

$$\frac{A_08}{256}$$

Paolo Podio–Guidugli

LEZIONI DI SCIENZA DELLE COSTRUZIONI

Seconda edizione riveduta, corretta
e ampliata, con 340 figure e 95 esercizi



Copyright © MMIX
ARACNE editrice S.r.l.

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

via Raffaele Garofalo, 133/A-B
00173 Roma
(06) 93781065

ISBN 978-88-548-2770-7

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: novembre 2008
II edizione: ottobre 2009
I ristampa aggiornata della II edizione: ottobre 2010

All'ingegner Adriano Guidugli, mio padre, *in memoriam*.

PRESENTAZIONE.

Questa nuova edizione delle mie “Lezioni” riunisce i due volumetti con lo stesso titolo (Parte I. Travi e travature e Parte II. Stato di sforzo nelle travi) apparsi per i tipi di ARACNE giusto un anno fa. Come il sottotitolo recita, la prima edizione è stata corretta – e per molte delle correzioni ringrazio Antonino Favata, Andrea Micheletti e Achille Paolone, che me ne hanno segnalato la necessità – riveduta – perché una rilettura sempre induce qua e là qualche scontento – e ampliata, sia nel testo che nel novero degli esercizi.

Paolo Podio-Guidugli

Roma, 15 ottobre 2009

PRESENTAZIONE DELLA PRIMA EDIZIONE.

Queste mie “Lezioni” hanno radici remote, *in primis* nel libro di Scienza delle Costruzioni di Letterio F. Donato sul quale ho penato da studente a Pisa (dopo che, ai suoi tempi, ci aveva penato mio padre). Non sarebbero come sono se la fortuna non avesse portato a Pisa, dove ho cominciato la mia carriera accademica, Piero Villaggio e Gianpietro Del Piero: con il secondo ho condiviso l'onore e l'onere delle esercitazioni che accompagnavano il corso di lezioni del primo; da entrambi ho imparato molto.

Ho tenuto per la prima volta io stesso un corso completo di Scienza delle Costruzioni da professore di prima nomina nell'Università di Ancona, nel 1975; lì – anzi, sul treno che mi ci portava da Pisa – queste note hanno cominciato a prender forma; tornato dopo un paio d'anni a Pisa, ne ho redatto una seconda versione. Si trattava di documenti manoscritti, distribuiti ai miei studenti al prezzo della carta sulla quale erano fotocopiati; l'intenzione era di dar loro prima o poi l'aspetto formale di un manuale a stampa. Trasferitomi all'Università di Roma TorVergata nel 1983, non ho avuto occasione di insegnare di nuovo Scienza delle Costruzioni che vent'anni dopo, a valle della ‘rivoluzione del 3+2’. Malgrado fossi ormai un moschettiere non più giovane, questo fatto mi ha indotto a concepire un piano didattico ambizioso, che includesse anche la redazione di un corso di lezioni di Meccanica dei Solidi; in tutto, quattro svelti libretti, due di Meccanica e due di Scienza, coerenti per linguaggio e notazioni e privi di ripetizioni, ad uso degli studenti di ingegneria del secondo e terz'anno del corso di laurea triennale. Il terzo di quei libretti è apparso a stampa da poco, anch'esso per i tipi di ARACNE; questo è il quarto ed ultimo; i primi due seguiranno tra breve.

Dei molti che in questi anni mi hanno aiutato, specie per l'esecuzione delle figure ma non solo, devo ringraziare in particolare Antonino Favata, Paola Isabella Valenzi, Andrea Micheletti, Vincenzo Nicotra e Giuseppe Tomassetti.

Roma, 15 ottobre 2008

Indice

Parte I	Travi e Travature	13
1	Un Esempio di Ricapitolazione	15
1.1	Esistenza di soluzioni del problema di equilibrio	16
1.2	La configurazione assunta sotto l'azione del carico	21
1.3	Il principio di bilancio delle potenze	22
1.4	I principi energetici	24
	Esercizi	26
2	La Trave: Geometria, Cinematica, Forze e Sforzi	29
2.1	Nozione di trave	29
	2.1.1 Geometria	29
	2.1.2 Cinematica	31
	2.1.3 Carichi applicati	33
2.2	Azioni interne in una trave	35
	2.2.1 Esempi di calcolo	36
2.3	Caratteristiche di sollecitazione	37
	2.3.1 Diagrammi	40
	2.3.2 Equilibrio puntuale di travi piane ad asse rettilineo	42
	2.3.3 Altri esempi di tracciamento di diagrammi	44
3	Le Travature: Giunzioni, Sconnessioni e Simmetrie	47
3.1	Giunzioni e sconnessioni	47
	Esercizi	53
3.2	Simmetrie ed equilibrio	56

3.2.1	Esempi	64
4	Equilibrio di Travi Piane ad Asse Curvilineo	69
4.1	Equilibrio puntuale	69
4.1.1	Condizioni differenziali	70
4.1.2	Condizioni di salto	71
	Esercizio	72
4.2	Equilibrio per parti: l'Equazione dei Lavori Virtuali	74
4.2.1	In assenza di carichi concentrati	74
4.2.2	In presenza di carichi concentrati	77
4.3	L'arco a tre cerniere	78
4.3.1	La forma di un arco soggetto solo a forza normale	79
4.3.2	La descrizione analitica di una curva piana	80
4.3.3	Lo sforzo normale nelle sezioni in chiave e d'imposta	82
	Esercizi	82
5	Deformazioni di Travi ad Asse Rettilineo	85
5.1	La soluzione elastica dei problemi di equilibrio	85
5.2	Deformazioni estensionali	87
5.2.1	Deformazioni estensionali di origine meccanica	87
	Esercizi	94
5.2.2	Deformazioni estensionali di origine termica	95
	Esercizi	98
5.2.3	Deformazioni estensionali dovute a distorsioni	101
5.3	Deformazioni flessionali	102
5.3.1	Il modello di Bernoulli-Navier	102
5.3.2	L'equazione della linea elastica	106
	Esercizio	109
5.3.3	Il modello di Timoshenko	110
	Esercizi	112
5.3.4	Deformazioni flessionali di origine termica	115
5.3.5	Deformazioni flessionali dovute a distorsioni	117
	Esercizio	118
5.4	Deformazioni torsionali	118
6	Impieghi dell'Equazione dei Lavori virtuali	123
6.1	L'Equazione dei Lavori Virtuali per travature ad asse rettilineo	123
	Esercizi	128
6.2	Calcolo di spostamenti e rotazioni in travature isostatiche	130
6.2.1	Esempi	131
6.2.2	Il caso delle travature reticolari	136
	Esercizio	138

6.3	Digressione: Elementi di teoria lineare delle travature ad asse rettilineo	138
6.3.1	Principio di Sovrapposizione	139
6.3.2	Energia elastica. Teorema del Lavoro e dell'Energia	139
6.3.3	Teorema di Reciprocità	140
6.3.4	Teorema di Unicità	141
6.4	Calcolo di incognite iperstatiche	141
	Esercizio	144
6.4.1	La scelta del sistema principale	144
6.4.2	Le equazioni di elasticità	147
6.4.3	Esempi	149
6.4.4	Cedimenti anelastici.	153
6.4.5	Altri esempi	159
6.4.6	Sistemi reticolari	163
6.5	Calcolo di spostamenti e rotazioni in travature iperstatiche	165
6.5.1	Esempio	166
7	Instabilità dell'Equilibrio Elastico	169
7.1	Il carico critico	169
7.1.1	Deformabilità flessionale concentrata	169
7.1.2	Deformabilità flessionale diffusa	172
7.2	Il carico critico dal punto di vista del progettista di strutture	175
7.3	Effetto delle condizioni di vincolo	178
7.4	Cause di instabilità diverse dai carichi applicati	180
7.4.1	Variazioni di temperatura	180
7.4.2	Distorsioni	181
7.5	Effetto delle imperfezioni	182
7.5.1	Imperfezioni geometriche	182
7.5.2	Imperfezioni di carico	185
7.6	Travature con porzioni rigide	186
	Esercizi	188
Parte II Stato di Sforzo nelle Travi		191
8	Richiami e Complementi di Algebra Lineare	193
8.1	Prodotto scalare, prodotto vettoriale e prodotto misto	193
8.2	Prodotto diadico	194
8.3	Tensori del secondo ordine	194
8.3.1	Base ortonormale per lo spazio dei tensori	194
8.3.2	Traccia e determinante	196
8.3.3	Composizione e prodotto scalare di tensori	196
8.3.4	Tensori simmetrici e tensori antisimmetrici	197

9	Forze e Sforzi in un Continuo Tridimensionale	199
9.1	Interazioni di contatto	199
9.2	Sistemi di forze bilanciati	204
9.3	Il Teorema del Tetraedro	207
9.3.1	Forze di contatto e sforzo	207
9.3.2	Sforzo e forze a distanza	210
9.3.3	Simmetria del campo di sforzo	212
9.3.4	Il Principio dei Lavori Virtuali	213
	Esercizi	217
9.4	Il problema statico	220
9.4.1	Trazione	221
9.4.2	Pressione	222
9.4.3	Taglio	223
	Esercizi	224
9.5	Analisi locale dello stato di sforzo	226
9.5.1	Stato di sforzo come addizione di stati elementari	226
9.5.2	Tensioni e direzioni principali	227
9.5.3	Tensione normale e tensione tangenziale	233
	Esercizi	236
10	Polarità d’Inerzia	241
10.1	Il tensore d’inerzia	241
10.1.1	Teorema di Huyghens	242
10.1.2	Teorema di Steiner	244
	Esercizi	245
10.2	L’ellisse d’inerzia	248
10.2.1	Polarità tra rette	248
10.2.2	Polarità tra punti e rette	250
10.2.3	Antipolarità tra punti e rette	252
10.3	Il nocciolo d’inerzia	254
	Esercizi	256
11	Il Problema di Saint-Venant: Considerazioni Generali	261
11.1	La rappresentazione del campo di sforzo in una trave	261
11.2	Formulazione del Problema di Saint-Venant	262
11.2.1	Geometria. Carichi applicati	263
11.2.2	Sforzi. Caratteristiche della sollecitazione	264
11.2.3	L’ipotesi di Saint-Venant	266
11.2.4	Autovalori e autovettori	271
	Esercizi	272
11.3	Spostamento, deformazione, equazione costitutiva.	274
11.3.1	Spostamento. Tensore di deformazione	275

11.3.2	L'equazione costitutiva dell'elasticità classica	278
	Esercizi	281
12	Il Problema di Saint-Venant: Casistica	285
12.1	Forza normale	285
12.2	Flessione retta	289
	Esercizi	295
12.3	Flessione deviata	296
	Esercizi	299
12.4	Pressoflessione	302
	Esercizio	303
12.5	Flessione e taglio	304
12.5.1	Teoria approssimata del taglio	306
	Esercizi	310
12.6	Torsione	322
12.6.1	Sezione circolare	323
12.6.2	Sezioni ellittica e triangolare equilatera	325
12.6.3	Sezione rettangolare	327
12.6.4	Valutazioni analogico-sperimentali	328
12.6.5	Sezioni tubolari. Formule di Bredt	329
	Esercizi	334
12.7	Rigidezza allo scorrimento e rigidezza torsionale di una trave . . .	338
12.7.1	Rigidezza allo scorrimento	338
12.7.2	Rigidezza torsionale	339
	Esercizi	340
13	Resistenza e Sicurezza di Strutture Travate	341
13.1	Considerazioni introduttive	341
13.2	Criteri di resistenza puntuale	343
13.2.1	Criterio della tensione normale (Galileo, Navier)	344
13.2.2	Criterio della tensione tangenziale (Tresca, Guest)	345
13.2.3	Criterio di Mohr-Coulomb	346
13.2.4	Criterio della dilatazione (Navier, Saint-Venant, Grashof)	346
13.2.5	Criteri energetici (Beltrami; Huber, Hencky, v. Mises)	348
13.3	Verifiche di resistenza e verifiche di sicurezza	351
	Esercizi	354
	Elenco dei simboli usati di frequente	357

Parte I

Travi e Travature

Questa prima parte del nostro corso di lezioni ha per oggetto la *teoria lineare delle travature elastiche*. Nello svilupparla, avremo cura di sottolineare come la struttura concettuale di questa teoria sia la stessa della teoria delle travature consistenti di travi rigide ed elementi elastici, che è stata presentata nel corso di Meccanica dei Solidi. Vi saranno, come è naturale quando si costruisce una teoria di generalità maggiore di un'altra, delle inevitabili complicazioni tecniche, la principale delle quali sarà l'impiego del calcolo differenziale in luogo o a complemento dei semplici sviluppi algebrici che bastano per trattare le travature a deformabilità concentrata; serviranno anche conoscenze di base relative alla rappresentazione analitica di curve, piane e non, all'integrazione e differenziazione su curve e alla risoluzione di problemi al contorno retti da equazioni differenziali ordinarie.

Introdotta la nozione di trave, ne descriveremo geometria e cinematica, carichi applicati e misure di sollecitazione; considereremo quindi le travature, cioè, quei sistemi strutturali che sono costituiti da travi collegate da giunzioni, complete o parziali (sconnessioni). Seguirà la deduzione delle equazioni che regolano l'equilibrio di una trave; e, nel caso di travi elastiche ad asse rettilineo, la formulazione e risoluzione dei problemi che ne determinano le deformazioni, siano esse estensionali, flessionali (tanto secondo il modello di Bernoulli-Navier che secondo il modello di Timoshenko) o torsionali.

Molta attenzione dedicheremo all'impiego dell'Equazione dei Lavori Virtuali per il calcolo diretto (cioè, senza essere costretti a compiere una risoluzione completa del problema di equilibrio) del valore in un punto della linea d'asse di una travatura dell'uno o dell'altro dei campi che ne descrivono lo stato di deformazione e di sollecitazione. Infine, compiremo uno studio elementare del problema di perdita di stabilità della configurazione di equilibrio di una trave elastica ad asse rettilineo, sia quando ciò è dovuto a variazioni di temperatura o a distorsioni sia quando il carico applicato attinge un valore critico, né trascureremo di considerare, nella determinazione del carico critico, l'effetto delle condizioni di vincolo e di eventuali imperfezioni costruttive o di carico.