



Copyright © Ulrico Hoepli Editore S.p.A. 2019
via Hoepli 5, 20121 Milano (Italy)
tel. +39 02 864871 – fax +39 02 8052886
e-mail hoepli@hoepli.it

www.hoepli.it

Tutti i diritti sono riservati a norma di legge
e a norma delle convenzioni internazionali

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15%
di ciascun volume/fascicolo dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68,
commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633.

Le fotocopie effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale
o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate a seguito
di specifica autorizzazione rilasciata da CLEARedi, Centro Licenze e Autorizzazioni per le
Riproduzioni Editoriali, Corso di Porta Romana n. 108, 20122 Milano,
e-mail autorizzazioni@clearedi.org e sito web www.clearedi.org

ISBN 978-88-203-9165-2

Ristampa:

4 3 2 1 0 2019 2020 2021 2022 2023

Copertina: Sara Taglialegne

Realizzazione editoriale: CompoMat S.r.l., Configni (Rieti)

Stampa: L.E.G.O. S.p.A., Stabilimento di Lavis (Trento)

Printed in Italy

Indice

Prefazione

1 Introduzione	1
1.1 Premessa	1
1.2 Tipologia delle strutture che possono essere interessate da un intervento di risanamento o adeguamento statico	1
1.3 Cause che portano alla necessità di un intervento di adeguamento statico o risanamento	2
1.4 Valutazione dello stato di fatto	4
1.4.1 Comportamento meccanico dei materiali costituenti la struttura	4
1.4.2 Tecniche costruttive adottate nella realizzazione della struttura	5
1.4.3 Valutazione dello stato di dissesto	6
1.4.4 Valutazione delle cause del dissesto	7
1.5 Strategie di intervento	18
1.5.1 Interventi di emergenza	18
1.5.2 Operazioni propedeutiche alla redazione del progetto di risanamento e adeguamento statico	19
1.5.3 Scelte progettuali	19
2 Le murature	25
2.1 Introduzione	25
2.2 Materiali costituenti	28
2.2.1 Elementi resistenti	28
2.2.2 Malte	33
2.3 Caratteristiche meccaniche della muratura	40
2.3.1 Resistenza a compressione	40
2.3.2 Resistenza a flessione	46
2.3.3 Legge costitutiva delle murature di mattoni pieni	47
2.3.4 Verifica a pressoflessione della muratura sotto i carichi massimi di esercizio ...	51
2.3.5 Comportamento statico degli edifici antichi in muratura	53
2.3.6 Verifica di elementi sottoposti a carichi concentrati	55
2.3.7 Resistenza a taglio	55
2.3.8 Resistenza al fuoco	57
2.3.9 Deformazione viscosa, ritiro e dilatazione termica	59
2.3.10 Classificazioni delle murature	60

2.4 Particolari costruttivi presenti nelle murature	72
2.4.1 Innessi tra murature	72
2.4.2 Legature finali	72
2.4.3 Aperture	73
2.4.4 Unioni di pareti ad altri elementi	75
2.5 Muratura armata	75
2.5.1 Introduzione	75
2.5.2 Muratura doppia con nucleo in calcestruzzo armato	76
2.5.3 Muratura con armatura diffusa all'interno della muratura	77
2.5.4 Muratura con armatura concentrata in pilastri	78
2.6 Muratura precompressa	79
3 Gli archi	81
3.1 Introduzione	81
3.1.1 Nomenclatura dell'arco	78
3.1.2 Geometria dell'arco	79
3.1.3 Materiali utilizzati per la costruzione degli archi	80
3.2 Statica dell'arco	82
3.2.1 Similitudine tra trave e arco	82
3.2.2 Arco a tre cerniere	83
3.2.3 Arco funicolare	84
3.2.4 Archi iperstatici	86
3.2.5 Cedimenti vincolari	97
3.3 Archi in muratura	99
3.3.1 Arco a spinta eliminata	100
3.3.2 Fondazioni e sottostrutture	101
3.3.3 Realizzazione degli archi in muratura	102
3.4 Piattabande	103
3.5 Volte e cupole	105
3.5.1 Tipologie di volte e cupole	105
3.5.2 Statica delle volte	108
3.5.3 Statica delle cupole	110
3.6 Travi parete	110
3.6.1 Similitudine di comportamento tra arco e trave parete in calcestruzzo armato	110
3.6.2 Considerazioni sulla definizione di trave parete	111
3.7 Analisi limite	112
3.7.1 L'analisi strutturale di un arco isolato	112
3.7.2 L'analisi strutturale di un arco non isolato	124
4 Gli stati fessurativi	127
4.1 Introduzione	127
4.1.1 Progressione del fenomeno	128

4.2 Stati fessurativi di travi e pilastri	129
4.2.1 Compressione e trazione centrata	129
4.2.2 Flessione	132
4.2.3 Flessione e taglio	134
4.2.4 Torsione	135
4.3 Risposta delle murature ai cedimenti vincolari	135
4.3.1 Le curve isostatiche	137
4.3.2 Cedimenti verticali	137
4.3.3 Cedimenti orizzontali	144
4.3.4 Traslazione inclinata	149
4.3.5 Deformazioni differite nel calcestruzzo	149
4.4 Stati fessurativi prodotti dalle forze	157
4.4.1 Carichi concentrati	157
4.4.2 Deformazione dei quadri isostatici in corrispondenza delle aperture	160
4.4.3 Spinte orizzontali	161
4.4.4 Spinte orizzontali oligocicliche (sismi)	163
5 Le opere provvisorie di sostegno	171
5.1 Introduzione	171
5.2 Legislazione	174
5.3 Carichi agenti sulle opere di sostegno	175
5.4 Puntelli metallici	177
5.4.1 Puntelli semplici	178
5.4.2 Torri e tavoli di sostegno	179
5.4.3 Puntelli di stabilizzazione e sostegno	180
5.4.4 Ponteggi per facciate	180
5.4.5 Coperture provvisorie	181
5.4.6 Controventamento e legame con opere esistenti	182
5.5 Puntelli in legno	183
5.5.1 Unione degli elementi in legno	186
5.6 Particolari di aggancio con l'opera esistente e il terreno	187
5.6.1 Vincolo al piede	187
5.6.2 Vincolo in testa	188
5.7 Verifiche di resistenza dei puntelli	188
5.8 Carene e cerchiature	191
6 Le misure in sito e in laboratorio	195
6.1 Introduzione	195
6.2 Misure su elementi in calcestruzzo	196
6.2.1 Determinazione delle caratteristiche meccaniche in sito	196
6.2.2 Determinazione delle caratteristiche meccaniche in laboratorio	203
6.2.3 Misure di valori diversi dalle caratteristiche meccaniche	205

6.3 Misure su elementi in muratura	206
6.4 Misure su elementi in acciaio	208
6.5 Misure su elementi lignei	208
6.6 Prove di carico e misure sulla struttura in servizio	208
7 Materiali specifici utilizzati nel consolidamento	211
7.1 Introduzione	211
7.2 Calcestruzzi e malte speciali	212
7.2.1 Calcestruzzi speciali	216
7.2.2 Malte speciali	219
7.3 Materiali compositi	222
7.3.1 Fibre	228
7.3.2 Matrici	230
7.3.3 Adesivi	232
7.3.4 Processi produttivi dei materiali compositi	234
7.3.5 Considerazioni conclusive	238
7.4 Resine caricate	238
7.4.1 Cariche	241
7.5 Il legno lamellare	241
7.5.1 Introduzione	241
7.5.2 La tecnica del legno lamellare	242
7.5.3 Il materiale e la produzione	251
7.5.4 Osservazioni finali	252
7.6 Connettori e chiodi chimici per calcestruzzo e legno	252
7.6.1 Introduzione	252
7.6.2 Tecnologia del fissaggio	261
7.6.3 Cenni sulla progettazione	262
7.7 Acciai inossidabili	262
7.7.1 Introduzione	262
7.7.2 Classificazione	264
7.7.3 Proprietà degli acciai inossidabili	265
7.7.4 Resistenza alla corrosione	266
7.7.5 Accoppiamento con acciaio al carbonio	266
7.8 Giunzioni meccaniche di barre d'armatura	266
8 Tecniche di recupero per le strutture in calcestruzzo armato	269
8.1 Introduzione	269
8.2 Rinforzo di travi e solai in calcestruzzo armato	269
8.2.1 Placcaggio con piatti metallici	277
8.2.2 Placcaggio con CFRP	288
8.2.3 Rinforzo a taglio con barre in acciaio	290
8.2.4 Rinforzo della zona compressa	

8.2.5 Incamiciatura	293
8.2.6 Precompressione esterna	302
8.3 Rinforzo di pilastri in calcestruzzo armato	308
8.3.1 Confinamento	308
8.3.2 Cerchiatura con tessuti in FRP	311
8.3.3 Cerchiatura in acciaio	317
8.3.4 Incamiciatura	320
8.4 Pareti di controvento	325
8.4.1 Ripartizione delle azioni orizzontali	325
8.4.2 Interventi sulle pareti di controvento	330
8.5 Rinforzo dei nodi strutturali con CFRP	332
8.6 Formazione di nodi strutturali sui pilastri	334
8.7 Eliminazione e sostituzione di pilastri	334
8.8 Rinforzo con FRP di silos, serbatoi e ciminiera	336
8.9 Rinforzo di mensole tozze	338
8.10 Il problema dello sfondellamento dei solai latero-cementizi	340
9 Tecniche di recupero per edifici in muratura	345
9.1 Introduzione	345
9.1.1 Concezione statica degli edifici in muratura portante	345
9.2 Rinforzo di maschi murari	348
9.2.1 Introduzione	348
9.2.2 Stuccatura	350
9.2.3 Stilatura dei giunti	350
9.2.4 Cuciture	351
9.2.5 Iniezioni	356
9.2.6 Intonaci armati	360
9.2.7 Tiranti e catene	365
9.2.8 Placcaggio	373
9.2.9 Creazione di cordoli in c.a. o in muratura armata	373
9.2.10 Creazione di sottostrutture irrigidenti in c.a.	375
9.2.11 Precompressione	376
9.3 Rinforzo o sostituzione di un solaio	377
9.3.1 Solaio in legno	377
9.3.2 Solai misti acciaio-laterizi	384
9.3.3 Sostituzione dei solai	385
9.4 Rinforzo di archi e volte in muratura	390
9.4.1 Catene	391
9.4.2 Riduzione del carico e rinfianco dell'arco	392
9.4.3 Creazione di un arco in calcestruzzo all'estradosso dell'esistente	393
9.4.4 Creazione del cosiddetto "arco armato"	394
9.4.5 Riduzione del carico tramite applicazione di un solaio portante	395
9.4.6 Placcaggio con tessuti in FRP	397

9.5 Rinforzo di pilastri in muratura	398
9.5.1 Cerchiatura	399
9.5.2 Incamiciatura	402
9.6 Creazione di aperture nei maschi murari	404
9.6.1 Apertura con ricongiungimento delle isostatiche di compressione	404
9.6.2 Apertura senza ricongiungimento delle isostatiche di compressione	406
9.6.3 Costruzione dell'architrave	407
9.6.4 Apertura di un vano ad arco	409
9.7 Creazione di controventi	410
10 Tecniche di recupero per le strutture in ferro	411
10.1 Introduzione	411
10.2 Sostituzione di elementi danneggiati	413
10.3 Modifica dell'assetto statico	414
10.4 Precompressione esterna	414
10.5 Placcaggio con FRP	415
11 Tecniche di recupero per le strutture lignee	417
11.1 Introduzione	417
11.1.1 Struttura	417
11.1.2 Meccanismi di degrado	419
11.1.3 Classificazione del legname strutturale	424
11.2 Rinforzo di una trave in legno	428
11.2.1 Placcaggio con tavole in legno	430
11.2.2 Rinforzo con elementi metallici	438
11.2.3 Placcaggio con CFRP	448
11.2.4 Sostituzione o rimozione parziale degli elementi danneggiati	451
12 Consolidamento delle fondazioni	455
12.1 Introduzione	455
12.2 Fenomeni di dissesto delle fondazioni	455
12.3 Criteri di progetto	457
12.4 Tipi di intervento	458
12.4.1 Sottofondazioni murarie	458
12.4.2 Allargamento delle fondazioni esistenti	458
12.4.3 Sottofondazione con pali	460
12.4.4 Diaframmi	462
12.4.5 Iniezione del terreno	462
12.4.5 Iniezione del terreno	463

Prefazione

Oggetto di questa trattazione sono i criteri, i materiali e le tecniche utilizzati nel consolidamento delle strutture.

Il volume è stato concepito quale supporto didattico ai corsi di Consolidamento delle strutture delle facoltà di Ingegneria Civile, nonché guida di primo orientamento per i professionisti (ingegneri e architetti) nella scelta delle tecniche di consolidamento più opportune. Di conseguenza l'attenzione è stata dedicata principalmente agli aspetti connessi al comportamento meccanico delle strutture in elevazione, preferendo rimandare ad altri testi per la trattazione di argomenti specifici, che richiedono competenze in diversi settori scientifico disciplinari necessarie a rendere la costruzione nuovamente fruibile.

Anche nell'ambito delle strutture in elevazione si è scelto comunque di trattare prevalentemente gli edifici che non hanno pregio storico monumentale, evitando di discutere in dettaglio anche i problemi connessi alla verifica sotto azioni sismiche.

Questo volume, giunto alla terza edizione, vuole affinare alcuni argomenti considerati cruciali quali le strategie di intervento, i problemi connessi alla sostituzione dei solai negli edifici in muratura, la definizione delle caratteristiche meccaniche minime delle tipologie di muratura più comuni in Italia.

Il risultato è una trattazione in cui dapprima si descrivono le cause dei problemi e le possibili strategie di intervento, quindi si analizzano argomenti che, seppure essenziali nel consolidamento delle strutture, tradizionalmente hanno poco spazio nei corsi di Tecnica delle Costruzioni quali il comportamento meccanico delle murature, la statica degli archi in muratura, l'analisi degli stati fessurativi, le caratteristiche dei materiali specifici utilizzati nel consolidamento, i metodi e gli strumenti di misura in sito e in laboratorio più comuni. Infine, attenzione particolare è dedicata alle tecniche più utilizzate nel consolidamento, di cui si descrivono la metodologia e i criteri di calcolo, nonché i pregi e i difetti espressi sulla base della sperimentazione e dell'esperienza sul campo.

Saremo grati a quanti vorranno segnalarci eventuali errori o manchevolezze.

Vogliamo, infine, ringraziare pubblicamente i colleghi che ci hanno aiutato nella redazione del testo, ovvero gli ingegneri Michele Cazzaniga, Fabio Crotti, Luca Redaelli e Patrick Bamonte. Ringraziamo, inoltre, tutti coloro che hanno permesso la pubblicazione di molte delle fotografie presenti su questo volume.

MARCO ANDREA PISANI
SARA CATTANEO
TOMMASO D'ANTINO