altri titoli

diagonali

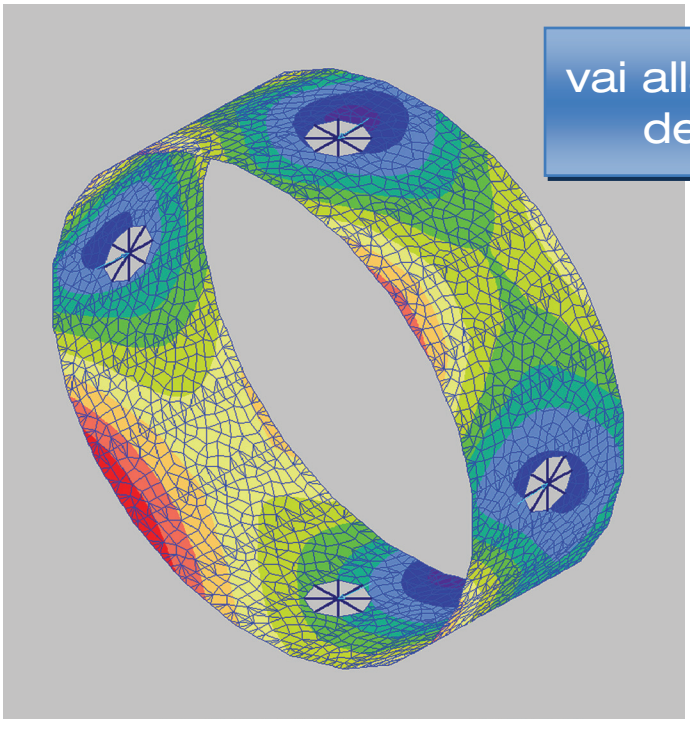
Paolo Rugarli

l'autore

ANALISI MODALE RAGIONATA

Teoria e pratica. Metodi, problemi, procedure di modellazione e calcolo con elementi di analisi sismica

II edizione



vai alla scheda del libro

EPC EDITORE

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

Paolo Rugarli

ANALISI MODALE RAGIONATA

Teoria e pratica.
Metodi, problemi, procedure di modellazione e calcolo.
Con elementi di analisi sismica

II edizione

EPC
EDITORE

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

ANALISI MODALE RAGIONATA - II edizione

ISBN: 978-88-6310-448-6

Copyright © 2005 EPC LIBRI S.r.l.
Copyright © 2016 EPC S.r.l. Socio Unico

EPC S.r.l. Socio Unico - Via dell'Acqua Traversa, 187/189 - 00135 Roma
www.insic.it - www.epc.it
Servizio clienti: 06 33245277 - Fax 06 3313212
Redazione: Tel. 06 33245264/205

Proprietà letteraria e tutti i diritti riservati alla EPC S.r.l. Socio Unico La struttura e il contenuto del presente volume non possono essere riprodotti, neppure parzialmente, salvo espressa autorizzazione della Casa Editrice. Non ne è altresì consentita la memorizzazione su qualsiasi supporto (magnetico, magneto-ottico, ottico, fotocopie ecc.).
La Casa Editrice, pur garantendo la massima cura nella preparazione del volume, declina ogni responsabilità per possibili errori od omissioni, nonché per eventuali danni risultanti dall'uso dell'informazione ivi contenuta.

Il codice QR che si trova sul retro della copertina, consente attraverso uno smartphone di accedere direttamente alle informazioni e agli eventuali aggiornamenti di questo volume.

Le stesse informazioni sono disponibili alla pagina:
https://www.epc.it/Prodotto/Editoria/Libri/Analisi-modale-ragionata/736

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

a Ro

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

INDICE GENERALE

PREMESSA ALLA SECONDA EDIZIONE 13
PREMESSA 15

CAPITOLO 1
INTRODUZIONE 17
1.1 Scopi del lavoro 17
1.2 Realtà e modello 20
1.3 Modelli e probabilistica 23
1.3.1 Probabilità soggettiva e probabilità oggettiva 26
1.3.2 Fenomeni aleatori non campionabili o non ripetibili 30
1.3.3 Ibridazione dell'approccio probabilistico 30
1.3.4 Incompletezza delle campionature statistiche 31
1.4 La via di mezzo 32

CAPITOLO 2
OSCILLATORI SEMPLICI 35
2.1 Le equazioni basilari della dinamica 35
2.2 Oscillazioni libere in assenza di smorzamento (OL) 39
2.3 Oscillazioni libere con smorzamento viscoso equivalente (OL-SVE) ... 43
2.4 Oscillazioni libere con smorzamento dovuto ad attrito (OL-SDA) 51
2.5 Oscillazioni forzate (forzante armonica) in assenza di smorzamento (OFFA) 53
2.6 Oscillazioni forzate (forzante armonica) con smorzamento viscoso equivalente (OFFA-SVE) 55
2.7 Una breve divagazione 63
2.8 Risposta dell'oscillatore semplice all'impulso 66
2.9 Risposta dell'oscillatore semplice al carico a gradino 67
2.10 Risposta dell'oscillatore semplice a una forzante qualsiasi (integrale di Duhamel) 68
2.11 Risposta dell'oscillatore semplice al sisma 69
2.11.1 Approccio a time history 69

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

2.11.2 Approccio a spettro di risposta ... 76
2.11.3 Dagli spettri elastici a quelli di progetto ... 87
2.11.4 Il ruolo dell'errore nell'uso degli spettri di risposta ... 92
2.11.4.1 Fattore di errore sul coefficiente sismico ... 92
2.11.4.2 Fattore di errore sullo spostamento massimo ... 93
2.11.4.3 Fattore di errore sulla massima forza di richiamo ... 95
2.11.4.4 Limite inferiore a C, C > 0.2 a_g/g ... 95
2.11.4.5 Il programma SPE (SPectrum Error) ... 98
2.11.5 La rappresentazione ADRS dello spettro di risposta ... 98

CAPITOLO 3
OSCILLATORI MULTIPLI (ANALISI MODALE) ... 101
3.1 Premessa ... 101
3.2 Richiami sul Metodo degli Elementi Finiti ... 102
3.2.1 Generalità ... 102
3.2.2 Conservazione dell'energia ... 108
3.2.3 Energia potenziale elastica ... 109
3.2.4 Energia cinetica ... 111
3.2.5 Potenziale dei carichi applicati ... 113
3.2.6 Equazioni canoniche ... 115
3.3 Le equazioni della analisi modale: oscillazioni libere non smorzate (OL) ... 117
3.3.1 Analisi modale ... 117
3.3.2 Ortogonalità dei modi ... 125
3.3.3 Normalizzazione ... 130
3.3.4 Ulteriori sviluppi: coordinate principali ... 132
3.3.5 Sull'importanza relativa dei vari modi ... 134
3.3.6 Autovettori multipli ... 139
3.3.7 Sulle tracce di Lord Rayleigh ... 142
3.4 Oscillazioni libere con smorzamento viscoso equivalente (OL-SVE) ... 144
3.4.1 Sistemi disaccoppiabili e non disaccoppiabili ... 144
3.4.2 OL-SVE per sistemi disaccoppiabili ... 146
3.5 Oscillazioni forzate, non smorzate, forzante armonica (OFFA) ... 147
3.6 Oscillazioni forzate, forzante armonica, smorzamento viscoso equivalente (OFFA-SVE) ... 149
3.7 Risposta ad una forzante qualsiasi ... 154
3.8 Risposta all'impulso ... 155
3.9 Risposta al sisma (time history lineare) ... 158

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

3.10 Breve panoramica sui metodi di calcolo basati sull'analisi modale 162
3.10.1 Problemi tipici dell'analisi modale 165

CAPITOLO 4
MODELLAZIONE LATO RIGIDEZZA 167
4.1 Rigidezza globale e rigidezza locale 167
4.1.1 La parabola dell'albero di Natale 167
4.1.2 Cosa modellare e cosa no 172
4.1.2.1 Esame di situazioni globali 173
4.1.2.2 Esame di situazioni locali 174
4.1.3 Identità tra modello statico e dinamico 177
4.2 Labilità, pseudo labilità, quasi labilità 178
4.2.1 Labilità ed ipostaticità 178
4.2.2 Pseudo labilità 182
4.2.3 Quasi labilità 184
4.3 Il ruolo della formulazione degli elementi 185
4.4 Il ruolo della mesh 186
4.4.1 Introduzione 186
4.4.2 Travi 187
4.4.2.1 Travi Appoggiate-appoggiate 187
4.4.2.1.1 Massa uniformemente distribuita, senza effetto del taglio (H = 1/20 L) 187
4.4.2.1.2 Massa uniformemente distribuita, con effetto del taglio (H = 1/20 L) 188
4.4.2.2 Mensole 189
4.4.2.2.1 Massa uniformemente distribuita, senza effetti del taglio (H = 1/20 L) 189
4.4.2.2.2 Massa uniformemente distribuita, con effetti del taglio (H = 1/20 L) 190
4.4.2.3 Travi continue 191
4.4.2.3.1 Trave a tre campate eguali, senza effetti del taglio, massa uniformemente distribuita 191
4.4.2.3.2 Cinque campate eguali, senza effetti del taglio 192
4.4.3 Telai 193
4.4.3.1 Quattro piani massa distribuita sulle travi 193
4.4.3.2 Quattro piani massa distribuita sulle colonne 194
4.4.3.3 Dieci piani, massa distribuita sulle travi 195
4.4.4 Membrane 196
4.4.5 Pareti 196

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

4.4.5.1 Parete con H/B = 4 197
4.4.5.2 Parete con H/B = 8 199
4.4.5.3 Conclusioni 201
4.4.6 Piastre 202
4.4.6.1 Piastra sottile (DKT e 4DKT) 202
4.4.6.2 Piastra spessa (Hughes) 204
4.4.6.3 Conclusioni 205
4.4.7 Distorsione degli elementi 206
4.4.7.1 Membrane: pareti 206
4.4.7.2 Piastre 209
4.4.8 Remeshing 211
4.5 Il ruolo della geometria 211
4.5.1 Dimensioni geometriche 211
4.5.2 Estremi rigidi degli elementi nei sistemi intelaiati 212
4.5.3 Fuori piombo nei telai 216
4.6 Il ruolo delle costanti di materiale 217
4.6.1 Costanti di materiale e precisione 217
4.6.1.1 Travi 218
4.6.1.2 Piastre 220
4.6.1.3 Errore sul modulo di Young 221
4.6.1.3.1 Acciaio 221
4.6.1.3.2 Calcestruzzo 222
4.7 Il ruolo della interazione suolo-struttura 224
4.8 Il ruolo dello stato di sollecitazione (rigidezza geometrica) 228

CAPITOLO 5
MODELLAZIONE LATO MASSA 233
5.1 Unità di misura 233
5.2 Masse traslazionali e momenti di inerzia, masse direzionali 235
5.2.1 Masse traslazionali e rotazionali 235
5.2.2 Masse direzionali 238
5.3 Approccio lumped e consistent 239
5.4 Masse nulle 242
5.5 Generazione automatica delle masse 243
5.6 Quantità di massa, combinazioni sismiche 245
5.7 Posizionamento, ad hoc lumping 250
5.8 Effetto della distribuzione di massa 259
5.8.1 Analisi del problema 259

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

5.8.2 Valutazione approssimata della variazione di periodo dovuta a una variazione delle masse 260
5.8.2.1 Variazione di intensità a parità di distribuzione 260
5.8.2.2 Variazione di distribuzione a parità di intensità 261
5.8.3 Valutazione approssimata della variazione della forma modale dovuta a una variazione di massa 266
5.9 Eccentricità delle masse 267
5.9.1 Classificazione delle eccentricità 267
5.9.2 Il ruolo dell'ipotesi di piani rigidi nella applicazione di eccentricità impreviste 268
5.9.3 Eccentricità propria 269
5.9.4 Eccentricità imprevista ("accidental eccentricity") 270
5.9.4.1 Distribuzioni eccentriche di massa per piante rettangolari: e = 5%L 271
5.9.4.1.1 Eccentricità in una sola direzione 272
5.9.4.1.2 Eccentricità in due direzioni 274
5.9.4.2 Eccentricità imprevista: modellazione in pratica 275
5.9.5 Momenti torcenti dovuti ai carichi variabili 276
5.9.6 Distribuzioni statiche atte a sposare eccentricità di valore dato.... 278
5.9.6.1 Distribuzione a gradino 278
5.9.6.2 Distribuzione a ! 279
5.9.6.3 Distribuzione a trapezio 279

CAPITOLO 6
MODELLAZIONE LATO SMORZAMENTO 281
6.1 Premessa 281
6.2 Smorzamento alla Rayleigh 282
6.3 Smorzamento alla Caughey 285
6.4 Smorzamento modale (light damping approximation) 286
6.5 Cause dello smorzamento nelle strutture 287
6.6 Cenni alle tecniche di valutazione sperimentale dello smorzamento 290
6.7 Valutazione a priori dello smorzamento 292
6.7.1 Fonti varie 293
6.7.2 Formule ESDU 1983 295
6.7.3 Lo studio di Lagomarsino (1993, [59]) 296
6.7.3.1 Il campione statistico analizzato 297
6.7.3.2 Formule predittive sul periodo 298
6.7.3.3 Formule predittive sullo smorzamento 299
6.7.4 Lo studio di Satake e altri (2003, [60]) 300

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

6.7.4.1 Risultati relativi al periodo di oscillazione ... 300
6.7.4.2 Risultati relativi allo smorzamento del primo modo ... 302
6.7.4.3 Risultati relativi allo smorzamento dei modi successivi ... 303
6.7.4.4 Influenza della destinazione d'uso ... 304
6.7.4.5 Formule predittive finali ... 304
6.7.5 Conclusioni sulla valutazione a priori ... 306

CAPITOLO 7
CENNI ALLE TECNICHE RISOLUTIVE ... 309
7.1 Introduzione ... 309
7.2 Shift ... 310
7.3 Metodi di calcolo di autovalori ed autovettori ... 311
7.3.1 Subspace iteration ... 311
7.3.2 Metodo di Lanzcos ... 314
7.3.3 Metodo di Jacobi ... 315
7.4 Controllo di sequenza di Sturm ... 317
7.5 Tecniche di riduzione ... 319
7.5.1 Guyan reduction ... 319
7.5.2 Component mode synthesis ... 321

CAPITOLO 8
ANALISI PRATICA DELLA RISPOSTA MODALE ... 323
8.1 Forme modali ai fini della analisi statica ... 323
8.2 Forme modali ai fini della analisi dinamica ... 329
8.2.1 Generalità ... 329
8.2.2 Simmetria ... 329
8.2.3 Regolarità, isotropia, isocronia ... 330
8.2.4 Discontinuità ... 331
8.2.5 Fattori di partecipazione e forme modali ... 334
8.2.6 Torsione ... 336
8.3 Modi irrilevanti o spurii ... 337
8.4 Periodi ... 340
8.5 Percentuale di massa partecipante ... 346
8.6 Frequenza massima estratta ... 347
8.7 Difficoltà a convergere ... 347
8.8 Casi discussi ... 347
8.8.1 La nave coi nodi puramente traslanti ... 347
8.8.2 Il controvento che non controventava ... 352
8.8.3 Il condotto oscillante ... 357

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

8.8.4 Variazioni su un modello ... 362
8.8.4.1 Multi1 ... 362
8.8.4.2 Multi2 ... 366
8.8.4.3 Multi3 ... 369
8.8.4.4 Multi4 ... 372
8.8.4.5 Multi5 ... 373
8.8.4.6 Multi6 ... 376
8.8.4.7 Multi7 ... 378
8.8.4.8 Multi8 ... 380
8.8.5 Difficoltà di convergenza ... 382
8.8.6 Effetti delle eccentricità ... 385

CAPITOLO 9
ANALISI A SPETTRO DI RISPOSTA ... 391
9.1 Come funziona il metodo ... 391
9.2 Spettro di risposta "di progetto": il fattore di struttura ... 403
9.2.1 Cosa è il fattore di struttura ... 403
9.2.2 Dagli spettri di risposta elastici agli spettri di progetto ... 414
9.3 Spettro di risposta con fattore di errore ... 416
9.3.1 Errore sul fattore di struttura ... 417
9.3.2 Errore sulla frequenza/periodo ... 418
9.3.2.1 Errore sullo spostamento ... 419
9.3.2.2 Fattore di errore sul taglio alla base ... 423
9.3.2.3 Fattore di errore sulle azioni interne ... 424
9.3.3 Riepilogo dei fattori di errore ... 424
9.3.4 Esempi di calcolo, controlli sulle formule trovate ... 426
9.3.4.1 Studio n. 1 ... 426
9.3.4.2 Studio n. 2 ... 428
9.3.4.3 Studio n. 3 ... 430
9.3.5 Conclusioni: il metodo dello spettro di risposta con fattore di errore ... 431
9.4 La combinazione dei modi ... 433
9.4.1 Il problema ... 433
9.4.2 Metodi di combinazione quadratica ... 433
9.4.2.1 SRSS ... 436
9.4.2.2 SRSS CON CLUSTER FACTOR ... 436
9.4.2.3 CQC ... 437
9.4.2.4 Osservazioni ... 438
9.5 Verifiche ed analisi a spettro di risposta ... 440
9.5.1 Il problema dei segni e delle distribuzioni ... 440

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

9.5.2 Possibili correzioni 443
9.5.2.1 Correzioni locali 443
9.5.2.2 Correzioni globali 444
9.5.3 Il metodo di amplificazione modale 444
9.6 Pushover 446
9.6.1 Un'analisi per tutti i fini 446
9.6.2 Tipologie di pushover 448
9.6.3 Limiti della pushover 449
9.6.4 Qualche dettaglio in più 450
9.6.5 Analisi multimodale 456

CAPITOLO 10
RIFERIMENTI 459

APPENDICI

APPENDICE 1
PERIODI DI VIBRAZIONE 467

APPENDICE 2
DIZIONARIO MINIMO 473

APPENDICE 3
PRINCIPALI SIMBOLI 483

APPENDICE 4
NOTAZIONE DI CALCOLO 487

INDICE ANALITICO 491

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

PREMESSA ALLA SECONDA EDIZIONE

Questa seconda edizione vede la luce a circa dieci anni di distanza dalla prima del 2005. Nel rileggere con attenzione il testo ho trovato la necessità di aggiornare le parti ove si faceva riferimento alle normative, dato che, rispetto alla prima edizione, erano uscite sia le NTC 2005 sia le NTC 2008, con tutti i problemi a loro legati, ad esempio quelli relativi all'input sismico basato sulla latitudine e longitudine.

Altre questioni, originariamente legate alla Ordinanza 3274 PCM del 2003, sono state nel frattempo risolte, e quindi non le ho più menzionate. Altre ancora, purtroppo, sono rimaste nelle norme attuali e quindi le mie osservazioni sono rimaste attuali: ad esempio quelle relative al numero di cifre significative con cui si deve valutare il fattore di struttura.

Nel testo ho fatto riferimento sia agli spettri dell'Eurocodice 8, perché mi paiono un riferimento essenziale, sia agli spettri delle NTC 2008, resi di laboriosa applicazione dalla necessità di usare latitudine e longitudine.

Ho poi trovato e rimosso, anche grazie al collega ed amico strutturista ing. Giorgio Nieri, che qui desidero ringraziare, un certo numero di refusi e di sviste che erano sfuggiti nella prima edizione.

Il testo si presenta quindi aggiornato e migliorato, ma non stravolto. Infatti, a distanza di dieci anni, tutte le principali idee che ho cercato di illustrare e di sostenere in questo lavoro sulla analisi dinamica lineare dei sistemi a uno o molti gradi di libertà, condotta per mezzo della analisi modale, e che mi pare ne costituiscano il tratto distintivo, mi sono sembrate rafforzate, sia dalle normative che nel frattempo sono uscite, sia dalle ulteriori esperienze professionali maturate in questi ultimi anni. Le considerazioni fatte in questo libro, poi, sono solo molto debolmente legate all'evolversi delle normative, dato che l'analisi modale è una analisi di base la cui natura dipende dalle leggi della meccanica e non dalle normative.

Il tema fondamentale di questo lavoro era da un lato la estesa e motivata discussione dell'eccesso di precisione tipico del calcolo elettronico, cercando di fornire sistemi ingegneristici atti a prendere la giusta distanza da questa illusoria precisione; dall'altro la ordinata disamina delle insidie e dei trabocchetti che si annidano in un'analisi, quella modale, che è tanto rivelatrice della reale natura delle nostre strutture e dei nostri modelli, quanto talvolta drasticamente semplificata e mortificata da scorciatoie e *qui pro quo*.

L'introduzione in tutto il testo di "fattori di errore" indicati dalla lettera f, e da stimarsi in modo semplificato e ingegneristico, era servita a demistificare la

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

presunta precisione di metodi che talvolta sfociano in risultati aventi quattro o più cifre significative là dove i dati di partenza ne hanno solo due o anche meno. Ben consapevole di questo fatto, avevo mostrato come, esplicitando le incertezze, risultasse evidentemente priva di senso la pretesa di precisione che talvolta risulta sottointesa dai metodi e dalle formule che impieghiamo, o che siamo indotti a impiegare.

La direzione ed i contenuti di questo lavoro mi paiono quindi, a distanza di anni, ancora quelli giusti per chi si voglia avvicinare alla analisi modale con un approccio professionale pragmatico e fattivo.

Inoltre, per la sostanziale affinità d'intenti, penso che questo volume possa ben collocarsi nella collana *I Diagonali*, che nel frattempo ha visto la luce. Quindi, ve lo aggiungo ritenendo con ciò di fare un buon servizio sia alla collana, che al volume

L'Autore

Milano, dicembre 2015

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

PREMESSA

Quando circa tre anni fa cominciai a scrivere il libro Calcolo Strutturale con gli elementi Finiti, mi proponevo il compito di spiegare in modo comprensibile cosa fosse e come funzionasse il Metodo degli Elementi Finiti, spinto in ciò dalla consapevolezza che molti Colleghi non avevano avuto modo di conoscere le basi di una metodologia che pure, come sappiamo, oggi è ampiamente usata.

Benché sinteticamente affrontato, il testo divenne tale da non poter contenere tutte le cose che sarebbero state logicamente parte del volume. Questo secondo volume continua quindi il lavoro iniziato, cercando di spiegare in modo piano ed accessibile cosa sia, come funzioni e cosa debba attendersi dall'analisi modale e dall'analisi a spettro di risposta.

Mentre facevo questo lavoro, avendo l'obiettivo di essere chiaro, mi sono reso conto che un testo realmente sincero non poteva prescindere da una esplicita trattazione dell'errore, visto come una delle incognite fondamentali con la quale l'ingegnere o l'analista deve rapportarsi. Da qui l'idea di trattare esplicitamente le più frequenti cause d'errore dando loro dignità di protagonista, e non di semplice comparsa, come di fatto avviene normalmente. L'ingegnere per mestiere quantifica in modo ragionato e sensato cose che non può definitivamente conoscere, perché sono inconoscibili, quindi l'errore entra come protagonista e non come comparsa nei suoi ragionamenti. Mi sono permesso di cercare di ricordarlo a me e a chi leggerà.

Ho voluto provare a non limitarmi alla mera ripetizione delle formule, e mi sono sforzato di illustrarne il significato ed i limiti.

Sicuramente tentativi di questo tipo possono essere accusati di semplicismo, di approssimazione, di presunzione, ma sono convinto che le idee base, quelle che veramente governano tutti i problemi, possano essere spiegate con semplicità e senza scandalo anche demistificando procedure spesso inutilmente complesse.

Il Lettore vorrà comprendere questo intento costruttivo e scusare le mancanze di questo testo.

Desidero ringraziare i miei famigliari, ai quali ho sottratto non poco tempo che sarebbe stato dedicato allo svago: mia moglie Roberta, i miei figli Francesco e Stefano. La signora Maria Caporali, che ha composto questo testo con ammirevole pazienza.

Desidero anche ringraziare la signora Laura Lavarello, direttore della EPC Libri, poiché ha creduto che potessi fare un buon lavoro e mi ha dato l'opportunità di farlo in piena libertà.

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

Mentre sicuramente le eventuali pessime idee contenute in questo testo sono interamente responsabilità mia, molte buone idee in esso contenute derivano anche dalla discussione con Colleghi ed Esperti coi quali ho avuto il privilegio di parlare, e che certamente mi hanno molto aiutato; a tutti loro il mio sentito "grazie".

L'Autore

Milano, settembre 2005

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

Infine facciamo alcune osservazioni sul perché i sistemi lineari *sono tanto importanti. La risposta è semplice: perché possiamo risolverli! Così il più delle volte risolviamo sistemi lineari. Secondo (e importantissimo), risulta che le leggi fondamentali della fisica sono spesso lineari.*

Richard P. Feynman – Lectures on Physics

1.1 Scopi del lavoro

Questo volume si riferisce alla modellazione di strutture mediante il metodo degli elementi finiti, nell'ambito delle problematiche relative alla analisi modale. L'Analisi Modale di una struttura modellata con il Metodo degli Elementi Finiti è quindi il centro di questo lavoro, ed il principale argomento che si desidera trattare.

Già in occasione del capitolo introduttivo di un precedente lavoro [1] si era posto in rilievo che vi è un profondo contrasto tra la diffusione delle metodologie di calcolo agli elementi finiti e la loro reale conoscenza, e questo vale a maggior ragione anche per le analisi modali e le analisi che partendo da queste procedono verso ulteriori risultati: analisi a spettro di risposta, analisi di risposta in frequenza ed analisi di time history fatte sfruttando la analisi modale.

Le ragioni di questa ignoranza sono numerose: da un lato moltissimi professionisti non hanno avuto modo di seguire corsi sull'argomento Elementi Finiti, e meno ancora sull'argomento Analisi Modale; dall'altro il panorama dei testi esistenti sull'argomento si divide sostanzialmente in due: ci sono meravigliosi testi teorici, in specie in lingua inglese (1), i quali richiedono uno sforzo considerevole per essere compresi. Eppoi ci sono testi che ripetono quelli teorici limitandosi a trascrivere le formule, senza troppo spiegare perché abbiano quella forma, da dove vengano, cosa implichino.

In lingua italiana non pare ci sia ancora alcun testo che discuta degli aspetti *reali, pratici* dell'analisi modale. La natura del percorso che porta l'analista dal modello al risultato non è riferibile ad equazioni formalmente nitide quali quelle

1. Ad esempio si citano i classici testi [2], [3], [4], [5], tutti in lingua inglese.

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

dei testi teorici, ma piuttosto alla messa in atto di strategie legate ad una approfondita conoscenza di varie discipline: la teoria, sì, ma anche l'esperienza di calcolo numerico, di ingegneria strutturale, di meccanica computazionale, di modellistica, di cantiere, ecc. ecc..

L'analisi modale è spesso meramente presentata come un problema agli autovalori in cui la matrice delle masse e quella delle rigidezze arrivano come meteore senza che venga in alcun modo spiegato tutto quello che occorre fare per costruirle. La risposta strutturale si presenta sempre nitida, chiaramente leggibile, le ipotesi sono spesso così semplificate che non mettono conto di essere prese come realistico banco di prova per alcunché. La discussione sembra nella maggior parte dei casi assente.

Invece, a quanto risulta, è ben diverso mettere la massa in un modo o in un altro; modellare certe cose o altre; assumere o meno l'esistenza di simmetrie; usare una discretizzazione o un'altra; assumere che i piani siano rigidi, oppure no, e così via.

Dato questo panorama, è in qualche misura comprensibile che un'analisi modale risulti, per alcuni Colleghi, un'operazione paragonabile alla interrogazione della Sibilla Cumana.

Questo lavoro vuol cercare di spiegare cosa sia e come funzioni *in realtà* una analisi modale, cercando di spiegare le metodologie e le formule in modo piano e comprensibile: già molti altri testi - teorici - fanno il lavoro di discutere formalmente gli algoritmi e di enunciare le regole, non era minimamente il caso di scrivere una brutta copia dei testi classici, di fronte ai quali, quando sono classici veramente, è appena il caso di dire che l'atteggiamento dell'Autore è quello che ha un grato discepolo.

Il volume è diviso in 10 capitoli: nei primi 8 si discute di analisi modale, anche toccando argomenti come la risposta a forzanti armoniche e la risposta all'impulso, nel cap. 9 si discute specificamente di analisi a spettro di risposta per sistemi a molti gradi di libertà. Il cap. 10 raccoglie i riferimenti. Le appendici servono per consultazione, e sono la appendice I, dedicata alle formule approssimate per valutare i periodi di vibrazione; la appendice II contenente un dizionarietto minimo (nel quale si sono anche aggiunti acronimi e sigle inglesi che si possono incontrare nella sterminata letteratura sul tema); l'appendice III contenente la lista dei simboli; e l'appendice IV contenente brevi richiami sul calcolo matriciale.

Entrando più nel dettaglio, la prima parte comincia con un capitolo introduttivo necessario per dare conto della posizione dell'Autore su alcune importanti ed attuali questioni; il capitolo 2 riepiloga le equazioni ed i risultati fondamentali relativi all'oscillatore semplice, includendo l'analisi a spettro di risposta per oscillatori semplici. Il capitolo 3 introduce le equazioni della analisi modale passando per un brevissimo riepilogo relativo al metodo degli elementi finiti.

In pratica i capitoli 2 e 3 riepilogano i risultati teorici necessari a comprendere il problema. Il terzo capitolo è da intendersi come uno sforzo per cercare di spie-

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

gare i fondamenti matematici della analisi modale in modo possibilmente comprensibile.

Il quarto capitolo si occupa della modellazione lato rigidezze, vale a dire di "tutto" quello che è necessario per arrivare alla matrice di rigidezza **K**. Particolare attenzione viene rivolta ad indagare le cause di errore, incluso un accenno al problema della interazione suolo-struttura. La casistica potrebbe essere sterminata, si reputa comunque di aver trovato un buon compromesso tra l'esigenza della completezza e quella della sintesi.

Il quinto capitolo tratta della modellazione lato masse, ovvero della matrice **M**. Fa parte di questo capitolo una discussione sul problema della eccentricità accidentale ed una serie di possibili suggerimenti su come modellarla in pratica. Il problema della eccentricità "accidentale" è ancora oggetto di ricerca, e quindi su questo argomento bisognerà aspettare ancora per avere metodologie facili ed a favore di sicurezza.

Il sesto capitolo riguarda la modellazione lato smorzamenti (matrice **C**). Poiché in questo caso è necessario impiegare valori ottenuti per analogia (valutazione *a priori)* si è cercato di dare una piccola panoramica sui valori proposti in letteratura nel caso degli edifici. Ciò ha richiesto di citare per esteso alcuni importanti lavori che costituiscono ad oggi un riferimento obbligato, stante la grande carenza di dati. L'Autore ritiene che la conoscenza di questi studi sia molto importante per potersi fare una idea indipendente sul reale grado di conoscenza che abbiamo dei problemi di dinamica strutturale. Per questo ha ritenuto di dover citare ampiamente i risultati ed anche di riportare alcune immagini per come figurano in questi lavori.

Il settimo capitolo cerca di fornire informazioni di base sulle tecniche di soluzione e di riduzione ed evidenziazione, vale a dire quelle tecniche che consentono di ottenere problemi numerici di dimensioni minori o di estrarre più rapidamente i risultati che interessano. Su questi aspetti non si è ritenuto di dover insistere particolarmente, poiché in genere i dettagli computazionali spettano agli sviluppatori ed ai ricercatori, più che agli utilizzatori: nondimeno alcune idee base sono indispensabili per capire cosa sta succedendo. Queste idee di base si è cercato di fornire.

L'ottavo capitolo si occupa della analisi della risposta, in termini di forme modali, di periodi e di tolleranze: cerca insomma di spiegare come capire i risultati, come interpretarli e trarne spunto per migliorare l'analisi. In questo capitolo sono anche presentati e discussi casi reali. Anche questo argomento sarebbe sterminato, ci si è dovuti giocoforza limitare ad alcuni esempi particolarmente significativi.

Il capitolo 9 riguarda l'analisi a spettro di risposta per sistemi a molti gradi di libertà, e discute tutti gli aspetti pratici che ne rendono assai ostico il reale utilizzo: paragrafi chiave sono quelli relativi alle verifiche e quelli relativi alla combinazione dei modi, essendo, come si vedrà, tanto semplice quanto geniale l'idea di base. Viene presentato un metodo di utilizzo dello spettro di risposta (spettro di

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

risposta con fattore di errore) che è la logica conseguenza del discorso sull'errore portato avanti in tutto il testo. Completa il capitolo una discussione di massima sul metodo detto "*pushover*", presentando alcuni importanti risultati comparativi disponibili in letteratura e – forse – poco noti ai non addetti ai lavori.

Il capitolo 10 contiene i riferimenti. Si sono distinti i riferimenti direttamente consultati (la gran parte) da quelli giocoforza citati indirettamente. Citare indirettamente una fonte è cosa da non fare, ma non è purtroppo possibile trovare tutto quello che si desidererebbe.

Benché il testo non presuma la approfondita conoscenza del Metodo degli Elementi Finiti, sarebbe bene che alcuni concetti base risultino chiari: a questo proposito viene spontaneo riferirsi, per l'analogia di concezione, al precedente volume [1], anche se esistono naturalmente anche tanti altri testi sull'argomento, ciascuno con taglio diverso.

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

CAPITOLO 8

ANALISI PRATICA DELLA RISPOSTA MODALE

Questo capitolo è dedicato alla analisi pratica della risposta modale, vale a dire alla discussione su ciò che l'analista dovrà cercare di capire a partire da un certo risultato di analisi modale, al fine di validarlo e di comprenderne il significato, giungendo eventualmente a quelle modifiche al modello o al progetto che l'analisi dovesse rendere consigliabili.

8.1 Forme modali ai fini della analisi statica

Come già in precedenza accennato l'analisi modale non è utile solo ai fini di una analisi dinamica, ma anche ai fini di una analisi statica. Ciò dipende dal fatto che i modi di vibrare di una struttura sono in diretta correlazione con gli schemi resistenti in essa contenuti e non necessariamente con ciò che noi, come progettisti, potremmo attenderci o desiderare. La mera analisi statica può non essere in grado di cogliere rilevanti debolezze presenti nella struttura e ciò perché la risposta della stessa ad un insieme di azioni dipende fortemente da come le azioni sono disposte, mentre la risposta modale è totalmente indipendente da esse, dipendendo solo dalla distribuzione di rigidezza e dalla distribuzione di massa. Una struttura può comportarsi benissimo in risposta all'insieme di azioni che noi abbiamo applicato ad essa in una analisi statica e comportarsi nondimeno malissimo a causa della presenza di un certo insieme di debolezze non messe in luce.

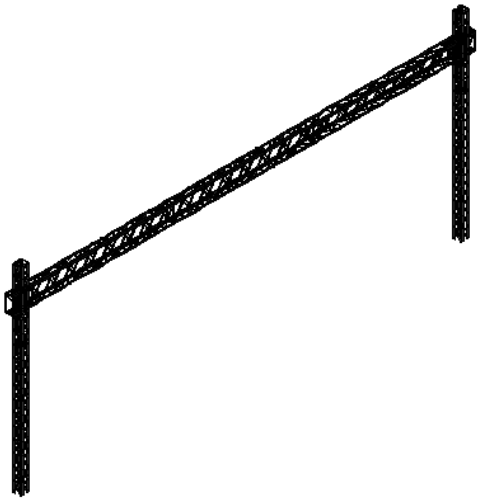


Figura 8.1 - *Struttura a traliccio spaziale priva di controventi a croce di S. Andrea atti a impedire la deformata romboidale*

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

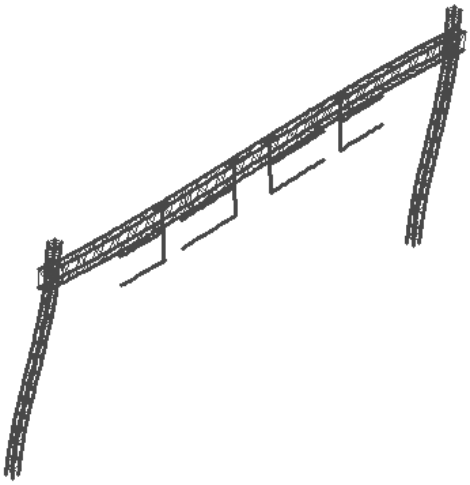


Figura 8.2 - *Le deformate statiche non mostrano alcun problema legato alla assenza degli elementi indicati*

A titolo di esempio consideriamo la struttura di figura 8.1, un portale tralicciato. Questa struttura non contiene alcun elemento in grado di impedire la romboidizzazione del traverso. Ciò può dipendere da una voluta mancanza nel modello oppure può dipendere da una effettiva dimenticanza del progettista.

Le deformate legate ai carichi statici, si noti, data la sostanziale simmetria e convenzionalità dei carichi applicati, non sono state in grado di mostrare alcun comportamento anomalo (fig. 8.2).

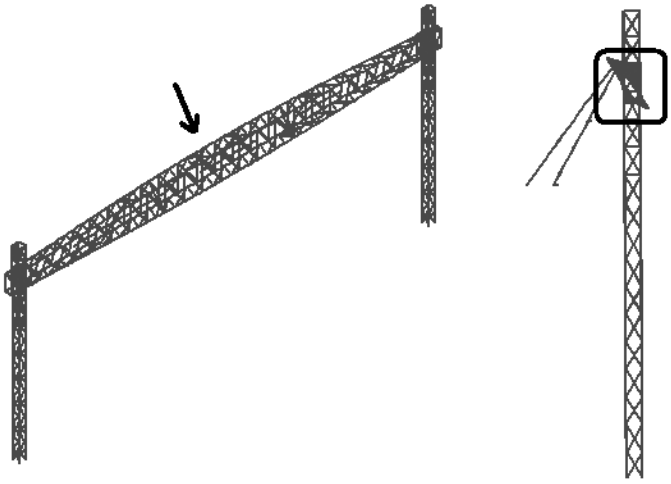


Figura 8.3 - *Deformata del primo modo di vibrare in vista assonometrica ed in vista frontale. È evidente la romboidizzazione della sezione del traverso dovuta alla mancanza di controventi opportuni*

Viceversa una analisi modale mostra come primo modo la deformata indicata nella figura 8.3, che fa vedere l'insospettata perdita di forma della sezione a causa della mancanza degli elementi di controvento giacenti nel piano verticale sulla sezione del traverso.

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

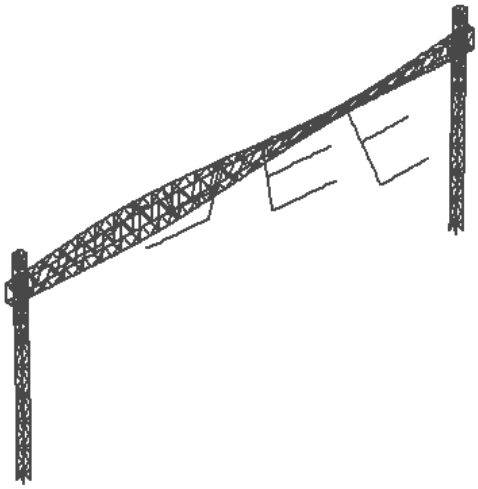


Figura 8.4 - *Deformata modale del secondo modo della struttura delle figure precedenti. È palese la torsione sul traliccio, che di fatto si comporta come se i piani non fossero collegati tra loro*

La deformata modale successiva (fig. 8.4) mostra anch'essa un comportamento torsionale assai spiccato. Il fatto che questi modi di vibrare si presentino per primi indica che la struttura, secondo questa modalità, possiede una rigidezza minore di quella del primo modo di vibrare atteso per questa struttura, vale a dire una oscillazione della trave nel piano verticale oppure un movimento orizzontale dell'intero portale.

In certi casi il comportamento strutturale si presenta in modo davvero bizzarro ed inatteso, stante la presenza o di errori di modellazione o di errori di progettazione. Consideriamo la struttura rappresentata nella figura 8.5 e in vista frontale nella figura 8.6.

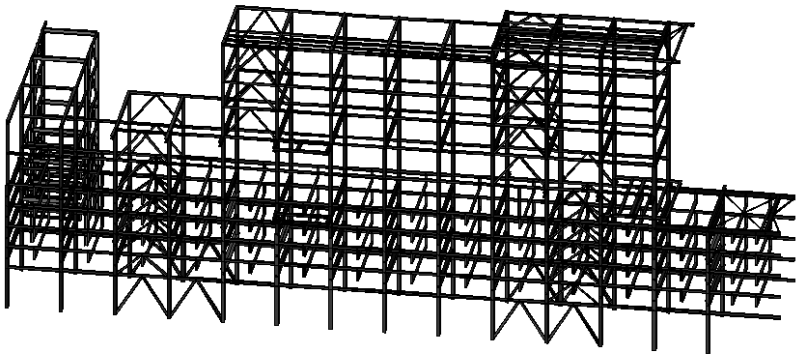


Figura 8.5 - *Struttura industriale spaziale in acciaio in vista assonometrica e restituzione solida*

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

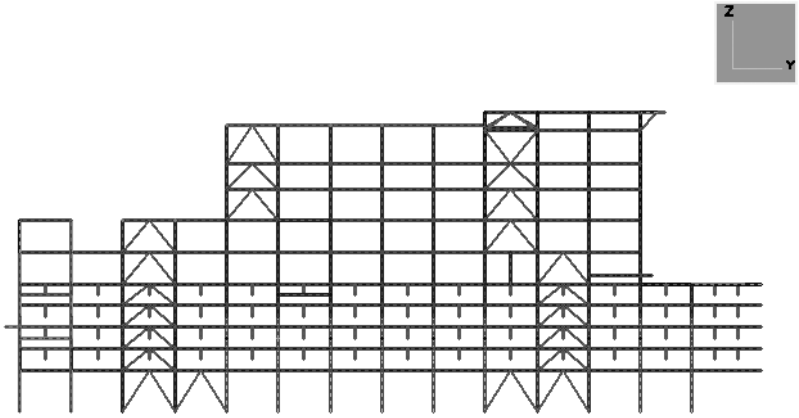


Figura 8.6 - *La stessa struttura in vista frontale. Si noti la disposizione dei controventi*

Il primo modo di vibrare di questa struttura è quello rappresentato nella figura 8.7, il secondo modo di vibrare è quello rappresentato nella figura 8.8.

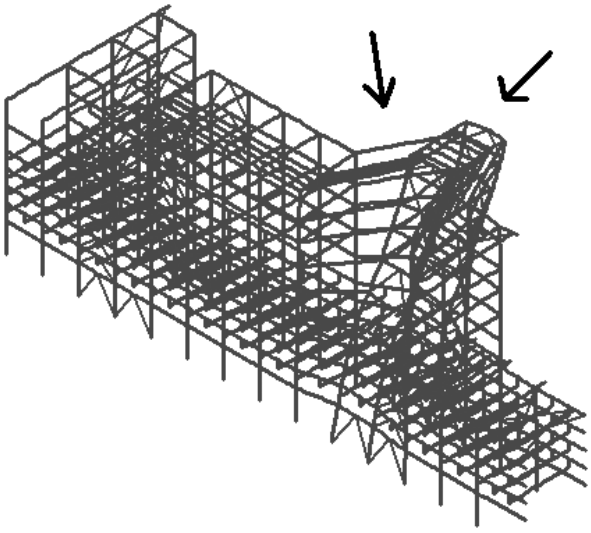


Figura 8.7 - *Primo modo di vibrare della struttura delle viste precedenti. Un pezzo di struttura oscilla sul primo modo in modo totalmente disgiunto dalla parte rimanente*

L'esame delle deformate modali mostra la mancanza di opportuni controventi di piano atti a riportare le azioni orizzontali sui controventi e la presenza di cinematismi dovuti alla presenza di svincoli flessionali sulle travi, in modo che la zona di struttura evidenziata dalla deformata modale è sostanzialmente disaccoppiata e disgiunta da tutto il resto.

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

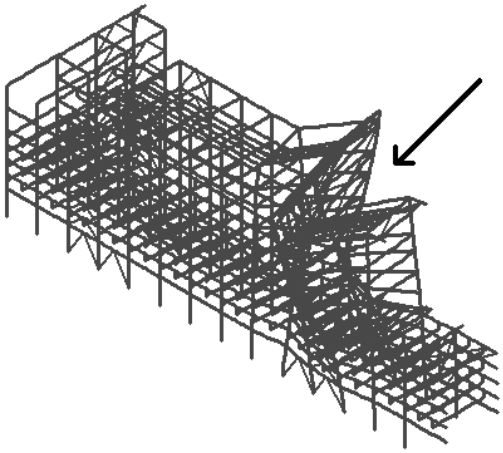


Figura 8.8 - *Secondo modo di vibrare della struttura precedente. Anche in questo caso sono visibili atti di moto che coinvolgono una parte limitata della struttura, ma su tutta la altezza, con deforme modali che ricordano veri e propri cinematismi*

Si noti che la presenza di moti deformativi non previsti sui primi modi della struttura dovrebbe essere evitata, in quanto sebbene nel modello statico tipicamente non sempre si attivino, questi comportamenti deformativi saranno invece con ogni probabilità causa di problemi nella realtà strutturale, per sua intrinseca natura soggetta ad azioni caotiche ed imprevedibili e quindi tali, potenzialmente, da attivare quegli stessi schemi deformativi non adeguatamente contrastati.

Segnatamente nello studio dei controventi, la forma delle deformate modali può portare a sorprese del tutto inattese. Consideriamo la struttura di copertura della figura successiva.

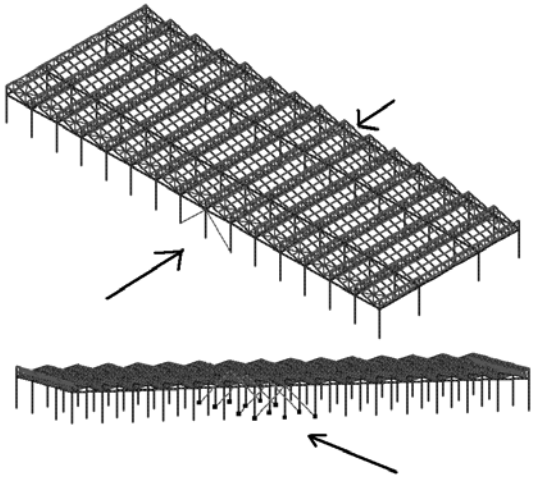


Figura 8.9 - *Struttura di copertura con controventi disposti in una unica direzione in corrispondenza ad un unico filo della costruzione, due viste diverse dello stesso modello*

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

La deformata del secondo e del terzo modo sono mostrate in pianta nelle figure successive, dove è evidente la modalità torsionale e flessionale che di fatto vanifica l'efficacia del controvento. Si noti che il primo modo (fig. 8.12) è una deformazione omogenea e simmetrica in direzione normale alla direzione controventata, come c'era da attendersi. Infatti ai primi modi corrispondono i modi di maggior periodo, e quindi i modi ai quali corrisponde – a parità di massa – la minor rigidezza.

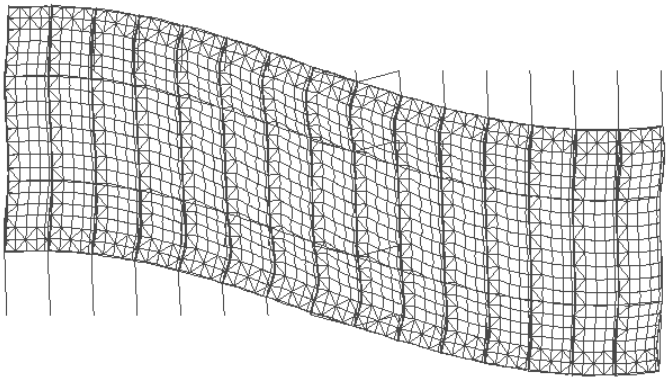


Figura 8.10 - *Deformata del secondo modo della struttura precedente. I controventi non reagiscono in quanto la struttura di copertura ruota intorno a loro. La deformata è sostanzialmente di tipo torsionale, antisimmetrica*

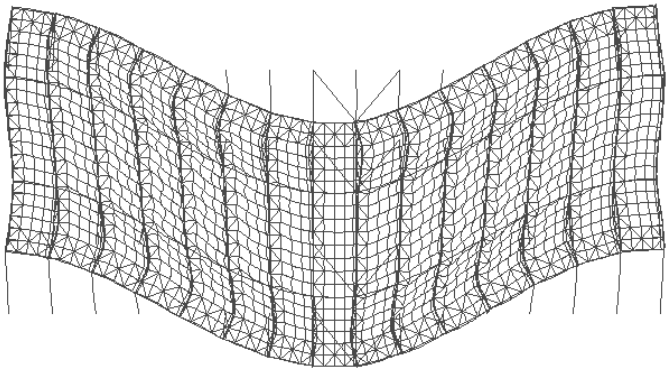


Figura 8.11 - *Deformata del terzo modo. Anche in questo caso i controventi non reagiscono e l'intera copertura si deforma in modo affine a quello di una trave libera*

Deformate modali come quelle che abbiamo visto sui primi modi devono mettere in allarme il progettista in quanto denunciano l'esistenza di modalità deformative che non erano state adeguatamente previste. In particolare, a causa della torsione, è possibile che alcune colonne vengano ad essere sollecitate in modo molto diverso dalle altre. Di fronte a casi come questo il progettista provvederà a creare opportuni controventi nel piano della copertura atti ad irrigidirla, e

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

disporrà i controventi in modo da sospingere verso periodi più brevi le modalità torsionali descritte.

L'analisi modale è quindi utilissima da impiegare come segugio da sguinzagliare alla ricerca di comportamenti deformativi assai marcati e quindi potenzialmente possibili a prezzo di una modesta escussione di energia di deformazione. Tali comportamenti sono spesso dovuti alla presenza di zone da rinforzare.

8.2 Forme modali ai fini della analisi dinamica

8.2.1 Generalità

Nel seguito si enumereranno, discutendole, una serie di caratteristiche delle forme modali da ricercare a seguito di una analisi modale. La discussione sarà orientata alle tipiche problematiche legate alla analisi dinamica, anche se, in diversi casi, considerazioni analoghe saranno fattibili ai fini della analisi statica.

8.2.2 Simmetria

In presenza di una distribuzione di massa e di rigidezza simmetrica le forme modali si presenteranno simmetriche o antisimmetriche. Questa circostanza presenta un aspetto positivo ed utile ed un aspetto negativo e potenzialmente pericoloso.

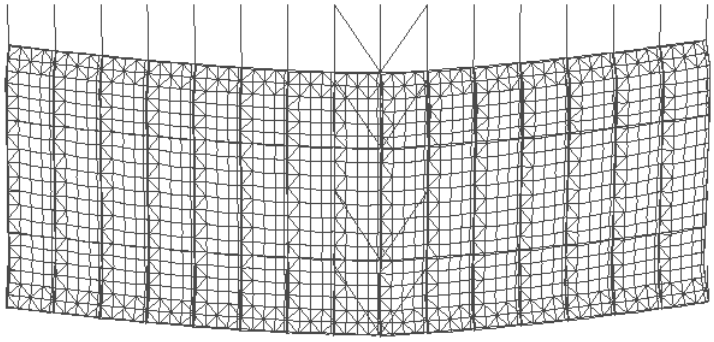


Figura 8.12 - *Vista dall'alto della deformata del primo modo di una copertura simmetrica: la deformata modale è essa stessa simmetrica. Si tratta della stessa struttura delle figure precedenti*

L'aspetto utile è che la simmetria della risposta modale è una prova indiretta della simmetria del modello, pertanto se il modello è simmetrico e la forma modale non lo è (simmetrica o antisimmetrica) possiamo concludere che c'è qualcosa di sbagliato. Se una distribuzione di forze simmetrica dà luogo a spostamenti simmetrici questo vuol dire che l'errore è nella distribuzione delle masse. Viceversa l'errore è nella distribuzione delle rigidezze. Ecco quindi che la simmetria della risposta può essere impiegata al fine di validare (come prova necessaria ma non sufficiente) un modello simmetrico.

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

L'aspetto negativo della simmetria quando è associata a modelli che contengono quote parti di massa variabile, è che tale simmetria è illusoria e fuorviante. In effetti nessuna struttura è rigorosamente simmetrica, nemmeno quando è costituita di rigidezze e masse simmetriche e permanenti. Ma quando le masse sono variabili nel tempo (come avviene per gli edifici) la presunzione di simmetria è certamente sbagliata e potenzialmente foriera, come vedremo, di gravi problemi.

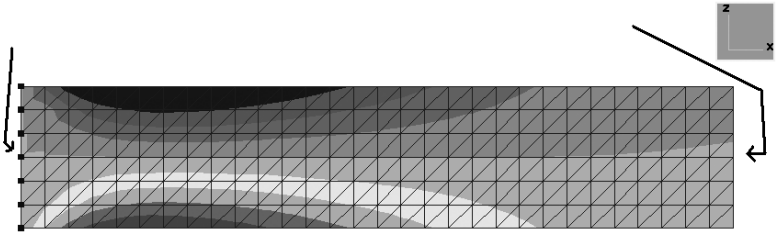


Figura 8.13 - *Andamento della rotazione R_x nella deformata del primo modo di una mensola incastrata a sinistra. Si noti la assenza di simmetria rispetto al piano medio Z = 0, dovuta alla asimmetria di mesh*

È da notare che la simmetria dovrebbe essere non solo di struttura, ma anche di mesh. Ad esempio, nella figura precedente si vede una mappa di deformata modale non simmetrica a causa della non simmetria della mesh. Lungo la retta orizzontale corrispondente al piano medio si vede che la isolinea devia. La asimmetria è puramente numerica ed indotta dalla mancanza di simmetria della mesh.

8.2.3 Regolarità, isotropia, isocronia

La analisi delle deformate modali deve portare a constatare che sui modi più importanti della struttura è presente un andamento regolare. Questa circostanza consente di distribuire il cimento in modo omogeneo tra gli elementi strutturali, senza che ve ne siano alcuni che devono deformarsi in maniera marcatamente diversa da altri similari. Tutta la struttura deve essere chiamata a deformarsi in modo organizzato e previsto, così da funzionare in modo affine a quanto progettato.

Oltre alla regolarità è bene che la struttura presenti una sostanziale isocronia dei modi dominanti nelle due direzioni principali in pianta, in modo che il periodo del primo modo dominante [1] corrispondente ad una oscillazione in X sia grosso modo simile al periodo del primo modo dominante corrispondente ad una

1. Non è affatto detto che il periodo "del primo modo" sia un periodo realmente importante per la struttura, esso potrebbe essere un modo locale o un modo spurio. È uso parlare di "primo modo" sottointendendo che la struttura sia stata modellata in modo da escludere modi locali aventi periodi tra quelli dei modi estratti. Tale circostanza però non è sempre ottenibile, ed è quindi possibile che il "primo modo dominante" non sia il "primo modo" *tout court*.

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

oscillazione in Y. Questa circostanza comporta la sostanziale simiglianza delle rigidezze offerte dalla struttura nelle due direzioni principali, e quindi la sua sostanziale isotropia di comportamento, di modo che, essendo simile il comportamento nelle due direzioni, non vi sia una direzione previlegiata alla quale corrisponda un comportamento strutturale nettamente migliore.

È classico il caso di strutture controventate con sistemi costruttivi differenti nelle due direzioni: in questo caso sono da attendersi rilevanti differenze nei periodi dominanti della struttura nelle due direzioni, a meno di attenti lavori di taratura delle rigidezze volti ad escludere fenomeni come quelli indicati.

8.2.4 Discontinuità

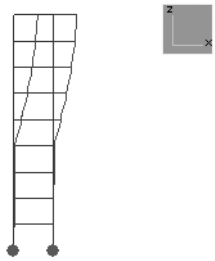


Figura 8.14 - *Un caso eclatante di forma modale con evidente discontinuità in altezza*

Un caso particolarmente importante di irregolarità è costituito dalla presenza di discontinuità nella forma modale, generalmente dovute a bruschi salti di massa o di rigidezza, oppure alla presenza in pianta di sottostrutture attaccate al corpo principale. Se l'analisi delle forme modali mostra la presenza di comportamenti di questo tipo è bene intervenire sulle rigidezze al fine di riportare la risposta ad essere regolare.

Nella figura 8.14 si vede un esempio molto marcato di discontinuità nella forma modale. Talvolta la discontinuità non si presenta in modo così marcatamente visibile, e tuttavia è ben presente una rilevante discontinuità. Nelle due figure successive si vede un modello (impiegato da chi scrive per spiegare qualitativamente il fenomeno nel corso di alcune lezioni, e quindi non realistico come discretizzazione) nel quale il nucleo di controvento si interrompe senza giungere a tutta altezza.

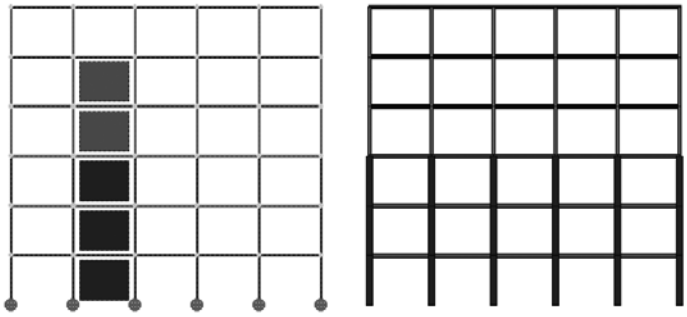


Figura 8.15 - *Esempio qualitativo (si noti la mesh insufficientemente fitta per il nucleo di controvento). Il nucleo non prosegue fino in cima, le colonne hanno un brusco salto di sezione al terzo piano*

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

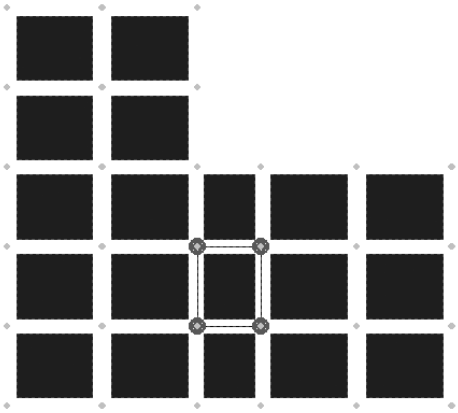


Figura 8.16 - *Pianta dell'edificio precedente, si noti la eccentricità del nucleo di controvento e la assenza di pareti di controvento sul perimetro, con il conseguente marcato problema torsionale*

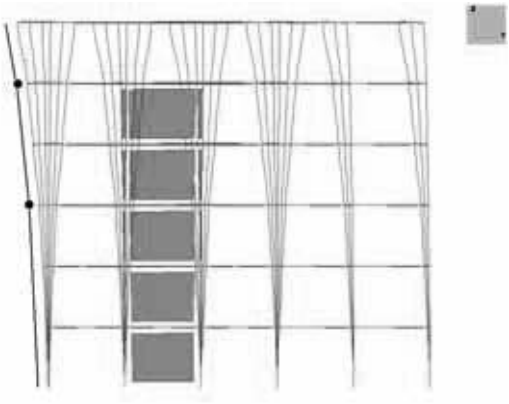


Figura 8.17 - *Vista frontale della deformata modale della struttura, primo modo di vibrare. Si notino le cuspidi relative ai salti di rigidezza, evidenziate dai pallini e dalla linea spezzata. Le cuspidi sono visibili ma non evidenti come nella figura 8.14. L'apertura a ventaglio delle colonne indica un comportamento torsionale*

Nelle due figure successive si vede il primo modo di vibrare di questa struttura, che presenta un marcato comportamento torsionale, dovuto alla assenza di pareti sul perimetro ed alla presenza di un solo nucleo di controvento centrale, tra l'altro in posizione eccentrica. È apprezzabile, ma non così marcato come nella figura 8.14, il salto di rigidezza legato alle discontinuità e la presenza di cuspidi nella deformata modale.

Irregolarità come queste sono cause di crolli nel corso di terremoti, poiché nei piani deboli le accelerazioni dovute al sisma possono subire un marcato incremento.

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

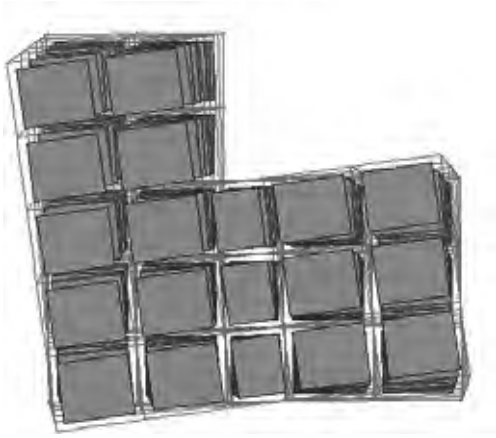


Figura 8.18 - *Vista dall'alto della deformata modale dello stesso primo modo. È evidente il marcato atteggiamento torsionale, dovuto all'insufficiente rigidezza torsionale offerta dal nucleo di controvento centrale, tra l'altro in posizione eccentrica*

Oltre alle irregolarità in altezza occorre guardarsi dalle irregolarità in pianta, le quali possono essere architettonicamente mascherate ma strutturalmente evidenti. È il caso in cui nel corpo di una struttura vi siano – in pianta – delle rilevanti discontinuità strutturali (non necessariamente architettoniche) o peggio il caso in cui differenti corpi di fabbrica sono uniti architettonicamente ma non strutturalmente. Tipico è il caso di escrescenze, corpi aggiunti, ampliamenti, che vengono fatti né il piena solidarietà con l'esistente né il vera indipendenza.

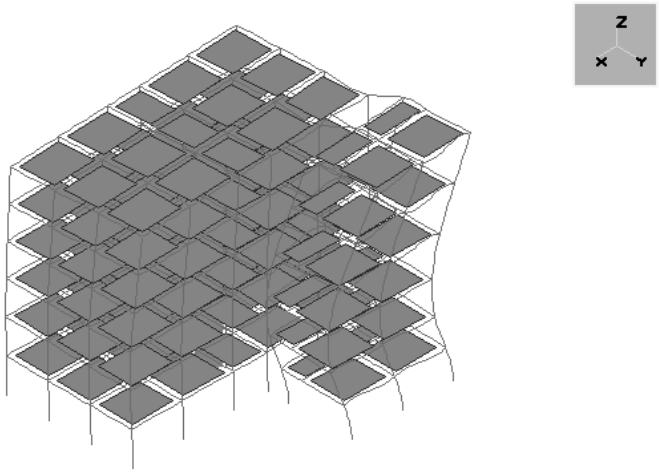


Figura 8.19 - *Evidente disaccoppiamento nel comportamento dinamico dei due blocchi, uniti insufficientemente da travi di collegamento (discontinuità in pianta). È da notare la discontinuità del piano del solaio. Se questo fosse stato continuo la struttura sarebbe stata eccentrica ma unica*

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

Il rischio in questi casi è che nel corso di un sisma il "corpo estraneo" venga espulso dalla struttura, come rigettato da essa, con anche il rilevante pericolo di interazione dinamica tra il corpo aggiunto e l'esistente (martellamento), tanto che il corpo espulso può costituire una spece di ariete in grado di distruggere la parte rimanente. A questo proposito si noti la deformata modale della figura successiva, nella quale è evidente il possibile rischio di martellamento, almeno nel caso in cui l'ampiezza della oscillazione superi la distanza esistente tra gli edifici.

Naturalmente la ampiezza della deformata rappresentata in figura 8.20 non deve essere presa per vera, poiché si tratta ancora di una forma modale, e non dei risultati di una vera e propria analisi a spettro di risposta, che invece può effettivamente stimare l'entità degli spostamenti.

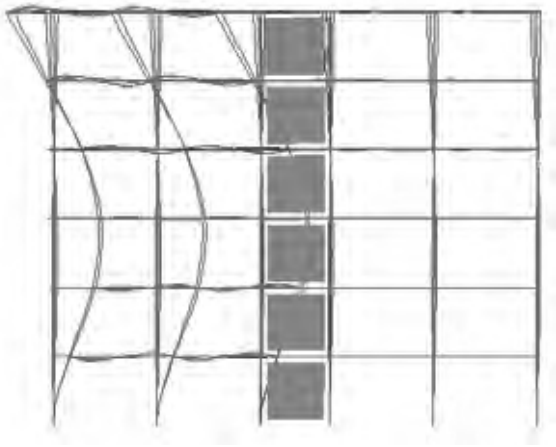


Figura 8.20 - *Lo stesso modo della figura precedente in vista frontale. Deformata modale che mette in luce un possibile fenomeno di martellamento tra il blocco aggiunto e la parte originaria dell'edificio. Si noti il completo disaccoppiamento tra i due corpi di fabbrica*

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

INDICE ANALITICO

A

Accelerogramma 70
Amplificazione modale, *metodo di* 444
Autovettore 117

C

Caughey, *smorzamento alla* 285
Centesimazione, *tempi di* 50
Coefficiente di Poisson 218
COF 347
Component Mode Syntesis 321
Consistent, *approccio* 239
Correzioni 443
CQC 437

D

Decremento 45
Dimensioni geometriche 211
Duhamel, *integrale di* 69, 154
Duttilità
globale 408
locale 407
richiesta 89

E

EC8, Eurocodice 8 ..... 74, 82, 414
Eccentricità, v. massa, *eccentricità*
Elementi
distorsione 206
Elementi, *formulazione* 185
Energia
cinetica 35, 111
conservazione della 36, 108
dissipata 38, 116
potenziale dei carichi 35, 113
potenziale elastica 35, 109
Errore 32, 40, 91

F

Forze
apparenti 37, 159
nodali equivalenti 107
Frequenza angolare 39
Funzioni di forma 106
Fuori piombo 216

G

Gradino, *carico a* 67
Gravitazionale, *spostamento* 397
Guyan, *riduzione di* 319

I

Impulso 66, 155
Interazione suolo-struttura 224, 289

Pagine tratte da www.epc.it - Tutti i diritti riservati

diagonali

Collana di testi di Ingegneria e non necessariamente solo di Ingegneria

L'*ingegneria* non consiste nella applicazione formale di regole rigide o nella pedissequa applicazione di formule complicate e illusoriamente precise, ma nella libera ideazione di modelli, nella loro critica consapevole, e nella loro valutazione intelligente ai fini di un certo uso, in condizioni di sicurezza e di vantaggiosità sociale ed economica. Dunque l'ingegneria è un'attività che richiede non soltanto una profonda comprensione dei fenomeni fisici, ma anche una ampia cultura e una preparazione multidisciplinare, ed è inscindibile da un alto grado di decisione esperta.

Negli ultimi anni, la figura dell'ingegnere è stata resa sempre più arida e apparentemente inadeguata dal vertiginoso e non sempre giustificato complicarsi delle *tecniche*, che hanno richiesto specializzazioni e automazioni via via crescenti. Ciò ha prodotto da un lato un grave impoverimento e uno svilimento della professione, sempre più vista come marginale e subordinata, e dall'altro un drastico incremento dell'utilizzo di protesi software. Tali protesi sono state ritenute implicitamente atte a colmare il divario tra le competenze effettive e quelle richieste, nella progressiva desertificazione delle conoscenze più autentiche.

Anziché porre l'accento sulla necessità di formare una ampia messe di esperti in grado di ragionare con la loro testa per risolvere problemi unici in modo efficiente, ci si è apparentemente dedicati alla formazione di una specie di *tecno-automa* computerizzato, visto più come *servente al pezzo* che come individuo pensante.

La progressiva richiesta di specializzazione ha generato una riduzione del numero delle aree di studio: si sono create e si stanno creando singole entità apparentemente super specializzate, e tante invisibili frontiere tra specialisti e specialisti, con tutti i tipici problemi legati al corretto trasferimento delle informazioni attraverso le interfacce tra esperti e organizzazioni diverse. Se la super specializzazione ha prodotto alti livelli di *expertise* in singoli, specifici campi della scienza e della tecnica, essa ha anche aumentato il rischio di cecità nei riguardi di altri importanti snodi del processo decisionale, spesso contigui ai propri. Ciò ha portato ad una accresciuta probabilità di errore. La corretta informazione sugli *snodi contigui* è anche ostacolata dalla carenza di testi completamente e immediatamente comprensibili, scritti allo scopo di illustrare e di spiegare.

Questa collana nasce dal desiderio di contribuire a mitigare questi problemi.

Il Curatore
Ing. Paolo Rugarli

CASTALIA