  $\lambda$ , dell'ordine delle decine od anche centinaia di W/m K. Una seconda categoria comprende i corpi mediamente conduttori del calore, attraverso i quali il calore fluisce con maggiore difficoltà, come i materiali usati nelle costruzioni edilizie: mattoni, calcestruzzo, gesso, ecc.; questi presentano valori di  $\lambda$  dell'ordine dell'unità di W/m K. Una terza categoria di corpi, infine, comprende i materiali isolanti termici, come l'amianto, la lana di vetro, il polistirolo espanso, ecc., ai quali competono valori di  $\lambda$  dell'ordine di centesimi di W/m K.

In regime stazionario, la conducibilità è l'unico parametro che influenza la trasmissione di calore all'interno dei corpi. Quando invece il regime è variabile, nel corpo avvengono variazioni di temperatura nel tempo, alle quali è associato un accumulo di calore, la cui entità dipende dal materiale, attraverso le grandezze fisiche densità e calore specifico. Pertanto, in regime variabile, la trasmissione di calore all'interno di un corpo dipende non solo della conducibilità, ma anche dal calore specifico e dalla densità del materiale.

Molti problemi di trasmissione del calore per conduzione sono risolti grazie al supporto dell'Analisi Matematica, la quale, anche storicamente, ha trovato proprio in questi problemi un importante sbocco applicativo. Strumento fondamentale di questo tipo di studi è l'*equazione di Fourier*. Negli ultimi tempi si è avuto un crescente sviluppo dei metodi numerici per lo studio di problemi complessi e non risolvibili in forma chiusa. In misura maggiore rispetto alle altre forme di trasmissione del calore, soprattutto rispetto alla convezione, il supporto teorico del quale si avvale la conduzione è solido ed efficace, e consente di limitare l'attività sperimentale specifica. Così i problemi di conduzione sono più agevoli da trattare,

potendo essere affrontati con l'impiego di tecniche di calcolo computerizzate e non richiedendo il continuo intervento di attività sperimentali, le quali, per loro natura, necessitano di un impegno molto più dispendioso e prolungato.

### 1.3 Convezione.

Nel nostro Universo, i corpi solidi hanno dimensioni finite e confinano con un fluido, con un altro solido, oppure con il vuoto. Nella trasmissione di calore per convezione si considera l'eventualità in cui il corpo solido confina con un fluido. Questa situazione è la più diffusa per i fenomeni naturali sulla superficie terrestre, dove i corpi solidi sono inevitabilmente immersi nell'aria atmosferica, ovvero nell'acqua del mare o dei fiumi. Anche nelle applicazioni tecniche, tuttavia, il caso di un fluido che lambisce un solido è frequente e la trasmissione di calore per convezione ha una importanza ragguardevole.

Condizione necessaria e sufficiente affinché si verifichi scambio di calore per convezione fra un corpo solido ed un fluido con esso confinante è che il solido ed il fluido si trovino a temperatura diversa. Nella convezione il meccanismo di trasferimento del calore è la *trasporto di massa*: a seguito del movimento di materia in seno al fluido, se il corpo è più caldo, un elemento di massa, situato in prossimità del corpo solido, si riscalda; il suo posto viene preso da un elemento di fluido più freddo, il quale, a sua volta, si riscalda e si allontana, e così via. La trasmissione del calore è pertanto associata al trasporto di materia: *convezione* deriva dal latino *con-vehere*, che significa appunto *trasportare*.

La grandezza che caratterizza l'entità dello scambio di calore per convezione prende il nome di *coefficiente (o fattore) di convezione*, si indica con il simbolo  $h_c$  e si misura in  $\text{W/m}^2 \text{K}$ . Il coefficiente di convezione dipende dalle proprietà termofisiche del fluido, dalle condizioni di moto e dalla geometria del sistema; non dipende dalle proprietà termofisiche del corpo solido, il quale può influenzare  $h_c$  soltanto in conseguenza della propria forma e del tipo ed entità della scabrezza superficiale.

A differenza di quanto accadeva per la conduzione, non è quasi mai possibile trattare per via teorica la trasmissione di calore per convezione: le formule per il calcolo di  $h_c$  contengono coefficienti determinabili soltanto per via sperimentale. Lo sforzo principale della ricerca tecnico-scientifica in questo settore è consistito nell'organizzazione razionale dei dati sperimentali, al fine di limitare il numero degli esperimenti e di costruire formule aventi un campo di applicabilità elevato: in questo sforzo è risultato decisivo l'impiego del metodo dell'*analisi dimensionale*, che ha permesso di generalizzare i risultati ottenuti in una particolare situazione sperimentale ad un insieme assai vasto di casi non sperimentati direttamente e comprendenti anche l'impiego di *fluidi diversi* da quello utilizzato nell'esperienza diretta.

#### 1.4 Irraggiamento.

Ogni corpo esistente nell'Universo, per il solo fatto di trovarsi ad una temperatura diversa dallo zero assoluto, è una sorgente di energia raggianti, la quale si propaga nello spazio circostante finché non incontra altri corpi che la intercettino. Se il corpo non è sede di altri fenomeni e se non è alimentato energeticamente, all'emissione di energia corrisponde un abbassamento della temperatura del corpo: tutto va come se il corpo avesse ceduto calore. D'altra parte, quando il citato fascio di energia raggiante incide sopra un secondo corpo, spesso in questo corpo si verifica un incremento di temperatura. Il secondo corpo dunque assorbe una parte dell'energia che lo ha colpito e tutto va come se avesse ricevuto calore. In definitiva si può dire che due corpi a temperatura diversa, posti in presenza l'uno dell'altro, *scambiano calore per irraggiamento*, dal momento che l'emissione ed assorbimento di energia raggiante provocano sui due corpi i medesimi effetti di una cessione e somministrazione di calore. E' pur vero che l'emissione e l'assorbimento di energia raggiante possono indurre anche fenomeni diversi, per lo studio dei quali si rinvia a sedi più appropriate.

L'energia raggiante emessa da un corpo è proporzionale alla *quarta*

*potenza* della temperatura assoluta del corpo e dipende dalle proprietà del materiale; anche l'energia radiante assorbita dal corpo dipende dalle caratteristiche dell'energia incidente e dalle proprietà del materiale. Esiste una legge generale della Fisica, nota come *principio di Kirchhoff*, la quale consente di correlare le proprietà di assorbimento e di emissione dei corpi; il principio di Kirchhoff è di fondamentale rilievo sia concettuale che applicativo.

L'entità dello scambio di calore per irraggiamento fra due corpi è conseguenza delle leggi generali di emissione e assorbimento dell'energia radiante: detta entità risulta infatti proporzionale alla differenza fra le quarte potenze delle temperature assolute dei corpi e dipende dalla configurazione geometrica e dalle proprietà radiative dei materiali. Dal punto di vista metodologico, i problemi di scambio di calore per irraggiamento sono spesso definiti con chiarezza e presentano informazioni adeguate sulle variabili d'ingresso; per contro, la loro risoluzione è subordinata, a volte, a difficoltà algoritmiche scoraggianti. Si intuisce perciò come il progresso delle tecniche di calcolo computerizzate abbia sviluppato un impulso decisivo in questo settore ed appaia meno significativo il ricorso a soluzioni semplificate.

## **1.5 Problemi complessi di trasmissione del calore.**

In tutti i fenomeni naturali di scambio termico che accadono sulla superficie della Terra, conduzione, convezione e irraggiamento sono contemporaneamente presenti. Anche nelle applicazioni tecniche, pertanto, ci si trova in presenza delle tre forme di trasmissione del calore: a volte una o due di esse può prevalere rispetto alle altre, così che alcuni problemi sono trattati in modo più semplice dal punto di vista algoritmico. Altre volte la particolare struttura delle formule operative suggerisce semplificazioni di calcolo, come nel caso della trasmissione del calore detta per *adduzione*, nella quale si conglobano in un termine unico le quantità di calore scambiate per convezione e per irraggiamento. Queste semplificazioni, tuttavia, benché largamente diffuse nella pratica ingegneristica e ricorrenti nei libri

di testo di trasmissione del calore, possono portare a conclusioni incongruenti, allorché le ipotesi che le sostengono vengano meno senza che l'operatore che le utilizza se ne avveda. Nella moderna ingegneria pertanto, che si avvale di mezzi di calcolo raffinati e sempre più a buon mercato, è auspicabile che si vada verso la trattazione più esatta dei problemi termici, quando questa sia possibile in base ad una buona conoscenza dei parametri d'ingresso.

Molti procedimenti semplificativi introdotti in passato, infatti, nascevano dalla carenza di mezzi adeguati di calcolo; alcuni, però, derivavano dalla constatazione che era inutile ed illusorio approfondire la trattazione analitica di un problema di per sé indeterminato dalla incompleta conoscenza delle variabili d'ingresso. In queste situazioni poco giovano i progressi degli strumenti di calcolo: probabilmente la trasmissione di calore *per adduzione* rientra fra questi casi e continuerà ad essere trattata con il metodo tradizionale.