

## **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.	3
1.3	Convezione.....	pag.	4
1.4	Irraggiamento .....	pag.	5
1.5	Fenomeni complessi di trasmissione del calore .....	pag.	5

##### **Capitolo Secondo: Conduzione**

2.1	Campi termici.....	pag.	7
2.2	Postulato di Fourier .....	pag.	9
2.3	Equazione di Fourier .....	pag.	13
2.4	Conducibilità termica e materiali .....	pag.	18
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.	29
2.8	Parete cilindrica a sezione circolare e simmetria cilindrica .....	pag.	31
2.9	Strato sferico a simmetria radiale.....	pag.	35
2.10	Resistenze di contatto.....	pag.	37
2.11	Muro di Fourier.....	pag.	40
2.12	Alcune applicazioni del Muro di Fourier .....	pag.	46
2.13	Gradino di temperatura.....	pag.	50
2.14	Elenco dei simboli.....	pag.	55
2.15	Bibliografia .....	pag.	56

**Capitolo Terzo: Convezione**

3.1	Il fenomeno della convezione.....	pag.	59
3.2	Lo strato limite .....	pag.	61
3.3	Il coefficiente di convezione.....	pag.	65
3.4	Convezione naturale e convezione forzata .....	pag.	67
3.5	Il metodo dell'analisi dimensionale .....	pag.	69
3.6	Il metodo degli indici.....	pag.	71
3.7	Significato fisico dei parametri adimensionali .....	pag.	73
	3.7.1 Numero di Nusselt Nu.....	pag.	73
	3.7.2 Numero di Prandtl Pr.....	pag.	74
	3.7.3 Numero di Reynolds Re .....	pag.	74
	3.7.4 Numero di Grashof Gr.....	pag.	76
3.8	Rassegna sintetica dei parametri adimensionali in uso.....	pag.	76
3.9	Alcune relazioni tra i numeri adimensionali.....	pag.	78
A.	Convezione naturale .....	pag.	79
A.1	Pareti verticali piane .....	pag.	79
	A.1.1 Regime laminare ( $Ra < 10^9$ ).....	pag.	79
	A.1.2 Regime turbolento ( $Ra > 10^9$ ).....	pag.	79
A.2	Superfici orizzontali .....	pag.	80
A.3	Tubo lambito esternamente da un fluido in convezione naturale .....	pag.	80
	A.3.1 Tubo verticale .....	pag.	80
	A.3.2 Tubo orizzontale .....	pag.	80
B.	Convezione forzata .....	pag.	81
B.1	Convezione forzata entro condotti, relazioni di impiego generale.....	pag.	81
	B.1.1 Regime laminare, convezione forzata entro condotti.....	pag.	82
	B.1.2 Regime turbolento, convezione forzata entro condotti .....	pag.	83
	B.1.3 Convezione forzata entro condotti, regime turbolento, fluido in fase liquida .....	pag.	84
B.2	Pareti verticali piane .....	pag.	84
	B.2.1 Lastra piana verticale, convezione forzata .....	pag.	84
B.3	Convezione forzata esterna su un banco di tubi .....	pag.	85
3.10	Cenni sullo scambio termico in ebollizione e condensazione .....	pag.	87
3.11	Elenco dei simboli .....	pag.	90
3.12	Bibliografia.....	pag.	91

**Capitolo Quarto: Irraggiamento**

4.1	Le proprietà dell'energia raggiante.....	pag. 93
4.2	Interazione fra l'energia raggiante e una lastra piana.....	pag. 95
4.3	La costante di assorbimento .....	pag. 98
4.4	Emissione dei corpi solidi e liquidi .....	pag. 100
4.5	Il Principio di Kirchhoff e il Corpo Nero .....	pag. 104
4.6	Le Leggi del Corpo Nero .....	pag. 106
4.7	Proprietà radianti dei corpi.....	pag. 108
4.8	Effetto serra.....	pag. 111
4.9	La geometria dei sistemi che scambiano calore per irraggiamento: il fattore di forma .....	pag. 113
4.10	Valutazione dello scambio termico per irraggiamento: metodo della radiosità .....	pag. 118
4.11	Piani paralleli affacciati.....	pag. 120
4.12	Schermi di radiazione.....	pag. 124
4.13	Corpo interno ad una cavità .....	pag. 126
4.14	Elenco dei simboli.....	pag. 129
4.15	Bibliografia .....	pag. 129

**Capitolo Quinto: Applicazioni: ingegneria civile**

5.1	Adduzione .....	pag. 131
5.2	La trasmittanza di una parete .....	pag. 135
5.3	Pareti con intercapedine .....	pag. 141
5.4	Parete opaca esposta ad irraggiamento solare .....	pag. 147
5.5	Bilancio termico di una parete vetrata semplice.....	pag. 151
5.6	Materiali termoisolanti .....	pag. 153
5.7	Elenco dei simboli.....	pag. 156
5.8	Bibliografia .....	pag. 156

**Capitolo Sesto: Applicazioni: ingegneria industriale**

6.1	Scambiatore di calore a tubi concentrici .....	pag. 159
6.2	Scambiatore di calore a tubi e mantello .....	pag. 168
6.3	Parametri di progetto di uno scambiatore di calore.....	pag. 172
6.4	Distribuzione di fluidi termovettori.....	pag. 176
6.5	Raffreddamento di un fluido in una tubazione.....	pag. 178
6.6	L'isolamento delle tubazioni.....	pag. 183

6.7	Aletta di raffreddamento.....	pag.	186
6.8	Riscaldamento e raffreddamento di un corpo.....	pag.	199
6.9	Filo percorso da corrente.....	pag.	203
6.10	Sistemi di captazione dell'energia solare.....	pag.	208
6.11	Pannelli solari.....	pag.	212
6.12	La normativa sui dispositivi di raccolta termici.....	pag.	226
6.13	Elenco dei simboli.....	pag.	231
6.14	Bibliografia.....	pag.	231

## **Parte Seconda: Acustica**

### **Capitolo Settimo: Acustica Fisica**

7.1	L'Acustica e la Fisica Tecnica.....	pag.	235
7.2	Le onde sonore.....	pag.	236
7.3	Grandezze acustiche.....	pag.	238
7.4	Campi sonori.....	pag.	241
7.5	Sorgenti sonore.....	pag.	244
7.6	Spettri acustici.....	pag.	247
7.7	La propagazione del suono.....	pag.	252
7.8	I materiali fonoassorbenti.....	pag.	255
	7.8.1 Pannelli fonoassorbenti porosi.....	pag.	255
	7.8.2 Pannelli forati risonanti assorbenti.....	pag.	257
	7.8.3 Pannelli vibranti.....	pag.	261
7.9	Strutture fonoisolanti.....	pag.	265
	7.9.1 L'isolamento acustico.....	pag.	265
	7.9.2 La legge della massa.....	pag.	265
7.10	Elenco dei simboli.....	pag.	274
7.11	Bibliografia.....	pag.	275

### **Capitolo Ottavo: Elementi di psicoacustica**

8.1	Sviluppo dell'Acustica e cultura specifica.....	pag.	277
8.2	L'organo dell'udito.....	pag.	279
8.3	La sensazione auditiva e la nascita delle scale fonometriche.....	pag.	281
8.4	La soglia assoluta di udibilità.....	pag.	283
8.5	La scala fonometrica dei decibel.....	pag.	285
8.6	L'audiogramma normale di Fletcher e Munson.....	pag.	288

8.7	Elenco dei simboli.....	pag.	291
8.8	Bibliografia .....	pag.	291

**Capitolo Nono: Elementi di ingegneria acustica**

9.1	L'acustica degli ambienti confinati.....	pag.	293
9.2	La riverberazione .....	pag.	297
	9.2.1 La teoria di Sabine .....	pag.	301
	9.2.2 La teoria di Eyring .....	pag.	305
9.3	Qualità acustica di una sala .....	pag.	307
9.4	Progettazione e correzione acustica degli ambienti chiusi .....	pag.	312
9.5	Elenco dei simboli.....	pag.	317
9.6	Bibliografia .....	pag.	318

**Parte Terza: Tecnica dell'Illuminazione**

**Capitolo Decimo: Elementi di Fotometria**

10.1	Illuminazione e progetto Fisico – Tecnico .....	pag.	321
10.2	L'organo della vista .....	pag.	323
10.3	Le qualità della visione .....	pag.	324
10.4	La curva di visibilità.....	pag.	328
10.5	Metodi per la costruzione della curva di visibilità .....	pag.	335
10.6	Definizione delle grandezze fotometriche.....	pag.	338
10.7	Elenco dei simboli.....	pag.	345
10.8	Bibliografia .....	pag.	345

**Capitolo Undicesimo: Sorgenti di luce**

11.1	Notizie storiche .....	pag.	347
11.2	Caratteristiche principali di una sorgente luminosa .....	pag.	349
11.3	Lampade a filamento.....	pag.	354
	11.3.1 Principio di funzionamento .....	pag.	354
11.4	Lampade a scarica .....	pag.	357
	11.4.1 Principio di funzionamento .....	pag.	357
11.5	Elenco dei simboli.....	pag.	366
11.6	Bibliografia .....	pag.	366

**Capitolo Dodicesimo: *Elementi di ingegneria dell'illuminazione***

12.1	Il progetto illuminotecnico .....	pag. 367
12.2	Ambienti chiusi: metodo del flusso totale .....	pag. 371
12.3	Ambienti aperti: metodo punto-punto .....	pag. 379
12.4	Illuminazione naturale .....	pag. 381
12.5	Elenco dei simboli .....	pag. 385
12.6	Bibliografia.....	pag. 386

**Parte Prima**

**Trasmissione del Calore**





## 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.

### 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.

### 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 W/m<sup>2</sup> 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.

#### 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 l'energia raggiante emessa 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.

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 raggiante assorbita dal corpo dipende dalle caratteristiche dell'energia incidente e dalle proprietà del materiale.

#### 1.5 Fenomeni 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.