

# INDICE

Presentazione.....	XIII
Prefazione.....	XV
<b>Capitolo 1 Richiami a conoscenze pregresse e nozioni basilari sui fluidi.....</b>	<b>1</b>
1.1 Richiami di geometria e calcolo differenziale.....	1
1.1.1 Tensori.....	1
1.1.2 Operatori differenziali.....	12
1.1.3 Teoremi fondamentali del calcolo integro-differenziale.....	14
1.2 Richiami ai principi basilari della meccanica.....	16
1.2.1 Equazioni di quantità di moto per i sistemi di particelle.....	16
1.2.2 Equazione del momento angolare per i sistemi di particelle.....	18
1.2.3 Teorema dell'energia meccanica per i sistemi di particelle.....	20
1.2.4 Principio di relatività Galileiana.....	22
1.2.5 Principio di minima azione ed equazioni di Lagrange.....	26
1.2.6 Equazioni di Hamilton.....	30
1.3 L'ipotesi del continuo in fluidodinamica.....	33
1.4 Descrizione Lagrangiana ed Euleriana del sistema fluido.....	35
1.5 Cinematica dei sistemi fluidi.....	36
1.5.1 Correnti solenoidali.....	39
1.5.2 Correnti irrotazionali.....	43
1.5.3 Moto armonico.....	46
1.5.4 Correnti rotazionali.....	48
1.5.5 Teorema di Clebsch.....	52
1.5.6 Accelerazione nei fluidi.....	53
1.6 Proprietà notevoli dei fluidi ed equazione di stato.....	53
1.7 Teorema del trasporto di Reynolds e sue applicazioni.....	57
1.8 Conclusioni.....	58
<b>Capitolo 2 Termodinamica classica.....</b>	<b>61</b>
2.0 Inquadramento storico e scientifico della termodinamica.....	61
2.0.1 Le macchine idrauliche e termiche: l'esperienza francese e quella inglese.....	63
2.0.2 La termometria ed il calorico.....	67
2.0.3 Principi base della termodinamica: S. Carnot, Joule, Thomson ed il contributo tedesco.....	69
2.0.4 Il consolidamento dei principi della termodinamica e la loro applicazione alla chimica.....	74

2.1 Alcune definizioni preliminari.....	75
2.2 La regola delle fasi di Gibbs.....	78
2.3 Primo principio della termodinamica.....	81
2.3.1 Espressione del lavoro in sistemi Lagrangiani.....	84
2.3.2 Significato fisico del concetto di calore.....	88
2.3.3 Espressione del primo principio della termodinamica per i sistemi euleriani.....	89
2.3.4 Equazione di Bernoulli generalizzata per correnti unidimensionali.....	92
2.3.5 Principio di conservazione dell'energia in sistemi di riferimento non inerziali.....	94
2.4 Secondo principio della termodinamica.....	96
2.4.1 Reversibilità ed irreversibilità delle trasformazioni.....	98
2.4.2 Teorema di Carnot e definizione di temperatura termodinamica.....	101
2.4.3 Teorema di Clausius ed espressione del secondo principio come equazione.....	105
2.4.4 La funzione di stato entropia.....	106
2.4.5 Produzione di entropia in sistemi Lagrangiani.....	108
2.4.6 Trasformazioni tracciabili sui diagrammi termodinamici.....	112
2.4.7. Equazione di entropia e produzione di entropia in sistemi aperti.....	116
2.4.8. Principio di massima entropia.....	116
2.4.9. Capacità termica e calore specifico.....	118
2.5 Equazione di stato fondamentale della termodinamica.....	120
2.6 Exergia.....	121
2.6.1. Significato fisico dell'exergia nei sistemi aperti stazionari.....	124
2.6.2 Estensione dei concetti visti ai sistemi chiusi e teorema di Gouy-Stodola.....	127
2.6.3 Visualizzazione grafica dell'exergia sul diagramma di Mollier.....	129
2.6.4 Formulazione dei principi della termodinamica in termini di exergia.....	130
2.6.5 Rendimento di secondo principio nei cicli e nei processi di interesse tecnico.....	130
2.7 Equazione del momento angolare e formula del lavoro tecnico specifico.....	139
2.8 Conclusioni.....	140
<b>Capitolo 3 Elementi avanzati di termodinamica classica.....</b>	<b>143</b>
3.1 Significato dei calori specifici sul piano p-v e trasformazioni politropiche.....	143
3.1.1. Il metodo dello Jacobiano di Shaw.....	146
3.1.2. Gas perfetti e trasformazioni politropiche.....	146
3.2 Potenziali termodinamici e condizioni di equilibrio in sistemi vincolati.....	147
3.3 Implicazioni delle disequaglianze legate al II° principio della termodinamica.....	151
3.3.1 Exergia ed equilibrio termodinamico.....	155
3.4 Rappresentazione in variabili naturali e relazioni di Maxwell.....	156
3.4.1. Quadrato termodinamico di Born.....	158
3.4.2. Relazioni operative di Bridgman per energia interna, entalpia ed entropia.....	159
3.4.3. Relazioni tra calori specifici principali, modulo di elasticità ed espansività isobara.....	160
3.4.4. Coefficiente di Joule – Thompson.....	161
3.5 Il teorema di Le Chatelier-Braun.....	163
3.5.1. Equilibrio termodinamico perturbato da un disturbo termico.....	166
3.5.2. Equilibrio termodinamico perturbato da un disturbo meccanico.....	169

3.6 Potenziale chimico.....	170
3.6.1. Caratterizzazione dell'equilibrio chimico.....	172
3.6.2 Equazioni di Maxwell generalizzate per sistemi semplici ad un solo componente.....	174
3.7 Sistemi a più componenti.....	175
3.7.1 Teorema di Eulero per le funzioni omogenee ed applicazione alla termodinamica.....	177
3.7.2 Miscele di gas ideali.....	180
3.7.3 Paradosso di Gibbs.....	182
3.7.4 Dimostrazione della regola delle fasi di Gibbs.....	183
3.7.5 Analisi exergetica di sistemi omogenei multicomponente.....	184
3.8 Terzo principio della termodinamica.....	188
3.8.1 La costante dell'entropia nei gas perfetti.....	191
3.8.2 Regola di Berthelot-Thomsen.....	191
3.9 Conclusioni.....	193
<b>Capitolo 4 Termofluidodinamica.....</b>	<b>195</b>
4.0 Inquadramento storico e scientifico della fluidodinamica.....	196
4.0.1 Il Settecento e i fluidi perfetti.....	196
4.0.2 L'Ottocento: i flussi viscosi, il metodo del flusso potenziale, vorticosità e moti ondosi.....	198
4.0.3 Albori e prima metà del Novecento: strato limite, similitudine fluidodinamica e termodinamica dei sistemi in equilibrio locale.....	203
4.1 Equilibrio termodinamico locale.....	205
4.2 Teorema del tetraedro di Cauchy e statica dei fluidi.....	206
4.3 Stato tensionale dei fluidi in movimento.....	208
4.4 Equazioni costitutive di Navier-Stokes per fluidi newtoniani.....	210
4.4.1 Relazione di Stokes per l'equilibrio termodinamico locale.....	213
4.5 Forma generale di una legge di conservazione.....	215
4.5.1 Legge di conservazione della massa.....	217
4.5.2 Equazione di bilancio della quantità di moto.....	218
4.5.3 Equazione di bilancio dell'energia.....	220
4.6 Teorema dell'energia meccanica per sistemi fluidi Lagrangiani.....	222
4.7 Equazione dell'entropia.....	225
4.7.1 Produzione di irreversibilità e disequaglianza di Clausius-Duhem.....	226
4.8 Meccanismo di trasporto diffusivo.....	228
4.8.1 Diffusione delle specie chimiche e leggi di Fick.....	228
4.8.2 Diffusione di quantità di moto.....	234
4.8.3 Diffusione di energia.....	236
4.9 Fenomeni termoelettrici.....	238
4.9.1 Effetto Seebeck.....	238
4.9.2 Effetto Peltier.....	241
4.9.3 Effetto Thomson.....	244
4.9.4 Relazioni di Thomson per i fenomeni termoelettrici.....	245
4.10 Teoria di Onsager per i processi irreversibili accoppiati.....	247
4.10.1 Relazioni di reciprocità.....	250
4.10.2 Verifica sperimentale delle relazioni di reciprocità in termoelettricità.....	253
4.10.3 Applicazione della teoria di Onsager alla termodiffusione.....	256
4.11 Conclusioni.....	260

<b>Capitolo 5 Modelli fluidodinamici di base per le macchine.....</b>	<b>263</b>
5.1 Equazioni di Navier-Stokes per flussi incomprimibili o barotropici.....	263
5.1.1 Flussi barotropici.....	265
5.2 Flusso laminare.....	266
5.2.1 Flusso incomprimibile laminare tra due lastre piane parallele.....	267
5.2.2 Flusso incomprimibile laminare di Couette.....	269
5.2.3 Flusso incomprimibile laminare di Poiseuille.....	271
5.3 Teoria della lubrificazione.....	273
5.3.1 Equazione generalizzata di Reynolds per la lubrificazione.....	273
5.3.2 Calcolo dei pattini lubrificati.....	277
5.3.3 Calcolo dei perni lubrificati.....	282
5.4 Propagazione delle piccole perturbazioni.....	286
5.5 Modello classico delle equazioni di Eulero.....	291
5.5.1 Equazioni di Eulero generalizzate.....	294
5.6 Teorema di Bernoulli per fluidi perfetti.....	296
5.6.1 Moti irrotazionali non stazionari.....	300
5.6.2 Moti di Beltrami.....	301
5.7 Coefficiente di efflusso in ugelli rettilinei e fori calibrati.....	301
5.8 Caratteristiche del meccanismo di trasporto diffusivo.....	308
5.8.1 Risposta del sistema fluido all'oscillazione armonica della piastra (2° problema di Stokes).....	310
5.8.2 Risposta del sistema fluido ad un moto impulsivo della piastra (1° problema di Stokes).....	311
5.9 Moti convettivi del fluido in presenza di effetti termici.....	313
5.9.1 Convezione termica forzata.....	317
5.9.2 Convezione termica naturale.....	318
5.9.3 Numero di Nusselt nella convezione naturale e forzata.....	321
5.10 Moti convettivi dovuti a disomogeneità di composizione chimica.....	323
5.11 Conclusioni.....	323
<b>Capitolo 6 Teoria del flusso potenziale e genesi delle forze scambiate tra flussi e corpi.....</b>	<b>327</b>
6.1 Equazioni del flusso potenziale.....	327
6.1.1 Proprietà di ristagno, numero di Mach ed incomprimibilità per il caso dei gas perfetti.....	332
6.2 Il potenziale complesso: osservazioni preliminari.....	335
6.3 Funzioni complesse di variabile complessa e loro proprietà.....	336
6.4 Derivazione in campo complesso: le funzioni analitiche.....	337
6.5 Integrazione in campo complesso.....	340
6.6 Teorema della formula integrale di Cauchy e sue dirette implicazioni.....	344
6.7 Sviluppi in serie delle funzioni analitiche.....	347
6.7.1 Serie di Taylor.....	347
6.7.2 Serie di Laurent.....	349
6.8 Trasformazioni conformi.....	353
6.8.1 Alcuni teoremi notevoli riguardanti le trasformazioni conformi.....	355
6.9 Applicazione dei concetti visti al problema del corpo immerso nella corrente.....	357
6.9.1 Collocamento dei punti critici della trasformazione conforme.....	359
6.9.2 Conservazione della circuitazione della velocità.....	360
6.10 Esempi di campi di velocità armonici piani notevoli.....	361
6.10.1 Corrente uniforme.....	361

6.10.2 Sorgenti e pozzi puntiformi.....	362
6.10.3 Vortice matematico.....	363
6.10.4 Doppietta.....	364
6.10.5 Vortice a spirale.....	366
6.10.6 Corrente ad angolo retto.....	366
6.11 Metodo delle singolarità virtuali e campo di moto attorno al cilindro.....	367
6.12 Paradosso di d'Alembert.....	370
6.12.1 Simulazione della portanza.....	372
6.13 Azioni aerodinamiche sui solidi.....	377
6.13.1 Prima e seconda formula di Blasius.....	380
6.14 Teorema di Kutta-Joukowski.....	383
6.15 Estensione del paradosso di d'Alembert ai flussi 3D ed ai fluidi viscosi.....	384
6.16 Cause fisiche del paradosso di d'Alembert e sua rimozione.....	387
6.16.1 Stato limite, meccanismo della sustentazione idrodinamica e linee di singolarità.....	388
6.17 Conclusioni.....	391
<b>Capitolo 7 Trasformazioni conformi e aerodinamica dei profili alari isolati e in schiera ...</b>	<b>395</b>
7.1 Esempi di trasformazioni conformi.....	395
7.2 Trasformazione conforme di Joukowski.....	401
7.2.1 Condizione di Kutta.....	409
7.2.2 Deflessione cinematica nei profili isolati.....	413
7.3 Teoria della portanza di Von Mises.....	413
7.3.1 Coefficiente del momento deviatorico e secondo asse del profilo.....	414
7.4 Verifiche sperimentali della teoria della portanza.....	416
7.5 Teoria del Witoszinski.....	419
7.6 Profili alternativi a quelli di Joukowski.....	423
7.6.1 Profili di Karman-Trefftz.....	423
7.6.2 Profili di Von Mises.....	425
7.6.3 Profili di Theodorsen.....	427
7.7 Il metodo dell'analogia idrodinamica.....	428
7.7.1 La tecnica delle riflessioni per generare i campi di moto.....	429
7.8 Schiere alari secondo Weinig.....	433
7.8.1 Il calettamento, il passo e la solidità della schiera.....	436
7.9 Campo di moto attorno ad una schiera di pale.....	440
7.10 Deflessione cinematica e forze sulle palettature.....	444
7.11 Triangoli delle velocità.....	447
7.12 Stallo in una schiera di pale di un turbocompressore.....	452
7.12.1 Correlazione di Howell.....	454
7.13 Trasformazioni conformi e calcolo del coefficiente di efflusso.....	458
7.13.1 Espressione di Kirchhoff per il coefficiente di efflusso.....	460
7.14 Conclusioni.....	466
<b>Capitolo 8 Teoria della similitudine fluidodinamica e sue applicazioni.....</b>	<b>469</b>
8.1 Elementi di teoria della similitudine fluidodinamica.....	469
8.2 Similitudine geometrica.....	472
8.3 Similitudine cinematica.....	473
8.4 Similitudine dinamica.....	474

8.5 Similitudine termodinamica.....	475
8.6 Analisi dimensionale.....	475
8.6.1 Fluido incompressibile viscoso.....	476
8.6.2 Fluido incompressibile pesante, non viscoso.....	478
8.6.3 Fluido comprimibile non viscoso.....	478
8.6.4 Fluido comprimibile viscoso in presenza di gravità.....	480
8.6.5 Flusso viscoso in presenza di effetti di convezione termica.....	482
8.6.6 Altri numeri caratteristici di interesse nelle applicazioni dell'ingegneria.....	483
8.7 Determinazione del coefficiente di attrito a parete per flussi in condotti.....	486
8.7.1 Determinazione del coefficiente di attrito nella zona di moto turbolento.....	488
8.7.2 Estensione dei risultati a condotti con sezione non circolare.....	492
8.8 Determinazione del coefficiente di attrito in flussi esterni che investono corpi.....	493
8.9 Determinazione del coefficiente di convezione termica.....	495
8.9.1 Espressione del coefficiente $h$ in convezione forzata.....	496
8.9.2 Espressione del coefficiente $h$ in convezione naturale.....	500
8.10 Applicazione dei concetti di similitudine allo studio delle macchine.....	501
8.10.1 Vincoli nella scelta del modello.....	505
8.10.2 Turbine idrauliche.....	505
8.10.3 Turbocompressori centrifughi.....	507
8.11 Conclusioni.....	513
<b>Capitolo 9 Vorticità, teoria dello strato limite e analisi di stabilità dei flussi laminari.....</b>	<b>515</b>
9.1 Caratterizzazioni dei vortici.....	515
9.2 Teoremi di Kelvin, Lagrange e Helmholtz.....	517
9.3 Equazione di Helmholtz e dinamica della vorticità.....	520
9.3.1 Interpretazione fisica del termine $\rho\omega \cdot \nabla v$ .....	522
9.4 Punto di stagnazione nella corrente che investe un corpo.....	524
9.5 Flusso attorno ad un disco rotante.....	529
9.6 Sorgenti di vorticità.....	532
9.7 Teoria di Prandtl dello strato limite.....	536
9.8 Strato limite laminare di Blasius come applicazione della teoria di Prandtl.....	540
9.8.1 Metodo approssimato di Pohlhausen.....	544
9.9 Parametri globali caratterizzanti lo strato limite.....	546
9.9.1 Parametri integrali di strato limite calcolati a partire dall'equazione di Blasius.....	553
9.10 Equazione integrali di Von Karman e di Wieghardt.....	555
9.10.1 Note sull'utilità dell'equazione integrale di Von Karman.....	557
9.10.2 Equazione integrale di Wieghardt.....	558
9.11 Teoria dell'instabilità fluidodinamica dello strato limite.....	560
9.11.1 Criterio del punto di inflessione di Rayleigh.....	565
9.11.2 Teorema di Squire ed onde di Tollmien-Schlichting.....	567
9.12 Strato limite termico e di concentrazione.....	572
9.12.1 Strato limite termico.....	572
9.12.2 Strato limite di concentrazione.....	574
9.13 Conclusioni.....	576

<b>Capitolo 10 Teoria delle espansioni supersoniche e degli urti gasdinamici</b> .....	579
10.0 Introduzione storica alla gasdinamica.....	579
10.1 Classificazione dei flussi compressibili.....	583
10.2 Cono di Mach e boato sonico.....	584
10.3 Forma notevole delle equazioni di Eulero per il flusso 2D supersonico.....	589
10.4 Linee caratteristiche sul piano fisico del flusso ed equazioni di compatibilità.....	592
10.4.1 Piano odografo.....	596
10.5 Linee caratteristiche sul piano fisico del flusso e legame col piano odografo.....	599
10.6 Il metodo delle caratteristiche per il flusso supersonico stazionario 2D.....	604
10.7 Flussi supersonici ad onda semplice.....	606
10.7.1 Espansione di Prandtl-Meyer.....	609
10.8 Genesi degli urti.....	613
10.8.1 Vincoli sulle proprietà del fluido per la genesi degli urti di compressione ed espansione.....	616
10.9 Teoria degli urti gasdinamici.....	618
10.9.1 Equazioni di governo degli urti.....	618
10.9.2 Analisi delle equazioni di governo degli urti.....	622
10.9.3 Relazione di Prandtl sugli urti.....	625
10.9.4 Curva polare dell'urto sul piano odografo.....	626
10.10 Natura della trasformazione attraverso l'urto e perdite aerodinamiche.....	630
10.10.1 Irreversibilità nelle onde d'urto deboli.....	632
10.10.2 Perdite aerodinamiche per urto.....	632
10.11 Interazione e riflessione di onde d'urto e di onde di espansione.....	635
10.11.1 Interazione tra onde di espansione.....	637
10.11.2 Interazione tra urto e ventaglio di espansione.....	638
10.11.3 Interazione tra urti.....	641
10.11.4 Interazione delle onde di espansione e degli urti con il contorno.....	644
10.12 Postespansione nell'ambiente a valle di un canale bidimensionale.....	653
10.13 Conclusioni.....	661
<b>Capitolo 11 Modelli gasdinamici unidimensionali per le macchine a fluido</b> .....	665
11.1 Cause di variazione delle proprietà del flusso in condotti unidimensionali.....	665
11.2 Flussi isentropici in ugelli e diffusori.....	666
11.2.1 Andamento delle proprietà termodinamiche del flusso isentropico in ugelli.....	669
11.2.2 Progetto di ugelli.....	672
11.2.3 Forze scambiate tra flusso e pareti.....	673
11.2.4 Prestazioni di ugelli reali in condizioni di progetto.....	675
11.3 Funzionamento in condizioni di fuori-progetto (trattazione 1D).....	678
11.3.1 Ugelli semplicemente convergenti.....	678
11.3.2 Ugelli de Laval.....	682
11.3.3 Calcolo dell'ugello de Laval in presenza di urti retti.....	687
11.4 Condizioni di choking in ugelli.....	692
11.5 Flusso con attrito in condotti a sezione costante.....	694
11.5.1 Equazioni differenziali di governo del flusso di Fanno.....	696
11.5.2 Integrazione delle equazioni differenziali di governo e formule algebriche.....	700
11.5.3 Valutazione del coefficiente di attrito per fluido comprimibile.....	702

11.6 Choking dovuto all'attrito nel flusso di Fanno.....	705
11.7 Condotti a sezione costante con attrito alimentati da ugelli.....	708
11.7.1 Condotti alimentati da ugelli convergenti: analisi al variare della pressione di valle.....	708
11.7.2 Condotti alimentati da ugelli de Laval: analisi al variare della pressione di valle e di $L$ .....	712
11.8 Flusso diabatico di Rayleigh in condotti a sezione costante.....	714
11.8.1 Equazioni differenziali di governo del flusso di Rayleigh.....	717
11.8.2 Formule algebriche del flusso di Rayleigh.....	719
11.9 Choking termico nel flusso di Rayleigh.....	722
11.10 Curve di Rayleigh e di Fanno parametrizzate al variare della portata.....	724
11.11 Flusso isoterma con attrito in condotti lunghi a sezione costante.....	726
11.12 Caratterizzazione del choking e differenze tra choking e flussi sonici.....	729
11.13 Flussi incompressibili in canali aperti e analogie con i flussi compressibili.....	731
11.13.1 Choking nei flussi incompressibili a superficie libera .....	734
11.13.2 Analogie tra flussi a superficie libera e flussi compressibili in ugelli.....	736
11.14 Tenute a labirinto.....	740
11.15 Conclusioni.....	746
<b>Bibliografia.....</b>	<b>753</b>