

**Claudio Gianini**

# **INGEGNERIA STRUTTURALE COMPUTAZIONALE**

Calcolo automatico di strutture meccaniche

*Introduzione alla Parte I:  
di Rory Byrne*

*Introduzione alla Parte II:  
di Luca Marmorini*

  
IDELSON-GNOCCHI

## INDICE

PREFAZIONE.....	13
Nota dell'Autore .....	15
PARTE I .....	17
INTRODUZIONE I.....	19
<b>CAPITOLO 1</b> La modellazione delle strutture mediante Elementi Finiti.....	21
1.1 Introduzione .....	21
1.2 La modellazione con elementi 2D.....	22
1.2.1 Lo stato di sforzo piano .....	23
1.2.2 Lo stato di deformazione piana.....	26
1.2.3 Lo stato di sforzo assialsimmetrico .....	28
1.3 La modellazione con elementi 3D.....	33
1.4 La modellazione con elementi shell.....	37
1.5 Considerazioni sui collegamenti tra varie parti.....	41
1.5.1 Collegamenti saldati .....	41
1.5.2 Collegamenti rivettati .....	42
1.5.3 Collegamenti a vite .....	43
1.5.4 Collegamenti mediante incollaggio .....	43
1.6 Gli elementi monodimensionali .....	43
1.7 Gli elementi zerodimensionali .....	45
1.8 Gli elementi non strutturali .....	46
1.9 Gli elementi membrana.....	48
1.10 Considerazioni di carattere generale .....	48
1.10.1 Generalità.....	49
1.10.2 Gli elementi monodimensionali.....	49
1.10.3 Gli elementi 2D e gli elementi shell .....	50
1.10.4 Gli elementi 3D.....	50
1.10.5 Gli elementi non strutturali .....	51
1.11 Conclusioni .....	51
<b>CAPITOLO 2</b> La modellazione delle condizioni al contorno .....	53
2.1 Introduzione .....	53
2.2 Le condizioni di vincolo.....	53
2.3 Le condizioni di carico.....	56
2.3.1 I carichi puntuali .....	56
2.3.2 I carichi distribuiti.....	57
2.3.3 I carichi termici.....	58
2.3.4 I carichi inerziali .....	58
2.3.5 Le forze di volume.....	59
2.4 Simmetria e antisimmetria .....	59
2.4.1 Simmetrie geometriche e di carico .....	59
2.4.2 Simmetrie geometriche e antisimmetrie di carico .....	62
2.4.3 Analisi modale .....	66
2.4.4 Conclusioni .....	68

<b>CAPITOLO 3</b>	L'interpretazione dei risultati .....	71
3.1	Introduzione .....	71
3.2	Contour mediati e non mediati .....	72
3.3	Il sistema di riferimento .....	74
3.4	Gli elementi shell .....	76
3.4.1	Top, Bottom e Middle .....	76
3.4.2	Intersezioni tra elementi su piani diversi .....	79
3.4.3	Giunzioni discontinue .....	84
3.4.4	Giunzioni continue .....	94
3.5	Gli elementi solidi .....	95
3.5.1	Giunzioni discontinue .....	97
3.5.2	Giunzioni continue .....	98
3.6	Gli elementi monodimensionali .....	99
3.7	Gli elementi non strutturali .....	101
3.8	Le reazioni vincolari .....	102
3.9	Considerazioni sulla post-processazione grafica .....	106
3.9.1	Generalità .....	106
3.9.2	Le linee di flusso .....	106
3.9.3	L'effetto imbuto .....	108
3.9.4	Strain energy .....	110
3.9.5	Punti di Gauss e nodi .....	111
<b>CAPITOLO 4</b>	Frequenze proprie e modi di vibrare .....	115
4.1	Introduzione .....	115
4.2	Il problema dinamico .....	115
4.3	Analisi modale "free-free" .....	116
4.4	Analisi modale vincolata .....	117
4.5	L'importanza della discretizzazione .....	118
4.6	Massa modale effettiva e fattore di partecipazione modale .....	122
4.7	Load stiffening .....	125
4.8	Conclusioni .....	127
<b>CAPITOLO 5</b>	L'instabilità dell'equilibrio elastico .....	129
5.1	Introduzione .....	129
5.2	Il buckling lineare .....	129
5.3	L'approccio mediante FEM .....	129
5.4	Alcuni esempi applicativi .....	133
5.4.1	Cilindro sottoposto a pressione esterna .....	134
5.4.2	Trave incastrata caricata a flessione e taglio .....	135
5.4.3	Cilindro a spessore sottile soggetto a carico assiale di compressione .....	137
5.4.4	Cilindro a spessore sottile soggetto a pura torsione .....	138
5.5	Cenni sull'instabilità in campo non lineare .....	140
<b>CAPITOLO 6</b>	Gli errori nel calcolo a Elementi Finiti .....	141
6.1	Introduzione .....	141
6.2	Gli errori dell'utente .....	141
6.3	Gli errori di discretizzazione .....	143
6.3.1	Introduzione .....	143
6.3.2	Densità della mesh .....	143

6.3.2.1	Un caso limite.....	143
6.3.2.2	Un caso pratico.....	147
6.3.3	Tipo di elemento.....	149
6.3.3.1	Trave A.....	150
6.3.3.2	Trave B.....	153
6.3.3.3	Esaedri contro tetraedri.....	158
6.3.3.4	Quadrangoli contro triangoli.....	161
6.3.3.5	Trave con sezione a C.....	161
6.3.3.6	Trave a grande curvatura.....	164
6.3.3.7	La tecnica dello "skinning".....	168
6.3.4	Conclusioni.....	170
6.4	Gli errori di modellazione.....	171
6.4.1	Gli errori di "distrazione".....	171
6.4.2	Gli errori di concetto.....	174
6.4.2.1	Trave modellata esclusivamente con elementi brick.....	175
6.4.2.2	Trave modellata brick/shell - Soluzione I.....	175
6.4.2.3	Trave modellata brick/shell - Soluzione II.....	177
6.4.2.4	Trave modellata brick/shell - Soluzione III.....	178
6.4.2.5	Trave modellata brick/shell - Soluzione errata.....	180
6.4.2.6	Interfaccia brick/beam.....	180
6.4.2.7	Interfaccia tra altri elementi.....	181
6.5	Gli errori numerici.....	181
6.5.1	Il numero di condizionamento per la matrice di rigidezza.....	182
6.5.2	Autovalori e autovettori della matrice di rigidezza.....	183
6.5.3	Elemento piano perfettamente quadrato.....	185
6.5.4	Elemento piano leggermente distorto.....	186
6.5.5	Elemento fortemente distorto.....	187
6.5.6	Elemento inaccettabilmente distorto.....	188
6.6	Gli errori di pre-processazione.....	191
<b>CAPITOLO 7</b> Tecniche avanzate di modellazione.....		193
7.1	Introduzione.....	193
7.2	Il Substructuring.....	193
7.2.1	I superelementi.....	194
7.2.2	Un esempio applicativo.....	195
7.3	Il Submodeling.....	201
7.3.1	Un esempio applicativo.....	201
7.4	La simulazione degli accoppiamenti per interferenza.....	210
7.4.1	Albero - Volano.....	211
7.4.2	Ruota - Assile.....	214
7.4.3	Supporto per motoriduttore.....	216
7.4.4	Guscio - Spina.....	219
7.5	Il precarico nei collegamenti a bullone.....	229
7.6	Conclusioni.....	236
<b>CAPITOLO 8</b> Il calcolo elastico lineare dei materiali compositi.....		239
8.1	Introduzione.....	239

8.1.1	Cenni storici.....	240
8.2	Tipi di elemento da impiegare.....	241
8.3	I compositi a fibra corta e non orientata.....	243
8.4	I compositi a fibra lunga e orientata.....	243
8.4.1	I materiali.....	243
8.4.2	L'impilamento dei teli.....	245
8.4.3	L'orientazione dei teli.....	246
8.4.4	L'orientazione della normale degli elementi.....	246
8.4.5	Il draping.....	247
8.5	Un esempio di laminato senza core.....	248
8.5.1	Barretta con sequenza di impilamento simmetrica.....	249
8.5.2	Barretta con sequenza di impilamento non simmetrica.....	251
8.5.3	Barretta con impilamento simmetrico e aumento dei teli unidirezionali.....	254
8.5.4	Barretta con impilamento simmetrico e teli orientati diversamente.....	256
8.5.5	Barretta con impilamento simmetrico soggetta a flessione - Caso 1.....	258
8.5.6	Barretta con impilamento simmetrico soggetta a flessione - Caso 2.....	259
8.6	I pannelli sandwich.....	260
8.7	I 3D layered elements.....	267
8.8	I 3D continuum shell elements.....	268
8.9	I metodi "zone based" e "ply based".....	273
8.9.1	Introduzione.....	273
8.9.2	Metodo zone based.....	273
8.9.3	Metodo ply based.....	274
8.9.4	Zone based vs ply based.....	274
8.10	Ancora sugli elementi 3D.....	274
8.11	I compositi 3D.....	278
8.12	I sistemi di giunzione.....	279
8.13	Cenni sui compositi a matrice metallica.....	280
8.14	Considerazioni conclusive.....	281
<b>CAPITOLO 9</b> Metodi di validazione dei modelli a elementi finiti.....		285
9.1	Introduzione.....	285
9.2	La validazione numerica.....	285
9.2.1	Carichi applicati e reazioni vincolari.....	286
9.2.2	Indice "EPSILON".....	286
9.2.3	Indice "MAXRATIO".....	287
9.2.4	Indice di controllo sui modi rigidi.....	287
9.2.5	Controllo sulla strain energy.....	287
9.2.6	Considerazioni sugli indici di controllo.....	288
9.2.7	I controlli visivi.....	288
9.3	La validazione sperimentale.....	289
9.3.1	L'applicazione dei carichi senza misurazione delle tensioni.....	289
9.3.2	L'applicazione dei carichi con misurazioni estensimetriche.....	290
9.3.3	La fotoelasticità.....	292
<b>CAPITOLO 10</b> Le verifiche di resistenza.....		293
10.1	Introduzione.....	293

10.2	La verifica statica per i materiali omogenei e isotropi.....	294
10.2.1	Le parti di struttura continue.....	294
10.2.2	I sistemi di collegamento.....	296
10.2.2.1	Introduzione.....	296
10.2.2.2	Le viti.....	296
10.2.2.3	I rivetti.....	299
10.2.2.4	I fori e gli occhielli.....	299
10.2.2.5	Le saldature.....	301
10.3	La verifica a fatica per i materiali omogenei e isotropi.....	302
10.3.1	Le parti di struttura continue.....	302
10.3.1.1	Metodo classico.....	303
10.3.1.2	Il criterio di Gough-Pollard.....	306
10.3.1.3	Il metodo UIC (Union International des Chemins de Fer).....	306
10.3.1.4	Il criterio di Von Mises.....	307
10.3.1.5	Il coefficiente $b_2$ (finitura superficiale).....	308
10.3.1.6	Il coefficiente $b_3$ (effetto dimensionale).....	309
10.3.1.7	I coefficienti di sovrasollecitazione $K_t$ e $K_f$ .....	310
10.3.1.8	Un esempio applicativo.....	310
10.3.1.9	La regola di Miner.....	314
10.3.2	I sistemi di collegamento.....	317
10.4	I criteri di rottura per i materiali compositi.....	318
10.4.1	Il criterio della massima tensione.....	318
10.4.2	Il criterio di Tsai-Hill.....	320
10.4.3	Il criterio di Tsai-Wu.....	322
10.4.4	Interlaminar shear.....	322
10.4.5	Considerazioni.....	323
10.4.6	I sistemi di collegamento.....	325
10.4.6.1	Introduzione.....	325
10.4.6.2	Gli incollaggi.....	325
10.4.6.3	Il pull out degli inserti.....	328
10.5	La verifica a fatica per i materiali compositi.....	329
10.6	Le verifiche oltre il limite elastico.....	329
10.7	Conclusioni.....	330
<b>PARTE II.....</b>		<b>331</b>
<b>INTRODUZIONE II.....</b>		<b>333</b>
<b>CAPITOLO 11 La non linearità geometrica.....</b>		<b>335</b>
11.1	Introduzione.....	335
11.2	Non linearità geometrica.....	335
11.3	Considerazioni.....	339
11.4	Il post-buckling.....	341
11.4.1	Travetta in compressione.....	342
11.4.2	Telaio piano.....	345
11.4.3	La modellazione delle imperfezioni geometriche.....	348
11.4.4	Conclusioni.....	350
<b>CAPITOLO 12 La non linearità di contatto.....</b>		<b>353</b>
12.1	Introduzione.....	353

12.2	Gli elementi GAP.....	353
12.2.1	Sfera su piano infinitamente rigido.....	354
12.2.2	Il modello a elementi finiti.....	355
12.3	Le superfici di contatto.....	360
12.3.1	Sfera su piano deformabile.....	360
12.3.2	Il modello a elementi finiti.....	361
12.3.3	Supporto per motoriduttore (Capitolo 7).....	365
12.3.4	Guscio - spina (Capitolo 7).....	367
12.3.5	Autocontatto.....	370
12.4	Alcuni suggerimenti.....	370
12.5	Conclusioni.....	372
<b>CAPITOLO 13</b> La non linearità di materiale.....		373
13.1	Introduzione.....	373
13.2	Trave in flessione al limite elastico.....	374
13.3	Trave in flessione oltre il limite elastico.....	375
13.4	Trave in torsione oltre il limite elastico.....	383
13.5	La pratica industriale.....	386
13.5.1	Semiassie per vettura da competizione.....	386
13.5.2	Distanziale per collegamento flangiato.....	391
13.6	Sollecitazioni e deformazioni reali.....	395
13.6.1	Tubo flangiato (Capitolo 7).....	399
13.7	I materiali elastomerici.....	403
13.7.1	Introduzione.....	403
13.7.2	Prova monoassiale di trazione-compressione.....	404
13.7.3	Studio di un O-Ring.....	405
13.8	Conclusioni.....	410
<b>CAPITOLO 14</b> Le analisi dinamiche.....		411
14.1	Introduzione.....	411
14.2	La risposta in frequenza.....	411
14.2.1	Lo smorzamento strutturale.....	415
14.2.2	Le tecniche di soluzione.....	416
14.2.3	Integrazione diretta.....	416
14.2.4	Sovrapposizione modale.....	417
14.2.5	Confronto tra i due metodi.....	417
14.2.6	Sovrapposizione modale con un numero insufficiente di modi.....	420
14.2.7	Conclusioni.....	421
14.3	L'analisi dinamica transitoria.....	421
14.3.1	Integrazione diretta.....	423
14.3.2	Sovrapposizione modale.....	425
14.3.3	Il confronto con il caso statico.....	428
14.3.4	Non linearità di materiale.....	428
14.3.5	Conclusioni.....	429
14.4	Analisi dello spettro di risposta.....	430
14.5	Risposta alle vibrazioni random.....	430
14.6	Metodi espliciti.....	431
14.6.1	Introduzione.....	431

14.6.2	Confronto con il metodo implicito.....	432
14.6.3	Alcune considerazioni sull'approccio esplicito.....	434
14.6.4	Conclusioni.....	435
<b>CAPITOLO 15</b> L'ottimizzazione strutturale.....		437
15.1	Introduzione.....	437
15.1.1	Ottimizzazione di taglia.....	437
15.1.2	Ottimizzazione di forma.....	437
15.1.3	Ottimizzazione topologica.....	438
15.2	Un caso pratico.....	439
15.3	Conclusioni.....	449
<b>CAPITOLO 16</b> La simulazione del danno.....		451
16.1	Introduzione.....	451
16.2	Il danno nei materiali duttili.....	451
16.3	Il danno nei materiali compositi.....	454
16.4	Il danno negli incollaggi.....	458
<b>CAPITOLO 17</b> Alcuni esempi di calcolo avanzato.....		467
17.1	Introduzione.....	467
17.2	La modellazione dei cuscinetti a sfere.....	467
17.2.1	Introduzione.....	467
17.2.2	Il gruppo ruota.....	467
17.2.3	Il modello FE del cuscinetto.....	468
17.2.4	La validazione del modello di calcolo.....	470
17.2.5	L'ottimizzazione del gruppo ruota.....	477
17.2.6	Conclusioni.....	480
17.3	La modellazione di cerchio ruota e pneumatico.....	482
17.3.1	Introduzione.....	482
17.3.2	Il modello a elementi finiti.....	482
17.4	Le giunzioni imbullonate.....	487
17.4.1	Introduzione.....	487
17.4.2	Il precarico.....	488
17.4.3	Precarico + carico esterno ortogonale simmetrico.....	489
17.4.4	Precarico + carico esterno ortogonale non simmetrico.....	493
17.4.5	Precarico + carico esterno tangenziale.....	495
17.4.6	Conclusioni.....	502
17.5	Basetta a T (Capitolo 3).....	502
17.5.1	Introduzione.....	502
17.5.2	Senza precarico.....	503
17.5.3	Con precarico.....	504
17.5.4	Conclusioni.....	506
17.6	Il calcolo dei lug.....	506
17.6.1	Introduzione.....	506
17.6.2	Il calcolo classico.....	506
17.6.3	Il calcolo a elementi finiti.....	507
17.7	Conclusioni.....	510
<b>CAPITOLO 18</b> Stato dell'arte e sviluppi futuri.....		513
18.1	Introduzione.....	513



18.1.1	Quando conviene ricorrere ai metodi classici.....	513
18.1.2	Quando conviene ricorrere ai metodi numerici .....	514
18.1.3	Quando conviene ricorrere a un metodo "ibrido".....	514
18.1.4	Il principio della minima massa indispensabile .....	515
18.1.5	Conclusioni .....	516
18.2	I metodi FE classici .....	516
18.3	Metodi multibody e FE .....	517
18.4	Metodi multiphysics.....	518
18.5	La simulazione di processo .....	519
18.6	Il CAE nel CAD.....	520
18.7	Conclusioni .....	521
<b>APPENDICE A</b> Richiami di calcolo strutturale in campo elastico lineare .....		523
A.1	Introduzione .....	523
A.2	Il legame sforzi - deformazioni .....	523
A.3	Le equazioni di congruenza .....	525
A.4	Le equazioni indefinite di equilibrio.....	526
A.5	Lo stato di sforzo piano.....	528
A.6	Lo stato di deformazione piana.....	529
A.7	Lo stato di sforzo assialsimmetrico.....	530
<b>APPENDICE B</b> La matrice di rigidezza per l'elemento a 3 nodi in regime di sforzo piano .....		533
B.1	Introduzione .....	533
B.2	Gli Elementi Finiti .....	533
B.3	Le funzioni di forma per l'elemento triangolare in stato di sforzo piano.....	533
B.4	La matrice di rigidezza per l'elemento CST .....	536
B.5	Un esempio applicativo.....	538
<b>APPENDICE C</b> La soluzione numerica dei sistemi di equazioni algebriche lineari.....		547
C.1	Introduzione .....	547
C.2	Il sistema di equazioni.....	547
C.3	I metodi diretti.....	548
C.4	I metodi iterativi.....	550
C.5	Confronto tra i metodi diretti e quelli iterativi .....	551
C.6	Conclusioni .....	552
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....		553
<b>LINKS</b> .....		555
<b>INDICE ANALITICO</b> .....		557