

LEZIONI DI FISICA TECNICA 2

Trasmissione del Calore, Acustica, Tecnica dell'Illuminazione

INDICE DEI CONTENUTI

Parte Prima: Trasmissione del Calore

Capitolo Primo: Modalità di trasmissione del calore

1.1	Il calore.....	pag.	3
1.2	Conduzione	pag.	4
1.3	Convezione.....	pag.	5
1.4	Irraggiamento	pag.	6
1.5	Problemi complessi di trasmissione del calore.....	pag.	7

Capitolo Secondo: Conduzione

2.1	Campi termici.....	pag.	9
2.2	Postulato di Fourier	pag.	11
2.3	Equazione di Fourier	pag.	15
2.4	Conducibilità termica e materiali	pag.	20
2.5	Parete piana in regime stazionario.....	pag.	24
2.6	Parete piana multistrato in regime stazionario	pag.	26
2.7	Parete piana con sviluppo interno di calore in regime stazionario	pag.	28
2.8	Resistenze di contatto.....	pag.	32
2.9	Muro di Fourier.....	pag.	37
2.10	Alcune applicazioni del Muro di Fourier	pag.	44
2.11	Elenco dei simboli.....	pag.	48
2.12	Bibliografia	pag.	49

Capitolo Terzo: Convezione

3.1	Il fenomeno della convezione	pag.	51
3.2	Lo strato limite	pag.	52
3.3	Il coefficiente di convezione	pag.	56
3.4	Convezione naturale e convezione forzata.....	pag.	58

3.5	Il metodo dell'analisi dimensionale	pag.	60
3.6	Il metodo degli indici.....	pag.	62
3.7	Significato fisico dei parametri adimensionali	pag.	65
	3.7.1 Numero di Nusselt Nu.....	pag.	65
	3.7.2 Numero di Prandtl Pr.....	pag.	66
	3.7.3 Numero di Reynolds Re	pag.	66
	3.7.4 Numero di Grashof Gr.....	pag.	68
3.8	Rassegna sintetica dei parametri adimensionali in uso.....	pag.	70
3.9	Alcune relazioni tra i numeri adimensionali.....	pag.	70
A.	Convezione naturale	pag.	73
A.1	Pareti verticali piane	pag.	73
	A.1.1 Regime laminare ($Ra < 10^9$).....	pag.	73
	A.1.2 Regime turbolento ($Ra > 10^9$).....	pag.	73
A.2	Superfici orizzontali	pag.	74
A.3	Tubo lambito esternamente da un fluido in convezione naturale	pag.	74
	A.3.1 Tubo verticale	pag.	74
	A.3.2 Tubo orizzontale	pag.	74
B.	Convezione forzata.....	pag.	74
B.1	Convezione forzata entro condotti, relazioni di impiego generale.....	pag.	74
	B.1.1 Regime laminare, convezione forzata entro condotti.....	pag.	76
	B.1.2 Regime turbolento, convezione forzata entro condotti	pag.	76
	B.1.3 Convezione forzata entro condotti, regime turbolento, fluido in fase liquida	pag.	77
B.2	Pareti verticali piane	pag.	78
	B.2.1 Lastra piana verticale, convezione forzata	pag.	78
B.3	Convezione forzata esterna su un banco di tubi	pag.	78
3.10	Elenco dei simboli	pag.	80
3.11	Bibliografia.....	pag.	81

Capitolo Quarto: Irraggiamento

4.1	Le proprietà dell'energia raggiante	pag.	83
4.2	Interazione fra l'energia raggiante e una lastra piana.....	pag.	86
4.3	La costante di assorbimento	pag.	88
4.4	Emissione dei corpi solidi e liquidi	pag.	90
4.5	Il Principio di Kirchhoff e il Corpo Nero	pag.	94

4.6	Le Leggi del Corpo Nero	pag.	96
4.7	Proprietà radianti dei corpi	pag.	99
4.8	Effetto serra	pag.	102
4.9	Piani paralleli affacciati	pag.	104
4.10	Schermi di radiazione	pag.	106
4.11	Elenco dei simboli	pag.	109
4.12	Bibliografia	pag.	109

Capitolo Quinto: Applicazioni: ingegneria civile

5.1	Adduzione	pag.	111
5.2	La trasmittanza di una parete	pag.	115
5.3	Pareti con intercapedine	pag.	121
5.4	Parete opaca esposta ad irraggiamento solare	pag.	127
5.5	Bilancio termico di una parete vetrata semplice	pag.	130
5.6	Materiali termoisolanti	pag.	133
5.7	Elenco dei simboli	pag.	136
5.8	Bibliografia	pag.	136

Capitolo Sesto: Applicazioni: ingegneria industriale

6.1	Scambiatore di calore a tubi concentrici	pag.	139
6.2	Scambiatore di calore a tubi e mantello	pag.	148
6.3	Distribuzione di fluidi termovettori	pag.	152
6.4	Raffreddamento di un fluido in una tubazione	pag.	154
6.5	L'isolamento delle tubazioni	pag.	159
6.6	Aletta di raffreddamento	pag.	160
6.7	Riscaldamento e raffreddamento di un corpo	pag.	168
6.8	Elenco dei simboli	pag.	173
6.9	Bibliografia	pag.	173

Capitolo Settimo: Energia Solare

7.1	Introduzione	pag.	175
7.2	Distribuzione spettrale dell'energia solare	pag.	177
7.3	I pannelli piani	pag.	180
7.4	I collettori parabolico-cilindrici	pag.	189

7.5	Elenco dei simboli	pag. 195
7.6	Bibliografia.....	pag. 195

Parte Seconda: Acustica

Capitolo Ottavo: Acustica Fisica

8.1	L'Acustica e la Fisica Tecnica	pag. 199
8.2	Grandezze acustiche	pag. 200
8.3	Spettri acustici	pag. 204
8.4	La propagazione del suono	pag. 209
8.5	I materiali fonoassorbenti	pag. 210
	8.5.1 Pannelli fonoassorbenti porosi	pag. 210
	8.5.2 Pannelli forati risonanti assorbenti	pag. 213
	8.5.3 Pannelli vibranti	pag. 216
8.6	Strutture fonoisolanti	pag. 220
	8.6.1 L'isolamento acustico	pag. 220
	8.6.2 La legge della massa.....	pag. 220
8.7	Elenco dei simboli	pag. 225
8.8	Bibliografia.....	pag. 226

Capitolo Nono: Elementi di psicoacustica

9.1	L'organo dell'udito	pag. 227
9.2	La sensazione auditiva e la nascita delle scale fonometriche	pag. 230
9.3	La scala fonometrica dei decibel	pag. 234
9.4	L'audiogramma normale di Fletcher e Munson	pag. 238
9.5	Effetto Haas ed eco.....	pag. 240
9.6	Elenco dei simboli	pag. 241
9.7	Bibliografia.....	pag. 242

Capitolo Decimo: Elementi di ingegneria acustica

10.1	L'acustica degli ambienti confinati	pag. 243
10.2	La riverberazione.....	pag. 246
	10.2.1 La teoria di Sabine.....	pag. 251
	10.2.2 La teoria di Eyring.....	pag. 255
10.3	Qualità acustica di una sala	pag. 257

10.4	Progettazione e correzione acustica degli ambienti chiusi	pag. 261
10.5	La distorsione acustica	pag. 266
10.6	Indici di valutazione del rumore.....	pag. 269
10.7	Il fonometro.....	pag. 274
10.8	Elenco dei simboli.....	pag. 282
10.9	Bibliografia	pag. 283

Parte Terza: Tecnica dell'Illuminazione

Capitolo Undicesimo: Elementi di Fotometria

11.1	L'organo della vista	pag. 287
11.2	La curva di visibilità.....	pag. 291
11.3	Metodi per la costruzione della curva di visibilità	pag. 296
11.4	Definizione delle grandezze fotometriche.....	pag. 301
11.5	Elenco dei simboli.....	pag. 307
11.6	Bibliografia	pag. 308

Capitolo Dodicesimo: Sorgenti di luce

12.1	Notizie storiche	pag. 309
12.2	Caratteristiche principali di una sorgente luminosa	pag. 310
12.3	Lampade a filamento.....	pag. 313
12.4	Lampade a scarica	pag. 315
12.5	Elenco dei simboli.....	pag. 323
12.6	Bibliografia	pag. 323

Capitolo Tredicesimo: Elementi di ingegneria dell'illuminazione

13.1	Il progetto illuminotecnico	pag. 325
13.2	Ambienti chiusi: metodo del flusso totale.....	pag. 328
13.3	Ambienti aperti: illuminazione delle strade	pag. 338
13.4	L'illuminazione naturale.....	pag. 345
13.5	Elenco dei simboli.....	pag. 352
13.6	Bibliografia	pag. 353

Capitolo Quattordicesimo: *La Conservazione delle opere d'arte*

14.1	Introduzione.....	pag. 355
14.2	Condizioni termoigrometriche.....	pag. 355
14.3	Illuminamento.....	pag. 356
14.4	Qualità dell'aria	pag. 360
14.5	La Norma UNI 10829.....	pag. 362
14.6	Monitoraggi ambientali e indici di rischio.....	pag. 362
14.7	Materiale fotocinematografico e informatico	pag. 365
14.8	Elenco dei simboli	pag. 370
14.9	Bibliografia.....	pag. 370

Parte Prima
Trasmissione del Calore

Capitolo 1

MODALITÀ DI TRASMISSIONE DEL CALORE

1.1 Il calore.

Nello 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 1, era emersa la necessità, ai fini della valutazione dei parametri fondamentali di alcune macchine, di introdurre la grandezza tempo. Ciò in relazione al 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 fundamentalmente 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 exerge-

tica 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. Quando poi 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 λ e si misura in W/mK.

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 λ , dell'ordine delle decine od anche centinaia di W/mK. 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 λ dell'ordine dell'unità di W/mK. 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 λ dell'ordine di centesimi di W/mK.

In regime stazionario, la conducibilità è l'unico parametro che influenza la trasmissione di calore all'interno dei corpi. Quando 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 dalla 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 il *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 *convehere*, 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 raggiante, 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 radiante possono indurre anche fenomeni diversi, per lo studio dei quali si rinvia a sedi più appropriate.

L'energia radiante 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 diffusi, 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.