

Indice

Prefazione	XVII
Introduzione	XXI
Ringraziamenti	XXVII
1 La meccanica dei solidi	5
1.1 Introduzione	5
1.2 Il corpo continuo	6
1.3 Le azioni esterne e il corpo continuo di Cauchy	7
1.4 La formalizzazione del problema	10
2 L'analisi della tensione	13
2.1 Introduzione	13
2.2 Il vettore tensione	13
2.2.1 Il postulato di Cauchy	15
2.3 Scomposizione del vettore tensione	17
2.4 Lo stato di tensione in un punto	18
2.4.1 Le componenti speciali di tensione	20
2.4.2 Il teorema di Cauchy	21
2.4.3 La rappresentazione dello stato di tensione	24
2.4.4 Esempio 1: tensore delle tensioni e vettore tensione	25
2.5 Le equazioni di equilibrio indefinito	27
2.5.1 Equilibrio alla traslazione	28
2.5.2 Equilibrio alla rotazione	29
2.5.3 Le condizioni di equilibrio al contorno	30
2.6 Analisi e proprietà della tensione	32
2.7 Il principio di reciprocità	32
2.8 Trasformazione del tensore per rotazione del sistema di coordinate	33
2.9 Tensioni principali e direzioni principali	35
2.9.1 Ortogonalità delle direzioni principali	37

2.9.2	Il sistema di riferimento principale	38
2.9.3	Esempio 2: calcolo delle tensioni e delle direzioni principali	40
2.10	Classificazione dello stato di tensione	42
2.11	La tensione media e il deviatore di tensione	45
2.12	La tensione ottaedrica	46
2.13	Analisi della tensione nel piano	48
2.13.1	Il vettore tensione nel piano	48
2.13.2	La trasformazione per rotazione nel piano	49
2.13.3	Le tensioni principali nel piano	50
2.13.4	Tensione in recipienti a parete sottile in pressione	52
2.14	Rappresentazione della tensione sul piano di Mohr	55
2.14.1	Casi notevoli	58
2.14.2	Stato di tensione rappresentato su una semicirconferenza di Mohr	59
2.14.3	Rappresentazione delle trasformazioni per rotazione nel piano sulla circonferenza di Mohr	60
2.15	Esempi	63
2.15.1	Esempio 3: stato di tensione triassiale	63
2.15.2	Esempio 4: stato di tensione piano	68
2.15.3	Esempio 5: identificazione dello stato di tensione in un punto	74
3	L'analisi della deformazione	79
3.1	Introduzione	79
3.2	La funzione di trasporto	81
3.3	Il vettore spostamento	82
3.4	Proprietà della funzione di trasporto e del campo di spostamento	83
3.5	Analisi del campo di spostamento	85
3.6	Trasformazione dell'intorno infinitesimo di un punto del corpo	86
3.6.1	Trasformazioni affini	87
3.6.2	Trasformazione del volume elementare nell'intorno del generico punto P	88
3.6.3	Esempio 1: trasformazione e variazione volumetrica nell'intorno di un punto	90
3.7	La misura della deformazione	92
3.8	La teoria deformativa del primo ordine	93
3.8.1	Le matrici $[E]$ e $[R]$	95
3.8.2	La rotazione rigida locale	95
3.9	Il tensore $[E]$ delle piccole deformazioni	96
3.9.1	Il vettore deformazione $\bar{\epsilon}_n$	96
3.9.2	Variazioni di lunghezza e distorsioni angolari	99
3.10	Le componenti speciali di deformazione	102
3.11	La deformazione del volume elementare	105

3.11.1	Esempio 2: ricostruzione del volume deformato noto il tensore $[E]$	105
3.12	Le equazioni di congruenza	107
3.13	Proprietà del tensore di deformazione	110
3.14	Trasformazione di $[E]$ per rotazione del sistema di riferimento	111
3.15	Deformazioni principali e direzioni principali	112
3.15.1	Il sistema di riferimento principale	113
3.16	Classificazione dello stato di deformazione	115
3.17	La deformazione volumetrica	116
3.18	Deformazione volumetrica e deviatore di deformazione	117
3.19	Rappresentazione della deformazione sul piano di Mohr	118
3.20	Analisi della deformazione nel piano	120
3.20.1	Trasformazione del tensore per rotazione degli assi	121
3.20.2	Deformazioni e direzioni principali nel piano	122
3.20.3	Relazione angolare tra il sistema principale $O12$ e il sistema Oxy	122
3.20.4	La rappresentazione sulla circonferenza di Mohr	123
3.21	Misure con estensimetri	125
3.21.1	Rosette estensimetriche	126
3.22	Esempi	130
3.22.1	Esempio 3: dal campo di spostamento allo stato di deformazione	130
3.22.2	Esempio 4: deformazione nel sistema principale e nel sistema generico	138
3.22.3	Esempio 5: misure con rosette estensimetriche	140
4	Il problema generale della meccanica dei solidi	145
4.1	Introduzione	145
4.2	La notazione in forma vettoriale dei tensori di tensione e deformazione	146
4.3	La dualità statico cinematica	148
4.4	L'identità dei lavori virtuali	149
4.4.1	Il lavoro virtuale interno	151
4.4.2	Verifica dell'identità dei lavori virtuali	153
4.4.3	Osservazioni	153
4.5	Il legame costitutivo	154
4.6	Formulazione completa del problema	155
4.7	Il bilancio energetico	156
4.7.1	Il lavoro di deformazione	156
4.7.2	Il lavoro specifico di deformazione	158

5	Il legame costitutivo	161
5.1	Introduzione	161
5.2	L'analisi sperimentale del comportamento dei materiali	161
5.3	Le curve di risposta sperimentali	162
5.3.1	La dipendenza dalla variabile temporale	164
5.3.2	La variabilità delle proprietà nel materiale	165
5.4	La funzione di risposta	167
5.5	Il legame elastico	168
5.5.1	Il legame elastico diretto	170
5.5.2	Il legame elastico inverso	171
5.6	Il legame elastico lineare	172
5.7	Il materiale elastico lineare isotropo	175
5.7.1	Proprietà delle matrici $[C]$ e $[D]$	178
5.7.2	Il modulo di elasticità volumica	178
5.8	La misura delle costanti elastiche	179
5.8.1	La prova di trazione	179
5.8.2	La prova di torsione	182
5.9	Limiti ai valori delle costanti elastiche	183
5.9.1	Valori tipici delle costanti elastiche	185
5.9.2	Un'espressione alternativa delle costanti elastiche: le costanti di Lamè	185
5.10	Stati tensionali piani	186
5.11	Stati deformativi piani	187
5.12	Materiali non isotropi	187
5.12.1	Materiali monoclini	188
5.12.2	Materiali ortotropi	189
5.12.3	Il materiale trasversalmente isotropo	191
5.13	Trasformazione delle costanti elastiche per rotazione del sistema di riferimento	192
5.14	Esempi	194
5.14.1	Esempio 1: stato di tensione e deformazione da misure con estensimetri	194
5.14.2	Esempio 2: effetti del rapporto di Poisson	197
5.14.3	Esempio 3: deformazione di un recipiente cilindrico in pressione	199
6	I criteri di resistenza statica	203
6.1	Introduzione	203
6.2	Il limite elastico e la crisi di un componente	204
6.3	Prove di trazione: lo snervamento e la rottura	205
6.3.1	Simmetria-asimmetria della risposta a trazione e compressione	207
6.4	Il dominio elastico e la frontiera elastica	208
6.4.1	Stati di tensione pluriassiali	209

6.4.2	I materiali isotropi	211
6.5	La tensione equivalente	212
6.6	I criteri di resistenza statica	213
6.7	Il criterio di Galileo-Navier-Rankine	214
6.8	Il criterio di Guest-Tresca	215
6.9	I criteri di Von Mises – Huber – Hencky – Ros-Eichinger	218
6.9.1	La tensione tangenziale ottaedrica (Ros-Eichinger)	218
6.9.2	L'energia di distorsione (Von Mises – Huber – Hencky)	219
6.9.3	Espressione in funzione degli invarianti e rappresentazione grafica	220
6.9.4	Confronto tra i criteri di Tresca e di Von Mises	221
6.10	Il criterio di Mohr	223
6.11	Il criterio di Mohr Coulomb	224
6.12	Il criterio di Drucker-Prager	226
6.13	Verifiche di resistenza: il coefficiente di sicurezza e la tensione ammissibile	228
6.14	Esempi	231
6.14.1	Esempio 1: materiale duttile simmetrico - criteri di Tresca e Von Mises	231
6.14.2	Esempio 2: materiale duttile simmetrico - effetto di uno stato di tensione idrostatico	234
6.14.3	Esempio 3: materiale asimmetrico - criterio di Mohr - Coulomb	236
7	Il solido elastico lineare	241
7.1	Introduzione	241
7.2	Il problema generale del solido elastico lineare	242
7.3	L'esistenza e l'unicità della soluzione	243
7.4	I principali teoremi energetici per il solido elastico lineare	244
7.4.1	Il teorema di Clapeyron	245
7.4.2	Il teorema di Betti (o del lavoro mutuo)	247
7.4.3	Il teorema di Maxwell e i coefficienti di influenza	249
7.4.4	Il secondo teorema di Castigliano	251
7.5	La soluzione del problema elastico lineare	253
7.6	Il postulato di De Saint Venant	254
7.7	La meccanica dei solidi monodimensionali	255
7.8	Il problema di De Saint Venant	256
7.9	Ambito di validità e possibili estensioni del problema di De Saint Venant	264
7.10	La soluzione generale del problema di De Saint Venant	267
7.10.1	La soluzione per le tensioni normali	267
7.11	Conclusioni	271

8	Travi soggette ad azione normale centrata	273
8.1	Introduzione	273
8.2	Lo stato di tensione e di deformazione	273
8.3	Il campo di spostamento	274
8.3.1	La deformata elastica	276
8.4	Lo stato limite elastico	277
8.5	Variazione dello stato di tensione per rotazione	278
8.6	Estensione dei risultati a casi reali	279
8.6.1	Carichi distribuiti lungo l'asse	280
8.6.2	Carichi concentrati applicati lungo l'asse	282
8.6.3	Travi con variazione di sezione graduale e continua	283
8.6.4	Travi con brusche variazioni di sezione lungo l'asse	284
8.6.5	Relazioni generali per il calcolo	285
8.7	Il dimensionamento e la verifica	286
8.8	Problemi iperstatici	287
8.8.1	Il metodo delle forze	288
8.8.2	Il metodo degli spostamenti	289
8.8.3	Il metodo della deformata elastica	290
8.8.4	Il metodo di Castigliano	291
8.9	Effetto di variazioni della temperatura	292
8.10	Esempi	294
8.10.1	Esempio 1: applicazione dell'equazione di Poisson	294
8.10.2	Esempio 2: elementi in parallelo	297
8.10.3	Esempio 3: supporto di una barra rigida mediante aste o funi	300
8.10.4	Esempio 4: dimensionamento di un solido di uniforme resistenza	305
8.10.5	Esempio 5: effetto di un errore di lavorazione	306
9	Travi soggette a flessione semplice	311
9.1	Introduzione	311
9.2	La flessione semplice retta e deviata	311
9.3	La flessione retta	312
9.4	Lo stato di deformazione	313
9.5	Il campo di spostamento	315
9.5.1	Lo spostamento primario	316
9.5.2	La deformata dell'asse (linea elastica)	317
9.5.3	Lo spostamento secondario	318
9.5.4	La variazione di volume	320
9.6	La flessione retta dovuta al momento M_y	320
9.7	Verifica e dimensionamento per la flessione retta	321
9.7.1	Il calcolo a resistenza	321
9.7.2	Il calcolo a rigidezza	323
9.7.3	La scelta della sezione resistente	324

9.8	La flessione deviata	327
9.8.1	L'asse neutro	329
9.8.2	L'andamento delle tensioni	329
9.8.3	La linea elastica	331
9.8.4	Gli assi caratteristici della flessione deviata	332
9.9	L'azione normale eccentrica	333
9.9.1	L'asse neutro	335
9.9.2	Il nocciolo centrale d'inerzia	336
9.9.3	Parzializzazione della sezione	339
9.10	Estensione dei risultati della soluzione di De Saint Venant a casi reali	340
9.10.1	Geometria della sezione lungo l'asse	340
9.10.2	Momenti concentrati lungo l'asse	341
9.10.3	Rettilinearità dell'asse	341
9.10.4	Travi curve soggette a flessione	342
9.11	Esempi	346
9.11.1	Esempio 1: la prova di flessione in 4 punti	346
9.11.2	Esempio 2: flessione retta, materiale asimmetrico a tra- zione e compressione	349
9.11.3	Esempio 3: flessione deviata	352
9.11.4	Esempio 4: azione normale eccentrica	356
9.11.5	Esempio 5: sezioni composte	361
9.11.6	Esempio 6: tensione in un gancio	365
10	Travi soggette a torsione	367
10.1	Introduzione	367
10.1.1	La valenza applicativa del problema	368
10.2	Analisi della torsione uniforme	369
10.3	Torsione nelle travi a sezione circolare	371
10.3.1	I campi di spostamento e di deformazione	374
10.3.2	Lo stato di tensione	375
10.3.3	L'angolo unitario di torsione Θ	375
10.3.4	Il potenziale elastico e l'energia elastica	376
10.3.5	Sezioni piene e cave	377
10.3.6	Caratteristiche del campo di tensione	378
10.3.7	Trasformazioni per rotazione del sistema di riferimento .	380
10.4	Torsione per sezioni non circolari	382
10.5	Soluzione del problema attraverso la funzione d'ingobbamento .	384
10.5.1	Il centro di torsione	386
10.6	Soluzione del problema attraverso la funzione delle tensioni . .	387
10.6.1	L'analogia idrodinamica	389
10.6.2	L'analogia della membrana	390
10.7	La sezione rettangolare	391
10.8	Sezioni aperte a parete sottile	393

10.8.1	La sezione rettangolare a parete sottile	393
10.8.2	Altre sezioni aperte a parete sottile	396
10.9	Sezioni chiuse a parete sottile	399
10.9.1	Sezioni alveolari o pluricellulari	405
10.10	Estensione dei risultati della soluzione di De Saint Venant a casi reali	408
10.10.1	Variazione della geometria della sezione lungo l'asse	409
10.10.2	Momenti applicati lungo l'asse	410
10.10.3	Relazioni generalizzate	411
10.10.4	L'ingobbamento impedito	411
10.10.5	Problemi staticamente indeterminati	413
10.11	Verifica e dimensionamento a torsione	416
10.11.1	Il calcolo a resistenza	416
10.11.2	Il calcolo a rigidezza	418
10.11.3	L'utilizzo del materiale	419
10.12	Esempi applicativi	419
10.12.1	Esempio 1: confronto tra sezione chiusa e aperta a parete sottile	419
10.12.2	Esempio 2: sezioni composte a spessore sottile	422
10.12.3	Esempio 3: struttura iperstatica con elementi disposti in serie	425
10.12.4	Esempio 4: arresto improvviso di un albero	429
10.12.5	Esempio 5: sezioni alveolari	431
11	Travi soggette a taglio e flessione	435
11.1	Introduzione	435
11.2	Presentazione generale del problema	436
11.2.1	La prova di taglio e flessione	438
11.3	La teoria approssimata di Jourawsky	441
11.3.1	Il taglio retto	442
11.4	Applicabilità della formula approssimata di Jourawsky	448
11.5	La sezione rettangolare	449
11.5.1	Lo stato di tensione sulla sezione	450
11.5.2	Validità della formula semplificata	450
11.6	La sezione circolare	451
11.7	Le sezioni a parete sottile	453
11.8	Le sezioni aperte a parete sottile	454
11.8.1	La sezione a doppio T	456
11.9	La determinazione approssimata del centro di taglio	462
11.9.1	Il centro di taglio della sezione a C	463
11.9.2	Osservazioni e accorgimenti	467
11.10	Sezioni a parete sottile chiuse e alveolari	468
11.10.1	Sezioni chiuse simmetriche	469
11.11	La deformazione a taglio	471

11.11.1 Il taglio T_y	472
11.11.2 Il taglio T_x	473
11.11.3 Il fattore di rigidezza a taglio χ	473
11.11.4 Il taglio deviato	474
11.12 Esempi	475
11.12.1 Esempio 1: effetti del taglio e della flessione per una trave a sbalzo	475
11.12.2 Esempio 2: confronto tra le risposte a taglio di sezioni aperte e chiuse	477
11.12.3 Esempio 3: giunzioni di subparticolari soggette a taglio .	481
11.13 Conclusioni	485
12 Analisi e verifica a resistenza delle travi	487
12.1 Introduzione	487
12.2 Lo stato generale di tensione	488
12.2.1 Il tensore delle tensioni	489
12.3 Le verifiche di resistenza	491
12.4 Procedura operativa di verifica	493
12.4.1 Esempio 1: taglio e flessione in una sezione a doppio T .	493
12.4.2 Esempio 2: flessione, taglio e torsione in una sezione rettangolare cava	496
12.4.3 Sintesi conclusiva	498
12.5 Effetti locali e concentrazioni di tensione	498
12.5.1 Concentrazioni di tensione nell'intorno di un foro	500
12.5.2 La piastra forata di dimensioni finite	504
12.5.3 L'uso del fattore di concentrazione delle tensioni K_t . . .	505
12.5.4 Diagrammi di calcolo del fattore di concentrazione delle tensioni K_t	506
12.5.5 Esempio 3: calcolo a snervamento di un albero con variazione di sezione	508
12.5.6 Sovrapposizione di intagli	512
12.6 Conclusioni	516
13 Analisi di rigidezza delle travi	519
13.1 Introduzione	519
13.2 Componenti di deformazione pura	520
13.3 L'energia di deformazione	521
13.4 La deformata elastica	522
13.4.1 L'equazione della linea elastica per azione normale . . .	523
13.4.2 Esempio 1: deformata elastica di una struttura reticolare	525
13.4.3 L'equazione della linea elastica per azione torcente . . .	527
13.4.4 Le equazioni della linea elastica per flessione e taglio . .	528
13.4.5 Esempio 2: confronto tra le condizioni di montaggio di un asse	533

13.4.6	Esempio 3: trave iperstatica soggetta a carico distribuito	538
13.4.7	La deformata elastica di strutture complesse	542
13.4.8	Esempio 4: effetto combinato di flessione e torsione sulla deformata	543
13.5	L'applicazione dei teoremi energetici	548
13.5.1	Il teorema di Castigliano	550
13.5.2	L'integrale di Mohr-Maxwell	552
13.5.3	L'applicazione del principio dei lavori virtuali	553
13.5.4	Cedimenti vincolari - errori di montaggio	554
13.5.5	Esempio 5: spostamento e inclinazione in punti notevoli di una leva	555
13.6	I coefficienti d'influenza	558
13.7	Problemi iperstatici	561
13.7.1	L'integrale di Müller-Breslau	562
13.7.2	Spostamenti generalizzati di una struttura iperstatica .	565
13.7.3	Esempio 6: effetto combinato di flessione e torsione . . .	566
13.7.4	Esempio 7: applicazione del metodo di Müller-Breslau .	568
13.7.5	Esempio 8: effetto di un cedimento vincolare su una tubatura iperstatica	573
13.8	Effetto di variazioni termiche	581
13.8.1	Il caso delle travi	583
13.8.2	Esempio 9: effetto di un gradiente termico	588
14	Stabilità strutturale	591
14.1	Introduzione	591
14.2	Fenomeni d'instabilità negli elementi strutturali	593
14.3	Analisi dell'instabilità di modelli a parametri concentrati	594
14.3.1	Biforcazione dell'equilibrio di tipo stabile	594
14.3.2	Biforcazione dell'equilibrio di tipo instabile	598
14.3.3	Effetto della presenza di imperfezioni	600
14.4	Instabilità nelle travi elastiche	601
14.4.1	Il problema di Eulero	601
14.4.2	Soluzione del problema di Eulero per condizioni di vincolo generiche	605
14.4.3	La lunghezza efficace e il fattore di snellezza	611
14.5	La verifica delle travi soggette a carico di punta	614
14.6	Effetti perturbativi e travi non ideali	617
14.6.1	L'azione normale eccentrica	618
14.6.2	Il carico inclinato	622
14.6.3	Il carico trasversale distribuito	622
14.6.4	Le imperfezioni geometriche (difetto di rettilineità) . . .	623
14.7	Considerazioni progettuali	624
14.8	Esempi di analisi d'instabilità	625
14.8.1	Esempio 1: modello a parametri concentrati	625

14.8.2	Esempio 2: instabilità dovuta a variazione termica . . .	630
14.8.3	Esempio 3: effetto di controventi sul carico critico di una colonna	632
14.8.4	Esempio 4: condizioni di funzionamento di un seghetto manuale	635
14.9	Conclusione	640
15	Condizioni di sollecitazione oltre il limite elastico	641
15.1	Introduzione	641
15.2	Modellazione della risposta del materiale	642
15.2.1	Modelli reologici dei materiali	644
15.3	Problemi elastoplastici elementari	645
15.4	Azione normale oltre il limite elastico	645
15.4.1	Risposta elastoplastica in presenza d'intaglio	650
15.5	Flessione oltre il limite elastico	652
15.5.1	Sezioni a doppia simmetria	653
15.5.2	Sezioni non simmetriche	658
15.5.3	Materiale non simmetrico	660
15.5.4	La cerniera plastica	660
15.5.5	Tensioni residue dopo lo scarico	663
15.6	Torsione oltre il limite elastico	665
15.7	Introduzione all'analisi limite delle strutture	667
15.8	Esempi	671
15.8.1	Esempio 1: parziale plasticizzazione di una sezione ret- tangolare	671
15.8.2	Esempio 2: risposta elastoplastica di una struttura iper- statica	674
	ONLINE - 1 Esempi di analisi strutturale	685
	ONLINE - 2 Esercizi	687
	Riferimenti bibliografici	689