

Edmund Booth

# **PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

Rassegna completa di problemi, pratiche, soluzioni

Traduzione di G. Barbella, S. Bellino, P. Rugarli



Titolo originale: *Earthquake Design Practice for Buildings*

© Thomas Telford Limited 2014

---

L'ing. Gianluca Barbella ha tradotto i seguenti capitoli: *Introduzione alla terza edizione, Prefazione, Premessa, Ringraziamenti, Indice dei simboli, Cap. 1, Cap. 2, Cap. 8, Cap. 10, Cap. 11 e Cap. 12.*

L'Ing. Serenella Bellino ha tradotto i seguenti capitoli: *Cap. 4, Cap. 7 e Cap. 13.*

L'ing. Paolo Rugarli ha tradotto i seguenti capitoli: *Cap. 3, Cap. 5, Cap. 6, Cap. 9 e Cap. 14.*

---

## PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI

---

ISBN: 978-88-6310-690-9

Copyright © 2015 EPC S.r.l. Socio Unico

EPC S.r.l. Socio Unico - Via dell'Acqua Traversa, 187/189 - 00135 Roma

[www.insic.it](http://www.insic.it) - [www.epc.it](http://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/Progettazione-sismica-di-edifici/2273>

---

# INDICE GENERALE

---

<b>INTRODUZIONE ALLA TERZA EDIZIONE</b> .....	17
<b>PREFAZIONE</b> .....	19
<b>PREMESSA</b> .....	21
<b>RINGRAZIAMENTI</b> .....	23
<b>INDICE DEI SIMBOLI</b> .....	25

## **CAPITOLO 1**

<b>LA NATURA DEL RISCHIO SISMICO</b> .....	31
<b>1.1</b> <b>Introduzione: le soluzioni tecniche non sono sufficienti</b> .....	31
<b>1.2</b> <b>Perché i terremoti sono differenti</b> .....	32
<b>1.3</b> <b>Come cambia tra le società il costo dovuto ai terremoti</b> .....	33
<b>1.4</b> <b>Prepararsi ai terremoti</b> .....	34
<b>1.5</b> <b>Quando il terremoto colpisce</b> .....	35
<b>1.6</b> <b>Ricostruzione e ripresa</b> .....	38
<b>1.7</b> <b>Una risposta adeguata alla minaccia sismica</b> .....	39
<b>1.8</b> <b>Creare comunità resilienti ai terremoti</b> .....	40
<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	42

## **CAPITOLO 2**

<b>LA PERICOLOSITÀ SISMICA</b> .....	43
<b>2.1</b> <b>I pericoli generati dai terremoti</b> .....	43
<b>2.2</b> <b>Nozioni di base sui terremoti</b> .....	45
2.2.1 <b>Origine dei terremoti</b> .....	45
2.2.2 <b>Misurazione dei terremoti</b> .....	46
2.2.2.1 <b>Magnitudo ed intensità di un terremoto</b> .....	46
2.2.2.2 <b>Magnitudo di un terremoto</b> .....	46
2.2.2.3 <b>Intensità di un terremoto</b> .....	47
2.2.2.4 <b>Correlazione tra magnitudo e intensità</b> .....	47
2.2.3 <b>Frequenza dei terremoti</b> .....	47
<b>2.3</b> <b>Probabilità e periodo di ritorno di un terremoto</b> .....	48
<b>2.4</b> <b>Obiettivi di prestazione sismica</b> .....	49

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

<b>2.5</b>	<b>Rappresentazione del moto del terreno</b> .....	52
2.5.1	Storie temporali del moto sismico .....	52
2.5.2	Spettri sismici di risposta .....	52
2.5.3	Capacità di danno del moto del terreno.....	55
2.5.4	Componenti verticale, torsionale e di ribaltamento.....	55
2.5.4.1	<i>Spostamenti verticali</i> .....	56
2.5.4.2	<i>Moti rotazionali</i> .....	56
<b>2.6</b>	<b>Effetti di sito</b> .....	57
<b>2.7</b>	<b>Quantificazione del rischio sismico</b> .....	58
2.7.1	La sismicità nel mondo .....	58
2.7.2	Stime probabilistiche della pericolosità sismica .....	59
2.7.3	Fonti pubblicate della pericolosità del moto del terreno.....	61
2.7.4	Aree a bassa sismicità .....	62
<b>2.8</b>	<b>Moto sismico di progetto</b> .....	63
2.8.1	Spettri di risposta nei codici di progettazione.....	63
2.8.2	Spettri di risposta da studi specifici .....	64
2.8.3	Storie temporali sismiche per la progettazione.....	64
	<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	66

**CAPITOLO 3**

<b>IL CALCOLO DELLA RISPOSTA STRUTTURALE</b> .....	69	
<b>3.1</b>	<b>Introduzione</b> .....	69
<b>3.2</b>	<b>Principi di base di analisi sismica</b> .....	70
3.2.1	Risonanza .....	71
3.2.2	Smorzamento.....	72
3.2.3	Determinazione dei periodi strutturali degli edifici.....	75
3.2.4	Determinazione del livello di smorzamento negli edifici .....	76
<b>3.3</b>	<b>Analisi lineare a spettro di risposta</b> .....	77
3.3.1	Spettri di risposta dei terremoti .....	77
3.3.2	Spettri di risposta regolarizzati .....	79
3.3.3	Valori assoluti e relativi .....	79
3.3.4	Spettri di spostamento .....	80
3.3.5	Spettri di velocità e di Fourier.....	81
3.3.6	Spettri di capacità di spostamento.....	82
3.3.7	Sistemi con più gradi di libertà .....	83
<b>3.4</b>	<b>Risposta non lineare ai terremoti</b> .....	88
3.4.1	Domanda di duttilità e sua disponibilità.....	88
3.4.2	Definizione e misura della duttilità.....	89

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

3.4.3	Analisi a spettro di risposta modificata per tener conto della duttilità .....	89
3.4.4	Applicazione degli spettri modificati per tener conto della duttilità a sistemi MDOF .....	94
3.4.5	Conseguenze della plasticizzazione .....	95
3.4.6	Duttilità di curvatura .....	97
<b>3.5</b>	<b>Analisi per il progetto a capacità (gerarchia delle resistenze) .....</b>	<b>99</b>
<b>3.6</b>	<b>Altre considerazioni per una analisi sismica .....</b>	<b>101</b>
3.6.1	Influenza delle parti non strutturali .....	101
3.6.2	Effetti di sito .....	102
3.6.3	Rigidezza effettiva degli elementi in calcestruzzo .....	102
3.6.4	Risposta torsionale .....	102
3.6.5	Effetto P-delta .....	104
<b>3.7</b>	<b>Analisi sismica di edifici .....</b>	<b>104</b>
3.7.1	Obiettivi .....	104
3.7.2	Tipi di analisi .....	105
3.7.3	Analisi statica equivalente. ....	105
3.7.4	Analisi modale a spettro di risposta .....	107
3.7.5	Analisi lineare di time history (passo passo) .....	108
3.7.6	Analisi lineare di time history nel dominio delle frequenze .....	109
3.7.7	Uso di analisi lineari o non lineari .....	109
3.7.8	Analisi di time history non lineare .....	110
3.7.9	Metodi di analisi statica non lineare e “basati sullo spostamento” .....	111
3.7.9.1	<i>Generalità</i> .....	111
3.7.9.2	<i>Analisi di pushover statica</i> .....	112
3.7.9.3	<i>Metodo dello spostamento obiettivo</i> .....	112
3.7.9.4	<i>Metodo dello spettro di capacità di ATC 40</i> .....	113
3.7.9.5	<i>Interpretazione dei risultati</i> .....	117
<b>3.8</b>	<b>Progetto basato sullo spostamento .....</b>	<b>118</b>
3.8.1	Introduzione al progetto basato sullo spostamento .....	118
3.8.2	Descrizione del progetto basato sullo spostamento .....	119
3.8.3	Scelta dello spostamento di progetto: introduzione .....	122
3.8.4	Scelta dello spostamento di progetto: limitazione del danno non strutturale .....	122
3.8.5	Scelta dello spostamento di progetto: limitazione del danno strutturale .....	123
3.8.6	Calcolo dello spostamento allo snervamento. ....	125
	<b>Riferimenti bibliografici .....</b>	<b>126</b>

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

**CAPITOLO 4**

**ANALISI DEI TERRENI ED INTERAZIONE**

<b>TERRENO-STRUTTURA</b> .....	129
<b>4.1</b> <b>Caratteristiche dei terreni per la progettazione sismica</b> .....	129
4.1.1      Introduzione .....	129
4.1.2      Caratteristiche del terreno per un'analisi dinamica .....	130
4.1.2.1 <i>Inerzia</i> .....	130
4.1.2.2 <i>Rigidezza e smorzamento nei terreni</i> .....	130
4.1.3      Rigidezza delle sabbie e delle argille.....	131
4.1.4      Smorzamento delle sabbie e delle argille.....	133
4.1.5      Rigidezza e smorzamento dei limi .....	133
4.1.6      Resistenza dei terreni granulari.....	134
4.1.7      Resistenza dei terreni coesivi.....	134
<b>4.2</b> <b>Liquefazione</b> .....	135
4.2.1      Valutazione del potenziale di liquefazione dei terreni .....	135
4.2.2      Metodo semplificato per la valutazione della liquefacibilità.....	137
4.2.3      Margine tra i valori CRR e CSR .....	143
4.2.4      Altri metodi di valutazione del potenziale di liquefazione .....	143
4.2.5      Procedura EC8 per la valutazione della liquefazione .....	144
4.2.6      Conseguenze della liquefazione .....	144
<b>4.3</b> <b>Pericolosità sismiche di sito</b> .....	146
4.3.1      Effetti di amplificazione locale.....	146
4.3.2      Effetti di bacino .....	147
4.3.3      Amplificazione dello spostamento verticale .....	148
4.3.4      Effetti topografici .....	148
4.3.5      Stabilità dei pendii.....	148
4.3.6      Rotture di faglie.....	149
4.3.7      Movimenti del terreno vicino alle faglie “seismic flings” .....	149
<b>4.4</b> <b>Interazione terreno-struttura</b> .....	150
4.4.1      Effetti della flessibilità della fondazione .....	150
4.4.2      Analisi dell'interazione terreno-struttura.....	151
<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	152

**CAPITOLO 5**

<b>CONCEZIONE STRUTTURALE</b> .....	155
<b>5.1</b> <b>Le lezioni tratte dai danni sismici</b> .....	155
<b>5.2</b> <b>Progetto e obiettivi prestazionali</b> .....	156
<b>5.3</b> <b>Anatomia di un edificio</b> .....	158
<b>5.4</b> <b>Considerazioni di progetto</b> .....	159

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

5.4.1	L'influenza delle condizioni del sito.....	159
5.4.2	Disposizione delle strutture .....	162
5.4.3	Fornitura di una duttilità adeguata .....	163
5.4.4	Disponibilità di adeguata rigidezza .....	164
5.4.5	Disponibilità di una adeguata resistenza laterale .....	165
5.4.6	Interazione tra la struttura e le parti non strutturali.....	165
<b>5.5</b>	<b>Sistemi strutturali .....</b>	<b>166</b>
5.5.1	Fondazioni .....	166
5.5.1.1	<i>Generalità.....</i>	166
5.5.1.2	<i>Fondazioni superficiali .....</i>	166
5.5.1.3	<i>Fondazioni su pali .....</i>	167
5.5.1.4	<i>Fondazioni su suoli liquefabili .....</i>	167
5.5.2	Scelta del materiale strutturale .....	167
5.5.3	Telai resistenti a momento .....	168
5.5.3.1	<i>Caratteristiche generali dei telai resistenti a momento.....</i>	168
5.5.3.2	<i>Telai interni e perimetrali.....</i>	170
5.5.3.3	<i>Telai prefabbricati in calcestruzzo.....</i>	171
5.5.3.4	<i>Tamponature a blocchi nei telai resistenti a momento.....</i>	172
5.5.4	Telai con controventi concentrici.....	172
5.5.5	Telai a controventi eccentrici.....	176
5.5.6	Telai con controventi ad instabilità impedita .....	176
5.5.7	Pareti di taglio.....	178
5.5.7.1	<i>Generalità.....</i>	178
5.5.7.2	<i>Pareti di taglio singole o isolate.....</i>	180
5.5.7.3	<i>Sistemi a grandi pannelli prefabbricati.....</i>	180
5.5.7.4	<i>Sistemi duali a telaio e pareti.....</i>	180
5.5.7.5	<i>Pareti di taglio accoppiate .....</i>	182
5.5.7.6	<i>Pareti di taglio in lamiera d'acciaio.....</i>	182
5.5.8	Metodi speciali per migliorare la resistenza sismica .....	183
5.5.8.1	<i>Generalità.....</i>	183
5.5.8.2	<i>Isolamento sismico degli edifici.....</i>	185
5.5.8.3	<i>Smorzamento aggiuntivo .....</i>	186
5.5.8.4	<i>Sistemi di smorzamento semi attivi.....</i>	188
5.5.8.5	<i>Sistemi auto-centranti .....</i>	190
<b>5.6</b>	<b>Costo della resistenza sismica .....</b>	<b>191</b>
	<b>Riferimenti bibliografici .....</b>	<b>192</b>

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

**CAPITOLO 6**

**NORMATIVE SISMICHE** ..... 195

**6.1 Il ruolo delle normative nel progetto** ..... 195

**6.2 Sviluppo di codici** ..... 196

**6.3 Normative sismiche internazionali** ..... 197

**6.4 Progetto e obiettivi prestazionali** ..... 197

**6.5 Requisiti delle normative ai fini dell'analisi** ..... 198

    6.5.1 Analisi statica equivalente ..... 198

    6.5.2 Analisi con spettro di risposta ..... 201

    6.5.3 Analisi di time history ..... 201

    6.5.4 Analisi statica non lineare ..... 202

    6.5.5 Deformazioni plastiche limite ..... 202

**6.6 Requisiti dei codici per la resistenza** ..... 203

**6.7 Requisiti dei codici per la deformabilità** ..... 203

**6.8 Combinazioni di carico** ..... 204

**6.9 Requisiti delle normative per i dettagli costruttivi** ..... 205

**6.10 Requisiti delle normative per le fondazioni** ..... 205

**6.11 Requisiti delle normative per gli elementi non strutturali e per il contenuto degli edifici** ..... 206

**6.12 Altre considerazioni** ..... 206

    6.12.1 Combinazione delle forze in due direzioni ortogonali ..... 206

    6.12.2 Carichi verticali sismici ..... 206

**6.13 Materiale informativo** ..... 207

    6.13.1 Eurocodice 8 ..... 207

    6.13.2 Norme statunitensi ..... 207

**Riferimenti bibliografici** ..... 207

**CAPITOLO 7**

**FONDAZIONI** ..... 209

**7.1 Finalità del progetto** ..... 209

**7.2 “Gerarchia delle resistenze” considerazioni per le fondazioni** ..... 210

    7.2.1 Resistenza e duttilità delle strutture in fondazione ..... 210

    7.2.2 La risposta del terreno ..... 211

**7.3 Coefficienti parziali di sicurezza per progettazione sismica di fondazioni** ..... 212

    7.3.1 Coefficienti parziali per le azioni ..... 212

    7.3.2 Coefficienti parziali di sicurezza per le resistenze globali del terreno e per i parametri geotecnici ..... 212

**7.4 Fondazioni isolate e continue** ..... 213



## PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI

7.4.1	Meccanismi di rottura .....	213
7.4.1.1	<i>Collasso per scorrimento</i> .....	213
7.4.1.2	<i>Collasso per mancanza di capacità portante</i> .....	215
7.4.1.3	<i>Collasso per ribaltamento</i> .....	215
7.4.1.4	<i>Cedimento strutturale della fondazione</i> .....	216
7.4.2	Collegamenti tra le fondazioni .....	216
<b>7.5</b>	<b>Fondazioni a platea</b> .....	<b>216</b>
<b>7.6</b>	<b>Fondazioni su pali</b> .....	<b>217</b>
7.6.1	Effetti verticali ed orizzontali .....	217
7.6.2	Dettagli dei pali in c.a. ....	219
7.6.3	Gruppo di pali.....	220
<b>7.7</b>	<b>Opere di sostegno</b> .....	<b>221</b>
7.7.1	Introduzione.....	221
7.7.2	Analisi delle spinte del terreno durante un terremoto.....	222
7.7.3	Pressioni di fluidi .....	222
<b>7.8</b>	<b>Progetto in presenza di terreni liquefacibili</b> .....	<b>223</b>
	<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	<b>224</b>

## CAPITOLO 8

### PROGETTAZIONE DEL CEMENTO ARMATO ..... 227

<b>8.1</b>	<b>Lezioni apprese dai danni dei terremoti</b> .....	<b>227</b>
<b>8.2</b>	<b>Comportamento del calcestruzzo armato sottoposto a carico ciclico</b> .....	<b>236</b>
8.2.1	Comportamento ciclico dell'armatura.....	236
8.2.2	Proprietà del legame sforzo-deformazione nel calcestruzzo semplice .....	237
8.2.3	Proprietà del legame sforzo-deformazione nel calcestruzzo confinato .....	238
8.2.4	Aderenza, ancoraggi e giunzioni .....	240
8.2.5	Flessione e taglio nelle travi: inversione delle cerniere .....	241
8.2.5.1	<i>Introduzione</i> .....	241
8.2.5.2	<i>Degrado ciclico della resistenza a taglio</i> .....	241
8.2.5.3	<i>Allungamento di travi e pareti</i> .....	244
8.2.5.4	<i>Implicazioni per la progettazione</i> .....	245
8.2.6	Flessione e taglio nelle travi: cerniere unidirezionali.....	246
8.2.7	Flessione e taglio nei pilastri.....	248
8.2.8	Flessione e taglio nelle pareti snelle .....	249
8.2.9	Pareti tozze .....	251
8.2.10	Calcestruzzo precompresso.....	251

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

8.2.11	Armature non metalliche nelle strutture sismo resistenti .....	252
<b>8.3</b>	<b>Specifiche dei materiali .....</b>	<b>252</b>
<b>8.4</b>	<b>Analisi delle strutture in calcestruzzo armato .....</b>	<b>253</b>
8.4.1	Lo smorzamento nelle strutture in calcestruzzo .....	253
8.4.2	Stima della capacità di rotazione degli elementi in calcestruzzo..	254
8.4.3	Modellazione della rigidità delle membrature in calcestruzzo armato .....	258
8.4.3.1	<i>Rapporto tra rigidità flessionale fessurata e non fessurata .....</i>	<i>258</i>
8.4.3.2	<i>Relazione tra rigidità flessionale e curvatura allo snervamento ....</i>	<i>261</i>
8.4.3.3	<i>Derivazione approssimata della curvatura allo snervamento .....</i>	<i>264</i>
8.4.3.4	<i>Implicazioni per progettisti e analisti dell'interdipendenza tra rigidità e rapporto d'armatura .....</i>	<i>265</i>
8.4.3.5	<i>Limitazioni del metodo delle rigidità flessionali raccomandate ....</i>	<i>266</i>
8.4.3.6	<i>Riepilogo del metodo raccomandato per determinare la rigidità flessionale .....</i>	<i>267</i>
8.4.3.7	<i>Rigidità a taglio .....</i>	<i>268</i>
8.4.3.8	<i>Rigidità assiale .....</i>	<i>268</i>
8.4.4	Modellazione di una struttura a telaio in calcestruzzo .....	268
8.4.4.1	<i>Modellazione dei nodi trave-pilastro .....</i>	<i>272</i>
8.4.4.2	<i>Posizione delle cerniere plastiche nelle travi .....</i>	<i>273</i>
8.4.4.3	<i>Posizione delle cerniere plastiche nei pilastri .....</i>	<i>273</i>
8.4.4.4	<i>Modellazione delle cerniere alla base delle pareti di taglio .....</i>	<i>274</i>
8.4.4.5	<i>Limitazioni dei modelli non lineari di telaio semplice .....</i>	<i>274</i>
<b>8.5</b>	<b>Progettazione degli edifici in calcestruzzo .....</b>	<b>275</b>
8.5.1	Livelli di progetto della duttilità .....	275
8.5.2	Progettazione dei telai in calcestruzzo armato .....	276
8.5.2.1	<i>Introduzione .....</i>	<i>276</i>
8.5.2.2	<i>Dimensionamento preliminare .....</i>	<i>276</i>
8.5.2.3	<i>Dettagli costruttivi di travi e pilastri .....</i>	<i>278</i>
8.5.2.4	<i>Nodi trave-pilastro .....</i>	<i>283</i>
8.5.2.5	<i>Strutture a telaio a duttilità 'bassa' o 'ordinaria' .....</i>	<i>287</i>
8.5.2.6	<i>Telai 'secondari' non dimensionati per resistere a carichi laterali ...</i>	<i>287</i>
8.5.2.7	<i>Telai prefabbricati in calcestruzzo .....</i>	<i>288</i>
8.5.2.8	<i>Strutture a telaio momento-resistenti con tamponature in muratura .....</i>	<i>288</i>
8.5.3	Pareti di taglio .....	289
8.5.3.1	<i>Predimensionamento .....</i>	<i>289</i>
8.5.3.2	<i>Resistenza a taglio e flessione delle pareti sottili .....</i>	<i>290</i>
8.5.3.3	<i>Elementi di bordo delle pareti .....</i>	<i>292</i>
8.5.3.4	<i>Pareti tozze .....</i>	<i>292</i>
8.5.3.5	<i>Aperture nelle pareti .....</i>	<i>293</i>

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

8.5.3.6	<i>Strutture realizzate con pannelli prefabbricati</i> .....	294
8.5.4	Diaframmi di piano in calcestruzzo .....	296
8.5.4.1	<i>La funzione strutturale dei diaframmi</i> .....	296
8.5.4.2	<i>Predimensionamento dei diaframmi</i> .....	297
8.5.4.3	<i>Considerazioni sulla gerarchia delle resistenze</i> .....	298
8.5.4.4	<i>Flessibilità dei diaframmi</i> .....	298
8.5.4.5	<i>Forze locali e di trasferimento</i> .....	299
8.5.4.6	<i>Resistenza dei diaframmi</i> .....	299
	<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	300

**CAPITOLO 9**

<b>ACCIAIO</b> .....	303	
<b>9.1</b>	<b>Introduzione</b> .....	303
<b>9.2</b>	<b>Lezioni apprese dai danni sismici</b> .....	304
<b>9.3</b>	<b>Il comportamento di elementi in acciaio sotto l'azione di carichi ciclici</b> .....	308
9.3.1	Introduzione.....	308
9.3.2	Carico ciclico di puntoni.....	309
9.3.3	Carico ciclico flessionale .....	312
9.3.4	Carico ciclico sulle saldature .....	315
9.3.5	Pannelli nodali .....	315
9.3.6	Effetti di scala .....	316
<b>9.4</b>	<b>Specifiche per il materiale</b> .....	316
<b>9.5</b>	<b>Analisi di strutture in acciaio</b> .....	317
9.5.1	Fattori di struttura .....	317
9.5.2	Domanda di rotazione e capacità delle cerniere flessionali in acciaio .....	318
9.5.3	Tener conto della flessibilità in telai di acciaio non controventati .....	318
9.5.4	Analisi di telai CBF .....	318
<b>9.6</b>	<b>Progetto di strutture di edifici in acciaio</b> .....	319
9.6.1	Livelli di progetto della duttilità .....	319
9.6.2	Telai con controventi concentrici.....	319
9.6.2.1	<i>Generalità</i> .....	321
9.6.2.2	<i>Sistemi con controventi ad X e a diagonali</i> .....	322
9.6.2.3	<i>Sistemi con controventi diagonali e a V</i> .....	322
9.6.2.4	<i>Sistemi con controventi "a cerniera lampo"</i> .....	323
9.6.2.5	<i>Sistemi con controventi a K</i> .....	323
9.6.3	Telai con controventi eccentrici .....	323
9.6.4	Telai con controventi ad instabilità impedita .....	324

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

9.6.5	Telai resistenti a momento .....	324
9.6.5.1	<i>Considerazioni generali</i> .....	324
9.6.5.2	<i>Predimensionamento</i> .....	325
9.6.5.3	<i>Travi</i> .....	326
9.6.5.4	<i>Colonne</i> .....	326
9.6.5.5	<i>Pannelli nodali</i> .....	327
9.6.5.6	<i>Connessioni</i> .....	328
9.6.5.7	<i>Connessioni che dissipano energia</i> .....	332
9.6.5.8	<i>Telai non dimensionati per resistere a carichi laterali</i> .....	333
9.6.5.9	<i>Telai resistenti a momento con tamponature in muratura.</i> .....	333
<b>9.7</b>	<b>Strutture composte acciaio calcestruzzo</b> .....	333
	<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	333

**CAPITOLO 10**

<b>LA MURATURA</b> .....	337	
<b>10.1</b>	<b>Introduzione</b> .....	338
<b>10.2</b>	<b>Tipologie di costruzioni in muratura</b> .....	339
10.2.1	Muratura non armata.....	339
10.2.2	Muratura armata.....	341
10.2.3	Muratura confinata.....	343
10.2.4	Altre tipologie di muratura rinforzata .....	344
<b>10.3</b>	<b>Lezioni apprese dai danni conseguenti ai terremoti</b> .....	344
<b>10.4</b>	<b>Progettazione antisismica delle strutture in muratura</b> .....	348
10.4.1	Resistenza minima dei materiali .....	348
10.4.2	Resistenza a taglio nel piano delle pareti in muratura.....	348
10.4.3	Azioni fuori piano sulle pareti in muratura .....	351
<b>10.5</b>	<b>Analisi delle strutture in muratura</b> .....	352
<b>10.6</b>	<b>Semplici regole per edifici in muratura</b> .....	354
	<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	356

**CAPITOLO 11**

<b>IL LEGNO</b> .....	359	
<b>11.1</b>	<b>Introduzione</b> .....	359
<b>11.2</b>	<b>Lezioni apprese dai danni provocati dai terremoti</b> .....	360
<b>11.3</b>	<b>Caratteristiche del legno come materiale da costruzione per edifici sismo-resistenti</b> .....	361
<b>11.4</b>	<b>Progettazione delle strutture in legno</b> .....	362
11.4.1	Disposizioni dell'Eurocodice 8.....	362
11.4.1.1	<i>Introduzione</i> .....	362

## PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI

11.4.1.2	<i>Fattori q e classi di duttilità nelle strutture in legno</i> .....	363
11.4.1.3	<i>Sintesi delle regole dell'EC8 per strutture dissipative in legno (CDM e CDA)</i> .....	364
11.4.1.4	<i>Criteri di gerarchia delle resistenze per strutture dissipative in legno</i> .....	364
11.4.2	La prassi negli USA.....	365
11.4.3	Costruzioni con pannelli lamellari a strati incrociati ed altre tipologie di pannelli prefabbricati .....	365
11.4.4	Costruzioni in bambù.....	368
	<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	369

## CAPITOLO 12

<b>IL CONTENUTO DEGLI EDIFICI</b> .....	371	
<b>12.1</b> <b>Introduzione</b> .....	371	
<b>12.2</b> <b>Analisi e progettazione sismica degli elementi non strutturali</b> .....	372	
12.2.1	Principi generali di progettazione e dettagli costruttivi. ....	372
12.2.2	Analisi dei componenti sensibili agli spostamenti .....	374
12.2.3	Analisi di semplici componenti sensibili alle accelerazioni .....	375
12.2.4	Analisi di elementi sensibili alle accelerazioni attraverso gli 'spettri di risposta di piano' .....	378
12.2.5	Analisi di elementi soggetti a rocking .....	379
12.2.6	Prove di elementi sensibili alle accelerazioni .....	380
12.2.7	Qualifica di elementi sensibili alle accelerazioni attraverso 'banche dati dell'esperienza pregressa' .....	380
<b>12.3</b>	<b>Apparecchiature elettriche, meccaniche e di altro tipo</b> .....	381
<b>12.4</b>	<b>Impianti di servizio verticali ed orizzontali</b> .....	381
<b>12.5</b>	<b>Rivestimenti</b> .....	382
	<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	382

## CAPITOLO 13

<b>ISOLAMENTO SISMICO</b> .....	385	
<b>13.1</b> <b>Introduzione</b> .....	385	
13.1.1	Isolamento sismico: un'idea che si è sviluppata nel tempo .....	385
13.1.2	Principi base dell'isolamento sismico.....	386
13.1.3	Applicazioni pratiche .....	389
<b>13.2</b>	<b>Comportamento degli edifici isolati sismicamente durante un terremoto</b> .....	391
<b>13.3</b>	<b>Sistemi di isolamento sismico</b> .....	393
13.3.1	Requisiti funzionali di un sistema di isolamento sismico.....	393
13.3.1.1	<i>Caratteristica di flessibilità orizzontale</i> .....	393

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

13.3.1.2	<i>Caratteristica di smorzamento e rigidità iniziale</i> .....	393
13.3.1.3	<i>Caratteristica di ricentraggio</i> .....	394
13.3.2	Tipi di dispositivi di isolatori sismici .....	395
<b>13.4</b>	<b>Considerazioni progettuali</b> .....	399
13.4.1	Adattabilità degli edifici all'isolamento sismico .....	399
13.4.1.1	<i>Limitazioni delle altezze</i> .....	399
13.4.1.2	<i>Condizioni di terreno soffice</i> .....	399
13.4.1.3	<i>Faglie attive</i> .....	400
13.4.1.4	<i>Azioni del vento</i> .....	400
13.4.1.5	<i>Snellezza globale</i> .....	400
13.4.1.6	<i>Distanza tra edifici e giunti strutturali</i> .....	400
13.4.1.7	<i>Destinazione d'uso di un edificio</i> .....	400
13.4.2	Convenienza dell'isolamento come tecnica di rinforzo strutturale .....	401
13.4.3	Posizione del piano di isolamento .....	401
<b>13.5</b>	<b>Analisi dei sistemi di isolamento sismico</b> .....	402
13.5.1	Obiettivi dell'analisi .....	402
13.5.2	Analisi lineare semplificata .....	402
13.5.3	Analisi più rigorose .....	407
13.5.4	Duttilità ed edifici sismicamente isolati .....	407
<b>13.6</b>	<b>Norme europee e statunitensi per edifici isolati sismicamente</b> .....	408
13.6.1	Criteri di progettazione strutturale .....	408
13.6.2	Norme per le prove di qualificazione .....	408
	<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	409

**CAPITOLO 14**

<b>VALUTAZIONE E RINFORZO DI EDIFICI ESISTENTI</b> .....	411	
<b>14.1</b>	<b>Introduzione</b> .....	411
<b>14.2</b>	<b>Prestazioni di edifici rinforzati nel corso di terremoti</b> .....	414
14.2.1	Edifici in calcestruzzo .....	414
14.2.2	Edifici in acciaio .....	415
14.2.3	Edifici in muratura .....	415
14.2.4	Edifici storici .....	416
<b>14.3</b>	<b>Strategie di progetto per il rinforzo</b> .....	416
14.3.1	Obiettivi prestazionali per il rinforzo .....	416
14.3.2	Analisi costi-benefici del rinforzo sismico .....	417
14.3.3	Rinforzo di edifici danneggiati dal sisma .....	419
<b>14.4</b>	<b>Determinazione della adeguatezza sismica di edifici esistenti</b> .....	419
14.4.1	Edifici non danneggiati: sopralluoghi visivi rapidi .....	419

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

---

14.4.2	Edifici non danneggiati: sopralluoghi più dettagliati .....	420
14.4.3	Sopralluoghi su edifici danneggiati dal sisma .....	422
<b>14.5</b>	<b>Metodi di analisi</b> .....	<b>422</b>
14.5.1	Metodi approssimati iniziali .....	422
14.5.2	Analisi più dettagliate .....	422
<b>14.6</b>	<b>Metodi di rinforzo</b> .....	<b>423</b>
14.6.1	Generalità .....	423
14.6.2	Alcune considerazioni iniziali .....	423
14.6.3	Possibilità di rinforzo .....	423
14.6.3.1	<i>Aggiunta di pareti di taglio</i> .....	423
14.6.3.2	<i>Controventi</i> .....	425
14.6.3.3	<i>Smorzatori passivi</i> .....	425
14.6.3.4	<i>Incamiciatura degli elementi in calcestruzzo</i> .....	425
14.6.3.5	<i>Rinforzo di strutture con telai resistenti a momento</i> .....	426
14.6.3.6	<i>Rinforzo dei piani</i> .....	427
14.6.3.7	<i>Rinforzo delle connessioni tra muro e piano</i> .....	427
14.6.3.8	<i>Rinforzo di pareti in muratura</i> .....	427
14.6.3.9	<i>Isolamento sismico</i> .....	427
<b>14.7</b>	<b>Considerazioni speciali per il rinforzo di edifici danneggiati dal terremoto</b> .....	<b>428</b>
14.7.1	Categorie di danno .....	428
14.7.2	Metodi di riparazione .....	428
<b>14.8</b>	<b>Adeguamento di edifici storici</b> .....	<b>428</b>
<b>14.9</b>	<b>Valutazione di grandi insiemi di edifici</b> .....	<b>429</b>
	<b>Riferimenti bibliografici</b> .....	<b>430</b>
<b>INDICE ANALITICO</b> .....		<b>433</b>

# INTRODUZIONE ALLA TERZA EDIZIONE

---

Molte cose sono cambiate da quando nel 1987 David Key scrisse la sua introduzione alla prima edizione, ma il suo approccio ivi delineato rimane sostanzialmente valido. I cambiamenti più importanti nell'ingegneria sismica possono essere riassunti come segue.

- 1) Pubblicazione di un codice di progettazione sismica Europeo e significativi sviluppi delle normative di ogni altro paese, in particolare negli Stati Uniti.
- 2) Una crescente consapevolezza del fatto che, in molti casi, la prevenzione del collasso non è l'unico obiettivo dell'ingegnere; minimizzare i costi di riparazione e preservare l'efficienza sono infatti obiettivi altrettanto importanti.
- 3) Un deciso progresso nel numero, disponibilità e nella qualità delle registrazioni del moto del terreno, e una migliore comprensione dell'influenza che hanno su quest'ultimo le caratteristiche del suolo e dell'evento sismico.
- 4) Una maggiore consapevolezza dei fattori che devono essere considerati nella progettazione sismica delle strutture in acciaio, e una migliore conoscenza della risposta sismica del calcestruzzo, della muratura e del legno.
- 5) Evoluzione delle analisi non-lineari nel tempo da un metodo di ricerca riservato agli specialisti ad uno strumento potenzialmente utile (e realmente impiegato) nella pratica professionale, e utilizzo crescente delle tecniche di analisi statica non-lineare (pushover).
- 6) Sviluppo di metodi pratici per la valutazione e il miglioramento della resistenza sismica di strutture esistenti (sebbene ci sia ancora molto lavoro da fare in questo senso!).
- 7) Impiego molto maggiore ed esperienza nell'utilizzo delle tecniche di isolamento sismico delle strutture e di altri metodi per il miglioramento delle prestazioni sismiche degli edifici, sebbene attualmente tali soluzioni rappresentino una piccola minoranza delle costruzioni realizzate.

Il testo riveduto riflette questi cambiamenti, sulla base dell'esperienza trentennale dell'autore come consulente nel campo dell'ingegneria sismica. Del testo originale di David Key, rimane infatti solo la sua introduzione, nella speranza che questa nuova edizione del libro rimanga fedele alla sua originaria idea di una guida pratica per ingegneri alle prese, forse per la prima volta, con la progettazione di strutture in zona sismica.



# PREFAZIONE

---

## Scopo

Questo libro è rivolto agli ingegneri professionisti e agli studenti avanzati che hanno una buona conoscenza generale della progettazione strutturale ma che potrebbero non avere molta familiarità con i problemi che riguardano la resistenza sismica. L'ingegneria sismica è una materia vasta e l'intento di questo libro non è di fornirne una trattazione completa ed approfondita. Si cercherà piuttosto di illustrare e rendere comprensibili ai lettori quegli aspetti della materia che rivestono un ruolo importante nella progettazione in zona sismica, richiamando per ulteriori dettagli fonti più approfondite ove necessario. Il contenuto di questo testo fa essenzialmente riferimento agli edifici, ma molti dei principi trattati si applicano in modo più generale anche ad altre tipologie di costruzioni, come ponti, serbatoi o torri per le telecomunicazioni.

Sebbene i terremoti non siano vincolati da confini nazionali, la pratica dell'ingegneria sismica varia significativamente da regione a regione, e questo si riflette nelle diverse strutture e requisiti delle normative sismiche di ogni paese. In questo contesto il presente testo vuole avere una valenza generale più che descrivere l'approccio di una singola normativa, benché esso rifletta l'esperienza dell'autore, e dunque quella europea, con l'Eurocodice 8, e quella statunitense. Piuttosto che soffermarsi sulla mera descrizione dei requisiti contenuti nelle normative, si cercherà pertanto di illustrare i principi scientifici e ingegneristici da cui (nella maggioranza dei casi!) derivano.

## Struttura del testo

Spesso si verificano terremoti che mettono alla prova gli edifici molto più duramente di quanto i loro progettisti si sarebbero potuti aspettare. Gli ingegneri dovrebbero sfruttare (e lo fanno) questa possibilità (disponibile più raramente in altre discipline) di scoprire se le teorie correntemente applicate trovino realmente conferma nella pratica. Nel testo sono pertanto discusse una serie di lezioni che si possono trarre dal modo in cui in passato gli edifici si sono comportati durante eventi sismici. Tale impostazione è alla base dell'idea che ispirò David Key per l'edizione originale (1987) di questo testo.

Il primo capitolo, esulando dalla trattazione ingegneristica dei capitoli successivi, analizza in modo più ampio i fattori che contribuiscono a determinare gli effetti che i terremoti hanno sull'ambiente costruito e sulle persone che lo abitano. Il secondo capitolo è una breve introduzione alla sismologia, in cui sono trattati argomenti quali la misurazione della magnitudo dei terremoti e dei moti da essi indotti nel terreno. Il Capitolo 3 delinea i principi base della dinamica delle

## **PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

---

strutture applicabili all'analisi sismica, mentre il Capitolo 4 illustra il comportamento dei terreni (tema di cruciale importanza dato che il suolo supporta e allo stesso tempo sollecita le strutture che su di esso sono fondate). Il Capitolo 5 presenta il problema della progettazione concettuale degli edifici, questione di fondamentale importanza poiché se un progetto è carente già dalla sua concezione, difficilmente la prestazione sismica sarà soddisfacente. Il Capitolo 6 dà una panoramica di alcune normative per la progettazione sismica. Nel Capitolo 7 si analizza la progettazione delle fondazioni, mentre i capitoli dall'8 all'11 riguardano la progettazione sismica con riferimento specifico ai quattro materiali impiegati nelle costruzioni – calcestruzzo, acciaio, muratura e legno. Fino a questo punto, ci si è concentrati sulla struttura portante degli edifici, ma anche ciò che viene portato è molto vulnerabile e, collassando, può causare gravi danni e perdite, se non addirittura maggiori. Il Capitolo 12 pertanto esamina il contenuto e i rivestimenti degli edifici. Il Capitolo 13 tratta il problema dell'isolamento sismico, tecnica che consiste nel realizzare gli edifici su fondazioni flessibili al fine di renderli indipendenti dal moto del terreno. Gli edifici esistenti privi di una sufficiente resistenza sismica rappresentano in molte parti del mondo una grossa minaccia in termini di sicurezza ed economici, l'ultimo capitolo descrive dunque le problematiche legate alla loro valutazione e al consolidamento.

# PREMESSA

---

Fu durante una visita a Città del Messico con Edmund Booth nelle settimane successive il disastroso terremoto del 1985 che ho cominciato a comprendere l'enormità della sfida insita nell'affrontare la professione dell'ingegnere. Non si trattava di una materia accademica, come molti potrebbero percepirla, ma di una questione che riguardava la vita e la morte di quelle persone e comunità tanto sfortunate da essere stati colpiti dalla distruzione. Edifici costruiti da pochi anni erano crollati come schiacciati al suolo, rovesciati come tessere di un domino o in frantumi come tasselli di un mosaico. Alla porta accanto, edifici che sembrava dovessero essere crollati già da anni sotto il proprio peso erano rimasti indenni.

Il terremoto del Messico mi ha mostrato la portata della sfida ingegneristica: con un esiguo tempo per reagire, ogni cosa è scossa, ognuno è messo alla prova, ed in pochi minuti le strutture dalle quali fino a poco prima è dipesa la vita economica e sociale della comunità giacciono in rovine. Il terremoto del Messico non fu il primo disastro in tempi recenti a mettere alla prova edifici costruiti con una certa comprensione dei moderni principi della progettazione e, naturalmente, non sarebbe stato nemmeno l'ultimo.

Purtroppo, anche nei decenni successivi la storia si è ripetuta più volte in tutto il mondo. Terremoti devastanti continuano ad affliggere paesi ricchi e poveri. In questa nuova, terza edizione di "Progettazione sismica di edifici", Edmund mette a confronto il disastro del 2010 di Haiti con il terremoto del Tohoku in Giappone del 2011 e i due terremoti che hanno colpito Christchurch in Nuova Zelanda negli stessi anni. La lezione rivolta agli ingegneri sembra in ogni caso anche troppo familiare. Gli edifici costruiti senza un'adeguata considerazione dei principi di progettazione sismica e soggetti a forti scosse verranno danneggiati o distrutti, spesso con conseguenze fatali. Ne conosciamo esattamente le cause, eppure siamo come impotenti nel prevenire ulteriori catastrofi.

Una parte importante del problema è la sua scala. Alla stessa velocità con la quale avanza la nostra comprensione della pericolosità e del rischio sismico, il problema cresce su scala globale. Dal 1985 la popolazione mondiale è cresciuta del 50% circa. L'urbanizzazione avanza a rotta di collo in tutto il mondo. Lo sviluppo interessa zone sempre più vulnerabili. Edifici in calcestruzzo di altezza media ed elevata rappresentano tutt'ora la soluzione costruttiva scelta nei paesi in via di sviluppo e in quelle economie emergenti che si sforzano di fare i conti con la crescita demografica e i cambiamenti dei modelli di vita.

Le soluzioni tecniche che potrebbero migliorare significativamente il comportamento degli edifici e delle infrastrutture in zone a sismicità elevata sono ben note agli esperti. Tuttavia, la sfida più grande riguarda la comunicazione; come

## **PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

---

stimolare all'interno della società civile un appropriato dialogo sul livello del rischio sismico al quale le comunità più vulnerabili sono esposte, e su come esso venga gestito insieme ad altri rischi di natura estrema. Dovrebbero forse le comunità cercare di mitigare il rischio sismico impiegando nuove normative e controlli più rigorosi sulle costruzioni, migliorando gli edifici esistenti, attraverso una migliore gestione dei disastri, l'installazione di sistemi di allarme (come per gli tsunami), o anche attraverso il sistema assicurativo?

Per tutte queste ragioni la condivisione più ampia possibile della conoscenza nell'ingegneria sismica è vitale. In questo importante contributo alla questione, Edmund ha saputo miscelare in modo esperto un ricco contenuto tecnico con un'ampia discussione contestuale. Se questo lavoro stimola un nuovo dialogo e intesa tra gli specialisti in ingegneria sismica e i loro colleghi professionisti e i clienti in tutto il mondo, esso ha il potenziale per fare realmente la differenza nella mitigazione dei disastri causati dai terremoti.

Scott Steedman CBE FREng

Ottobre 2013

## CAPITOLO 5

# CONCEZIONE STRUTTURALE

---

La sicurezza [nei riguardi del terremoto] può essere costosa se si parte con il sistema o con il progetto architettonico o strutturale sbagliato.

Degenkolb (1994)

Questo capitolo tratta i seguenti argomenti:

- Le lezioni tratte dai terremoti.
- Considerazioni di progetto e forma globale.
- Scelta del luogo ed effetto dei suoli di fondazione.
- Sistemi intelaiati tradizionali.
- Misure speciali della resistenza sismica.
- Costo delle regole antisismiche.

### 5.1 Le lezioni tratte dai danni sismici

Un principio guida della edizione originale di questo libro, scritto nella prima pagina, fu che “l’ingegneria sismica non si deve imparare solo dai libri”. Lo studio dei danni causati dai terremoti del passato, preferibilmente di prima mano, fornisce un percorso ineguagliabile per la comprensione di ciò che lavora bene nel creare un buon edificio sismo-resistente, e ciò che invece non lo fa. Molti degli aspetti teorici della ingegneria sismica descritti nei libri sono molto complessi, ed è facile perdere di vista la realtà della materia in mezzo a tutte queste complessità. Non vi è nulla come l’esperienza fatta vedendo le spesso spiacevoli conseguenze di un forte terremoto sulle strutture e su chi ci vive, per riconsiderare il proprio approccio e fondarlo nella realtà pratica.

Per questa ragione, le investigazioni sul campo relative agli effetti dei terremoti sono importanti per i progettisti strutturali. Nel Regno Unito, nel corso degli ultimi 30 anni, l’Earthquake Engineering Field Investigation Team (EEFIT) ha dato a oltre 100 ingegneri, provenienti in egual misura dalla industria e dalla università, l’opportunità di visitare i luoghi di 29 terremoti distruttivi (Booth *et al.*, 2011). L’EEFIT ha pubblicato rapporti su tutti questi eventi, che, insieme con le foto dei danni causati dal sisma, sono liberamente disponibili dal sito della sua organizzazione sponsor, The Institution of Structural Engineers ([www.istructe.org.uk](http://www.istructe.org.uk)). Negli USA, l’Earthquake Engineering Research Institute

## PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI

([www.eeri.org](http://www.eeri.org)), similmente, ha pubblicato eccellenti rapporti di ricerca sui terremoti e accoglie dei riassunti di questi nel suo sito a poche settimane dal verificarsi degli eventi. La New Zealand Society for Earthquake Engineering ([www.nzsee.org.nz](http://www.nzsee.org.nz)) è un'altra buona fonte di rapporti in lingua inglese.

I rapporti dai siti terremotati mostrano che la maggioranza dei problemi scaturisce da errori tipici; in particolare tra le modalità notevoli di rottura vi sono:

- Piani deboli (o “soffici”).
- Scarsi dettagli costruttivi per le armature nelle strutture in calcestruzzo, e per i collegamenti in quelle in acciaio.
- Progetto inadeguato delle fondazioni.
- Rischio di frana non tenuto in conto.
- Insufficiente resistenza laterale.
- Eccentricità tra i centri di rigidezza e di resistenza laterale, tale da portare a una risposta torsionale.
- Scarsi dettagli costruttivi dei rivestimenti, dei servizi e di altri elementi non strutturali.
- Inadeguata messa in conto del rischio di tsunami.

L'esperienza ottenuta dai passati terremoti è naturalmente una guida eccellente per le decisioni da prendere durante la progettazione iniziale e per le fasi successive della progettazione. Per questa ragione, i capitoli successivi sulla progettazione delle fondazioni e della sovrastruttura cominciano, tutti, con una rassegna delle lezioni apprese dai terremoti avvenuti nel passato.

### 5.2 Progetto e obiettivi prestazionali

Le decisioni prese nella fase di concezione e di progetto iniziale hanno di solito un effetto cruciale sia sul costo della progettazione sismica, che sul livello di prestazione dell'edificio nel corso del terremoto. Queste decisioni iniziali sono spesso difficili da modificare in un secondo tempo così che è essenziale che le loro conseguenze siano pienamente comprese in termini di prestazione e costi, il prima possibile.

**Tab. 5.1** - *Obiettivi prestazionali nel corso del sisma*

OBIETTIVO PRESTAZIONALE	ESEMPIO DI EDIFICI A CUI APPLICARLO
Sicurezza della vita degli occupanti e di altri nelle vicinanze dell'edificio	Tutti gli edifici occupati.
Minimizzazione del danno strutturale	Edifici storici o culturalmente importanti.
Minimizzazione dei costi sostenuti nel corso della vita dell'edificio, includendo i costi di riparazione	Dipende dalla propensione al rischio finanziario e dalla disponibilità di assicurazioni.

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI****Tab. 5.1** - (segue) *Obiettivi prestazionali nel corso del sisma*

OBIETTIVO PRESTAZIONALE	ESEMPIO DI EDIFICI A CUI APPLICARLO
Protezione del contenuto	Edifici con contenuti costosi, come musei con reperti fragili, e fabbriche con impianti costosi.
Mantenimento della funzione dell'edificio durante e/o dopo un terremoto	Ospedali, ed in particolar modo ospedali di emergenza. Fabbriche. Centri civici di controllo che si occupino di emergenze post-sisma. Impianti che forniscono controlli correlati alla sicurezza in installazioni nucleari e petrochimiche. Edifici con funzione di ricovero post-sisma.
Contenimento di contenuti pericolosi	Impianti che accolgano materiali radioattivi, infiammabili o nocivi.

Il progettista che voglia avere successo deve essere chiaro sin dall'inizio sugli obiettivi prestazionali richiesti sotto un carico sismico. La Tabella 5.1 delinea possibili obiettivi e dà esempi del tipo di edifici ai quali tali obiettivi si possono applicare. La tabella deve essere raffrontata con la Tabella 2.1 che mostra gli obiettivi definiti nelle norme statunitensi ed europee, insieme con i periodi di ritorno associati dei moti sismici.

Ad oggi, la grande maggior parte degli edifici è stata progettata con il semplice obiettivo di preservare la sicurezza della vita, e questa può essere l'opzione più economica se si vanno a vedere solo i costi iniziali, benché una tale scelta è probabile implichi costosi lavori di riparazione o più probabilmente una vera e propria ricostruzione nel caso in cui si verifichi un forte terremoto. Comunque la società, fatta dai non professionisti, ha reagito con incredulità alla nozione che un edificio danneggiato al di là del riparabile si sia "comportato bene" nel corso del terremoto, anche se è stata evitata la perdita di vite umane. Così, Kam e Pampalin (2012), commentando i terremoti che devastarono Christchurch in Nuova Zelanda, nel 2010 e 2011, affermano che essi "evidenziarono criticamente lo iato tra le attese della società e la realtà delle 'prestazioni sismiche' delle costruzioni ingegneristiche". La tendenza nelle società sviluppate è stata quindi sempre più nella direzione che la semplice salvaguardia delle vite umane sia un obiettivo prestazionale insufficiente di per sé, benché naturalmente esso rimanga assolutamente essenziale. Le normative stanno cominciando a riflettere questo modo di vedere, come ha mostrato la Tabella 2.1, benché la sicurezza della vita al momento resti il principale obiettivo trattato in ogni dettaglio dalle normative.

Il resto di questo capitolo discute come il progetto iniziale di un edificio influenzi la sua successiva prestazione sismica. I vari aspetti considerati sono il layout funzionale, la scelta del sito e la scelta del materiale e del sistema struttu-

## PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI

rale. Si pone l'accento sulle forme strutturali convenzionali, ma una sezione aggiuntiva introduce alcune delle misure speciali sviluppate per fornire una prestazione ben al di là di quella della semplice sicurezza della vita. Infine, è aggiunta una nota sul costo della progettazione sismica.

### 5.3 Anatomia di un edificio

Le parti funzionali di un edificio influenzano il modo nel quale in esso si può disporre lo scheletro strutturale. Per questa ragione, è utile considerare la principale suddivisione delle funzioni e come queste influenzino la struttura.

**Tab. 5.2** - *Classificazione funzionale delle parti di un edificio*

ELEMENTO DELL'EDIFICIO	FUNZIONE
Interrato	Parcheeggio, magazzino, impianto meccanico ed elettrico
Livello strada	Può essere usato in modo molto diverso dal resto dell'edificio, portando spesso ad una altezza di piano maggiore della tipica, ed al bisogno di spazio di piano non ostruito. Per esempio, negli hotel il livello strada può essere usato per la reception, e per le aree convegni e ristorante, in contrasto con lo schema regolare delle stanze di piani tipici. Nei palazzi di uffici, il livello strada può includere negozi, banche, ristoranti, ecc.
Piani tipici	Livelli ripetitivi standard
Strutture della copertura	Impianto meccanico ed elettrico, sala motori per gli ascensori, serbatoi d'acqua, ecc.
Nuclei di servizio e accesso	Scale, ascensori, condotti fognari ed idrici, che sono spesso raggruppati e forniscono potenzialmente elementi resistenti ai carichi laterali
Piano utilizzabile	Spazi aperti, di solito modulari. Diaframmi di piano forniscono la vitale funzione di distribuzione dei carichi sismici agli elementi dotati di resistenza laterale ed anche di collegamento tra le strutture

La Tabella 5.2 dà una semplice classificazione funzionale. Le divisioni verticali di funzione all'interno dell'edificio possono essere una causa di problemi, rendendo difficile impedire irregolarità di massa o di rigidità. Per esempio, il piano terra di molti edifici commerciali è spesso più alto e più aperto dei piani superiori, creando potenzialmente un piano debole. Comunque, i nuclei di servizio e il rivestimento esterno forniscono l'opportunità di incorporare pareti di taglio o pannelli di controvento per superare i problemi risultanti dalle considerazioni precedenti. Un importante obiettivo di progettazione iniziale, è stabilire



## PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI

le collocazioni ottimali per i nuclei di servizio e per gli altri elementi strutturali atti a fornire resistenza ai carichi laterali, che saranno continui sino alla fondazione.

Non è inusuale trovare che i requisiti strutturali ed architettonici siano in conflitto nella fase di concezione iniziale, ma è essenziale che venga trovato un compromesso soddisfacente in questa fase del lavoro.

### 5.4 Considerazioni di progetto

#### 5.4.1 L'influenza delle condizioni del sito

È essenziale ottenere dati sulle condizioni del suolo in una fase iniziale, così come informazioni sul livello di falda, poiché questi possono avere una influenza fondamentale sulla progettazione sismica. I principali aspetti da determinare sono l'intervallo di periodo nel quale i suoli possono amplificare i moti sismici, il potenziale di liquefazione del suolo e la stabilità dei pendii nel sito o in sua vicinanza. Prove standard, almeno all'inizio sono sufficienti, comprendendo prove *in-situ* (valori di *standard penetration test* o *cone penetration test*, e misure del piano di falda) e prove di laboratorio (descrizione del suolo e prove di resistenza standard). Tecniche specialistiche aggiuntive come la misura della velocità delle onde di taglio *in-situ*, e la prova triassiale ciclica o prove di colonna risonante in laboratorio possono essere necessarie in casi speciali (per esempio profili di suolo di tipo  $S_1$  ed  $S_2$  in Tabella 5.3). A meno che i suoli del sito siano ben conosciuti grazie ad analisi precedenti, sono necessari dati di *borehole* fino ad almeno 30m (o fino al substrato roccioso se minore).

**Tab. 5.3** - Classificazione dei suoli (da BS EN 1998-1:2004+A1:2013)

DESCRIZIONE	Parametri caratteristici nei primi 30m		Intervallo di periodi da $T_B$ a $T_C$ per la amplificazione del moto di picco del suolo	
	Suoli non coesivi	Suoli Coesivi	Governano terremoti forti	Governano terremoti deboli
	$N_{SPT}$ Colpi / 300mm	$c_u$ (kPa) Resistenza a taglio in condizioni non drenate	$T_{B:S}$ $T_{C:S}$	$T_{B:S}$ $T_{C:S}$
A Roccia o altre formazioni geologiche assimilabili, includendo non più di 5m di materiale più debole in superficie			0.15 0.4	0.05 0.25

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

**Tab. 5.3** - (segue) *Classificazione dei suoli (da BS EN 1998-1:2004+A1:2013)*

DESCRIZIONE	Parametri caratteristici nei primi 30m		Intervallo di periodi da $T_B$ a $T_C$ per la amplificazione del moto di picco del suolo			
	Suoli non coesivi	Suoli Coesivi	Governano terremoti forti		Governano terremoti deboli	
	$N_{SPT}$ Colpi / 300mm	$c_u$ (kPa) Resistenza a taglio in condizioni non drenate	$T_{B:s}$	$T_{C:s}$	$T_{B:s}$	$T_{C:s}$
B Depositi di sabbia molto densa, ghiaia, o argilla molto rigida, almeno diverse decine di metri di spessore, caratterizzate da un incremento graduale delle proprietà meccaniche con la profondità	>50	>250	0.15	0.5	0.05	0.25
C Depositi profondi di sabbia densa o mediamente densa, ghiaia o argilla rigida, con spessore variabile da alcune decine a molte centinaia di metri	15-50	70-250	0.20	0.6	0.1	0.25
D Depositi di suolo non coesivo da incoerente a medio (con o senza alcuni strati coesivi morbidi), o di suoli coesivi predominantemente da morbidi a fermi.	<15	<70	0.20	0.8	0.1	0.3
E Un profilo di suolo consistente di uno strato superficiale di suolo alluvionale soffice simile al suolo C o D e di uno spessore variabile da circa 5 a 20m, con sotto un materiale più rigido con una velocità di onde di taglio > 800m/s			0.15	0.5	0.05	0.25

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

**Tab. 5.3** - (segue) *Classificazione dei suoli (da BS EN 1998-1:2004+A1:2013)*

DESCRIZIONE	Parametri caratteristici nei primi 30m		Intervallo di periodi da $T_B$ a $T_C$ per la amplificazione del moto di picco del suolo	
	Suoli non coesivi	Suoli Coesivi	Governano terremoti forti	Governano terremoti deboli
	$N_{SPT}$ Colpi / 300mm	$c_u$ (kPa) Resistenza a taglio in condizioni non drenate	$T_B:s$ $T_C:s$	$T_B:s$ $T_C:s$
$S_1$ Depositi consistenti di o contenenti uno strato di spessore di almeno 10m, di argille morbide/limo con alto indice di plasticità ( $PI > 40$ ) ed alto contenuto d'acqua		10-20	Necessarie indagini speciali	
$S_2$ Depositi di suoli liquefabili di argille sensibili, o di ogni altro profilo di suolo non incluso nei tipi A-E o $S_f$ .			Necessarie indagini speciali	

Per progetti che non siano di minor importanza, i dati del suolo devono essere sufficienti a classificare il sito in uno dei profili standard descritti nelle normative. La Tabella 5.3 mostra il sistema di classificazione dell'Eurocodice 8 (EC8), insieme con l'intervallo di periodi da  $T_B$  a  $T_C$  per la amplificazione di picco del moto del suolo. Le strutture che ricadono in questo intervallo di periodi possono essere in risonanza con il moto del suolo. Come guida iniziale di base, il periodo fondamentale di un edificio è pari a  $N/10$  dove  $N$  è il numero dei piani al di sopra del livello del suolo. Di conseguenza, depositi di suolo profondi e soffici possono essere pericolosi per edifici alti, ma anche depositi poco profondi e rigidi possono rivelarsi forieri di problemi per strutture basse. Se il periodo del sito è simile a quello della struttura proposta, ciò darà luogo ad una forte amplificazione della risposta sismica, e può essere opportuno considerare i modi per modificare il periodo strutturale per disaccoppiarlo dal moto sismico. Aumentare la rigidezza (per esempio mediante l'aggiunta di controventi o pareti di taglio) o ridurre la massa (per esempio con strutture di piano leggere o calcestruzzo alleggerito): entrambe le azioni riducono il periodo strutturale, ed è ovviamente vero anche il contrario. Comunque, i periodi dipendono dalla radice quadrata della massa divisa per la rigidezza, e quindi sono necessari forti cambiamenti di massa e/o rigidezza per un cambiamento significativo del periodo. Mettere la struttura su appoggi flessibili può aumentare il modo drastico il periodo – si veda la Sezione 5.5.8.2.

# INDICE ANALITICO

3D-BASIS .....	407	Albergo .....	179
		Allungamento degli elementi in c.a. ....	244,
		.....	245, 246, 248, 273, 274, 297, 300
		Ammorsamento .....	343, 351
		Amplificazione del moto ...	375, 376, 377, 378
		Amplificazione	
		dello spostamento verticale .....	148
		Analisi	
		<i>lineare o non lineare</i> .....	109
		Analisi a spettro di risposta .....	77, 87, 88, 95,
		.....	96, 107, 108, 109, 118, 201, 253,
		.....	258, 268, 274
		<i>con spettro modificato</i> .....	95
		Analisi costi-benefici	
		<i>nella scelta del livello</i>	
		<i>di adeguamento</i> .....	417
		Analisi di sensitività .....	406
		Analisi di sistemi isolati	
		<i>obiettivi</i> .....	402
		Analisi di time history .....	201
		Analisi dinamica di transitorio .....	64
		Analisi dinamiche .....	268
		Analisi dinamiche non lineari .....	245, 254
		Analisi non lineari .....	254, 258, 269
		Analisi sismica	
		<i>obiettivi</i> .....	104
		Analisi statica equivalente .....	69, 105, 198
		<i>base teorica</i> .....	105
		Analisi statiche non lineari .....	254, 277
		Ancoraggio .....	228, 240, 241, 250, 251,
		.....	252, 284, 285, 343, 365, 366
		Ancoraggio degli elementi .....	372, 374,
		.....	375, 378, 380, 381
		Anello di Fuoco Circumpacifico .....	58, 59
		Annesso nazionale .....	197
		ANSI/AISC 341 .....	197
		Apparecchiature elettriche .....	380, 381

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

Apparecchiature meccaniche .....	371, 380, 381	Calcestruzzo prefabbricato .....	227
Argilla .....	338, 341, 368	Calcestruzzo semplice .....	237, 238
Armatura		Calcestruzzo spruzzato .....	415
<i>influenza sulla rigidezza</i> .....	102	Canterbury .....	392, 393, 409
Armatura a scala .....	342	Canterbury Earthquakes Royal	
Armatura di confinamento 239, 240, 243, 249,		Commission .....	232, 234, 250, 289
.....	256, 288, 289, 292	Capacità	
Armatura orizzontale nella muratura 339, 341,		<i>progetto a</i> .....	99, 101
.....	342, 343	Capacità di danno .....	43, 52, 55
Armatura verticale nella muratura .... 341, 342,		Capacità rotazionale .....	239, 254
.....	343, 344	<i>determinazione della (acciaio)</i> .....	318
Armature non metalliche .....	252	Caratteristiche geologiche .....	185
ASCE 41-06 .....	198	Carichi eolici .....	287
ASCE 4-98 .....	151	Carichi laterali .....	276, 287, 297, 298
ASCE 7 .....	197	Carico ciclico .....	227, 236, 237, 240, 241,
Ashlar .....	339	.... 242, 244, 245, 246, 248, 250, 251, 257, 287	
Asociación Colombiana		<i>perdita di resistenza del terreno</i> .....	213
de Ingeniería Sísmica .....	368, 369	Carico flessionale	
Auto-centraggio .....	190	<i>ciclico</i> .....	312
Azioni fuori piano .....	344, 346, 351, 352, 382	Catene .....	427
Azioni nel piano . 347, 348, 350, 351, 352, 354		Cavi scorrevoli .....	190
		CBF .....	172, 173, 174, 176, 177, 178,
		.....	179, 187, 314, 318, 319, 320, 323
		<i>a K</i> .....	175
		<i>a V</i> .....	174
		<i>ad X</i> .....	173
		<i>controventi ad X</i> .....	318
		<i>fattori di struttura</i> .....	318
		<i>pro ed i contro</i> .....	173
		Centraggio .....	399
		Centrale nucleare .....	36, 45, 48, 63, 64,
		.....	372, 379, 380
		Centro di rigidezza .....	103
		Cerniera plastica	
		<i>lunghezza equivalente</i> .....	203
		<i>rotazione permessa</i> .....	202
		Cerniere bidirezionali Si veda cerniere inverse	
		Cerniere flessionali	
		<i>entità rotazione plastica</i> .....	326
		Cerniere inverse .....	241, 242, 243, 244,
		.....	247, 248
		Cerniere plastiche .....	97, 99, 100, 101, 110,
		.....	112, 117, 124, 241, 242, 243, 244,
		.....	245, 246, 247, 248, 249, 250, 252,
		.....	254, 255, 256, 257, 258, 261, 266,
		.....	269, 270, 271, 272, 273, 274, 277,
		.....	287, 289, 292, 294, 307, 327

**B**

Bambù, costruzioni in .....	359, 361, 368
Banche dati dell'esperienza pregressa .....	373,
.....	378, 380
Basati sullo spostamento	
<i>metodi Vedi DBD</i>	
Basilica di San Francesco d'Assisi .....	416
Bauschinger, effetto .....	236, 242, 309,
.....	310, 312, 313
Blocchi cavi in calcestruzzo .....	341, 342
Bonifica con asportazione .....	224
BRBF .....	176, 177, 178, 324
<i>fattore di struttura</i> .....	324
British Geological Survey .....	48

**C**

Calcestruzzo	
<i>come materiale antisismico</i> .....	168
Calcestruzzo confinato Si veda confinamento del calcestruzzo	
Calcestruzzo precompresso .....	227, 237, 251

**PROGETTAZIONE SISMICA DI EDIFICI**

<i>degradazione</i> .....	110	<i>trave-colonna</i> .....	169
<i>in prossimità di giunti saldati</i> .....	426	Colonna forte/trave debole .....	100
<i>massime rotazioni</i> .....	124	Colonne	
<i>rotazione</i> .....	117	<i>cerniere alla base</i> .....	326
Cerniere unidirezionali .....	246, 247, 248, 249	Colonne ad albero	
Christchurch .....	157, 192, 308, 334, 412, 413,	<i>nelle strutture in acciaio</i> .....	307
.....	415, 419, 427, 429, 431, 432	Combinazione delle risposte modali .....	87
Christchurch, terremoto di .....	21, 39	Combinazioni sismiche .....	204
Cicli di carico nei terreni		Compattezza .....	162, 312, 315
<i>forma del ciclo</i> .....	131	Componenti di rocking Si veda rocking	
Cicli di compressione		Componenti torsionali Si veda torsione	
<i>perdita di resistenza e rigidità</i> .....	309	Componenti verticali .....	55, 56
Cicli di isteresi .....	75	Comportamento a taglio	
Ciclo di isteresi		<i>dei terreni</i> .....	130
<i>dei terreni</i> .....	130	Comportamento ciclico .....	236
Cintura Alpino-Himalayana .....	58, 59	Comunità .....	22, 31, 40, 41
Città del Messico .....	21, 36, 57, 64	Condutture	
<i>densità terreno</i> .....	130	<i>e rotture di faglia</i> .....	149
Classe delle sezioni		Cone penetration test .....	159
<i>e fattore di struttura</i> .....	314	Confinamento del calcestruzzo .	237, 238, 239,
Classe di duttilità alta (CDA) ...	241, 243, 251,	.....	240, 252, 256, 283, 292
.....	275, 363, 364, 367	Connessioni	
Classe di duttilità bassa (CDB) .....	275, 287,	<i>dissipative</i> .....	332
.....	363, 367	<i>gerarchia delle resistenze</i> .....	328
Classe di duttilità media (CDM) 241,	253, 363,	<i>progetti pre-qualificati</i> .....	328
.....	364, 367	<i>scarsa qualità progetto</i> .....	306
Classe sezione .....	312	<i>sovraresistenza</i> .....	321
Classi di duttilità .....	363	Connessioni a dissipazione energia .....	295
Classificazione dei siti .....	199	Connessioni bullonate .....	361, 362, 364, 365
Codici di progettazione .....	17, 19, 61,	Connessioni chiodate .....	361, 362, 364, 365
.....	63, 64, 65	Connessioni con perni .....	364
Coefficiente di sicurezza		Connessioni con viti .....	361, 362, 364, 365
<i>terreno</i> .....	213	Connessioni incollate .....	362, 364
Coefficienti parziali per le azioni		Connessioni tra muri e piano .....	427
<i>fondazioni</i> .....	212	Contributo del calcestruzzo .....	241, 242,
Collasso		.....	246, 248
<i>collasso della</i> .....	209	Controlli a campione	
Collasso del piano intermedio .....	229, 230	<i>fatti in situ</i> .....	421
Collasso del piano superiore .....	229, 230	Controllo del danno vs livello di prestazione ..	418
Collasso globale .....	230, 231	Controllo sismico semi attivo .....	188
Collasso incipiente .....	50	Controsoffitti .....	418, 421
Collasso per piano debole Si veda piano debole		Controventi	
Collasso per taglio Si veda rottura a taglio		<i>aggiunta di</i> .....	425
Collegamenti		Controventi a K	
<i>progettazione troppo elementare</i> .....	306	<i>vietati</i> .....	323
Collegamento		Controventi a V .....	322
<i>tra fondazioni, forza di</i> .....	216		



# 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

