



DOMENICO BRIGANTE

# CONSOLIDAMENTO STRUTTURALE CON MATERIALI COMPOSITI

RINFORZI CON SISTEMI FRP, FRCM E CRM



WEBAPP INCLUSA  
CON AGGIORNAMENTO AUTOMATICO

Domenico Brigante

**CONSOLIDAMENTO STRUTTURALE CON MATERIALI COMPOSITI  
RINFORZI CON SISTEMI FRP, FRCM E CRM**

Ed. I (02-2020)

ISBN 13 978-88-277-0112-6

EAN 9 788827 701126

Collana **Manuali** (255)

Brigante, Domenico <1982->  
Consolidamento strutturale con materiali compositi : rinforzi con sistemi  
FRP, FRCM e CRM / Domenico Brigante. – Palermo : Grafill, 2020.  
(Manuali ; 255)  
ISBN 978-88-277-0112-6  
1. Strutture edilizie – Consolidamento.  
624.171 CDD-23 SBN Pal0324791  
CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

© **GRAFILL S.r.l.** Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313 – Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail [grafill@grafill.it](mailto:grafill@grafill.it)

**CONTATTI  
IMMEDIATI**



**ProntoGRAFILL**  
Tel. 091 226679



**Chiamami**  
[chiamami.grafill.it](http://chiamami.grafill.it)



**Whatsapp**  
[grafill.it/whatsapp](http://grafill.it/whatsapp)



**Messenger**  
[grafill.it/messenger](http://grafill.it/messenger)



**Telegram**  
[grafill.it/telegram](http://grafill.it/telegram)

Finito di stampare nel mese di febbraio 2020

presso **Tipografia Luxograph S.r.l.** Piazza Bartolomeo Da Messina, 2 – 90142 Palermo

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

## SOMMARIO

### PREFAZIONE

a cura dell'Ing. PAOLO IANNELLI ..... p. 11

### PREFAZIONE

a cura del Prof. Ing. I. CRIVELLI VISCONTI..... " 13

INTRODUZIONE..... " 15

1. MATERIALI COMPOSITI ..... " 17

1.1. I materiali compositi e loro proprietà ..... " 17

1.2. Caratteristiche dei materiali compositi ..... " 18

1.3. Le fibre nei materiali compositi ..... " 18

1.4. Fibre di carbonio ..... " 19

1.5. Fibre di vetro ..... " 20

1.6. Fibre di basalto ..... " 22

1.7. Fibre aramidiche ..... " 23

1.8. Fibre di PBO ..... " 24

1.9. Fibre di acciaio ..... " 24

1.10. Tessuti ibridi ..... " 25

1.11. Le matrici ..... " 26

1.12. Matrici plastiche ..... " 26

1.12.1. Resine poliestere ..... " 27

1.12.2. Resine epossidiche ..... " 27

1.12.3. Resine fenoliche ..... " 28

1.12.4. Resine silconiche ..... " 29

1.13. Matrici inorganiche ..... " 29

1.14. Altre tipologie di matrici ..... " 29

1.14.1. Matrici metalliche ..... " 29

1.14.2. Matrici ceramiche ..... " 29

2. PROCESSI DI FABBRICAZIONE ..... " 30

2.1. Tecnologie di fabbricazione ..... " 30

2.1.1. Processi produttivi dei materiali compositi ..... " 31

2.2. Impregnazione manuale senza applicazione di pressione o vuoto ..... " 31

2.3. Filament Winding ..... " 32

2.3.1.	L'avvolgimento .....	p.	32
2.3.2.	L'impregnazione .....	"	32
2.3.3.	Il mandrino .....	"	33
2.3.4.	Le macchine .....	"	33
2.4.	Pultrusione .....	"	33
2.4.1.	Alimentazione del rinforzo .....	"	34
2.4.2.	Impregnazione.....	"	35
2.4.3.	Preformatura.....	"	36
2.4.4.	Formatura e polimerizzazione.....	"	37
2.4.5.	Postformatura .....	"	38
2.4.6.	Tiro e taglio .....	"	38
2.4.7.	Controlli .....	"	39
2.5.	Formatura per iniezione di resina (RTM <i>Resin Transfer Molding</i> ) .....	"	40
2.6.	<i>Resin Infusion Under Flexible Tooling</i> (RIFT).....	"	40
2.7.	Formatura in autoclave .....	"	42
2.8.	Impregnatore semiautomatico per sistemi FRP .....	"	43
2.9.	Reti per sistemi FRCM .....	"	43
2.10.	Reti per sistemi CRM .....	"	44
2.11.	Taglio di tessuti per sistemi FRP ed FRCM.....	"	45
<b>3.</b>	<b>SCELTA DEL SISTEMA COMPOSITO FRP, FRCM E CRM .....</b>	"	46
3.1.	Vantaggi dei materiali compositi .....	"	46
3.2.	Progettabilità dei materiali compositi .....	"	47
3.3.	FRP ( <i>Fiber Reinforced Polymers</i> ) .....	"	48
3.4.	SRP ( <i>Steel Reinforced Polymers</i> ) .....	"	49
3.5.	FRCM ( <i>Fiber Reinforced Cementitious Matrix</i> ) .....	"	49
3.6.	SRG ( <i>Steel Reinforced Grout</i> ) .....	"	49
3.7.	CRM ( <i>Composite Reinforced Mortar</i> ).....	"	50
3.8.	Scelta del sistema composito .....	"	50
3.9.	Planarità delle superfici delle strutture da rinforzare .....	"	51
3.10.	Influenza della temperatura.....	"	51
3.11.	Comportamento nei confronti dell'umidità .....	"	51
3.12.	Utilizzo di mano d'opera specializzata .....	"	52
3.13.	Utilizzo dei dispositivi di protezione individuale .....	"	53
3.14.	Degrado degli attrezzi di lavoro.....	"	53
3.15.	Resistenza al fuoco .....	"	53
3.16.	Resistenza ai raggi ultravioletti.....	"	54
3.17.	Radior trasparenza.....	"	54
<b>4.</b>	<b>IL QUADRO NORMATIVO PER I SISTEMI FRP, FRCM E CRM.....</b>	"	55
4.1.	Quadro normativo nazionale ed internazionale dei sistemi FRP .....	"	55
4.2.	Il documento tecnico italiano CNR-DT 200/04 e R1 2013 .....	"	56
4.3.	Linee Guida – Dipartimento Protezione Civile – ReLUIS.....	"	57
4.4.	Linee Guida dell'Assemblea Generale del CSLLPP 2009 .....	"	59

4.5.	Linee Guida del CSLLPP per i sistemi FRP 2015-2019.....	p.	60
4.6.	Linee Guida del CSLLPP per i sistemi FRCM.....	"	60
4.7.	Il CNR DT 215-18.....	"	61
4.8.	Linee Guida del CSLLPP per i sistemi CRM.....	"	62
<b>5.</b>	<b>RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A. E C.A.P.</b> .....	"	63
5.1.	Introduzione.....	"	63
5.2.	La delaminazione.....	"	63
5.3.	Rinforzo a flessione di travi in c.a. ....	"	64
5.4.	Analisi del comportamento allo Stato Limite Ultimo (SLU) e agli Stati Limite di Esercizio (SLE).....	"	65
5.5.	Rinforzo di solai latero-cementizi.....	"	68
5.6.	Rinforzo a taglio di travi in c.a. ....	"	69
5.7.	Rinforzo di pilastri in c.a. ....	"	71
5.8.	Rinforzo dei nodi trave pilastro.....	"	74
5.9.	Criteri per il progetto del rafforzamento locale di nodi non confinati.....	"	75
<b>6.</b>	<b>RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN MURATURA</b> .....	"	78
6.1.	Introduzione.....	"	78
6.2.	Progetto di rinforzo di strutture in muratura con FRP.....	"	79
6.3.	Meccanismi di rottura per delaminazione.....	"	82
6.3.1.	Resistenza alla delaminazione radente allo Stato Limite Ultimo.....	"	82
6.4.	Rinforzo di pannelli murari.....	"	83
6.4.1.	Verifiche per azioni fuori dal piano.....	"	83
6.4.2.	Verifica per ribaltamento semplice.....	"	84
6.4.3.	Verifica per flessione della striscia muraria verticale.....	"	85
6.4.4.	Verifica per flessione della striscia orizzontale.....	"	86
6.4.5.	Verifiche per azioni nel piano.....	"	87
6.4.6.	Pressoflessione nel piano.....	"	87
6.4.7.	Taglio.....	"	87
6.5.	Rinforzo di archi e volte in muratura.....	"	88
6.6.	Rinforzo di colonne in muratura.....	"	89
6.7.	Sistemi di pretensionamento.....	"	90
6.8.	Sistema di tensionamento per SRG – SRP.....	"	92
6.9.	Sistemi di ancoraggio.....	"	94
6.10.	Preparazione del substrato.....	"	94
<b>7.</b>	<b>COMPOSITI FIBRORINFORZATI A MATRICE INORGANICA – FRCM</b> .....	"	96
7.1.	I materiali compositi FRCM.....	"	96
7.2.	Caratteristiche del composito e dei relativi componenti.....	"	97
7.3.	Qualificazione dei sistemi FRCM.....	"	99
7.4.	Prove di qualificazione per il rilascio del CVT.....	"	99

7.4.1.	Prove di caratterizzazione meccanica .....	p.	100
7.4.2.	Prove di trazione sulla rete e sui provini FRCM.....	"	100
7.4.3.	Prove di distacco dal supporto .....	"	101
7.5.	Il documento CNR-DT 215/18 e le Linee Guida del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici per i materiali FRCM.....	"	102
7.6.	Rinforzo di struttura in muratura con FRCM .....	"	103
7.6.1.	Interventi di rinforzo a taglio con FRCM .....	"	104
7.6.2.	Interventi di rinforzo a pressoflessione con FRCM .....	"	105
7.6.3.	Interventi di rinforzo di pareti fuori del piano con FRCM .....	"	105
7.6.4.	Confinamento di colonne in muratura con FRCM.....	"	106
7.6.5.	Consolidamento di archi e volte in muratura con FRCM.....	"	106
7.7.	Rinforzo di strutture di calcestruzzo armato con FRCM.....	"	107
7.7.1.	Rinforzo a flessione con FRCM.....	"	108
7.7.2.	Rinforzo a taglio con FRCM.....	"	108
7.7.3.	Confinamento di colonne di c.a. con FRCM.....	"	110
7.8.	Procedure di accettazione in cantiere.....	"	110
7.9.	Installazione dei sistemi FRCM.....	"	112
<b>8.</b>	<b>SISTEMI ANTI-ESPULSIONE DELLE TAMPONATURE .....</b>	"	113
8.1.	Ribaltamento delle tamponature .....	"	113
8.2.	La verifica di espulsione e le tamponature esistenti .....	"	114
8.3.	Verifica di espulsione della tamponatura .....	"	117
8.4.	Individuazione della domanda sismica .....	"	117
8.5.	Verifica di ribaltamento semplice della tamponatura.....	"	120
8.6.	Intervento di solidarizzazione della tamponatura alla cornice strutturale.....	"	121
8.7.	Verifica a pressoflessione .....	"	122
8.8.	Intervento di rinforzo fuori piano della tamponatura.....	"	124
8.9.	Verifica di espulsione della tamponatura con rinforzo fuori piano.....	"	125
<b>9.</b>	<b>LE LINEE GUIDA PER I SISTEMI CRM DEL CSLLPP .....</b>	"	128
9.1.	Introduzione .....	"	128
9.2.	Le caratteristiche dei Sistemi CRM e le classi prestazionali .....	"	129
9.3.	Le reti, gli angolari e i connettori per i Sistemi CRM .....	"	130
9.4.	Qualificazione dei Sistemi CRM .....	"	131
9.5.	Corretta posa in opera e controllo dei Sistemi CRM .....	"	132
9.6.	Procedure di accettazione in cantiere.....	"	133
9.7.	Ristilatura armata.....	"	134
<b>10.</b>	<b>ACCETTAZIONE E COLLAUDO DI SISTEMI FRP, FRCM E CRM .....</b>	"	136
10.1.	Introduzione .....	"	136
10.2.	Accettazione e collaudo dei sistemi FRP.....	"	137
10.2.1.	Accettazione in cantiere di sistemi di consolidamento FRP laminati in situ.....	"	137

10.2.2.	Accettazione in cantiere di sistemi di consolidamento FRP preformati .....	p.	138
10.2.3.	Modalità di collaudo di sistemi FRP su strutture in c.a. ....	"	140
10.2.4.	Modalità di collaudo di sistemi FRP su strutture in muratura .....	"	142
10.3.	Accettazione e collaudo dei sistemi FRCM.....	"	143
10.3.1.	I controlli sui sistemi FRCM.....	"	143
10.3.2.	Accettazione in cantiere di sistemi di consolidamento FRCM.....	"	145
10.3.3.	Controlli di accettazione di sistemi di consolidamento FRCM.....	"	145
10.3.4.	Modalità di collaudo di sistemi di consolidamento FRCM su strutture in c.a. ....	"	146
10.3.5.	Modalità di collaudo di sistemi di consolidamento FRCM su strutture in muratura .....	"	147
10.4.	Accettazione dei sistemi di consolidamento CRM.....	"	148
10.4.1.	Controlli di accettazione dei sistemi di consolidamento CRM.....	"	148
<b>11.</b>	<b>I COMPOSITI NATURALI.....</b>	"	150
11.1.	Le fibre naturali.....	"	150
11.2.	Fibre naturali vegetali .....	"	150
11.2.1.	Classificazione delle fibre .....	"	151
11.3.	Caratterizzazione delle fibre .....	"	151
11.4.	Principali tipologie di fibre .....	"	152
11.4.1.	Fibre di cotone .....	"	152
11.4.2.	Fibre di lino.....	"	153
11.4.3.	Fibre di juta .....	"	154
11.4.4.	Fibre di agave.....	"	155
11.4.5.	Fibre di canapa.....	"	156
<b>12.</b>	<b>ESEMPI DI APPLICAZIONE</b>		
	<b>DI SISTEMI DI CONSOLIDAMENTO FRP, FRCM E CRM .....</b>	"	158
12.1.	Miglioramento sismico di una struttura in calcestruzzo armato .....	"	158
12.2.	Adeguamento sismico di un edificio in muratura degli anni Venti, infrastruttura di interesse strategico.....	"	158
12.3.	Adeguamento sismico di un edificio scolastico in calcestruzzo .....	"	159
12.4.	Consolidamento di una struttura in calcestruzzo armato – Città delle Arti e della Scienza – Valencia (ES).....	"	159
12.5.	Consolidamento strutturale con sistemi di consolidamento CRM per il miglioramento sismico di edifici in muratura a Beirut (Libano).....	"	160
12.6.	Consolidamento strutturale di un ponte in calcestruzzo armato in Costa Rica.....	"	161
12.7.	Consolidamento di volte in muratura del castello Maresca di Serracapriola con sistemi FRCM.....	"	161

12.8.	Rinforzo di travi in legno con FRP presso il C.I.R.A. – Centro Italiano di Ricerca Aereospaziale.....	p.	162
12.9.	Rinforzo a flessione di travi in legno lamellare .....	"	162
12.10.	Miglioramento sismico di una struttura conventuale in muratura .....	"	163
12.11.	Sistemi antisfondellamento con reti in GFRP su solai latero cementizi.....	"	163
12.12.	Sistemi antisfondellamento con reti in GFRP su solai in putrelle metalliche e laterizi .....	"	164
13.	<b>LA STAMPA 3D E LE APPLICAZIONI IN EDILIZIA</b> .....	"	165
13.1.	Origini e tecnologie della stampa 3D .....	"	165
13.2.	Caratteristiche della stampa 3D .....	"	167
13.2.1.	La risoluzione delle stampanti 3D .....	"	167
13.2.2.	Il processo di stampa 3D .....	"	167
13.3.	La stampa 3D con filamenti compositi .....	"	168
13.3.1.	Filamenti che simulano il legno .....	"	168
13.3.2.	Filamenti che simulano metalli .....	"	168
13.3.3.	Filamenti terracotta .....	"	169
13.3.4.	Filamenti cemento .....	"	169
13.3.5.	Filamenti marmo .....	"	169
13.3.6.	Filamenti vetro .....	"	169
13.3.7.	Filamenti carbonio .....	"	170
13.4.	Campi di applicazione della stampa 3D .....	"	170
13.4.1.	La stampa 3D in ambito museale .....	"	170
13.4.2.	La stampa 3D nel design .....	"	172
13.5.	La stampa 3D in edilizia .....	"	174
13.5.1.	Le potenzialità della stampa 3D in edilizia .....	"	174
13.5.2.	Le case stampate in 3D di WASP.....	"	174
14.	<b>CONTENUTI E ATTIVAZIONE DELLA WEBAPP</b> .....	"	176
14.1.	Contenuti della WebApp.....	"	176
14.2.	Requisiti hardware e software.....	"	176
14.3.	Attivazione della WebApp.....	"	176
14.4.	Assistenza tecnica ( <i>TicketSystem</i> ).....	"	177
	<b>BIBLIOGRAFIA, RIFERIMENTI NORMATIVI E SITOGRAFIA</b> .....	"	178
–	BIBLIOGRAFIA.....	"	178
–	RIFERIMENTI NORMATIVI.....	"	179
–	SITOGRAFIA .....	"	180

## INTRODUZIONE

A seguito del terremoto che ha colpito il Centro Italia nel 2016, dato il gran numero di strutture esistenti in muratura, molte delle quali di interesse culturale, è aumentato notevolmente l'utilizzo di sistemi di consolidamento FRCM e CRM, che rappresentano un'importante soluzione tecnica per questa tipologia di strutture ad integrazione dei *tradizionali* compositi FRP.

I materiali compositi fibrorinforzati, trovano già da tempo numerose applicazioni in differenti campi dell'ingegneria. Nonostante ciò le prime applicazioni nel campo delle costruzioni si sono avute dopo gli anni Ottanta, sia per l'elevato costo, sia per l'alto contenuto tecnologico dei prodotti. Dagli anni Ottanta ad oggi le cose sono profondamente cambiate e, l'impiego dei sistemi FRP, FRCM e CRM nelle costruzioni rappresenta una realtà nel consolidamento strutturale, in particolar modo per gli interventi di miglioramento e adeguamento sismico.

Negli anni, numerosi paesi tra cui il Giappone, gli Stati Uniti, il Canada e l'Italia hanno investito importanti risorse nello studio e nella diffusione di questi innovativi sistemi di consolidamento.

Verso la metà degli anni Ottanta in Giappone e in U.S.A. si mettono a punto dei sistemi di rinforzo denominati FRP o *compositi*, in cui l'interazione fra una matrice resinosa ed una fibra ad alte prestazioni (come il carbonio) genera un sistema in grado di migliorare le resistenze finali degli elementi trattati se applicato alle strutture. In sintesi, una sorta di tecnica del *beton plaqué* evoluta e migliorata: sottili e leggeri nastri di fibre di carbonio vengono incollati alle strutture mediante impregnazione in situ di resine. Il metodo soppianta l'ingombrante ed onerosa tecnica tradizionale, che prevedeva la messa in opera di pesanti strutture in acciaio mediante connessioni meccaniche e tasselli chimici.

La tecnica dei rinforzi strutturali FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) si diffonde rapidamente nel mondo del consolidamento strutturale, sia sulla spinta della convenienza economica, sia sull'effettiva efficacia della tecnologia, duramente messa alla prova anche dai potenti sismi Giapponesi e Americani della costa Pacifica alla fine degli anni Novanta.

Sulla scorta di queste esperienze anche in Italia, intorno al '95, compaiono le prime applicazioni: si tratta per lo più di riparazioni di strutture danneggiate da impatti accidentali (ponti e viadotti), o il cui stato di degrado necessita di rinforzi che vadano oltre la normale ricostituzione della sezione resistente mediante utilizzo di malte speciali.

Il patrimonio edilizio italiano è da sempre largamente costituito da strutture in muratura e, ancora una volta, fu l'evento sismico che colpì le zone delle Marche e dell'Umbria nel 1997 a portare alla luce le potenzialità dei sistemi di rinforzo composito: la grave emergenza aveva colpito una delle zone del paese più densamente costruite con tecniche tradizionali, danneggiando seriamente anche opere d'arte di valore storico artistico mondiale. Anche col contributo del mondo accademico, del CNR e del CSLLPP furono rapidamente messe a punto tecniche di intervento che consentirono di travasare le brillanti esperienze realizzate nelle strutture in calce-

## MATERIALI COMPOSITI

### 1.1. I materiali compositi e loro proprietà

Dal punto di vista storico il concetto di rinforzo con fibra è assai vecchio. Ci sono addirittura nella bibbia riferimenti al rinforzo di laterizi con paglia nell'antico Egitto. Barrette di ferro erano usate per rinforzare le murature nel XIX secolo e questo portò allo sviluppo del cemento armato. Resine fenoliche rinforzate con amianto furono introdotte nel XX secolo. La prima barca in vetroresina fu realizzata nel 1942 e dello stesso periodo sono le plastiche rinforzate per l'impiego aeronautico e per componenti di apparecchiature elettriche. Elementi avvolti furono inventati nel 1946 ed usati in applicazione nel campo missilistico negli anni Cinquanta. Le prime fibre di boro e di carbonio ad alta resistenza furono introdotte nei primi anni Sessanta con l'applicazione di compositi avanzati per componenti aeronautici. Compositi con matrici metalliche come boro/alluminio furono introdotte nel 1970. La Dupont sviluppò fibre aramidiche nel 1973.

A partire dagli ultimi anni Settanta le applicazioni dei compositi si espansero fortemente in campo aeronautico, automobilistico, per articoli sportivi e per applicazioni in industrie biomediche. Gli anni Ottanta portarono ad un significativo sviluppo nell'utilizzo di fibre ad alto modulo di elasticità.



Figura 1.1. *I materiali compositi*

I materiali compositi rappresentano l'evoluzione della scienza e delle tecnologie dei materiali fondendo al loro interno le migliori caratteristiche di più materiali, prodotti con tecnologie innovative che ne determinano le elevatissime caratteristiche fisico-meccaniche. Lo studio dei compositi è una filosofia di progetto di materiali che si propone di ottimizzare nello stesso tempo la composizione del materiale con il progetto di ottimizzazione strutturale in un processo convergente ed interattivo. È una scienza e una tecnologia che richiede la stretta interazione di diverse

discipline come progetto ed analisi strutturale, analisi dei materiali, meccanica dei materiali ed ingegneria di processo.

Negli ultimi anni la ricerca accademica e scientifica a livello nazionale ed internazionale ha permesso la sperimentazione e lo sviluppo di materiali compositi a matrice inorganica conosciuti con gli acronimi FRCM e CRM. I nuovi materiali compositi sono oggetto di specifici documenti tecnici emanati dal CNR e delle Linee Guida del CSLPP.

## 1.2. Caratteristiche dei materiali compositi

Si definisce materiale composito un sistema costituito da due o più fasi, le cui proprietà e prestazioni sono progettate in modo tale da essere superiori a quelle dei materiali costituenti che agiscono indipendentemente. Normalmente una delle due fasi è discontinua, più rigida e più forte ed è chiamata *rinforzo*, mentre la fase meno rigida e più debole, è continua ed è chiamata *matrice*. Talvolta a causa di interazioni chimiche od altri effetti, esiste una fase aggiuntiva, chiamata *interfase*, tra rinforzo e matrice.

Le proprietà di un composito dipendono dalle proprietà dei costituenti, dalla geometria e distribuzione delle fasi. Uno dei parametri più importanti è il volume (o il peso) della frazione di rinforzo o il rapporto di volume delle fibre. La distribuzione del rinforzo determina le caratteristiche del sistema. Meno è uniforme il rinforzo, più è eterogeneo il materiale e più alta è la probabilità di rottura nelle aree più deboli. La geometria e l'orientamento del rinforzo, invece, influiscono sull'anisotropia del sistema.

Le fasi del composito hanno ruoli differenti che dipendono dal tipo e dalla messa in opera del composito. Nel caso di compositi con prestazioni basse o medie, il rinforzo, usualmente fibre corte o particelle, dà un certo irrigidimento ma rinforza solo localmente il materiale. La matrice d'altra parte, è il costituente principale per reggere i carichi e definisce le proprietà meccaniche del materiale.

Nel caso di compositi ad alte prestazioni strutturali, il rinforzo è normalmente costituito da fibra continua e forma lo scheletro del materiale, determinando la rigidità e la resistenza nella direzione della fibra. La fase matrice procura la protezione, il sostegno per le fibre ed il trasferimento degli sforzi locali da una fibra all'altra. L'interfase, anche se di piccola dimensione, può giocare un ruolo importante nel controllo del meccanismo di rottura, nella resistenza alla frattura e, soprattutto, nel comportamento sforzi/deformazioni del materiale.

## 1.3. Le fibre nei materiali compositi

Grazie alle loro dimensioni limitate, le fibre presentano una perfezione strutturale fuori del comune; questa caratteristica, unita alle proprietà intrinseche dei materiali costitutivi, assicura loro:

- resistenza meccanica elevata;
- modulo elastico molto alto;
- peso specifico molto basso;
- comportamento elastico lineare fino alla rottura.

Le fibre più importanti per uso in compositi possono essere di vetro, carbonio, organiche e minerali. Esse si trovano nei compositi o sotto forma di fibre continue disposte parallelamente in un piano, o sotto forma di fibre tagliate e disposte in un piano con orientazione casuale (MAT) o, infine, possono essere tessute secondo una configurazione trama-ordito e disposte in un piano.

## PROCESSI DI FABBRICAZIONE

### 2.1. Tecnologie di fabbricazione

Nel consolidamento strutturale con sistemi FRP, FRCM e CRM la tecnologia di formazione del composito maggiormente utilizzata è la tecnologia di formatura manuale. Mentre per i compositi di nuova generazione FRCM e CRM non sono state ingegnerizzate tecnologie differenti da quella manuale, numerose sono le tecnologie di fabbricazione utilizzabili per la realizzazione di elementi in materiali compositi FRP. È possibile ottenere materiali con caratteristiche fisico-meccaniche elevatissime e con elevatissima percentuale volumetrica di fibre ed è altresì possibile ottenere elementi con caratteristiche meno elevate ma con costi di produzione notevolmente ridotti. Le tecnologie di fabbricazione di elementi in materiale composito variano secondo la forma, dimensione e proprietà richieste al pezzo finito.

In funzione delle caratteristiche che si vogliono ottenere da un elemento in composito, della necessità o meno di riproduzione dello stesso o di una produzione in continuo, le tecnologie possono essere distinte in tecnologie in cui si impiegano stampi chiusi o stampi aperti; ancora, le tecnologie possono essere distinte in continue o discontinue e manuali e automatizzate.

Nell'ambito dei sistemi di rinforzo strutturale realizzati con materiali compositi viene solitamente utilizzato solo un numero limitato di tecnologie, successivamente andremo comunque ad analizzare le principali caratteristiche delle più note tecnologie che, se pur non attualmente utilizzate in questo giovane settore di applicazione, potrebbero in futuro determinare importanti innovazioni.

Con il termine stampo aperto si indica uno stampo che consente l'ottenimento di una sola superficie a finitura controllata dei particolari. Nel caso dei sistemi di rinforzo in ingegneria civile gli stampi sono costituiti dagli stessi elementi strutturali che vengono rinforzati. I processi a stampo aperto si prestano comunemente alla fabbricazione di parti molto voluminose: in questi casi sarebbe praticamente impossibile disporre di stampi chiusi per la loro difficile movimentazione legata al peso eccessivo. Nel campo dell'ingegneria civile, usando delle fibre secche, l'impregnazione viene eseguita tramite un pennello, al momento dell'esecuzione del particolare, contemporaneamente all'adattamento degli strati alla superficie dello stampo che nel caso specifico è costituito dal supporto in muratura o c.a. Le inevitabili bolle d'aria tra gli strati vengono eliminate eseguendo una rullatura ed eventualmente, qualora siano richiesti migliori risultati, ricorrendo ad un sacco a vuoto.

Questa serie di operazioni presenta però degli inconvenienti rispetto a tecnologie di fabbricazione più avanzate: in primo luogo, impregnando le fibre a mano si utilizza un quantitativo di resina superiore a quello strettamente necessario, ed è assai difficoltoso, anche ricorrendo alla formatura sottovuoto, eliminare la parte superflua, per cui il composito sarà di qualità più scadente perché strati di fibra molto mobili accrescono le difficoltà di esecuzione di un buon sacco a vuoto.

### 2.1.1. *Processi produttivi dei materiali compositi*

I processi produttivi dei materiali compositi sono svariati e i più diffusi sono:

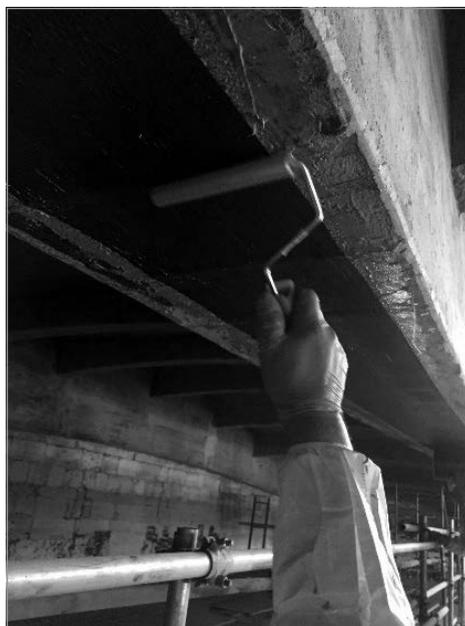
- 1) Stesura manuale;
- 2) *Resin Transfer Molding* (RTM);
- 3) *Filament winding*;
- 4) Pultrusione;
- 5) *Vacuum Infusion* (RIFT).

### 2.2. **Impregnazione manuale senza applicazione di pressione o vuoto**

È un processo tuttora largamente diffuso per lavori su superfici ampie quali piscine e scafi di imbarcazioni per i quali la produzione si svolge tipicamente per piccoli lotti ed è il processo di fabbricazione maggiormente utilizzato nell'ambito dell'ingegneria civile. Rinforzi in forma di *mat*, tessuto o stuoia, in percentuale come da progetto sono stesi all'interno dello stampo costituito nel caso delle applicazioni di ingegneria civile dal supporto in muratura o c.a., successivamente le fibre vengono imbevute di resina catalizzata e poi consolidate manualmente usando rulli di metallo o di plastica allo scopo di eliminare la resina in eccesso.

La polimerizzazione avviene generalmente a temperatura ambiente. I valori tipici di  $V_f$ , essendo  $V_f$  la frazione in volume delle fibre (rapporto tra il volume delle fibre ed il volume totale del composito) ottenibili con tale tecnologia, sono 25-30%.

In alcuni casi, per migliorare la qualità del laminato stampato, l'impregnazione dei tessuti viene effettuata prima della loro posa con apposite attrezzature, in modo da utilizzare la corretta quantità di resina per ogni lamina, in questo caso è possibile raggiungere valori di  $V_f$  anche di 35-38%.



**Figura 2.1.** *Impregnazione manuale e rullatura*

## SCELTA DEL SISTEMA COMPOSITO FRP, FRCM E CRM

### 3.1. Vantaggi dei materiali compositi

I compositi hanno vantaggi unici rispetto ai materiali monolitici, come alta resistenza, alta rigidità, lunga vita a fatica, bassa densità ed adattabilità alle funzioni che si vogliono dare alla struttura. Miglioramenti aggiuntivi possono essere ottenuti nella resistenza alla corrosione, resistenza all'usura, estetica, comportamento in funzione della temperatura, stabilità termica, isolamento e conduttività termica, isolamento acustico.

Le basi delle migliori prestazioni strutturali dei materiali compositi sono l'alta resistenza specifica (rapporto resistenza/densità) e l'alta rigidità specifica (rapporto modulo E/densità) e nel carattere anisotropo ed eterogeneo del materiale. Queste ultime caratteristiche danno al sistema composito molti *gradi di libertà* che consentono di ottimizzare la configurazione del materiale. I compositi però hanno alcune limitazioni che i materiali monolitici convenzionali non hanno.

Visti alla scala delle dimensioni della fibra, i compositi hanno il vantaggio dell'alta rigidità e dell'alta resistenza della fibra. La normalmente bassa tenacità a rottura della fibra è compensata dalla dissipazione di energia dell'interfaccia fibra/matrice e dalla duttilità della matrice. La capacità di trasferire gli sforzi della matrice permette lo sviluppo di meccanismi di frattura diffusi.

D'altra parte le fibre mostrano una dispersione di resistenza relativamente elevata. La concentrazione di sforzi locali attorno alle fibre riduce la resistenza trasversale a trazione in modo apprezzabile. I materiali convenzionali sono più sensibili alla loro microstruttura ed a irregolarità locali che influenzano il comportamento fragile o duttile del materiale.

In una analisi macromeccanica, in cui il materiale è trattato come quasi omogeneo, la sua anisotropia può essere usata in modo vantaggioso. Il comportamento medio del materiale può essere previsto e controllato dalle proprietà dei costituenti. Comunque l'analisi anisotropa è più complessa e più dipendente dalle procedure di calcolo. D'altra parte, l'analisi per i materiali convenzionali è molto più semplice a causa della loro isotropia e omogeneità. L'analisi di una struttura in composito richiede l'inserimento dei dati relativi alle proprietà medie dei materiali. Queste possono essere previste sulla base delle proprietà e della disposizione dei costituenti.

In ogni modo la verifica sperimentale dell'analisi o una caratterizzazione indipendente richiede un programma completo ed esaustivo per la determinazione dei parametri di un gran numero di campioni dei materiali di base. Per i materiali convenzionali la caratterizzazione meccanica è semplice dal momento che sono sufficienti solo due costanti elastiche e due valori di resistenza.

I compositi possono operare per lunghi periodi di tempo anche in ambienti aggressivi. Hanno lunga vita a fatica e in molte applicazioni possono essere facilmente riparati. Di contro essi sono sensibili ad ambienti soggetti a sbalzi igro-termici. La crescita dei danneggiamenti prodotti dall'uso può avvenire all'interno del composito e sono necessarie sofisticate tecniche non distruttive di rilevamento e monitoraggio. Talvolta è necessario applicare rivestimenti protettivi contro l'erosione, i danneggiamenti di superficie e le fulminazioni.

I materiali convenzionali, di solito metalli, sono soggetti alla corrosione in ambiente aggressivo. Difetti e incrinature possono formarsi nell'uso e possono crescere e propagarsi fino a cedimenti catastrofici. Anche se il rilevamento di questi difetti può essere più facile al contrario non è facile poi riparare i materiali convenzionali.

I principali vantaggi dell'utilizzo dei materiali compositi sono i seguenti:

- non si aggiungono ulteriori carichi alla struttura;
- possibilità di progettazione *ad hoc* in funzione delle direzioni di sollecitazione;
- velocità e semplicità di intervento;
- reversibilità dell'intervento;
- interventi esteticamente non invasivi;
- nessuna variazione alla geometria originale;
- aumento della duttilità della struttura.

I materiali compositi possono essere più resistenti e – specialmente nel caso dei compositi a fibra di carbonio – più rigidi dei materiali da costruzione tradizionali. Conseguentemente, quando per uno specifico progetto, il peso della struttura diventa rilevante, i compositi possono risultare molto attrattivi grazie alla loro minore densità. La resistenza specifica (resistenza/densità) dei compositi può assumere valori fino a quattro volte superiori rispetto a quelli esibiti dai materiali tradizionali; il loro modulo di elasticità normale specifico (modulo/densità) fino al doppio. Ciò significa che, a parità di rigidità, una struttura di materiale composito può arrivare a pesare circa la metà di un'altra realizzata con un materiale da costruzione tradizionale. La natura delle fasi che costituiscono il composito contribuisce in maniera determinante alla formazione delle proprietà finali del materiale. Tuttavia, per ottenere un composito ad elevata resistenza meccanica, non è sufficiente utilizzare fibre *resistenti*: è anche indispensabile garantire una buona adesione tra la matrice ed il rinforzo. L'adesione viene di solito promossa mediante l'impiego di un terzo componente, che, applicato in strato molto sottile sulla superficie delle fibre, la rende compatibile con la matrice organica.

Le fibre più usate per la produzione di materiali compositi sono quelle di vetro, di carbonio e le fibre aramidiche. La particolare geometria filiforme, ancorché molto versatile per la realizzazione dei compositi, conferisce a tali materiali caratteristiche di rigidità e di resistenza molto più elevate di quelle possedute dagli stessi materiali quando siano utilizzati in configurazione tridimensionale: ciò è dovuto alla minore densità di difetti che tipicamente compete alla configurazione monodimensionale rispetto a quest'ultima.

Nonostante i numerosi vantaggi sopra evidenziati, un aspetto importante da non trascurare nella progettazione del rinforzo di un elemento strutturale è la valutazione delle alternative possibili e praticabili. La circostanza che un particolare tipo di intervento possa essere portato a termine con l'utilizzo di materiali fibrorinforzati non è, in generale, condizione sufficiente a garantire che esso rappresenti la migliore soluzione possibile, vanno quindi analizzati accuratamente vantaggi e svantaggi di tali applicazioni in relazione allo stato di fatto della struttura, alle altre tipologie di rinforzi realizzabili ed ad un'accurata analisi tecnico-economica.

### 3.2. Progettabilità dei materiali compositi

La progettazione di un sistema di rinforzo con l'utilizzo di materiali compositi è definibile progettazione multiscale. Nella progettazione di un sistema di rinforzo con materiali compositi, a

## IL QUADRO NORMATIVO PER I SISTEMI FRP, FRCM E CRM

### 4.1. Quadro normativo nazionale ed internazionale dei sistemi FRP

Negli ultimi venti anni, il crescente interesse per l'utilizzo dei materiali compositi nell'ambito dell'ingegneria civile, ha spinto gruppi e commissioni internazionali ad una fitta produzione di codici, ordinanze e raccomandazioni specificatamente predisposte per l'impiego di materiali «*non convenzionali*». Si possono citare a tal proposito le regole progettuali elaborate e pubblicate su appositi bollettini dal *fib* Task Group 9.3, il comitato istituito a livello europeo nel 1998, oppure i bollettini dell'*American Concrete Institute* (ACI) che hanno l'intento di fornire le Linee Guida per il progetto e la costruzione di strutture in cemento armato rinforzato con FRP.

Un ulteriore contributo in materia è stato fornito dall'*European Committee for Standardization* che ha pubblicato nuove regole di progettazione e rinforzo con l'impiego degli FRP nell'Eurocode8 «*Design of structures for earthquake resistance*» Part 3 «*Assessment and retrofitting of buildings*», Draft n. 7 January 2003.

In Italia l'Ordinanza n. 3274 del maggio 2005 riguardante le norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici, ha introdotto al punto 11.3.3.3 l'uso di FRP nel rinforzo sismico di elementi in c.a. rimandando, in modo esplicito, per le verifiche di sicurezza alle istruzioni del CNR DT 200-2004.

L'Assemblea Generale del CSLLP ha approvato, nella riunione del 24 luglio 2009, le «*Linee Guida per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Collaudo di Interventi di Rinforzo di Strutture di cemento armato, cemento armato precompresso e murarie mediante FRP*». Tali Linee Guida sono diventate pertanto parte integrante delle attuali *Norme Tecniche per le Costruzioni* (NTC 2018) dando chiare indicazioni a progettisti e direttori dei lavori per l'utilizzo dei materiali fibrorinforzati negli interventi di rinforzo delle strutture esistenti.

Le Linee Guida si affiancano alle già note *Linee Guida CNR DT 200-04* relative ai rinforzi esterni con FRP che erano già richiamate nelle *Norme Tecniche per le Costruzioni* 2008 nel cap. 8.6 e nel cap. 12 con riferimento ai materiali non tradizionali per interventi su strutture esistenti.

Dopo il sisma che il 6 aprile 2009 ha colpito l'Abruzzo il Dipartimento della Protezione Civile ed il consorzio ReLUIS hanno pubblicato una specifica linea guida che verrà introdotta nei paragrafi successivi.

Numerose sono state, a partire dagli anni Novanta, le iniziative in campo internazionale per individuare Linee Guida che rispondano alle esigenze delineate. Si ricordano le istruzioni giapponesi (JSCE – 1997), quelle americane (ACI 440 – 2000) ed infine quelle europee (FIP-CEB – 2001). Ad esse va aggiunto, per completezza, il documento di studio approvato dal CNR nel gennaio '99 dal titolo «*Impiego delle armature non metalliche nel c.a.*».

Negli ultimi anni, a valle dell'evoluzione nel settore e dei crescenti sviluppi in termini di sperimentazione e applicazioni dei sistemi FRP, sono stati pubblicati numerosi aggiornamenti delle istruzioni sopraccitate.

Nel 2013 e successivamente nel 2014 il CNR ha emanato una nuova revisione del documento tecnico DT 200-04 denominato CNR DT 200-R1 2013 che ha sostituito la versione del 2004.

Nel 2015 il CSLPP ha emanato le «*Linee Guida per la Qualificazione ed il Controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti*» che hanno consentito la certificazione CVT dei sistemi di consolidamento FRP, licenziata con parere favorevole n. 115/2013 del 19 febbraio 2015 dalla Prima Sezione del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici che è stata aggiornata nel maggio 2019.

Le direttive Americane ACI 440 2R sono state più volte aggiornate fino all'ultima versione del 2017: 440.2R-17: *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*.

Le direttive della *Fédération internationale du béton* sono state aggiornate nel 2019 con l'emanazione del: *Fib Bulletin n. 90 2019 – Externally applied FRP reinforcement for concrete structures*.

Da gennaio 2014 negli USA è entrata in vigore la norma ACI 549 «*Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Systems for Repair and Strengthening Concrete and Masonry Structures*», la prima linea guida approvata a livello mondiale che tratta la caratterizzazione e l'utilizzo dei sistemi FRCM.

#### **4.2. Il documento tecnico italiano CNR-DT 200/04 e R1 2013**

L'interesse scientifico verso le applicazioni innovative degli FRP per il consolidamento strutturale, da un lato, e la peculiarità del patrimonio edilizio italiano, ampiamente variegato, dall'altro, hanno attirato negli ultimi anni l'interesse di numerosi ricercatori operanti nei settori della Meccanica delle Strutture, delle Costruzioni, della Riabilitazione Strutturale e dell'Ingegneria Sismica.

Appare evidente come la redazione di un documento italiano di Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati (FRP), abbia rappresentato una svolta nell'utilizzo dei suddetti materiali, trattandosi di un documento di ampio respiro utilizzabile per le diverse tipologie presenti nel patrimonio edilizio nazionale, dalle costruzioni di c.a. e di c.a.p. a quelle murarie, dalle costruzioni di legno a quelle metalliche.

Il CNR, per il tramite della propria Commissione incaricata di formulare pareri in materia di Normativa tecnica relativa alle costruzioni, ha avvertito tempestivamente tale esigenza e si è adoperato per soddisfarla. A tal fine la citata commissione ha promosso nel mondo accademico ed industriale una specifica iniziativa attraverso l'azione catalizzatrice di un gruppo di docenti di Scienza e di Tecnica delle costruzioni, da tempo impegnati in ricerche sugli FRP.

Il documento rispondente ai requisiti sopra delineati ed articolato nelle seguenti parti:

- Materiali;
- Concetti basilari del rinforzo con FRP e problematiche speciali;
- Rinforzo di strutture di c.a. e di c.a.p.;
- Rinforzo di strutture murarie;
- Rinforzo di strutture metalliche;
- Rinforzo di strutture di legno;
- Nuove costruzioni con l'impiego di FRP.

## RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN C.A. E C.A.P.

### 5.1. Introduzione

Tra le più note e consolidate applicazioni dei sistemi di consolidamento con materiali compositi nell'ambito dell'edilizia vi è sicuramente l'applicazione di questi materiali per il consolidamento strutturale di strutture in c.a. e c.a.p. resistenti.

Il consolidamento di queste strutture può risultare necessario per numerose motivazioni che vanno dall'adeguamento di strutture preesistenti a nuovi carichi di esercizio o alle nuove normative tecniche, o possono ritenersi necessari a seguito di danneggiamento degli elementi strutturali a seguito di fenomeni di ossidazione delle armature o altro tipo di danni accidentali. Il rinforzo di una struttura in c.a. può interessare tutti gli elementi che la costituiscono come travi, pilastri, setti e impalcati e il consolidamento dei singoli elementi strutturali può essere necessario a seguito di sollecitazioni flessionali, a taglio, a sforzo normale o miste.

Vengono di seguito riportati i dettami e le formulazioni delle Linee Guida del CSLPP del 2009 e gli aggiornamenti del CNR R1 2013.

### 5.2. La delaminazione

Come indicato nelle Linee Guida dell'Assemblea Generale Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, uno dei fattori di primaria importanza nell'ambito della verifica e progettazione di un sistema di rinforzo con materiali compositi di elementi in c.a. è la delaminazione.



**Figura 5.1.** *Delaminazione di estremità*

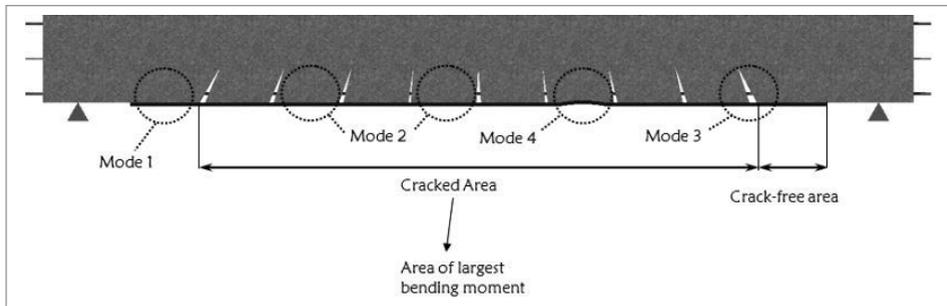
Il fenomeno della delaminazione è fortemente influenzato dall'aderenza tra il substrato del supporto e il composito. Le modalità di perdita di aderenza tra composito ed elemento in

calcestruzzo sono: delaminazione all'interno dell'adesivo, delaminazione tra calcestruzzo ed adesivo, delaminazione nel calcestruzzo, delaminazione all'interno del rinforzo (delaminazione interlaminare).

Poiché le caratteristiche meccaniche della resina di incollaggio sono notevolmente più elevate rispetto a quelle del calcestruzzo, se il composito è posto in opera a corretta regola d'arte il fenomeno della delaminazione avviene all'interno del calcestruzzo con l'asportazione di uno strato di materiale.

Le possibili modalità di collasso per delaminazione del materiale composito dal supporto sono:

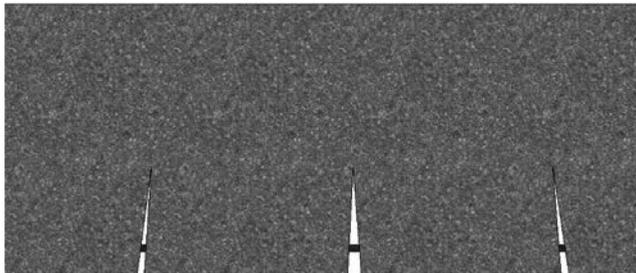
- **Modalità 1** (*Delaminazione di estremità*);
- **Modalità 2** (*Delaminazione intermedia, causata da fessure per flessione nella trave*);
- **Modalità 3** (*Delaminazione causata da fessure diagonali da taglio*);
- **Modalità 4** (*Delaminazione causata da irregolarità e rugosità della superficie di calcestruzzo*).



**Figura 5.2.** *Modalità di delaminazione*

### 5.3. Rinforzo a flessione di travi in c.a.

Nel caso in cui un elemento strutturale tipo trave è soggetto ad un momento flettente di progetto maggiore del proprio momento resistente e possibile intervenire per incrementare il valore di quest'ultimo applicando all'intradosso dell'elemento strutturale un tessuto o lamina in materiale composito.



**Figura 5.3.** *Rottura per flessione*

## RINFORZO CON FRP DI STRUTTURE IN MURATURA

### 6.1. Introduzione

Gran parte del patrimonio edilizio italiano è costituito da strutture in muratura, che in molti casi risultano di interesse culturale. Il rinforzo, il miglioramento o l'adeguamento sismico di tali strutture è in molti casi realizzabile mediante l'utilizzo dei materiali compositi. Tale rinforzo si ottiene applicando agli elementi strutturali in muratura un materiale caratterizzato da un'elevata resistenza a trazione, dotato di un'interfaccia tecnologicamente compatibile che, assicurando l'adesione ai singoli mattoni, sia in grado di ridurre le sollecitazioni di taglio nei letti di malta interstiziali, conferendo al sistema un comportamento monolitico fino alla rottura.

Il danneggiamento della muratura dovuto ad azioni orizzontali, quali possono essere quelle prodotte da eventi sismici o da dissesti lenti in atto, è, infatti, associato o al danneggiamento dei giunti di malta o alla rottura dei conci murari. In particolare, esso si manifesta con fenomeni di scorrimento relativo dei blocchi rispetto all'interfaccia, previa decoesione.

Numerosi sono ad oggi i possibili utilizzi dei materiali compositi per il consolidamento di elementi strutturali in muratura, con numerose tecnologie e geometrie, dall'utilizzo di lamine e tessuti in FRP ai più innovativi sistemi FRCM e CRM caratterizzati dalla matrice inorganica che verranno trattati nei seguenti capitoli di questo libro.

Il rinforzo di strutture in muratura con FRP oltre a migliorare le caratteristiche meccaniche dei singoli elementi strutturali, consente notevoli miglioramenti della struttura soggetta ad azioni sismiche e può essere vantaggiosamente utilizzato nel caso in cui le stesse non soddisfino i requisiti di sicurezza previsti dalla Normativa vigente nei confronti di uno o più stati limite.



**Figura 6.1.** *Miglioramento sismico di una struttura in muratura*

La strategia d'intervento con FRP deve essere ispirata al principio di incrementare la resistenza degli elementi sottodimensionati, con l'intento di conseguire contestualmente una maggiore regolarità strutturale e l'eliminazione di possibili modi di collasso locale di singole pareti o elementi strutturali.

L'efficienza sismica dell'intervento progettato può essere stimata dall'incremento di spostamento orizzontale a collasso derivante dall'applicazione del rinforzo.

È sempre necessario valutare se gli interventi di rinforzo, orientati ad aumentare la resistenza laterale degli schemi strutturali, non determinino una diminuzione della duttilità generale che possa indurre una maggiore vulnerabilità sismica. A tale scopo, deve essere posta particolare attenzione agli interventi che tendono a solidarizzare i blocchi costituenti i piedritti verticali e agli interventi orientati ad impedire la formazione di cerniere negli archi o nelle volte di collegamento. Sono in genere da preferirsi interventi orientati ad aumentare la duttilità delle cerniere sia nei ritti che nelle volte. Analogamente, nelle pareti di controvento degli edifici ordinari occorre orientare gli interventi ad un aumento della duttilità generale dello schema evitando che il collasso dei ritti preceda quello delle fasce di piano.

## **6.2. Progetto di rinforzo di strutture in muratura con FRP**

Anche per quanto riguarda il rinforzo di murature con materiali compositi le normative tecniche di riferimento sono: il documento tecnico del CNR DT 200-04 e l'aggiornamento R1 2013, le *Linee Guida dell'Assemblea Generale del CSLLPP* del 24 luglio 2009 e le *Linee Guida redatte dal Dipartimento della Protezione Civile ed il consorzio ReLUIS*.

L'utilizzo di materiali compositi in un progetto di rinforzo di strutture in muratura deve essere motivato dalle seguenti indicazioni:

- trasmissione di sforzi di trazione all'interno di singoli elementi strutturali o tra elementi contigui (rinforzi a flessione, taglio, ecc.);
- collegamento tra elementi che collaborano a resistere all'azione esterna (catene di volte e di pareti, connessioni tra pareti ortogonali, ecc.);
- irrigidimento di solai nel proprio piano per conseguire un funzionamento a diaframma rigido;
- limitazione dell'apertura di fessure;
- confinamento di colonne al fine di incrementare la resistenza del materiale.

Nell'ambito della progettazione dei rinforzi con materiali compositi si deve sempre porre l'attenzione a far lavorare gli stessi in modo da essere soggetti principalmente o unicamente a sollecitazioni di trazione, questi materiali infatti sono caratterizzati da elevate caratteristiche meccaniche se sollecitati in questo modo. Quando invece i materiali compositi sono soggetti a compressione non sono generalmente in grado di incrementare le prestazioni delle murature, in quanto, a parità di contrazione, la risultante degli sforzi di compressione a carico della muratura prevale solitamente di gran lunga su quella a carico del composito fibrorinforzato, a causa della notevole differenza di area tra la muratura compressa ed il rinforzo. Inoltre, i rinforzi compressi sono soggetti a possibile delaminazione per instabilità locale.

Per le strutture murarie rinforzate con FRP e soggette a sollecitazioni cicliche di trazione e compressione, quali quelle causate da eventi sismici e da variazioni termiche, l'adesione muratura-FRP può deteriorarsi notevolmente nel corso della vita della struttura. A tal riguardo potrebbe

## COMPOSITI FIBRORINFORZATI A MATRICE INORGANICA – FRCM

### 7.1. I materiali compositi FRCM

Da alcuni anni è cresciuto sul territorio nazionale l'interesse per l'utilizzo di materiali compositi a matrice inorganica denominati FRCM al fianco dei *tradizionali* compositi a matrice organica FRP. Viene riportato di seguito quanto indicato nella Linea Guida del CSLLPP: «Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti».

Le Norme Tecniche per le Costruzioni, prescrivono che tutti i materiali e prodotti da costruzione, impiegati per uso strutturale, debbano essere identificabili, in possesso di specifica qualificazione all'uso previsto e debbano altresì essere oggetto di controllo in fase di accettazione da parte del Direttore dei Lavori. A tal fine sono state sviluppate dal CSLLPP specifiche Linee Guida che forniscono le procedure per l'identificazione, la qualificazione ed il controllo di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica, denominati FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*), impiegati per il consolidamento strutturale.

I compositi FRCM sono utilizzabili per realizzare *sistemi di rinforzo* esterni di strutture esistenti in muratura o in conglomerato cementizio armato.

Rientrano nel campo di applicazione della citata Linea Guida i sistemi di rinforzo FRCM il cui spessore è compreso, nel caso di una singola rete, tra 5 e 15 mm, al netto del livellamento del supporto. Nel caso di più reti lo spessore massimo non può essere superiore a 30 mm.



Figura 7.1. Sistemi FRCM in fibra di vetro

Le procedure per la qualificazione ed accettazione dei sistemi di rinforzo FRM forniscono curve di comportamento e relativi parametri meccanici utilizzabili per la progettazione e la verifica degli interventi di rinforzo, quali la resistenza ultima a trazione del sistema di rinforzo FRM e la resistenza nei confronti di prove di distacco dal supporto (o distacco di estremità).

### 7.2. Caratteristiche del composito e dei relativi componenti

Il *sistema di rinforzo* in FRM è realizzato in situ applicando alla struttura da consolidare il composito ed eventuali dispositivi di ancoraggio e/o speciali adesivi atti ad impedire il distacco prematuro del composito dal supporto. Può essere qualificato come sistema di rinforzo FRM una singola rete di rinforzo annegata in uno spessore definito di malta, ovvero più reti in un unico spessore di malta sulla base di modalità definite dal fabbricante.

Come prescrivono le norme, i sistemi di rinforzo FRM devono essere posti in commercio da un unico fabbricante, che assume la responsabilità della dichiarazione delle prestazioni, analogamente a quanto previsto dalle definizioni di cui al Regolamento.

Nel caso in cui sia necessario regolarizzare il supporto in situ prima dell'applicazione del rinforzo FRM, il fabbricante deve riportare sulla scheda di installazione le indicazioni sul tipo di prodotto da utilizzare.

Nei sistemi di rinforzo FRM la matrice inorganica, a base di cemento o di calce, nel seguito denominata anche malta, viene rinforzata con reti realizzate con fibre continue di una o più delle seguenti tipologie di materiali:

- acciaio ad alta resistenza;
- arammide;
- basalto;
- carbonio;
- poliparafenilenbenzobisoxazolo (nel seguito PBO);
- vetro AR.

La matrice dei sistemi FRM, funge anche da adesivo al substrato interessato dall'intervento di rinforzo.



Figura 7.2. Rete in fibre di basalto FRM

## SISTEMI ANTI-ESPULSIONE DELLE TAMPONATURE

### 8.1. Ribaltamento delle tamponature

Nella prassi della progettazione edilizia le tamponature vengono prevalentemente considerate come l'involucro dell'edificio, di notevole importanza dal punto di vista energetico.

Tuttavia, sebbene queste siano elementi non strutturali, il fenomeno di espulsione delle stesse fuori dal proprio piano diviene di fatto un problema di salvaguardia della vita delle persone, oltre che causa di ingenti perdite economiche.

Gli elementi non strutturali tamponature, in passato trascurati, in realtà risultano importanti per la sicurezza degli utenti delle strutture tanto quanto gli elementi strutturali, come evidenziato dalle immagini relative al danneggiamento degli edifici prodotto dai più recenti eventi sismici.

In generale, le Norme Tecniche per le Costruzioni 2018 pongono particolare attenzione al tema degli elementi non strutturali che, se non progettati correttamente, possono generare collassi e ridurre la sicurezza delle strutture.

In particolare, come vedremo nel seguito, vengono chiariti i concetti espressi in precedenza dalle vecchie norme ed aggiunte nuove prescrizioni per analizzare questi elementi.

Preme evidenziare che le tamponature, durante un terremoto, oltre ad essere soggette ad azioni fuori piano, risultano contemporaneamente sottoposte ad azioni nel piano, generate dalla deformazione del telaio circostante. Il danneggiamento nel piano della tamponatura, provocato dalla deformazione del telaio circostante e dovuto alla scarsa resistenza a taglio delle stesse, ne causa una riduzione della resistenza fuori piano, rendendola ancor più vulnerabile rispetto al fenomeno di espulsione.

Ricapitolando, lo scuotimento sismico investe l'edificio in tutte le direzioni sollecitando le tamponature nel piano e fuori piano. La risposta fuori piano della tamponatura viene influenzata negativamente dal danneggiamento nel piano della stessa, quindi, risulta importante studiare l'effetto combinato nel piano e fuori piano per poter progettare e garantire la sicurezza delle tamponature.

Al paragrafo 3.2 delle *«Linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni»* si legge: *«Per gli edifici in calcestruzzo armato, analogamente a quanto sopra detto per le strutture assimilabili ai capannoni industriali, è prevista la possibilità di ritenere valido il passaggio alla Classe di Rischio immediatamente superiore, eseguendo solamente interventi locali di rafforzamento ed anche in assenza di una preventiva attribuzione della Classe di Rischio. Ciò è possibile soltanto se la struttura è stata originariamente concepita con la presenza di telai in entrambe le direzioni e se saranno eseguiti tutti gli interventi seguenti:*

- *confinamento di tutti i nodi perimetrali non confinati dell'edificio;*
- *opere volte a scongiurare il ribaltamento delle tamponature, compiute su tutte le tamponature perimetrali presenti sulle facciate;*
- *eventuali opere di ripristino delle zone danneggiate e/o degradate.».*

Se ne comprende che, eseguire interventi volti a scongiurare il ribaltamento delle tamponature perimetrali, oltre ad interventi di confinamento dei nodi perimetrali non confinati, permette il passaggio di un edificio esistente in c.a. alla Classe di Rischio immediatamente superiore, anche in assenza di una preventiva attribuzione della Classe di Rischio dello stesso.

## 8.2. La verifica di espulsione e le tamponature esistenti

Negli edifici esistenti le tamponature si presentano non collegate al telaio circostante cioè libere in sommità e alle estremità laterali. È possibile dunque schematizzare l'elemento bidimensionale tamponatura come una trave a mensola soggetta al carico sismico orizzontale. Il meccanismo di collasso prevede la rotazione rigida del pannello di tamponatura attorno alla cerniera orizzontale alla base, formatasi a causa di sollecitazioni fuori piano.

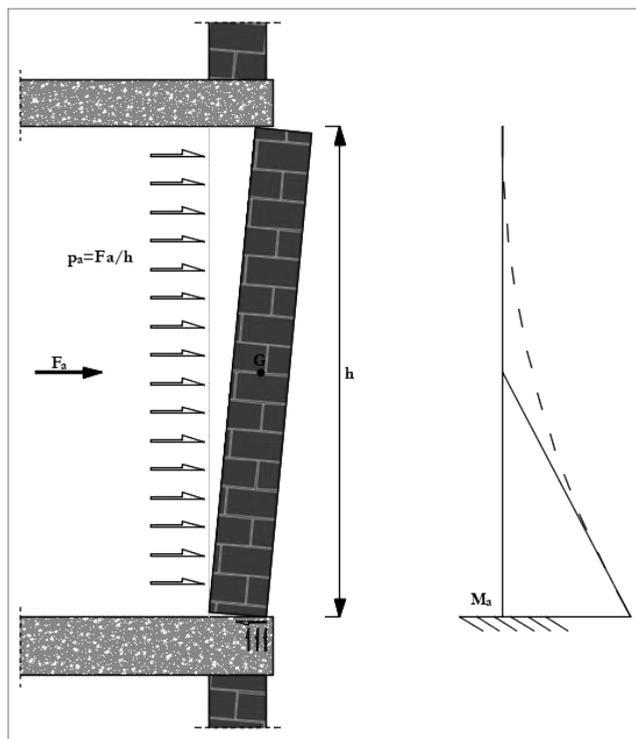


Figura 8.1. Cinematismo per ribaltamento semplice della parete

La metodologia di verifica più appropriata a questo caso è la verifica del cinematismo per ribaltamento semplice della parete, che consiste nel confronto tra il momento ribaltante dovuto alle azioni sismiche ortogonali al piano e il momento stabilizzante dovuto ai pesi gravanti sul tamponamento.

Nel caso in cui questa verifica non risulti soddisfatta, risulta necessario eseguire un intervento di collegamento della tamponatura alla cornice strutturale.

## LE LINEE GUIDA PER I SISTEMI CRM DEL CSLPP

### 9.1. Introduzione

Una innovativa tecnologia di consolidamento con materiali compositi di strutture in muratura è rappresentata dai compositi CRM (*Composite Reinforced Mortar*). I Sistemi CRM rappresentano un'innovazione del tradizionale sistema di consolidamento con intonaco armato realizzato con reti in FRP.

Sebbene il sistema sia già presente sul mercato da alcuni anni, nel maggio 2019 il CSLPP ha emanato la «*Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione dei sistemi a rete preformata in materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti con la tecnica dell'intonaco armato CRM (Composite Reinforced Mortar)*». Questa Linea Guida fornisce le procedure per l'identificazione, la qualificazione ed il controllo di «*sistemi di rinforzo*» costituiti da reti in composito fibrorinforzate a matrice polimerica FRP, da applicare sulle superfici degli elementi strutturali per il consolidamento degli stessi con malte cementizie e/o di calce, ovvero mediante la tecnica dell'intonaco armato di tipo CRM (*Composite Reinforced Mortar*).

La Linea Guida sopracitata consente quindi la certificazione CVT (*Certificazione di Valutazione Tecnica*) dei Sistemi CRM da parte dei fornitori di materiale.

A differenza del tradizionale intonaco armato con reti metalliche, l'intonaco armato CRM, è realizzato mediante una rete preformata in composito (FRP) inserita in una malta ad uso strutturale e applicata sulla superficie dell'elemento strutturale in muratura da rinforzare. In detto sistema la rete in FRP è in grado di assorbire gli sforzi di trazione, mentre la malta strutturale contribuisce ad assorbire gli sforzi di compressione. Il trasferimento degli sforzi fra il supporto e la rete di rinforzo è garantito anche dalla presenza dei connettori, che assicurano la collaborazione strutturale fra l'elemento murario e l'intonaco armato.

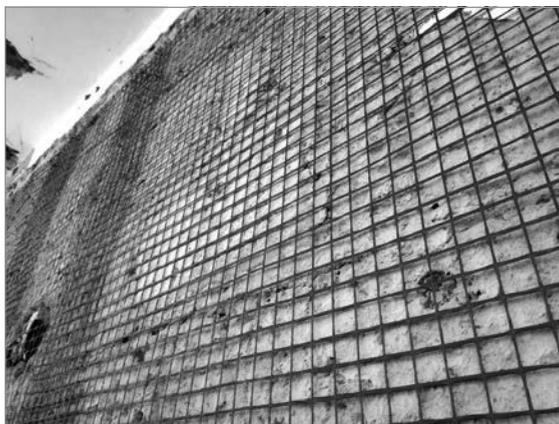


Figura 9.1. Reti in GFRP

A differenza dei sistemi di rinforzo FRCM, nel caso di Sistemi CRM, lo spessore dei sistemi di rinforzo CRM è compreso, di norma, tra 30 mm e 50 mm, al netto del livellamento del supporto e la distanza netta tra i trefoli non può essere superiore a 4 volte lo spessore della malta e comunque non può essere minore di 30 mm.

Come specificato nelle Linee Guida, i sistemi di rinforzo CRM sono tipicamente costituiti da: reti preformate, angolari in rete preformati, elementi di connessione interamente o parzialmente preformati, malte a base cementizia o di calce a prestazione garantita per uso strutturale, ancoranti chimici per la solidarizzazione dei connettori tra loro o l'ancoraggio degli stessi nel supporto murario. Le reti, gli angolari e gli elementi di connessione in composito, costituenti i sistemi di rinforzo CRM, sono realizzati mediante l'impiego di fibre lunghe e continue di vetro, carbonio, basalto o arammide, immerse in una matrice polimerica termoindurente.

Per la progettazione e le modalità di impiego dei sistemi di rinforzo CRM si dovrà fare riferimento alla normativa tecnica vigente, ed eventualmente a documenti complementari di comprovata validità.



**Figura 9.2.** *Rinforzo muratura con CRM*

## **9.2. Le caratteristiche dei Sistemi CRM e le classi prestazionali**

Nell'ambito della Linea Guida le reti e gli angolari dei sistemi di rinforzo preformati sono classificati in base ai valori delle seguenti due caratteristiche meccaniche, il modulo elastico e la tensione di rottura. Tali caratteristiche, valutate in regime di trazione uniassiale, devono essere riferite all'unità di superficie complessiva della sezione retta del rinforzo FRP (fibre e matrice), ortogonalmente cioè alla direzione delle fibre.

La successiva tabella riportata nelle Linee Guida, riporta le classi di tali rinforzi contemplate dalla Linea Guida ed i corrispondenti valori delle suddette caratteristiche meccaniche.

I valori esposti sono nominali. La condizione che i valori del modulo elastico medio e della resistenza caratteristica a trazione delle reti/angolari in FRP siano maggiori o uguali a quelli nominali ne legittima l'appartenenza alla corrispondente classe.

## ACCETTAZIONE E COLLAUDO DI SISTEMI FRP, FRCM E CRM

### 10.1. Introduzione

Come riportato al capitolo 11 (*Materiali e prodotti per uso strutturale*) delle NTC 2018 di cui al D.M. 17 gennaio 2018, si definiscono materiali e prodotti per uso strutturale quelli che consentono ad un'opera ove questi sono incorporati permanentemente di soddisfare in maniera prioritaria il requisito base delle opere n. 1 «*Resistenza meccanica e stabilità*» di cui all'Allegato I del Regolamento UE 305/2011.

I materiali ed i prodotti per uso strutturale devono rispondere ai seguenti requisiti:

- I materiali e prodotti per uso strutturale devono essere:
  - identificati univocamente a cura del fabbricante, secondo le procedure di seguito richiamate;
  - qualificati sotto la responsabilità del fabbricante, secondo le procedure di seguito richiamate;
  - accettati dal Direttore dei Lavori mediante acquisizione e verifica della documentazione di identificazione e qualificazione, nonché mediante eventuali prove di accettazione.
- In particolare, per quanto attiene l'identificazione e la qualificazione, possono configurarsi i seguenti casi:
  - A) materiali e prodotti per i quali sia disponibile, per l'uso strutturale previsto, una norma europea armonizzata il cui riferimento sia pubblicato su GUUE. Al termine del periodo di coesistenza il loro impiego nelle opere è possibile soltanto se corredati della *Dichiarazione di Prestazione* e della Marcatura CE, prevista al Capo II del Regolamento UE 305/2011;
  - B) materiali e prodotti per uso strutturale per i quali non sia disponibile una norma europea armonizzata oppure la stessa ricada nel periodo di coesistenza, per i quali sia invece prevista la qualificazione con le modalità e le procedure indicate nelle presenti norme. È fatto salvo il caso in cui, nel periodo di coesistenza della specifica norma armonizzata, il fabbricante abbia volontariamente optato per la Marcatura CE;
  - C) materiali e prodotti per uso strutturale non ricadenti in una delle tipologie A) o B. In tali casi il fabbricante dovrà pervenire alla Marcatura CE sulla base della pertinente «*Valutazione Tecnica Europea*» (ETA), oppure dovrà ottenere un «*Certificato di Valutazione Tecnica*» rilasciato dal Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, previa istruttoria del Servizio Tecnico Centrale, anche sulla base di Linee Guida approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, ove disponibili; con decreto del Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, su conforme parere della competente Sezione, sono approvate Linee Guida relative alle specifiche procedure per il rilascio del «*Certificato di Valutazione Tecnica*».

Al fine di procedere all'accettazione e collaudo dei sistemi FRP, FRCM e CRM, i DT del CNR e le Linee Guida del CSLPP riportano chiare indicazioni e prescrizioni che andiamo ad analizzare di seguito.

## **10.2. Accettazione e collaudo dei sistemi FRP**

Le modalità di accettazione e collaudo dei sistemi FRP vengono riportate nel DT 200 R1 2013 e nelle Linee Guida del CSLPP «*Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti*» del maggio 2019 che aggiornano e sostituiscono le Linee Guida del 2015.

Si riportano di seguito le prescrizioni per l'accettazione ed il collaudo di sistemi FRP laminati in situ e preformati.

### **10.2.1. Accettazione in cantiere di sistemi di consolidamento FRP laminati in situ**

Per l'accettazione in cantiere di sistemi di consolidamento FRP laminati in situ si deve procedere come segue:

- verifica documentazione di accompagnamento alle forniture: (indicazione del CVT nel documento di trasporto; verifica marcatura del sistema);
- sottoscrizione richiesta di prove presso laboratorio autorizzato di cui all'art. 59 del D.P.R. n. 380/2001.

Il prelievo dei campioni da inviare al laboratorio, viene eseguito secondo quanto previsto dalla relativa Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti.

#### **Prelievo**

N. 6 campioni per ciascun sistema di rinforzo da installare, realizzati in cantiere con la procedura di installazione prescritta dal fabbricante. Il numero di strati del campione da realizzare equivale al numero massimo di strati del progetto oggetto di accettazione.

#### **Dimensione dei campioni**

- Larghezza compresa nell'intervallo 25-70 mm.
- Lunghezza compresa nell'intervallo 250-350 mm.

#### **Prove di accettazione**

Per ciascun campione, i valori della tensione di rottura a trazione e del modulo elastico, entrambi nella direzione delle fibre, risultano non inferiori all'85% quelli nominali della classe di appartenenza.

#### **Qualora la verifica non dovesse essere soddisfatta**

- Ripetizione della prova con le stesse modalità su n. 6 provini.
- In caso di ulteriore esito negativo il Direttore dei Lavori assume le determinazioni più opportune e ne dà comunicazione al STC. In tal caso l'intero lotto di spedizione è da

## I COMPOSITI NATURALI

### 11.1. Le fibre naturali

La nuova frontiera dei materiali compositi, anche nell'ingegneria civile, è sicuramente la produzione di *biocompositi*, realizzati principalmente mediante l'utilizzo di fibre naturali. Le fibre naturali sono quelle già presenti in natura e ricavabili con procedimenti diversi, meccanici e chimici. Possono essere classificate indicativamente, tenendo conto della propria origine in: fibre vegetali, fibre animali, fibre minerali.

### 11.2. Fibre naturali vegetali

La prima definizione, necessariamente indispensabile al fine di una migliore comprensione dell'argomento, è quella di *fibra vegetale*. Con tale dizione si intende la singola cellula che, avendo contribuito all'accrescimento della pianta da cui viene estratta, ha ormai cessato le sue funzioni vitali.

Il rinforzo vegetale assume successivamente e definitivamente aspetti diversificati e opportunamente scelto a seconda dell'utilizzo che se ne intende fare, ad esempio se utilizzato in esperienze di laboratorio oppure nella realizzazione pratica del prodotto composito.

È noto che le fibre da utilizzare nella realizzazione dei compositi naturali sono costituite da particelle macroscopiche (ordine del millimetro) ovvero caratterizzate da dimensioni facilmente misurabili ed ottenute con procedimenti immutati nel tempo quali tritatura del materiale legnoso selezionato oppure da filamenti molto lunghi (ordine del metro) ottenuti dalle foglie piuttosto robuste e spesse di alcune piante che vivono nella regione tropicale del globo terrestre. Esiste una terza possibilità per ottenere le fibre ed è quella di ricorrere a trattamenti chimici più o meno severi della matrice vegetale dalla quale si intende estrarre le stesse.

Le proprietà della fibra vegetale sono sinteticamente esposte qui di seguito:

- integrità strutturale e alta qualità tecnologica;
- omogeneità;
- dimensione trasversale della fibra dell'ordine della decina di micron;
- proprietà sono riscontrabili soltanto nella struttura elementare della singola cellula vegetale;
- ogni singola cellula è indivisibile poiché ogni sua frazione perderebbe di identità e significato strutturale;
- essa è costituita quasi esclusivamente da cellulosa che è decisamente il suo elemento costitutivo principale ed in alcuni casi l'unico, come ad esempio nel cotone.

Generalmente, diverse fonti, indicano le fibre naturali come generatrici di una categoria vasta quanto variegata, quella delle fibre tessili. La ragione di ciò risiede nel fatto che la stessa natura di tali fibre è filamentosa e le stesse sono estremamente flessibili e resistenti. Complessivamente,

queste caratteristiche intime delle fibre, ne fanno ottime candidate alle operazioni di tessitura, allo scopo di poter ottenere prodotti di diversa qualità, in termini di pregio del filato e peso, con destinazioni commerciali che vanno, dall'impiego nell'industria d'abbigliamento nel caso dei filati pregiati a quello, come per i filati grezzi quali scarti della canapa, juta, lino grezzo non trattato, nell'industria automobilistica, aeronautica, ecc..

### 11.2.1. *Classificazione delle fibre*

Una classificazione è resa possibile impostando una analisi che tenga conto, in relazione alla pianta origine, della provenienza zonale della fibra. Quindi, al fine di procedere ad un razionale tentativo di identificazione del tipo di fibra, interessa conoscere con esattezza due elementi particolarmente indicativi e sono:

- pianta dalla quale la si intende estrarre;
- zona della pianta interessata dall'operazione di estrazione.

Le fibre possono essere estratte da queste parti delle piante:

- *fusto*;
- *foglie*;
- *semi*;
- *frutto*.

Quindi le fibre si possono suddividere in quattro classi:

- *fibre dei semi* (cotone, kapok, sete vegetali);
- *fibre del frutto* (cocco, peli di tifa, banana);
- *fibre del fusto* (lino, canapa, ibisco, sunn, gelsomino, ginestra, ramié, ortica dioica, juta, abelmosco, urena, tiglio, luppolo, tifa);
- *fibre fogliari* (canapa di Manila, agavi (sisal, pita), canapa di Maurizio, lino della Nuova Zelanda, aloe, sansevieria, yucca, ananas, sparto, rafia, piassava, crine vegetale);

Inoltre a seconda della lunghezza le fibre si distinguono in fibre lunghe (seta, fibre artificiali e sintetiche) ed in fibre corte (cotone, lino, canapa, juta, ramié, lana, amianto).

### 11.3. *Caratterizzazione delle fibre*

Nell'affrontare la descrizione delle caratteristiche di una specifica fibra, è buona norma seguire una ordinata procedura scientifica. Essa vale anche per le fibre vegetali.

Una specifica analisi delle fibre deve prevedere un certo numero di prove e di test mirati per l'identificazione delle fibre stesse. La procedura standard per indagare in modo razionale sulla natura della fibra da caratterizzare si compone di:

- *analisi chimica*: si opera una descrizione delle sostanze chimiche costituenti la fibra, se ne definiscono i composti presenti ed il loro ammontare relativo, nonché il modo in cui sono distribuiti all'interno del volume della fibra. Limitando il discorso alle fibre naturali vegetali, c'è da dire che la composizione chimica è qualitativamente identica in tutte le fibre. Ciò che varia passando da una specie vegetale all'altra è l'ammontare relativo delle varie sostanze. Questo aspetto incide in modo non trascurabile sulle caratteristiche della risposta alle sollecitazioni dei carichi esterni applicati;
- *analisi morfologica*: è la descrizione dell'aspetto della fibra, la forma viene definita nei suoi tratti distintivi. Ciò che bisogna tener presente è che tra le diverse fibre naturali la

## ESEMPI DI APPLICAZIONE DI SISTEMI DI CONSOLIDAMENTO FRP, FRCM E CRM

### 12.1. Miglioramento sismico di una struttura in calcestruzzo armato

Un importante intervento di consolidamento strutturale su strutture in calcestruzzo è stato realizzato su un edificio sito in provincia di Avellino, nel territorio colpito dal terremoto del 1980.

L'intervento ha previsto il consolidamento dei nodi perimetrali della struttura con tessuti in CFRP. Per il consolidamento dei nodi sono stati utilizzati tessuti quadriassiali in CFRP sui pannelli di nodo e tessuti uniassiali in CFRP per il rinforzo degli elementi convergenti nei nodi.

Durante le lavorazioni è stato necessario monitorare costantemente la temperatura ambientale e quella dei supporti al fine di non scendere al di sotto delle temperature minima di applicazione delle resine.



**Figura 12.1.** Consolidamento di nodi perimetrali con CFRP

### 12.2. Adeguamento sismico di un edificio in muratura degli anni Venti, infrastruttura di interesse strategico

Al fine di adeguare sismicamente una struttura in muratura di interesse strategico, sono stati utilizzati nastri in CFRP uniassiali disposti sulle murature.

L'intervento di consolidamento ha interessato tutte le strutture verticali in muratura ed i solai in latero cemento.

I solai latero cementizi sono stati rinforzati intradossalmente mediante l'uso di lamine pultruse in CFRP 50x1.4 mm in Classe C150/2800.

Le murature sono state rinforzate mediante l'uso di tessuti uniassiali in CFRP da 300 e 600 g/m<sup>2</sup> in Classe 210C.

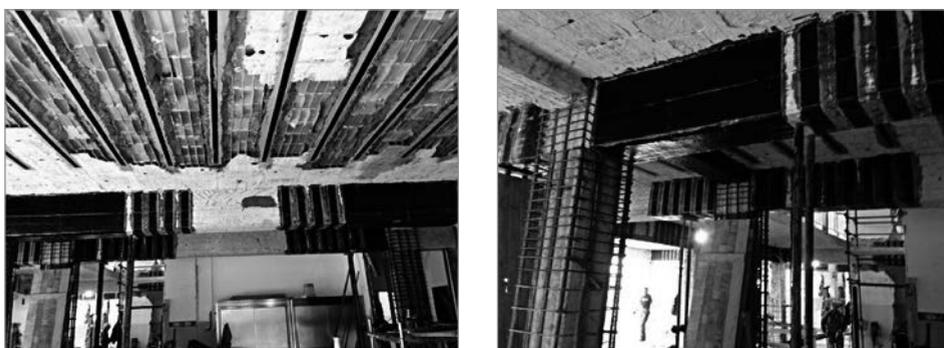
Mediante l'uso di sistemi di consolidamento in FRP è stato possibile adeguare sismicamente la struttura con vita nominale 100 anni.



**Figura 12.2.** Consolidamento di murature con CFRP

### 12.3. Adeguamento sismico di un edificio scolastico in calcestruzzo

Al fine di raggiungere l'adeguamento sismico di un edificio scolastico in calcestruzzo armato è stato realizzato un intervento misto mediante il consolidamento dei pilastri con incamiciatura in calcestruzzo, il consolidamento a taglio delle travi con tessuti uniassiali in CFRP da  $300 \text{ g/m}^2$  in classe 210 C ed il rinforzo intradossale dei solai latero cementizi con lamine pultruse da  $50 \times 1.4 \text{ mm}$  in CFRP in Classe 120C.



**Figura 12.3.** Consolidamento di solai e travi in c.a. con CFRP

### 12.4. Consolidamento di una struttura in calcestruzzo armato – Città delle Arti e della Scienza – Valencia (ES)

Un interessante intervento di consolidamento strutturale su strutture in calcestruzzo, realizzato con lo scopo di cambiare la destinazione d'uso di una struttura è stato realizzato a Valencia

## LA STAMPA 3D E LE APPLICAZIONI IN EDILIZIA

### 13.1. Origini e tecnologie della stampa 3D

Un'importante tecnologia di fabbricazione che prevede anche l'utilizzo di particolari materiali compositi in edilizia è il processo di stampa 3D. La tecnologia di stampa 3D nasce nel 1986, con la pubblicazione del brevetto di Chuck Hull, che inventa la stereolitografia.

Dal 1986 la stampa 3D si è evoluta e differenziata, con l'introduzione di nuove tecniche di stampa e di innumerevoli materiali con diverse caratteristiche meccaniche, stampabili sia da soli che in combinazione, permettendo la diffusione di questa tecnica di produzione in molti ambiti, che spaziano dall'industria all'ambito medico e domestico.

A partire dal 2009, con la scadenza del brevetto 5.121.329 sulla tecnologia FDM, il costo delle stampanti 3D si è considerevolmente contratto, rendendole economicamente accessibili alle piccole e medie imprese e favorendone l'ingresso nel mondo degli uffici. Sebbene la prototipazione rapida domini gli usi attuali, le stampanti 3D offrono un grande potenziale per la produzione di applicazioni.

Esistono diverse tecnologie per la stampa 3D e le loro differenze principali riguardano il modo in cui sono stampati gli strati. Alcuni metodi usano materiali che si fondono, si sinterizzano, o si ammorbidiscono col calore (in genere prodotto per irraggiamento da una sorgente di radiazione elettromagnetica oppure da un fascio di elettroni) per produrre gli strati, ad es. il *selective laser sintering* (SLS) e la modellazione a deposizione fusa (*fused deposition modeling*, FDM), mentre altri depongono materiali liquidi che sono fatti indurire con tecnologie diverse. Nel caso dei sistemi di laminazione, si hanno strati sottili che vengono tagliati secondo la forma e uniti insieme.

Ogni metodo ha i suoi vantaggi e inconvenienti, e conseguentemente alcune società offrono una scelta tra polvere e polimero come materiale dal quale l'oggetto è ricavato. Generalmente, i fattori principali presi in considerazione sono la velocità, il costo del prototipo stampato, il costo della stampante 3D, la scelta dei materiali, le colorazioni disponibili.

Un metodo di stampa 3D consiste in un sistema di stampa ad estrusione di materiale. La stampante crea il modello uno strato alla volta, spargendo uno strato di polvere (gesso o resine) e stampando con il getto d'inchiostro un legante nella sezione trasversale della parte. Il processo viene ripetuto finché non è stampato ogni strato. Questa tecnologia è l'unica che consente la stampa di prototipi interamente a colori. Questo metodo permette anche di realizzare sporgenze. È inoltre riconosciuto come il metodo più veloce.

Nel *Digital Light Processing* (DLP), una vasca di polimero liquido è esposto alla luce di un proiettore DLP in condizioni di luce inattinica. Il polimero liquido esposto si indurisce. La piastra di costruzione poi si muove in basso in piccoli incrementi e il polimero liquido è di nuovo esposto alla luce. Il processo si ripete finché il modello non è costruito. Il polimero liquido è poi drenato dalla vasca, lasciando il modello solido. Lo ZBuilder Ultra o la 3DL Printer sono esempi di sistema di prototipazione rapida DLP.

Il *fused deposition modeling* (FDM), deriva da una tecnologia storicamente applicata ad esempio nella saldatura di fogli plastici, nell'incollaggio a caldo e nell'applicazione automatizzata di guarnizioni polimeriche, nei primi anni Ottanta è stata poi adattata da Hideo Kodama e successivamente da S. Scott Crump ad una struttura cartesiana, scaduto il brevetto tale tecnologia è diventata oggetto commerciale grazie all'intervento di Stratasys.



**Figura 13.1.** Processo di stampa FDM

Il metodo FDM è basato su un ugello che deposita un polimero fuso strato dopo strato per creare la geometria del pezzo. I polimeri più conosciuti che vengono utilizzati col metodo FDM sono il PLA (*Acido Polilattico*) e l'ABS (*Acrilnitrile Butadiene Stirene*). Il PLA viene estruso normalmente a una temperatura di fusione variabile fra i 180 °C e i 220 °C, mentre l'ABS fra i 220 °C e i 250 °C. Al contrario dell'ABS il PLA non emette fumi potenzialmente dannosi quando viene fuso ed estruso. Gli oggetti stampati in ABS sono meno fragili, maggiormente resistenti alle alte temperature e più flessibili degli oggetti stampati in PLA.

Un altro approccio chiamato SLS è la fusione selettiva di un mezzo stampato in un letto granulare. In questa variazione, il mezzo non fuso serve a sostenere le sporgenze e le pareti sottili nella parte che viene prodotta, riducendo il bisogno di supporti ausiliari temporanei per il pezzo da lavorare. Normalmente si usa un laser per sinterizzare il mezzo e formare il solido. Esempi di questa tecnica sono l'SLS e il DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*), che usano metalli.

Infine, le configurazioni ultrasottili sono realizzate mediante la tecnica di microfabbricazione 3D della fotopolimerizzazione a due fotoni. In questo approccio, l'oggetto 3D desiderato è

## CONTENUTI E ATTIVAZIONE DELLA WEBAPP

### 14.1. Contenuti della WebApp

La WebApp è parte integrante della presente pubblicazione e gestisce le seguenti utilità:

- **Normativa di riferimento e giurisprudenza** consultabili attraverso un motore di ricerca (aggiornamento automatico per 365 giorni dall'attivazione della WebApp).
- **Modelli per l'accettazione ed il collaudo dei sistemi FRP, FRCM e CRM:**
  - Accettazione in cantiere sistemi di consolidamento CRM;
  - Accettazione in cantiere sistemi di consolidamento FRCM;
  - Accettazione in cantiere sistemi di consolidamento FRP in situ;
  - Accettazione in cantiere di sistemi di consolidamento preformati FRP;
  - Collaudo di sistemi di consolidamento FRCM;
  - Collaudo di sistemi di consolidamento FRP in c.a.;
  - Collaudo di sistemi di consolidamento FRP su muratura.
- **Glossario** (termini più ricorrenti sull'argomento); **FAQ** (risposte alle domande più frequenti); **Test base / Test avanzato** (verifiche sulla conoscenza dell'argomento).

### 14.2. Requisiti hardware e software

- Dispositivo con MS Windows, Mac OS X, Linux, iOS o Android
- Accesso ad internet e browser web con *Javascript* attivo
- Software per la gestione di documenti Office e PDF

### 14.3. Attivazione della WebApp

1) Collegarsi al seguente indirizzo internet:

[https://www.grafill.it/pass/0112\\_6.php](https://www.grafill.it/pass/0112_6.php)

- 2) Inserire i codici “A” e “B” (vedi ultima pagina del volume) e cliccare [**Continua**]
- 3) **Utenti già registrati su [www.grafill.it](http://www.grafill.it)**
  - 3.1) Inserire i dati di accesso e cliccare [**Accedi**]
  - 3.2) Accettare la licenza d'uso e cliccare [**Continua**]
- 4) **Utenti non ancora registrati su [www.grafill.it](http://www.grafill.it)**
  - 4.1) Cliccare [**Iscriviti**]
  - 4.2) Compilare il form di registrazione e cliccare [**Iscriviti**]
  - 4.3) Accettare la licenza d'uso e cliccare [**Continua**]

- 5) Un **link per il download del software** e la **password di attivazione** saranno inviati all'indirizzo e-mail inserito nel form di registrazione
- 6) Accedere al profilo utente su **www.grafill.it**
- 7) Cliccare il pulsante **[G-CLOUD]**
- 8) Cliccare il pulsante **[Vai alla WebApp]** in corrispondenza del prodotto acquistato

#### **14.4. Assistenza tecnica (*TicketSystem*)**

I prodotti **Grafill** sono coperti da assistenza tecnica gratuita per 365 giorni dall'acquisto. L'assistenza è prevista per l'installazione, l'avvio o la reinstallazione del prodotto (*non è prevista assistenza per il recupero dei dati*), se la configurazione hardware rispetta i requisiti richiesti.

---

L'assistenza *TicketSystem* è disponibile all'indirizzo **<https://www.supporto.grafill.it>**. Effettuare il login al *TicketSystem* utilizzando i dati del profilo utente di **www.grafill.it** ed aprire un ticket seguendo le istruzioni. La cronologia dei ticket resterà disponibile sulla schermata principale del *TicketSystem*.

---



A seguito del terremoto che ha colpito il Centro Italia nel 2016, è aumentato l'utilizzo di sistemi di consolidamento FRCM e CRM, che rappresentano un'importante soluzione tecnica per questa tipologia di strutture ad integrazione dei compositi FRP.

Numerosi sono stati negli anni i documenti tecnici e le Linee Guida prodotti dal CNR e dal CSLLPP in merito ai sistemi di consolidamento FRP, FRCM e CRM, oltre alle importanti norme tecniche prodotte in ambito internazionale.

Oggetto del volume è l'analisi degli aggiornamenti normativi, con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17 gennaio 2018, che oltre a definire le modalità di progettazione dei nuovi sistemi di consolidamento chiariscono gli adempimenti di imprese, Direttore dei Lavori e Collaudatore.

I tre sistemi di consolidamento FRP, FRCM e CRM vengono analizzati in riferimento alle norme, alle caratteristiche e ai vantaggi e svantaggi applicativi.

Oltre alle tradizionali fibre sintetiche sono oggetto del volume le fibre naturali presenti sul mercato, ancora non molto utilizzate in Italia ma notevolmente diffuse in Oriente.

A completamento dell'analisi delle tecnologie di fabbricazione dei materiali compositi, vengono analizzate le innovative tecniche di stampa 3D, la cui rapida evoluzione anche in edilizia, spinta anche dall'utilizzo di materiali compositi innovativi, rappresenterà nel prossimo futuro una realtà consolidata nel settore delle nuove costruzioni.

A corredo del volume sono state prodotte alcune schede per direttore dei lavori e collaudatore nell'ambito di un intervento di consolidamento con l'uso di compositi.

Questo volume rappresenta un fondamentale strumento per i tecnici che, nel loro ruolo di Progettista, Direttore dei Lavori e Collaudatore, si trovano a lavorare in un intervento di consolidamento strutturale con sistemi FRP, FRCM e CRM.

La **WebApp inclusa** è parte integrante della presente pubblicazione e gestisce:

- **Normativa di riferimento e giurisprudenza** consultabili attraverso un motore di ricerca (aggiornamento automatico per 365 giorni dall'attivazione della WebApp).
- **Modelli per l'accettazione ed il collaudo dei sistemi FRP, FRCM e CRM.**
- **Glossario** (termini più ricorrenti sull'argomento); **FAQ** (risposte alle domande più frequenti); **Test base / Test avanzato** (verifiche sulla conoscenza dell'argomento).

#### REQUISITI HARDWARE E SOFTWARE

Qualsiasi dispositivo con MS Windows, Mac OS X, Linux, iOS o Android; accesso ad internet e browser web con Javascript attivo; software per la gestione di documenti Office e PDF.

**Domenico Brigante**, professore a contratto di "Materiali Innovativi" presso l'Università telematica Mercatorum, Ingegnere Strutturista presso la Soprintendenza Speciale del MIBACT per il Terremoto in Centro Italia, e presidente del Centro Compositi in Edilizia. È Autore di volumi tecnici pubblicati con la casa editrice Grafill e in lingua inglese con la casa editrice americana Springer.



WebApp

Assistenza  
tecnica

ISBN 13 978-88-277-0112-6



9 788827 701126 >

Euro 35,00