

Alfredo Badagliacca

# Fondamenti di Trasmissione del Calore



SI RITENGONO CONTRAFFATTE LE COPIE NON FIRMATE DALL'AUTORE  
E SPROVVISTE DEL TALLONCINO SIAE

Copyright © MCMXCVII, *Alfredo Badagliacca*  
Dipartimento di Fisica Tecnica  
Università degli Studi di Roma "La Sapienza"  
00184 Roma, via Eudossiana, 18

Copyright © MCMXCVII, ARACNE EDITRICE  
di *Gioacchino Onorati*  
00173 Roma, via R. Garofalo, 133  
tel. (06) 72672233 telefax 72672222

ISBN 88-7999-175-2

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,  
di riproduzione e di adattamento anche parziale,  
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie  
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: settembre 1997

*a chi vive in sincerità*

E se non è da venti accompagnato,  
Mi par sentir dir le brigate:  
Colui è un ignorante e smemorato

*Galileo Galilei*

## Prefazione

*Nel presente volume viene presentata una elementare trattazione dei principi della trasmissione del calore, che trova la sua giusta collocazione funzionale nella transizione dalle conoscenze fisiche di base alle applicazioni specialistiche della tecnica.*

*Il contenuto emerge chiaramente dal Sommario. Si ritiene opportuno, però, dire qualcosa a proposito della ratio che ha indotto ad intraprendere un'opera, per la quale viene richiesto un impegno non indifferente, a fronte della natura e della delicatezza degli argomenti trattati.*

*La possibilità per gli studenti universitari di poter frequentare in ambito europeo corsi tenuti presso una Università differente da quella propria di iscrizione, e di vedersene riconoscere nei propri curricula i risultati degli accertamenti di merito, sta imponendo la necessità di rivedere l'organizzazione dei percorsi didattici universitari, alla ricerca di una flessibilità di scelta di moduli operativi che siano armonici in un disegno di progettualità professionale del corso di Laurea di iscrizione e, nel contempo, funzionali agli scambi culturali predetti.*

*In vista di tale obiettivo, si è pensato di suddividere il volume sostanzialmente in due moduli: uno di base, ed uno di introduzione alle varie applicazioni.*

*Il primo modulo è stato presentato come Sezione dedicata ai fenomeni semplici, vale a dire a quei fenomeni di trasmissione di calore che si possono far risalire ad una sola causa predominante. La trattazione ha seguito l'impostazione classica della trasmissione di calore per conduzione, convezione ed irraggiamento, affiancata dal trasferimento di materia per diffusione termica.*

*L'attenzione alla recente normativa internazionale in tema di simbologia, di definizione e di unità di misura, ne fa un modulo compatto che ben si adatta alla intercambiabilità tra percorsi didattici di ordinamenti diversi.*

*Il secondo modulo è stato presentato come Sezione dedicata ai fenomeni complessi, vale a dire quei fenomeni in cui il risultato si fa risalire a più cause concomitanti.*

*La flessibilità di questo modulo va vista in funzione del raccordo tra i principi basi della trasmissione del calore e le applicazioni dei differenti profili professionali.*

*In questo contesto si sono impostati i necessari percorsi di studio di interfaccia dei principi base con le applicazioni delle varie branche dell'ingegneria.*

---

---

*Si è ritenuto di semplificare il servizio didattico introducendo il concetto di accoppiamento termico tra sistemi. In tal modo si è potuto evidenziare con più immediata percezione come l'alettatura delle superfici di scambio termico, l'interposizione di uno strato d'isolante tra due sistemi o la qualità del contatto determinatosi dall'accostamento tra due corpi solidi, possa farsi risalire ad una sola categoria fenomenologica.*

*In sostanza, con la stesura di questo libro si è pensato di fornire uno strumento di servizio didattico adeguato alle necessità che incombono.*

*In conclusione, si desidera esprimere sentimenti di ringraziamento alla collega prof. Maria Paola Cappelli D'Orazio, che ha sempre seguito con simpatia questo impegno, a volte suggerendo preziosi consigli, a volte spronando a superare gli ostacoli che via via si presentavano, alcuni dei quali francamente inaspettati.*

*Roma, luglio 1997*

*Alfredo Badagliacca*

---

# SOMMARIO

*Prefazione*

IX

## SEZIONE I - FENOMENI SEMPLICI

### INTRODUZIONE

§1.1 - Esperienza ed osservazione dei fenomeni fisici	3
1.1.2 - Approccio metodologico allo studio	3
§1.2 - Sistemi fisici e grandezze fisiche	4
1.2.1 - Sistemi omogenei ed eterogenei	6
1.2.2 - Campo all'interno di un sistema macroscopico	7
§1.3 - Richiami intorno a talune proprietà dei campi	7
1.3.1 - Definizioni	7
1.3.2 - Gradiente di uno scalare	8
1.3.2.1 - Campo conservativo	9
1.3.3 - Flusso di un vettore	10
1.3.4 - Rotazione di un vettore	11
§1.4 - Fenomeni di trasporto	13
§1.5 - Analogia elettrica	14

### TRASMISSIONE DI CALORE PER CONDUZIONE

§2.1 - Generalità	17
§2.2 - Principi generali della conduzione termica	18
2.2.1 - Legge di Fourier	18
2.2.1.1 - Coefficiente di conduttività termica	20
2.2.1.2 - Coefficiente d'isolamento termico	22
2.2.2 - Equazione differenziale della conduzione	22
2.2.2.1 - Flusso di calore attraverso una superficie comunque orientata	22
2.2.2.2 - Equazione di Fourier e sue generalizzazioni	23
2.2.3 - Condizioni ai limiti	30

§2.3 - Conduzione termica in regime stazionario con condizioni ai limiti del primo tipo	31
2.3.1 - Conduzione in condizioni di campo termico monodimensionale ed in assenza di generazione interna	31
a) Parete piana con facce a temperatura fissata	32
b) Parete piana multistrato con facce esterne a temperatura fissata	36
c) Parete cilindrica con facce esterne a temperatura fissata	38
2.3.2 - Conduzione in condizioni di campo termico monodimensionale e con generazione interna di calore	41
a) Lastra piana con sviluppo interno di calore uniforme e costante nel tempo	42
b) Corpo cilindrico con sviluppo interno di calore uniforme e costante nel tempo	44
c) Lastra con sorgente interna a distribuzione esponenziale	46
2.3.3 - Conduzione in condizioni di campo termico a due dimensioni e in assenza di generazione interna di calore	47
2.3.3.1 - Approccio analitico	48
2.3.3.2 - Approccio numerico	49
2.3.3.3 - Approccio grafico	51
§2.4 - Conduzione in regime variabile con condizioni ai limiti del primo tipo	57
2.4.1 - Sistema costituito da mezzo seminfinito con faccia limite a temperatura uniforme	57
2.4.1.1 - Variazione a gradino della temperatura al contorno	58
2.4.1.2 - Temperatura al contorno variabile secondo una legge sinusoidale	62

## **TRASFERIMENTO DI CALORE PER CONVEZIONE**

§3.1 - Considerazioni generali	70
3.1.1 - Definizioni	70
3.1.2 - Elementi fondamentali del fenomeno	71
3.1.3 - Criteri generali per lo studio del fenomeno	72
3.1.4 - Legge di Newton della viscosità	73
3.1.4.1 - Classificazione dei fluidi in funzione del modello del loro comportamento viscoso	75
§3.2 - Approccio generale nel caso di fluido monocomponente e monofase	75
3.2.1 - Equazioni generali di variazione	76
3.2.1.1 - Bilancio di massa	77
3.2.1.2 - Bilancio della quantità di moto	77
3.2.1.3 - Equazione dell'energia termica	79
§3.3 - Strati limite e moto completamente sviluppato	79
3.3.1 - Strato limite fluidodinamico.	79
3.3.2 - Moto completamente sviluppato	81

---



3.3.3 - Strato limite termico	83
§3.4 - Approccio mediante modello globale lineare	84
3.4.1 - Dipendenza funzionale di $h_c$ nel caso di convezione forzata	86
3.4.2 - Dipendenza funzionale di $h_c$ nel caso di convezione naturale	89
3.4.3 - Dipendenza funzionale di $h_c$ nel caso generale	90
§3.5 - Criteri per la determinazione del coefficiente di convezione	90
3.5.1 - Grandezze adimensionate caratteristiche della convezione termica	91
§3.6 - Applicazione dell'equazione della similitudine nella determinazione del coefficiente di convezione	94
3.6.1 - Convezione forzata	95
3.6.1.1 - Regime laminare	95
3.6.1.2 - Regime turbolento	96
3.6.2 - Convezione naturale	98
3.6.3 - Scambio termico di banchi di tubi con correnti incrociate	101
§3.7 - Cenni sull'impiego dell'analisi dimensionale	104
3.7.1 - Elementi teorici di base	104
3.7.1.1 - Grandezze adimensionate	105
3.7.1.2 - Teorema di Buckingham	106
3.7.2 - Applicazione alla convezione termica	108
§3.8 - Cenni sull'impiego della teoria della similitudine	109
3.8.1 - Elementi teorici di base	109
3.8.2 - Esempio di applicazione	110

## **TRASFERIMENTO DI CALORE PER IRRAGGIAMENTO**

§4.1 - Considerazioni generali	115
4.1.1 - Natura del fenomeno	115
4.1.2 - Alcuni elementi inerenti alla radiazione elettromagnetica	116
4.1.2.1 - Parametri dell'onda di radiazione	118
4.1.3 - La radiazione ultravioletta	118
4.1.4 - Aspetti macroscopici dell'energia raggiante	120
§4.2 - Proprietà connesse all'energia raggiante	123
4.2.1 - I corpi nel ruolo di sorgente	124
4.2.1.1 - Proprietà globali	124
4.2.1.2 - Proprietà specifiche	128
4.2.2 - I corpi nel ruolo di ricettori	133
4.2.2.1 - Potenza intercettata da un corpo	133
4.2.2.2 - Proprietà della natura dei corpi in relazione alla composizione spettrale della potenza	135
4.2.2.3 - Indebolimento del flusso di energia raggiante nel propagarsi all'interno dei corpi	141

4.2.3 - Classificazione dei corpi in funzione della loro potenziale azione sulla radiazione intercettata	145
§4.3 - Leggi che governano il fenomeno dell'irraggiamento termico	148
4.3.1 - Proprietà della reciprocità tra superfici che s'irradiano mutuamente	148
4.3.2 - Emissione termica all'interno di una cavità in equilibrio termodinamico	149
4.3.2.1 - Legge di Kirchhoff	150
4.3.3 - Leggi sull'emissione del corpo nero	152
4.3.3.1 - Legge di Stefan- Boltzmann	152
4.3.3.2 - Legge di Wien	153
4.3.3.3 - Legge di Planck	153
4.3.4 - L'emissione dei corpi reali in rapporto con quella del corpo nero	153
§4.4 - Trasferimento di calore tra corpi per mutuo irraggiamento attraverso un mezzo perfettamente trasparente	159
4.4.1 - Il fattore di vista nel bilancio energetico	159
4.4.1.1 - Impostazione del calcolo dei fattori di vista	161
4.4.1.2 - Proprietà dei fattori di vista	165
4.4.1.3 - Flussi di calore relativi a configurazioni geometriche con fattore di vista pari ad uno	166
4.4.2 - Modello lineare	169
4.4.3 - Temperatura media radiante	170
§4.5 - Radiosità	172
4.5.1 - Analogia elettrica	172
§4.6 - Il ruolo del mezzo interposto	174
4.6.1 - Schermi d'irradiazione	176
4.6.2 - L'atmosfera e la radiazione solare	178
4.6.2.1 - Spettro della radiazione solare	178
4.6.2.2 - Azione dell'atmosfera	180
4.6.2.3 - Il ruolo della regione circostante	183
4.6.3 - Effetto serra	185

## **TRASFERIMENTO DI MASSA**

§5.1 - Generalità	188
§5.2 - Principi generali della diffusione di massa	189
5.2.1 - Richiami sulle miscele	189
Parametri che definiscono la composizione di una miscela.	190
5.2.2 - Legge di Fick	192
Espressione relativa ai miscugli di gas perfetti	196
§5.3 - Diffusione del vapor d'acqua attraverso l'aria	197
5.3.1 - Strato d'aria stagnante su acqua	197

---

5.3.2 - Processo di diffusione nell'atmosfera	200
§5.4 - Modello globale per il trasferimento di massa	202

## SEZIONE II - FENOMENI COMPLESSI

### SCAMBIO DI CALORE DEI CORPI SOLIDI CON L'AMBIENTE

§6.1 - Generalità	209
§6.2 - Flusso termico superficiale dovuto a convezione e irraggiamento (adduzione)	210
6.2.1 - Scambi per irraggiamento	211
6.2.2 - Scambio per convezione	211
6.2.3 - Conduttanza termica superficiale unitaria	211
6.2.4 - Analogia elettrica	214
6.2.5 - Condizione al contorno	215
§6.3 - Scambio di calore in regime non stazionario	215
6.3.1 - Analisi a parametri concentrati	216
6.3.1.1 - Corpo esposto all'aria aperta	217
6.3.2 - Analisi dimensionale	220
6.3.3 - Cenni sull'analisi alle differenze finite	221
6.3.4 - Corpo seminfinito con flusso termico imposto in superficie	225
§6.4 - Scambio di calore in regime stazionario	227
6.4.1 - Lastra piana verticale interposta tra due fluidi a temperatura differente	227
a) Lastra monostrato	227
b) Lastra multistrato	229
6.4.2 - Lastra cilindrica interposta tra due fluidi a temperatura differente	230
6.4.2.1 - Spessore critico di isolante	231

### ACCOPIAMENTO TERMICO

§7.1 - Generalità	233
§7.2 - Resistenze di contatto	234
§7.3 - Isolamento	237
§7.4 - Superfici alettate	237
7.4.1 - Aletta diritta a sezione costante accoppiata a parete piana	239
7.4.1.1 - Determinazione del campo termico	240
7.4.1.2 - Determinazione del flusso termico	243
7.4.1.3 - Condizione limite d'impiego	245
7.4.1.4 - Efficienza	246

7.4.1.5 - Parete alettata	247
7.4.2 - Aletta anulare di spessore uniforme	247
7.4.3 - Configurazione ottima dell'aletta	249

## **PROBLEMI DI SCAMBIO TERMICO NEGLI EDIFICI**

§8.1 - Generalità	253
§8.2 - Interazione edificio-ambiente esterno	253
8.2.1 - Caratterizzazione del sistema edificio	253
8.2.1.1 - Bilancio energetico	254
8.2.1.2 - La capacità termica	256
§8.3 - Criteri per la determinazione del valore dei coefficienti di scambio termico superficiale	257
§8.4 - Ponti termici	260
8.4.1 - Modello per la determinazione delle dispersioni termiche	260
8.4.2 - Criteri per la correzione	260
§8.5 - Pareti	263
8.5.1 - Parete sottoposta a regime periodico di temperatura	263
8.5.1.1 - Parete con $\beta_s > 1$	265
8.5.1.2 - Parete con $\beta_s < 1$	265
8.5.2 - Parete irraggiata dal sole	267
8.5.2.1 - Determinazione del campo termico	267
8.5.2.2 - Modello della temperatura fittizia	269
8.5.2.3 - Modalità di finitura superficiale e conseguenze termiche	271
8.5.3 - Permeanza al vapore	272
8.5.3.1 - Campo di concentrazione del vapor d'acqua e relativa diffusione in regime stazionario	272
8.5.3.2 - Flusso di vapor d'acqua conseguente al differenziale di concentrazione tra ambiente interno e ambiente esterno	274
8.5.4 - Parete con intercapedine d'aria	276

## **SCAMBI DI CALORE CON FLUIDI IN EBOLLIZIONE E IN CONDENSAZIONE**

§9.1 - Generalità	280
§9.2 - Ebollizione	281
9.2.1 - Caratteri generali	281
9.2.2 - Ebollizione di un liquido stagnante	282
9.2.2.1 - Correlazioni semiempiriche	284
9.2.2 - Ebollizione di un liquido in moto	286
§9.3 - Condensazione	288
9.3.1 - Caratteri generali	288

---

9.3.2 - Condensazione a film su lastra verticale	289
9.3.3 - Condensazione a gocce	292

## **SCAMBIATORI DI CALORE**

§10.1 - Generalità	293
§10.2 - Scambiatori di calore a flussi paralleli	297
10.2.1 - Scambiatori a flussi in controcorrente	300
10.2.1.1 - Equazione delle portate	300
10.2.1.2 - Equazione delle temperature	301
10.2.1.3 - Campo termico lungo l'asse	302
10.2.1.4 - Equazione della trasmissione	305
10.2.1.5 - Flusso termico massimo teorico	306
10.2.1.5 - Efficienza	308
10.2.2 - Scambiatori a flussi equicorrente	308
§10.3 - Scambiatori di tipo complesso	311
10.3.1 - Generalizzazione dell'equazione della trasmissione	311
10.3.2 - Efficienza	311
§10.4 - Influenza delle incrostazioni	314
§10.5 - Considerazioni sulle scelte operative	315

## **SEZIONE III - APPENDICE E RIFERIMENTI GENERALI**

<b>FATTORI DI CONVERSIONE</b>	319
<b>INDICE ANALITICO</b>	331
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	340
Memorie e Testi	340
Manuali e Norme	343

---