

FONDAMENTI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

Nell'esposizione degli argomenti di questo volume, gli Autori hanno seguito il percorso storico che prevede la suddivisione dei contenuti nelle tre classi fondamentali: conduzione, convezione e irraggiamento. I singoli capitoli sono in larga misura autosufficienti per consentire l'utilizzo del testo nei percorsi didattici abbreviati. Allo stesso tempo, nella trattazione si è tenuto conto delle esigenze dello studio individuale, non sottintendendo gli sviluppi algebrici ma anzi proponendo numerosi esempi di applicazione completamente svolti. In questo modo il testo può essere utilizzato anche a livello professionale, ad esempio come guida nell'analisi di problemi complessi, introduzione all'impiego dei codici di calcolo commerciali o come ausilio indispensabile per i tecnici che, oltre ad applicare le normative termotecniche, desiderano approfondire le basi fisiche sulle quali le normative stesse si fondano. Ristampa della quarta edizione.

GIANNI COMINI, già professore ordinario di Fisica tecnica nelle università di Trieste e Udine dal 1975 al 2010, dal 2010 è direttore del Dipartimento di energia e ambiente del Centro Internazionale per le Scienze Meccaniche (CISM) di Udine.

GIOVANNI CORTELLA è professore associato di Fisica tecnica presso l'Università di Udine e si occupa di sistemi per la refrigerazione e di scambio termico.

libreriauniversitaria.it
edizioni

€ 29,90



Gianni Comini, Giovanni Cortella – FONDAMENTI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

libreriauniversitaria.it

Biblioteca
Contemporanea

**Gianni Comini,
Giovanni Cortella**

FONDAMENTI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

Le informazioni che si ottengono dagli studi di trasmissione del calore trovano applicazione in tutti i settori dell'ingegneria. I problemi da risolvere riguardano essenzialmente la previsione dei campi di temperatura e la determinazione dei flussi termici anche se, abbastanza spesso, è richiesto il calcolo di altre grandezze caratteristiche dei processi di scambio, come le portate e le perdite di carico.

libreriauniversitaria.it
edizioni

FONDAMENTI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

*Gianni Comini,
Giovanni Cortella*

libreriauniversitaria.it
edizioni

Proprietà letteraria riservata
© libreriauniversitaria.it Edizioni
TXT SpA, Padova, Italy

I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica, di riproduzione e di adattamento totale o parziale con qualsiasi mezzo (compresi i microfilm e le copie fotostatiche) sono riservati per tutti i Paesi.

Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta, distribuita o trasmessa in qualsivoglia forma senza l'autorizzazione scritta dell'Editore, a eccezione di brevi citazioni incorporate in recensioni o per altri usi non commerciali permessi dalla legge sul copyright. Per richieste di permessi contattare in forma scritta l'Editore al seguente indirizzo:
redazione@libreriauniversitaria.it

ISBN: 978-88-3359-479-8
Ristampa della quarta edizione: giugno 2022

Il nostro indirizzo internet è:
www.edizioni.libreriauniversitaria.it

Per segnalazioni di errori o suggerimenti relativi a questo volume potete contattare:

libreriauniversitaria.it Edizioni
TXT SpA (sede operativa)
Via Vincenzo Stefano Breda, 26
35010 - Limena PD
redazione@libreriauniversitaria.it

Prefazione

Il libro è la ristampa della quarta edizione, esaurita ma ancora molto richiesta, del volume “Fondamenti di Trasmissione del Calore”. L'impostazione è quella classica, fondata sui bilanci di massa, energia e quantità di moto. Nell'esposizione, si è seguito il percorso storico che prevede la suddivisione dei contenuti nelle tre classi fondamentali: conduzione, convezione ed irraggiamento. I singoli capitoli sono, in larga misura, autosufficienti e ciò facilita, nelle lauree triennali, l'individuazione di percorsi didattici abbreviati che possono comprendere solo gli argomenti funzionali rispetto alle esigenze didattiche dei corsi. Allo stesso tempo, nella trattazione si è cercato di agevolare lo studio individuale, non sottintendendo gli sviluppi algebrici e proponendo numerosi esempi di applicazione completamente svolti, al fine di illustrare la “teoria” ed abituare alla formulazione di “modelli di soluzione”. In questo modo il testo può essere utilizzato anche a livello professionale, ad esempio come “guida” all'analisi di problemi complessi, “introduzione” all'impiego dei codici di calcolo commerciali o, più semplicemente, come ausilio indispensabile per i tecnici che, oltre ad applicare le normative termotecniche, desiderino approfondire le basi fisiche sulle quali le normative stesse si fondano.

Con maggiore dettaglio, i contenuti si possono così riassumere:

- *Il primo capitolo consente di acquisire, fin dall'inizio, i concetti di base sui tre meccanismi principali di scambio termico: la conduzione, la convezione e l'irraggiamento.*
- *Il secondo capitolo illustra i metodi numerici utilizzabili per la determinazione delle distribuzioni di temperatura nei processi di conduzione in regime stazionario e transitorio.*
- *Il terzo ed il quarto capitolo illustrano le principali soluzioni analitiche disponibili in letteratura per i problemi di conduzione facendo*

riferimento, rispettivamente, al regime stazionario ed a quello transitorio.

- *Nel quinto capitolo sono trattati i problemi connessi alla determinazione del campo di moto e del campo termico nei processi di convezione, ricavando le equazioni del moto e dell'energia e descrivendo, dal punto di vista degli utenti, le procedure di soluzione impiegate nei codici di calcolo commerciali.*
- *Nel sesto capitolo si è introdotto il concetto di strato limite e si sono ricavati su basi fisiche i parametri adimensionali che condizionano lo sviluppo degli strati limite dinamico e termico illustrando, con l'ausilio di esempi numerici, le procedure di calcolo per la determinazione dei coefficienti di attrito e di scambio termico nella convezione forzata esterna.*
- *Il settimo e l'ottavo capitolo si occupano, rispettivamente, della convezione forzata interna e della convezione naturale.*
- *Nel nono capitolo sono trattati i problemi di scambio termico durante l'ebollizione e la condensazione.*
- *Nel decimo capitolo sono illustrate le tipologie di scambiatori più diffuse e sono discussi gli aspetti termici legati alla progettazione ed all'impiego degli scambiatori di calore a superficie.*
- *L'undicesimo e il dodicesimo capitolo sono dedicati all'illustrazione degli scambi termici per irraggiamento che hanno luogo, rispettivamente, tra le superfici e nei materiali semitrasparenti come vetro e plastica.*
- *Infine, per dare una base concettuale solida ed univoca allo studio dei processi di diffusione dell'umidità e degli scambi termici convettivi che coinvolgono l'aria umida, si è dedicato l'intero capitolo tredicesimo ai problemi di trasporto di massa.*

*Gianni Comini e Giovanni Cortella
Udine, giugno 2022.*

INDICE

CAPITOLO 1

MODALITÀ DI SCAMBIO TERMICO

1.1 GENERALITÀ	pag.	1
1.2 SCAMBI DI ENERGIA	«	2
1.3 CONDUZIONE	«	5
1.3.1 Mezzi Anisotropi	«	9
1.3.2 Gradiente in Coordinate non Cartesiane	«	10
1.4 CONDUTTIVITÀ TERMICA	«	13
1.4.1 Solidi	«	13
1.4.2 Fluidi	«	14
1.5 CONVEZIONE	«	15
1.6 IRRAGGIAMENTO	«	21
1.7 COMBINAZIONE DI PIÙ MECCANISMI	«	24
1.7.1 Scambio Termico nei Materiali da Costruzione ed Isolanti	«	25
1.8 CONCLUSIONI	«	26

CAPITOLO 2

EQUAZIONI DELLA CONDUZIONE

2.1 GENERALITÀ	«	29
2.2 EQUAZIONI DELLA CONDUZIONE	«	30
2.2.1 Espressioni del Laplaciano in Coordinate Cartesiane	«	33
2.2.2 Espressioni del Laplaciano in Coordinate Cilindriche	«	36
2.2.3 Espressioni del Laplaciano in Coordinate Sferiche	«	37
2.2.4 Condizioni al Contorno e Condizioni Iniziali	«	37
2.3 METODI NUMERICI	«	46
2.3.1 Regime Stazionario	«	52
2.3.2 Regime Transitorio	«	54
2.4 CONCLUSIONI	«	58

CAPITOLO 3**CONDUZIONE IN REGIME STAZIONARIO**

3.1 GENERALITÀ	pag.	59
3.2 PARETI PIANE MONOSTRATO	«	59
3.2.1 Coefficiente di Trasmissione Globale per lo Strato Piano	«	62
3.2.2 Conduttività Termica Dipendente dalla Temperatura	«	65
3.2.3 Numero di Biot	«	66
3.3 PARETI PIANE MULTISTRATO	«	67
3.4 PARETI CILINDRICHE MONOSTRATO	«	70
3.4.1 Coefficiente di Trasmissione Globale per lo Strato Cilindrico	«	75
3.5 PARETI CILINDRICHE MULTISTRATO	«	79
3.5.1 Raggio Critico di Isolamento	«	83
3.6 SUPERFICI ALETTATE	«	85
3.6.1 Distribuzione di Temperatura nelle Alette Piane	«	85
3.6.2 Efficienza delle Alette	«	91
3.6.3 Batterie Alettate	«	95
3.7 GENERAZIONE INTERNA DI CALORE	«	99
3.7.1 Generazione Interna di Calore in uno Strato Piano	«	100
3.7.2 Generazione Interna di Calore in una Barra Cilindrica	«	103
3.8 CONDUZIONE BIDIMENSIONALE IN REGIME STAZIONARIO	«	106
3.8.1 Soluzione Analitica Esatta di un Problema Bidimensionale	«	107
3.8.2 Fattori di Forma	«	111
3.9 CONCLUSIONI	«	114

CAPITOLO 4**CONDUZIONE IN REGIME TRANSITORIO**

4.1 GENERALITÀ	«	115
4.2 SCHEMATIZZAZIONE	«	116
4.3 RESISTENZA INTERNA TRASCURABILE	«	117
4.4 RESISTENZA INTERNA NON TRASCURABILE	«	124
4.4.1 Transitorio Termico in Geometrie Monodimensionali	«	125
4.4.2 Diagrammi per la Conduzione in Regime Transitorio	«	130
4.4.3 Soluzioni Approssimate	«	147
4.4.4 Transitorio Termico in Geometrie Multidimensionali	«	151

4.5 CORPO SEMINFINITO	pag.	154
4.5.1 Variazione a Gradino della Temperatura in Superficie	«	155
4.5.2 Variazione Sinusoidale della Temperatura in Superficie	«	163
4.6 CONDUZIONE CON CAMBIAMENTO DI FASE	«	168
4.7 CONCLUSIONI	«	174

CAPITOLO 5

EQUAZIONI DELLA CONVEZIONE

5.1 GENERALITÀ	«	177
5.2 CONSERVAZIONE DELLA MASSA	«	177
5.3 CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA	«	180
5.3.1 Equazione dell'Energia in Forma Completa	«	183
5.3.2 Condizioni al Contorno e Condizioni Iniziali per l'Equazione dell'Energia	«	184
5.3.3 Coefficiente di Convezione	«	186
5.4 CONSERVAZIONE DELLA QUANTITÀ DI MOTO	«	187
5.4.1 Equazioni di Navier	«	187
5.4.2 Leggi di Stokes	«	193
5.4.3 Viscosità dei Fluidi	«	201
5.4.4 Equazioni di Navier-Stokes	«	203
5.4.5 Equazioni di Navier-Stokes in Convezione Naturale	«	206
5.4.6 Condizioni al Contorno e Condizioni Iniziali per le Equazioni di Navier-Stokes	«	208
5.5 CONVEZIONE TURBOLENTA	«	209
5.5.1 Equazione Media Temporale della Continuità	«	212
5.5.2 Equazione Media Temporale dell'Energia	«	212
5.5.3 Equazioni Medie Temporali di Navier-Stokes	«	215
5.6 PROCEDURE DI SOLUZIONE NUMERICA	«	219
5.7 CONCLUSIONI	«	220

CAPITOLO 6

CONVEZIONE FORZATA ESTERNA

6.1 GENERALITÀ	«	223
6.2 STRATO LIMITE LAMINARE	«	224
6.2.1 Numero di Nusselt	«	228

6.3 EQUAZIONI DELLO STRATO LIMITE LAMINARE ...	pag.	232
6.3.1 Continuità	«	234
6.3.2 Conservazione della Quantità di Moto	«	235
6.3.3 Conservazione dell'Energia	«	241
6.4 ADIMENSIONALIZZAZIONE DELLE EQUAZIONI DELLO STRATO LIMITE	«	244
6.4.1 Numeri di Reynolds e Prandtl	«	245
6.4.2 Convezione Forzata Laminare su una Lastra Piana	«	247
6.5 STRATO LIMITE TURBOLENTO	«	253
6.5.1 Viscosità Cinematica Turbolenta	«	254
6.5.2 Diffusività Termica Turbolenta	«	258
6.5.3 Analogia tra Convezione ed Attrito	«	262
6.5.4 Convezione Forzata Turbolenta su una Lastra Piana	«	264
6.5.5 Analisi delle Correlazioni per una Lastra Piana	«	265
6.6 SEPARAZIONE DELLO STRATO LIMITE	«	266
6.6.1 Convezione Forzata nel Deflusso Trasversale a Superfici Cilindriche	«	270
6.7 PROCEDURA DI CALCOLO	«	272
6.8 CONCLUSIONI	«	278
 CAPITOLO 7		
CONVEZIONE FORZATA INTERNA		
7.1 GENERALITÀ	«	279
7.2 CAMPO DI MOTO	«	280
7.3 PERDITE DI CARICO	«	285
7.3.1 Perdite di Carico Distribuite	«	286
7.3.2 Perdite di Carico Localizzate	«	293
7.4 CAMPO TERMICO	«	296
7.4.1 Valutazione dei Flussi Termici	«	297
7.4.2 Campo Termico Completamente Sviluppato	«	299
7.4.3 Sviluppo del Campo Termico in Regime Laminare	«	304
7.4.4 Sviluppo del Campo Termico in Regime Turbolento	«	306
7.4.5 Influenza della Rugosità	«	307
7.5 DIAMETRO IDRAULICO	«	307
7.6 PROCEDURA DI CALCOLO	«	309

7.7 CONCLUSIONI	pag. 318
------------------------------	----------

CAPITOLO 8

CONVEZIONE NATURALE

8.1 GENERALITÀ	« 319
8.2 EQUAZIONI DELLA CONVEZIONE NATURALE	« 320
8.3 ADIMENSIONALIZZAZIONE DELLE EQUAZIONI DELLA CONVEZIONE NATURALE	« 324
8.3.1 Numeri di Grashof e Rayleigh	« 327
8.3.2 Strato Limite Turbolento	« 332
8.4 CORRELAZIONI PER LA CONVEZIONE NATURALE ESTERNA	« 334
8.4.1 Convezione Naturale su una Lastra Piana Verticale	« 336
8.4.2 Convezione Naturale su una Lastra Piana Orizzontale	« 338
8.4.3 Convezione Naturale su Cilindri Orizzontali Lunghi	« 342
8.5 CONVEZIONE NATURALE IN CAVITÀ CHIUSE	« 345
8.6 CONVEZIONE MISTA	« 350
8.7 CONCLUSIONI	« 354

CAPITOLO 9

EBOLLIZIONE E CONDENSAZIONE

9.1 GENERALITÀ	« 355
9.2 FENOMENOLOGIA DELL'EBOLLIZIONE	« 355
9.2.1 Equilibrio di una Bolla	« 356
9.2.2 Formazione e Distacco di una Bolla	« 359
9.3 EBOLLIZIONE NEI LIQUIDI IN QUIETE	« 361
9.3.1 Coefficiente di Scambio Termico nell'Ebollizione a Nuclei	« 364
9.3.2 Flusso Termico Massimo nell'Ebollizione a Nuclei	« 365
9.4 EBOLLIZIONE IN CONVEZIONE FORZATA	« 368
9.4.1 Coefficiente di Scambio Termico nell'Ebollizione in Convezione Forzata	« 372
9.4.2 Flusso Termico Massimo nell'Ebollizione in Convezione Forzata	« 378
9.5 FENOMENOLOGIA DELLA CONDENSAZIONE	« 379
9.6 CONDENSAZIONE ESTERNA	« 380
9.6.1 Influenza degli Incondensabili	« 387

9.6.2 Influenza della Velocità del Vapore	pag. 388
9.7 CONDENSAZIONE INTERNA	« 391
9.8 PERDITE DI CARICO NEL MOTO BIFASE	« 394
9.9 CONCLUSIONI	« 394

CAPITOLO 10

SCAMBIATORI DI CALORE

10.1 GENERALITÀ	« 397
10.2 CLASSI DI SCAMBIATORI	« 398
10.3 PROGETTAZIONE DEGLI SCAMBIATORI	« 404
10.3.1 Andamenti delle Temperature negli Scambiatori in Equicorrente e Controcorrente	« 406
10.3.2 Differenza di Temperatura Media Logaritmica	« 411
10.3.3 Scambiatori a Passaggi Multipli ed a Correnti Incrociate	« 416
10.4 EFFICIENZA DEGLI SCAMBIATORI	« 422
10.4.1 Efficienza degli Scambiatori in Equicorrente e Controcorrente	« 424
10.4.2 Efficienza degli Scambiatori a Passaggi Multipli ed a Correnti Incrociate	« 430
10.4.3 Relazione tra Efficienza e Fattore di Correzione	« 436
10.5 CONCLUSIONI	« 437

CAPITOLO 11

IRRAGGIAMENTO TERMICO

11.1 GENERALITÀ	« 439
11.2 FISICA DELLA RADIAZIONE	« 440
11.3 GRANDEZZE FONDAMENTALI	« 441
11.3.1 Radiazione Emessa	« 442
11.3.2 Irradianza e Radiosità	« 446
11.4 RADIAZIONE DEL CORPO NERO	« 450
11.4.1 Leggi di Emissione del Corpo Nero	« 451
11.4.2 Calcolo della Radiazione di Corpo Nero	« 455
11.5 SUPERFICI REALI	« 458
11.5.1 Emissività	« 458
11.5.2 Coefficiente di Assorbimento	« 461
11.5.3 Legge di Kirchhoff	« 462

11.5.4 Coefficienti di Riflessione e Trasmissione	pag.	467
11.5.5 Corpo Grigio	«	471
11.6 SCAMBIO TERMICO RADIATIVO	«	472
11.6.1 Fattori di Vista	«	472
11.6.2 Relazioni tra i Fattori di Vista per più di due Superfici	«	477
11.6.3 Scambio Termico Radiativo tra Superfici Nere	«	479
11.6.4 Flusso Netto Uscente da una Superficie Grigia	«	482
11.6.5 Scambio Termico Radiativo tra due Superfici Grigie	«	484
11.6.6 Irraggiamento in Cavità con due Superfici Grigie	«	485
11.6.7 Irraggiamento in Cavità con più Superfici Grigie	«	493
11.7 EMISSIONE ED ASSORBIMENTO DI GAS		
E FIAMME	«	502
11.7.1 Scambio Termico Radiativo nei Gas	«	502
11.7.2 Scambio Termico Radiativo nelle Fiamme	«	506
11.8 CONCLUSIONI	«	507
<i>CAPITOLO 12</i>		
<i>RADIAZIONE NEI MATERIALI SEMITRASPARENTI</i>		
12.1 GENERALITÀ	«	509
12.2 PROPAGAZIONE	«	510
12.2.1 Materiali Semitrasparenti	«	511
12.2.2 Polarizzazione.....	«	516
12.3 RIFLESSIONE E RIFRAZIONE	«	518
12.3.1 Coefficienti di Riflessione	«	522
12.4 LASTRE TRASPARENTI	«	525
12.4.1 Lastra Singola.....	«	527
12.4.2 Calcolo di una Lastra Singola.....	«	530
12.4.3 Rivestimenti Sottili	«	533
12.5 VETRATE PER L'EDILIZIA.....	«	540
12.5.1 Sistema di due Lastre.....	«	541
12.5.2 Calcolo di una Vetrata Doppia	«	544
12.5.3 Fattore Solare.....	«	548
12.6 COPERTURE DEI PANNELLI SOLARI	«	550
12.6.1 Pannelli Solari Termici	«	551
12.6.2 Pannelli Solari Fotovoltaici.....	«	553

12.7 CONCLUSIONI	pag. 555
-------------------------------	----------

CAPITOLO 13

TRASPORTO DI MASSA

13.1 GENERALITÀ	« 557
13.2 LEGGI DELLA DIFFUSIONE	« 558
13.3 EQUAZIONI DELLA DIFFUSIONE	« 561
13.3.1 Condizioni al Contorno e Condizioni Iniziali	« 564
13.4 DIFFUSIONE DEL VAPORE NEI MATERIALI DA COSTRUZIONE	« 566
13.4.1 Analisi Termoigrometriche delle Pareti Edilizie	« 568
13.5 CONSERVAZIONE DI UNA SPECIE CHIMICA	« 576
13.5.1 Strato Limite Laminare	« 577
13.5.2 Numero di Sherwood	« 579
13.5.3 Conservazione di una Specie nello Strato Limite	« 580
13.5.4 Numeri di Schmidt e Lewis	« 581
13.5.5 Analogia tra Convezione di Calore e di Massa	« 582
13.6 CONVEZIONE SIMULTANEA DI CALORE E DI MASSA	« 584
13.6.1 Temperatura di Bulbo Bagnato	« 584
13.6.2 Raffreddamento con Deumidificazione	« 587
13.7 CONCLUSIONI	« 589

APPENDICI

A.1 Proprietà termofisiche dell'aria	« 592
A.2 Proprietà termofisiche dell'acqua	« 594
A.3 Proprietà termofisiche dell'R-134a	« 597
A.4 Proprietà termofisiche dei materiali solidi	« 598
A.5 Proprietà termofisiche dei liquidi	« 600
A.6 Radiazione del corpo nero	« 601
A.7 Funzioni matematiche	« 602

BIBLIOGRAFIA	« 605
---------------------------	-------

INDICE ANALITICO	« 609
-------------------------------	-------