

Direttore scientifico **Antonio Borri**

A. Baila, L. Binda, A. Borri, G. Cangi, G. Cardani, G. Castori, M. Corradi,
A. De Maria, E. Del Monte, C. Donà, L. Galano, A. Giannantoni, B. Ortolani,
A. Pagliuzzi, A. Saisi, D. Sperandio, E. Speranzini, C. Tedeschi, A. Vignoli

MANUALE DELLE MURATURE STORICHE

a cura di Chiara Donà
con la collaborazione di Alessandro De Maria

MEMIS

Volume I

Analisi e valutazione del comportamento strutturale

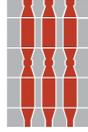


dei
TIPOGRAFIA DEL GENIO CIVILE

Collana Centro Studi
SISTO
MASTRODICASA



Si ringraziano:



REGIONE UMBRIA



**CENTRO STUDI
SISTO MASTRODICASA**



**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
DEL POLITECNICO DI MILANO**
(Prof.ssa Luigia Binda)

UNILAB
SPIN OFF DELL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PERUGIA

Copyright © 2011 DEI s.r.l. TIPOGRAFIA DEL GENIO CIVILE

Roma, Via Nomentana, 16 - 00161 Roma Tel. 06.4416371 Fax 06.440.33.07

e-mail dei@build.it - URL <http://www.build.it>

I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica, di riproduzione e di adattamento, totale o parziale con qualsiasi mezzo (compreso i microfilm e le copie fotostatiche) sono riservati per tutti i Paesi.

L'elaborazione del testo, anche se curata con scrupolosa attenzione, non può comportare specifiche responsabilità per eventuali involontari errori o inesattezze.

Direttore scientifico **Antonio Borri**

A. Baila, L. Binda, A. Borri, G. Cangi, G. Cardani, G. Castori, M. Corradi,
A. De Maria, E. Del Monte, C. Donà, L. Galano, A. Giannantoni, B. Ortolani,
A. Pagliuzzi, A. Saisi, D. Sperandio, E. Speranzini, C. Tedeschi, A. Vignoli

MANUALE DELLE MURATURE STORICHE

MEMIS

a cura di Chiara Donà
con la collaborazione di Alessandro De Maria

Volume I

Analisi e valutazione del comportamento strutturale



GLI AUTORI

Angela Baila	Capitolo 1
Luigia Binda	Capitolo 6, paragrafi 6.1 - 6.2 - 6.3 - 6.3.1 - 6.3.2 - 6.3.3 - 6.3.4 - 6.5
Antonio Borri	Capitoli 2 - 3 - 5 - Scheda M14 (vol. II)
Giovanni Cangì	Capitoli 2 - 3 - Capitolo 5, paragrafo 5.5
Giuliana Cardani	Capitolo 6, paragrafi 6.1 - 6.2 - 6.3 - 6.3.1 - 6.3.2 - 6.3.3 - 6.3.4 - 6.5
Giulio Castori	Capitolo 6, paragrafo 6.4
Marco Corradi	Capitolo 6, paragrafo 6.3.5 - Scheda M14 (vol. II)
Alessandro De Maria	Capitoli 2, 3, 5 - Capitolo 7, paragrafo 7.8
Emanuele Del Monte	Capitolo 7, paragrafo 7.12 - Appendice A5
Chiara Donà	Capitoli 1, 4, 9 - Capitolo 2, paragrafi 2.1 - 2.2 - 2.4.2 - Capitolo 5, paragrafi 5.1 - 5.4 - 5.5 - Introduzione e schede (vol. II)
Luciano Galano	Capitolo 7 - Appendici A1 - A2 - A3 - A4
Andrea Giannantoni	Schede (vol. II)
Barbara Ortolani	Capitolo 7, paragrafo 7.12 - Appendice A5
Andrea Pagliuzzi	Capitolo 8 - Appendice A6
Antonella Saisi	Capitolo 6, paragrafi 6.1 - 6.2 - 6.3 - 6.3.1 - 6.3.2 - 6.3.3 - 6.3.4 - 6.5
Dino Sperandio	Contributo nel paragrafo “Problematiche rispetto alle esigenze della conservazione” delle schede F1, M1, M2, M3, M5, M6, M7, M9, M11, M15, V1, V2, V5-A5, AT1 (vol. II)
Emanuela Speranzini	Scheda M14 (vol. II)
Cristina Tedeschi	Capitolo 6, paragrafi 6.1 - 6.2 - 6.3 - 6.3.1 - 6.3.2 - 6.3.3 - 6.3.4 - 6.5
Andrea Vignoli	Capitoli 7 - 8 - Appendici A1 - A2 - A3 - A4 - A5 - A6

INDICE VOLUME I

PRESENTAZIONE <i>Luciano Marchetti</i>	pag. 17
INTRODUZIONE <i>Antonio Borri</i>	pag. 19
PARTE PRIMA - ASPETTI METODOLOGICI	
1. LE MURATURE NEI TRATTATI STORICI	
1.1. Introduzione	pag. 25
1.2. Dall'antichità al Cinquecento	pag. 26
1.2.1. Vitruvio	pag. 26
1.2.2. Leon Battista Alberti.....	pag. 27
1.2.3. Andrea Palladio.....	pag. 29
1.3. Il Seicento ed il Settecento	pag. 32
1.3.1. Vincenzo Scamozzi.....	pag. 32
1.3.2. Bernardo Antonio Vittone.....	pag. 36
1.3.3. Francesco Milizia	pag. 38
1.4. L'Ottocento	pag. 39
1.4.1. I trattatisti della prima metà del secolo.....	pag. 39
1.4.2. Nicola Cavalieri di San Bertolo	pag. 52
1.4.3. Mathieu Joseph Sganzi.....	pag. 62
1.4.4. Altri trattatisti della seconda metà del secolo.....	pag. 65
1.4.5. Gustav Adolf Breyman	pag. 67
1.4.6. Carlo Formenti	pag. 78
1.5. Il Novecento	pag. 80
1.5.1. I trattatisti di inizio secolo	pag. 80
1.5.2. Daniele Donghi	pag. 82
2. COMPORTAMENTO MECCANICO DELLE MURATURE STORICHE	
2.1. Introduzione: la ricerca della sicurezza e le esigenze della conservazione.....	pag. 89
2.2. Valutazione della sicurezza	pag. 97
2.3. Percorso metodologico di studio della fabbrica	pag. 101
2.4. Qualità muraria	pag. 104
2.4.1. L'analisi della qualità muraria	pag. 104
2.4.2. La regola dell'arte	pag. 105
2.4.3. Interpretazione della qualità muraria attraverso il quadro fessurativo.....	pag. 107
2.4.4. Peculiarità delle murature	pag. 108
2.4.4.1. <i>Costruzione e struttura resistente</i>	pag. 108

2.4.4.2. Comportamento del "materiale" muratura: azioni verticali	pag. 108
2.4.4.3. Comportamento del "materiale" muratura: azioni fuori piano	pag. 110
2.4.4.4. Comportamento del "materiale" muratura: azioni nel piano	pag. 111
2.4.4.5. Influenza dei vuoti	pag. 112

3. LA RISPOSTA STRUTTURALE DEGLI EDIFICI IN MURATURA

3.1. Definizione delle problematiche.....	pag. 115
3.2. Ipotesi sul comportamento di insieme, sui vincoli e sul materiale	pag. 115
3.3. Modellazione degli edifici in muratura esistenti	pag. 117
3.4. Meccanismi di collasso	pag. 119
3.5. Comportamento del singolo pannello.....	pag. 125
3.5.1. Comportamento del pannello murario per azioni verticali.....	pag. 126
3.5.2. Forze sismiche orizzontali e meccanismi di ribaltamento	pag. 129
3.5.3. Comportamento di angolate e martelli murari: i meccanismi di secondo modo	pag. 132
3.6. Comportamento della cellula.....	pag. 137
3.6.1. Cellula muraria con orizzontamenti deformabili	pag. 138
3.6.2. Cellula muraria con orizzontamenti rigidi.....	pag. 141
3.7. Comportamento degli aggregati: gli edifici a schiera	pag. 145
3.7.1. Modalità di accrescimento	pag. 146
3.7.2. Azioni trasversali: meccanismi del martello murario	pag. 146
3.7.3. Azioni longitudinali: differente rigidezza tra pareti	pag. 149
3.7.4. Azioni longitudinali: reciproco sostegno nelle schiere.....	pag. 151
3.7.5. Cellula di testata	pag. 151
3.7.6. Prospetti non allineati, cellule emergenti, volte in successione	pag. 155
3.8. Schede di sintesi	pag. 156
3.8.1. Introduzione	pag. 156
Scheda 1. Abaco delle tipologie murarie (1/3).....	pag. 158
Scheda 2. Abaco delle tipologie murarie (2/3).....	pag. 159
Scheda 3. Abaco delle tipologie murarie (3/3).....	pag. 160
Scheda 4. La regola dell'arte (1/2).....	pag. 161
Scheda 5. La regola dell'arte (2/2).....	pag. 162
Scheda 6. Comportamento della muratura per azioni verticali	pag. 163
Scheda 7. Comportamento della muratura e della parete muraria per azioni orizzontali fuori piano	pag. 164
Scheda 8. Comportamento della muratura e della parete muraria per azioni orizzontali nel proprio piano	pag. 165
Scheda 9. Danni derivanti dalla cattiva qualità delle murature	pag. 166
Scheda 10. Lettura del danno attraverso l'analisi di intonaci e cortine murarie.....	pag. 167
Scheda 11. Meccanismo di danno fuori dal piano per pareti a doppia cortina e monolitiche semplicemente appoggiate al muro ortogonale	pag. 168
Scheda 12. Controllo dei meccanismi di primo modo tramite le catene metalliche e le connessioni con il muro di spina.....	pag. 169
Scheda 13. Meccanismi di danno fuori dal piano per una parete connessa alla muratura ortogonale	pag. 170

Scheda 14. Meccanismi di danno fuori dal piano: la rottura a flessione di un pannello privo di aperture vincolato alle murature ortogonali	pag. 171
Scheda 15. Meccanismi di danno fuori dal piano in presenza di murature ortogonali collegate tra loro.....	pag. 172
Scheda 16. Problemi strutturali osservati per solai rigidi con cordolature. Lettura statica: l'“effetto trave”.....	pag. 173
Scheda 17. Problemi strutturali osservati per orizzontamenti rigidi. Lettura dinamica. Effetto di decompressione della parete	pag. 174
Scheda 18. Problemi dovuti a cordoli realizzati su murature inadeguate	pag. 175
Scheda 19. Comportamento della cellula in muratura con solaio deformabile.....	pag. 176
Scheda 20. Comportamento della cellula in muratura con copertura a volta	pag. 177
Scheda 21. Comportamento di cellule con solaio rigido.....	pag. 178
Scheda 22. Meccanismi di accrescimento degli agglomerati in muratura	pag. 179
Scheda 23. Comportamento di edifici a schiera per sollecitazioni sismiche parallele al prospetto ..	pag. 180
Scheda 24. Comportamento del piano voltato in edifici a schiera	pag. 181
Scheda 25. Comportamento di edifici a schiera per sollecitazioni sismiche ortogonali al prospetto	pag. 182
Scheda 26. Abaco dei meccanismi di collasso in funzione dei vincoli e delle configurazioni strutturali	pag. 183
Scheda 27. Calcolo del coefficiente di collasso C di una catena cinematica con il Principio dei Lavori Virtuali e con l'equilibrio alla rotazione.....	pag. 184

PARTE SECONDA - PROCEDURE OPERATIVE

4. IL RILIEVO DEGLI EDIFICI IN MURATURA

4.1. Introduzione.....	pag. 187
4.2. Analisi storico-critica.....	pag. 188
4.3. Rilievo geometrico-dimensionale.....	pag. 191
4.3.1. Rilievo degli aggregati edilizi.....	pag. 194
4.4. Rilievo fotogrammetrico	pag. 195
4.5. Lettura costruttiva e strutturale	pag. 196
4.5.1. Fondazioni	pag. 196
4.5.2. Strutture murarie.....	pag. 201
4.5.3. Strutture voltate.....	pag. 203
4.5.4. Solai piani	pag. 209
4.5.5. Coperture.....	pag. 212
4.5.6. Scale.....	pag. 212
4.5.7. Connessioni tra elementi strutturali.....	pag. 214
4.6. Rilievo dello stato di conservazione	pag. 216
4.7. Analisi interpretativa e critica della costruzione.....	pag. 223
Scheda 1. Tiranti	pag. 226
Scheda 2. Ancoraggio testate	pag. 227
Scheda 3. Cordolo in cemento armato	pag. 228
Scheda 4. Cordolo in muratura armata	pag. 229

Scheda 5. Crollo	pag. 230
Scheda 6. Fuori piombo	pag. 231
Scheda 7. Sfilamento travi – Lesioni diffuse	pag. 232
Scheda 8. Lesioni da traslazione orizzontale e verticale	pag. 233
Scheda 9. Lesioni da rotazione – Scorrimento di facciata	pag. 234
Scheda 10. Depressione della volta – Inflexione del solaio	pag. 235

5. METODI QUALITATIVI PER LA VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ MURARIA

5.1. Introduzione	pag. 237
5.2. Criteri qualitativi per definire la sicurezza strutturale nell'analisi della qualità muraria: ipotesi di base	pag. 238
5.3. Acquisizione di indicatori di vulnerabilità specifica: l'indice di qualità muraria.....	pag. 239
5.3.1. Determinazione dei punteggi ed attribuzione delle categorie murarie.....	pag. 247
5.3.2. Criteri utilizzati per l'attribuzione dei pesi.....	pag. 248
5.3.3. Correlazione tra Indice di Qualità Muraria e parametri meccanici	pag. 250
5.3.4. Conferme sperimentali del metodo dell'Indice di Qualità Muraria (IQM)	pag. 254
5.4. Metodo LMT (Linea Minima di Tracciato)	pag. 259
5.5. Catene cinematiche in assenza di segni indicativi dei potenziali meccanismi di danno	pag. 264
5.6. Esempi di schede per la valutazione dell'Indice di Qualità Muraria (IQM)	pag. 268
Scheda 1. Muratura di pietrame con malta di calce e sabbia mista a scaglie di pietra	pag. 270
Scheda 2. Muratura di blocchi di pietra squadrata e ciottoli a doppio paramento	pag. 271
Scheda 3. Muratura di pietra di dimensioni minute, mista a ciottoli naturali o spaccati e pietrame	pag. 272
Scheda 4. Muratura di blocchi di pietra perfettamente squadrata	pag. 273
Scheda 5. Muratura di blocchi di tufo disposti a una testa	pag. 274
Scheda 6. Muratura di mattoni a due teste con elementi disposti ortogonalmente al piano di muratura	pag. 275
Scheda 7. Muratura di blocchi di laterizi (occhialini e forati in genere)	pag. 276
Scheda 8. Muratura in laterizi (mattoni) a due teste con disposizione alternata	pag. 277
Scheda 9. Muratura di blocchi di pietra squadrata a doppio paramento	pag. 278
Scheda 10. Muratura di blocchi di pietra squadrata e ciottoli a doppio paramento	pag. 279
Scheda 11. Muratura di blocchi di pietra sbozzata, ciottoli e pietrame a doppio paramento	pag. 280
Scheda 12. Muratura di blocchi di pietra scaglia grossolanamente squadrata con riempimento interno ("muratura a sacco")	pag. 281
Scheda 13. Muratura di blocchi di pietra sbozzata e ciottoli con interposizione di pietrame e ciottolame	pag. 282
Scheda 14. Muratura di blocchi di pietra sbozzata, ciottoli, laterizi e detriti vari	pag. 283
Scheda 15. Muratura di blocchi di pietra sbozzata talvolta con presenza di laterizi e ciottoli	pag. 284
Scheda 16. Muratura di blocchi di pietra sbozzata e ciottoli con interposizione di pietrame e ciottolame	pag. 285
Scheda 17. Muratura di pietra calcarea con elementi di forma e dimensione irregolare	pag. 286
Scheda 18. Muratura di blocchi sbozzati di pietra calcarea, di varie dimensioni e forme, misti a scaglie	pag. 287
Scheda 19. Muratura di pietra calcarea bianca o rosa di forma irregolare, mista a scaglie e detriti	pag. 288
Scheda 20. Muratura di pietre di dimensioni minute, mista a ciottoli naturali o spaccati e pietrame	pag. 289

Scheda 21. Muratura mista di ciottoli e pietrame con paramento di pietra perfettamente squadrata	pag. 290
Scheda 22. Muratura mista di ciottoli e pietrame con paramento esterno di pietra (scaglia) grossolanamente squadrata	pag. 291
Scheda 23. Muratura mista di ciottoli, pietrame e laterizi legati con malta di calce e sabbia	pag. 292
Scheda 24. Muratura mista di ciottoli, pietrame e laterizi legati con malta di calce e sabbia, con paramento di mattoni	pag. 293
Scheda 25. Muratura di ciottoli legati con malta di calce e sabbia misti a pietrame e scaglie di pietra	pag. 294

6. PROCEDURE SPERIMENTALI PER LA DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DELLA MURATURA

6.1. Introduzione	pag. 295
6.2. Caratterizzazione dei materiali in laboratorio	pag. 295
6.2.1. Prelievo di mattoni, pietre e malte	pag. 295
6.2.2. Caratterizzazione chimica, mineralogico-petrografica, fisica e meccanica delle malte	pag. 296
6.2.3. Caratterizzazione chimica, mineralogico-petrografica, fisica e meccanica di mattoni e pietre	pag. 296
6.3. Caratterizzazione morfologica e meccanica in situ della muratura	pag. 298
6.3.1. Endoscopia	pag. 298
6.3.2. Prova con i martinetti piatti	pag. 298
6.3.3. Durezza, penetrazione e pull-out test	pag. 304
6.3.4. Indagini soniche	pag. 304
6.3.5. Prova di compressione su pannelli murari	pag. 307
6.3.5.1. Prova di taglio-compressione con pressione di confinamento esistente	pag. 309
6.3.5.2. Prova di taglio-compressione con pressione di confinamento nota su pannelli murari	pag. 311
6.3.5.3. Prova di compressione diagonale su pannelli murari	pag. 316
6.4. Alcuni risultati sperimentali ottenuti da prove in situ	pag. 319
6.4.1. Caratterizzazione dei materiali componenti	pag. 319
6.4.2. Tecniche di rinforzo applicate	pag. 321
6.4.3. Layout di prova	pag. 324
6.4.4. Prove sperimentali	pag. 324
6.4.4.1. L'edificio di Turruta di Montefalco	pag. 325
6.4.4.2. L'edificio di Pale	pag. 326
6.4.4.3. L'edificio di Trevi	pag. 327
6.4.4.4. L'edificio di Foligno	pag. 328
6.4.5. Analisi dei risultati	pag. 329
6.5. Schede tecniche	pag. 330
Scheda 1. Ispezione e prelievo mediante carotaggio	pag. 331
Scheda 2. Indagini soniche	pag. 333
Scheda 3. Martinetti piatti singoli: stato di sforzo locale	pag. 335
Scheda 4. Martinetti piatti doppi	pag. 337
Scheda 5. Prelievo dei materiali da muratura	pag. 338
Scheda 6. Sezione muraria	pag. 340

7. MODELLAZIONE E CALCOLO DI COSTRUZIONI IN MURATURA

7.1. L'analisi delle costruzioni in muratura: generalità	pag. 341
7.2. Concetti e nozioni generali sul calcolo delle costruzioni in muratura	pag. 342
7.3. I metodi di calcolo: elementi finiti ed analisi limite	pag. 346
7.4. Calcolo delle pareti per azioni verticali	pag. 349
7.5. Rottura di pannelli murari per azioni orizzontali nel piano	pag. 350
7.6. Le verifiche locali per l'edificio in muratura: azioni ortogonali al piano	pag. 352
7.7. Modellazione agli elementi finiti delle strutture in muratura	pag. 354
7.8. Il metodo dei cinematismi di collasso	pag. 356
7.9. Metodi semplificati a macroelementi per edifici soggetti ad azioni orizzontali	pag. 361
7.9.1. Generalità	pag. 361
7.9.2. Il metodo VET (1977)	pag. 363
7.9.3. Il metodo POR (1977)	pag. 363
7.9.4. Metodo della Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici del 30 luglio 1981, n. 21745	pag. 365
7.9.5. Il metodo PORFLEX (1982)	pag. 366
7.9.6. Il metodo RAN	pag. 366
7.9.7. Il metodo POR90 (1990)	pag. 367
7.9.8. Il metodo VEM (1991)	pag. 367
7.9.9. Il metodo SAM (1996)	pag. 368
7.9.10. Il metodo PORDIN	pag. 368
7.10. Considerazioni e confronto fra i metodi di analisi	pag. 368
7.11. Applicabilità dei metodi alle varie tipologie di costruzioni	pag. 370
7.12. Valutazione della sicurezza di edifici esistenti in muratura secondo il DM 14 gennaio 2008	pag. 387
7.12.1. Generalità	pag. 387
7.12.2. Comportamento sismico globale: Analisi Statica non Lineare (ASnL)	pag. 387
7.12.3. Meccanismi locali di collasso: Analisi Cinematica Lineare (ACL) ed Analisi Cinematica non Lineare (ACnL)	pag. 403
7.12.3.1. <i>Analisi cinematica lineare</i>	pag. 403
7.12.3.2. <i>Analisi cinematica non lineare</i>	pag. 405

8. ARCHI E VOLTE IN MURATURA

8.1. Archi e volte in muratura: definizioni	pag. 407
8.2. L'antichità e le regole del dimensionamento geometrico	pag. 412
8.3. Regole di dimensionamento meccanico: il calcolo a rottura	pag. 414
8.4. Regole empiriche di dimensionamento	pag. 417
8.5. La curva delle pressioni ed il metodo di Mery	pag. 419
8.6. I moderni metodi di calcolo delle strutture voltate	pag. 422
8.7. Le equazioni costitutive della muratura	pag. 426
8.8. I due teoremi dell'analisi limite	pag. 428
8.9. Un esempio di analisi limite nel caso di azioni orizzontali	pag. 430
8.10. Modelli analitici di collasso per volte a crociera	pag. 432
8.11. Estensione dei metodi analitici ai sistemi più complessi	pag. 433

9. IL RESTAURO STRUTTURALE DEL COSTRUITO STORICO

9.1. Modalità e finalità dell'intervento strutturale nell'edilizia storica	pag. 437
9.1.1. L'intervento di miglioramento.....	pag. 442
 BIBLIOGRAFIA	pag. 449
 FONTI DELLE ILLUSTRAZIONI	pag. 463
 GLI AUTORI	pag. 469

PRESENTAZIONE

Gli eventi sismici sono una catastrofe imprevedibile ed inevitabile ma debbono rappresentare anche un momento di verifica e di riflessione sulle opere che sono state eseguite nel tempo, col fine di garantire la salvaguardia del patrimonio edificato e delle attività in esso contenute.

La peculiarità del nostro territorio nazionale risiede principalmente nella cospicua presenza di inestimabili testimonianze del passato che, giunte fino ai nostri giorni, impreziosiscono i numerosi piccoli e più importanti centri storici e borghi antichi. Strutture di questo tipo, per la propria intrinseca vulnerabilità agli eventi sismici, richiedono attenzioni specialistiche ed una specifica ed approfondita conoscenza. È doveroso dunque mettere in campo esperienze e risorse per salvaguardare tale inestimabile ed irriproducibile patrimonio e trasferirlo nella propria inviolata originalità alle generazioni future.

Le strutture murarie, per le particolari caratteristiche di complessità ed eterogeneità, sia geometrica che dei caratteri costruttivi e per la presenza di criticità locali (a volte imprevedibili perché celate all'osservazione diretta), richiedono particolare esperienza nell'esame delle condizioni che ne possano garantire la sicurezza sismica, anche in relazione ad una auspicabile ed utile fruizione. Non sempre è possibile acquisire una conoscenza approfondita ed estensiva delle tecnologie costruttive presenti in edifici esistenti, in particolare modo negli edifici che si presentano in aggregato, caso tipico nei centri storici, risultato di una genesi articolata nel tempo, di accrescimenti, completamenti ed interventi successivi, ed è spesso illusoria la definizione di sofisticati modelli di analisi che possano descrivere in maniera adeguata il reale comportamento in condizioni sismiche. È in tal senso che occorre "apprendere" dal terremoto e far ricorso, per quanto possibile, al "buon senso". Il terremoto manifesta le criticità che rendono vulnerabili le strutture murarie e l'osservazione dei danni provocati dal sisma, accompagnata dalla corretta interpretazione di tali criticità in associazione all'esame delle specifiche tecnologie costruttive presenti, consente di meglio interpretare la risposta al sisma di strutture anche com-

plesse, semplificando ed orientando in maniera ragionevole la fase di analisi e verifica.

La scelta effettuata in tempi remoti di privilegiare lo studio delle nuove tecnologie costruttive ha comportato un progressivo abbandono delle conoscenze sulle murature: le nuove costruzioni utilizzano principalmente strutture portanti e resistenti di nuova concezione e raramente si edificano strutture in muratura portante. Più recentemente, anche in conseguenza dei disastrosi eventi sismici che hanno riportato all'opinione pubblica tali argomenti, seguiti da un importante rinnovamento in ambito normativo rivolto ad una più ampia attenzione nei riguardi degli organismi strutturali in muratura, si è resa manifesta una maggiore sensibilità a riguardo delle tematiche che consentono di acquisire una indispensabile comprensione del comportamento di tale tipologia costruttiva.

Questo volume raccoglie le esperienze di molti soggetti che hanno lavorato sugli edifici danneggiati dai molti terremoti che hanno colpito la nostra penisola, cercando di rendere nuovamente attuale lo studio delle strutture in muratura e del loro comportamento in condizioni statiche ed in presenza di azioni dinamiche. È oltremodo significativo che nel piano dell'opera si sia sentita la necessità di evidenziare la descrizione delle murature nei trattati e che l'informazione relativa ai trattatisti del Novecento si esaurisca in poche pagine. Da questa sintesi si sviluppa poi un'importante analisi sul comportamento meccanico delle murature storiche, evidenziando le peculiari caratteristiche degli apparecchi murari e il comportamento degli edifici in muratura in relazione alle sollecitazioni indotte dal sisma e dai carichi.

Il testo dà ulteriori informazioni sulle procedure operative per la lettura e la valutazione della qualità e dello stato delle murature, nonché delle caratterizzazioni e delle prove necessarie.

La modellazione ed il calcolo delle strutture si rendono poi indispensabili, oltre che per definire gli interventi necessari, anche per ottemperare agli obblighi imposti dalla normativa sulla definizione del li-

vello di miglioramento sismico progettato. Il confronto fra i diversi metodi di calcolo semplificati, che nel tempo sono stati adottati per cercare di modellare il comportamento delle strutture in muratura, dà un'idea della ricerca che su questo argomento in tempi recenti si è sviluppata. Il testo dà ulteriori e preziosi riferimenti sullo studio delle strutture voltate e sul loro comportamento in condizioni di esercizio e di sollecitazione sismica.

Il capitolo finale ed il secondo volume offrono un'ampia panoramica delle possibili soluzioni per il consolidamento delle strutture murarie e delle tecniche di intervento fino ad oggi sperimentate ed attuate in diverse condizioni, fermo restando che solo una conoscenza approfondita del comportamento delle strutture su cui si interviene consente al progettista di scegliere la tipologia di intervento da applicare al caso specifico e l'esperienza e la conoscenza rappresentano il metro su cui valutare le scelte più opportune per il fine che si vuole raggiungere.

La scelta di completare l'opera con una serie di appendici su CD Rom permette un migliore uso del testo ed una più agile informazione del lettore, fornendo quei dati e quegli esempi che rendono questo testo particolarmente utile per i professionisti che intervengono sulle strutture in muratura.

Il nostro Paese ha un patrimonio edificato molto importante sia sotto il profilo quantitativo che qualitativo e la maggior parte di questo patrimonio storico è realizzata in muratura di diversa qualità e consistenza; la conservazione di questa peculiare caratteristica è fondamentale per salvaguardare la storia e l'individualità dei nostri centri in cui si riconoscono i cittadini di ogni nostro borgo o città. Credo che questa opera possa, oggi, rappresentare un importante contributo alla conservazione del nostro patrimonio ed alla sua valorizzazione, sfatando anche molti dei pregiudizi sulla sicurezza delle strutture in muratura e sulla loro affidabilità.

Luciano Marchetti

Vice Commissario delegato per la Tutela dei Beni Culturali
nel territorio abruzzese colpito dal sisma

INTRODUZIONE

Il sisma che ha colpito L'Aquila ed i paesi limitrofi il 6 aprile 2009 ha riportato, drammaticamente, alla ribalta il problema della vulnerabilità del costruito storico italiano e l'importanza di individuare metodologie efficaci per l'analisi, il consolidamento ed il rinforzo di questi manufatti, con l'obiettivo di evitare, per quanto possibile, danni e crolli di questa gravità.

La protezione sismica del costruito storico presenta, però, tutta una serie di problematiche di non semplice soluzione. Molte sono infatti le particolarità, non sempre positive, del comportamento meccanico di edifici costruiti con le tecniche tradizionali del passato e che, per varie vicende, si trovano inseriti in aggregazioni dove le relazioni strutturali tra i vari elementi risultano complesse ed aleatorie.

A questo si aggiunge talvolta il fatto che molte delle costruzioni storiche portano segni incancellabili della devastazione culturale causata da alcune tipologie di intervento di un recente passato, con la sostituzione sistematica dei solai lignei con ben più pesanti solai latero-cementizi, la realizzazione di cordoli sommitali in c.a., di cordoli in breccia, pilastri in breccia, paretine in c.a., intonaci armati etc. Non sempre tali operazioni hanno significato maggior sicurezza: i terremoti più recenti hanno mostrato numerosissimi casi che vanno nel senso opposto. Quasi sempre, comunque, tali operazioni hanno rappresentato perdite dei caratteri architettonici originari di queste costruzioni.

La nuova normativa sismica introdotta in Italia ha certamente significato un momento di "rottura" e di avanzamento rispetto al passato, anche per quanto riguarda gli edifici esistenti in muratura. Molto resta però da fare per rendere attuabile ed operativo questo nuovo approccio ed un contributo in questa direzione può venire anche da questo lavoro, che si pone l'ambizioso obiettivo di raccogliere e sintetizzare varie metodologie di analisi della qualità muraria, di modellazione degli edifici in muratura e di modalità di intervento.

Così, in questo contesto e dopo molti anni di "gestazione", vede la luce il presente "Manuale delle Muraure Storiche", che riassume esperienze e ricerche

svolte da vari gruppi di lavoro composti da ricercatori universitari e professionisti esperti nel settore del consolidamento delle costruzioni in muratura.

L'intento è quello di raccogliere e riordinare quanto è stato fatto dagli Autori negli ultimi anni, allo scopo di realizzare uno strumento operativo di riferimento per la valutazione della qualità muraria, la previsione del suo comportamento meccanico e l'individuazione delle metodologie di intervento più appropriate.

I temi trattati riguardano la definizione della qualità muraria, intesa non solo come caratterizzazione meccanica dei materiali e geometrica dei paramenti, ma anche in relazione alla tipologia delle sezioni; seguono gli aspetti metodologici in relazione al corretto approccio per la comprensione del comportamento meccanico di queste murature, degli edifici e degli aggregati ed una descrizione dei metodi di calcolo ai fini della valutazione della sicurezza di questo patrimonio edilizio, in particolare nei confronti dell'azione sismica.

Nel Manuale sono contenute anche varie schede tecniche: da quelle per la valutazione speditiva della qualità muraria, orientate alla definizione dei valori dei parametri meccanici da assumere per le verifiche, a quelle riguardanti specifiche tecniche di intervento.

L'opportunità di una raccolta di questo tipo e di una sintesi che possa essere assunta come punto di riferimento per quanti operano nel settore è evidente anche alla luce della nuova normativa sismica, in particolare dove si indica al progettista la via della ricerca dei riferimenti disponibili in letteratura per le necessarie valutazioni delle caratteristiche delle murature.

Lo strumento proposto è inteso quindi come aiuto al professionista per la comprensione delle diversità di comportamento e la scelta delle tecniche di intervento più appropriate, attraverso un percorso di conoscenza specifico per i manufatti storici in muratura, profondamente diversi, soprattutto per quanto riguarda il comportamento strutturale, dalle costruzioni che si sviluppano a partire dalla seconda metà del Novecento.

D'altra parte appare ormai chiaro a tutti quanto male si adattino ai manufatti storici i criteri di analisi e di

calcolo sviluppati per le strutture intelaiate, cui la legge 2 febbraio 1974, n. 64, omologando modalità di calcolo e di intervento, ha cancellato l'identità specifica dei modi e mezzi costruttivi, cosa che ancora era presente nella normativa dei primi del secolo scorso.

Come altrettanto chiaro è il cambiamento, a partire dal dibattito di inizio Novecento, del concetto stesso di sicurezza; una radicale evoluzione compiuta negli ultimi anni è stata quella imposta dagli Eurocodici, che hanno visto il passaggio da norme a carattere prescrittivo a norme a carattere prestazionale.

All'interno di tale cambiamento è stata comunque avvertita nella normativa italiana la necessità di sviluppare un percorso specifico per gli edifici in muratura, rispettoso delle peculiari caratteristiche storico-costruttive e dei valori che determinano l'identità della specifica costruzione, finalizzato a concretizzarsi in interventi di restauro e miglioramento strutturale idonei e funzionali al singolo caso.

Contributi fondamentali in questo senso sono venuti, a partire dalla metà degli anni Ottanta, con il Comitato Nazionale per la Prevenzione del Patrimonio Culturale e dal mondo scientifico con personalità quali Antonino Giuffrè, Edoardo Benvenuto e Salvatore Di Pasquale, fino a giungere alle esperienze maturate con i terremoti più recenti.

Alla luce di quanto sopra accennato, il volume propone un percorso metodologico che vede una progettazione sviluppata sulla base della reale conoscenza della fabbrica storica, realizzando un progetto rispettoso del contesto in cui si va ad intervenire e che risponda, dal punto di vista della sicurezza strutturale, a criteri di necessità strutturale, affidabilità tecnica e affidabilità costruttiva. Questo significa adottare un concetto di "sicurezza equivalente" «che si caratterizza per essere un intelligente confronto tra gli aspetti della sicurezza» (si veda *Linee Guida*, introduzione di Roberto Cecchi e Michele Calvi). Ciò si traduce nell'adozione ed interazione, contemporaneamente, di criteri qualitativi e quantitativi nella definizione della sicurezza strutturale degli edifici storici in muratura.

Oltre allo sviluppo di un concetto di "sicurezza equivalente" da adottare per le costruzioni storiche definito dal rispetto della regola d'arte e dalla conoscenza che deriva della fabbrica sulla base dell'applicazione di una precisa metodologia di rilievo, con la recente normativa si introduce il concetto di "vita nominale" della costruzione, in cui la funzione tempo diventa fondamentale per definire l'intervallo temporale in cui la costruzione può essere dichiarata sicura

senza adottare provvedimenti ed interventi di manutenzione o restauro strutturale. Naturalmente, l'applicazione di tali concetti nella valutazione della sicurezza implica un livello di conoscenza del manufatto architettonico opportunamente approfondito.

Nel volume la scelta di tale percorso di conoscenza inizia dalla comprensione delle caratteristiche costruttive ottimali che una muratura dovrebbe possedere per poter essere durevole nel tempo, così come trasmesse nei secoli dai trattatisti storici: di qui la scelta di una analisi comparativa della trattatistica, nel definire tipologie e qualità muraria. Ne discende una "regola d'arte" nella murazione, il cui rispetto fornisce le garanzie di durabilità ed affidabilità (*ratio firmitatis*) della costruzione nel tempo.

Questo concetto viene poi ulteriormente approfondito, comparando le attuali esigenze di sicurezza strutturale con quelle della conservazione, delineando le problematiche nello studio del comportamento strutturale degli edifici storici, dalla modellazione all'individuazione del meccanismo di collasso. Partendo dal comportamento del singolo pannello murario sottoposto ad azioni verticali, nel piano e fuori piano, si arriva a definire il comportamento della cellula e poi dell'aggregazione edilizia, attraverso gli elementi che la definiscono.

In questo percorso, la comprensione e la classificazione della qualità muraria di un edificio rappresenta uno dei punti più importanti del processo di analisi e di diagnosi, dato che da tale qualità discendono le possibilità o meno di un comportamento meccanico adeguato alle azioni previste. L'estrema variabilità delle caratteristiche meccaniche delle murature è legata al fatto stesso che non si è in presenza di un "materiale" vero e proprio, bensì di un prodotto artigianale, realizzato con materiali molto diversi da caso a caso, con tecniche e sapienza costruttiva variabili da zona a zona, da edificio ad edificio, da persona a persona, ed anche da momento a momento. I risultati che si hanno sono estremamente dispersi e differiscono tra loro anche in funzione delle azioni che si considerano.

Molto spazio viene dedicato nella parte iniziale del lavoro per mettere nella giusta luce queste peculiarità del "materiale" muratura, evidenziandone le profonde differenze che si hanno rispetto ai materiali "moderni", prima fra tutte la distinzione tra "costruzione" e "struttura resistente", messa in luce da Violet-le-Duc e brillantemente ripresa poi da Salvatore Di Pasquale.

L'approfondimento sulle tipologie murarie considera, poi, le diverse possibili sezioni che costituiscono la muratura, ottenute mediante rilievi diretti, ed i diversi tipi di connessioni che possono essere o meno presenti tra gli strati stessi. In particolare, il rilievo delle sezioni permette di definire importanti parametri strutturali, come la distribuzione percentuale di pietre, malte e vuoti ed il rapporto tra le dimensioni dei diversi paramenti e quello della sezione, le dimensioni e la distribuzione dei vuoti nella sezione.

Particolare attenzione è stata poi dedicata all'analisi strutturale ed alle verifiche, precisando subito che per gli edifici storici "non alterati" (cioè che hanno avuto solo riparazioni e modifiche secondo le regole premoderne) il concetto di "verifica globale" va assunto con un significato molto diverso da quello delle moderne costruzioni intelaiate, nel senso che l'analisi strutturale per la valutazione della sicurezza deve essere eseguita attraverso verifiche di dettaglio dei singoli elementi.

In condizioni statiche, la fabbrica tradizionale si può considerare come un assemblaggio di elementi "imperfettamente elastici", staticamente determinati, vincolati in modo monolatero. I carichi agiscono sull'elemento che direttamente li sopportano, e questo li trasmette agli elementi su cui è appoggiato. È quindi ben lontana dal comportamento di una struttura elastica (o elasto-plastica), monolitica, pluriconnessa ed iperstatica, che può rappresentare solo una schematizzazione del tutto astratta e tendente a privilegiare aspetti del comportamento strutturale che nella realtà si rivelano ininfluenti. La vulnerabilità sismica degli edifici storici è invece significativamente condizionata dalla tipologia e dalla qualità delle connessioni fra i componenti dell'organismo edilizio stesso, connessioni che, in condizioni statiche ordinarie e sotto l'azione dei soli carichi verticali, sembrano contribuire marginalmente alla stabilità globale dell'organismo edilizio ma, in caso di sisma, assumono un ruolo determinante.

Ai fini dell'analisi strutturale è necessario operare una schematizzazione dell'oggetto che sia, nello stesso tempo, semplice ed affidabile. Per le costruzioni in muratura, la complessità e le difficoltà di tale schematizzazione, qualora venga inserita in approcci unitari e ben codificati, sono ben note anche per gli edifici nuovi ed acquistano un rilievo ben maggiore e spesso determinante per gli edifici storici.

Quanto detto mette chiaramente in luce la profonda differenza concettuale e metodologica esistente rispetto al calcolo ed alla verifica degli edifici intelaiati in c.a. ed in acciaio, che sono condotti sulla base di schemi di comportamento ben codificati, sia geometricamente, sia meccanicamente, nei quali la congruenza delle deformazioni svolge un ruolo essenziale. Per gli edifici storici in muratura occorre quindi seguire un approccio specifico, seguendo metodologie di calcolo ben inserite all'interno di approcci noti e ben consolidati nell'ambito della Scienza delle Costruzioni. Ciò per evitare i rischi derivanti da approcci empirici, o, ancor peggio, astratti, che, nel passato, sono stati fonte di gravi insuccessi.

Chiude il volume un utile ed approfondito repertorio di tecniche di intervento, aggiornato alle metodiche più recenti ed innovative.

Il "Manuale delle Murature Storiche" si propone quindi quale strumento di ausilio al progettista per la conoscenza del costruito, l'analisi della qualità muraria, la definizione del comportamento meccanico del materiale, la modellazione del comportamento strutturale della costruzione e la scelta delle tecniche di intervento.

A chiusura di questa breve introduzione, un sentito ringraziamento a tutti gli Autori per i loro preziosi contributi ed un grazie particolare alla curatrice Arch. Chiara Donà ed all'Ing. Alessandro De Maria che con le loro capacità ed il loro impegno hanno fornito la spinta necessaria a far decollare questo lavoro.

Antonio Borri

Professore Ordinario della Facoltà di Ingegneria
Università degli Studi di Perugia
Presidente del Centro Studi Sisto Mastrodicasa

Direttore scientifico **Antonio Borri**

A. Baila, L. Binda, A. Borri, G. Cangi, G. Cardani, G. Castori, M. Corradi,
A. De Maria, E. Del Monte, C. Donà, L. Galano, A. Giannantoni, B. Ortolani,
A. Pagliuzzi, A. Saisi, D. Sperandio, E. Speranzini, C. Tedeschi, A. Vignoli

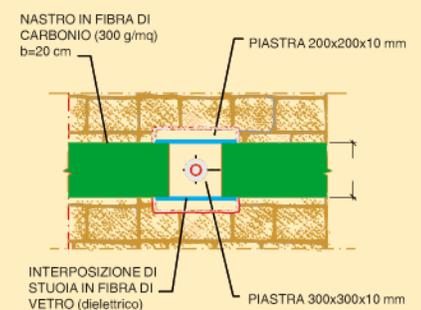
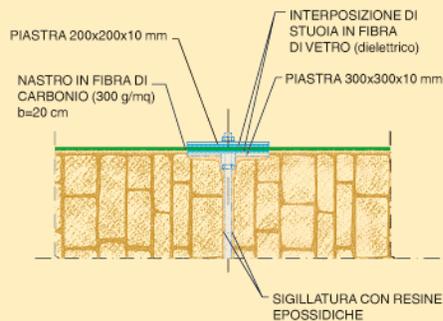
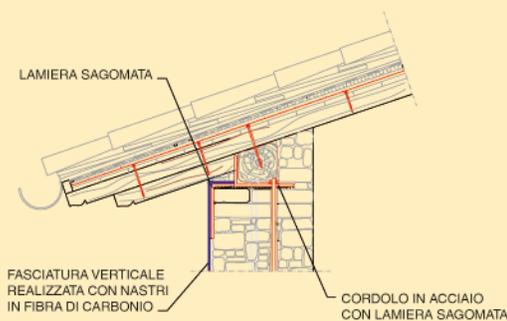
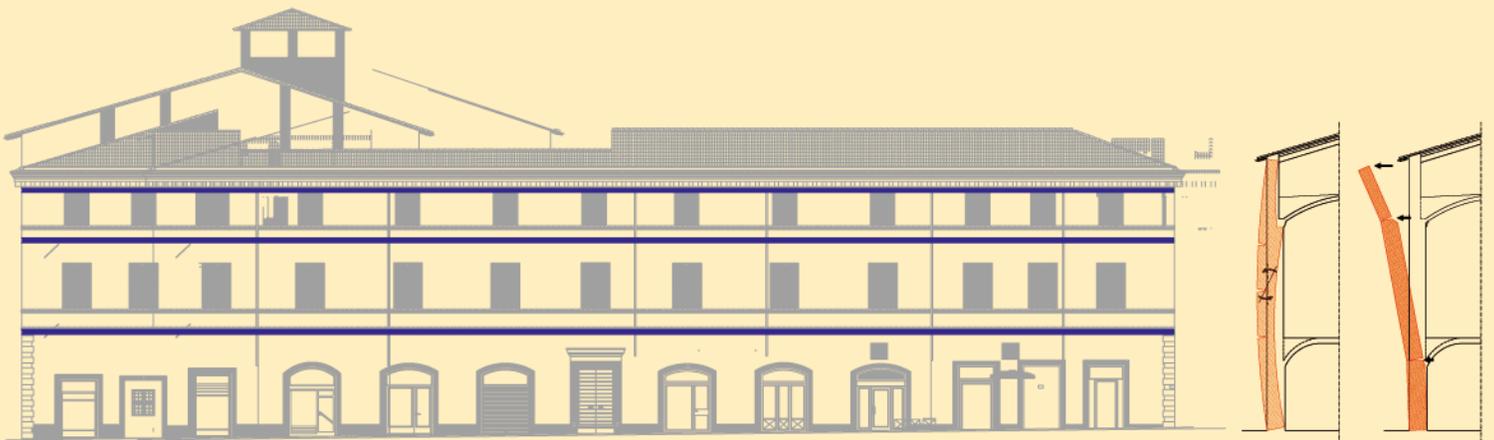
MANUALE DELLE MURATURE STORICHE

a cura di Chiara Donà
con la collaborazione di Alessandro De Maria

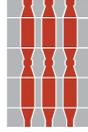
MEMIS

Volume II

Schede operative per gli interventi di restauro strutturale



Si ringraziano:



REGIONE UMBRIA



**CENTRO STUDI
SISTO MASTRODICASA**



**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE
DEL POLITECNICO DI MILANO**
(Prof.ssa Luigia Binda)

UNILAB
SPIN OFF DELL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PERUGIA

Copyright © 2011 DEI s.r.l. TIPOGRAFIA DEL GENIO CIVILE
Roma, Via Nomentana, 16 - 00161 Roma Tel. 06.4416371 Fax 06.440.33.07
e-mail dei@build.it - URL <http://www.build.it>

I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica, di riproduzione e di adattamento, totale o parziale con qualsiasi mezzo (compreso i microfilm e le copie fotostatiche) sono riservati per tutti i Paesi.
L'elaborazione del testo, anche se curata con scrupolosa attenzione, non può comportare specifiche responsabilità per eventuali involontari errori o inesattezze.

Direttore scientifico **Antonio Borri**

A. Baila, L. Binda, A. Borri, G. Cangi, G. Cardani, G. Castori, M. Corradi,
A. De Maria, E. Del Monte, C. Donà, L. Galano, A. Giannantoni, B. Ortolani,
A. Pagliuzzi, A. Saisi, D. Sperandio, E. Speranzini, C. Tedeschi, A. Vignoli

MANUALE DELLE MURATURE STORICHE

IV-MIS

a cura di Chiara Donà
con la collaborazione di Alessandro De Maria

Volume II

Schede operative per gli interventi di restauro strutturale



GLI AUTORI

Angela Baila	Capitolo 1
Luigia Binda	Capitolo 6, paragrafi 6.1 - 6.2 - 6.3 - 6.3.1 - 6.3.2 - 6.3.3 - 6.3.4 - 6.5
Antonio Borri	Capitoli 2 - 3 - 5 - Scheda M14 (vol. II)
Giovanni Cangi	Capitoli 2 - 3 - Capitolo 5, paragrafo 5.5
Giuliana Cardani	Capitolo 6, paragrafi 6.1 - 6.2 - 6.3 - 6.3.1 - 6.3.2 - 6.3.3 - 6.3.4 - 6.5
Giulio Castori	Capitolo 6, paragrafo 6.4
Marco Corradi	Capitolo 6, paragrafo 6.3.5 - Scheda M14 (vol. II)
Alessandro De Maria	Capitoli 2, 3, 5 - Capitolo 7, paragrafo 7.8
Emanuele Del Monte	Capitolo 7, paragrafo 7.12 - Appendice A5
Chiara Donà	Capitoli 1, 4, 9 - Capitolo 2, paragrafi 2.1 - 2.2 - 2.4.2 - Capitolo 5, paragrafi 5.1 - 5.4 - 5.5 - Introduzione e schede (vol. II)
Luciano Galano	Capitolo 7 - Appendici A1 - A2 - A3 - A4
Andrea Giannantoni	Schede (vol. II)
Barbara Ortolani	Capitolo 7, paragrafo 7.12 - Appendice A5
Andrea Pagliuzzi	Capitolo 8 - Appendice A6
Antonella Saisi	Capitolo 6, paragrafi 6.1 - 6.2 - 6.3 - 6.3.1 - 6.3.2 - 6.3.3 - 6.3.4 - 6.5
Dino Sperandio	Contributo nel paragrafo “Problematiche rispetto alle esigenze della conservazione” delle schede F1, M1, M2, M3, M5, M6, M7, M9, M11, M15, V1, V2, V5-A5, AT1 (vol. II)
Emanuela Speranzini	Scheda M14 (vol. II)
Cristina Tedeschi	Capitolo 6, paragrafi 6.1 - 6.2 - 6.3 - 6.3.1 - 6.3.2 - 6.3.3 - 6.3.4 - 6.5
Andrea Vignoli	Capitoli 7 - 8 - Appendici A1 - A2 - A3 - A4 - A5 - A6

GLI AUTORI

Angela Baila	Capitolo 1
Luigia Binda	Capitolo 6, paragrafi 6.1 - 6.2 - 6.3 - 6.3.1 - 6.3.2 - 6.3.3 - 6.3.4 - 6.5
Antonio Borri	Capitoli 2 - 3 - 5 - Scheda M14 (vol. II)
Giovanni Cangi	Capitoli 2 - 3 - Capitolo 5, paragrafo 5.5
Giuliana Cardani	Capitolo 6, paragrafi 6.1 - 6.2 - 6.3 - 6.3.1 - 6.3.2 - 6.3.3 - 6.3.4 - 6.5
Giulio Castori	Capitolo 6, paragrafo 6.4
Marco Corradi	Capitolo 6, paragrafo 6.3.5 - Scheda M14 (vol. II)
Alessandro De Maria	Capitoli 2, 3, 5 - Capitolo 7, paragrafo 7.8
Emanuele Del Monte	Capitolo 7, paragrafo 7.12 - Appendice A5
Chiara Donà	Capitoli 1, 4, 9 - Capitolo 2, paragrafi 2.1 - 2.2 - 2.4.2 - Capitolo 5, paragrafi 5.1 - 5.4 - 5.5 - Introduzione e schede (vol. II)
Luciano Galano	Capitolo 7 - Appendici A1 - A2 - A3 - A4
Andrea Giannantoni	Schede (vol. II)
Barbara Ortolani	Capitolo 7, paragrafo 7.12 - Appendice A5
Andrea Pagliuzzi	Capitolo 8 - Appendice A6
Antonella Saisi	Capitolo 6, paragrafi 6.1 - 6.2 - 6.3 - 6.3.1 - 6.3.2 - 6.3.3 - 6.3.4 - 6.5
Dino Sperandio	Contributo nel paragrafo “Problematiche rispetto alle esigenze della conservazione” delle schede F1, M1, M2, M3, M5, M6, M7, M9, M11, M15, V1, V2, V5-A5, AT1 (vol. II)
Emanuela Speranzini	Scheda M14 (vol. II)
Cristina Tedeschi	Capitolo 6, paragrafi 6.1 - 6.2 - 6.3 - 6.3.1 - 6.3.2 - 6.3.3 - 6.3.4 - 6.5
Andrea Vignoli	Capitoli 7 - 8 - Appendici A1 - A2 - A3 - A4 - A5 - A6

INDICE VOLUME II

PARTE TERZA - SCHEDE DEGLI INTERVENTI SULLE STRUTTURE E SUGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI

INTRODUZIONE	pag. 17
FONDAZIONI (F)	
Scheda F1 Sottofondazioni per sottomurazioni	pag. 29
Scheda F2 Ampliamento base fondale (semicordolo affiancato con teste di ammorsamento o parzialmente sottomurato).....	pag. 36
Scheda F3 Pali.....	pag. 45
MURATURE (M)	
Scheda M1 Iniezioni di miscele leganti	pag. 56
Scheda M2 Cuciture armate	pag. 69
Scheda M3 Tirantini metallici antiespulsivi	pag. 75
Scheda M4 Diatoni artificiali	pag. 82
Scheda M5 Diatoni in pietra o laterizio	pag. 88
Scheda M6 Placcaggio con lastre e reti elettrosaldate	pag. 92
Scheda M7 Scuci e cucì con elementi di recupero o elementi nuovi	pag. 108
Scheda M8 Riparazione di lesioni dei paramenti esterni.....	pag. 117
Scheda M9 Ammorsature murarie delle angolate	pag. 123
Scheda M10 Ricostruzione parziale di muri	pag. 128
Scheda M11 Scarnitura e ristilatura profonda dei giunti	pag. 136
Scheda M12 Rinzeppatura/rincocciatura dei giunti.....	pag. 142
Scheda M13 Ristilatura armata dei giunti di malta	pag. 146
Scheda M14 Reticulatus	pag. 153
Scheda M15 Contrafforti e speroni	pag. 160
Scheda M16 Ringrossi della muratura.....	pag. 168
Scheda M17 Archi di scarico	pag. 173
Scheda M18 Cordoli in calcestruzzo cementizio armato.....	pag. 179
Scheda M19 Cordoli in muratura armata.....	pag. 188
Scheda M20 Cordoli in metallo.....	pag. 195
Scheda M21 Cordoli in legno.....	pag. 200
Scheda M22 Tiranti verticali post-tesi	pag. 205
Scheda M23 Catene	pag. 212
Scheda M24 Dispositivi in lega a memoria di forma: Shape Memory Alloy Devices (SMAD)	pag. 228
Scheda M25 Dispositivi di vincolo dinamico: Shock Transmitters	pag. 238

Scheda M26	Trasformazione di travi lignee in catene ed ancoraggi delle strutture orizzontali alle strutture verticali	pag. 242
Scheda M27	Cerchiature metalliche di pilastri e colonne in muratura	pag. 251
Scheda M28	Cerchiature con nastri in materiale fibro-rinforzato di pilastri e colonne in muratura	pag. 258

VOLTE E ARCHI (V, A)

Scheda V1	Consolidamento di volte con cappa in cemento armato	pag. 264
Scheda V2	Consolidamento di volte con profilati metallici	pag. 270
Scheda V3-A3	Consolidamento di volte ed archi con materiali fibro-rinforzati	pag. 280
Scheda V4	Consolidamento di volte con archi a rotoli	pag. 295
Scheda V5-A5	Ripristino della geometria	pag. 304
Scheda V6	Frenelli in muratura	pag. 311
Scheda V7	Frenelli in muratura e materiali fibro-rinforzati	pag. 316
Scheda V8-A8	Tirantatura metallica	pag. 324

ARCHITRAVI (AT)

Scheda AT1	Archi di scarico, piattabande, dormienti	pag. 331
Scheda AT2	Cuciture armate	pag. 338
Scheda AT3	Profilati metallici.....	pag. 343

INDICE DEL CD ROM

A1. MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI DELLE STRUTTURE IN MURATURA

- A1.1. Aspetti generali
- A1.2. Derivazione delle equazioni del metodo basato sugli spostamenti nelle analisi lineari
- A1.3. Diverse strategie di discretizzazione
- A1.4. Leggi costitutive
- A1.5. Alcuni aspetti del codice di calcolo ANSYS
Caratteri generali del programma (Releases 4.4 e 5.5); Organizzazione del programma; Fase di Pre-Processor (PREP7); Fase di Soluzione (SOLUTION); Fase di Postprocessor (POST1 e POST26); Elementi di libreria; Considerazioni conclusive per l'analisi delle murature
- A1.6. Aspetti di dettaglio della modellazione agli elementi finiti delle strutture in muratura
Aspetti del comportamento meccanico delle murature; I criteri di rottura biassiali: modelli teorici e studi sperimentali; I criteri di rottura biassiali: modelli empirici e fenomenologici; La muratura soggetta all'azione di carichi ciclici; Aspetti relativi alla modellazione dei materiali con piccola resistenza a trazione; Le diverse strategie di discretizzazione; Le micromodellazioni; Le macromodellazioni; Alcuni contributi in cui si utilizzano macromodelli specifici per le murature; Descrizione particolare di un modello significativo; Considerazioni sui modelli esaminati
- A1.7. Bibliografia

A2. ESEMPI DI MODELLAZIONE AGLI ELEMENTI FINITI CON IL CODICE ANSYS

- A2.1. Introduzione
- A2.2. Descrizione del modello numerico adottato
La definizione dell'elemento finito; Il modello elastico perfettamente plastico; Modellazione della fessurazione al continuo
- A2.3. La taratura del modello
Prove sperimentali; Identificazione dei parametri costitutivi
- A2.4. La Pieve di Cerreto
Descrizione; Modellazione agli elementi finiti; Analisi statica ed analisi delle forme modali della Pieve; Le analisi sismiche; I modelli consolidati della Pieve
- A2.5. Un edificio a Fivizzano (MS)
Descrizione; Modellazioni agli elementi finiti; Valutazione dell'efficienza dell'intervento di miglioramento

sismico; Analisi non lineari

- A2.6. Commenti
 - A2.7. Un edificio a Rometta (Fivizzano (MS))
Caratteristiche del terreno e zonazione sismica; Indagine storica; Lo stato attuale dell'edificio; Criteri e motivazioni progettuali; Il modello agli elementi finiti dell'edificio nello stato attuale; La modellazione degli interventi di consolidamento; Analisi statiche: valutazione del beneficio indotto dalle catene metalliche; Valutazione dell'incremento del coefficiente moltiplicativo del carico sismico a collasso: l'analisi non lineare
 - A2.8. Bibliografia
- ### A3. IL METODO DEI CINEMATISMI DI COLLASSO
- A3.1. Generalità
Connessioni tra pareti murarie e tra pareti e solai. I carichi gravanti sui solai
 - A3.2. Teoria del metodo cinematico dei meccanismi di collasso
Meccanismi di danno di primo modo; Meccanismi di danno di secondo modo
 - A3.3. Il metodo dei cinematismi di collasso applicato ad un edificio storico
Introduzione; Rilievo dell'edificio; I principali elementi costruttivi; Analisi dei cinematismi di primo e di secondo modo; Ipotesi di intervento
 - A3.4. Bibliografia

A4. METODI E MACROELEMENTI

- A4.1. Generalità
- A4.2. Metodi di calcolo a macroelementi per azioni orizzontali
Il metodo VET (1977); Il metodo POR (1977); Metodo della Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici 30 luglio 1981, n. 21745; Il metodo PORFLEX (1982); Il metodo RAN; Il metodo POR90 (1990); Il metodo VEM (1991); Il metodo SAM (1996); Il metodo PORDIN; Modellazione a "punti equivalenti"; Un metodo a macroelementi bidimensionali; I metodi "no tension"
- A4.3. Applicazioni dei metodi a macroelementi
Applicazioni e confronti per pareti piane; Confronti tra i risultati dei metodi POR, PORFLEX, SAM e cinematismi di collasso
- A4.4. Bibliografia

A5. VERIFICA DELLA SICUREZZA DI UN EDIFICIO ESISTENTE IN MURATURA, AI SENSI DEL DM DEL 14 GENNAIO 2008

- A5.1. Introduzione
- A5.2. Processo di conoscenza
Prescrizioni normative; Descrizione dell'edificio
- A5.3. Analisi dei carichi
Carichi verticali; Azione sismica
- A5.4. Analisi sismica globale
Modellazione strutturale; Verifica di sicurezza secondo l'ASnL
- A5.5. Analisi dei meccanismi locali di collasso
Ribaltamento dell'intera parete; Ribaltamento di due piani; Ribaltamento dell'ultimo piano

A5.6. Conclusioni

A5.7. Bibliografia

A6. ARCHI E VOLTE IN MURATURA

- A6.1. L'arco murario con rinfianco
- A6.2. Le equazioni del metodo cinematico
Arco semicircolare con carico verticale concentrato
- A6.3. Modelli analitici di collasso per volte a crociera
- A6.4. Modellazioni FEM di una volta a botte in muratura
- A6.5. Principali risultati e commenti
- A6.6. Bibliografia

INTRODUZIONE

Chiara Donà, Andrea Giannantoni

Nel corso degli anni la normativa ha identificato gli interventi sulle costruzioni esistenti attraverso precisi termini, in parte creando nuove definizioni, in parte mutuandoli dal mondo del restauro¹.

L'intervento strutturale, inquadrabile esclusivamente all'interno del restauro architettonico², riflette le teorie di volta in volta più diffuse sul modo di operare sulle testimonianze del passato per assicurarne la conservazione³, tant'è che lo stesso termine *consolidamento* rimane tuttora molto ambiguo e di problematica definizione⁴.

Del resto, come ricorda Bellini, «la questione del restauro si pone quando si ritiene possibile, in nome della ricerca del vero storico, la ricostruzione di un assetto antico andato perduto o alterato nel tempo per

le più svariate ragioni», dove «l'obiettivo non è quello della verità testimoniata dalla presenza materiale, dall'autenticità della materia, ma il ricostituirsi di una forma ideale o storicamente data, rappresentativa di valori esemplari», tanto che «in questo procedere l'aspetto tecnologico assume una funzione subordinata: i modi di intervento sono semplicemente mezzi per raggiungere un fine determinato attraverso valutazioni che quasi sempre prescindono da quanto è materialmente necessario per realizzarli: nessuna autonomia è riconosciuta all'analisi scientifica e tecnologica e soprattutto alla scelta delle tecniche da impiegare, se non in rapporto agli obiettivi di natura formale»⁵. Questo perché è nell'apprezzamento della storicità dell'architettura che la qualità del materiale non

¹ Si veda il capitolo 9 nel volume I del presente Manuale e il testo di C. Donà, "Miglioramento ed adeguamento antisismico: criteri concettuali e limiti nell'approccio al costruito storico" in A. Centroni (a cura di), *Atti del VI Convegno Nazionale dell'ARCo - Associazione per il Recupero del Costruito, Quale sicurezza per il patrimonio architettonico?*, Mantova, 30 novembre-2 dicembre 2006, Nuova Argos, Roma 2007, pp. 619-627; per maggiori approfondimenti si rimanda anche a C. Donà, *Sicurezza strutturale e conservazione del costruito storico. Ricerche per una reciproca conciliabilità*. Dottorato di ricerca in Restauro - XVIII ciclo, SSAV, Venezia 2006, tutor: F. Doglioni; relatori: A. Borri, F. Doglioni; correlatore: G. Mirabella Roberti.

² Ad esempio, a tale proposito si vedano i testi di: A. Annoni, *Scienza e arte del restauro architettonico*, Edizioni artistiche Framar, Milano 1946; F. Jossa, "Introduzione" al volume a cura di R. Di Stefano e G. Fiengo, "Diagnosi dei dissesti e consolidamento degli edifici" in *Restauro. Quaderni di restauro dei monumenti e di urbanistica dei centri storici*, Anno I, n. 2, agosto-settembre 1972; *Atti del I Congresso Nazionale ASS.I.R.C.CO., Consolidamento e restauro architettonico*, Edizioni Kappa, Roma 1981; R. Ciuffo, F. Migliorato, E. Virdia (a cura di), *Il restauro delle costruzioni tra le ragioni della conservazione e quelle della statica*, *Atti del V Congresso Nazionale ASS.I.R.C.CO.*, Edizioni Kappa, Roma 1997.

³ Non a caso, come ricorda Francesco Doglioni, la domanda ricorrente che ci si deve porre quando si interviene è: «quale consolidamento in rapporto a quale restauro?» (F. Doglioni, "Consolidamento come componente strutturale del restauro architettonico: una affermazione, molte domande" in P. Rocchi (a cura di), *Trattato sul Consolidamento*, Mancosu Editore, Roma 2003, p. C 262).

⁴ Infatti, non tutti sono concordi sull'utilizzo del termine "consolidamento" (dal greco *συμφύω* e dal latino *firmitas* o *confirmo* con il significato di rendere solido, stabile, resistente; rafforzare, rassodare) per indicare l'insieme di operazioni sulla struttura del manufatto, preferendo la locuzione "problemi statici del restauro" anche alla dizione di "re-

stauro statico", «locuzione imperfetta nel suo voler aggettivare e parzializzare un'operazione che ha nella totalità delle sue sfaccettature, tutte riconducibili all'unità della *guida storico-critica*, il suo dato fondatore» (G. Carbonara, "Presentazione" in P. Rocchi, C. Piccirilli, *Manuale del consolidamento. Contributo alla nascente trattatistica*, DEI Tipografia del Genio Civile, Roma 1994, p. 9). Tuttavia tale locuzione viene utilizzata dalle stesse Norme UNI 9124, in cui il "restauro statico" «comprende gli elementi rivolti a conservare l'organismo edilizio o sue parti o anche singoli componenti nella loro totale integrità, nel rispetto delle concezioni strutturali presenti in essi, riprendendo gli stessi materiali in opera, nonché le tecniche impiegate per la loro preparazione e posa in opera» (Norme UNI 9124, parte I "Strutture di elevazione di muratura ed elementi costruttivi associati"). Attualmente ci si rende conto che "consolidare" non può significare solamente "rendere solide insieme" parti strutturali di un edificio, ma va inteso come contributo a salvaguardare i valori materici e storico-tecnici del manufatto.

Gli stessi termini di "restauro" (dal verbo latino *re-in-staurare*: ricostruire, fabbricare di nuovo, laddove il prefisso *re* sottolinea il carattere ripetitivo e, in qualche modo, retrospettivo e reintegrativo dell'azione) e "conservazione" (dal verbo latino *cum-serbare*: mantenere insieme, unito l'oggetto, evitare che si frammenti, si disgreghi; assicurarne, cioè, la trasmissione integrale al futuro), presuppongono che si prefigurino comportamenti molto differenti alla base delle due azioni (a tale proposito si rimanda a quanto espresso da Giovanni Carbonara nell'articolo "Orientamenti nel restauro in Italia: alcune premesse" in *L'architetto italiano*, n. 5, dicembre-gennaio 2005, pp. 58-61 e nel testo *Avvicinamento al restauro - Teoria, storia, monumenti*, Liguori, Napoli 1997).

⁵ A. Bellini, "L'intervento strutturale nel restauro come stratificazione di rilevante interesse storico" in M. Piana (a cura di), *Il consolidamento strutturale dell'edilizia storica*, Quaderni dei seminari sul restauro architettonico n. 1, Centro Internazionale di Studi Andrea Palladio, Vi-

ottiene una propria considerazione soltanto come strumento di individuazione della forma e colore, in grado di adempiere ad una funzione, comunque sostituibile da qualsiasi altro elemento che possa svolgere lo stesso compito in termini anche migliorativi, ma esso è portatore di segni e significati (ad esempio tracce di una lavorazione artistica o semplicemente artigiana- le etc.), con una funzione espressiva e materiale non sostituibile.

Probabilmente non è un caso che sia proprio nel trattamento dei materiali lapidei che il termine ha raggiunto una più riconosciuta definizione: in tal senso, consolidare significa operare, sebbene con materiali, procedure e strumenti variabili nel tempo e nello spazio, per «migliorare le caratteristiche di coesione e di adesione tra i costituenti di un materiale lapideo»⁶. Ecco allora che «il consolidamento si rende necessario quando la pietra ha perso la sua coesione sia superficialmente che in profondità e il degrado è in uno stadio così avanzato che la stessa sopravvivenza fisica del manufatto è in pericolo. Le caratteristiche da ricercare mediante il consolidamento devono riferirsi alle proprietà della pietra sana, ossia l'obiettivo da raggiungere con un consolidante è quello di ristabilire le condizioni della pietra prima del degrado. Inutile, infatti, ricercare delle resistenze meccaniche superiori a quelle della pietra naturale non alterate. In definitiva il consolidamento deve servire a eliminare le brusche differenze fisico-meccaniche esistenti tra la parte esterna alterata della pietra e degli strati più

interni ben conservati, ristabilendo una continuità nel profilo del materiale»⁷, anche nella fase precedente alla pulitura.

L'operazione di consolidamento, pertanto, è volta a conferire saldezza e continuità⁸ alla materia degradata, ancorandola a quella sana: laddove si ammetta una sostituzione di materia, il problema strutturale diviene irrilevante. Ciò porta a prolungare l'esistenza di un manufatto e rinforzarlo, aumentando relativamente le sue caratteristiche di resistenza meccanica ma anche a proteggerlo.

Se Gustavo Giovannoni ritiene che «i restauri di consolidamento, cioè di rinforzo statico e di difesa dagli agenti esterni, sono provvedimenti tecnici affini ai lavori di manutenzione e di riparazione, e rappresentano lo stadio più umile dei restauri, che non accende la fantasia, ma che appunto per questo è più utile e dovrebbe essere oggetto delle massime cure»⁹, nonostante questa umiltà, il termine consolidamento ha finito per indicare un vasto insieme di interventi volti non solo a rinsaldare la materia dell'architettura, ma anche le unioni esistenti tra diversi elementi e le varie parti di un manufatto, affinché il sistema da esso formato sia in equilibrio, in grado di sorreggere anche altri elementi o sistemi di elementi. Donde, «un intervento di consolidamento può essere attuato per ridare coesione e resistenza ad un manufatto, agendo sulla sua materia, oppure sulle sue connessioni interne ed esterne. Consolidare può dunque significare con-

enza 1995, n. 2, p. 1. In maniera analoga si esprime Salvatore Boscarino, con qualche ulteriore precisazione: «le strutture architettoniche, trattandosi di edifici tradizionali costruiti in muratura portante, vengono subito ad assumere la doppia accezione che il termine oggi riveste: quella di parte specificatamente portante o resistente della fabbrica e quella, linguistico-strutturalistica, di relazione tra le parti, volta a costituire insieme un sistema di segni decifrabile mediante l'uso di propri codici. La conoscenza deve essere finalizzata alla conservazione della fabbrica che ci è pervenuta per se stessa, la quale ultima presuppone l'intervento, ma anche il più auspicabile non intervento, nel quadro di un uso economico possibile e compatibile che, essendo un derivato delle sue qualità, non costituisce, la sua essenza. Dunque gli interventi di restauro sulle preesistenze architettoniche, criticamente riconosciute, devono partire dalla convinzione che, non occupandosi di un costruito generico e di spazi naturali qualsiasi, essi non sono soltanto tecnici e non possono fare a meno delle conoscenze storiche. Per questo motivo anche il consolidamento statico, attraverso il quale alla fine si è fatta passare ogni operazione di restauro architettonico in ogni tempo, non può risultare un'operazione distinta e separabile dal restauro architettonico vero e proprio. Il fare nel restauro è contemporaneamente giudizio storico-critico e sapere scientifico; in esso sono compresenti gli ambiti storico-umanistici e quelli tecnico-operativi» (S. Boscarino, «Conoscenza delle strutture architettoniche: metodi e tecniche di approccio» in Atti del III Congresso Nazionale

ASS.I.R.C.CO., *Conoscere per intervenire: il consolidamento degli edifici storici*, Catania, 10-12 novembre 1988, p. 14).

⁶ P. B. Torsello, S. F. Musso, *Tecniche di restauro architettonico*, UTET, Torino 2003, vol. I, p. 225.

⁷ G. Amoroso, M. Camaiti, *Scienza dei materiali e restauro*, Alinea, Firenze 1997, p. 119.

⁸ In tale ottica, prevale una logica del continuo che è propria dei materiali teorizzati dalla Scienza delle Costruzioni e che pervade anche la verifica analitica di Sisto Mastrodicasa nella valutazione dei dissesti che interessano la materia muraria. Tuttavia è necessario ricordare che le lesioni sono discretizzazioni finalizzate al raggiungimento di una nuova configurazione di equilibrio, condizione che è propria della natura discreta dei vincoli monolateri della muratura e che ne differenzia sostanzialmente il comportamento dal cemento e dall'acciaio, nonché ne distingue la necessaria verifica analitica. Questo complica una possibile definizione dell'intervento di consolidamento come «un'operazione volta a fornire all'edificio quella sicurezza, o quelle caratteristiche di comportamento strutturale, che - allo stato attuale - non presenta, in quanto perdute col trascorrere del tempo, o che non ha mai posseduto» (E. Siviero, A. Barbieri, P. Foraboschi, *Lettura strutturale delle costruzioni*, Città Studi Edizioni, Milano 1997, p. 95).

⁹ G. Giovannoni, «Il restauro dei monumenti» in Atti del I Convegno degli Ispettori Onorari dei Monumenti e Scavi, *La tutela delle opere d'arte in Italia*, Roma 22-25 ottobre 1912, Roma 1913, pp. 501-542.

ferire continuità ad un oggetto per rinforzarlo, proteggerlo e renderlo ancora capace di svolgere il proprio ruolo resistendo alle sollecitazioni cui è soggetto. Anche il tentativo di dare stabilità, equilibrio e resistenza a singoli elementi o a interi di manufatti o strutture sembra così rientrare tra i compiti del consolidamento. D'altra parte un manufatto cui è stata restituita continuità materiale, spesso subisce anche una integrazione o una re-integrazione della propria forma ed immagine, così che l'intervento di consolidamento sembra sconfinare in altri territori sollevando ulteriori questioni¹⁰. Il fatto poi che tale modo di operare possa configurarsi come un intervento globale e sistematico (come la normativa impone), «potrebbe condurre a trasformare gli edifici per adattarli ad una logica strutturale radicalmente diversa da quella che ne ha governato la costruzione e ciò, oltre a richiedere calcoli e verifiche [...] delinea un esito assai discutibile per un intervento definito di restauro»¹¹. Del resto, sono da sempre state consolidate intere strutture architettoniche quando ancora non esistevano metodi di calcolo strutturale e si poteva fare affidamento esclusivamente sul rispetto dell'arte del costruire, dettata da precisi criteri geometrici e proporzionali.

Ne consegue che il consolidamento dovrebbe opporsi al naturale destino di morte di ogni cosa, come sostiene John Ruskin nelle *Sette lampade dell'architettura*, ma, di fatto, lo realizza nel modo peggiore, cambiando la materia, l'unica su cui la storia ed il passare del tempo hanno impresso i propri segni irreversibili, donando alla fabbrica l'onore e la bellezza che ci rende sensibili al fascino del passato. Il consolida-

mento ritarda l'ufficio funebre ma rischia di condurre l'edificio a quella meta privandolo di ogni dignità, falsandolo e deturpandolo. Analoga preoccupazione per la difesa della verità del monumento antico è espressa da Edoardo Benvenuto, Salvatore Di Pasquale, Antonino Giuffrè o Salvatore D'Agostino nei confronti di quegli interventi che tradiscono la logica strutturale e che trasformano l'edificio al punto da mantenerne solo l'immagine esterna. «Il vero e il falso strutturale si affiancano così al vero e al falso storico e documentario, e a quelli estetici ed espressivi o artistici, e le riflessioni su questo argomento, come sul restauro in generale, risentono della lotta tra apparenza e realtà, tra sincerità e inganno. Il consolidamento, infatti, come le integrazioni o le riadesioni, comporta spesso aggiunte o sottrazioni di materia dal manufatto su cui agisce e anche questa circostanza fa sì che ogni intervento chiami in causa l'eterno dibattito attorno a concetti quali autentico e falso, originale e originario, vero e contraffatto [...]»¹².

Il problema estetico che si evidenzia nel consolidamento è dettato dal fatto che la statica costituisce un aspetto tutt'altro che collaterale ed estrinseco all'architettura, poiché da essa trae fondamento l'essenza estetica dell'opera¹³. La stessa prassi che motiva le ragioni del ripristino, pone la spinosa questione se si debba restaurare la materia o il suo significato, vale a dire il significato della storia¹⁴, ove quindi la componente estetica svolge un ruolo non secondario nelle decisioni da attuare.

¹⁰ P. B. Torsello, S. F. Musso, *Tecniche di restauro architettonico*, op. cit., vol. I, pp. 226-227.

¹¹ *Ibidem*, p. 227. Tutt'oggi, si nega spesso, nella concretezza delle modalità operative, ciò che si afferma a parole. Ad esempio, è da tutti attualmente accettato il criterio secondo cui è necessario non intervenire con operazioni che possono modificare il comportamento di una costruzione fatta di elementi in sé validi e in buono stato, ma spesso si accettano interventi che trasferiscono la funzione strutturale originaria ad un'altra struttura inserita ad arte nella compagine muraria esistente.

¹² P. B. Torsello, S. F. Musso, *Tecniche di restauro architettonico*, op. cit., vol. I, p. 228.

¹³ Si veda a tale proposito A. Schopenhauer, *Il mondo come volontà e rappresentazione*, Laterza, Bari 1986, vol. I. Il filosofo coglie molto chiaramente una traccia "estetica" nei tre principali temi della meccanica strutturale (ovvero resistenza dei solidi, composizione e scomposizione delle forze, statica nel suo complesso). Come incisivamente rammenta Hugo parlando dell'architettura e del significato in essa racchiuso, «[...] l'idea madre, il verbo, non era unicamente nell'intimo concetto di tali edifici, ma benanche nella loro forma. [...] Il verbo era pertanto racchiuso nell'edificio, ma la sua immagine era nel suo involucro, come la figura umana sulla bara di una mummia. E non solo la

forma degli edifici, ma anche l'ubicazione che si sceglieva loro rivelava il pensiero che rappresentavano», ubicazione che risalta la forma (V. Hugo, *Notre-Dame de Paris*, 1832, cap. "Ceci tuera cela" ovvero "Questo ucciderà quello"). Del resto anche Quatremère de Quincy, nel suo celebre dizionario, rammenta che per "struttura" si intende «quella parte dell'architettura che comprende tutto ciò che vi ha in quest'arte di materiale, di meccanico, di scientifico, ed alla qualità de' materiali o del loro impiego in un fabbricato»; tuttavia ne estende subito la portata, affermando che «del linguaggio poetico in questo genere, abbraccia i rapporti esterni dell'arte che si manifesta agli occhi per l'arditezza delle masse, la bellezza delle forme, la proporzione degli ordini e la maestria dell'esecuzione» (A. C. Quatremère de Quincy, *Dizionario storico di architettura contenente le nozioni storiche, descrittive archeologiche, biografiche, teoriche, didattiche e pratiche di quest'arte*, prima traduzione italiana a cura di Antonio Mainardi, Presso gli editori Fratelli Negretti, Mantova 1844, vol. II, p. 500).

¹⁴ Di fatto, essa viene a corrispondere alla scissione brandiana di materia come aspetto (si veda il testo di P. Marconi, *Materia e significato. La questione del restauro architettonico*, Laterza, Bari 1999). Diversamente da quanto strettamente inteso da Marconi, Umberto Eco rammenta che l'architettura può essere considerata come un sistema di segni, che vanno caratterizzati. Nel segno architettonico vi è la pre-

Però, non bisogna mai dimenticare che durante l'intervento si fa e si scrive la storia all'interno e in corrispondenza dell'epidermide del manufatto, compresa quella statica, con tutte le implicazioni che questo comporta per la costruzione in termini di risposta prestazionale nel tempo. La materia viene a costituire non solo veicolo costitutivo, ma anche «forma formante ed, insieme, forma formata», *res* «concreta, tangibile, e però insostituibile, nel suo stesso deperimento, poi nell'inevitabile rovina (di cui, alla fine, va preso doverosamente atto, dopo aver tentato ogni cura), in quanto deposito, inesauribile e irripetibile, di valori»¹⁵.

Pertanto, il concetto di *struttura* è una primaria parte costitutiva del linguaggio formativo dell'architettura. Se viene spogliata della componente strutturale, l'architettura non sussiste e diventa priva di significato¹⁶: è questa la ragione per cui, nel campo degli stu-

di storico-critici di architettura, si ritiene che il ricorso al termine ed alla nozione di struttura rientri in un più generale tentativo di rinnovamento metodologico delle discipline umanistiche, volto ad assicurarne una rifondazione su base scientifica, per offrire maggiori garanzie di rigore e verificabilità agli studi stessi¹⁷.

Il termine struttura viene dal latino *structura*, derivato dal verbo *struere*, "costruire". Ha quindi in primo luogo un senso architettonico, che designa il modo in cui è costruito un edificio (matericamente inteso), ma indica anche il modo con cui le parti di un tutto sono disposte tra loro¹⁸. Estendendo il concetto, essa costituisce il particolare legame di un edificio, cioè di un *unicum*, ma è pure legata alla materia plasmandone le forme¹⁹.

In tale accezione, la parola designa nel contempo: un insieme/sistema; le parti di questo insieme/sistema; i

senza di un significante, il cui significato è la funzione che esso rende possibile. In tale frangente, gli elementi segnici esistono almeno sotto forma di accadimenti fisici osservabili; la storia non fa altro che riempire di segni e di interpretazioni successive questi fatti fisici osservabili, continuando a considerarli come segni, per quanto appaiono ambigui e misteriosi. I soli oggetti concreti con cui si ha a che fare sono gli oggetti architettonici in quanto forme significanti. L'oggetto d'uso è il significante di quel significato esattamente e convenzionalmente denotato che è la sua funzione. Il principio che la forma segue la funzione, significa che la forma dell'oggetto non solo deve rendere possibile la funzione, ma deve denotarla in modo così chiaro da renderla desiderabile oltre che agevole. Infatti, la forma denota la funzione solo sulla base di un sistema di attese e di abitudini acquisite, e dunque sulla base di un codice. Tuttavia il codice geometrico non appartiene solo all'architettura. Il fatto che l'architettura sia descrivibile sulla base di un codice geometrico non porta a riconoscere che l'architettura in quanto tale si fondi sul codice geometrico, bensì essa risulta spesso complicata da un insieme di relazioni. Del resto, le strutture possono essere distinte fra loro, oltre che per la forma, anche per la particolare sollecitazione a cui sono sottoposte (per maggiori approfondimenti si rimanda ai testi di Umberto Eco, *La struttura assente. La ricerca semiotica e il metodo strutturale*, Edizioni Bompiani, Milano 1968 e *I limiti dell'interpretazione*, Edizioni Bompiani, Milano 1990).

¹⁵ P. Fancelli, "La struttura ... presente. Introduzione allo studio della storia del consolidamento" in P. Rocchi (a cura di), *Trattato sul Consolidamento*, Mancosu Editore, Roma 2003, p. A 7.

¹⁶ Tanto più considerando che in una costruzione in muratura non è facile definire quale sia l'elemento portante e quello portato, per cui tutto è struttura. Come ricorda Salvatore Di Pasquale, nella definizione stessa di "struttura muraria", «in molti casi, se non addirittura nella loro generalità, riesce impossibile estrarre dal problema dato la struttura così come si è abituati a fare allorché si progetta l'organismo resistente di un moderno edificio. Nel caso di restauro dei monumenti e dell'edilizia storica, struttura e architettura sono spesso la stessa cosa; e, poiché, esse sono fatte di pietra o mattoni ed hanno forme del tutto particolari non contemplate nelle tipologie a noi abituali ed hanno dimensioni di tutto rispetto e spessore relativi per nulla trascurabili, ben si comprende in quali difficoltà ci si imbatte» (S. Di Pasquale, "Scienza delle costruzioni e restauro dei monumenti" in *Restauro. Quaderni di restauro dei monumenti e di urbanistica dei centri storici*, Anno X, n. 56-57-58, luglio-dicembre 1981, p. 159). Invece Pier Lui-

gi Nervi, illustrando le caratteristiche di strutture in acciaio, strutture antisismiche di concezione contemporanea, afferma: «in edifici di grandi dimensioni o di particolari esigenze tecnico-costruttive la struttura resistente può acquistare una così preminente importanza da diventare un essenziale elemento architettonico di tutta l'opera. In questi casi si può parlare di vera e propria *architettura strutturale* quale specifico settore del grande campo architettonico. L'architettura strutturale deve corrispondere a ben precise condizioni che si possono così definire: a) rispondere ad una autentica necessità statica ed essere da questa determinata; b) rendere visibile e comprensibile, all'esterno o all'interno dell'edificio, lo schema statico e costruttivo; c) denunciare francamente il materiale con il quale la struttura è eseguita e trovare nelle caratteristiche tecnologiche del materiale stesso gli spunti e i modi dell'insieme e dei particolari» (*Enciclopedia Italiana di Scienze, Lettere ed Arti 1949-1960*, Istituto della Enciclopedia Italiana fondata da Giovanni Treccani, Roma MCMLXI, Terza Appendice M-Z, p. 858). Si deduce così che il termine struttura, ha acquistato l'attuale significato di "parte della costruzione destinata a svolgere compiti statici" solo verso la seconda metà dell'Ottocento, grazie alle suggestioni prodotte dalle prime grandi costruzioni metalliche, che contribuirono alla diffusa idea della certezza di poter distinguere in una costruzione ciò che è struttura da ciò che non lo è. Capire nella costruzione muraria cosa è la veramente struttura, porta a distinguere quelle che sono discretizzazioni patologiche da quelle fisiologiche, con conseguenze non irrilevanti nella prassi del consolidamento.

¹⁷ Si rimanda ai contenuti dei capitoli 4 e 9 nel volume I del presente Manuale, relativamente all'importanza della ricerca storica ai fini di un corretto restauro.

¹⁸ Tanto che in architettura si intende per struttura sia la *distribuzione delle parti di una costruzione*, considerate nei rapporti e nelle proporzioni reciproche, sia *l'insieme degli elementi costruttivi costituenti l'ossatura di un manufatto*, o anche una parte comunque individuata di tale complesso; essa può essere *semplice* (come un muro, una trave, un pilastro etc.), o *complessa* (come ad esempio l'ossatura di un fabbricato, l'impalcato di un ponte, una travatura reticolare etc.), ove generalmente la struttura complessa è ottenuta dall'unione di più strutture semplici.

¹⁹ Si vedano i contenuti del capitolo 9 nel volume I del presente Manuale a proposito delle categorie qualitative aristoteliche (*habitus, dispositio, figura e forma*).

rapporti di queste parti tra loro (quindi, i rapporti di organizzazione dell'insieme/sistema e la particolare disposizione delle parti di un tutto). La struttura individua un'«entità autonoma di dipendenze interne»²⁰, e, «in contrapposizione ad una semplice combinazione di elementi», è vista come «un tutto formato da elementi solidali, tali che ciascun dipenda dagli altri e non possa essere quello che è se non in virtù della relazione con gli altri»²¹: questo significa che la struttura è intesa come una *definizione* dell'oggetto, ma anche una *costruzione informatrice* dell'oggetto.

Nella metà del XIX secolo viene fornita una moderna definizione di struttura nel *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e au XVI^e siècle*, laddove Viollet-le-Duc affronta il fenomeno architettonico in termini di sistemi, più o meno legati e coerenti, e tali che una modifica apportata ad una qualunque delle loro parti non può non avere effetti e ripercussioni in altri punti dell'organismo costruttivo. In esso l'autore considera gli elementi come unità funzionali a valore differenziale in base alle relazioni d'implicazione e d'esclusione, di compatibilità e di incompatibilità che intrattengono con le altre, tanto da riconoscere un'organizzazione gerarchica della sintassi architettonica e ricercare il senso dell'edificio architettonico a livello del sistema complessivo, anziché degli elementi.

Se alla base dell'indagine chimica sulla struttura dei composti è la conoscenza di come due o più atomi possano restare uniti fra loro, formando un legame chimico, per cui la conoscenza della struttura dei com-

posti viene ad essere l'elemento più importante per la comprensione del fenomeno delle reazioni chimiche, allo stesso modo in architettura gli elementi costituiscono la base del sistema dei nodi strutturali che definisce l'organismo architettonico²², dettando quindi una precisa definizione di struttura come essenza della *costruzione*²³: la capacità di valutazione dell'interazione tra singolo elemento ed organismo strutturale, e quindi la loro relazione, vincola il giudizio sulle prestazioni della fabbrica e sulle deficienze in essa insite; tale capacità di valutazione delle prestazioni strutturali scaturisce pertanto dall'attenta osservazione delle modalità con cui l'edificio è costruito.

La parola stessa, come abbiamo visto, indica un rigoroso collegamento tra diverse componenti. Esiste così il tema della connessione tra struttura e strutture: gli elementi, non soltanto sono fattori nel vivo corpo di un assetto organico, ma sono come dei moduli in grado di generare sistemi ulteriori (qui affini), sia verso l'infinitamente piccolo che verso l'infinitamente grande. Del resto, come si ricorda ancora una volta attraverso le parole del Battaglia²⁴, con struttura si intende generalmente tanto la costruzione di un edificio, quanto la stessa composizione e distribuzione complessiva ed organica degli elementi architettonici costitutivi e funzionali di una costruzione.

Quindi, rispettare la struttura significa non soltanto calibrare gli interventi laddove necessario, ma anche che non tutte le tecniche ed i materiali possono essere impiegati indifferentemente, sempre ed in ogni caso²⁵, come pure non è detto si debbano forzatamente

²⁰ L. Hjelmslev, *Essai linguistiques*, Nordisk Sprog-og Kulturforlag, Copenaghen 1959, p. 100.

²¹ A. Lalande, *Vocabulaire de philosophie*, Liviana, Padova 1949, voce «Structure», pp. 1010-1011.

²² Come accennato, se riferito al campo linguistico, il termine struttura può essere assimilato a quello di *organizzazione* e di *sistema*, che racchiude degli elementi, che a loro volta costituiscono l'essenza della *concezione strutturale* (si veda il saggio di Benveniste in R. Bastide (a cura di), *Usi e significati del termine "struttura" nelle scienze umane e sociali*, Bompiani, Milano 1965, pp. 27-35): il modo di essere di ogni elemento dipende dalla struttura dell'insieme e dalle leggi che lo governano.

²³ Se Nicolò Tommaseo annotava nei suoi scritti che «costruzione è atto; struttura l'effetto della costruzione», individuando così un'efficace compresenza di fini e mezzi, che già nella valutazione aristotelica e poi in quella hegeliana era stata indicata come necessaria alla legittimità di un'architettura (N. Tommaseo, *Nuovo dizionario dei sinonimi della lingua italiana*, Bietti & C., Nuova Edizione Napoletana, Bideri 1830), Viollet-le-Duc precisa che l'architettura è sintesi di scienza e arte, ma comunque i due concetti risultano ben distinti: infatti «la costruzione è una scienza, è anche un'arte, in altre parole il costruttore necessita del sapere, dell'esperienza e della intuizione naturale. [...] L'architettura e la costruzione devono essere insegnate o praticate

simultaneamente: la costruzione è il mezzo, l'architettura il risultato; e tuttavia vi sono opere di architettura che non possono essere considerate come costruzioni, vi sono certe costruzioni che non possono essere annoverate tra le opere di architettura. Alcuni animali costruiscono, gli uni cellette, altri nidi, ponticelli, gallerie, specie di capanne, reti di fili: sono certo delle costruzioni, non è architettura». Del resto, «per l'architetto costruire è impiegare i materiali in ragione delle loro qualità e della loro propria natura, con l'idea preliminare di soddisfare un bisogno con i mezzi più semplici e più solidi, di dare alla cosa costruita l'apparenza della durata, proporzioni convenienti sottoposte a certe regole imposte dai sensi, dal ragionamento e dall'istinto. I metodi del costruttore devono dunque variare in ragione della natura dei materiali, dei mezzi di cui dispone, delle necessità che deve soddisfare e della civiltà in seno alla quale nasce» (E. Viollet-le-Duc, *L'Architettura ragionata*, Jaca Book, Milano 1982, p. 19).

²⁴ S. Battaglia, *Grande Dizionario della Lingua Italiana*, UTET, Torino 2000, vol. XX, pp. 413-414.

²⁵ Specie di nuovi prodotti e formulati va sempre verificata l'efficacia, i loro limiti, i loro effetti collaterali, considerando non solo gli esiti di laboratorio, ma anche le operazioni e le prestazioni sul campo, oltre agli effetti a lungo termine. La Carta di Cracovia rammenta che «il ruolo delle *tecniche* nell'ambito della conservazione e del restauro è strettamente legato alla ricerca scientifica interdisciplinare sugli specifici

sempre disporre dei rinforzi, tutt'altro. Non devono esistere scelte a-prioristiche; si possono utilizzare ampie gamme di rimedi, purché sempre coerenti ed appropriati, rispettosi e non stravolgenti il sistema strutturale (ma non solamente di esso) su cui si agisce ed, anzi, solo coadiuvanti ed integranti quest'ultimo, mai sostitutivi nei riguardi del medesimo²⁶. Questo implica che vi siano dei criteri di massima cui gli interventi di restauro strutturale debbono sottostare, pena il rischio di ledere l'unitarietà del manufatto sia in termini di materiali, sia in termini formali, sia in termini di ossature.

Del resto, come ricorda Paolo Fancelli, «i principi generali della conservazione postulano senza dubbio, tra l'altro, il rispetto della verità strutturale del monumento. E ciò non nel senso di un legame meccanico fra struttura e aspetto dell'opera, ma piuttosto nel senso di una considerazione rigorosa dell'elemento strutturale stesso quale veicolo di valori assolutamente fondanti dell'edificio. Pertanto, gli interventi a riguardo quali che essi siano - che adottino tecniche tradizio-

nali o innovative, non importa -, è importante che coadiuvino il sistema statico del monumento, corroborandolo, non dunque sostituendone il potere portante, ma anzi contribuendo a farlo sopravvivere il più possibile integro, intatto e in pieno esercizio. E ciò valutando la materia, la struttura, la tettonica quali documenti storici in sé, ma pure come supreme e incredibili valenze dell'estrinsecazione architettonica in quanto tale, vale a dire come nessi pur mediati, ma cogenti e biunivoci, tra espressività e concezione statica, tra risultato e condizioni che, insostituibili, ne consentono la piena ostentazione»²⁷. E, per la verità strutturale del manufatto, si evince che «è necessario non lasciarsi sopraffare dalle possibilità tecnologiche in nostro possesso [...], giacché un edificio sarà tanto meglio restaurato quanto più si comporterà in modo identico anche strutturalmente, al suo comportamento iniziale»²⁸. Ne consegue che «il restauro statico, oggi, si configura e s'identifica nella conservazione della concezione strutturale dei monumenti; concezione strutturale che dev'essere preventivamente individuata con

materiali e sulle specifiche tecnologie utilizzate nella costruzione, riparazione e restauro del patrimonio costruito. L'intervento scelto deve rispettare la funzione originale e assicurare la compatibilità con i materiali, le strutture e i valori architettonici esistenti. I nuovi materiali e le nuove tecnologie devono essere rigorosamente sperimentati, comparati e adeguati alle reali necessità conservative. Quando l'applicazione *in situ* di nuove tecniche assume particolare rilevanza per la conservazione della fabbrica esistente, è necessario prevedere un continuo monitoraggio dei risultati ottenuti, prendendo in considerazione il loro comportamento nel tempo e la possibilità della eventuale reversibilità. Dovrà essere stimolata la conoscenza dei materiali e delle tecniche tradizionali e per la loro conservazione nel contesto della moderna società, essendo di per se stesse una componente importante del patrimonio» (G. Cristinelli (a cura di), *La Carta di Cracovia 2000. Principi per la conservazione ed il restauro del patrimonio costruito*, Marsilio Editori, Venezia 2002, pp. 185-186, punto 10). Anche il Comitato Nazionale per la Prevenzione del Patrimonio Culturale dal Rischio Sismico, nel 1986, afferma che offre migliori garanzie il ricorso a materiali e tecniche compatibili dal punto di vista fisico-chimico e meccanico agli originali, con severo esame critico interdisciplinare. Analogamente si esprimono le *Raccomandations* di Skopje del 1988: «high level of resistance can be achieved by using the same building material and technology of the existing historical structures». Spesso però non si tratta tanto di scegliere tra tecniche pre-moderne o moderne, ma tra tecniche *appropriate* per quell'intervento. Sta al progettista, scegliere e magari adattare, fin quasi a reinventarle, le tecniche di intervento. Si tratta di quanto sostenuto anche da De Angelis D'Ossat, per cui se è vero che l'intervento è in molti casi intimamente connesso all'essenza ed alla figuratività dell'opera, che è tanto facile compromettere o snaturare, è pure necessario cogliere l'essenza e lo spirito del monumento, non tanto per decodificarne i messaggi, quanto per prevederne la disponibilità a moderni interventi e per saggiarne gli accordi ed i rapporti modal di compatibilità dialettica.

²⁶ «Il punto focale del restauro statico oggi non è tanto la tecnica d'intervento quanto la conservazione della concezione strutturale del

manufatto che sarà discriminante per i materiali e le tecniche stesse d'intervento; conservazione di una concezione strutturale che in primo luogo, ovviamente, dev'essere individuata con certezza» (A. Buti, G. Galliani, «Il restauro statico dei monumenti: alcune considerazioni per una metodologia d'intervento» in *Restauro. Quaderni dei monumenti e di urbanistica dei centri storici*, n. 70, novembre-dicembre 1983, p. 8).

²⁷ P. Fancelli, «Relazione alle Giornate sul tema» in *Gli Interventi sul Patrimonio Monumentale e Artistico dopo il sisma nell'Umbria e nelle Marche. Dall'emergenza alla progettazione*, Roma 22-23 giugno 1998, Roma 1999, p. 38.

²⁸ P. Sanpaolesi, *Discorso generale sulla metodologia del restauro dei monumenti*, Editrice Edam, Firenze 1973, p. 81. Così, specifica Sanpaolesi, «è qui opportuno precisare che anche se tale comportamento, visto alla luce delle nostre attuali conoscenze di statica, presenta manifesti difetti o anomalie, questi ultimi non vanno «corretti» se non lì dove è necessario farlo ad evitare danni e dissesti irreparabili, [...] giacché tali anomalie fanno parte integrante e documentaria dell'edificio. Un errore di valutazione frequentissimo è infatti quello di far risiedere la bellezza e l'importanza dell'edificio nelle sue decorazioni esterne o interne, trascurando gli intimi dati strutturali». Questo motiva la necessità di una riscoperta delle antiche tecniche costruttive, che vanno riabilite durante l'intervento di restauro strutturale, svelando così la concezione strutturale dell'edificio, anche perché «la storicità della tecnica costruttiva è un elemento prioritario per l'esame strutturale: non si può controllare la stabilità dell'opera se non si conosce come essa sia stata costruita; non si può modellare una struttura ed eseguirne uno studio meccanico se non si possiede con piena consapevolezza la tecnica con cui è realizzata. Anche gli effetti del degrado non possono essere giudicati senza la consapevolezza della matrice su cui agiscono. La storia delle tecniche costruttive è quindi un capitolo indispensabile per l'intervento strutturale; lo strutturista non può prescindere; egli deve assolutamente conoscerlo e per ciò deve partecipare a produrlo» (A. Giuffrè, «L'intervento strutturale quale atto conclusivo di un approccio multidisciplinare» in M. Piana (a cura

certezza mediante una serie di operazioni concatenate metodologicamente»²⁹. Per questo, non si parla più di «sostituzione dell'organismo edilizio statico di un vecchio edificio con un organismo statico diverso, ma restituzione alle vecchie strutture dei loro compiti e delle loro caratteristiche strutturali con l'aiuto, dove occorra, di strutture integrative, [...] prevedendo l'utilizzazione dei mezzi più avanzati, purché da tale impiego non derivi mai una compromissione delle caratteristiche formali e strutturali dell'opera stessa poiché questo significherebbe ritornare per altra via alla creazione di quei falsi architettonici, caratteristici della prima generazione di restauri ormai universalmente deprecati e rifiutati»³⁰: donde lo sviluppo di ricerche su solai in legno, strutture murature portanti, volte etc., per effettuare interventi di rinforzo compatibili, integrativi e collaboranti, non sostitutivi e neppure necessariamente nascosti.

Al di là di questo breve cenno di carattere generale, in cui sono state evidenziate alcune delle questioni legate alle problematiche strutturali nel restauro architettonico, vi sono precisi concetti e principi che bisogna rispettare quando ci si pone di fronte ad una costruzione esistente.

Lorenzo Jurina, in modo quanto mai efficace e sintetico, ricorda come tra i criteri fondamentali cui attenersi nel restauro strutturale degli edifici storici rientrano «al primo posto certamente la *necessità*. Al secondo la *non nocività*. Al terzo la corrispondenza tra il problema e gli strumenti adottati, e quindi l'*efficacia* del metodo usato. Il quarto, a pari merito, è rappresentato dalla *compatibilità*, la *durabilità*, la *ridotta invasività*, la *riconoscibilità*. In quinta posizione, ma solo in quinta, la *reversibilità*, o qualcosa che le assomigli. Seguono la *specificità* della soluzione, la sua *leggerezza*, la migliorata *fruibilità* del bene e tanti altri aspetti legati al singolo caso, in grado di trasformare un intervento a posteriori, non previsto né desiderato, in un vero e proprio progetto. Qualcuno potrebbe aggiungere eleganza, sensibilità e buon gusto, ma non sempre ciò è dato ai comuni mortali»³¹, oltre

alla possibilità di controllare l'intervento. E, soprattutto per quanto riguarda l'intervento di consolidamento, è necessario che esso *conviva* con la struttura antica, diventandone parte integrante, essendo dettato, più di ogni altro, da ragioni di occorrenza. Del resto, soprattutto nel caso dell'intervento strutturale, si ha una modifica, più o meno spinta, della realtà, a seconda di come viene valutato il rispetto dell'esistente.

Come ricorda Giovanni Carbonara³² ed è comunemente accettato, ogni operazione di restauro dovrebbe garantire:

- la conservazione dell'*autenticità*, per cui le nuove aggiunte dovrebbero essere, in linea di massima, riconoscibili a vista e distinte dall'antico quanto è sufficiente per non sacrificare inutilmente l'unità figurativa dell'edificio; inoltre, le parti originali, vanno mantenute nella loro consistenza originale e non celate alla vista, neanche per il lodevole intento di preservarle;
- l'*attualità espressiva*, come conseguenza dei criteri di "autenticità" e "distinguibilità", per evitare ogni tentativo di imitazione in stile o di falsificazione storicistica (quindi si sperimentano controllate e discrete opportunità d'espressione attuale per quelle aggiunte e modifiche minime ed indispensabili che è necessario apportare);
- la *compatibilità meccanica, chimico-fisica e costruttiva* con la preesistenza (per cui i materiali aggiunti per integrazioni o riparazioni dovrebbero essere uguali agli antichi o, se moderni, possedere analoghe caratteristiche; ciò determina la qualità dell'intervento, assicurando all'insieme omogeneità di comportamento nel tempo, onde evitare, ad esempio, differenti dilatazioni termiche e conseguenti distacchi o scorrimenti di materiali, stati di coazione, sovraccarichi localizzati e disomogeneità meccaniche, formazione di elementi eccessivamente resistenti, accelerazione dei fenomeni di degrado al margine delle zone rinnovate);
- la *durabilità*, che dovrebbe essere sostanzialmente analoga per le parti antiche e quelle moderne;

di), *Il consolidamento strutturale dell'edilizia storica*, Quaderni dei seminari sul restauro architettonico n. 1, Centro Internazionali di Studi Andrea Palladio, Vicenza 1995, n. 8).

²⁹ A. Buti, G. Galliani, "Il restauro statico dei monumenti: alcune considerazioni per una metodologia d'intervento" in *Restauro. Quaderni dei monumenti e di urbanistica dei centri storici*, op. cit., p. 10.

³⁰ S. Bonamico, "La filosofia del recupero dei beni edificati" in *Il consolidamento delle costruzioni*, Udine, n. 1, 1983, pp. 6-7.

³¹ L. Jurina, "La possibilità dell'approccio reversibile negli interventi di consolidamento strutturale (ovvero un inno al tirante e puntone)" in Atti del XIX Convegno Scienza e Beni Culturali, *La reversibilità nel restauro. Riflessioni, esperienze, percorsi di ricerche*, Bressanone 1-4 giugno 2003, Edizioni Arcadia Ricerche, Padova 2003, p. 275.

³² Oltre a quanto precedentemente citato, si veda il testo diretto da G. Carbonara, *Trattato di restauro architettonico*, UTET, Torino 1996, vol. III, pp. 507-525.

- l'efficacia in termini meccanici, coniugazione, tra l'altro, dei criteri di compatibilità e durabilità³³;
- il *minimo intervento*, per cui si devono escludere tutti i lavori che non sono strettamente necessari, finalizzando l'intervento alla massima conservazione di materia e forma;
- la *reversibilità* almeno potenziale delle opere previste od attuate (per esempio questo comporta cercare di lavorare "per via di aggiungere" piuttosto che "per via di togliere", essendo l'aggiunta di regola rimovibile, mentre la rimozione non lo è. Per il medesimo criterio, i saggi diagnostici dovrebbero essere non invasivi e non distruttivi).

In sostanza, ciò significa che la concezione dell'intervento strutturale dipende dalla lettura e dall'importanza storico-architettonica dell'edificio, dall'analisi dello stato di conservazione, e, infine, dai risultati dell'indagine storica, necessaria, per una più corretta interpretazione del fenomeno e delle cause che hanno condotto al dissesto riscontrato³⁴. L'opportunità di una simile procedura è dettata dall'obiettivo di assicurare l'efficacia nel tempo dell'intervento, riuscendo contestualmente a limitarne al minimo l'invasività, formale e strutturale.

Tuttavia bisogna sempre tenere a mente che ogni intervento comporta un'alterazione dello stato esistente; pertanto, a fronte di alcuni benefici, vi sono sempre dei costi, in termini di alterazione dei caratteri storico-architettonici dell'edificio³⁵, come per esempio:

- il dover praticare dei fori, pur sapendo che essi nel tempo possono rivelarsi pericolosi veicoli d'infiltrazioni e un punto di origine preferenziale per la disseminazione di lesioni;
- la necessità dell'inserimento di elementi di natura o rigidità in parte diversa da quella del manufatto, con la possibilità che si inneschino coazioni interne;
- l'esecuzione di interventi che non sono sempre di agevole lettura sulla superficie, il che comporta il rischio di perderne le tracce, traendo in errore co-

- loro che opereranno in futuro sull'edificio;
- la reale capacità dell'intervento di ricostituire le risorse di resistenza perdute e di riparare in maniera efficace il danno, senza causare nuove discontinuità;
- l'entità della componente distruttiva propria dell'intervento;
- la compatibilità sotto vari aspetti (fisica, chimica e strutturale) tra i materiali e le tecniche costruttive proprie della parte danneggiata ed i materiali e le tecniche adottate per la riparazione;
- il grado di invasività e la potenziale possibilità di rimozione o ripetibilità dell'intervento compiuto, nel caso esso si riveli o diventi nel tempo inefficace od incompatibile.

Ne discende che l'intervento di consolidamento deve mirare a:

- massimizzare la permanenza della materia autentica del manufatto, limitando le trasformazioni;
- riconoscere la variabile tempo come segno che aggiunge valore alla fabbrica, la quale, frutto di un palinsesto, è memoria storica in se stessa;
- utilizzare conoscenze la cui efficacia sia oggettiva e strettamente correlata alla patologia specifica dell'edificio;
- formulare decisioni sulla scorta di valutazioni tecniche supportate da una approfondita conoscenza storica e tecnico-scientifica;
- realizzare interventi minimi, riconoscibili e reversibili, prevalentemente di aggiunta o di affiancamento dell'esistente in maniera da renderne possibile il monitoraggio nel tempo, anziché ricorrere a drastiche sostituzioni;
- stabilire un corretto monitoraggio nel tempo, con periodiche e puntuali manutenzioni.

Ciò premesso, nelle schede³⁶ che seguono sono illustrati alcuni tra i numerosi interventi di restauro strutturale che è possibile attuare sulle strutture murarie

³³ L'Eurocodice 8 stesso ricorda che «l'intervento dovrebbe essere efficace, e la sua efficacia dovrebbe essere dimostrata per mezzo di prove qualitative o quantitative» (Eurocodice 8 del 31 ottobre 1999. *Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture. Parte 1-4: Regole generali – Rafforzamento e riparazione degli edifici* (UNI ENV 1998-1-4), Appendice F, punto F.5, paragrafo 2 a).

³⁴ Per un maggiore approfondimento, si rimanda ai contenuti del capitolo 4 nel volume I del presente Manuale.

³⁵ Circolare del Ministero dei Beni Culturali e Ambientali 12 marzo 1991,

n. 1841, punto 11.

³⁶ Le schede costituiscono una rielaborazione ed un ampliamento del materiale illustrato in C. Donà, *Sicurezza strutturale e conservazione del costruito storico. Ricerche per una reciproca conciliabilità*. Dottorato di ricerca in Restauro - XVIII ciclo, SSAV, Venezia 2006, tutor: F. Doglioni; relatori: A. Borri, F. Doglioni; correlatore: G. Mirabella Roberti. Tale lavoro di revisione ed ampliamento è stato svolto in collaborazione con l'ing. Andrea Giannantoni. Si ringrazia il restauratore Dino Sperandio per le integrazioni apportate in alcune schede,

di edifici storici, nonché gli strumenti volti a privilegiare le tecniche capaci di bilanciare le istanze della sicurezza con quelle della conservazione, discernendo opportunamente tra lavori necessari e superflui. Particolare attenzione viene rivolta alla ricerca di metodologie operative in grado di aumentare l'efficacia degli interventi ed al tempo stesso di minimizzare i danni, calibrando gli interventi sull'effettiva entità dei problemi in essere.

Non si tratta, quindi, di un compendio e di una redazione acritica e compilativa a spiegazione di operazioni entrate ormai nella prassi progettuale e di cantiere, quanto piuttosto di correlare risultati di sperimentazioni scientifiche, comprovanti o meno l'affidabilità di una soluzione tecnica, con quanto riconosciuto attraverso i criteri invalsi ed accettati nel mondo del restauro.

Per delineare un percorso critico relativo al singolo intervento, ogni scheda è stata articolata in vari punti. Nella prima voce (*descrizione*) viene inquadrato l'intervento dal punto di vista tecnico, con un successivo approfondimento dei *campi di applicazione* più idonei cui è rivolto l'intervento stesso. Seguono le voci *materiali e strumenti impiegati*, *tecniche di esecuzione* e *precauzioni operative* da adottare durante l'intervento, ove, oltre alla descrizione delle singole fasi operative, sono evidenziati i diversi materiali impiegati e ciò che comporta il loro utilizzo dal punto di vista meccanico e conservativo. A tale scopo, è stata approntata una voce specifica sull'*affidabilità tecnica dell'intervento*, in cui sono riportati i risultati di pro-

ve sperimentali e le osservazioni tecniche sull'analisi di fattibilità operativa e sui miglioramenti attesi, in base ai quali si può dare una risposta anche relativamente al rispetto dell'autenticità del comportamento strutturale, quindi sul rispetto o meno del comportamento proprio della costruzione³⁷. Va ricordato tuttavia che la sperimentazione, a monte di qualsiasi intervento sulla preesistenza antica, non risulta sempre esaustiva e lo stesso trasferimento di conoscenze dal laboratorio scientifico alla pratica della conservazione non è così immediato come potrebbe sembrare.

Le *problematiche rispetto alle esigenze della conservazione* sono rivolte alla valutazione specifica degli interventi, come risposta a precisi assunti propri del restauro, in merito alla "compatibilità fisico-chimica, meccanico-strutturale e costruttiva", alla "distinguiabilità"³⁸, alla "durabilità"³⁹, al "minimo intervento/minore invasività" (conservazione di materia e forma), alla "reversibilità"⁴⁰, alla "leggibilità della stratigrafia storica", quindi al significato che tali operazioni tecniche implicano e rivestono per la cultura costruita, di cui si lascia testimonianza materiale. Questo è importante perché ciascuna scelta progettuale va adeguatamente indagata per i possibili effetti collaterali che può comportare. In tal senso, nella consapevolezza del significato culturale e materiale del manufatto, bisogna sempre valutare con attenzione le conseguenze di ogni alterazione dell'architettura (come ad esempio, lo smusso degli angoli di un pilastro o la rimozione dell'intonaco o la scarnificazione dei giunti di malta). Infine, ogni scheda riporta un ampio

nella parte relativa alle problematiche rispetto alle esigenze della conservazione e per il fondamentale contributo alla scheda M14 si ringraziano i professori Antonio Borri, Marco Corradi ed Emanuela Speranzini.

³⁷ Ad esempio, pareti armate e cappe estradossali, invece di collaborare, mirano alla defunzionalizzazione del costruito storico. Oltre alla corrosione dei ferri, si ha una mancanza di riduzione della vulnerabilità dell'edificio storico a causa delle elevate rigidità delle strutture cementizie, le quali risentono maggiormente delle forze d'inerzia messe in atto dal sisma. Inoltre, si hanno importanti modifiche all'impaginato architettonico causate dagli elevati spessori che alterano la lettura di partiture ed oggetti; senza tralasciare l'eliminazione degli strati di intonaco preesistenti, sostituiti da impasti cementizi della moderna cultura industriale.

³⁸ La riconoscibilità degli interventi, che possono avere un linguaggio figurativo autonomo rispetto all'edificio, implica anche un controllo visivo sulle modifiche alla visibilità ed alla percezione del manufatto, conseguenti agli interventi. In generale, gli interventi di affiancamento, se non ostentati ed opportunamente contenuti, presentano impatti visivi e di invasività materica minori rispetto ad interventi di radicale sostituzione e ricostruzione.

³⁹ Proprio l'aspetto della durabilità pone pesanti problematiche per la

valutazione dell'efficacia di alcuni materiali di rinforzo nel tempo e, quindi, per l'attribuzione a classi di vulnerabilità degli stessi (ad esempio, intonaci armati, materiali fibrorinforzati, resine epossidiche). Del resto, è la prova del tempo che può permettere scelte future più consapevoli in termini di efficacia e correttezza. Pertanto, le prove di invecchiamento effettuate per valutare la durabilità dei nuovi materiali, non possono simulare, se non in minima parte, il delicato equilibrio tra muratura ed ambiente, difficilmente riproducibile in laboratorio.

⁴⁰ La reversibilità dovrebbe garantire la possibilità di rimozione e sostituzione dell'intervento senza danni eccessivi. Pertanto, maggiori sono i rischi dell'insorgere di forme di incompatibilità (meccanica, fisico-chimica) tra l'elemento inserito e la struttura esistente, oppure la possibilità del verificarsi di una limitata durabilità della nuova inserzione, maggiore deve essere l'attenzione a consentirne l'asportazione futura. Un affiancamento non invasivo, che riduce gli impatti tramite ancoraggi puntuali, deve essere il principale requisito per tecniche e materiali innovativi, la cui durabilità e compatibilità nel tempo devono essere attentamente verificate. Invece per materiali e tecniche la cui affinità costruttiva con i modi della fabbrica muraria originaria è accertata, la reversibilità è un fattore di minore importanza, considerando che questo non è un requisito proprio della tradizione costruttiva antica.

apparato bibliografico (voci *riferimenti normativi e bibliografia*), a cui si rimanda per ulteriori precisazioni tecniche relative alla tipologia di intervento considerata.

Uno spunto di riflessione, dunque, sulle implicazioni che operazioni tecniche più o meno frequenti consolidate possono comportare sul costruito storico, nonché sulla loro reale affidabilità ed efficacia.

- ▶ **Analisi strutturale per il recupero antisismico** con *CD Rom* di G. Cangi, M. Caraboni, A. De Maria
- ▶ **Manuale del recupero strutturale e antisismico** con *CD Rom* di G. Cangi
- ▶ **Trattato sul consolidamento e restauro degli edifici in muratura** - 2 VOL. con *CD Rom* di M. Mariani
- ▶ **Sistemi voltati in muratura: teoria e applicazioni** con *CD Rom* di M. Paradiso, G. Tempesta, F. Pugi, S. Galassi
- ▶ **Edifici in muratura: progettazione degli interventi post sisma** con *CD Rom* Regione Molise
- ▶ **Manuale per la riabilitazione e ricostruzione postsismica degli edifici** con *CD Rom* Regione Umbria
- ▶ **Il degrado dei materiali nell'edilizia** con *CD Rom* di S. Franceschi, L. Germani
- ▶ **Manuale operativo per il restauro architettonico** con *CD Rom* di S. Franceschi, L. Germani
- ▶ **Manuale del Recupero del Comune di Città di Castello** a cura di F. Giovanetti
- ▶ **Lezioni di scienza delle costruzioni** di A. Borri, F. Angotti
- ▶ **Consolidamento delle strutture lignee con l'acciaio** con *CD Rom* di M. Mariani
- ▶ Collana i **MANUALI DEL RECUPERO** edita dalla Dei Tipografia del Genio Civile

per informazioni www.build.it

- ▶ Il Manuale costituisce uno strumento di ausilio al progettista per:

- la conoscenza del costruito
- l'analisi della qualità muraria
- la definizione del comportamento meccanico
- la modellazione del comportamento strutturale della costruzione
- la scelta delle tecniche di intervento

alla luce della buona tecnica e delle indicazioni introdotte dalle Norme Tecniche per le Costruzioni.

L'opera - costituita da due volumi - riassume e organizza esperienze e ricerche svolte da vari gruppi di lavoro composti da ricercatori universitari e professionisti esperti nel settore del consolidamento e delle costruzioni in muratura.

Il secondo volume raccoglie oltre 40 schede relative ad interventi di restauro strutturale che è possibile attuare sulle strutture murarie di edifici storici, nonché gli strumenti volti a privilegiare le tecniche capaci di bilanciare le istanze della sicurezza con quelle della conservazione.

I CONTENUTI DELL'OPERA

Volume I

Aspetti metodologici

- le murature nei trattati storici
- il comportamento meccanico delle murature storiche
- la risposta strutturale degli edifici in muratura

Procedure operative

- il rilievo degli edifici in muratura
- metodi per la valutazione della qualità muraria
- procedure per la determinazione delle caratteristiche della muratura
- modellazione e calcolo delle costruzioni in muratura
- archi e volte in muratura
- il restauro strutturale del costruito storico

Volume II

Schede degli interventi sulle strutture e sugli elementi costruttivi:

- fondazioni
- murature
- volte e archi
- architravi

- ▶ **Il CD Rom contiene:**

- Esempi e metodi di calcolo

REQUISITI TECNICI

Win 2000 - Win XP - Win Vista - Win 7

Oltre al pacchetto Microsoft Office (Word/Excel)

€ 150,00 2 volumi indivisibili

ISBN 978.88.496.0403.0



9 788849 604030