FILIPPO ARREDI

Ordinario di Costruzioni Idrauliche nella Facoltà di Ingegneria della Università di Roma

COSTRUZIONI IDRAULICHE

Volume secondo

Parte prima

Le opere di trasporto e di distribuzione

Seconda edizione

UNIVERSITA' D. STUDI DI TORINO
BIBLIOTECA

UNIONE TIPOGRAFICO-EDITRICE TORINESE

INDICE

Avvertenza . . . . . *Pag.* III

LE OPERE DI TRASPORTO E DI DISTRIBUZIONE

Introduzione . . . . . *Pag.* 3

1 - L'acqua elemento singolare e fattore fondamentale della vita » 3
2 - Le utilizzazioni dell'acqua . . . . . » 4
3 - Il patrimonio idrico . . . . . » 5
4 - I luoghi e i tempi delle disponibilità e i luoghi e i tempi delle utilizzazioni . . . . . » 6
5 - La degradazione dei caratteri dell'acqua nelle utilizzazioni » 7
6 - Le opere di utilizzazione . . . . . » 9

CAPITOLO I. — **Caratteristiche generali delle opere di trasporto e di distribuzione** . . . . . » 10

1 - Le opere di trasporto e di distribuzione . . . . . » 10
2 - I tubi di ghisa . . . . . » 13
3 - I tubi di acciaio senza saldatura . . . . . » 22
4 - I tubi di acciaio saldati longitudinalmente, di serie . . . » 29
5 - I tubi di acciaio saldati elicoidalmente . . . . . » 30
6 - I tubi di acciaio saldati di grande diametro . . . . . » 32
7 - I tubi blindati . . . . . » 33
8 - I tubi di calcestruzzo di cemento armato . . . . . » 35
9 - I tubi di cemento amianto . . . . . » 41
10 - I tubi di resine . . . . . » 43
11 - Le disposizioni di appoggio e di ancoraggio dei tubi al terreno » 49
12 - Le gallerie . . . . . » 53
13 - Cunicoli e gallerie eseguiti con il sistema dei tubi a spinta » 96
14 - I canali superficiali . . . . . » 98
15 - Sifoni, ponti tubo e ponti canale . . . . . » 111

Bibliografia . . . . . » 116

CAPITOLO II. — **La corrosione dei tubi** . . . . . » 117

1 - L'equilibrio della anidride carbonica e l'aggressività dell'acqua . . . . . » 117
2 - La corrosione delle strutture metalliche . . . . . » 121
3 - Cenni di teoria della corrosione dei metalli . . . . . » 122
4 - La corrosione del ferro . . . . . » 128

5 - Le sovratensioni . . . . . *Pag.* 135
6 - Le pile locali . . . . . » 141
7 - La corrosione nel terreno . . . . . » 143
8 - Influenza di microrganismi nella corrosione . . . . . » 147
9 - Le correnti vaganti . . . . . » 148
10 - La corrosione atmosferica . . . . . » 150
11 - La corrosione dei tubi di ghisa . . . . . » 151
12 - I tubi di acciaio - La protezione passiva - I rivestimenti . » 152
13 - La protezione catodica - Generalità . . . . . » 164
14 - Il potenziale di protezione . . . . . » 168
15 - Il sistema di protezione con correnti impresse . . . . . » 170
16 - Gli anodi reattivi . . . . . » 172
17 - Cenni teorici sulla distribuzione del potenziale . . . . . » 173
18 - Dispositivi e provvedimenti particolari nella protezione catodica . . . . . » 180
19 - Provvedimenti per le interferenze . . . . . » 182
20 - La protezione dalle correnti vaganti . . . . . » 186
21 - La protezione delle tubazioni di acciaio non interrate . . » 190
22 - La corrosione dei materiali cementizi . . . . . » 191
23 - La corrosione degli elementi ferrosi entro il calcestruzzo » 201
Bibliografia . . . . . » 203

CAPITOLO III. — **Il moto uniforme e il moto permanente nei sistemi di tubazioni** . . . . . » 204

1 - Il moto uniforme . . . . . » 204
2 - I sistemi di tubazioni . . . . . » 216
3 - Sistemi di tipo aperto con unico estremo di alimentazione » 218
4 - Introduzione al problema di minimo costo - Elementi del costo delle tubazioni . . . . . » 221
5 - I costi virtuali degli impianti di produzione di energia o di sollevamento . . . . . » 224
6 - Impianti di produzione di energia o di sollevamento a portata variabile nel tempo . . . . . » 225
7 - Equazioni generali di minimo costo del sistema . . . . . » 227
8 - Risoluzione generale del sistema di equazioni determinatore dei diametri delle tubazioni e dei salti . . . . . » 231
9 - Caso di tubazioni metalliche . . . . . » 233
10 - Metodo di risoluzione per approssimazioni successive . . . » 234
11 - Sistema di tubazioni metalliche, senza diramazioni . . . . » 235
12 - Osservazioni sull'impiego delle espressioni risolutive del caso precedente . . . . . » 238
13 - I sistemi di tipo chiuso . . . . . » 239
14 - Il problema di verifica . . . . . » 243
15 - Il metodo di Cross di bilanciamento dei carichi . . . . . » 245
16 - Il metodo di bilanciamento delle portate . . . . . » 246
17 - Caso generale di indeterminazione . . . . . » 250
18 - I modelli elettrici . . . . . » 253
19 - Tubazioni con erogazioni lungo il percorso . . . . . » 255
Bibliografia . . . . . » 267

CAPITOLO IV. — **Il moto vario elastico nelle tubazioni** . . . . . » 269

A) CARATTERI ED EQUAZIONI GENERALI DEL PROCESSO . . . . . » 269

1 - Introduzione . . . . . » 269
2 - I parametri elastici del sistema . . . . . » 270

3 - Le equazioni generali del moto vario elastico . . . . . *Pag.* 273
4 - I caratteri generali del moto vario elastico . . . . . » 278

B) Analisi del moto vario elastico nel caso classico . . . . » 281

5 - Il caso classico - La condizione di estremo superiore . . . » 281
6 - La relazione delle sovrapressioni nell'estremo inferiore . . » 284
7 - Deduzione delle sovrapressioni in una sezione generica dalle sovrapressioni all'estremo inferiore . . . . . » 285
8 - Le vicende del moto conseguenti ad annullamento istantaneo o graduale della portata all'estremo inferiore . . . » 286
9 - La relazione di estremità inferiore nel caso classico . . . » 291
10 - L'espressione delle serie concatenate di Allievi . . . . . » 293
11 - Le manovre lineari . . . . . » 297
12 - Analisi delle sovrapressioni all'estremo inferiore, da manovre lineari, durante la manovra . . . . . » 300
13 - Analisi delle sovrapressioni all'estremo inferiore, da manovre lineari, dopo il termine della manovra . . . . . » 305
14 - La semplificazione di De Sparre . . . . . » 308
15 - Il maggior valore delle sovrapressioni per il complesso di tutte le manovre lineari brusche di variazione di apertura » 309
16 - Il maggior valore delle sovrapressioni per il complesso di tutte le manovre lineari lente di variazione di apertura . . » 315
17 - Il maggior valore delle sovrapressioni per il complesso di tutte le manovre lineari . . . . . » 326
18 - Le vicende delle sovrapressioni per piccole variazioni del grado di apertura . . . . . » 328
19 - Distribuzione delle maggiori sovrapressioni lungo la tubazione . . . . . » 330

C) I sistemi diversi da quello classico - Il metodo Schnyder-Bergeron - Il metodo delle caratteristiche . . . . » 331

20 - I dispositivi terminali diversi da quelli del caso classico » 331
21 - Tubazioni a caratteristiche variabili . . . . . » 339
22 - Il procedimento grafico Schnyder e Bergeron per tubazione unica a caratteristiche uniformi . . . . . » 352
23 - La determinazione delle vicende del moto vario in una sezione intermedia della tubazione . . . . . » 360
24 - Variante d'impostazione del procedimento Schnyder e Bergeron per tubazione unica ed uniforme . . . . . » 361
25 - Criteri approssimati sull'influenza delle resistenze passive . » 364
26 - Applicazioni del procedimento Schnyder e Bergeron tenuto conto delle resistenze passive . . . . . » 368
27 - Tubazione di un impianto di sollevamento . . . . . » 374
28 - Sistemi di tubazioni - Il metodo di Schnyder e Bergeron - Le caratteristiche nodali . . . . . » 381
29 - Guida generale all'applicazione del metodo Schnyder e Bergeron . . . . . » 386
30 - Relazioni algebriche della ripartizione delle sovrapressioni ai nodi del sistema . . . . . » 389
31 - Ripartizione delle sovrapressioni nel nodo condotta forzata pozzo piezometrico galleria in pressione di un impianto idroelettrico . . . . . » 392
32 - Il metodo delle caratteristiche - Princìpi di base . . . . » 400
33 - Il metodo delle caratteristiche - Procedimento di applicazione . . . . . » 404

D) Il moto vario d'insieme nel sistema classico e la regolazione dei gruppi idroelettrici . . . . . *Pag.* 410

34 - Moto vario elastico e moto vario d'insieme . . . . . » 410
35 - Le equazioni del moto vario d'insieme . . . . . » 411
36 - L'assimilabilità del moto vario elastico al moto vario d'insieme . . . . . » 415
37 - La regolazione dei gruppi idroelettrici nei rapporti col moto vario . . . . . » 418
38 - La potenza della corrente idrica durante le variazioni di apertura . . . . . » 421
39 - Gli effetti sulla marcia del gruppo turbina alternatore delle variazioni della potenza idrica affluente . . . . . » 426
40 - Impianti a piccolo salto . . . . . » 431
41 - Le sovrapressioni nel moto vario d'insieme . . . . . » 433
42 - Caso di sovrapressioni relative piccole . . . . . » 437
43 - Manovre di piccola ampiezza . . . . . » 440
44 - I valori limiti delle sovrapressioni . . . . . » 441
45 - Il moto vario d'insieme con le dissipazioni di energia . . » 443
46 - Il moto vario con condotto di afflusso e condotto di scarico della turbina . . . . . » 445

Capitolo V. — Il moto vario d'insieme nei sistemi serbatoio galleria pozzo piezometrico . . . . . » 447

A) Aspetti e caratteristiche generali del moto . . . . . » 447

1 - Le funzioni del pozzo piezometrico . . . . . » 447
2 - Il processo di moto vario d'insieme nel sistema . . . . . » 448
3 - Questioni generali di dimensionamento del pozzo . . . . » 451
4 - I pozzi di tipo speciale . . . . . » 452
5 - Le ipotesi fondamentali del processo di moto vario d'insieme nel sistema . . . . . » 460
6 - Le equazioni generali del moto nel sistema . . . . . » 464
7 - Le equazioni generali in forma adimensionale . . . . . » 468
8 - Condotte e gallerie a sezione variabile o multiple in parallelo » 472
9 - Osservazioni su alcuni parametri del sistema . . . . . » 474
10 - Le manovre di maggior interesse . . . . . » 479

B) Analisi generale del processo oscillatorio . . . . . » 480

11 - Il caso di riferimento: pozzo cilindrico, assenza di dissipazioni di energia, manovra istantanea . . . . . » 480
12 - Pozzo cilindrico, assenza di dissipazioni di energia, manovra graduale . . . . . » 483
13 - Pozzo cilindrico, assenza di dissipazioni di energia, due manovre istantanee successive . . . . . » 488
14 - Pozzo cilindrico con camera superiore cilindrica, assenza di dissipazioni di energia, riduzione istantanea di portata . . » 491
15 - Rapporti del moto vario d'insieme con il moto vario elastico » 493

C) Teoria nelle condizioni reali . . . . . » 503

16 - Pozzo cilindrico, presenza di dissipazioni di energia, annullamento istantaneo della portata derivata . . . . . » 503
17 - Pozzo cilindrico con camera superiore ed inferiore cilindriche, presenza di dissipazioni di energia, annullamento istantaneo della portata derivata . . . . . » 510
18 - Pozzo cilindrico, presenza di dissipazioni di energia, aumento istantaneo della portata derivata . . . . . » 513

19 - Pozzo cilindrico, presenza di dissipazioni di energia, variazioni istantanee qualsiasi della portata derivata . . . . . *Pag.* 518
20 - Analisi di massima dell'effetto di una strozzatura . . . . » 531
21 - Pozzo cilindrico con strozzatura, annullamento istantaneo della portata derivata . . . . . » 534
22 - Pozzo cilindrico con strozzatura, aumento istantaneo della portata derivata . . . . . » 544
23 - Confronto degli effetti della strozzatura per riduzione e aumento della portata derivata . . . . . » 544
24 - Pozzo cilindrico con strozzatura: manovre multiple . . . » 548
25 - Teoria dei pozzi differenziali . . . . . » 551
26 - Teoria dei pozzi sfioranti . . . . . » 564

D) I PROCEDIMENTI DI INTEGRAZIONE APPROSSIMATI . . . . . » 567

27 - Procedimenti d'integrazione numerica delle equazioni generali alle differenze finite . . . . . » 567
28 - Il procedimento grafico di Calame e Gaden . . . . . » 572
29 - Pozzi cilindrici senza o con strozzatura . . . . . » 574
30 - Pozzo a sezione variabile con strozzatura . . . . . » 580
31 - Variazioni graduali della portata derivata . . . . . » 583
32 - Introduzione nel metodo grafico delle perdite di carico nella condotta . . . . . » 588
33 - Pozzi nelle gallerie di scarico . . . . . » 594

E) LA STABILITÀ DELLA REGOLAZIONE DEGLI IMPIANTI IDROELETTRICI » 599

34 - Aspetti generali del problema della stabilità di regolazione della potenza negli impianti idroelettrici a serbatoio . . . » 599
35 - La teoria della stabilità di Thoma . . . . . » 602
36 - Richiami di nozioni generali sulle condizioni analitiche circa la stabilità dei sistemi meccanici . . . . . » 608
37 - Trasformazione delle equazioni di moto vario del sistema in equazioni alle variazioni . . . . . » 613
38 - Applicazione dei criteri generali di stabilità al caso del sistema di Thoma . . . . . » 614
39 - Ampliamento del sistema di Thoma con l'inserimento della condotta forzata . . . . . » 616
40 - Influenza sulla stabilità del regolatore e del gruppo . . . » 619
41 - I regolatori . . . . . » 620
42 - L'equazione alle variazioni del regolatore . . . . . » 627
43 - L'equazione alle variazioni del moto vario del gruppo e l'equazione alle variazioni dell'afflusso alla turbina . . . . » 629
44 - La stabilità del sistema regolatore-gruppo e del sistema condotta regolatore-gruppo . . . . . » 631
45 - La stabilità del sistema totale . . . . . » 635
46 - La stabilità degli impianti in parallelo . . . . . » 637

F) LA PROTEZIONE DELLE TUBAZIONI ALIMENTATE DA POMPE . . . » 641

47 - I dispositivi di protezione dalle sovrapressioni di moto vario elastico delle tubazioni alimentate da pompe . . . . . » 641
48 - I pozzi piezometrici . . . . . » 641
49 - Le casse d'aria . . . . . » 643
50 - Le equazioni di moto vario d'insieme nel sistema tubazione-cassa d'aria . . . . . » 645
51 - La risoluzione del sistema di equazioni del moto vario d'insieme nel sistema tubazione-cassa d'aria . . . . . » 650

52 - Il moto vario nel sistema pompa a pistone - cassa d'aria - tubazione - Le equazioni generali . . . . . *Pag.* 655
53 - Il moto vario nel sistema pompa a pistone - cassa d'aria - tubazione - Le oscillazioni a regime . . . . . » 661

Bibliografia (Capitoli IV e V) . . . . . » 669

CAPITOLO VI. — **Statica delle tubazioni** . . . . . » 679

1 - Le azioni attive agenti su un elemento di tubo - Il peso proprio e le pressioni dell'acqua . . . . . » 679
2 - Le sollecitazioni indotte dalle pressioni centrali nello stato di tensione piano . . . . . » 682
3 - Le azioni termiche . . . . . » 686
4 - Reazioni di due appoggi concentrati simmetrici . . . . . » 687
5 - Appoggio su superfici larghe . . . . . » 690
6 - Le pressioni d'appoggio su terreno sciolto e le pressioni di rinterro . . . . . » 692
7 - La stabilità longitudinale dei tubi ancorati all'estremo inferiore . . . . . » 697
8 - Le azioni longitudinali su un tronco di tubazione rettilineo bloccato ad entrambe le estremità . . . . . » 702
9 - Le forze longitudinali nelle tubazioni stabili non ancorate » 703
10 - La flessione trasversale dovuta alle azioni attive non centralmente simmetriche . . . . . » 706
a) Pressioni complementari dell'acqua . . . . . » 709
b) Peso proprio . . . . . » 710
c) Pressioni dell'acqua durante il riempimento . . . . . » 711
d) Forza F_r applicata nella sezione dell'anello di angolo θ_0 avente direzione radiale, verso positivo centrifugo . . . » 714
e) Forza F_t applicata nella sezione dell'anello di angolo θ_0, avente direzione normale a quella radiale di angolo θ_0, linea d'azione a distanza ka dal centro, verso positivo orario . . . . . » 715
f) Forza F_v parallela e forza F_0 normale all'asse ζ applicate nella sezione di angolo θ_0 a distanza $a(k-1)$ dal baricentro della sezione . . . . . » 717
g) Forza P applicata nella sezione di angolo θ_0, parallela all'asse ζ e verso contrario a quello dell'asse stesso (nel primo quadrante) . . . . . » 717
h) Pressioni p_v parallele all'asse ζ, con verso positivo contrario a quello dell'asse stesso (nel primo quadrante), agenti lungo la fibra media dell'anello, dalla sezione di angolo θ_1 alla sezione di angolo θ_2, di intensità costante » 718
i) Pressioni p_0 in direzione normale all'asse ζ, con verso positivo volto verso l'asse stesso, agenti lungo la fibra media dell'anello, dalla sezione di angolo θ_1 alla sezione di angolo θ_2, di intensità costante . . . . . » 720
l) Pressioni radiali con verso positivo centripeto agenti lungo la fibra media dell'anello, dalla sezione di angolo θ_1 alla sezione di angolo θ_2, di intensità variante linearmente con l'angolo α . . . . . » 721
m) Pressioni normali alle direzioni radiali, con verso positivo orario, agenti lungo la fibra media dell'anello, dalla sezione di angolo θ_1 alla sezione di angolo θ_2, di intensità variante linearmente con angolo α . . . . . » 723

n) Pressioni parallele all'asse ζ, con verso positivo contrario a quello dell'asse stesso, agenti lungo la fibra media dell'anello dalla sezione di sommità ($\theta = 0$) alla sezione di angolo θ_2, di intensità proporzionale alla distanza, in direzione parallela all'asse ζ, delle diverse sezioni da quella di sommità . . . . . *Pag.* 725

o) Pressioni in direzione normale all'asse ζ, con verso positivo volto verso l'asse stesso, agenti lungo la fibra media dell'anello, dalla sezione di sommità ($\theta = 0$) alla sezione di angolo θ_2, di intensità proporzionale alla distanza, in direzione parallela all'asse ζ, delle diverse sezioni da quella di sommità . . . . . » 726

11 - La pressione critica di schiacciamento . . . . . » 727

12 - La continuità longitudinale . . . . . » 731

13 - Le relazioni fra spostamenti e deformazioni . . . . . » 732

14 - Le relazioni fra spostamenti e sforzi . . . . . » 735

15 - Struttura a simmetria centrale - Le equazioni di equilibrio » 737

16 - Tubo di grande lunghezza - Effetto di carico concentrato o di vincolo su una direttrice . . . . . » 743

17 - Effetto di vincoli vicini tra loro . . . . . » 746

18 - Tubi blindati . . . . . » 749

19 - Le azioni complementari - Le equazioni di equilibrio in stato di membrana . . . . . » 757

20 - Tubo orizzontale soggetto a peso proprio e peso dell'acqua » 760

21 - Gli spostamenti . . . . . » 762

22 - Lastra cilindrica soggetta a pressioni e forze continue, in regime flessionale . . . . . » 765

23 - Tubo orizzontale soggetto a peso proprio e peso dell'acqua » 768

24 - Tubo orizzontale soggetto al peso proprio ed al peso dell'acqua, con estremità vincolate a flange rigide . . . . . » 774

25 - La stabilità dell'equilibrio elastico di una tubazione soggetta a compressione assiale per forza applicata alle estremità » 779

Bibliografia . . . . . » 786