

A. CACCIATORE - E. STOCCHI

IMPIANTI CHIMICI INDUSTRIALI

Volume Secondo



edisco

ALFONSO CACCIATORE

EUGENIO STOCCHI

IMPIANTI CHIMICI INDUSTRIALI

TEORIA E PRATICA

VOLUME SECONDO



edisco

PRESENTAZIONE

Si completa con la pubblicazione di questo secondo volume del testo di istituzioni e d'esercitazioni di calcolo d'IMPIANTI CHIMICI INDUSTRIALI il trittico editoriale destinato dalla Casa Editrice «EDISCO» all'insegnamento dell'impiantistica chimica nelle scuole italiane che vi sono interessate.

Presentandone, come qui si fa, l'ultimo componente, si può tracciare un retrospettivo quadro dell'intera opera, il cui spirito rivive quello che anima l'insegnamento che essa serve.

Lo studio scolastico dell'impiantistica chimica persegue principalmente gli scopi d'indirizzare a rappresentare graficamente strutture d'insieme e particolari dei componenti impiantistici ed a capire i principi di funzionamento delle apparecchiature da cui sono composti gli impianti chimici. Si tratta perciò di scienza e di tecnica interdisciplinare: richiedendosi per il suo proficuo studio conoscenze dei processi di chimica serviti, di fisica generale e tecnica, di tecnologia, di chimicafisica e di grafica; in un contesto di sicuro possesso concettuale operativo degli algoritmi di supporto.

Presupponendo astrattamente che questo cospicuo insieme di nozioni siano possedute dagli allievi cui i testi si indirizzano, cioè muovendosi nell'ottica degli operatori del settore (addetti alla conduzione ed alla manutenzione degli impianti o progettisti impiantistici), si arriva solo ad elaborare aridi soliloqui riproducenti le conoscenze settoriali degli autori: privilegiando chiaramente le parti attinenti la loro specifica attività e perciò avulsi dalla realtà scolastica.

Per un insegnamento efficace occorre invece, tenendo costantemente conto del grado d'istruzione acquisito parallelamente all'uso di quest'opera nella scuola dai suoi destinatari, saper legare, integrare ed adattare i supporti culturali che stanno a base della comprensione del discorso scientifico e tecnico dell'insegnamento dell'impiantistica chimica.

Tutto quel che ora s'è detto è quanto si è costantemente curato di fare in tutti i componenti dell'opera che questa pubblicazione conclude:

— aborrendo in modo rigoroso dal ridurre la materia ad arida tecnologia di fabbrica chimica;

— mantenendo vivo e razionalmente coordinato con le materie di supporto e di complemento il discorso, così da stimolare l'attenta partecipazione degli studenti ad esso e rendendone possibile una piana recezione;

— avendo il senso del limite: cioè la consapevolezza che un testo scolastico non può proporsi a manuale di progettazione d'alcun genere d'impianti, se pur si muove nell'ottica di indurre predisposizione ad un tal genere d'allettante attività.

Sono questi pregi di essa le peculiarità conferite all'opera dall'essere stata concepita, redatta e lungamente sperimentata proprio nel mondo del vivo insegnamento scolastico; senza mai disdegnare i confronti d'idee e d'esperienze e facendo tesoro d'ogni suggerimento e consiglio.

Ai Colleghi docenti, cui è affidato il compito della formazione dei nuovi quadri operativi intermedi (ed in prospettiva dirigenziali) della rinascite industria chimica italiana, si affidano nello spirito di collegialità in cui — come si è detto sopra — essa è stata realizzata le sorti di quest'opera; in attesa di altri illuminanti consigli che valgano a sempre meglio metterla in grado di rispondere efficacemente ai suoi peculiari compiti.

Alfonso Cacciatore

INDICE SISTEMATICO

PRESENTAZIONE	Pag.	5
INDICE DEI CAPITOLI	»	7

1 | TRASMISSIONE DEL CALORE..... Pag. 9

1.1 Generalità	»	9
----------------------	---	---

PARTE PRIMA

CASI TIPICI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

2.1 Suddivisione dei metodi di trasmissione	Pag.	10
3.1 Conduzione e conducibilità interna	»	10
Caso di parete unica		
Caso di più pareti		
Caso di cilindro cavo		
4.1 Esercizi applicativi	»	16
5.1 Convezione	»	19
6.1 Irraggiamento	»	23
7.1 Conducibilità esterna (convezione + irraggiamento)	»	24
8.1 Trasmissione del calore per miscelazione	»	25
9.1 Esercizi e complementi	»	26

PARTE SECONDA

LA TRASMISSIONE DEL CALORE NEL SUO INSIEME

10.1 Trasmissione tra due fluidi in quiete	Pag.	28
11.1 Trasmissione tra due fluidi in movimento	»	30
12.1 Calcolo di uno scambiatore di calore	»	32
Bilancio termico		
Superficie di scambio e numero di tubi		
13.1 Coefficiente di trasmissione ed effetto delle incrostazioni	»	35

PARTE TERZA
LA PRODUZIONE E IL TRASPORTO DEL CALORE

14.1	Metodo diretto e indiretto di cessione del calore	Pag.	36
15.1	I veicoli del calore utilizzati dalla tecnica	»	37
16.1	Elementi di tecnologia chimica del calore	»	38
	Espressione e tabulazione dei calori coinvolti dalla combustione		
	Volume teorico ed effettivo di aria necessaria alla combustione		
	Composizione percentuale dei fumi		
	Calori sensibili		
	Temperatura teorica dei fumi		
17.1	Caratteristiche del vapor saturo	»	47

PARTE QUARTA
GLI SCAMBIATORI DI CALORE E L'ISOLAMENTO TERMICO

18.1	Suddivisione degli scambiatori di calore	Pag.	50
19.1	Refrigeranti a pioggia	»	51
20.1	Scambiatori propriamente detti	»	52
21.1	Condensatori	»	56
22.1	Refrigeranti ad aria	»	58
23.1	Isolamenti termici	»	58
	Determinazione dello spessore di isolante che risulta economicamente più conveniente		
24.1	Esercizi e complementi di ricapitolazione	»	61
	Sul calcolo di massima d'uno scambiatore di calore		
	Calcoli applicativi sull'energia calorifica da combustione e su fattori e conseguenze della combustione		

2 | EVAPORAZIONE Pag. 71

1.2	Generalità operative, fenomenologia e valutazione del processo d'evaporazione	»	71
	All'esterno dei tubi		
	All'interno dei tubi		
2.2	Considerazioni teoriche	»	72
	Equilibrio liquido-vapore. Equazione di Clapeyron		
	Regola di Trouton		
	Effetti ebullioscopici nelle soluzioni acquose. Vapore surriscaldato		
	Regola di Dürhing		

3.2	Calcolo degli evaporatori a semplice effetto	Pag. 76
	Bilancio ponderale	
	Bilancio termico	
	Calcolo della superficie evaporante	
4.2	Suddivisione degli evaporatori	» 80
5.2	Evaporatori a circolazione naturale	» 80
	Evaporatore a tubi orizzontali con vapore all'interno dei tubi	
	Evaporatore a tubi orizzontali con vapore esterno ai tubi	
	Evaporatore verticale a tubi corti	
	Evaporatore verticale a tubi lunghi, tipo Kestner	
6.2	Evaporatori a circolazione forzata	» 85
	Evaporatore con elemento riscaldante esterno	
	Evaporatore con elemento riscaldante interno	
7.2	Evaporazione sotto vuoto	» 86
	Apparecchi evaporatori per «sotto vuoto»	
8.2	Evaporazione a multipli effetti	» 90
9.2	Classificazione e calcolo di massima di multipli effetti	» 93
10.2	Evaporazione mediante termocompressione	» 96
11.2	Apparecchi complementari degli impianti di evaporazione	» 98
	Condensatori	
	Scaricatori di condensa	
12.2	Esercizi e complementi	» 102
	Bilancio di materia in processo d'evaporazione	
	Calcolo di un evaporatore a fascio tubiero verticale corto con tubo di ritorno e funzionante a pressione atmosferica	
	Calcolo di massima di un multiplo effetto a 3 corpi in equicorrente	

3 | CRISTALLIZZAZIONE Pag. 109

1.3	Natura e collocazione impiantistica della cristallizzazione	» 109
2.3	I modi di portare una qualunque soluzione in «condizioni di cristallizzabilità»	» 109
3.3	Scelta del metodo usato per portare a cristallizzabilità una soluzione	» 112
4.3	Dipendenza dalla temperatura della solubilità e sua probabilità termodinamica	» 114
5.3	Come provocare cristallizzazione	» 116
6.3	Sviluppo dei cristalli e riciclo delle acque madri	» 117
7.3	Calcolo del prodotto cristallizzato e resa del processo	» 118
8.3	Suddivisione degli apparecchi per cristallizzazione	» 119
9.3	Cristallizzatori a raffreddamento	» 120
10.3	Cristallizzatori ad evaporazione	» 121
11.3	Cristallizzatori sotto vuoto	» 123
12.3	Esercizi e complementi sulla cristallizzazione	» 124

4 | DISTILLAZIONE E RETTIFICA Pag. 127

1.4	Distillazione ed evaporazione	»	127
2.4	Equilibrio tra liquidi e vapori	»	128
3.4	Metodi di distillazione	»	128
4.4	Tensione di vapore ed ebollizione	»	129
5.4	Modifiche del punto di ebollizione	»	130
6.4	Miscelanze di liquidi reciprocamente miscibili	»	131
7.4	Miscele di liquidi assolutamente immiscibili	»	132
8.4	Miscele di liquidi parzialmente miscibili	»	133
9.4	Espressioni delle frazioni molari del componente più volatile all'equilibrio	»	134
10.4	Metodo grafico atto al calcolo delle frazioni molari	»	136
	Diagramma temperature-tensione di vapore		
	Curva di equilibrio		
11.4	Variazione della curva di equilibrio	»	138
12.4	Curve di ebollizione e di rugiada	»	139
13.4	Principi base dei processi di distillazione e di condensazione frazionata	»	141
14.4	Curve di equilibrio anomale	»	143
	Miscele con punto di ebollizione minimo		
	Miscele con punto di ebollizione massimo		
15.4	Distillazione flash o di equilibrio	»	146
16.4	Distillazione semplice o differenziale	»	148
	1° caso		
	2° caso		
17.4	Distillazione per rettifica: generalità	»	151
18.4	La colonna di rettifica: caratteristiche costruttive e funzionamento	»	151
19.4	Teoria della colonna di rettifica	»	155
	Retta superiore di lavoro o «di arricchimento»		
	Retta inferiore di lavoro o «di esaurimento»		
	Bilancio termico e ponderale di un piatto		
	Grafico della retta superiore e piatti della colonna di arricchimento		
	Condizioni termiche dell'alimentazione. Definizione di q		
	La retta q e sua rappresentazione grafica		
	Rapporto di riflusso ed inclinazione della retta superiore di lavoro		
	Condizioni di massimo riflusso		
	Condizioni di riflusso minimo		
	Condizioni di riflusso effettivo		
	Valutazione del rapporto di riflusso economicamente più conveniente		
	Tracciamento delle rette effettive di lavoro		
	Numero di piatti effettivi		

20.4	Bilanci ponderale e termico della colonna di rettifica	»	176
	Bilancio ponderale		
	Bilancio termico		
21.4	Determinazione dell'altezza e del diametro della colonna di rettifica		Pag. 179
	Distanza tra i piatti e velocità dei vapori		
	Altezza e diametro della colonna		
22.4	Calcoli inerenti agli apparecchi complementari di una colonna di rettifica	»	181
	Determinazione della superficie del bollitore di base		
	Determinazione della superficie del condensatore		
	Determinazione del consumo di acqua nel condensatore		
	Superficie di scambio e consumo d'acqua per refrigerare il distillato		
23.4	Considerazioni generali sul funzionamento di una colonna di rettifica	»	183
	Ingresso dell'alimentazione e suo preriscaldamento		
	Regolazione del riflusso		
	Modi di condensare i vapori di testa		
24.4	Regolazione della colonna di frazionamento	»	187
25.4	Tipi particolari di colonne di rettifica	»	189
	Colonna a funzionamento discontinuo		
	Colonna di esaurimento		
	Colonna di rettifica a riempimento		
26.4	Tecniche particolari di distillazione	»	197
	Distillazione estrattiva		
	Distillazione azeotropica		
	Distillazione in corrente di vapore		
	Distillazione di miscugli a più componenti miscibili		
27.4	Esercizi e complementi	»	206
	Calcolo di variabili in una distillazione flash		
	Calcolo di massima di una colonna di rettifica		
	Sulla distillazione in corrente di vapore		
5	IGROMETRIA DELL'ARIA		Pag. 215
1.5	Introduzione all'argomento	»	215
2.5	Definizione di alcune grandezze fondamentali	»	215
	Umidità assoluta		
	Umidità di saturazione		
	Umidità relativa		
3.5	Diagrammi temperatura-umidità	»	218
	Diagramma temperatura-umidità di saturazione dell'aria		
	Diagramma temperatura-umidità assoluta, in funzione anche dell'umidità relativa		
4.5	Altre grandezze interessanti l'igrometria dell'aria	»	219
	Volumi specifici dell'aria		
	Calore specifico umido		

5.5	Temperature interessanti l'igrometria	Pag. 222
	Temperatura di rugiada	
	Temperatura a bulbo secco	
	Temperatura a bulbo umido	
6.5	Rette di raffreddamento adiabatico	» 224
7.5	L'uso del diagramma igrometrico	» 227
8.5	Metodi per rendere l'aria essiccative	» 229
	Riscaldamento dell'aria	
	Raffreddamento dell'aria e successivo riscaldamento	
	Passaggio dell'aria attraverso un mezzo disidratante	
9.5	Metodi per umidificare l'aria	» 233
	Aggiunta di una quantità prestabilita di vapor d'acqua	
	Aggiunta di aria umida	
	Contatto diretto aria-acqua	
10.5	Raffreddamento dell'acqua per evaporazione	» 235
11.5	Integrazioni teoriche ed esercizio complementare	» 236
	Teoria del calcolo della portata del fluido refrigerante e della superficie di scambio	
	Esempio applicativo	

6 | **ESSICCAMENTO** Pag. 239

1.6	Generalità sull'essiccamento	» 239
2.6	Considerazioni sui fenomeni fisici coinvolti dall'essiccamento ...	» 240
	Curva caratteristica dell'umidità di equilibrio	
	Curva di essiccazione	
	Conclusione sui fattori che influenzano l'essiccamento	
3.6	Calcoli relativi all'essiccamento diretto	» 243
	Bilancio ponderale	
	Bilancio termico	
4.6	Applicazione del diagramma igrometrico ad un processo di essiccamento	» 246
5.6	Generalità sugli apparecchi usati per l'essiccamento	» 248
6.6	Essiccatori ad armadio con ripiani	» 249
7.6	Essiccatori a turbina	» 251
8.6	Essiccatori per granulati e pezzame inagglomerabili	» 253
	Essiccatore Huillard	
	Essiccatore a tamburo	
9.6	Essiccatori a letto fluido	» 255
10.6	Essiccatori a polverizzazione	» 256
11.6	Essiccatori a cilindri	» 258
12.6	Essiccatori sotto vuoto	» 260
13.6	Il processo di liofilizzazione	» 261
14.6	Esercizi e complementi	» 262

7 | ESTRAZIONE CON SOLVENTI Pag. 265

1.7	Generalità sui «processi d'estrazione»	»	265
-----	--	---	-----

PARTE PRIMA

ESTRAZIONE LIQUIDO-LIQUIDO

2.7	Applicazioni, qualità dei solventi ed operazioni del processo	Pag.	266
3.7	La legge base del processo d'estrazione liquido-liquido	»	268
4.7	Per studiare processi estrattivi occorrono diagrammi ternari	»	268
5.7	Sfruttamento delle singolari proprietà dei triangoli equilateri per studiare sistemi ternari	»	270
6.7	Rappresentazioni grafiche in relazione alle diverse condizioni di miscibilità	»	273
	Caso di miscibilità completa del componente A nei componenti, tra loro solo parzialmente miscibili, B e C		
	Caso di miscibilità completa tra A e B, parziale tra A e C e pure parziale tra B e C		
	Parziale miscibilità di ogni componente in ciascuno degli altri due		
7.7	Applicazione dei diagrammi ternari nell'operazione d'estrazione liquido-liquido e diagrammi d'equilibrio	»	277
	Estrazione a semplice stadio		
	Estrazione a multipli stadi in equicorrente		
	Estrazione a multipli stadi in controcorrente		
8.7	Generalità sugli apparecchi per l'estrazione liquido-liquido	»	283
9.7	Descrizione degli apparecchi	»	283
	Apparecchiature monostadio		
	Apparecchiature multistadio		
	Colonna a spruzzo		
	Colonna a riempimento		
	Colonna a piatti		

PARTE SECONDA

«LISCIVIAZIONE»

O ESTRAZIONE SOLIDO-LIQUIDO

10.7	Nozioni preliminari sul processo	Pag.	287
11.7	Applicazione dei metodi grafici all'estrazione solido-liquido	»	288
12.7	Diagramma triangolare isoterma per un estraibile solido	»	291
13.7	Diagramma triangolare isoterma per un estraibile liquido	»	292
14.7	Curva e rette di equilibrio nell'estrazione solido-liquido	»	293
15.7	Estrazione solido-liquido a multipli stadi in controcorrente	»	294

16.7	Apparecchi di lisciviazione	Pag. 296
	Apparecchi di «tipo A»	
	Apparecchi di «tipo B»	
17.7	Esercizi e complementi	» 303

8 | RICUPERO D'AERIFORMI MEDIANTE LAVAGGIO Pag. 307

1.8	Generalità sui processi di sottrazione di aeriformi a miscugli	» 307
2.8	Il lavaggio implica solo prevalentemente fenomeni d'assorbimento o d'assorbimento	» 308
3.8	Assorbimento in controcorrente ed in equicorrente; forza motrice del fenomeno d'assorbimento	» 309
4.8	Teoria analitica dell'assorbimento	» 311
5.8	Considerazioni pratiche sui processi d'assorbimento	» 314
6.8	Apparecchi usati per l'operazione di lavaggio	» 315
	Assorbitori a superficie	
	Assorbitore a cascata	
	Colonne a piatti	
	Colonne a riempimento: generalità	
7.8	Particolarità costruttive delle colonne e riempimento e loro impiego	» 318
8.8	Schemi di impianti di lavaggio	» 320
9.8	Esercizi e complementi	» 322

9 | ANTINFORTUNISTICA E IGIENE DEL LAVORO Pag. 325

PARTE PRIMA ANTINFORTUNISTICA

1.9	Concetto d'infortunio	Pag. 325
2.9	Il costo degli infortuni	» 326
3.9	Cause d'infortunio e prevenzione degli infortuni	» 326
4.9	Classificazione degli infortuni	» 329
	Classificazione per cause	
	Classificazione per sede e natura della lesione	
5.9	Compiti dei «preposti alla sicurezza»	» 330
6.9	Il programma di prevenzione diretta	» 333
	Provvedimenti «a priori»	
	Provvedimenti «a posteriori»	
7.9	Istruzione antinfortunistica del personale	» 334
	Corsi di formazione alla sicurezza dei capi	
	Istruzione antinfortunistica dei lavoratori	

8.9	La propaganda antinfortunistica	Pag. 335
	La cartellonistica a servizio della prevenzione degli infortuni	
	Concorsi ed esami antinfortunistici	
9.9	I mezzi personali di protezione	» 340
	Rischi e relativi mezzi di protezione	
	Scelta ed assegnazione dei mezzi di protezione	

PARTE SECONDA

IGIENE DEL LAVORO

10.9	Nozione e finalità dell'igiene del lavoro	Pag. 343
11.9	Requisiti degli ambienti di lavoro	» 343
	Altezza, cubatura e superficie	
	Pavimentazioni	
	Colorazione, ubicazione e ventilazione degli ambienti	
	Condizioni climatiche ed illuminazione	
	Condizioni acustiche	
12.9	Difesa dagli agenti nocivi	347
	Nozioni e mezzi protettivi	
	Valori limite di sostanze nocive nell'aria	
	Gas tossici	
	Radiazioni ionizzanti	

APPENDICE ED INDICI Pag. 353

A_1	Nomogramma per la determinazione delle temperature medie logaritmiche	» 355
A_2	Tabella entalpica	» 356
A_3	Calori di combustione dei composti organici tecnicamente più importanti	» 358
A_4	Temperatura teorica di combustione di alcune sostanze	» 359
A_5	Dati sull'aria ricorrenti in problemi	» 359
A_6	Calori specifici medi ad un'ATM di pressione assoluta dei prin- cipali gas	» 360
A_7	Prodotto $R \times T$ calcolato a diverse temperature	» 360
A_7	Calori molari medi ad una ATM di pressione assoluta dei princi- pali gas	» 361
A_8	Costante di Trouton per alcune sostanze	» 361
A_{10}	Curve di distillazione di importanti miscele binarie	» 362

A ₁₁	Disposizioni legali su utilizzabilità, detenzione e trasporto di tossici interessanti impiantistica chimica o parachimica	»	365
A ₁₂	Estratto del Decr. Pres. Rep. 8.6.1982 n. 524 concernente l'attuazione delle direttive CEE n. 77/576 e n. 79/640 per l'unificazione delle disposizioni legislative degli stati membri in materia di segnaletica di sicurezza sul posto di lavoro	»	366
A ₁₃	Diagramma igrometrico	»	368
INDICE ANALITICO			» 371
INDICE SISTEMATICO			» 375

1 | TRASMISSIONE DEL CALORE

1.1 Generalità

Il calore è una delle tante forme di energia, cioè rappresenta una delle possibilità che ha un corpo di eseguire lavoro. Secondo le vedute della scienza, l'energia calorifica s'identifica con il movimento cinetico delle particelle costituenti un corpo e la sua qualità, in ordine al potersi trasformare in lavoro, è proporzionale alla temperatura di quel corpo¹; sicché si può ritenere la temperatura *indice del contenuto di energia calorifica di un corpo*, intesa come capacità effettiva del calore di trasformarsi in lavoro in opportune condizioni. Così stando le cose, in quanto cioè la temperatura è indice del livello di energia calorifica di un corpo, si comprende facilmente che la possibilità di trasmettersi del calore da un corpo all'altro è condizionata al fatto che tra i due esista un differenza di temperatura.

Alcuni paragoni chiariranno ulteriormente questo punto.

La condizione essenziale perché in un conduttore si verifichi passaggio di energia elettrica è che sussista differenza di potenziale tra gli estremi di tale conduttore e perché l'energia idrica si manifesti a seguito del deflusso di un liquido tra due vasche deve esserci una differenza di livello geodetico nei due recipienti a pelo libero.

Ogni manifestazione energetica presuppone dunque un salto tra i valori della grandezza che misura il livello energetico iniziale e finale del sistema in cui l'energia si rivela; ecco qual è l'ufficio di ciò che comunemente viene definito «salto di temperatura» e che si ritiene indispensabile perché il calore possa trasmettersi da un corpo all'altro.

1. Il secondo principio della termodinamica infatti porta in linea di massima a stabilire che il rendimento di una macchina termica è dato da:

$$\eta = \frac{T_1 - T_0}{T_0}$$

donde si rileva che, a parità di temperatura ambiente (T_0), il rendimento stesso è tanto maggiore quanto più grande è la temperatura originale (ossia quanto più nobile è la *qualità del calore*) del corpo che produce il lavoro entro la macchina.

Lo scambio del calore è fenomeno di grande importanza in molti processi tecnologici: come nella calorificazione, nella termostatazione, nella distillazione e così via.

Noi divideremo in tre parti lo studio della «trasmissione del calore»: prima passeremo in rassegna alcuni casi tipici e particolari, poi considereremo il fenomeno nel suo insieme ed infine analizzeremo i principali fluidi utilizzati come veicoli di calore.

PARTE PRIMA

CASI TIPICI DI TRASMISSIONE DEL CALORE

2.1 Suddivisione dei metodi di trasmissione

I modi di trasmettere il calore che vogliamo prendere in considerazione sono i seguenti:

- a) conduzione o conducibilità interna,
- b) convezione,
- c) irraggiamento,
- d) conducibilità esterna (convezione + irraggiamento),
- e) miscelazione di fluidi.

Nel seguito studieremo approfonditamente ciascuna di queste maniere di trasmettersi del calore tra i vari corpi, rivestendo ciascuna un proprio importante ruolo nell'impiantistica chimica.

3.1 Conduzione o conducibilità interna

Questo modo di trasmissione è caratteristico dei corpi solidi, per quanto possa verificarsi anche nei liquidi e nei gas quando sono riscaldati dall'alto.

In questo caso il calore viene trasmesso per gli urti reciproci a cui danno luogo le vibrazioni delle particelle costituenti i corpi (ioni, atomi, molecole), senza che peraltro a ciò consegua il mescolarsi di tali particelle.

Caso di parete unica

Per studiare bene il fenomeno, riferiamoci prima a superficie piana («parete») di materiale omogeneo, di spessore s e con facce d'estensione S .

Se riscaldiamo una delle due facce e la portiamo ad una temperatura costante t_1 , notiamo che, passato un certo tempo, anche l'altra faccia si

riscalda e raggiunge, dopo un periodo d'assestamento, una temperatura costante t_2 (nel frattempo il calore è stato ovviamente trasmesso da una faccia all'altra attraverso la parete di spessore s).

Quando la temperatura si è stabilizzata sulle due facce si dice che siamo nelle *condizioni di regime*.

Riportando su un sistema di assi cartesiani in ordinate le temperature misurate in $^{\circ}\text{C}$ ed in ascisse gli spessori di materiale in metri², si ottiene graficamente l'andamento delle temperature coinvolte nel suddetto fenomeno (Fig. 1/1).

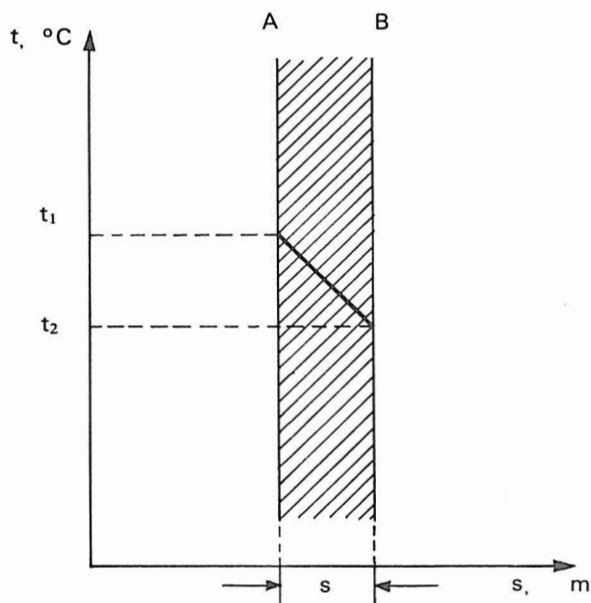


Fig. 1/1

La quantità di calore trasmessa dalla faccia A alla faccia B è data dalla seguente relazione («legge di Fourier»):

$$Q = \frac{C}{s} \cdot S \cdot (t_1 - t_2) \cdot \tau \quad (1_1)$$

dove i significati delle simbologie e le unità di misura delle grandezze rappresentate sono i seguenti:

Q = calore trasmesso in kcal;

τ = tempo misurato in ore;

S = superficie misurata in m²;

2. In tutti i diagrammi che seguono sulle ordinate e rispettivamente sulle ascisse appariranno queste grandezze misurate nelle unità ora specificate.

t_1, t_2 = temperature in °C delle facce in condizioni di regime;

s = spessore delle pareti in m;

C = coefficiente di conducibilità interna misurato in:

$$\frac{\text{kcal} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}} = \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{C} \cdot \text{h}}$$

Indicando con Δt il salto di temperatura $t_1 - t_2$ e, considerando genericamente le calorie trasmesse nell'unità di tempo, cioè in un'ora, la (1₁) può essere anche scritta sotto forma:

$$Q = \frac{C}{S} \cdot S \cdot \Delta t, \text{ in } \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \quad (1_1)$$

Il coefficiente C di conducibilità interna dipende non solo dalla natura del materiale, ma anche dalla temperatura t del materiale stesso. La dipendenza da quest'ultima grandezza è lineare ed è espressa dalla relazione seguente:

$$C_t = C_o (1 + \alpha t)$$

dove C è il coefficiente di conducibilità interna a temperatura ambiente ed α assume valori diversi a seconda della natura del conduttore, ma costanti in rapporto agli intervalli termici.

A titolo di esempio riportiamo alcuni valori medi di C .

Tab. 1-1 Coefficienti di conducibilità interna (medi) per alcuni solidi

<i>Metalli e leghe</i>	<i>Valori di C</i>	<i>Materiali isolanti</i>	<i>Valori di C</i>
Alluminio	178	Asfalto	0,55
Argentana	25	Cartone	0,12 ÷ 0,25
Argento	360	Mica	0,30
Bronzo	50	Sughero	0,05
Acciaio comune («ferro»)	50	Amianto	0,2
Acciaio al 5% Ni	25	Caucciù	0,1 ÷ 0,2
Acciaio al 30% Ni	9	Lava	0,7
Grafite	4,2	Refrattari Dinas	0,6 ÷ 0,8
Nichel	50	Incrostazioni	1 ÷ 3
Ottone	60 ÷ 100	Farina fossile	0,08
Oro	257	Lana di vetro	0,10
Piombo	30	Magnesia (carbonato cotto e amianto)	0,08
Platino	60	Segatura di legno	0,06
Rame	260 ÷ 340	Magnesite refrattaria	1,2 ÷ 1,4
Stagno	55	Resine stireniche poliuretano- niche ed ureiche espanse	0,010 ÷ 0,040
Zinco	95		

Caso di più pareti

Consideriamo ora il caso che si abbia da fare con più pareti disposte in serie, di proprietà fisiche differenti. Come si rileva dalla Fig. 2/1 si supponga che gli strati siano tre e che siano s_1 , s_2 ed s_3 i relativi spessori. Indichiamo con C_1 , C_2 e C_3 i rispettivi coefficienti di conducibilità, t_1 , t_2 le temperature a regime delle facce terminali e t_A , t_B le temperature delle facce intermedie.

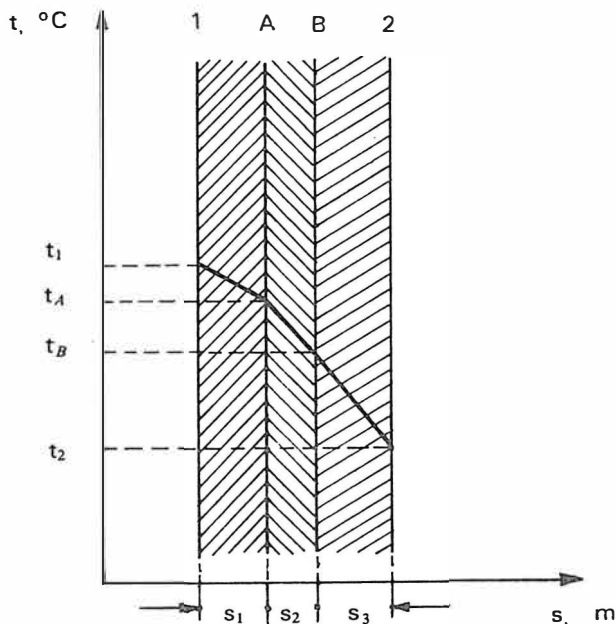


Fig. 2/1

Si può ammettere che la caduta $\Delta t = t_1 - t_2$ di temperatura sia somma delle tre singole cadute di temperatura che si verificano ad ogni strato, che cioè si abbia:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 \quad (2_1)$$

Applichiamo la (1₁) ad ogni strato; distinguendo in ciascun caso le grandezze che, di volta in volta, cambiano di valore:

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{C_1}{s_1} \cdot S \cdot \Delta t_1 \cdot \tau \\ Q_2 &= \frac{C_2}{s_2} \cdot S \cdot \Delta t_2 \cdot \tau \\ Q_3 &= \frac{C_3}{s_3} \cdot S \cdot \Delta t_3 \cdot \tau \end{aligned} \quad (3_1)$$

Il tempo τ (durata della trasmissione) e la superficie S si considerano uguali per i tre strati. In regime permanente anche Q deve assumere valori comuni ai tre strati.

Dalle (2₁) e (3₁) si ha:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 = \frac{Q}{\tau \cdot S} \left(\frac{s_1}{C_1} + \frac{s_2}{C_2} + \frac{s_3}{C_3} \right)$$

da cui:

$$Q = C \cdot S \cdot (t_1 - t_2) \cdot \tau \quad (1'')$$

dove:

$$C = \frac{1}{\frac{s_1}{C_1} + \frac{s_2}{C_2} + \frac{s_3}{C_3}} \quad (4_1)$$

L'espressione (4₁) di C rappresenta *il coefficiente di conducibilità interna totale*.

Caso di cilindro cavo

Relativamente alla figura d'un cilindro cavo riportata alla pagina seguente (Fig. 3/1), se ne considerino i valori dimensionali intrinseci e di trasmissione del calore qui simbolizzati e specificati:

r_1 raggio interno

r_2 raggio esterno

r un raggio generico

dr uno spessore infinitesimo

dt la relativa variazione di temperatura

t_1 la temperatura della faccia interna

t_2 la temperatura della faccia esterna (supposto $t_1 > t_2$).

Applicando la legge di Fourier, espressa nella forma (1'), ad un cilindro di altezza unitaria si ha:

$$Q = \frac{C \cdot 2 \pi r}{dr} \cdot dt$$

Adottiamo gli opportuni procedimenti matematici per calcolare il Q in riferimento a grandezze finite.

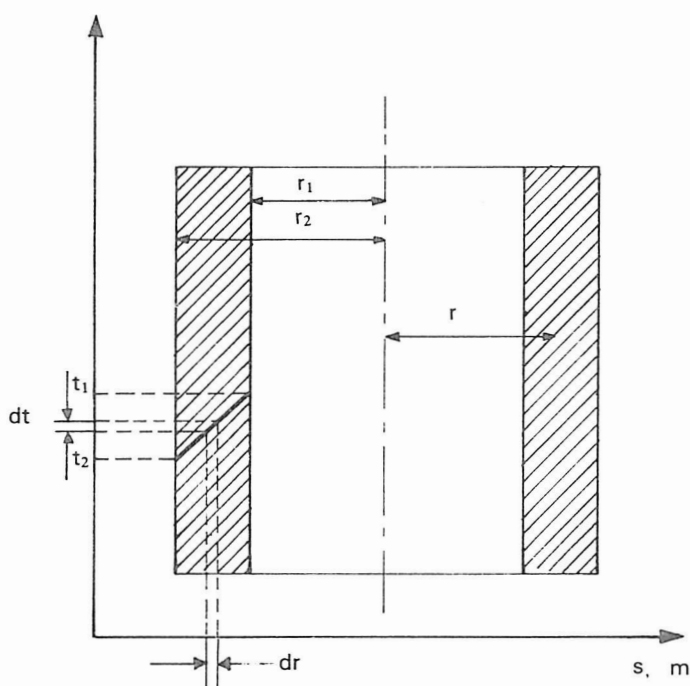


Fig. 3/1

Separiamo anzitutto le variabili:

$$\frac{dr}{r} = \frac{C \cdot 2 \pi}{Q} \cdot dt$$

e poi indichiamo i limiti di integrazione:

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{C \cdot 2 \pi}{Q} \cdot \int_{t_2}^{t_1} dt$$

La risoluzione di questa espressione porta a:

$$\ln \frac{r_2}{r_1} = \frac{C \cdot 2 \pi}{Q} \cdot (t_1 - t_2)$$

donde si può ricavare Q in funzione di grandezze tutte finite:

$$Q = \frac{C \cdot 2 \pi \cdot (t_1 - t_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (11''')$$

Notiamo che dalla (1^{'''}) moltiplicando e dividendo per $(r_2 - r_1)$ e, introducendo il raggio logaritmo medio r_m , espresso da:

$$r_m = \frac{r_2 - r_1}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (51)$$

si ottiene:

$$Q = \frac{C \cdot 2 \pi \cdot r_m \cdot (t_1 - t_2)}{r_2 - r_1}$$

e, tenendo presente che $r_2 - r_1 = s =$ spessore, si ha:

$$Q = \frac{C \cdot 2 \pi \cdot r_m \cdot (t_1 - t_2)}{s} \quad (11^V)$$

cioè si ottiene una relazione simile alla (1₁).

La relazione (1₁^V) [o la (1^{IV})] ci dà le calorie trasmesse attraverso un cilindro cavo, avente lunghezza unitaria. È evidente che se la lunghezza del tubo fosse di L metri, il numeratore del secondo membro delle suddette relazioni andrebbe moltiplicato per L .

Quando $r_2 - r_1$ è piccolo, in sostituzione del raggio medio logaritmo si può usare il raggio medio aritmetico, dato da $(r_2 + r_1)/2$, ed applicare con esso la relazione (1₁^{IV}).

4.1 Esercizi applicativi

Svolgiamo alcuni esercizi, come applicazione delle formule precedentemente ricavate.

1°. Calcolare la quantità di calore trasmessa Q nel caso che si abbia da fare con una lamiera di ferro cui sta sovrapposto uno strato di amianto (Fig. 4/1).

I dati sono:

- spessore dell'amianto $s_1 = 1$ cm;
- spessore della lamiera $s_2 = 5$ mm;
- $t_1 = 120$; $t_2 = 100$;
- tempo (τ) = 1 ora.

Determiniamo prima il valore di C , applicando la relazione (4₁) per strati in serie:

$$C = \frac{1}{\frac{0,005}{50} + \frac{0,01}{0,15}} = 14,9$$

$$Q = C \cdot S \cdot \tau \cdot (t_1 - t_2) = 14,9 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 20 \cong 300 \text{ kcal.}$$

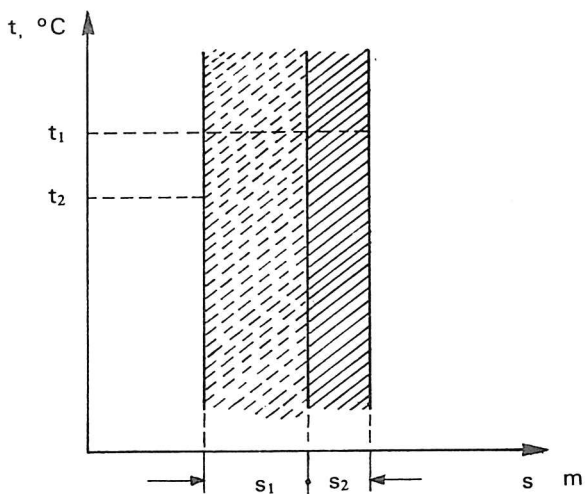


Fig. 4/1

2°. Calcolare la quantità di calore trasmessa Q in riferimento a un tubo di ferro rivestito di amianto (Fig. 5/1).

Sono dati:

- $\varnothing$ int. tubo di ferro 10 cm;
- $\varnothing$ est. tubo di ferro 12 cm;
- spessore amianto 2 cm;
- temperatura parete int. ferro = 300 °C;
- temperatura parete est. amianto = 50 °C;
- $L = 1$ m;
- $\tau = 1$ ora.

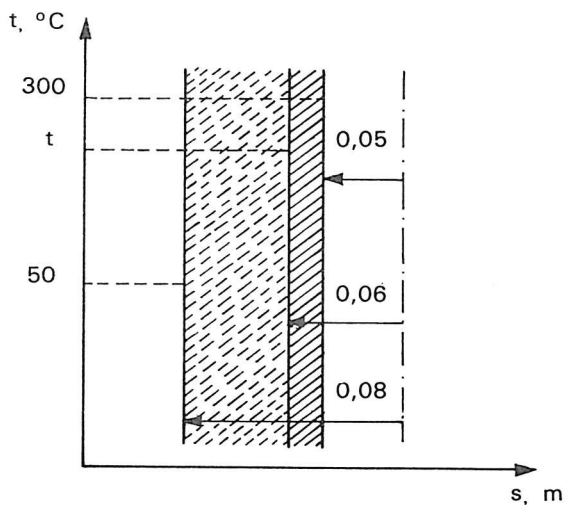


Fig. 5/1

Indichiamo convenzionalmente con t la temperatura nella superficie di contatto ferro-amianto. Poiché la quantità di calore Q che passa attraverso il ferro è la stessa di quella che passa attraverso l'amianto (in condizioni di regime), possiamo applicare la $[1_i''']$ ai due singoli strati.

Perché possa servire ai nostri scopi, scriviamo la $[1_i''']$ nelle forme seguenti:

$$\text{a) } 300 - t = \frac{Q \cdot 2,3 \cdot \log 6/5}{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 50} \quad ; \quad \text{b) } t - 50 = \frac{Q \cdot 2,3 \cdot \log 8/6}{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,15}$$

Facciamo poi la somma di queste due relazioni:

$$300 - 50 = \frac{2,3 \cdot Q}{2 \cdot 3,14} \left(\frac{\log 6/5}{50} + \frac{\log 8/6}{0,15} \right)$$

e da quest'unica uguaglianza ricaviamo Q .

Si ottiene precisamente: $Q = 810$ kcal.

Sostituendo infine questo valore di Q nella a) o nella b) si ricava il valore di t .

3°. *Calcolare il calore che passa in un'ora attraverso le pareti di un tubo lungo 1 m; avente:*

$$\varnothing \text{ int.} = 36 \text{ mm}; \quad \varnothing \text{ est.} = 40 \text{ mm}; \quad t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}; \quad t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}; \quad C = 50$$

In questo caso, essendo piccolo lo spessore di 2 mm in confronto al raggio del tubo, si può usare la (1_i^{IV}) ; adottando un raggio medio $r_m = \frac{20 + 18}{2} = 19$ mm.

Dalla richiamata relazione si ricava allora:

$$Q = \frac{50 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 19 \cdot 10^{-3} (100 - 40)}{2 \cdot 10^{-3}} = 180.000 \text{ kcal}$$

Proviamo anche ad applicare la $(1_i''')$:

$$Q = \frac{50 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot (100 - 40)}{2,3 \log \frac{40}{36}} = \frac{314 \cdot 60}{2,3 \cdot 0,045} = \frac{18.840}{0,103} = 183.000 \text{ kcal}$$

Come si vede, dal confronto dei due risultati ottenuti si rileva che applicando la (1_i^{IV}) si commette un errore di circa l'1%; fatto ammissibile nel calcolo dei normali impianti.

Ben diversamente vanno le cose per i tubi a forte spessore, come si può vedere dall'esempio seguente.

4°. *Calcolare il calore che si trasmette attraverso un tubo di sintesi avente le seguenti caratteristiche strutturali e nelle condizioni che vengono specificate.*

$$- \varnothing_1 = 500 \text{ mm}; \quad \varnothing_2 = 900 \text{ mm};$$

$$- C = 50;$$

- $t_1 = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t_2 = 120\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- lunghezza 3 m;
- tempo 1 ora.

Applicando la (11^V) in cui si adotta per r_m il raggio medio calcolato come media aritmetica, si ha:

$$r_m = \frac{250 + 450}{2} = 350 \text{ mm} \quad \text{ed} \quad s = 450 - 250 = 200 \text{ mm}$$

Sostituendo dunque si trova:

$$Q = \frac{50 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,35 \cdot (400 - 120) \cdot 3}{0,2} = 32.200 \text{ kcal}$$

Applicando invece la $[11''']$, si ha:

$$Q = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 50 (400 - 120)}{2,3 \log_{10} \frac{900}{500}} = \frac{945 \cdot 280}{2,3 \cdot 0,255} = 43.500 \text{ kcal}$$

donde si vede che l'errore commesso usando la (11^V) è quasi del 30%. In questo caso quindi è obbligatorio l'uso della $[11''']$. Un altro caso in cui occorre applicare la $[11''']$ capita quando si hanno tubazioni con isolante termico, se lo spessore dell'isolante è notevole rispetto al diametro della tubazione.

5.1 Convezione

In pratica non è possibile misurare il calore trasmesso per convezione in modo distinto da quello trasmesso per irraggiamento. Possiamo tuttavia considerare separatamente i due fenomeni per studiarli poi nel loro complessivo insieme.

Si è definita la trasmissione per conduzione come una vibrazione di molecole che non abbandonano la loro posizione; invece nella convezione si ha una migrazione di molecole: lo scambio di calore qui avviene precisamente attraverso un fenomeno di mescolanza di queste. Il fluido acquista calore a contatto con corpi caldi e cede calore ai corpi freddi con i quali, muovendosi, viene a contatto.

La convezione può essere *naturale* o *forzata* e può verificarsi in regime *laminare* o *turbolento*.

La **convezione naturale** si verifica quando i movimenti di materia sono dovuti ad un gradiente termico, esistente nella massa fluida, con conseguenti differenze di peso specifico in seno alla massa fluida stessa.

La **convezione forzata** si produce invece quando una causa esterna determina i rimescolamenti della massa fluida e i movimenti della materia.

Consideriamo una parete fredda a contatto con un fluido caldo (o viceversa). Dopo un periodo di assestamento, cioè in condizioni di regime, notiamo che le temperature assumono un andamento del tipo di quello segnato in figura 6/1. Come si vede, la temperatura t_1 del fluido rimane

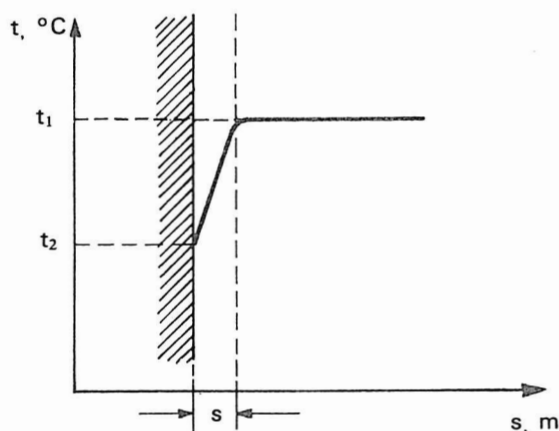


Fig. 6/1

costante nella massa, ma decresce bruscamente in uno strato adiacente alla parete ed assume un valore t_2 sulla superficie.

Quando un fluido è in movimento, anche se con regime laminare, esiste uno strato fluido vicino alla parete (*strato limite* o «pellicola») che è stagnante. È proprio questo strato di fluido che influenza il fenomeno di convezione: infatti attraverso tale pellicola il calore deve passare per conduzione, mentre attraverso la massa fluida, animata da regime turbolento, la resistenza offerta alla trasmissione del calore è pressoché nulla e il calore si trasmette per convezione.

In condizioni di regime, applicando la relazione (1₁) il calore trasmesso si può esprimere con la relazione:

$$Q = \frac{\lambda}{s} \cdot S \cdot (t_1 - t_2) \cdot \tau \quad (6_1)$$

dove λ è il coefficiente di convezione lineare, s misura il valore dello strato limite ed il significato e i valori delle altre grandezze saranno dati dopo la deduzione della (6₁).

Notiamo che λ dipende:

a) essenzialmente dalla natura del fluido (generalmente λ ha valori notevoli per vapori saturi, medi per liquidi, bassi per gas);