

Salvatore Lombardo - Tiziana Chiofalo



MANUALE DEL RINFORZO STRUTTURALE

GUIDA ALL'ADEGUAMENTO SISMICO CON SISTEMI COMPOSITI E TECNICHE TRADIZIONALI

Analisi dei dissesti • Diagnostica in situ • Tecniche di adeguamento sismico, rinforzo strutturale • Cemento armato, muratura, legno • Progettazione del rinforzo con compositi: esecutivi strutturali scaricabili in .dwg - analisi prezzi e voci di capitolo - elementi di calcolo - accettazione e controllo dei materiali

[Scheda sul sito >](#)



Salvatore Lombardo Tiziana Chiofalo

MANUALE DEL RINFORZO STRUTTURALE

**Guida all'adeguamento sismico con sistemi compositi
e tecniche tradizionali**



Dario Flaccovio Editore

Salvatore Lombardo – Tiziana Chiofalo

MANUALE DEL RINFORZO STRUTTURALE

Guida all'adeguamento sismico con sistemi compositi e tecniche tradizionali

ISBN 978-88-579-0337-8

© 2014 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: settembre 2014

Lombardo, Salvatore <1962->

Manuale del rinforzo strutturale : guida all'adeguamento sismico con sistemi compositi e tecniche tradizionali / Salvatore Lombardo, Tiziana Chiofalo. - Palermo : D. Flaccovio, 2014.

ISBN 978-88-579-0337-8

1. Strutture edilizie – Consolidamento.

I. Chiofalo, Tiziana <1982->.

690.24CDD-22

SBN Pal0273320

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana “Alberto Bombace”

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, settembre 2014

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

Indice

Premessa

Parte Prima I compositi fibrorinforzati

1. Le generalità dei compositi fibrorinforzati

1.1.	Le definizioni e i concetti base	»	23
1.2.	I principali sistemi FRP	»	24
1.2.1.	I sistemi impregnati in opera	»	24
1.2.1.1.	I tessuti unidirezionali	»	24
1.2.1.2.	I tessuti multidirezionali	»	24
1.2.1.3.	Le reti	»	26
1.2.2.	I sistemi pre-impregnati pultrusi	»	27
1.2.2.1.	Le lamine	»	27
1.2.2.2.	Le barre	»	28
1.2.2.3.	I tubi	»	28
1.2.2.4.	I profilati pultrusi strutturali	»	29
1.2.2.5.	Le connessioni	»	29
1.2.3.	Le fasi costituenti gli FRP	»	30
1.2.3.1.	Le fibre	»	30
1.2.3.2.	Le fibre di carbonio	»	32
1.2.3.3.	Le fibre di vetro	»	33
1.2.3.4.	Le fibre aramidiche	»	34
1.2.3.5.	Le fibre di basalto	»	34
1.2.3.6.	Le fibre d'acciaio	»	35
1.2.3.7.	Le altre fibre	»	35
1.2.3.7.1.	Le fibre di PBO	»	35
1.2.3.7.2.	Le fibre di boro	»	36
1.2.3.7.3.	Le fibre ceramiche	»	36
1.2.3.7.4.	Le fibre naturali	»	36
1.2.3.8.	Le matrici	»	36
1.2.3.8.1.	Le resine	»	37
1.2.3.8.1.1.	Le resine epossidiche	»	39
1.2.3.8.1.2.	Le resine poliestere	»	39
1.2.3.8.2.	Le matrici inorganiche	»	40
1.2.3.8.3.	Le altre tipologie di matrici	»	40
1.2.3.9.	Riferimenti bibliografici	»	41
1.2.4.	I riferimenti normativi	»	41
1.2.4.1.	I rinforzi con FRP nella normativa italiana	»	42
1.2.4.2.	I documenti del CNR	»	44
1.2.4.3.	Le Linee Guida ReLUIS	»	46

1.2.2.2.2.2.	L'esecuzione di diatoni con apertura non passante	»	89
1.2.2.2.3.	L'irrigidimento delle partizioni sul loro piano	»	89
1.2.2.2.3.1.	Gli interventi con rete per prevenire rotture fragili di murature.....	»	91
1.2.2.2.4.	Gli interventi di collegamento perimetrale a pilastri e travi/solai	»	92
1.2.2.3.	Il rinforzo dei nodi trave-colonna	»	94
1.2.2.4.	Il collasso a taglio di setti	»	94
1.2.2.4.1.	Il rinforzo dei setti in c.a.	»	96
1.2.2.5.	Il collasso a flessione e l'eccessiva deformabilità dei solai	»	96
1.2.2.5.1.	Il rinforzo dei solai a flessione e deformazione.....	»	96
1.2.2.5.2.	Le tipologie di consolidamento dei solai.....	»	97
1.2.3.	Il piano delle indagini per la caratterizzazione meccanica dei materiali e loro degrado	»	98
1.2.3.1.	I livelli di conoscenza della struttura	»	99
1.2.3.1.1.	Il livello di conoscenza limitata (LC1).....	»	100
1.2.3.1.2.	Livello di conoscenza adeguata (LC2).....	»	102
1.2.3.1.3.	Livello di conoscenza accurata (LC3).....	»	103
1.2.3.1.4.	Gli elaborati progettuali esecutivi	»	105
1.2.3.1.5.	I dettagli costruttivi e i difetti	»	106
1.2.3.1.6.	I fattori di confidenza e le resistenze dei materiali ...	»	106
1.3.	Bibliografia	»	109
2. I dissesti negli edifici in muratura			
2.1.	Gli edifici in muratura in aggregato.....	»	111
2.1.1.	Generalità.....	»	111
2.1.2.	La valutazione del comportamento strutturale degli edifici.....	»	113
2.1.3.	L'interazione tra gli edifici.....	»	114
2.1.4.	Gli aspetti generali sui meccanismi di danno	»	118
2.1.5.	L'unità strutturale e l'analisi globale	»	120
2.1.5.1.	L'analisi preliminare per individuare la US.....	»	120
2.1.5.2.	Le configurazioni più frequenti dell'unità strutturale.....	»	121
2.1.5.3.	I criteri utili per la individuazione delle unità strutturali	»	122
2.2.	La classificazione degli edifici in muratura	»	123
2.2.1.	Gli edifici di prima classe	»	124
2.2.2.	Gli edifici di seconda classe.....	»	125
2.2.3.	Gli edifici di terza classe.....	»	128
2.3.	Le murature tradizionali	»	129
2.4.	I livelli di conoscenza della struttura in muratura	»	130
2.4.1.	La geometria strutturale degli edifici esistenti.....	»	131
2.4.2.	I dettagli costruttivi.....	»	131
2.4.3.	Le proprietà meccaniche dei materiali e costruttive del tessuto murario	»	133
2.4.3.1.	Le indagini in situ limitate.....	»	134
2.4.3.2.	Le indagini in situ estese.....	»	134
2.4.3.3.	Le indagini in situ esaustive	»	135
2.4.4.	I valori medi dei parametri meccanici della muratura e i fattori di confidenza	»	135
2.4.4.1.	Le tipologie e i relativi parametri meccanici delle murature....	»	137

	2.4.4.1.1. I parametri meccanici per le murature consolidate	»	141
	2.4.4.2. Le considerazioni sulle caratteristiche meccaniche della muratura	»	142
2.5.	Le carenze strutturali gravi degli edifici in muratura	»	146
2.5.1.	La regolarità in pianta e in elevazione	»	147
2.5.2.	La presenza di piani sfalsati	»	150
2.5.3.	Le sopraelevazioni realizzate con materiali diversi che costituiscono un'apprezzabile discontinuità strutturale	»	151
2.5.4.	La presenza di solai o di coperture eccessivamente deformabili con insufficiente resistenza nel loro piano	»	153
2.5.5.	La presenza di solai e/o coperture rigidi e pesanti in edifici con muratura di cattiva qualità	»	161
2.5.6.	La mancanza completa o l'inefficacia dei collegamenti fra pareti ed orizzontamenti	»	163
2.5.7.	La mancanza completa o l'inefficacia dei collegamenti fra pareti e pareti	»	166
2.5.8.	Gli elementi non strutturali degli edifici in muratura	»	167
2.5.8.1.	I balconi	»	168
2.5.8.2.	I parapetti e le balaustre	»	169
2.5.8.2.1.	L'intervento di consolidamento	»	169
2.5.8.3.	I manti di copertura	»	169
2.5.8.4.	Le canne fumarie	»	170
2.5.8.5.	I cornicioni	»	170
2.5.8.6.	Le cornici di finestre e portali	»	170
2.5.8.7.	Gli intonaci	»	172
2.6.	Le lesioni nelle murature per carichi di esercizio	»	172
2.6.1.	Il quadro fessurativo	»	172
2.6.1.1.	Gli elaborati relativi al rilievo critico dello stato di danno, dei dissesti e del degrado	»	174
2.6.1.2.	Il rilievo delle fessurazioni	»	177
2.6.1.2.1.	Le biffe	»	178
2.6.1.2.2.	I fessurimetri	»	179
2.6.1.2.2.1.	I fessurimetri angolari	»	180
2.6.1.2.2.2.	I fessurimetri lineari	»	180
2.6.1.2.2.3.	L'identificazione delle lesioni	»	182
2.6.1.2.2.4.	L'evoluzione della fessurazione	»	182
2.6.1.3.	Le fessurazioni da schiacciamento	»	183
2.6.1.4.	Le fessurazioni causate da carichi concentrati	»	186
2.6.1.5.	Le fessurazioni per scarso concatenamento murario	»	187
2.6.1.6.	I dissesti dovuti alle spinte di archi e volte	»	190
2.6.1.7.	I dissesti causati da cedimenti di fondazione	»	192
2.6.1.7.1.	I tipi di cedimento delle fondazioni	»	194
2.6.1.7.2.	Le cause dei cedimenti fondali	»	198
2.6.1.7.3.	Le tipologie di lesioni	»	204
2.6.1.7.4.	I cedimenti di tratti centrali di fondazione. L'effetto arco	»	205
2.6.1.7.5.	I cedimenti rotazionali di tratti terminali	»	206
2.6.1.7.6.	I cedimenti di traslazione verticale di tratti terminali o periferici	»	210

2.6.1.7.7.	I cedimenti di pilastri in muratura di fondazioni discontinue a piloni ed archi dritti.....	»	214
2.6.1.7.8.	I cedimenti di edifici costruiti su discariche.....	»	217
2.6.1.7.9.	I cedimenti causati dal ritiro e dal rigonfiamento del terreno.....	»	218
2.6.1.7.10.	I cedimenti nelle fondazioni compensate.....	»	220
2.6.1.7.11.	I cedimenti nelle fondazioni omogenee poste a profondità diverse.....	»	221
2.6.1.7.12.	I cedimenti nelle fondazioni omogenee poste alla stessa profondità.....	»	221
2.6.1.7.13.	I cedimenti nelle fondazioni non omogenee poste a profondità diverse.....	»	222
2.6.1.7.14.	I cedimenti nelle fondazioni per variazione dei carichi in corpi dello stesso edificio e in aree adiacenti.....	»	223
2.6.1.7.15.	I cedimenti nelle fondazioni causati da alberi.....	»	224
2.6.1.7.16.	I cedimenti nelle fondazioni causati da scavi adiacenti.....	»	225
2.6.1.7.17.	I cedimenti verticali nelle connessioni murarie.....	»	228
2.7.	I meccanismi di collasso negli edifici in muratura per azioni sismiche.....	»	230
2.7.1.	Il comportamento scatolare.....	»	230
2.7.1.1.	Gli aspetti che influiscono sul comportamento dell'edificio in muratura.....	»	232
2.7.1.2.	I dissesti in un edificio in rapporto alla sollecitazione sismica.....	»	232
2.7.1.3.	I dissesti in un edificio in rapporto alla qualità della struttura muraria.....	»	235
2.7.2.	I tipi di meccanismo di collasso.....	»	235
2.7.2.1.	I meccanismi di danno riguardanti le pareti murarie.....	»	237
2.7.2.2.	I metodi di analisi globale e i criteri di verifica.....	»	240
2.7.2.3.	I meccanismi di collasso fuori dal piano.....	»	241
2.7.2.3.1.	L'influenza del sistema di copertura.....	»	242
2.7.2.3.2.	Il ribaltamento semplice.....	»	246
2.7.2.3.2.1.	Ribaltamento semplice di parete a doppia cortina.....	»	249
2.7.2.3.2.2.	Ribaltamento semplice di parete monolitica – parte alta.....	»	249
2.7.2.3.2.3.	L'inserimento di catene in FRP.....	»	254
2.7.2.3.2.4.	La realizzazione di un cordolo di coronamento in muratura e compositi.....	»	255
2.7.2.3.2.5.	La realizzazione di ancoraggi in FRP per gli orizzontamenti.....	»	256
2.7.2.3.2.6.	La cinturazione (o fascia di piano) in FRP.....	»	256
2.7.2.3.3.	Il ribaltamento composto.....	»	258
2.7.2.3.3.1.	L'efficacia del collegamento tra parete e parete.....	»	260
2.7.2.3.3.1.1.	L'ammorsamento dei cantonali.....	»	260
2.7.2.3.3.1.2.	L'inserimento di catene.....	»	261

	2.7.2.3.3.1.2.1. Gli incatenamenti	» 261
	2.7.2.3.3.1.2.2. Le indagini preliminari e le strutture già deformate	» 261
	2.7.2.3.3.1.2.3. Gli elementi costituenti l'incatenamento	» 262
	2.7.2.3.3.1.2.4. L'efficacia del collegamento tra pareti ortogonali	» 264
	2.7.2.3.3.1.2.5. Il tiro delle catene	» 265
	2.7.2.3.3.1.2.6. Alcune considerazioni esecutive.	» 268
	2.7.2.3.3.2. L'efficacia del collegamento tra pareti ed orizzontamenti	» 271
	2.7.2.3.3.3. Gli interventi e i presidi contro il ribaltamento composto	» 273
2.7.2.4.	La flessione verticale	» 274
	2.7.2.4.1. Le situazioni strutturali e costruttive	» 276
	2.7.2.4.2. La flessione verticale di parete a doppia cortina	» 276
	2.7.2.4.3. Gli interventi e i presidi contro la flessione verticale	» 277
2.7.2.5.	I corpi secondari addossati.....	» 277
	2.7.2.5.1. La rotazione fuori piano verso l'esterno della parete di fondo.....	» 277
	2.7.2.5.2. La traslazione orizzontale globale.....	» 278
2.7.2.6.	I meccanismi di collasso nel piano	» 278
	2.7.2.6.1. Altre considerazioni sulle pareti soggette ad azioni complanari	» 285
	2.7.2.6.2. Le fessurazioni in caso di discontinuità di aperture .	» 287
	2.7.2.6.3. I meccanismi riguardanti le pareti di spina	» 287
	2.7.2.6.4. Gli interventi e i presidi contro i meccanismi di collasso di secondo modo.....	» 288
	2.7.2.6.4.1. L'incamiciatura con rete in FRG	» 288
	2.7.2.6.4.2. Il rinforzo con fasce di tessuto FRP a taglio e/o a pressoflessione.....	» 289
	2.7.2.6.4.3. Il sistema di rinforzo Reticolatus	» 290
2.7.2.7.	I meccanismi locali	» 292
	2.7.2.7.1. I metodi di analisi dei meccanismi locali	» 293
	2.7.2.7.2. I meccanismi per dislocazioni locali	» 293
	2.7.2.7.2.1. La disgregazione della tessitura muraria	» 293
	2.7.2.7.2.1.1. Gli interventi e i presidi contro la disgregazione della tessitura muraria	» 294
	2.7.2.7.3. Il collasso a flessione o per eccessiva deformabilità di orizzontamenti lignei.....	» 295
	2.7.2.7.3.1. Le fessurazioni e il fluage.....	» 295
	2.7.2.7.3.2. Gli insetti xilofagi.....	» 296
	2.7.2.7.3.2.1. La carie	» 298
	2.7.2.7.3.2.2. I trattamenti preventivi alle operazioni di rinforzo	» 299
	2.7.2.7.3.3. Interventi e presidi mirati contro il collasso a flessione o l'eccessiva deformabilità degli orizzontamenti lignei.....	» 299

2.7.2.7.3.3.1. L'aumento della sezione resistente con l'impiego di travi pultruse in GFRP	»	299
2.7.2.7.3.3.2. Il rinforzo dei solai a flessione e deformazione.....	»	301
2.7.2.7.3.3.2.1. Il ripristino della sezione resistente o l'esecuzione di riparazioni locali con barre pultruse FRP.....	»	301
2.7.2.7.4. I meccanismi locali causati da elementi strutturali spingenti	»	302
2.7.2.7.4.1. Il ribaltamento della parte alta del cantonale.....	»	302
2.7.2.7.4.2. Gli interventi e i presidi contro il ribaltamento della parte alta del cantonale.....	»	304
2.7.2.7.5. La flessione orizzontale.....	»	304
2.7.2.7.5.1. Il cinematismo di flessione orizzontale di parete monolitica confinata	»	306
2.7.2.7.5.2. Il cinematismo di flessione orizzontale di parete monolitica non confinata	»	307
2.7.2.7.5.3. Gli interventi e i presidi contro la flessione orizzontale	»	309
2.7.2.7.6. Lo sfondamento della parete del timpano	»	310
2.7.2.7.6.1. Gli interventi e i presidi contro lo sfondamento della parete del timpano.....	»	311
2.7.2.7.7. I dissesti delle strutture voltate	»	312
2.7.2.7.7.1. La nomenclatura delle parti dell'arco..	»	312
2.7.2.7.7.2. Gli archi costruiti con mattoni pieni in laterizio.....	»	313
2.7.2.7.7.3. Il nodo tra due archi contigui aventi un pilastro in comune	»	314
2.7.2.7.7.4. Il dimensionamento degli archi	»	314
2.7.2.7.7.5. Cenni sulla statica dell'arco e delle volte.....	»	316
2.7.2.7.7.5.1. La linea delle pressioni.....	»	316
2.7.2.7.7.5.2. La verifica di stabilità.....	»	319
2.7.2.7.7.5.3. Gli effetti delle spinte e il loro contenimento	»	318
2.8. Bibliografia.....	»	327

Parte Terza

Gli interventi di consolidamento

1. Gli interventi di consolidamento negli edifici in muratura

1.1. I criteri per gli interventi di consolidamento di edifici in muratura	»	333
1.2. Gli interventi volti ad incrementare la resistenza nei maschi murari	»	334
1.2.1. Le iniezioni di miscele leganti.....	»	336
1.2.1.1. La procedura operativa	»	339
1.2.2. Le cuciture armate	»	342
1.2.2.1. La procedura operativa	»	344

1.2.2.2.	L'esecuzione di cuciture armate con tubi preimpregnati in FRP e malta	»	348
1.2.3.	Lo scuci e cucì	»	348
1.2.3.1.	La procedura operativa	»	351
1.2.4.	La rigenerazione dei giunti di malta	»	325
1.2.4.1.	La procedura operativa	»	355
1.2.4.2.	La ristilatura armata	»	356
1.2.5.	L'inserimento di diatoni artificiali	»	358
1.2.5.1.	Le connessioni trasversali con diatoni artificiali in c.a.	»	359
1.2.5.2.	Le connessioni trasversali con barre elicoidali in acciaio inox...	»	362
1.2.6.	Il placcaggio delle murature con intonaco armato	»	363
1.2.7.	L'inserimento di tiranti verticali post-tesi	»	365
1.2.8.	La barriera chimica all'umidità	»	366
1.2.8.1.	La procedura operativa	»	368
1.3.	Gli interventi volti a rinforzare le pareti intorno alle aperture	»	370
1.3.1.	I carichi gravanti sull'architrave	»	373
1.3.2.	La variazione del quadro isostatico nelle aperture a strappo o in breccia negli interventi di ristrutturazione	»	376
1.3.2.1.	L'apertura a strappo a piano terreno in un muro senza altre aperture	»	376
1.3.2.2.	L'apertura a strappo a piano terreno in un muro con altre aperture	»	377
1.3.2.3.	Le aperture a strappo in un piano elevato in un muro senza altre aperture	»	378
1.3.2.4.	L'esecuzione delle aperture a strappo	»	378
1.3.2.4.1.	Indagini e verifiche preliminari	»	378
1.3.2.4.2.	L'apertura a strappo a piano terreno	»	379
1.3.2.4.3.	L'esecuzione di un architrave in acciaio	»	381
1.3.2.5.	L'esecuzione di un arco in muratura a chiusura di una apertura a strappo	»	384
1.3.2.5.1.	L'esecuzione di una apertura a strappo in un piano elevato	»	384
1.4.	Gli interventi volti a ridurre l'eccessiva deformabilità dei solai	»	385
1.5.	Gli interventi in copertura	»	389
1.6.	Gli interventi che modificano la distribuzione degli elementi verticali resistenti ...	»	394
1.7.	Gli interventi su pilastri e colonne	»	396
1.8.	Gli interventi in fondazione	»	396
1.8.1.	L'intervento di sottofondazione per sottomurazione	»	398
1.8.2.	L'allargamento della base della fondazione	»	399
1.8.3.	Il consolidamento dei terreni di fondazione	»	401
1.8.4.	L'inserimento di sottofondazioni profonde (micropali, pali radice)	»	401
1.9.	Gli interventi alle scale	»	402
1.10.	Gli interventi volti ad assicurare i collegamenti degli elementi non strutturali ...	»	402
1.11.	La realizzazione di giunti sismici	»	403
1.12.	Gli interventi e i presidi contro i dissesti delle strutture voltate	»	404
1.12.1.	Gli interventi di consolidamento errati	»	405
1.12.1.1.	Le cappe in calcestruzzo armato e non	»	405

1.12.1.2. L'inserimento di biette	»	405
1.12.1.3. L'inserimento di catene metalliche per frenare le deformazioni dovute alla depressione o al rialzamento degli archi e delle volte	»	407
1.12.2. Primi cenni sull'incamiciatura con rete in compositi	»	407
1.12.3. Il rinforzo estradossale delle volte in mattoni disposti in foglio.....	»	408
1.12.4. Il rinforzo estradossale delle volte in mattoni disposti a coltello	»	409
1.12.5. Le volte in camorcanna (o cannucciato)	»	410
1.13. Bibliografia	»	410

2. Gli interventi di consolidamento negli edifici in c.a.

2.1. Il consolidamento e il ripristino delle strutture in c.a.: la Uni En 1504	»	413
2.2. I fattori che influenzano il degrado.....	»	415
2.2.1. Il rapporto acqua-cemento	»	416
2.2.2. Il copriferro	»	416
2.2.3. La protezione corticale.....	»	416
2.2.4. Il degrado delle armature secondo la Uni En 1504: la corrosione	»	417
2.2.4.1. La corrosione da carbonatazione	»	417
2.2.4.2. La corrosione da cloruri.....	»	418
2.2.4.3. La corrosione da correnti vaganti	»	420
2.2.5. Il degrado del calcestruzzo secondo la Uni En 1504.....	»	420
2.2.5.1. L'attacco solfatico	»	420
2.2.5.2. La cosiddetta reazione alcali-aggregati.....	»	422
2.2.5.3. I cicli di gelo-disgelo	»	422
2.2.5.4. Il ritiro del calcestruzzo	»	422
2.3. I principali interventi	»	424
2.3.1. Il ripristino corticale.....	»	428
2.3.1.1. Generalità.....	»	428
2.3.1.2. La procedura operativa	»	429
2.3.2. La risarcitura di lesioni profonde mediante incollaggio strutturale.....	»	430
2.3.2.1. Generalità.....	»	430
2.3.2.2. La procedura operativa	»	432
2.4. Bibliografia	»	435

3. L'adeguamento sismico e il rinforzo delle strutture con l'impiego di materiali compositi: c.a., muratura e legno

3.1. Le tecniche innovative di rinforzo strutturale	»	437
3.1.1. La valutazione dei requisiti base per il rinforzo	»	438
3.1.2. Le operazioni preliminari al rinforzo: il consolidamento e il ripristino ..	»	439
3.2. I differenti sistemi compositi e loro applicazione	»	441
3.2.1. Le procedure applicative dei sistemi FRP	»	442
3.2.1.1. L'applicazione degli FRP impregnati in opera	»	443
3.2.1.2. L'applicazione degli FRP preimpregnati pultrusi piani	»	444
3.2.1.3. L'applicazione degli SRP.....	»	445
3.2.1.4. L'applicazione degli FRG	»	446
3.2.2. Il cantiere dei compositi strutturali: prescrizioni operative e norme di sicurezza.....	»	447
3.2.2.1. Le prescrizioni operative	»	447
3.2.2.2. Le norme di sicurezza	»	449

3.2.3.	La protezione del rinforzo	»	450
3.2.4.	Il rinforzo con sistemi compositi delle strutture in c.a.	»	450
3.2.4.1.	Il rinforzo a taglio dei pilastri e il loro confinamento con tessuti CFRP.....	»	450
3.2.4.1.1.	Generalità	»	450
3.2.4.1.2.	La procedura operativa.....	»	451
3.2.4.2.	Il rinforzo a flessione e a taglio delle travi con lamine pultruse e tessuti CFRP.....	»	452
3.2.4.2.1.	Generalità	»	452
3.2.4.2.2.	La procedura operativa.....	»	453
3.2.4.3.	Il rinforzo a taglio e il confinamento dei nodi trave-colonna con tessuti CFRP.....	»	454
3.2.4.3.1.	Generalità	»	454
3.2.4.3.2.	La procedura operativa.....	»	457
3.2.4.4.	Il rinforzo a pressoflessione, taglio e confinamento dei pilastri d'angolo e dei relativi nodi trave-colonna con sistema SRP, BFRP e CFRP	»	462
3.2.4.4.1.	Generalità	»	462
3.2.4.4.2.	La procedura operativa.....	»	464
3.2.4.5.	Il rinforzo a flessione dei solai con lamine pultruse CFRP.....	»	466
3.2.4.5.1.	Generalità	»	466
3.2.4.5.2.	La procedura operativa.....	»	466
3.2.5.	Il rinforzo con sistemi compositi delle strutture in muratura.....	»	467
3.2.5.1.	Il rinforzo a taglio, l'aumento di duttilità e il confinamento dell'involucro murario con doppia incamiciatura in FRG	»	468
3.2.5.1.1.	Generalità	»	468
3.2.5.1.2.	La procedura operativa.....	»	469
3.2.5.2.	L'aumento di scolarità dell'involucro murario con l'ausilio di cinturazione in FRP	»	470
3.2.5.2.1.	Generalità	»	470
3.2.5.2.2.	La procedura operativa.....	»	470
3.2.5.3.	Il rinforzo delle strutture voltate con sistema FRP	»	474
3.2.5.3.1.	Generalità	»	474
3.2.5.3.2.	La procedura operativa.....	»	477
3.2.5.4.	Il rinforzo delle strutture voltate con sistema FRG	»	480
3.2.5.4.1.	Generalità	»	480
3.2.5.4.2.	La procedura operativa.....	»	481
3.2.6.	Il rinforzo con sistemi compositi delle strutture in legno	»	483
3.2.6.1.	La sostituzione di teste di travi cariate con l'ausilio di barre GFRP	»	485
3.2.6.1.1.	Generalità	»	485
3.2.6.1.2.	La procedura operativa.....	»	485
3.2.6.2.	Il rinforzo a flessione delle travi mediante l'impiego di lamine CFRP.....	»	486
3.2.6.2.1.	Generalità	»	486
3.2.6.2.2.	La procedura operativa.....	»	487
3.2.6.3.	L'aumento della sezione resistente di travi con profilati pultrusi strutturali GFRP	»	489
3.2.6.3.1.	Generalità	»	489
3.2.6.3.2.	La procedura operativa.....	»	489
3.3.	Bibliografia	»	491

Parte Quarta
Controlli e indagini sulle strutture esistenti.
Aspetti sul calcolo e il collaudo dei materiali compositi

1. Le indagini sugli edifici in muratura esistenti

1.1. Generalità	»	495
1.2. I tipi di indagini	»	496
1.2.1. La termografia	»	496
1.2.2. L'indagine radar	»	499
1.2.3. Le indagini soniche	»	501
1.2.3.1. Generalità	»	501
1.2.3.2. Modalità esecutiva e strumentazione	»	501
1.2.3.3. Le modalità di indagine	»	503
1.2.3.4. Il metodo di trasmissione diretta	»	504
1.2.3.5. Le murature storiche	»	508
1.2.4. L'endoscopia	»	508
1.2.4.1. Generalità	»	508
1.2.4.2. Esecuzione	»	509
1.2.4.3. Le raccomandazioni	»	511
1.2.5. I metodi elettromagnetici	»	511
1.2.6. La determinazione delle caratteristiche meccaniche delle murature mediante martinetti piatti	»	511
1.2.6.1. I martinetti piatti	»	511
1.2.6.2. L'esecuzione della prova	»	513
1.2.6.2.1. La prova con martinetto singolo. Il rilievo delle tensioni di esercizio	»	513
1.2.6.2.2. La prova con martinetto doppio. Il rilievo delle caratteristiche di deformazione	»	518
1.2.6.2.3. L'esecuzione del taglio	»	525
1.2.6.2.4. Il resoconto di prova	»	526
1.2.6.3. I problemi dovuti alle caratteristiche della muratura	»	556
1.2.6.3.1. La muratura con giunti spessi	»	526
1.2.6.3.2. La muratura regolare con giunti sottili	»	526
1.2.6.3.3. La muratura in pietra con tessitura irregolare	»	526
1.2.6.4. Il rilievo della resistenza a taglio lungo i corsi di malta	»	528
1.2.6.4.1. La prova secondo il metodo A	»	528
1.2.6.4.2. La prova secondo il metodo B	»	530
1.2.7. Le prove su giunti di malta	»	530
1.2.7.1. Lo sclerometro a pendolo per i giunti nelle murature di mattoni	»	530
1.2.7.2. La prova di pull-out sui giunti di malta	»	532
1.2.7.3. Le prove penetrometriche	»	533
1.2.7.3.1. Generalità	»	533
1.2.7.3.2. L'esecuzione	»	533
1.2.7.3.3. Le raccomandazioni	»	533
1.2.7.3.4. Il penetrometro di Liberatore e Spera	»	534
1.2.7.3.5. Il penetrometro di Felicetti e Gattesco	»	534
1.3. Le prove distruttive in situ	»	536
1.3.1. Le prove su pannelli	»	536
1.3.2. La prova a compressione	»	537

1.3.3.	La prova a compressione diagonale.....	»	538
1.3.4.	La prova a compressione e taglio con pressione di confinamento di valore esistente.....	»	540
1.3.5.	La prova a compressione e taglio con pressione di confinamento di valore noto	»	540
1.3.6.	Carotaggi.....	»	543
1.3.6.1.	Generalità.....	»	543
1.3.6.2.	L'esecuzione	»	543
1.3.6.3.	Le raccomandazioni.....	»	546
2. Le indagini sulle strutture in c.a. degli edifici esistenti			
2.1.	Le proprietà meccaniche dei materiali	»	547
2.2.	La programmazione delle indagini	»	547
2.2.1.	Generalità.....	»	547
2.2.2.	La definizione del programma delle indagini	»	548
2.2.3.	La classificazione dei controlli del calcestruzzo in opera.....	»	548
2.3.	Le indagini sulle strutture in opera.....	»	550
2.3.1.	Le finalità	»	550
2.3.2.	L'individuazione delle aree di calcestruzzo omogenee	»	551
2.3.3.	Le aree e le regioni di prova	»	551
2.3.4.	La preparazione delle aree di prova.....	»	553
2.3.5.	La scelta degli elementi strutturali.....	»	553
2.3.6.	La variazione delle proprietà del calcestruzzo in opera.....	»	554
2.3.7.	I campioni minimi da prelevare.....	»	556
2.3.8.	Le percentuali e il numero di elementi strutturali da indagare	»	556
2.3.8.1.	Le raccomandazioni per l'esecuzione dei controlli distruttivi nei pilastri.....	»	559
2.3.8.2.	Le raccomandazioni per l'esecuzione dei controlli distruttivi nelle travi.....	»	560
2.4.	I metodi distruttivi	»	562
2.4.1.	I saggi sulle strutture	»	562
2.4.2.	Il rilevamento della posizione delle armature.....	»	562
2.4.3.	Il prelievo di spezzoni d'armature	»	564
2.4.4.	Il carotaggio	»	565
2.4.4.1.	L'estrazione delle carote e il rilevamento delle armature.....	»	565
2.4.4.2.	Il numero di carote e la variabilità dei valori di resistenza.....	»	568
2.4.4.3.	Il verbale di prelievo	»	568
2.4.4.4.	La resistenza a compressione delle carote	»	568
2.4.4.5.	I coefficienti correttivi per la stima della resistenza a compressione del calcestruzzo in opera.....	»	569
2.4.4.6.	Il certificato di prova a compressione.....	»	571
2.4.5.	La stima della resistenza a compressione in opera del calcestruzzo.....	»	571
2.4.5.1.	Le prescrizioni normative	»	571
2.4.5.2.	La metodologia della Uni En 13791	»	579
2.4.5.2.1.	L'approccio A	»	573
2.4.5.2.2.	L'approccio B	»	576
2.5.	I controlli non distruttivi e semidistruttivi.....	»	578
2.5.1.	Le finalità e le limitazioni	»	578
2.5.2.	Le curve di correlazione	»	580

2.5.3.	La taratura della curve di correlazione di riferimento o di base	»	581
2.5.4.	I limiti e le precauzioni nell'applicazione dei metodi indiretti	»	582
2.5.5.	La determinazione dell'indice di rimbalzo	»	583
2.5.5.1.	Il metodo della curva unica.....	»	585
2.5.5.2.	Il trattamento delle superfici e lo spessore minimo dell'elemento strutturale	»	585
2.5.5.3.	Le diverse condizioni di influenza dell'indice di rimbalzo.....	»	586
2.5.6.	La velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici.....	»	588
2.5.6.1.	Generalità.....	»	588
2.5.6.2.	L'apparecchiatura.....	»	589
2.5.6.3.	La modalità d'esecuzione	»	589
2.5.6.4.	Le modalità di trasmissione dell'impulso ultrasonico	»	591
2.5.6.5.	La stima della resistenza a compressione	»	593
2.5.6.5.1.	La curva di correlazione costruita su provini prelevati in cantiere	»	594
2.5.6.5.2.	La curva di correlazione costruita su carote prelevate dalle strutture in opera	»	595
2.6.	L'impact-echo	»	595
2.6.1.	Generalità.....	»	595
2.6.2.	La metodologia	»	595
2.7.	La prova di estrazione (pull-out)	»	596
2.7.1.	Generalità.....	»	596
2.7.2.	La prova pull-out secondo la norma Uni 10157	»	596
2.7.2.1.	I punti di prova.....	»	597
2.7.2.2.	L'esecuzione della prova.....	»	598
2.7.2.3.	Il resoconto della prova pull-out.....	»	599
2.7.2.4.	La curva di correlazione	»	599
2.8.	La stima delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo con i metodi combinati	»	600
2.8.1.	Il metodo Sonreb.....	»	601
2.8.2.	La procedura esecutiva	»	601
2.8.3.	La stima della resistenza a compressione in opera del calcestruzzo	»	602
2.9.	L'elaborazione e l'interpretazione dei risultati di prova.....	»	607

3. Introduzione al calcolo, controlli di qualità e validazione di compositi per il rinforzo strutturale

3.1.	Introduzione al calcolo	»	609
3.1.1.	L'acquisizione dei dati: il metodo di indagine.....	»	609
3.1.2.	L'elaborazione dei dati: la conoscenza della struttura	»	609
3.1.2.1.	L'elaborazione dei dati: il grado di approssimazione	»	610
3.1.2.2.	L'elaborazione dei dati: la congruenza tra il modello e la realtà quale misura dell'affidabilità dei risultati	»	610
3.1.2.3.	L'elaborazione dei dati: il contributo degli elementi non strutturali negli edifici in c.a.	»	611
3.1.2.4.	L'elaborazione dei dati: l'analisi dei meccanismi di primo modo negli edifici in muratura.....	»	611
3.1.3.	La progettazione sismica: l'analisi pushover.....	»	612
3.1.3.1.	La progettazione sismica: il principio di equivalenza degli spostamenti	»	612

3.1.4.	La progettazione sismica: gli interventi definiti dalle NTC 2008.....	»	614
3.1.4.1.	L'adeguamento sismico	»	615
3.1.4.2.	Il miglioramento sismico	»	615
3.1.4.3.	Le riparazioni o gli interventi locali	»	615
3.1.5.	La progettazione sismica: performance based design.....	»	615
3.1.5.1.	La progettazione sismica: i principali obiettivi	»	616
3.1.5.2.	La progettazione sismica: tipologie di intervento a confronto .	»	616
3.1.6.	Il progetto del rinforzo FRP: considerazioni preliminari.....	»	617
3.1.6.1.	Il progetto del rinforzo FRP: i coefficienti parziali	»	617
3.1.7.	Il rinforzo FRP di elementi in c.a.: verifiche di sicurezza nei confronti del distacco dal supporto.....	»	619
3.1.7.1.	Il rinforzo FRP di elementi in c.a.: l'efficacia del confinamento	»	619
3.1.7.2.	Il rinforzo FRP di elementi in c.a.: interventi in zona sismica .	»	620
3.1.8.	Il rinforzo FRP delle murature: considerazioni preliminari	»	621
3.1.8.1.	Il rinforzo FRP delle murature: interventi in zona sismica.....	»	621
3.1.8.2.	Il rinforzo FRP delle murature: gli aspetti da esaminare	»	622
3.1.8.3.	Il rinforzo FRP delle murature: la delaminazione.....	»	622
3.1.8.4.	Il rinforzo FRP delle murature: archi e volte	»	623
3.2.	I controlli di qualità: l'accettazione, il collaudo e il monitoraggio dei compositi strutturali.....	»	624
3.2.1.	La procedura di accettazione dei sistemi FRP	»	625
3.2.1.1.	La lettura delle schede tecniche	»	625
3.2.1.2.	Le prove di accettazione	»	626
3.2.1.2.1.	Il Cokit	»	627
3.2.2.	Il collaudo dei sistemi FRP: il controllo di qualità	»	628
3.2.2.1.	Il controllo di qualità ai fini del collaudo: prove semi-distruttive	»	628
3.2.2.1.1.	La prova di strappo normale.....	»	628
3.2.2.1.2.	La prova di strappo a taglio.....	»	629
3.2.2.2.	Il controllo di qualità ai fini del collaudo: prove non distruttive	»	630
3.2.2.2.1.	Le prove di tipo acustico stimolato	»	631
3.2.2.2.2.	Le prove ultrasoniche ad alta frequenza.....	»	631
3.2.2.2.3.	Le prove in emissione acustica.....	»	631
3.2.2.2.4.	Le prove termografiche	»	631
3.2.2.3.	La qualifica degli operatori per l'esecuzione delle prove	»	631
3.2.2.4.	Monitoraggio dell'intervento di rinforzo	»	631
3.2.3.	La validazione sperimentale dei compositi strutturali	»	632
3.2.3.1.	Il rinforzo sismico di pilastri con SRP e GFRP	»	635
3.2.3.2.	Il rinforzo sismico di murature con FRG o FRCM.....	»	635
3.3.	Bibliografia	»	637
Appendice. Le analisi prezzi dei sistemi compositi			
Premessa			» 639
Indice analitico			» 709

Premessa

Il tema del consolidamento strutturale è certamente vasto e controverso. Intorno ad esso da sempre gravita una nutrita letteratura di settore figlia di epoche differenti e pertanto specchio della coscienza tecnica di quel tempo. Però se da un lato la manualistica tecnica storica costituisce ancora oggi, in molti casi, un valido punto di riferimento nei confronti del miglioramento sismico di strutture in muratura, dall'altro gli eventi calamitosi che hanno colpito il territorio italiano hanno messo in luce differenti criticità in termini di inefficacia o addirittura dannosità di interventi di rinforzo tipicamente e diffusamente adottati a macchia d'olio in un recente passato sino ad oggi.

Basti pensi alle tipiche tecniche di consolidamento delle strutture in muratura "in voga" a partire dagli anni '70: ebbene cordoli in breccia, cappe armate sulle volte, cuciture armate o placatura con rete elettrosaldata dei muri sono interventi di cui, in passato, si è spesso abusato confidando in una "miracolosa" efficacia con conseguenze devastanti. È chiaro peraltro che non sia in alcun modo possibile operare su edifici in muratura confidando a priori su interventi sempre efficaci al livello ottimale. La grande "eterogeneità" che caratterizza, tanto da un punto di vista "materico" (tipologie murarie, patologie di degrado e/o dissesti in atto, discontinuità locali, ecc.) quanto di concezione (tipologia strutturale, sviluppo in pianta ed in altezza, collocazione, condizioni di vincolo, ecc.) l'edificio in muratura per sua genesi, rende ogni caso diverso dall'altro; di conseguenza il progetto del consolidamento dev'essere concepito in maniera "sartoriale" poiché gli interventi pianificati devono "calzare a pennello" sull'edificio in funzione delle reali problematiche accuratamente indagate. Con particolare attenzione nel caso di edifici in aggregato gli interventi di consolidamento strutturale vanno infatti pianificati in un'ottica globale di coscienza tecnica, al fine di perseguire un reale presidio antisismico e non già supplire esclusivamente ad una necessità di apprestamento emergenziale in totale economia. In tal senso la scelta del tipo di intervento è un aspetto fondamentale, ed i compositi fibrorinforzati possono sicuramente aprire nuove prospettive in molti casi.

I sistemi in materiale composito, comunemente raggruppati nella grande famiglia degli FRP (acronimo di Fiber Reinforced Polymers), si inseriscono nell'attuale panorama dei rinforzi strutturali quale valida alternativa alle tradizionali tecniche impiegate sul c.a., come, per esempio, il placcaggio o l'incamiciatura di strutture o di parti di esse con piatti o profilati metallici, oppure, più comunemente, come il ringrosso delle sezioni con lo stesso calcestruzzo armato.

Rispetto alle tecniche tradizionali però il rinforzo con materiali compositi offre non pochi vantaggi.

Gli FRP presentano infatti, se paragonati a queste ultime, elevatissime prestazioni strutturali in termini di resistenza a trazione e flessione, a fronte di un'estrema leggerezza. In relazione all'a-

spetto applicativo il punto di forza degli FRP è rappresentato da rapidità, semplicità e pulizia nella messa in opera, caratteristiche queste che talvolta possono risultare indispensabili, specie nel caso di edifici particolarmente grandi e/o già abitati. Gli spessori minimi ottenibili negli interventi con FRP (praticamente trascurabili) e il fatto che questi tipi di rinforzi possano rimanere, al termine dei lavori, totalmente occultati alla vista sono fattori che garantiscono la “non invasività dell’intervento”, criterio basilare se si opera nell’abito di beni storico-architettonici vincolati dalla Sovrintendenza.

In relazione ai possibili campi di applicazione i sistemi compositi presentano un’estrema versatilità d’impiego poiché possono essere adoperati non soltanto per il rinforzo di elementi strutturali in c.a. consueti, quali per esempio travi, solette, pilastri e colonne, setti ed elementi di connessione (nodi), ma anche in strutture più complesse come volte, cupole, gallerie e ponti, silos e vasche, opere geotecniche, ecc. Per quanto attiene ai materiali, oltre che al c.a., gli FRP si accoppiano bene anche alla muratura, al legno e persino all’acciaio.

Si vedrà in seguito come gli interventi di rinforzo strutturale con materiali compositi spesso costituiscano, se inquadrati nell’ambito di una coscienziosa e completa progettazione antisismica, l’alternativa più sicura e prestazionale per la salvaguardia dell’esistente.

Di contro, benché la tecnologia del rinforzo sul c.a. con FRP sia stata utilizzata in varie parti del mondo a partire dalla seconda metà degli anni Ottanta, ancora oggi in Italia si riscontra non di rado una certa diffidenza nei confronti dell’impiego di questi sistemi da parte sia di progettisti che di imprese.

È innegabile infatti come vi siano difficoltà oggettive di approccio verso questi tipi di interventi tanto da un punto di vista progettuale quanto applicativo. Tali difficoltà risiedono sia nella mancanza di informazione che nella presenza di riferimenti normativi non sempre puntuali e chiari. Questi motivi possono costituire ostacolo alla progettazione esecutiva, intesa come scelta del tipo di intervento, procedure di calcolo, controlli sui materiali, direzione dei lavori. A questo si aggiunga il fatto che, operativamente, la mancanza di formazione da parte delle imprese si traduce in carenza di manodopera qualificata.

Nel complesso panorama fin qui delineato trova collocazione questo manuale pratico di progettazione degli interventi di rinforzo strutturale con l’impiego di FRP, che, rivolgendosi principalmente ai tecnici, si pone come obiettivo quello di far loro da guida nelle varie fasi progettuali fornendo un supporto concreto a partire dalla scelta del tipo di sistema da impiegare sino al completamento delle operazioni di cantiere.

PARTE PRIMA
I compositi fibrorinforzati

1. Le generalità dei compositi fibrorinforzati

1.1. Le definizioni e i concetti base

Con il generico termine “materiali compositi fibrorinforzati”, o più impropriamente FRP, si indicano tutti quei sistemi strutturali costituiti da due fasi macroscopicamente distinguibili caratterizzate da proprietà fisiche totalmente differenti tra loro il cui accoppiamento implementa qualitativamente le potenzialità dei materiali base considerati separatamente rispetto alle potenzialità del sistema composito corrispondente.

La fibra (fase discontinua) costituisce l'ossatura portante di questo sistema, cioè la struttura o “rinforzo”; la “matrice” (fase continua) invece, di natura organica (FRP cioè *Fiber Reinforced Polymers*) o inorganica (FRG cioè *Fiber Reinforced Grouts*), oltre a tenere insieme il tutto e a proteggere le fibre, svolge l'importante ruolo di ridistribuire gli sforzi in maniera uniforme sul substrato (figura 1.1).

Vasto è lo scenario di soluzioni FRP offerte dal mercato; soluzioni che andrebbero scelte di volta in volta mediando tra esigenze strutturali ed esigenze operative e logistiche.

In questo capitolo, preliminare alla progettazione vera e propria degli interventi, si cercherà di mettere ordine in questo variegato panorama, andando ad analizzare sia le differenti tipologie di sistemi disponibili in commercio sia le singole fasi costituenti questi sistemi in relazione ai materiali impiegati.

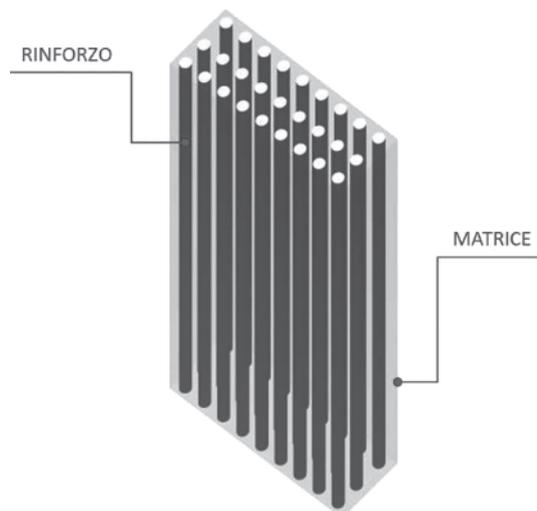


Figura 1.1
Struttura di un composito fibrorinforzato

1.2. I principali sistemi FRP

Il primo importante distinguo inerente le modalità di produzione, da cui conseguono impieghi e fasi applicative differenti, riguarda le due grandi famiglie di compositi fibrorinforzati: i sistemi impregnati in opera e i sistemi pre-impregnati.

Si intende precisare che in entrambi i casi si sta facendo riferimento a soluzioni per il rinforzo di strutture portanti in cui la fibra, pur rappresentando di per sé la fase discontinua del sistema, presenta una sua continuità intrinseca nonché un orientamento preferenziale.

Vi è infatti anche un altro vasto filone afferente ai compositi fibrorinforzati, di cui però non ci si occuperà in questa sede, che riguarda tutti quei sistemi in cui la fibra si trova in fase dispersa. Quest'ultima infatti – distribuita con orientamento casuale all'interno della matrice, prevalentemente inorganica, e costituita perlopiù da spezzoni di filamenti o da singole particelle di varia natura – ne costituisce la “carica”. È con questo procedimento che si ottengono intonaci, malte da ripristino e calcestruzzi altamente prestazionali con caratteristiche differenti a seconda della natura e del quantitativo di aggiunte in fibra.

1.2.1. I sistemi impregnati in opera

Nei sistemi impregnati in opera (*wet lay-up*) la matrice viene aggiunta alla fibra in cantiere. Di conseguenza la polimerizzazione delle resine avviene in sito, al termine del cosiddetto *pot-life*, tempo in cui la matrice, quasi sempre organica e bicomponente, risulta ancora lavorabile.

Parlando di sistemi FRP impregnati in opera, le tipologie di fibre presenti in commercio, sotto forma di rotoli, sono essenzialmente:

- tessuti unidirezionali
- tessuti multidirezionali
- reti,

a loro volta disponibili in differenti materiali.

I tessuti vengono impiegati prevalentemente nel rinforzo strutturale di elementi in c.a., le reti invece trovano applicazione perlopiù nel rinforzo di strutture murarie.

1.2.1.1. I tessuti unidirezionali

I tessuti unidirezionali sono ottenuti per tessitura di fibre di varia natura secondo un'unica direzione preferenziale nel piano (figura 1.2). Tali fibre, orientate tutte nella direzione della lunghezza del rotolo, sono tenute insieme da una trama leggera di tipo non strutturale.

Dato l'orientamento unidirezionale del rinforzo, che produce una risposta meccanica del sistema altamente anisotropa, i compositi rinforzati con tessuti unidirezionali possono essere impiegati esclusivamente in risposta ad una sollecitazione di tipo unidirezionale.

Il campo di applicazione abbraccia sia gli interventi di riparazione di elementi strutturali in cemento armato danneggiati da azioni fisico-meccaniche che il loro adeguamento o miglioramento sismico.

1.2.1.2. I tessuti multidirezionali

I tessuti multidirezionali variano in base al tipo di tessitura. Si possono infatti ottenere, come

nel caso dei tessuti bi-assiali (figura 1.3), due direzioni preferenziali di orientamento delle fibre (generalmente a 90° tra loro), oppure più direzioni preferenziali, come avviene invece nel caso dei tessuti quadri-assiali (figura 1.4), in cui le direzioni sono quattro: due di esse ortogonali tra loro e le restanti due disposte a 45° dalle prime.

I tessuti multidirezionali trovano impiego sia in interventi di riparazione o integrazione della sezione resistente di elementi in calcestruzzo armato danneggiati da azioni fisico-meccaniche, sia in interventi di adeguamento o miglioramento sismico.

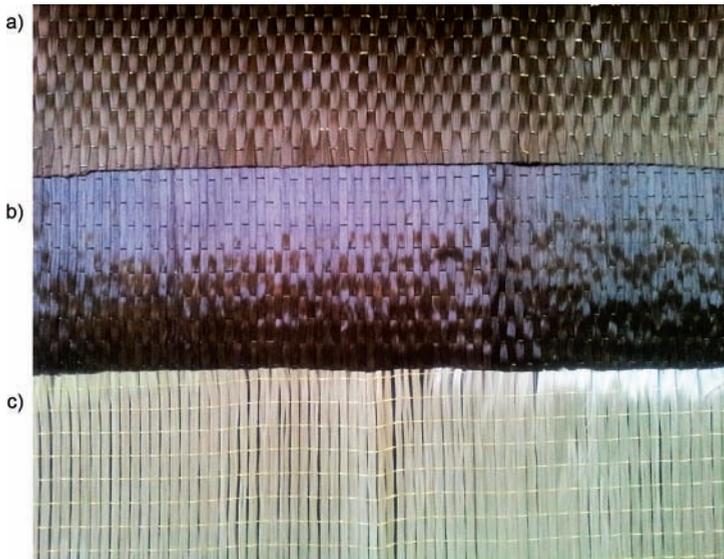


Figura 1.2. Differenti tipi di tessuti unidirezionali. Dall'alto: a) basalto, b) carbonio, c) vetro



Figura 1.3. Tessuto bi-assiale in fibra di carbonio

Nei tessuti multidirezionali la tessitura trama-ordito è generalmente bilanciata, ossia la fibra è distribuita equamente, da un punto di vista sia quantitativo che qualitativo, secondo le due o più direzioni preferenziali.

A tal proposito risulta di fondamentale importanza da parte del progettista verificare sempre, già in fase preliminare, la rispondenza o meno del prodotto a tale requisito.

Il bilanciamento delle fibre nel tessuto multidirezionale è infatti una specifica che il produttore ha l'obbligo di indicare sulla scheda tecnica poiché questo dato risulta fondamentale nella progettazione ai fini di una corretta schematizzazione della risposta alle sollecitazioni da parte del sistema FRP scelto.



Figura 1.4. Tessuto quadri-assiale in fibra di carbonio

1.2.1.3. Le reti

Le reti, che rispetto ai tessuti risultano generalmente meno prestazionali in termini di resistenza a trazione, si distinguono visivamente da essi poiché sono solo bidirezionali, a fibre ortogonali, e a maglie più larghe (figura 1.5).

Da un punto di vista operativo, contrariamente a quanto accade per i tessuti, le reti vengono impiegate prevalentemente in abbinamento a matrici inorganiche cioè cementizie, per il rinforzo locale o generalizzato di paramenti murari di varia natura; solo in rare occasioni sul calcestruzzo.

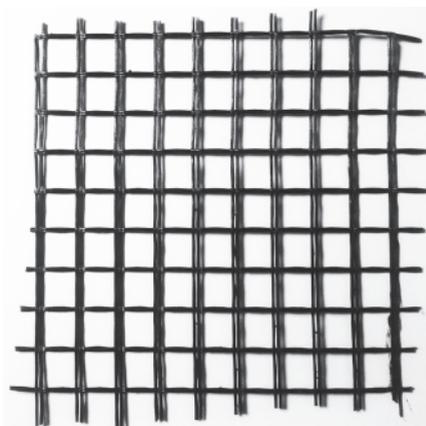


Figura 1.5
Rete in fibra di vetro alcali-resistente

1.2.2. I sistemi pre-impregnati pultrusi

Nei sistemi pre-impregnati pultrusi (*pre-preg*) la fibra, sotto forma di filato oppure di tessuto, viene saturata con la matrice resinosa, che in seguito polimerizza all'interno dello stampo, nel processo industriale cosiddetto di pultrusione. Di conseguenza, poiché la reticolazione del polimero avviene in tempi differenti rispetto all'applicazione del rinforzo strutturale, risulta indispensabile in cantiere l'impiego di un prodotto che promuova l'adesione e la mutua collaborazione del sistema FRP con il substrato; per l'appunto un adesivo. In realtà i compositi pre-impregnati risultano di più agevole messa in opera dato il numero ridotto di fasi applicative e materiali costituenti.

I principali prodotti FRP pre-impregnati sono essenzialmente: lamine, tubi e barre oltre che profilati strutturali.

Per chiarezza e completezza di informazioni va però precisato che i sistemi pre-impregnati sin qui descritti sono in realtà definiti dalla normativa (Istruzioni CNR-DT 200) *sistemi preformati* e sono completamente polimerizzati in stabilimento, mentre quelli che la normativa definisce *sistemi pre-impregnati* subiscono, al livello industriale, solo un processo di pre-polimerizzazione. Tali compositi, forniti in rotoli o in fogli sottili flessibili racchiusi da film distaccanti in quanto moderatamente appiccicosi, completano il loro processo di polimerizzazione in sito; a seguito di opportuni trattamenti termici avviene infatti la reticolazione vera e propria della resina. Per questo motivo è fondamentale che tali sistemi vengano conservati, prima dell'applicazione, in condizioni di temperatura e umidità controllate.

I sistemi compositi pre-impregnati parzialmente polimerizzati, di fatto poco diffusi in commercio, non verranno approfonditi in questa sede. Di conseguenza, con il termine *pre-impregnati* nel prosieguo della trattazione si indicheranno, per semplicità, esclusivamente sistemi preformati pultrusi completamente polimerizzati.

1.2.2.1. Le lamine

Le lamine pre-impregnate con resina epossidica, il più delle volte in fibra di carbonio, sono una valida alternativa al classico intervento di beton plaqué (figura 1.6).

Le lamine pre-impregnate vengono inoltre molto frequentemente utilizzate nel rinforzo a flessione di travi e di solai laterocementizi al fine di aumentare la capacità portante dei travetti e limitarne la freccia di inflessione.



Figura 1.6
Lamina in fibra di carbonio (fonte: scheda tecnica Kimitech PLATE ST 5 610 – Kimia)

1.2.2.2. Le barre

Le barre, in fibra di vetro o di carbonio (figura 1.7) a seconda delle esigenze specifiche di resistenza a trazione richiesta, pre-impregnate con una matrice resiliente, trovano impiego nella riparazione e nel rinforzo strutturale di elementi in calcestruzzo, legno o muratura danneggiati da azioni fisico-meccaniche e/o da vetustà.

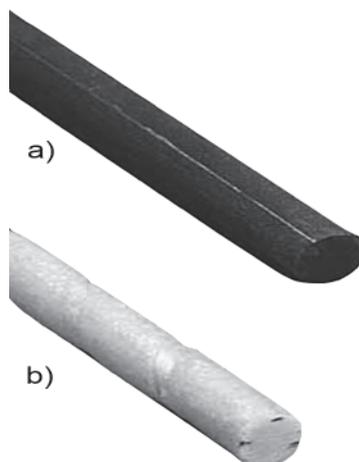


Figura 1.7
Dall'alto: a) barra in fibra di carbonio, b) barra in fibra di vetro (fonte: scheda tecnica Maperod – Mapei)

1.2.2.3. I tubi

I tubi in fibra di carbonio o in altro materiale sono una variante cava alle barre pre-impregnate. Essi sostituiscono, con l'ausilio di opportuni beccucci iniettori (figura 1.8) per far penetrare a pressione una resina oppure una boiaccia a seconda delle esigenze, le tradizionali cuciture armate metalliche. Trovano impiego nel recupero strutturale e funzionale di elementi in calcestruzzo e muratura anche nel caso di rilevanza storico-monumentale.

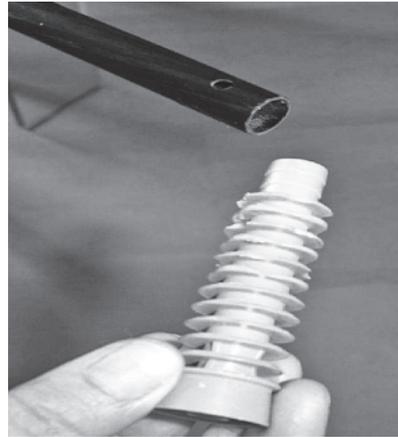


Figura 1.8
Tubo in fibra in abbinamento
a beccuccio iniettore (fonte: Mapei)

1.2.2.4. I profilati pultrusi strutturali

I profilati pultrusi strutturali (figura 1.9), ovvero travi preimpregnate a profilo aperto o chiuso in fibra di vetro, vengono impiegati prevalentemente nelle nuove costruzioni (passerelle, ponti pedonali, solai di grandi luci) data la grande leggerezza oltre che conseguente facilità di movimentazione rispetto all'acciaio, ma anche, in alcuni casi, per interventi sull'esistente nel rinforzo di solai o nel placcaggio di coperture lignee.

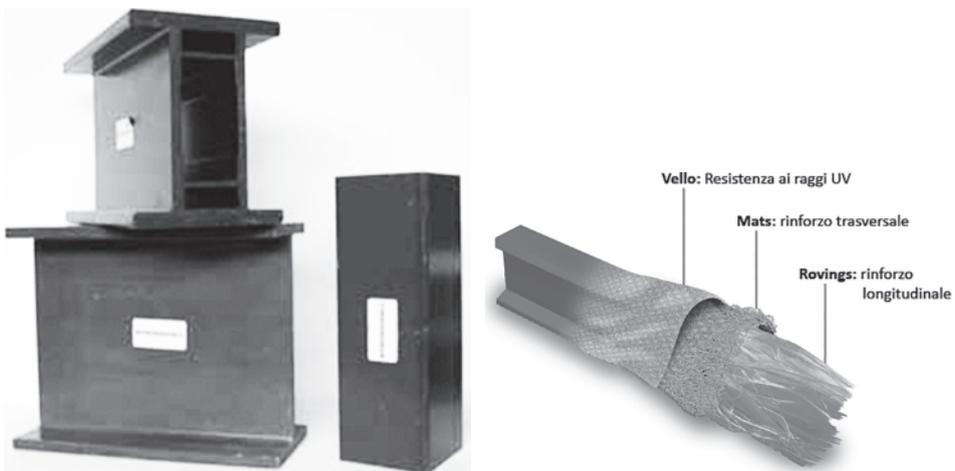


Figura 1.9. A destra: struttura di un profilato in GFRP. A sinistra: varietà di profilati strutturali in fibra di vetro (fonte: www.ectsystem.eu)

1.2.2.5. Le connessioni

Per concludere il quadro dei rinforzi strutturali per compositi si ricordano le connessioni: dif-

ferenti sono le tipologie disponibili, dai fiocchi in fibra di carbonio, basalto, acciaio o vetro (figura 1.10), alle L in fibra di vetro da abbinare ad analoghe reti o fasce di tessuto.

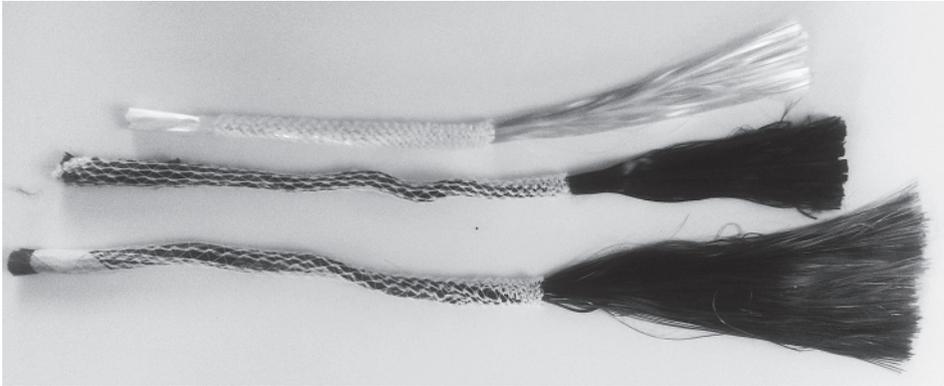


Figura 1.10. Fiochi connettori rispettivamente dal basso in fibra di basalto, carbonio e vetro

1.2.3. Le fasi costituenti gli FRP

Come già accennato, le caratteristiche di un composito fibrorinforzato dipendono sia dalle proprietà chimico-fisiche delle singole fasi costituenti il sistema sia dalla distribuzione della fibra in termini quantitativi e di orientamento spaziale all'interno della matrice.

Data pertanto la grande disponibilità di scelta e diversità in termini di prestazioni ottenibili, è dovere del progettista approfondire, già in fase preliminare, la conoscenza dei vari sistemi di rinforzo sul mercato a partire dalle due fasi costituenti (rinforzo e matrice) in relazione alla loro natura chimica e alle caratteristiche fisico-meccaniche, al fine di poter formulare la soluzione più appropriata.

1.2.3.1. Le fibre

I rinforzi per compositi, indipendentemente dal materiale con cui sono costituiti e dalla loro conformazione finale (tessuti, lamine, barre, ecc.), sono tutti ottenuti a partire dall'intreccio di minuscoli filamenti.

Tali filamenti di piccolissimo diametro (alcuni micron) (figura 1.11), una volta rivestiti con un film protettivo, detto *appretto*, vengono raggruppati in quantità variabile e torti su se stessi a formare ogni singola fibra o filo. La torsione contribuisce a conferire una maggiore coesione al filo, inoltre al variare del numero di filamenti impiegati per produrlo, varia anche il peso per unità di lunghezza e quindi, a parità di materiale, la resistenza.

Il processo di filatura, al livello microscopico, conferisce ai filamenti straordinaria perfezione perché si ha la quasi totale assenza di difetti nella struttura cristallina, date le dimensioni minime della sezione trasversale del singolo filamento. Questo fatto, al livello macroscopico, si traduce in prestazioni eccezionali quali:

- elevata resistenza a trazione
- elevato modulo elastico
- grande leggerezza.

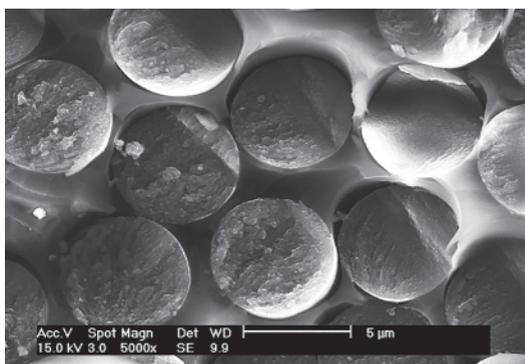


Figura 1.11
FRP visto al microscopio
(fonte: laboratori Mapei)

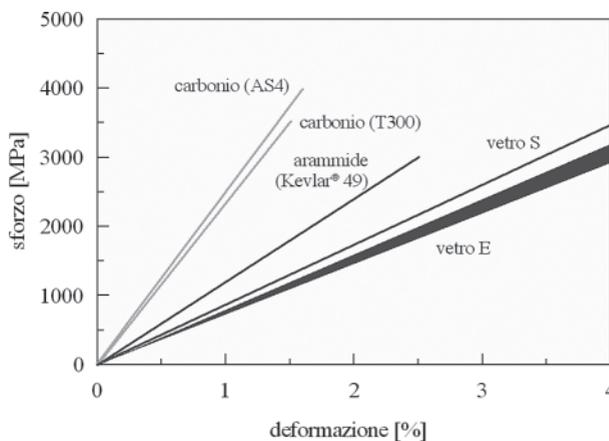


Figura 1.12
Confronto tra le più comuni fibre di
rinforzo: comportamento
a trazione monoassiale
(fonte: CNR DT 200/2004)

Va ricordato che le lavorazioni successive a cui il filato viene sottoposto, come la tessitura o la pultrusione, danneggiano una parte delle fibre riducendone i valori di resistenza e modulo elastico; questo è vero quanto più il tipo di lavorazione è invasiva. È un dato sperimentale infatti che la tessitura bidirezionale incida negativamente molto più di quella unidirezionale sulla qualità del filato.

Nell'ambito dei rinforzi strutturali vengono utilizzate prevalentemente fibre di carbonio, di vetro, aramidiche e di basalto, meno d'acciaio. Con queste fibre si producono svariate tipologie di trame e tessuti, tra cui anche ibridi, cioè tessuti in cui vengono impiegate al contempo fibre diverse.

Prima di procedere alla rassegna delle principali tipologie di fibre impiegate nell'ambito dei rinforzi strutturali è bene chiarire un aspetto di fondamentale importanza.

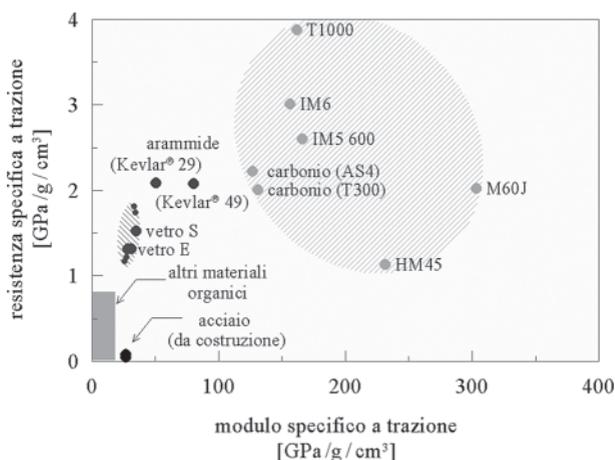
Il primo parametro meccanico che deve influenzare la scelta del tipo di fibra da impiegare non è la resistenza a trazione, bensì il modulo di elasticità o modulo di Young (E), graficamente rappresentato dalla tangente al tratto a comportamento elastico-lineare nel diagramma sforzo-deformazione (figura 1.12).

Infatti, mentre la tensione di esercizio cui vengono sottoposte in genere le fibre è piuttosto contenuta in confronto alle loro reali potenzialità, il modulo elastico a trazione è invece decisivo in quanto è misura della quota parte di irrigidimento fornito alla struttura dal rinforzo FRP. D'altro canto è indispensabile irrigidire garantendo la compatibilità in termini di modulo ela-

stico del sistema FRP adottato con quello della struttura da rinforzare, in modo da non indurre tensioni eccessive localizzate o peggiori danni sulla struttura in punti prossimi all'interfaccia col rinforzo, proprio a causa di una risposta meccanica totalmente differente da parte dei due sistemi (per esempio paramento murario rinforzato con fibre di carbonio vs paramento murario non rinforzato).

Per questo motivo, mentre nel rinforzo di elementi in c.a. si prediligono fibre più rigide come il carbonio, nell'ambito delle strutture in muratura si scelgono fibre da rinforzo più deformabili come quelle di vetro o aramidiche (figura 1.13).

Figura 1.13
Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: i valori del modulo di resistenza a trazione sono riferiti alla densità, cioè sono valori specifici (fonte: CNR DT 200/2004)



1.2.3.2. Le fibre di carbonio

Nell'ambito strutturale le fibre di carbonio rappresentano certamente il rinforzo più diffuso. Rispetto alle fibre di vetro quelle di carbonio possiedono tre importanti vantaggi:

- elevato modulo elastico
- bassa massa volumica
- bassissimo coefficiente di dilatazione termica.

Le fibre di carbonio sono quindi poco deformabili, leggere e sono dotate di una buona stabilità dimensionale al variare della temperatura. Il loro comportamento a rottura è di tipo fragile, cioè non subiscono deformazioni sensibili fino al carico limite, soglia al cui raggiungimento si rompono improvvisamente. Esse risultano inoltre poco sensibili ai fenomeni di *creep* (scorrimento viscoso di un materiale sottoposto a sforzo costante) e resistono bene anche a fatica, cioè se sottoposte all'azione di carichi ciclici non si deformano né frantumano (come invece accade specie nei metalli con la comparsa delle caratteristiche cricche) (tabella 1.1).

Le ottime proprietà meccaniche delle fibre di carbonio, che le rendono particolarmente adatte agli interventi sul c.a., derivano dalla particolare struttura cristallina della grafite. Quanto più tale struttura risulta perfetta, cioè esente da difetti, tanto più il materiale possiede caratteristiche di resistenza elevate. L'orientamento più o meno preciso dei cristalli di grafite, che dipende dal processo produttivo di "stabilizzazione", influisce molto sull'anisotropia del materiale fi-

nito; questo fa sì che i valori di riferimento delle caratteristiche meccaniche delle fibre presi in considerazione nella progettazione debbano essere ridotti rispetto a quelli teorici. Essendo appunto un materiale marcatamente anisotropo, parametri meccanici quali resistenza e modulo di elasticità risultano elevati in direzione longitudinale alla fibra; viceversa risultano bassi nella direzione della sezione trasversale.

Durante il processo produttivo le fibre di carbonio si ottengono a partire da fibre organiche tessili di rayon o PAN (poliacrilonitrile), dette *precursori*, che vengono poi trasformate in grafite. Le proprietà meccaniche della fibra di carbonio così ottenuta vengono poi potenziate sottoponendo il materiale ad ulteriori trattamenti quali la carbonizzazione e la grafitizzazione. Nel primo trattamento si raggiunge un carico di rottura maggiore e, quindi, una resistenza più elevata, nel secondo un più elevato modulo elastico, cioè una maggiore rigidità.

Poiché però nelle fibre di carbonio all'aumento del modulo di elasticità corrisponde una riduzione della resistenza, la normativa introduce due differenti categorie di materiale:

- C1: fibre di carbonio ad alto modulo elastico (o HM, High Modulus);
- C3: fibre di carbonio ad alta resistenza a trazione (o HS, High Straight).

1.2.3.3. Le fibre di vetro

Le fibre di vetro, a differenza di quelle di carbonio, pur possedendo una buona resistenza a trazione presentano un basso modulo elastico e inoltre sono particolarmente soggette a problemi di creep e fatica in seguito all'azione di carichi ciclici (tabella 1.1).

Anche la resistenza all'abrasione è modesta, tanto che necessitano di essere movimentate con cautela al fine di garantire la messa in opera di un prodotto perfettamente integro.

Di contro è ottima la resistenza al fuoco, in quanto le fibre di vetro possono essere da parzialmente a totalmente ignifughe; inoltre è abbastanza basso il decadimento delle proprietà meccaniche per effetto delle alte temperature. Anche la stabilità dimensionale in seguito a variazioni termiche è ottima, e il costo più contenuto rispetto alle altre tipologie di fibre.

Per garantire una maggiore durabilità in termini di compatibilità con la specifica matrice alla quale verranno accoppiate, le fibre di vetro vengono sottoposte ad ensimaggio con olio e appretto, che le rende alcali-resistenti.

Questo trattamento è indispensabile nel caso in cui la fibra di vetro venga annegata in una matrice inorganica, come peraltro avviene il più delle volte. Infatti una rete in fibra di vetro non resistente agli alcali impregnata con una matrice inorganica (per esempio una rasatura cementizia rinforzata con rete) subisce un processo corrosivo, catalizzato in ambiente umido, che a livello microscopico distrugge via via la struttura del materiale, e ben presto la rete "si scioglie" e scompare letteralmente all'interno della matrice, rendendo quindi il sistema composto totalmente inefficace.

È inoltre dimostrato come la ricopertura delle fibre possa anche migliorarne la resistenza fino al 20% in più; e, fatto ancora più importante, che l'appretto in specifici casi serve a incrementare in maniera sostanziale la resistenza dell'intero sistema FRP, promuovendo un'interazione chimica tra matrice e rinforzo, che si traduce in un legame strutturale tra fibre di vetro e resina. Le fibre di vetro per rinforzi strutturali indicate dalla normativa italiana appartengono a due macro-categorie:

- E: fibre di vetro con modulo elastico e resistenza a trazione standard;
- S: fibre di vetro con elevato modulo elastico ed elevata resistenza a trazione.

1.2.3.4. Le fibre aramidiche

Note commercialmente col nome di Kevlar[®], le fibre aramidiche sono fibre di natura organica con una struttura chimica ad orientamento preferenziale. Esse si distinguono per l'elevata tenacità e per la loro resistenza alla manipolazione e all'abrasione. I valori del modulo di elasticità e della resistenza a trazione sono intermedi tra quelli delle fibre di vetro e di carbonio (figura 1.13 e tabella 1.1).

Tabella 1.1. Confronto tra le proprietà delle fibre di rinforzo, le matrici più comuni e l'acciaio da costruzione (fonte: CNR DT 200/2004)

	Modulo di elasticità normale E	Resistenza a trazione σ_r	Deformazione a rottura ε_r	Coefficiente di dilatazione termica α	Densità ρ
	[GPa]	[MPa]	[%]	[$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]	[g/cm ³]
Fibre di vetro E	70-80	2000-3500	3.5-4.5	5-5.4	2.5-2.6
Fibre di vetro S	85-90	3500-4800	4.5-5.5	1.6-2.9	2.46-2.49
Fibre di carbonio (alto modulo)	300-760	2400-3400	0.5-0.8	-1.45	1.85-1.9
Fibre di carbonio (alta resistenza)	240-280	4100-5100	1.6-1.73	-0.6-0.9	1.75
Fibre aramidiche	62-180	3600-3800	1.9-5.5	-2	1.44-1.47
Matrice polimerica	2.7-3.6	40-82	1.4-5.2	30-54	1.10-1.25
Acciaio da costruzione	206	250-400 (snervamento) 450-600 (rottura)	20-30	10.4	7.8

La resistenza a compressione è invece circa 1/8 di quella a trazione. Questo può rappresentare un serio problema in quanto, a causa dell'anisotropia della struttura della fibra, eventuali componenti di compressione dell'azione sollecitante possono favorire lo snervamento localizzato del materiale. Le fibre aramidiche sono inoltre sensibili all'umidità e a una prolungata esposizione alla luce solare che può indurre ad una riduzione della resistenza a trazione fino al 50%. Per i motivi appena descritti le fibre aramidiche sono poco competitive nell'ambito del rinforzo di strutture in c.a. se paragonate alle fibre di carbonio; viceversa sono più prestazionali di quelle di vetro nel rinforzo di murature.

Il comportamento viscoso (*creep*) è simile a quello delle fibre di vetro, ma rispetto a queste ultime la resistenza a rottura risulta ben più elevata. Anche la resistenza a fatica flessionale è maggiore rispetto a quella delle fibre vetro. Le fibre aramidiche più resistenti in commercio offrono un rapporto di almeno 5:1 sull'acciaio in termini di sola resistenza meccanica.

1.2.3.5. Le fibre di basalto

Le fibre di basalto sono fibre minerali di origine vulcanica paragonabili a quelle aramidiche per

1.2.2.2.4. Gli interventi di collegamento perimetrale a pilastri e travi/solai

Le lavorazioni esecutive per interventi di collegamento perimetrale a pilastri e travi/solai richiedono le seguenti fasi⁷:

- 1) rimozione dell'intonaco esistente lungo le fasce perimetrali di ancoraggio di bordo in modo da conformare una sezione di intaglio ad L di lato 25 cm. Rimozione dell'intonaco esistente lungo le fasce di connessione d'angolo (figura 1.49);

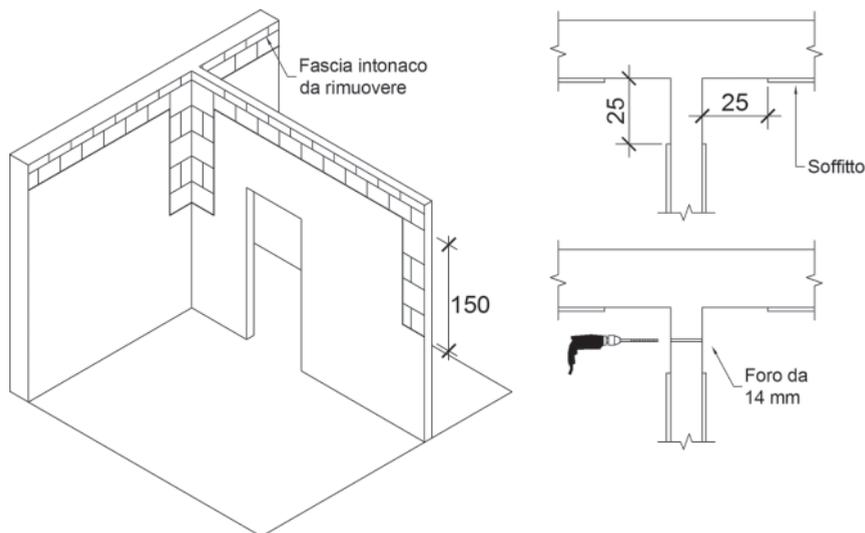


Figura 1.49. Rimozione fascia perimetrale intonaco esistente, depolverizzazione della superficie e lavaggio a bassa pressione

- 2) depolverizzazione delle superfici di intaglio e lavaggio con acqua a bassa pressione in modo da avere le superfici umide prima dell'esecuzione delle fasi successive;
- 3) foratura del tramezzo per l'intero spessore con utensile non battente con diametro non inferiore a 14 mm (figura 1.49);
- 4) occlusione temporanea del foro realizzato, con apposito segnalino removibile, per impedire alla malta cementizia (di successiva applicazione) di penetrarvi e consentirne la successiva individuazione;
- 5) applicazione di primo strato di malta cementizia bicomponente ad elevata duttilità sulla intera superficie conformata ad L per uno spessore di circa 6 mm avendo cura di arrotondare gli angoli fino ad ottenere una curvatura degli stessi non inferiore a 25 mm. Al di sopra del suddetto strato sarà applicata, in sequenza continua, la rete di cui alla successiva fase (figura 1.50);
- 6) applicazione di rete a maglie quadrate bilanciata (0°, 90°) in fibra di vetro di qualità alcali-resistente (vetro A.R.), apprettata allo scopo di migliorare le capacità fisico-meccaniche di aggrappo e ingranamento con la matrice (malta). La rete deve essere applicata sull'intera area trattata avendo cura di far penetrare la malta già applicata all'interno delle maglie della rete (figura 1.50);

⁷ Dipartimento Protezione Civile, *Linee guida per riparazione e rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni*, ReLUIS.

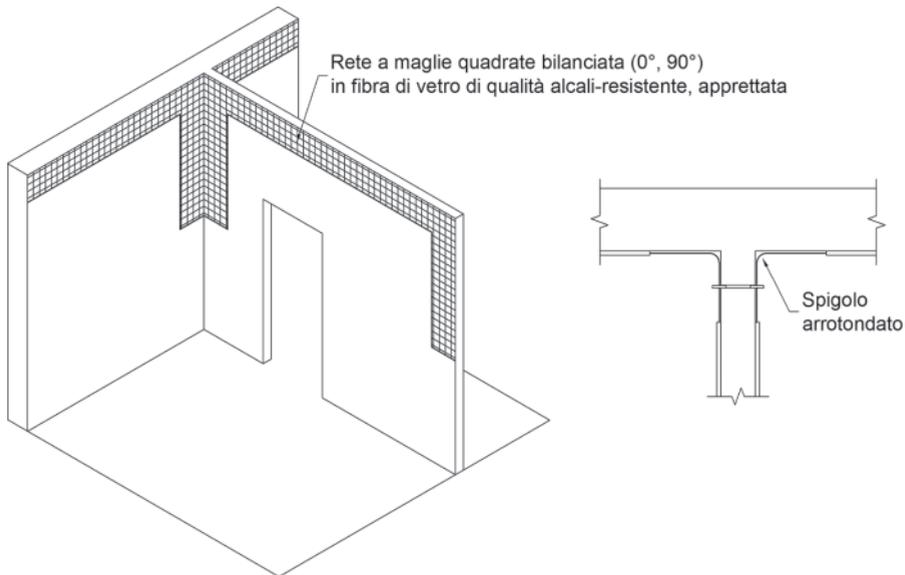


Figura 1.50. Posa in opera di rete a maglie quadrate bilanciate (0°, 90°) in fibra di vetro di qualità alcali-resistente, apprettata

- 7) applicazione di un secondo strato di malta cementizia bicomponente per uno spessore di circa 6 mm sull'intera superficie sulla quale è stata applicata la rete in fibra di vetro. Nell'applicare la malta si avrà cura di lasciare a vista una superficie di rete di dimensioni 10×10 cm intorno a ciascun dei fori realizzati precedentemente (figura 1.51);

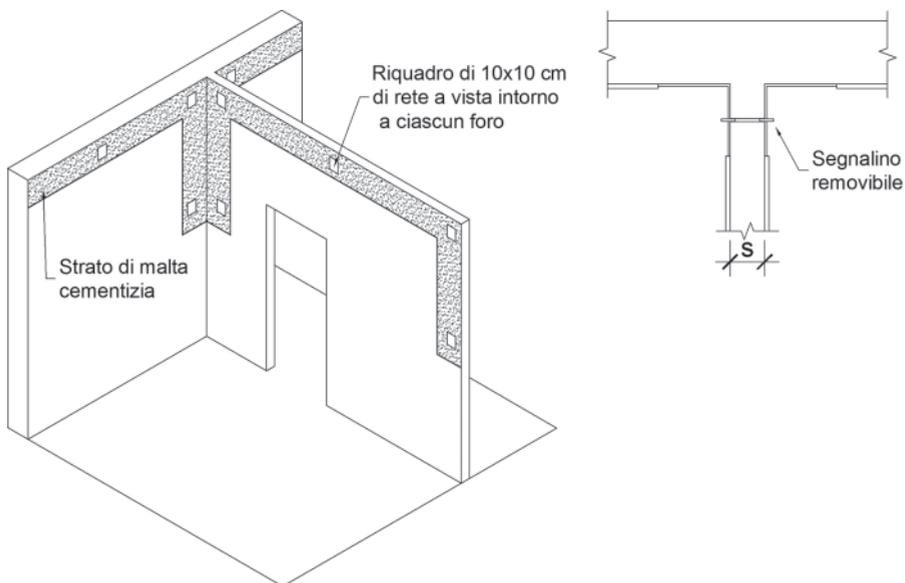


Figura 1.51. Applicazione di strato di malta cementizia bicomponente ad elevata duttilità

- 8) taglio a misura del fiocco-connettore ($L = 30 \text{ cm} + \text{spessore tramezzo} + 30 \text{ cm}$). Impregnazione con stucco epossidico del tratto centrale del fiocco interno allo spessore del tramezzo, al fine di ottenere un elemento impregnato e rigido (figura 1.52);
- 9) spalmatura di stucco epossidico all'interno del foro. Inserimento del fiocco così realizzato avendo cura di lasciare il tratto rigido interno alla muratura e successiva impregnazione con stucco epossidico delle parti terminali da sfioccare (figura 1.53).

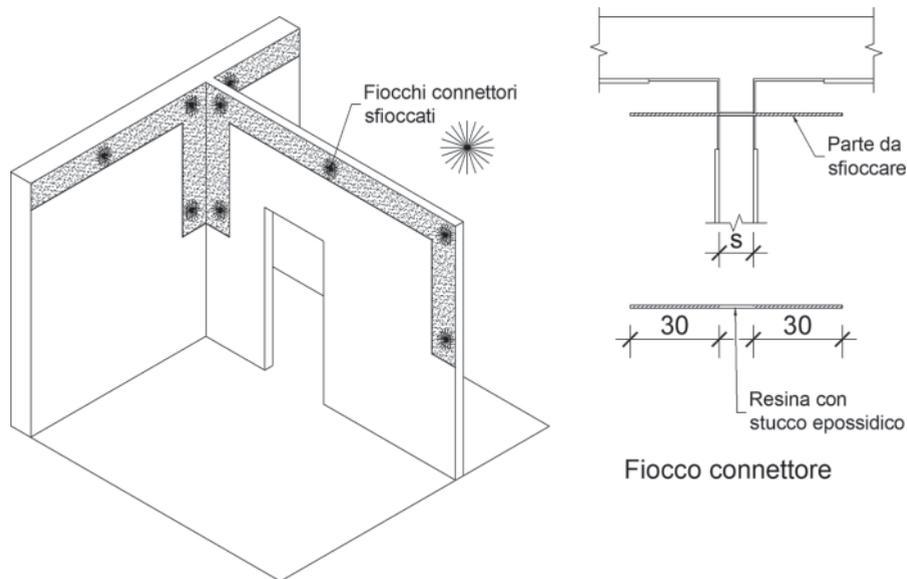


Figura 1.52. Applicazione del fiocco-connettore all'interno dei fori e spalmatura con stucco epossidico delle parti terminali da sfioccare

1.2.2.3. Il rinforzo dei nodi trave-colonna

Contro il possibile martellamento esercitato da tamponature non efficacemente collegate al telaio, è possibile agire altresì sul pannello di nodo, incrementandone la resistenza a taglio nell'ottica della gerarchia delle resistenze.

L'incremento di resistenza a taglio del pannello di nodo può essere conseguito mediante disposizione di tessuto quadriassiale in carbonio, secondo le modalità già illustrate per i nodi non interamente confinati nell'ambito dei meccanismi di collasso a travi forti e pilastri deboli (figura 1.53).

Per i nodi d'angolo, potenzialmente più soggetti a martellamento, è stato studiato uno specifico sistema di rinforzo che vede l'impiego di fasciature metalliche unidirezionali diagonali incrociate per incrementare la resistenza a taglio diretto (figura 1.54).

1.2.2.4. Il collasso a taglio di setti

Nel caso dei setti armati la principale causa di collasso è rappresentata dalla rottura a taglio per effetto di azioni sismiche complanari a quelle della piastra (figura 1.55).



Figura 1.53
Fase di posa del tessuto quadriassiale in fibra di carbonio nel confinamento e rinforzo a taglio del nodo (fonte: Dipartimento Protezione Civile, *Linee guida per riparazione e rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni*, ReLUIS)



Figura 1.54
Rinforzo del nodo d'angolo con fasce di tessuto uniassiale in fibra d'acciaio disposte ad X (fonte: Dipartimento Protezione Civile, *Linee guida per riparazione e rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni*, ReLUIS)



Figura 1.55
Rottura a taglio di setto in c.a. per effetto del sisma (fonte: Dipartimento Protezione Civile, *Linee guida per riparazione e rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni*, ReLUIS)

1.2.2.4.1. Il rinforzo dei setti in c.a.

Per l'esecuzione di rinforzo a taglio dei setti con l'impiego di FRP si può ricorrere all'utilizzo di fasce o reti in fibra di carbonio. Le modalità operative seguono la stessa logica di quelle, in seguito trattate, a proposito del rinforzo di murature portanti contro i meccanismi di collasso di secondo modo.

1.2.2.5. Il collasso a flessione e l'eccessiva deformabilità dei solai

Gli orizzontamenti degli edifici in c.a. possono frequentemente denunciare, in condizioni statiche, problemi di ridotta resistenza a flessione in seguito a mutate condizioni di operatività oppure a causa di degrado avanzato. Anche l'eccessiva deformabilità per la presenza di campate eccessivamente lunghe è un difetto frequente che si riscontra nei solai latero-cementizi.

1.2.2.5.1. Il rinforzo dei solai a flessione e deformazione

L'intervento principe nel rinforzo di solai con l'impiego di compositi fibrorinforzati, specie se latero-cementizi, è sicuramente quello che prevede l'applicazione di lamine pultruse preimpregnate lungo tutti i travetti e per tutta la loro lunghezza, una volta portati a nudo ed eventualmente ripristinati.

Questo tipo di soluzione è estremamente vantaggiosa in termini di facilità, tempi di applicazione e grado di disturbo, oltre che soprattutto di benefici ottenuti. Infatti, riesce a coniugare perfettamente, nel singolo travetto, l'aumento di resistenza a flessione con la limitazione di un'eccessiva freccia d'inflessione in luogo di campate con grandi luci.



Figura 1.56. Rinforzo dei travetti di un solaio latero-cementizio con l'impiego di lamine pultruse in fibra di carbonio (fonte: Mapei)

1.2.2.5.2. Le tipologie di consolidamento dei solai

Il consolidamento dei solai misti in calcestruzzo armato e laterizio ai fini della ripartizione delle forze sismiche orizzontali agli elementi strutturali verticali, può essere eseguito:

- realizzando all'estradosso sopra quella esistente una nuova soletta collaborante in c.a. leggero, dello spessore mediamente di 4 cm e armata con rete elettrosaldata per esempio con \varnothing 6/15 cm, ancorata ai travetti con connettori a L, previa rimozione delle parti preesistenti degradate di calcestruzzo. Particolare attenzione deve essere posta all'ammorsamento della nuova soletta nelle travi perimetrali mediante spillature resinare (figura 1.57);
- ricostruendo il calcestruzzo dei travetti espulso con lo sfondellamento del solaio, previo trattamento dei ferri ossidati, e successiva applicazione con resine epossidiche di lamine in acciaio o FRP all'intradosso di ogni nervatura (figura 1.58);
- inserendo nuove nervature, in calcestruzzo a ritiro compensato, all'interno di file di pignatte realizzate con:
 - travetto precompresso (figura 1.59);
 - travetto con profilato metallico UNP, ferri superiori e staffe saldate alle ali del profilato (figura 1.60).

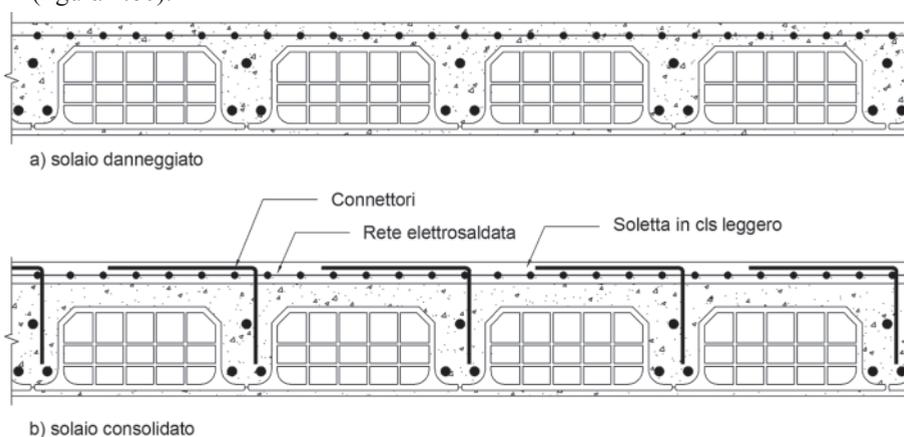


Figura 1.57. Rinforzo di solaio mediante realizzazione di nuova soletta collaborante all'estradosso

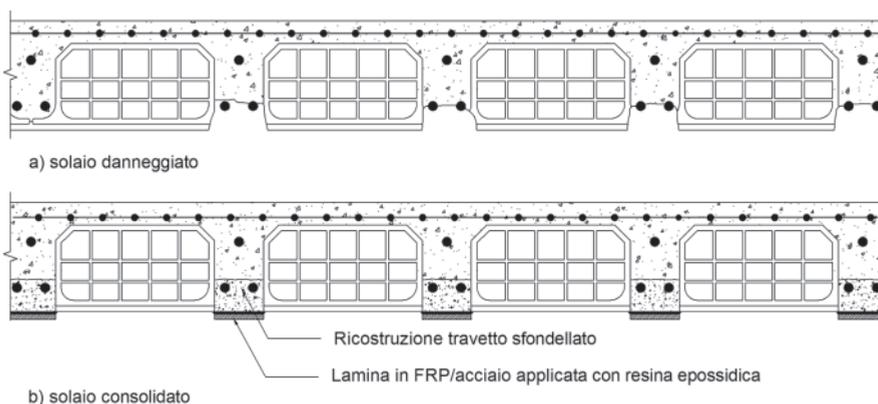


Figura 1.58. Rinforzo di solaio mediante applicazione di lamina d'acciaio o FRP all'intradosso dei travetti

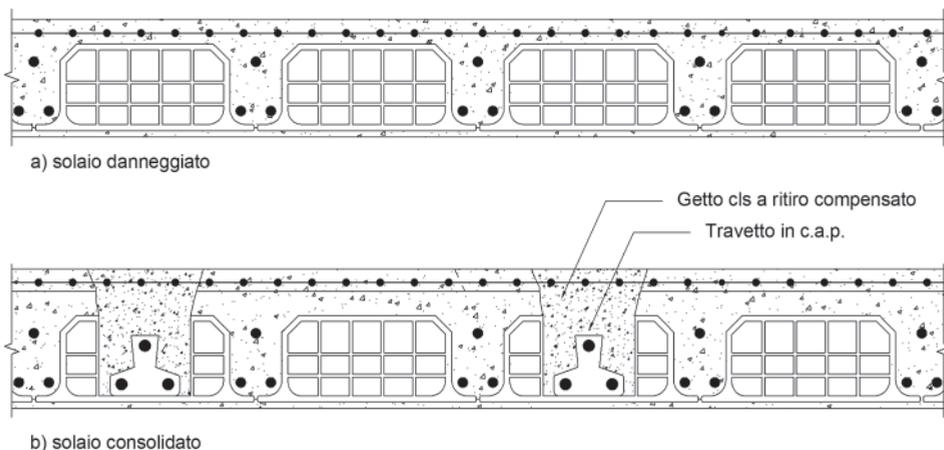


Figura 1.59. Rinforzo di solaio mediante realizzazione di nuovi travetti in c.a.p. all'interno di file di pignatte

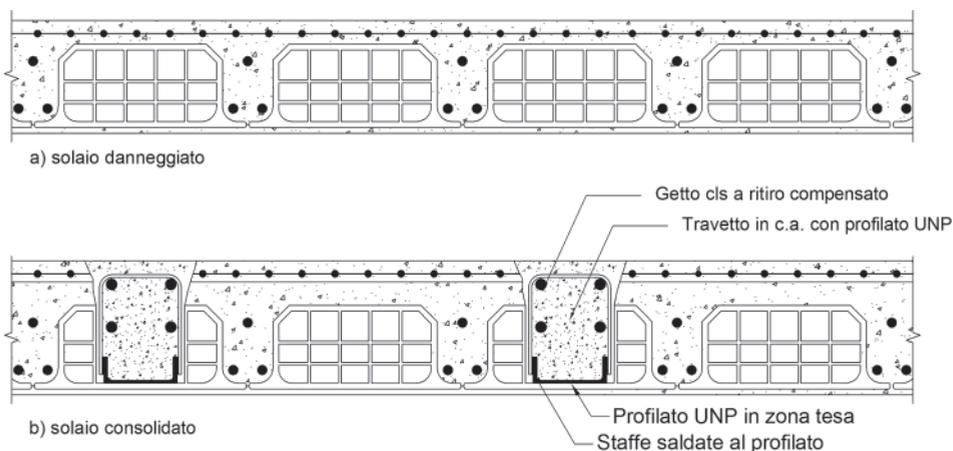


Figura 1.60. Rinforzo solaio mediante realizzazione di nuovi travetti, con profilato metallico UNP e staffe saldate, realizzati all'interno delle pignatte

1.2.3. Il piano delle indagini per la caratterizzazione meccanica dei materiali e loro degrado

Il § 8.5.3 delle Norme tecniche stabilisce che per conseguire un'adeguata conoscenza delle caratteristiche meccaniche dei materiali e del loro degrado ci si deve basare:

- sulla documentazione già disponibile o acquisibile presso gli uffici del Genio civile competente per territorio;
- su verifiche visive in situ;
- su indagini sperimentali.

Le indagini dovranno essere motivate, per tipo e quantità, dal loro effettivo uso nelle verifiche; nel caso di beni culturali e nel recupero di centri storici, dovrà esserne considerato l'impatto in termini di conservazione del bene. Il § C8.5.3 della C.M. n. 617/2009 afferma che il piano delle

La carenza costruttiva riguarda soprattutto gli effetti locali sulle murature conseguenti alla presenza di solai rigidi e pesanti, come il martellamento dei travetti in c.a. oppure l'inserimento di collegamenti (per esempio code di rondine) praticando pesanti interventi di demolizione della muratura al livello dei solai (figura 2.45).

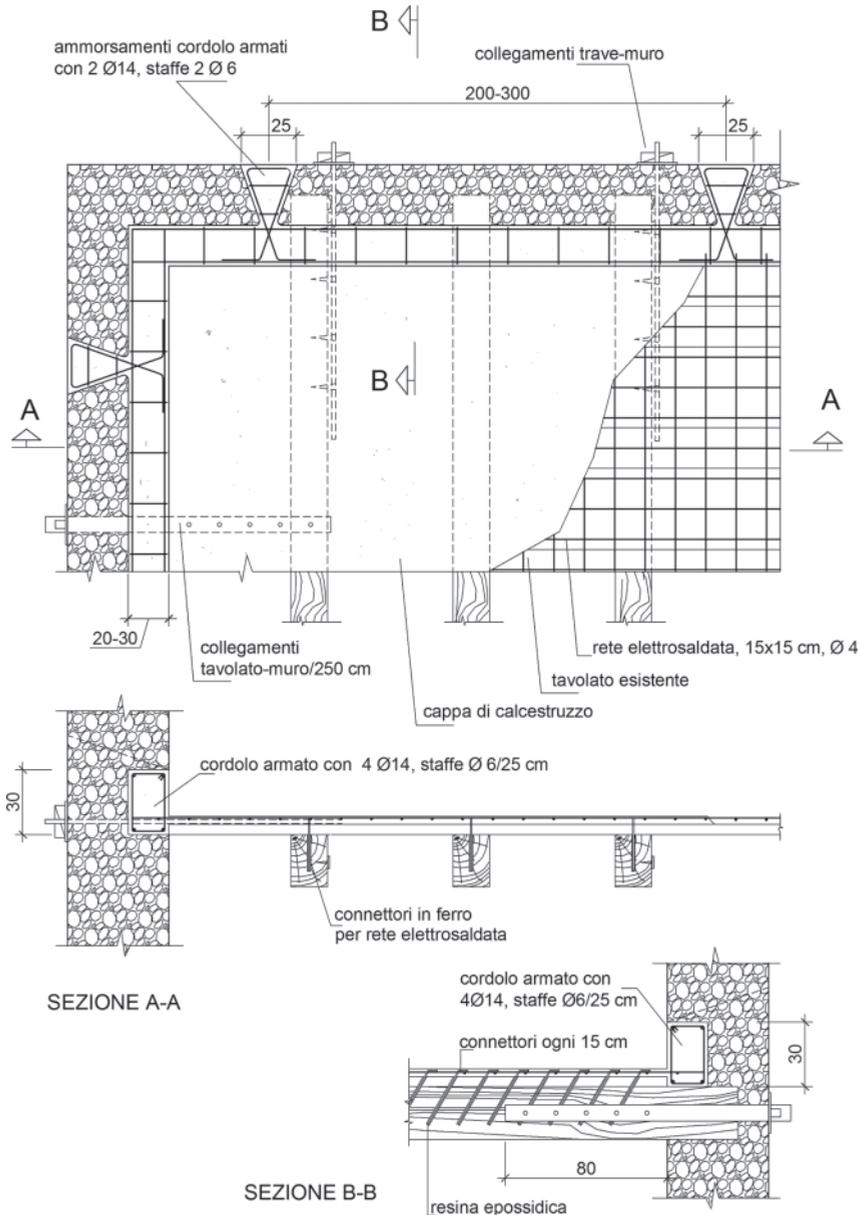


Figura 2.45. Soluzione di solaio in legno irrigidito con cappa di calcestruzzo armato con rete elettrosaldata ancorata alle pareti mediante cordolo in c.a. La soluzione è sconsigliata per i seguenti motivi: eccesso di carico, interruzione della continuità della muratura specie se di pietrame informe durante l'esecuzione dell'intervento

Un altro caso particolarmente critico è quello delle murature a sacco, di per sé deboli, con solai mal vincolati ad esse per mezzo di un cordolo in breccia.

Negli edifici esistenti possono presentarsi i seguenti casi:

- presenza di solai o coperture in cemento armato o in latero-cemento;
- presenza di solai o coperture a travetti (legno, acciaio, travi Varese) con soletta;
- presenza di solai o coperture a travetti (legno, acciaio, ecc.) con collegamenti realizzati dopo aver praticato demolizioni di grosse porzioni di muratura;
- presenza di solai o coperture a travetti (legno, acciaio, travi Varese) senza soletta;
- presenza di solai o coperture in latero-cemento su murature di buona qualità;
- assenza di solai o coperture rigide su murature di scarsa qualità;
- presenza di solai o coperture in latero-cemento su murature nuove.

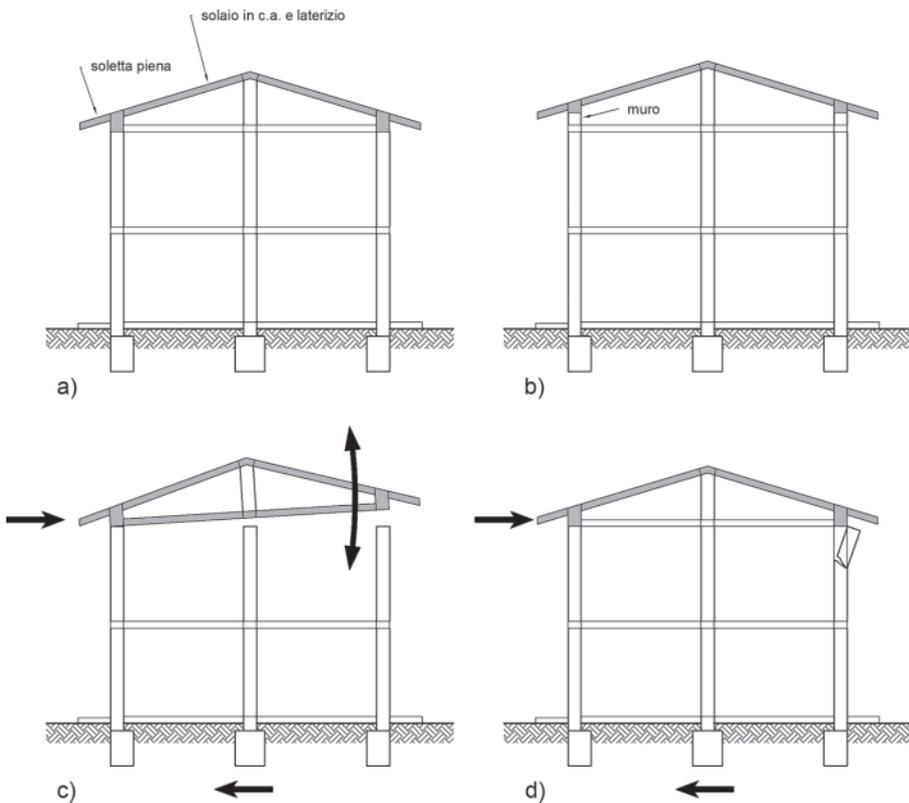


Figura 2.46. Esempi di solai in c.a. realizzati su edifici esistenti in muratura e danni causati dal sisma. Il meccanismo di danno è caratterizzato da una rotazione rigida dell'orizzontamento, dovuta all'azione sismica, che tende a sollevarsi dalla parete. In questo modo si perde l'azione di contenimento che il cordolo esercita sulle murature perimetrali sottostanti che collassano sotto l'azione dell'accelerazione sismica. Il meccanismo si sviluppa in presenza di cordoli sommitali

2.5.6. La mancanza completa o l'inefficacia dei collegamenti fra pareti ed orizzontamenti

Questa carenza si riferisce alla mancanza completa o all'inefficacia dei collegamenti tra pareti ed orizzontamenti, indispensabili per trasferire le azioni sismiche dai solai ai setti murari resistenti, al fine di garantire un buon comportamento scatolare dell'edificio.

La mancanza di adeguati collegamenti tra pareti e orizzontamenti si può esplicitare in termini di:

- 1) appoggio insufficiente dei solai in latero-cemento o in c.a. sulle pareti, senza cordoli o con cordoli inefficaci (non armati o debolmente armati, realizzati con calcestruzzo di scarsa qualità e cattiva posa in opera). La scarsa qualità del calcestruzzo e/o l'insufficienza o errata disposizione delle armature del cordolo (assenza di staffe, errata disposizione agli incroci ecc.) non garantiscono il corretto ancoraggio dell'armatura del travetto né permettono il comportamento scatolare dell'edificio;

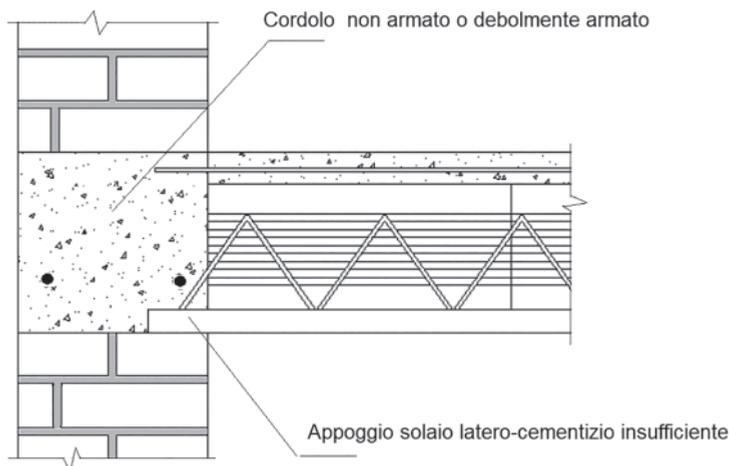


Figura 2.47. Collegamento realizzato con cordolo non armato o debolmente armato o di scarsa qualità e appoggio solaio latero-cementizio insufficiente

- 2) assenza di ancoraggi adeguati tra le travi in legno o in metallo dei solai alla muratura. Nei solai in ferro e tavelloni non di rado le putrelle in ferro vengono semplicemente appoggiate sulla muratura per una profondità insufficiente senza essere collegate a questa, tramite le barre di ancoraggio saldate o con l'eventuale cordolo in c.a.;

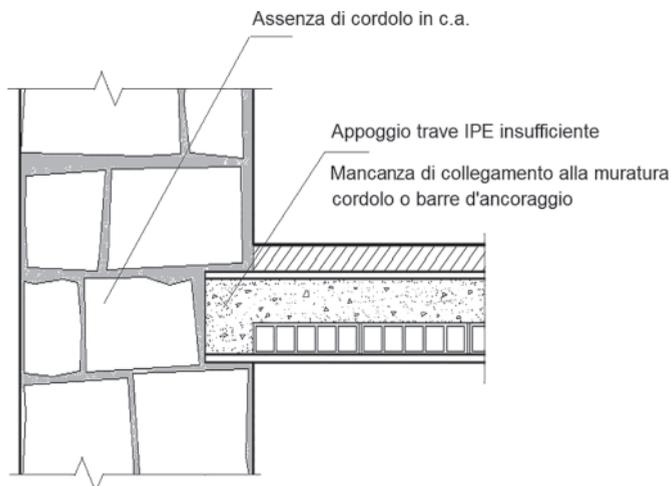


Figura 2.48. Appoggio semplice e insufficiente della trave metallica del solaio sulla muratura privo di cordolo in c.a. o di barre d'ancoraggio saldate alla trave

- 3) cordoli in breccia su pareti di muratura a sacco o di muratura di scarsa resistenza. In caso di sisma, per le murature a doppio paramento, il cordolo che insiste soltanto sul paramento interno della muratura può provocare il crollo del paramento esterno o di entrambi;

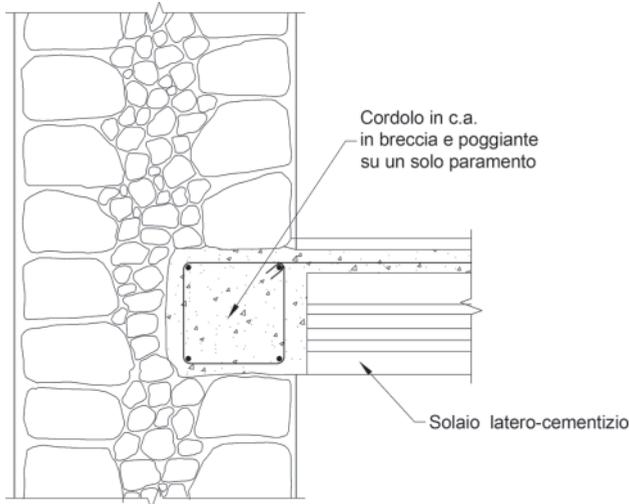


Figura 2.49. Collegamento tra orizzontamenti e pareti tramite cordoli in c.a. realizzati in breccia su un solo paramento del muro portante in pietrame a doppio paramento

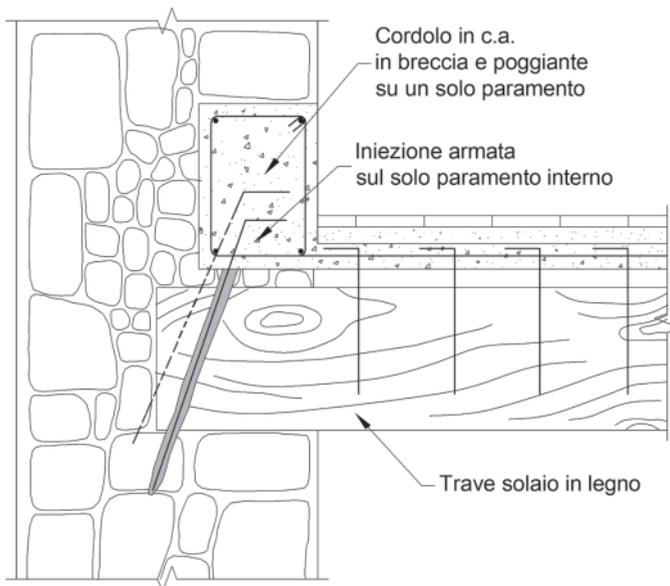


Figura 2.50. Collegamento realizzato con cordolo in c.a. in breccia ammortato con iniezioni armate alla muratura sottostante del solo paramento interno

- 4) cordoli in c.a. non collegati alla sommità della parete;
 5) travi o capriate di solai e coperture poggianti su mensole di ridotte dimensioni in pietra o in legno;

6) coperture in legno poggianti sulla muratura con sommità degradata o di scarsa qualità.

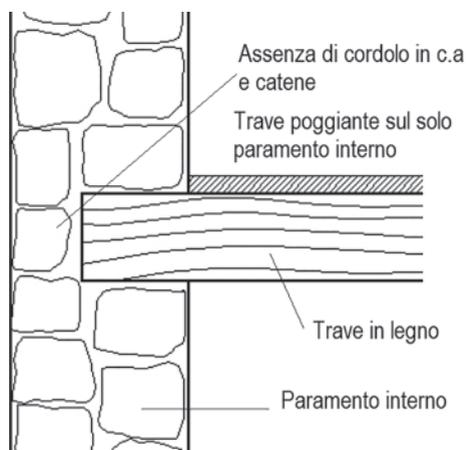


Figura 2.51
Assenza totale o parziale di cordoli o catene.
La trave in legno è priva di ancoraggio
alla muratura perimetrale

2.5.7. La mancanza completa o l'inefficacia dei collegamenti fra pareti e pareti

I collegamenti tra pareti e pareti, specialmente di corpi aggiunti successivamente ad edifici esistenti, risultano fondamentali per garantire un buon comportamento scatolare d'insieme dell'edificio, ossia per evitare il distacco delle pareti soggette ad azioni perpendicolari al loro piano ma anche per effetto di cedimento fondale uniforme di traslazione verticale di uno dei corpi di fabbrica. La mancanza di connessioni tra parete e parete si può esplicare in termini di:

- assenza di ammorsatura efficace tra muri ortogonali;
- marcata debolezza.

Le lesioni sulle superfici di contatto tra i corpi di fabbrica sono dovute spesso alla totale assenza di connessioni tra l'edificio esistente e quello aggiunto successivamente.

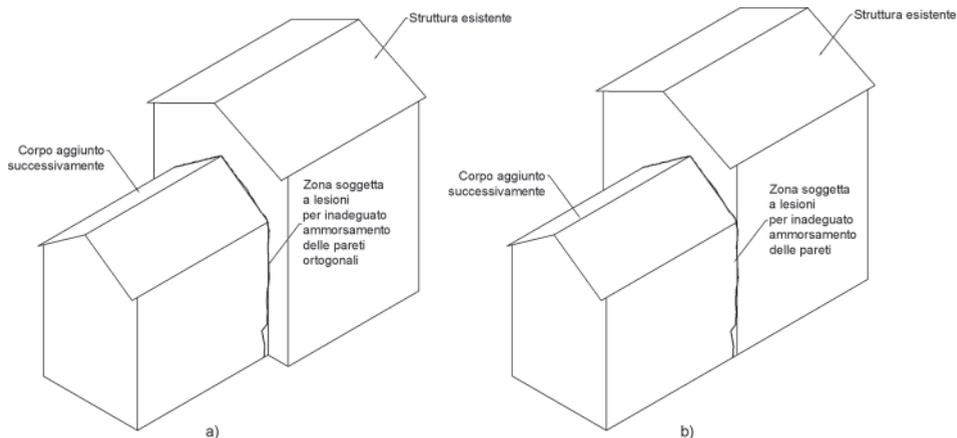


Figura 2.52. Comparsa di fessurazioni verticali per inadeguato ammorsamento tra pareti di corpi di fabbrica di edifici limitrofi realizzati in epoche diverse. La fessurazione è dovuta anche alla diversa rigidezza degli edifici

2.5.8. Gli elementi non strutturali degli edifici in muratura

Ogni elemento di ordine funzionale e/o decorativo non strutturale ma comunque pesante, facente parte di edifici in muratura e non, che sia un comignolo, una canna fumaria, un fregio, un cornicione, un muretto d'attico, una statua, un pennacchio, uno sporto, ecc., pur non specificamente menzionato dalla normativa antisismica, deve essere considerato per quanto concerne la vulnerabilità statica e dinamica e, qualora lo necessiti, deve essere oggetto di eventuali rinforzi per prevenire l'eventuale danno causabile da un sisma.

Esempio di elementi non strutturali

- Balconi
- Manti di copertura
- Epigrafi o iscrizioni
- Fonti di illuminazione
- Canne fumarie
- Vetrate e infissi
- Cornicioni
- Server e centraline
- Sfondellamenti solai
- Librerie e scaffalature
- Cornici di finestre e portali
- Persiane
- Intonaci
- Rivestimenti e paramenti
- Esterni
- Controsoffitti
- Tramezzature
- Comignoli
- Insegne
- Parapetti

Gli elementi non strutturali in caso di sisma sono i primi ad instabilizzarsi e quindi a costituire un potenziale pericolo per l'incolumità delle persone.

Nella figura 2.53 sono evidenziati ulteriori danni sempre in rapporto prevalente con la qualità della struttura muraria¹⁸, riguardanti balconi e bow-windows, mensole e aggetti in pietra, comignoli e tegole di copertura, stipiti ed imbotti in pietra, ecc. Nella figura è evidenziato anche il danno provocato da catene esistenti ma rese spingenti per l'azione localizzata sulle testate.

Nel seguito si riportano alcuni stralci tratte dalle *Linee guida per la riduzione della vulnerabilità di elementi non strutturali arredi e impianti* (giugno 2009) emanate dalla Presidenza del Consiglio dei ministri, Dipartimento della protezione civile.

In tale documento si evidenzia che il terremoto dell'Abruzzo del 6 aprile 2009, oltre ad aver provocato crolli e ingenti danni di carattere strutturale, ha evidenziato un diffuso danneggiamento agli elementi non strutturali, che ha spesso causato feriti o morti o intralcio alla fuga o all'accesso dei mezzi di soccorso.

La tipologia di questi danni è in molti casi simili a quella riscontrata in terremoti del passato, mentre in altri casi assume caratteri peculiari in relazione a tipologie costruttive presenti nella zona (per esempio balconi realizzati con lastre in pietra naturale).

¹⁸ Gavarini C. (coord.), *Costruzioni e terremoto*, Esa, Roma, 1983.

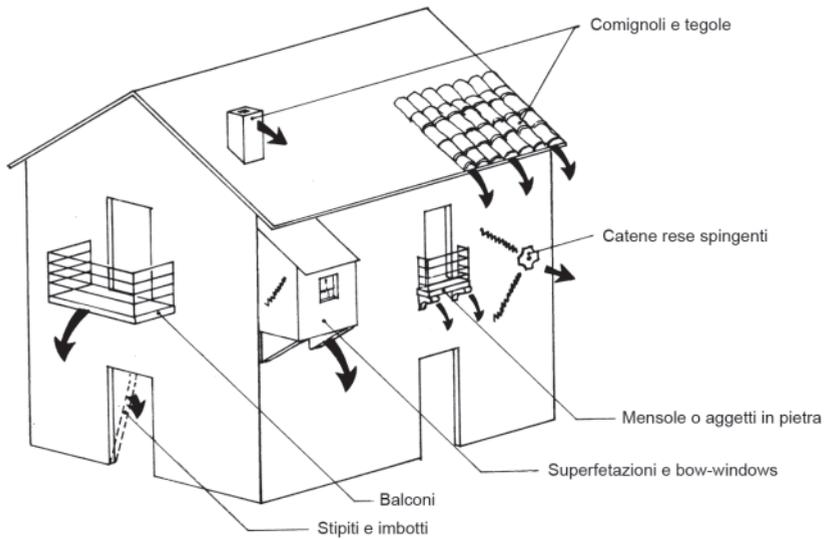


Figura 2.53. Danni da sisma ad elementi non strutturali (fonte: Gavarini C. (coord.), *Costruzioni e terremoto*, Esa, Roma, 1983)

2.5.8.1. I balconi

Il danno nei balconi consiste nel crollo di lastre di pietra naturale dei balconcini di edifici in muratura o parziale distacco delle lastre tra loro.



Figura 2.54. Danno a balcone in pietra durante il sisma dell'Abruzzo del 2009 (fonte: *Linee guida per la riduzione della vulnerabilità di elementi non strutturali arredi e impianti*, giugno 2009)

piegate come spinotti, sono perfette, per esempio, per la sostituzione di teste delle travi cariate con protesi in lamellare.

L'ulteriore vantaggio che gli interventi su strutture lignee (non solo orizzontamenti, ma anche travi di tetti oppure capriate, ecc.) presentano è che i compositi possono rimanere totalmente occultati alla vista restituendo un elemento perfettamente integro al termine della stuccatura e dell'impregnazione.



Figura 2.236
Ripristino sezione resistente parzializzata a flessione con barre CFRP (fonte: Mapei)

2.7.2.7.4. I meccanismi locali causati da elementi strutturali spingenti

A questa categoria appartengono i cedimenti conseguenti alla presenza di spinte non contrastate esercitate sulla muratura da altre strutture collaboranti (tetti, archi e volte).

A tal proposito bisogna fare una riflessione. Frequentemente negli edifici storici coperture piane e orizzontamenti presentano vincoli monolateri di collegamento tra l'orditura principale e la scatola muraria, ovvero le travi sono semplicemente appoggiate sulla muratura.

Questo significa che in condizioni sismiche si possono verificare due tipi complementari di cinematismo. Se la direzione d'ingresso del sisma ortogonale alla parete d'imposta procede dall'interno verso l'esterno la trave martella la porzione di muratura frontale; per sisma con la stessa direzione ma verso opposto, invece, allo sfilamento si oppone solo la componente d'attrito.

Risulta fondamentale quindi assicurare gli elementi principali di orizzontamenti e coperture piane con la muratura per scongiurare movimenti relativi in caso di sisma.

2.7.2.7.4.1. Il ribaltamento della parte alta del cantonale

Il meccanismo di ribaltamento del cantonale si manifesta attraverso la rotazione rigida di un cuneo di distacco di muratura, delimitato da superfici di frattura ad andamento diagonale nelle pareti concorrenti nelle angolate libere, rispetto ad una cerniera posta alla base dello stesso.

Tali tipi di meccanismi sono frequenti in edifici che presentano spinte concentrate in testa ai cantonali dovute in particolar modo ai carichi concentrati trasmessi dai puntone diagonali dei tetti a padiglione. Si suppone che il ribaltamento avvenga nella direzione di spinta del puntone e che il cinematico sia definito dalla rotazione del macroelemento individuato intorno ad un asse perpendicolare al piano verticale che forma un angolo di 45° con le pareti convergenti nell'angolata e passante per la cerniera suddetta.

Dato il buon grado di ammorsamento del cantonale sono infatti coinvolti entrambi i muri concorrenti all'angolata, ma in maniera parziale, proprio per la presenza di bucaure localizzate all'ultimo livello nell'immediata prossimità dell'intersezione muraria (figura 2.237).

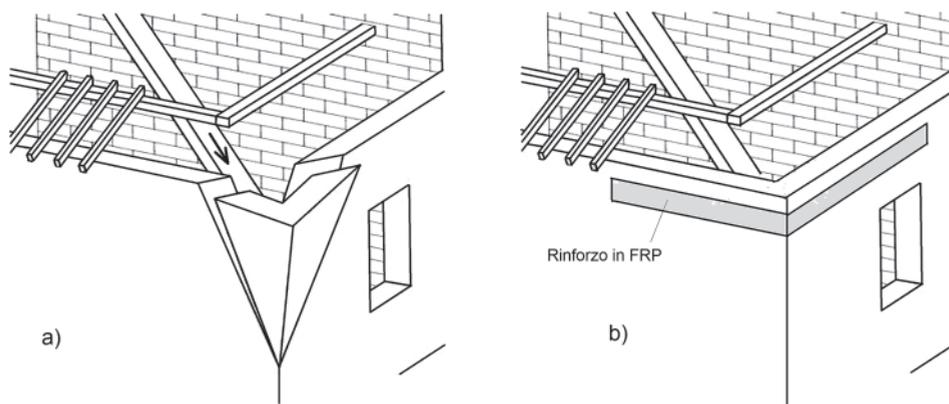
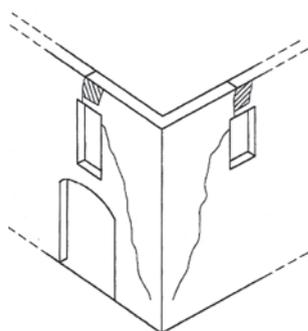


Figura 2.237. Azione dei puntone del tetto a padiglione sul cantonale dell'edificio e intervento di rinforzo con fascia in FRP

Stato di danno



Schema di meccanismo

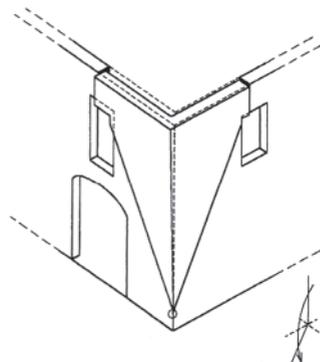
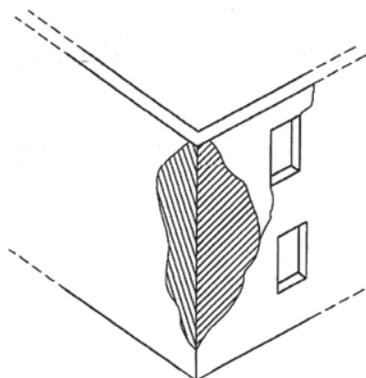


Figura 2.238. Rotazione verso l'esterno dell'angolata libera in un edificio in muratura. Il meccanismo è provocato dall'azione combinata delle forze agenti sui pannelli murari ortogonali formanti l'angolata. Il blocco ruota verso l'esterno con formazione di una cerniera nella parte bassa. Va notato che il macroelemento "angolata libera" può essere considerato come zona di sovrapposizione dei macroelementi "parete laterale" e "parete di testata". Il meccanismo è favorito dalla presenza di un puntone spingente che poggia sull'angolata (fonte: *Codice di Pratica Regione Marche*, Dogliani-Mazzotti)

Stato di danno



Schema di meccanismo

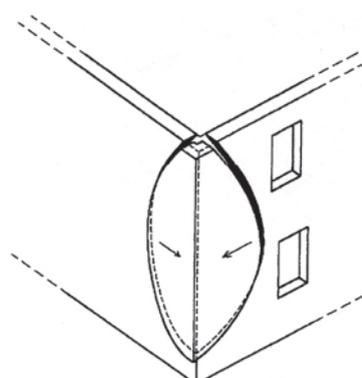


Figura 2.239. Espulsione con formazione di effetto arco in un edificio in muratura. Il meccanismo è un'evoluzione della rotazione verso l'esterno in presenza di un trattenimento (vincolo) alla sommità dell'angolata. Il vincolo può essere costituito da un cordolo o da una catena (fonte: *Codice di Pratica Regione Marche*, Dogliani-Mazzotti)

2.7.2.7.4.2. Gli interventi e i presidi contro il ribaltamento della parte alta del cantonale

In caso di ribaltamento della parte alta del cantonale, oltre alla necessità di creare vincoli efficaci tra le murature e gli orizzontamenti in testa, diviene di primaria importanza il contenimento delle spinte non contrastate esercitate dall'orditura principale del tetto. È pertanto consigliabile abbinare più soluzioni al fine di ovviare ad entrambe le problematiche, tenendo conto, in tal senso, che l'inserimento di tiranti attivi è un intervento di comprovata efficacia. Tra i principali interventi:

- a) inserimento di tiranti attivi in FRP: in questo caso l'inserimento di catene risulta di certo più utile e opportuno non tanto nei confronti del meccanismo di ribaltamento della muratura, cioè come sistema passivo di ritenuta che entra in funzione solo all'attivarsi del meccanismo di collasso, quanto invece lavorando in maniera attiva al fine di contrastare permanentemente l'azione spingente del tetto;
- b) realizzazione di un cordolo di coronamento in muratura e compositi;
- c) realizzazione di una cinturazione o fascia di piano in FRP;
- d) realizzazione di ancoraggi in FRP in corrispondenza degli orizzontamenti.

2.7.2.7.5. La flessione orizzontale

La flessione orizzontale è un tipo di collasso che interessa porzioni di muratura sommitali comprese tra due punti d'estremità alla stessa quota efficacemente vincolati alla rotazione (per la presenza di tiranti o ammorsamenti di altro genere) provocato dall'azione martellante esercitata sul pannello murario dall'orditura principale di "tetti spingenti", orditi cioè ortogonalmente alla linea di colmo.

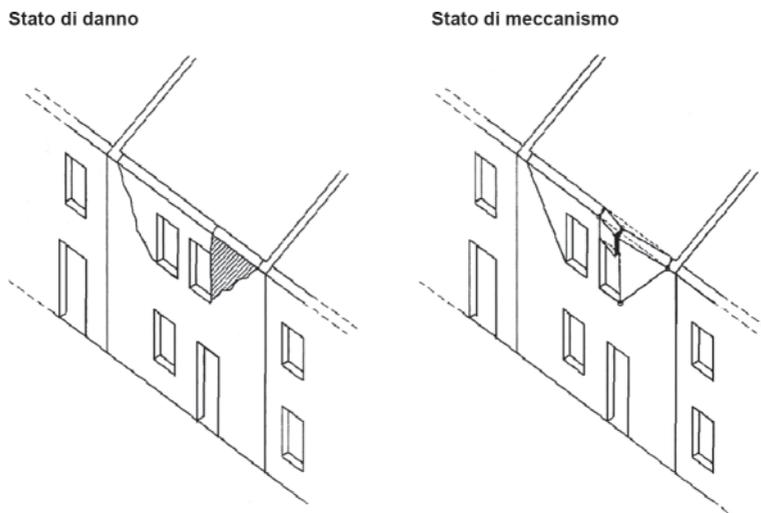


Figura 2.240. Stato di danno e di meccanismo di flessione orizzontale della parte alta della facciata di un edificio in muratura. Il meccanismo dimostra il buon ammassamento con le pareti ortogonali e l'efficacia delle aperture lontane dalle estremità. L'estensione della porzione muraria soggetta a rotazione è condizionata dalla posizione delle aperture. Il meccanismo è favorito dalla presenza di una copertura spingente (fonte: Regione Marche, *Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei costi negli edifici in muratura*, gennaio 2006)

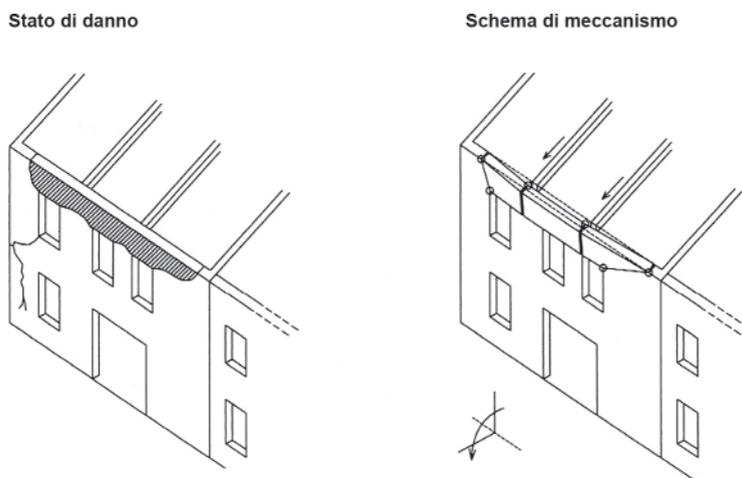


Figura 2.241. Stato di danno e di meccanismo di flessione orizzontale della parte alta della facciata di un edificio in muratura caratterizzato da aperture numerose vicine alla sommità. Il meccanismo è dovuto all'azione di spinta fuori piano degli elementi della grossa orditura del tetto (puntoni). Il martellamento ciclico determina il lesionamento o, al limite, il crollo della parte alta della parete che ruota verso l'esterno. In presenza di una fila di aperture vicine alla sommità della parete la cerniera, intorno alla quale avviene la rotazione, si posiziona in corrispondenza del filo superiore delle aperture stesse. Il meccanismo è favorito da una copertura spingente (fonte: Regione Marche, *Repertorio dei meccanismi di danno, delle tecniche di intervento e dei costi negli edifici in muratura*, gennaio 2006)

da un punto di vista qualitativo il comportamento della struttura poiché mirano ad evitare rotture di tipo fragile del calcestruzzo, instabilità presso-flessionale per insufficienza di armatura trasversale, nonché pericolosi meccanismi di piano.

Da un punto di vista operativo il rinforzo a taglio e il confinamento dei nodi possono essere condotti in differenti modi, sempre con l'impiego di sistemi compositi a matrice organica da impregnare in opera (carbonio, basalto, acciaio, vetro).

A tal proposito bisogna precisare che nel rinforzo dei nodi strutturali solitamente si accoppiano due interventi distinti. Infatti prima si fa il rinforzo a taglio, l'aumento di duttilità e il confinamento del pannello di nodo vero e proprio (figura 3.13, sinistra), per poi abbinarlo al rinforzo a taglio delle zone critiche di trave e pilastro ad esso afferenti (figura 3.13, destra).

Il sistema più semplice e cautelativo per effettuare il rinforzo a taglio del pannello di nodo prevede "l'impacchettamento" del nodo stesso mediante l'impiego di tessuto CFRP quadriassiale (0° , 90° , $\pm 45^\circ$), in modo da poter intercettare tutte le sollecitazioni convergenti; in alternativa si può ricorrere a tessuti biassiali o reti con le direzioni principali disposte lungo gli assi di trave e pilastro (in genere orizzontale e verticale), o addirittura più strati di tessuto uniassiale in sovrapposizione con orientamento differente. Quest'ultima soluzione però è da sconsigliarsi sia per motivi logistici (troppe sovrapposizioni, sfrido di resine, tempo di applicazione più lungo) che di semplicità e di garanzia sulla perfetta riuscita dell'intervento.



Figura 3.13. Nodo trave-colonna. A sinistra: rinforzo del pannello di nodo. A destra: confinamento col rinforzo a taglio delle zone critiche

Il rinforzo a taglio delle zone critiche di trave e pilastro afferenti al nodo viene invece realizzato, secondo la logica già descritta negli interventi precedenti, rispettivamente mediante fasciature ad U per le travi emergenti, e con il completo avvolgimento per i pilastri; in entrambi i casi sempre con l'ausilio di tessuto FRP unidirezionale.

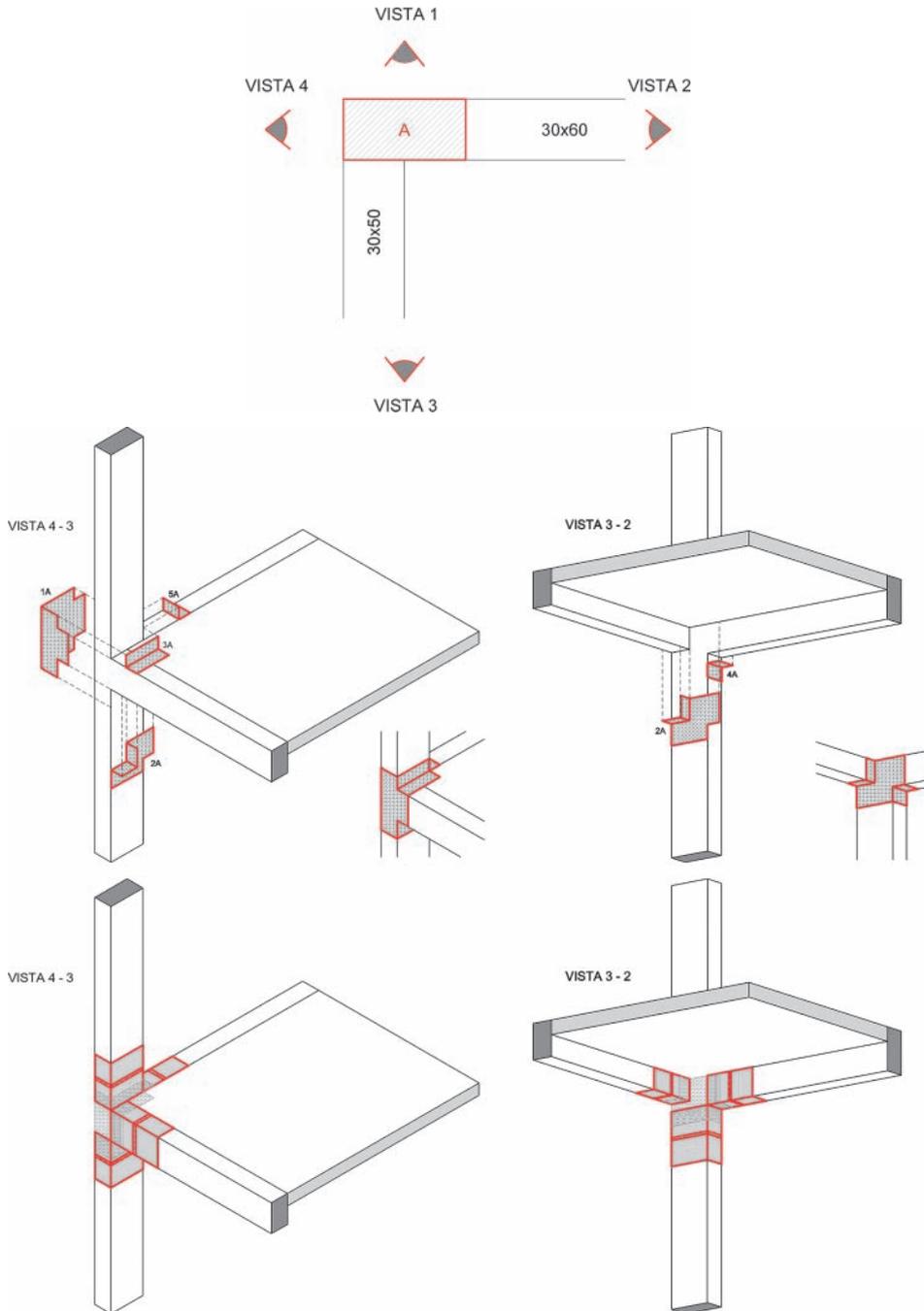


Figura 3.14. Nodo d'angolo "A" (in alto in pianta): schema di montaggio del rinforzo. In alto: disposizione del tessuto CFRP quadriassiale. In basso: disposizione delle fasciature CFRP uniassiali. Viste assometriche

Come nel caso del rinforzo a flessione della trave anche in questo caso le fasciature con tessuto unidirezionale fungono da confinamento per il tessuto impiegato nel rinforzo del pannello di nodo.

3.2.4.3.2. *La procedura operativa*

Vedere la tavola di progetto RC3.dwg, scaricabile dal sito della casa editrice.

Si è già discusso della particolare vulnerabilità sismica dei nodi non interamente confinati, quali i nodi esterni (con tre travi afferenti) o, peggio, i nodi d'angolo (con solo due travi afferenti).

In relazione a tale distinzione l'esempio applicativo proposto affronta la tematica del rinforzo di nodi trave-colonna mediante l'ausilio di sistemi CFRP per le tre differenti situazioni più ricorrenti: nodo d'angolo, nodo esterno e nodo interno.

In tutti i casi si tratta di nodi con travi emergenti, quindi non a spessore di solaio.

Si tenga sempre presente quanto detto a proposito delle sovrapposizioni dei tessuti e della smussatura degli spigoli vivi nel ripristino degli elementi strutturali da rinforzare.

La logica progettuale, nei tre casi proposti, si articola sempre con tre fondamentali step:

1. la schematizzazione dell'intervento secondo le due principali fasi, ovvero il rinforzo del pannello di nodo e il rinforzo delle zone critiche di travi e pilastri;
2. l'individuazione del numero di pezzi e della loro conformazione, alla luce del rispetto delle prescrizioni normative (sovrapposizioni minime e lunghezze di ancoraggio, strati massimi di tessuto, ecc.) e della logistica di cantiere (sfrido minimo, forma dei pezzi non eccessivamente complicata, minor numero di pezzi, ecc.);
3. la configurazione dettagliata di tali pezzi, utile sia come distinta di cantiere che come "istruzioni per il montaggio".

Per esempio, per quanto concerne il nodo d'angolo (nodo A), in figura 3.14 sono raffigurati in alto gli schemi di montaggio dei pezzi di tessuto quadriassiale per il rinforzo del pannello di nodo (1A-5A) e in basso le fasciature con tessuto unidirezionale, disposte in due avvolgimenti contigui sia in corrispondenza delle travi (ad U) che del pilastro (in completo avvolgimento), per il rinforzo a taglio delle zone critiche e fondamentali anche per il confinamento del tessuto quadriassiale.

Per garantire il confinamento del tessuto quadriassiale sono state considerate sempre lunghezze di sovrapposizione minime di 20 centimetri col tessuto unidirezionale, sia in corrispondenza delle travi che dei pilastri (figura 3.15 vista 3 in alto). Le giunzioni dei differenti pezzi di quadriassiale, per garantire una certa continuità di materiale, sono invece state previste sempre almeno di 5 centimetri. Per le fasciature (figura 3.15 viste 1-4-3-2 in basso) valgono le stesse considerazioni già fatte a proposito del rinforzo a taglio dei pilastri.

In conclusione, allo stesso modo, nelle figure 3.16 e 3.17 è raffigurato il rinforzo del nodo esterno (nodo E), e nelle figure 3.18 e 3.19 il rinforzo del nodo interno (nodo I).

Per quanto concerne l'applicazione dei tessuti CFRP, si faccia riferimento a quanto detto nel paragrafo sull'applicazione degli FRP impregnati in opera.



Figura 3.15. Nodo d'angolo "A": dettaglio esecutivo del rinforzo. In alto: disposizione del tessuto CFRP quadriassiale. In basso: disposizione delle fasciature CFRP uniassiali. Prospetti

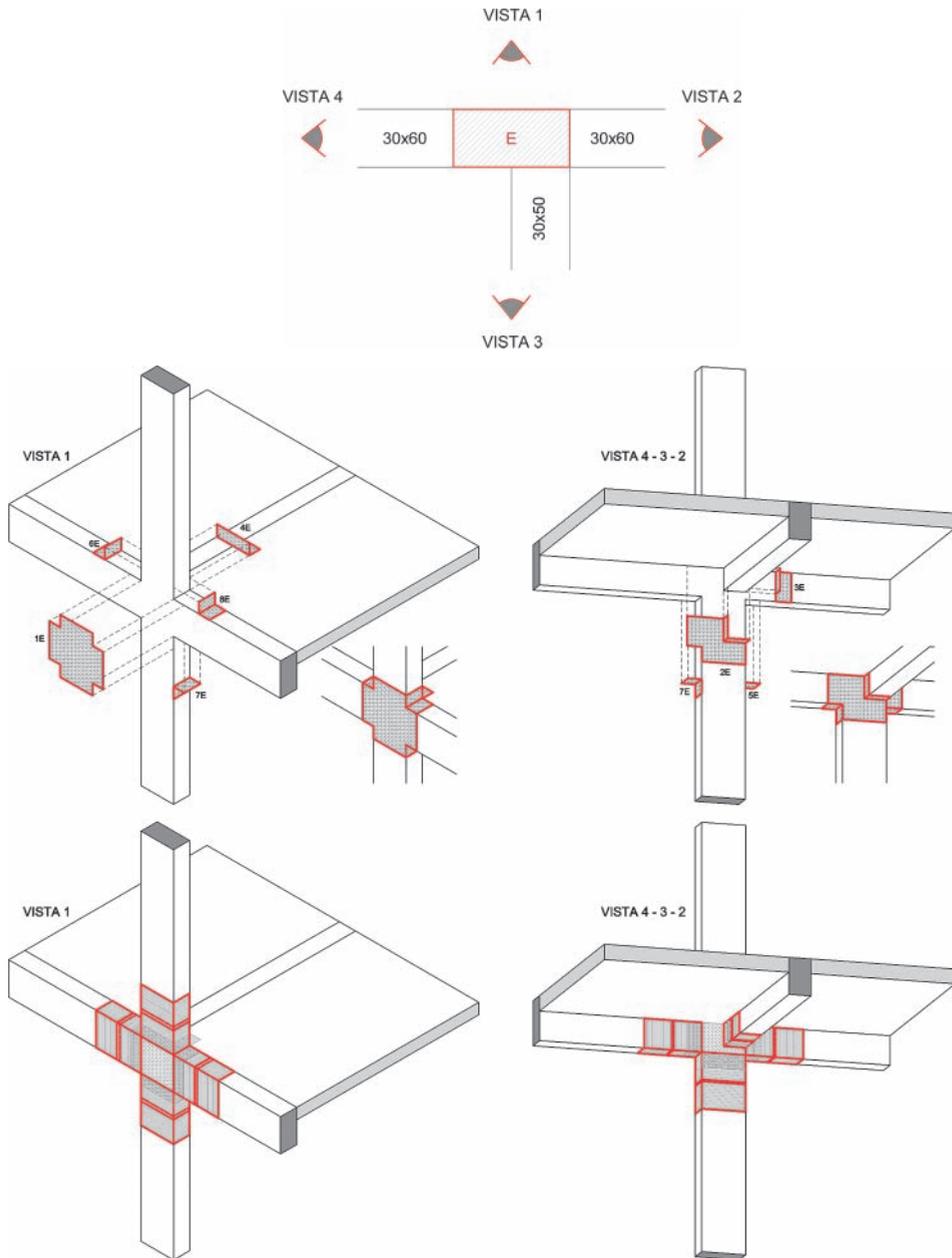


Figura 3.16. Nodo esterno "E" (in alto in pianta): schema di montaggio del rinforzo. In alto: disposizione del tessuto CFRP quadriassiale. In basso: disposizione delle fasciature CFRP uniassiale. Viste assometriche



Figura 3.17. Nodo esterno "E": dettaglio esecutivo del rinforzo. In alto: disposizione del tessuto CFRP quadriassiale. In basso: disposizione delle fasciature CFRP uniassiale. Prospetti