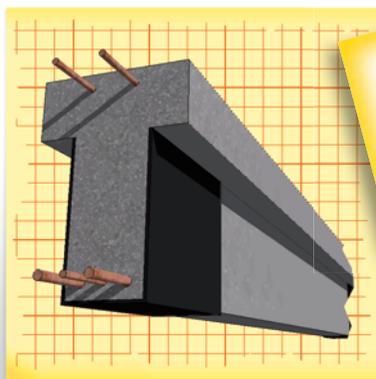


Domenico Brigante

DIREZIONE DEI LAVORI E COLLAUDO

NEL RINFORZO STRUTTURALE CON SISTEMI FRP

- MATERIALI COMPOSITI ▪ PROCESSI DI FABBRICAZIONE ▪ SCELTA DEL SISTEMA COMPOSITO ▪ NORMATIVA PER I SISTEMI FRP ▪ CERTIFICATO DI IDONEITÀ TECNICA PER FRP
- NORMATIVA PER I SISTEMI FRCM ▪ ESEMPI APPLICATIVI ▪ PARTICOLARI COSTRUTTIVI



**PRONTO
GRAFILL**

Clicca e richiedi di essere contattato
per informazioni e promozioni

SOFTWARE INCLUSO

MODELLI PER LA VERIFICA ED IL COLLAUDO IN CANTIERE
DI MATERIALI COMPOSITI FIBRORINFORZATI (FRP) PER IL RINFORZO STRUTTURALE

Glossario (principali termini tecnico-normativi), **F.A.Q.** (domande e risposte sui principali argomenti),
Test iniziale (verifica della formazione di base), **Test finale** (verifica dei concetti analizzati)



GRAFILL

Domenico Brigante
**DIREZIONE DEI LAVORI E COLLAUDO
NEL RINFORZO STRUTTURALE CON SISTEMI FRP**
Ed. I (2017)

ISBN 13 978-88-8207-917-8
EAN 9 788882 079178

Collana **Manuali** (209)

Brigante, Domenico <1982->
Direzione dei lavori e collaudo nel rinforzo strutturale
con sistemi FRP / Domenico Brigante. – Palermo : Grafill, 2017.
(Manuali ; 209)
ISBN 978-88-8207-917-8
1. Edifici – Consolidamento – Impiego [di] Materiali compositi.
690.24 CDD-23 SBN Pal0297221
CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Il volume è **disponibile anche in eBook** (formato *.pdf) compatibile con **PC, Macintosh, Smartphone, Tablet, eReader**.
Per l'acquisto di eBook e software sono previsti pagamenti con c/c postale, bonifico bancario, carta di credito e PayPal.
Per i pagamenti con carta di credito e PayPal è consentito il download immediato del prodotto acquistato.

Per maggiori informazioni inquadra con uno Smartphone o un Tablet il Codice QR sottostante.



I lettori di Codice QR sono disponibili gratuitamente su Play Store, App Store e Market Place.

© **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

Finito di stampare nel mese di aprile 2017
presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

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

➤	INTRODUZIONE	p.	9
1.	I MATERIALI COMPOSITI	"	11
1.1.	Definizione e caratteristiche.....	"	12
1.2.	Le fibre.....	"	12
1.3.	Fibre di carbonio.....	"	13
1.4.	Fibre di vetro.....	"	14
1.5.	Fibre Aramidiche.....	"	16
1.6.	Altre tipologie di fibre.....	"	18
1.7.	Le matrici.....	"	19
1.8.	Resine epossidiche.....	"	20
1.9.	Altre resine.....	"	20
1.10.	Altre tipologie di matrici.....	"	20
2.	PROCESSI DI FABBRICAZIONE	"	21
2.1.	Laminati in situ.....	"	22
2.2.	Preformati.....	"	22
2.3.	Reti in FRP.....	"	24
2.4.	Nuovo macchinario per impregnazione semiautomatizzata di sistemi FRP.....	"	25
2.5.	Altre tecnologie di produzione.....	"	28
3.	SCELTA DEL SISTEMA COMPOSITO	"	31
3.1.	Vantaggi dei materiali compositi.....	"	31
3.2.	Radiotrasparenza.....	"	32
3.3.	Progettabilità dei materiali.....	"	33
3.4.	Comportamento nei confronti del fuoco.....	"	34
3.5.	Resistenza ai raggi ultravioletti.....	"	34
3.6.	Comportamento nei confronti dell'umidità.....	"	35
4.	NORMATIVA PER I SISTEMI FRP	"	36
4.1.	FRP – Fiber Reinforced Polymers.....	"	36
4.2.	D.M. 14/09/2005 (G.U. n. 222 del 23/09/2005).....	"	37
4.3.	D.M. 14 gennaio 2008 (G.U. n. 29 del 4/02/2008).....	"	37
4.4.	Il documento tecnico italiano CNR-DT 200/04.....	"	38

4.5.	Le Linee Guida dell'Assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.....	p.	39
4.6.	Bozza Linee Guida – Dipartimento Protezione Civile – ReLUIS	"	40
4.7.	CNR-DT 200 R1/2013	"	42
4.8.	Decreto del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici n. 220 del 9/07/2015	"	43
5.	C.I.T. – CERTIFICATO IDONEITÀ TECNICA FRP	"	45
5.1.	Sistemi di rinforzo preformati.....	"	45
5.1.1.	Classificazione	"	45
5.1.2.	Qualificazione	"	46
5.1.3.	Identificazione.....	"	47
5.1.4.	Le prove	"	47
5.1.5.	Procedure per il rilascio del Certificato di Idoneità Tecnica (CIT).....	"	50
5.1.6.	Controlli di accettazione in cantiere.....	"	50
5.2.	Sistemi di rinforzo realizzati in situ.....	"	50
5.2.1.	Classificazione	"	51
5.2.2.	Qualificazione	"	51
5.2.3.	Le prove	"	52
5.2.4.	Controlli di accettazione in cantiere.....	"	54
6.	NORMATIVA PER I SISTEMI FRCM.....	"	55
6.1.	Introduzione ai sistemi FRCM.....	"	55
6.2.	Le normative in campo internazionale.....	"	57
6.2.1.	ES-ICC AC434.....	"	57
6.2.2.	ACI 549.....	"	57
6.3.	Linea guida per la qualificazione dei compositi FRCM	"	58
6.3.1.	Prove per la qualificazione dei sistemi di rinforzo.....	"	58
7.	IL DIRETTORE DEI LAVORI ED IL COLLAUDATORE.....	"	65
7.1.	Controlli di accettazione	"	65
7.1.1.	Laminati pultrusi	"	65
7.1.2.	Laminati in situ	"	66
7.1.3.	Scheda di sintesi per l'accettazione	"	67
7.2.	L'impresa	"	67
7.3.	Collaudo.....	"	67
7.3.1.	Prove semi-distruttive	"	68
7.3.2.	Prove non distruttive	"	70
7.4.	Monitoraggio	"	72
8.	ESEMPI DI APPLICAZIONE.....	"	73
8.1.	Chiesa di Nicoya in Costa Rica – Muratura	"	73
8.2.	Struttura alberghiera in c.a.....	"	76

8.3.	Molo in c.a. (Costa Rica).....	p.	78
8.4.	Edificio scolastico	"	79
8.5.	Antisfondellamento struttura ospedaliera	"	80
9.	PARTICOLARI COSTRUTTIVI.....	"	81
9.1.	Rinforzo a flessione trave in c.a.-carbonio	"	81
9.2.	Rinforzo a taglio trave in c.a.-carbonio	"	81
9.3.	Confinamento colonne in c.a.-carbonio	"	83
9.4.	Rinforzo a flessione trave in acciaio-carbonio.....	"	84
9.5.	Rinforzo a taglio muratura-carbonio.....	"	85
9.6.	Confinamento muratura-carbonio	"	85
9.7.	Rinforzo a flessione trave in legno-carbonio	"	86
9.8.	Rinforzo a flessione solaio latero-cementizio/carbonio.....	"	86
9.9.	Rinforzo a taglio muratura-aramide.....	"	87
9.10.	Confinamento muratura-aramide	"	87
9.11.	Antisfondellamento solai	"	88
9.12.	Rinforzo pannelli muratura.....	"	88
↘	INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE INCLUSO	"	89
-	Note sul software incluso	"	89
-	Requisiti hardware e software	"	89
-	Download del software e richiesta della password di attivazione	"	89
-	Installazione ed attivazione del software.....	"	90
↘	BIBLIOGRAFIA, NORMATIVE E SITI WEB.....	"	91

INTRODUZIONE

Le Norme Tecniche per le Costruzioni (nel seguito NTC2008), approvate con il Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008, prevedono al punto 11.1 che qualsiasi materiale e prodotto da costruzione, se impegnato ad uso strutturale, debba essere identificabile, dotato di qualifica all'uso del caso nonché soggetto al controllo del Direttore dei Lavori in fase di accettazione.

A tal riguardo è previsto che, qualora i materiali ed i prodotti da costruzione non siano in possesso della marcatura CEE ai sensi del Regolamento (UE) n. 305/2011 e di Benestare Tecnico Europeo, possiedano un Certificato di Idoneità Tecnica all'impiego (nel seguito CIT) rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale (nel seguito STC), sulla base di linee guida approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Al fine di intervenire su strutture esistenti, come indicato al punto 8.2. delle NTC2008, possono essere adoperati materiali tradizionali, trattati nelle dette norme, e materiali non tradizionali, di cui non si discute nelle NCT2008, purché si operi nel rispetto di normative e documenti coerenti con i principi della stessa norma.

In particolare, al punto 12 si palesa quali sono le normative di cui si può far uso:

- Eurocodici strutturali pubblicati dal CEN, con le precisazioni riportate nelle Appendici Nazionali o, in mancanza di esse, nella forma internazionale EN;
- Norme UNI EN armonizzate i cui riferimenti siano pubblicati su *Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea*;
- Norme per prove, materiali e prodotti pubblicate da UNI.

e quali sono i documenti che, costituendo riferimenti di comprovata validità, riconosciuti come non in contrasto con le NCT2008, in carenza di specifiche indicazioni possono essere utilizzati:

- Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee Guida del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale e successive modificazioni del Ministero per i Beni e le Attività Culturali, come licenziate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici e ss.mm.ii.;
- Istruzioni e documenti tecnici del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR);
- Codici internazionali, purché sia dimostrato che garantiscano livelli di sicurezza non inferiori a quelli delle presenti Norme tecniche.

Il patrimonio edilizio particolarmente vario ed importante che caratterizza l'Italia, ha determinato un forte e crescente interesse per materiali definiti come non tradizionali tra i quali i compositi fibrorinforzati (FRP – *Fiber Reinforced Polymer*) ed i compositi a matrice inorganica (FRCM – *Fabric-Reinforced-Cementitious-Matrix*).

In linea con quanto prescritto dall'attuale normativa, le Linee Guida del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici del 9 luglio 2015 dal titolo «*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», rappresentano uno strumento indispensabile al fine dell'identificazione, della qualificazione e dell'accettazione dei sistemi di rinforzo FRP.

I MATERIALI COMPOSITI

I materiali compositi rappresentano l'evoluzione della scienza e delle tecnologie dei materiali fornendo 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.

Dal punto di vista storico il concetto di rinforzo con fibra è molto 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 '50. Le prime fibre di boro e di carbonio ad alta resistenza furono introdotte nei primi anni '60 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.



Figura 1.1. *I materiali compositi*

A partire dagli ultimi anni '70 le applicazioni dei compositi si espansero fortemente in campo aeronautico, automobilistico, per articoli sportivi e per applicazioni in industrie biomediche. Gli anni '80 portarono ad un significativo sviluppo nell'utilizzo di fibre ad alto modulo di elasticità.

Oggi l'enfasi è posta sullo sviluppo di più moderni compositi con matrici a base i malte e matrici ibride con malta e resina epossidica per le applicazioni ad alta temperatura. Si hanno innumerevoli applicazioni: tubi interrati, container, barche, veicoli di terra, strutture aeronautiche e spaziali, applicazioni nell'edilizia civile, componenti per automobili, attrezzi sportivi, prodotti biomedici e moltissimi altri prodotti progettati per avere alte prestazioni meccaniche e/o stabilità dimensionale nei diversi ambienti accoppiati e bassi pesi.

1.1. Definizione e caratteristiche

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 la fase fibrosa è chiamata «rinforzo» e conferisce al materiale composito le principali caratteristiche meccaniche, mentre la fase matriciale, «matrice» consente la distribuzione di carico tra gli elementi che costituiscono la fase fibrosa, garantendone la corretta funzionalità oltre a proteggere la fase fibrosa e a dare la forma al materiale composito.

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.

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.

1.2. Le fibre

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

- 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, aramide e altre fibre naturali. Esse si trovano nei compositi o sotto forma di fibre continue disposte paral-

PROCESSI DI FABBRICAZIONE

Numerose sono le tecnologie di fabbricazione utilizzabili per la realizzazione di elementi in materiali compositi. 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 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 molto difficoltoso, anche ricorrendo alla formatura sottovuoto, eliminare la parte superflua.

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

- 1) Laminati in situ;
- 2) Preformati;
- 3) *Resin transfer molding* (RTM);
- 4) *Filament winding*;
- 5) *Vacuum infusion* (RIFT);
- 6) Produzione in autoclave.

2.1. Laminati in situ

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 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.



Figura 2.1. Impregnazione in situ

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%.

2.2. Preformati

Trattasi di composti ottenuti mediante impregnazione direttamente nello stabilimento di produzione. Il processo produttivo che porta alla realizzazione degli stessi è chiamato pultrusione.

SCELTA DEL SISTEMA COMPOSITO

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, 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. Radiotrasparenza

Importante caratteristica dei sistemi compositi è l'elevata radiotrasparenza in particolar modo per i sistemi compositi tipo GFRP. La radio trasparenza delle strutture realizzate in GFRP risulta notevolmente vantaggiosa nella realizzazione di strutture caratterizzate dalla presenza di antenne

NORMATIVA PER I SISTEMI FRP

4.1. FRP – *Fiber Reinforced Polymers*

FRP è acronimo di *Fiber Reinforced Polymers* o anche *Fiber Reinforced Plastic* per definire materiali costituiti da fibre di carbonio, vetro o con differenti caratteristiche fisico-chimiche impregnate in matrice polimerica. Le fibre sono la componente resistente del materiale e sono caratterizzate da resistenze assiali e rigidità molto elevate quando sottoposte a trazione. La matrice polimerica, più comunemente chiamata resina, protegge le fibre dall'usura ed eventuali danneggiamenti esterni, assicura un buon allineamento delle fibre, e garantisce che ci sia una buona distribuzione degli sforzi fra le fibre in modo che ci sia uniformità nella distribuzione delle sollecitazioni e dunque elevate prestazioni di adesione al supporto. Le proprietà meccaniche di un composito dipendono generalmente dalla combinazione di quelle della fibra e della resina.

In generale, i compositi a matrice polimerica sono caratterizzati da elevate prestazioni meccaniche. I principali svantaggi dell'utilizzo di materiali compositi tipo FRP sono la scarsa resistenza alle alte temperature e la scarsa traspirabilità dei supporti. Fanno parte della categoria degli FRP tutti i prodotti ottenuti per pultrusione che vengono realizzati mediante un processo di impregnazione in continuo delle fibre con una matrice polimerica.

Nell'ultimo decennio, 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 nuove 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'Eurocode 8 «*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. e rimanda, in modo esplicito, per le verifiche di sicurezza alle istruzioni del CNR-DT 200-2004.

L'assemblea Generale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici 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 (D.M. 14 gennaio 2008) 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 al punto 8.6 e nel capitolo 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 bozza di linee guida che verrà introdotta nei paragrafi successivi.

Il più recente documento a cui fare riferimento per la caratterizzazione dei sistemi FRP in ambito di normativa italiana risultano le «*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*», approvate con Decreto del Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici n. 220 del 9 luglio 2015.

Sono a tutti ben note le fondamentali 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 1999 dal titolo «*Impiego delle armature non metalliche nel c.a.*».

4.2. D.M. 14/09/2005 (G.U. n. 222 del 23/09/2005)

Nel settembre 2005 il decreto ministeriale introduce le prime «*Norme Tecniche per le Costruzioni*», inizialmente denominate «*Testo Unico*».

Il nuovo documento sostituisce tutti i decreti ministeriali emanati fino a questo punto, e raccoglie per la prima volta tutte le informazioni relative alle varie tipologie di costruzione. Il testo, approntato dalla Commissione istituita dal Ministro Pietro Lunardi, a distanza di circa 30 anni dall'ultima norma organica, ha permesso un riordino sistemico delle normative tecniche soddisfacendo alla necessità fortemente sentita nel campo della costruzione delle opere civili, di avere un riferimento coerente, chiaro e sintetico nonché con un moderno approccio prestazionale piuttosto che volto alla semplificazione legislativa. Il testo dedica particolare enfasi in riferimento al problema della sicurezza delle opere, sia di nuova costruzione che esistenti. Tema attuale in tutto il Paese e tra i vari livelli della popolazione è, infatti, quello che riguarda la sicurezza sia in riferimento alla salvaguardia della pubblica incolumità sia in riferimento alla conservazione del patrimonio edilizio con particolare attenzione per quello storico-monumentale.

Nel seguito l'Ordinanza n. 3431 del maggio 2005 introduce delle modifiche agli allegati della precedente ordinanza 3274, introducendo al punto 11.3.3.3 la possibilità di «*Placcatura e fasciatura in materiali fibrorinforzati (FRP)*» e rimandando, in modo esplicito, per le verifiche di sicurezza alle CNR-DT 200-2004. Di fatto si esplicita che è ammesso l'uso di materiali diversi dall'acciaio con funzione di armatura.

4.3. D.M. 14 gennaio 2008 (G.U. n. 29 del 4/02/2008)

Il decreto introduce le «*Nuove norme tecniche per le costruzioni*». Il testo normativo include tutte le norme che disciplinano la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo delle costruzioni al

C.I.T. – CERTIFICATO IDONEITÀ TECNICA FRP

Al Capitolo 11 dell'attuale normativa per le costruzioni si dice che i materiali ed i prodotti per uso strutturale, utilizzati nelle opere relative alle dette norme devono essere:

- *Identificati* univocamente a cura del produttore, secondo le procedure applicabili;
- *Qualificati* sotto la responsabilità del produttore, secondo le procedure applicabili;
- *Accettati* dal Direttore dei Lavori mediante acquisizione e verifica della documentazione di qualificazione, nonché mediante eventuali prove sperimentali di accettazione.

In merito all'identificazione ed alla qualificazione è previsto che *«i materiali e prodotti per uso strutturale innovativi o comunque non citati nel presente capitolo e non ricadenti in una delle tipologie A) o B)»* [marcatura CE su norma europea armonizzata] dovranno *«essere in possesso di un Certificato di idoneità tecnica all'impiego rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale sulla base di Linee Guida approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici»*.

Infine, il paragrafo 4.6 delle NTC2008 prevede che materiali non tradizionali ovvero non trattati nelle dette norme tecniche *«potranno essere utilizzati per la realizzazione di elementi strutturali od opere, previa autorizzazione del Servizio Tecnico Centrale su parere del Consiglio Superiore dei lavori pubblici»*.

In merito all'accettazione di prodotti non recanti la Marcatura CE, il Direttore dei Lavori dovrà verificare il possesso del Certificato di Idoneità Tecnica (nel seguito più brevemente CIT) all'impiego rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale (nel seguito più brevemente STC) del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

Tale normativa evidenzia quindi che non è possibile utilizzare per il rinforzo strutturale in edilizia materiali non certificati CIT. Tali materiali non potranno essere quindi accettati dal Direttore dei Lavori, posti in opera e dunque collaudati.

5.1. Sistemi di rinforzo preformati

Le *«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»*, fanno una netta distinzione tra sistemi preformati e sistemi realizzati in sito trattando separatamente la relativa certificazione.

La normativa di riferimento per le caratteristiche tecniche dei sistemi di rinforzo preformati e dei relativi metodi di prova è la UNI EN 13706-1-2-3, se non diversamente specificato.

5.1.1. Classificazione

I sistemi di rinforzo preformati sono classificati in base ai valori di:

- Modulo elastico;
- Tensione di rottura.

Le caratteristiche citate devono essere ricavate in condizione di trazione uniassiale e riferite all'unità di superficie complessiva della sezione del rinforzo FRP ovvero fibre e matrice.

Nel seguito la Tabella 5.1 riporta le classi di tali rinforzi contemplate dalla «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» ed i corrispondenti valori delle suddette caratteristiche meccaniche.

Tabella 5.1. Classi degli FRP preformati [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]

Classe	Natura della fibra	Modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre [GPa]	Resistenza a trazione nella direzione delle fibre [MPa]
E17	Vetro	17	170
E23	Vetro	23	240
G38/600	Vetro	38	600
G38/800	Vetro	38	800
G45	Vetro	45	1000
C120	Carbonio	120	1800
C150/1800	Carbonio	150	1800
C150/2300	Carbonio	150	2300
C190/1800	Carbonio	190	1800
C200/1800	Carbonio	200	1800
A55	Aramide	55	1200

I valori riportati sono nominali; per appartenere ad una determinata classe il materiale deve avere valori di resistenza meccanica e modulo elastico superiori a quelli riportati; nel caso in cui il materiale presenti valori di modulo elastico e resistenza a trazione ricadenti in classi differenti esso apparterrà alla classe con caratteristiche inferiori.

5.1.2. Qualificazione

I sistemi di rinforzo preformati devono essere prodotti in uno stabilimento dotato di un sistema permanente di controllo interno della qualità, in coerenza con la norma UNI EN 9001 e valutato, in sede di rilascio del CIT, dal STC.

La gestione della qualità deve prevedere specifici controlli in merito alla pianificazione delle attività di gestione del sistema stesso, il controllo della progettazione, la qualifica dei fornitori, il controllo della documentazione di sistema e delle registrazioni ed il controllo degli strumenti di misurazione e verifica e dei prodotti/servizi. Devono essere inoltre verificate le attività di monitoraggio di tutti i processi individuati all'interno dell'azienda, la gestione di un sistema di indicatori per la valutazione dei processi, i rapporti ed i riesami periodici della direzione, il monitoraggio della soddisfazione del cliente e gestione dei reclami (UNI ISO 10002) e la gestione dei resi.

Il sistema di controllo della produzione di sistemi di rinforzo FRP preformati deve prevedere controlli sui materiali base quali fibre, tessuti, resine ed eventuali additivi, le cui caratteristiche

NORMATIVA PER I SISTEMI FRCM

6.1. Introduzione ai sistemi FRCM

Nell'ambito del consolidamento strutturale con materiali innovativi di recente si sta diffondendo l'uso di compositi FRCM (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*).

Quando la matrice polimerica viene costituita con una malta l'acronimo FRP viene sostituito dall'acronimo FRG – *Fiber Reinforced Grout o anche FRCM – Fabric Reinforced Cementitious Matrix*. Anche in questo caso come per gli FRP la fase fibrosa può essere costituita da fibre di carbonio, vetro o con differenti caratteristiche fisico-chimiche ma la matrice è costituita da una malta che può essere cementizia o ad esempio a base di leganti idraulici selezionati. Le malte possono essere inoltre miscelate con resine epossidiche o altre tipologie di resine sintetiche a seconda che sia essenziale fare in modo che il supporto sia altamente traspirabile come nel caso di supporti murari, o assicurare elevate prestazioni meccaniche nonché ottima adesione al supporto, come nel caso di rinforzi di strutture in CLS. In questa tipologia di materiali compositi, spesso la fase fibrosa è costituita da reti bilanciate (trama e ordito si equivalgono) termosaldate ad esempio con filamenti di poliestere. Tali reti sono caratterizzate da una maglia sufficientemente larga da consentire il passaggio della malta di impregnazione, da una parte all'altra del tessuto, seppur nel caso di tessuti FRCM spesso non si riesca a parlare di vera e propria impregnazione della fibre, ciò che accade è che le fibre vengono in gran parte inglobate nella matrice. Da questa condizione ne consegue una minore distribuzione di carico rispetto al caso degli FRP e dunque la necessità di un passo della maglia non troppo ridotto per evitare fenomeni di distacco dal supporto per delaminazione.

I principali vantaggi dell'utilizzo degli FRCM sono:

- Maggiore resistenza alle alte temperature; gli FRCM non sono vincolati alla temperatura di transizione vetrosa delle resine epossidiche che costituiscono la matrice degli FRP e dunque garantiscono una maggiore resistenza al fuoco;
- Maggiore traspirabilità del supporto; non costituiscono una barriera al vapore che potrebbe alterare il regime termo-igrometrico della muratura ed inoltre possono essere applicati su superfici bagnate;
- Maggiore compatibilità con il supporto, soprattutto nel caso delle murature ed in particolare, con il beneplacito delle Soprintendenze, di quelle a carattere storico e monumentale;
- Compatibilità con il supporto, soprattutto in riferimento a strutture in muratura;
- Possono essere messi in opera su superfici scabre e irregolari, senza preventiva regolarizzazione, infatti è la matrice stessa a colmare le irregolarità della superficie (considerati gli spessori del sistema) senza necessità;
- Possono essere messi in opera su superfici scabre e irregolari;
- Non presentano le difficoltà di messa in opera tipiche delle matrici organiche infatti richiedono manodopera meno specializzata.

Tabella 6.1. Principali differenze

Descrizione	Resistenza a cicli gelo-disgelo	Resistenza alle alte temperature	Resistenza al fuoco	Resistenza all'umidità	Resistenza ai raggi UV	Adesione al supporto	Resistenza a trazione	Permeabilità al vapore	Velocità di applicazione
Matrice mista epoxi-inorganica	Alta	Media	Media	Media	Media	Alta	Media	Media	Media
Matrice mista + Intonaco di protezione	Alta	Media	Media	Media	Media	Alta	Media	Media	Media
Matrice inorganica	Media	Alta	Media	Alta	Alta	Media	Media	Alta	Media
Matrice inorganica + Intonaco di protezione	Media	Alta	Alta	Alta	Alta	Media	Media	Alta	Media
Matrice organica	Alta	Media	Bassa	Media	Media	Alta	Media	Bassa	Media
Matrice organica + Intonaco di protezione	Alta	Media	Media	Media	Media	Alta	Media	Bassa	Media

Nonostante l'ormai ampio utilizzo che se ne fa, questa tipologia di composito non risulta adeguatamente studiata, non è noto con esattezza il comportamento costitutivo così come i meccanismi di rottura, tra i quali, in particolare, quello di distacco dal supporto. Dunque non si dispone allo stato attuale delle cose di criteri di qualificazione degli stessi, con conseguenti problemi di accettazione in cantiere come anche di progetto e collaudo di interventi di riparazione e di rafforzamento così realizzati.

La procedura per una corretta applicazione prevede in primo luogo una preparazione della superficie di applicazione, con la rimozione di intonaci e tutte le parti incoerenti, compreso le malte degradate tra i conci. Se necessario si procede alla stilatura dei giunti e ad una regolarizzazione della superficie, quindi alla bagnatura della stessa. Si applica un primo strato di malta, solitamente di 3-4 millimetri di spessore in cui viene posizionata la rete in fibra, esercitando una pressione sufficiente affinché la malta possa penetrare attraverso la maglia. Segue un secondo strato di malta a ricoprire completamente il tessuto completando l'intervento. Si può migliorare l'efficacia e l'isotropia del rinforzo applicando un secondo tessuto, con fibre orientate a 45° rispetto al primo. L'applicazione può essere fatta su una sola faccia della parete da consolidare o su entrambe ed ha l'effetto di aumentare la capacità portante della muratura se opportunamente connessa alla stessa.

IL DIRETTORE DEI LAVORI ED IL COLLAUDATORE

7.1. Controlli di accettazione

Come già anticipato, le NTC2008 chiedono che i materiali ed i prodotti da costruzione quando utilizzati per applicazioni strutturali, debbano essere identificabili, e in possesso di una specifica qualificazione all'uso previsto e debbano essere oggetto di controllo in fase di accettazione da parte del direttore dei lavori.

7.1.1. Laminati pultrusi

Secondo quanto stabilito nelle NTC2008, i controlli di accettazione sono obbligatori e di competenza del Direttore dei Lavori. Tutti i rinforzi FRP oggetto di fornitura devono essere campionati nell'ambito di ciascun lotto di spedizione.

Per i laminati pultrusi, il direttore dei lavori, o un suo tecnico di fiducia, dovrà:

- Verificare che ciascun lotto spedito sia coperto da un CIT valido;
- Verificare che una copia del CIT sia allegata ai documenti di trasporto.

Dopo queste verifiche dovrà eseguire un campionamento del composito e dell'adesivo e dovrà inviarli, a un laboratorio abilitato ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. n. 380/2001, come indicato dalle NTC2008 e dalle linee guida, al fine di effettuare prove sperimentali e di ottenere la relativa certificazione.

È il Direttore dei Lavori o un tecnico di sua fiducia ad effettuare il campionamento, in ragione di 3 campioni per ogni lotto di spedizione e comunque ogni 500 m o frazione di sistema di rinforzo preformato assicurando, mediante idonee sigle, etichettature indelebili, la rintracciabilità dei campioni in ordine alla fornitura ed alla ubicazione e all'uso previsto in cantiere. Sono previsti solo controlli di tipo meccanico; si prescrivono inoltre prove sulla resina-adesivo.

Le prove meccaniche devono essere effettuate da un laboratorio di cui all'art. 59 del D.P.R. n. 380/2001, con comprovata esperienza e dotato di strumentazione adeguata per prove su FRP. Tali prove vanno eseguite in tempo utile, e comunque non oltre i 30 giorni. In merito a questo termine temporale nessuna delle norme prese in analisi chiarisce il termine iniziale di decorrenza. Prima ancora di procedere all'esecuzione dei controlli d'accettazione il Direttore dei Lavori dovrà verificare che tutte le forniture di materiali siano accompagnate dal «Documento di trasporto» e che in tale documento sia presente un'esplicita annotazione con indicazione del CIT. Se questi documenti dovessero mancare, la fornitura non potrà essere utilizzata.

Per ciascun campione i valori della tensione di rottura a trazione e del modulo elastico, entrambi nella direzione delle fibre, devono risultare non inferiori ai corrispondenti valori nominali dichiarati nella scheda prodotto. Le proprietà della resina-adesivo devono soddisfare i valori dichiarati dal produttore. Qualora ciò si verifica il lotto è considerato conforme, altrimenti se gli standard non sono rispettati, anche solo per uno dei campioni del lotto, sia il provino che il metodo di prova devono essere attentamente analizzati. Se nel campione è presente un difetto o

si ha ragione di credere che si sia verificato un errore durante la prova, il risultato della prova stessa deve essere ignorato. In questo caso occorre prelevare un ulteriore (singolo) campione ed accertare il soddisfacimento dei requisiti di accettazione. In tutti gli altri casi, il risultato negativo va comunicato al STC e il Direttore dei Lavori deve assumere le opportune determinazioni. L'intero lotto di spedizione è da considerarsi non conforme e come tale non deve essere utilizzato per il previsto rinforzo strutturale.

I certificati emessi dai laboratori devono riportare l'identificazione del laboratorio che rilascia il certificato, l'identificazione univoca del certificato (numero di serie e data di emissione) e di ciascuna sua pagina, oltre al numero totale di pagine, l'identificazione del committente dei lavori in esecuzione e del cantiere di riferimento, il nominativo del Direttore dei Lavori che richiede le prove, una descrizione e identificazione dei campioni da provare con indicazione della relativa marcatura ove non reperibile sui campioni, gli estremi del verbale di prelievo sottoscritto dal Direttore dei Lavori, la data di ricevimento dei campioni, la data di esecuzione delle prove, l'indicazione della norma di riferimento della prova, le dimensioni effettivamente misurate dei campioni ed in fine i valori delle grandezze misurate.

Per i materiali e prodotti recanti la marcatura CE è onere del Direttore dei Lavori, in fase di accettazione, accertarsi del possesso della marcatura stessa e richiedere ad ogni fornitore, per ogni diverso prodotto, il Certificato ovvero Dichiarazione di Conformità alla parte armonizzata della specifica norma europea ovvero allo specifico Benestare Tecnico Europeo.

7.1.2. Laminati in situ

Anche per i laminati in situ, il Direttore dei Lavori è responsabile dell'accettazione dei materiali. Dovrà verificare che i materiali siano corredati della dovuta documentazione, costituita dal CIT e da una copia allegata ai documenti di trasporto, e dovrà eseguire, egli stesso o un suo tecnico di fiducia, il campionamento per l'esecuzione di prove meccaniche necessarie per garantire la conformità del prodotto fornito. Le prove consistono nella determinazione della tensione di rottura e del modulo elastico a trazione nella direzione delle fibre che devono risultare non inferiori a quelli relativi alla propria classe di appartenenza. Il Direttore dei Lavori, dopo averne data notizia al fornitore, preleva in cantiere dei campioni di tessuto e di resina, in quantità opportuna, e li invia ad un Laboratorio incaricato, di fiducia anche del fornitore, insieme con il manuale di installazione prodotto dal fornitore. La richiesta delle prove al laboratorio deve essere sottoscritta dal Direttore dei Lavori, altrimenti le certificazioni emesse dal laboratorio non avranno validità.

Il laboratorio incaricato deve essere autorizzato ai sensi dell'art. 59 del D.P.R. n. 380/2001 in tempo ritenuto utile dal Direttore dei Lavori ai fini dell'accertamento della qualità e della conformità alle specifiche di progetto dei rinforzi oggetto di fornitura e comunque non oltre 30 giorni. Le condizioni ambientali devono essere le medesime di quelle di installazione.

I laminati devono essere tanti quante sono le classi dei sistemi di rinforzo da installare, tenendo anche conto dell'eventuale molteplicità di fornitori e devono essere costituiti da 3 strati. Da ciascun laminato devono essere ricavati 3 campioni per ogni lotto di spedizione e comunque ogni 500 m² purché il marchio e la documentazione di accompagnamento dimostrino la provenienza del sistema di rinforzo da uno stesso fornitore.

Il laboratorio, sulla base delle procedure descritte nel manuale di installazione, realizza un laminato a 3 strati, ricavando da esso 3 provini da sottoporre a prova di trazione. Il Direttore dei Lavori ed il fornitore possono richiedere di assistere alla preparazione dei provini ed alla succes-

ESEMPI DI APPLICAZIONE

8.1. Chiesa di Nicoya in Costa Rica – Muratura

Analizzando lo stato della struttura della Chiesa di Nicoya in Costa Rica, è stato possibile ipotizzare una strategia di rinforzo strutturale che coinvolge l'uso di tessuto di fibra aramidica ad elevato modulo di elasticità.

L'intervento proposto ha i seguenti obiettivi:

- Eliminare i cinematismi di ribaltamento fuori dal piano della muratura del prospetto principale della Chiesa;
- Rinforzare l'arco presente nella parte centrale della Chiesa e la muratura sovrastante;
- Aumentare le caratteristiche meccaniche delle due murature ortogonali presenti sul lato posteriore della Chiesa;
- Realizzare un cerchiaggio completo della porzione di edificio con tetto spingente presente nella parte posteriore della Chiesa;
- Realizzare un rinforzo dei cantonali per evitare problematiche di distacco causate da eventuali successivi fenomeni sismici.

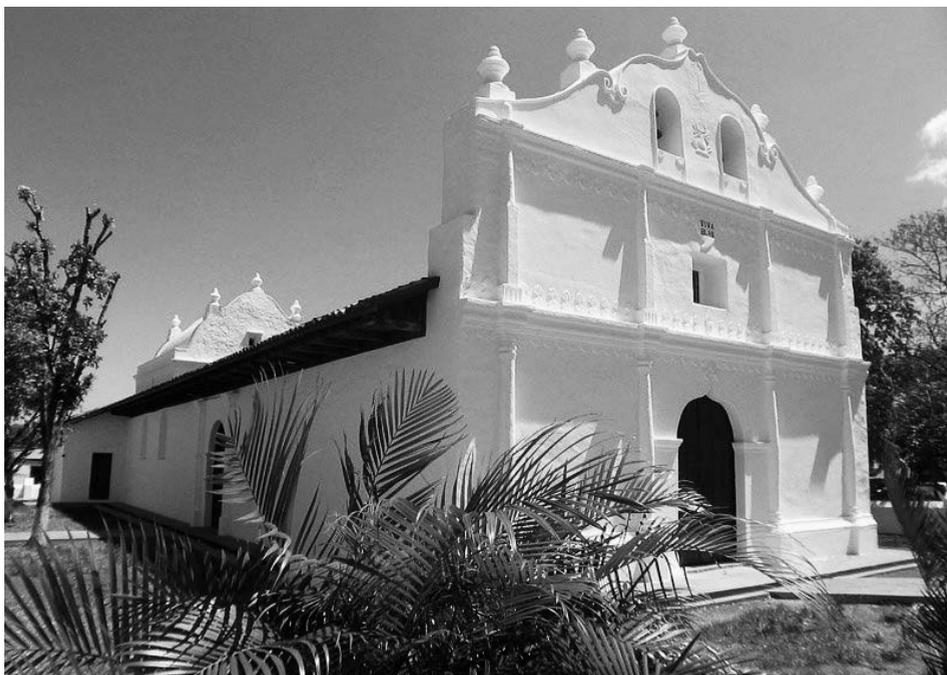


Figura 8.1. Chiesa di Nicoya

Eliminazione dei cinematismi di ribaltamento fuori dal piano della muratura del prospetto principale della Chiesa

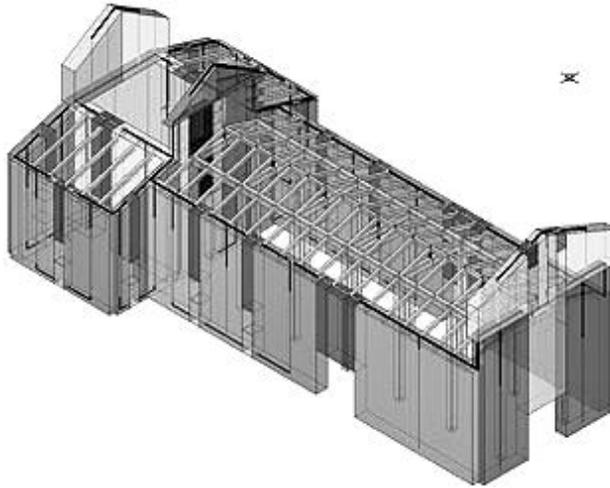


Figura 8.2. *Schema chiesa di Nicoya*

Per eliminare i cinematismi di ribaltamento fuori dal piano della muratura del prospetto principale della Chiesa risulta necessario compensare completamente la carenza di resistenza a flessione della muratura ed incrementare la resistenza a taglio applicando, in direzione orizzontale e verticale, su entrambi i lati della muratura, tessuto in fibra di aramide al fine del rinforzo a flessione ed a taglio.

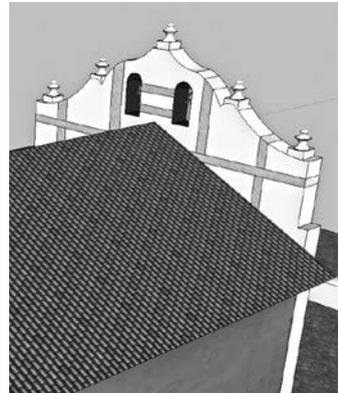


Figura 8.3. *Schema prospetto principale chiesa di Nicoya*

Rinforzo dell'arco presente nella parte centrale della Chiesa e della muratura sovrastante

Per aumentare la resistenza meccanica dell'arco presente nella muratura centrale della Chiesa è proposto di disporre, lungo tutto l'arco, al suo intradosso, un rinforzo con AFRP, che viene collegato alla muratura mediante l'utilizzo di connettori in AFRP.

PARTICOLARI COSTRUTTIVI

Nel seguito vengono riportati alcuni particolari costruttivi di interventi realizzabili mediante l'uso di materiali compositi FRP.

9.1. Rinforzo a flessione trave in c.a.-carbonio

Intervento di rinforzo a flessione di trave in c.a mediante tessuto unidirezionale in fibra di carbonio (Figura 9.1) e mediante lamina pultrusa in fibra di carbonio (Figura 9.2).



Figura 9.1. Rinforzo a flessione trave in c.a. mediante tessuto unidirezionale in fibra di carbonio

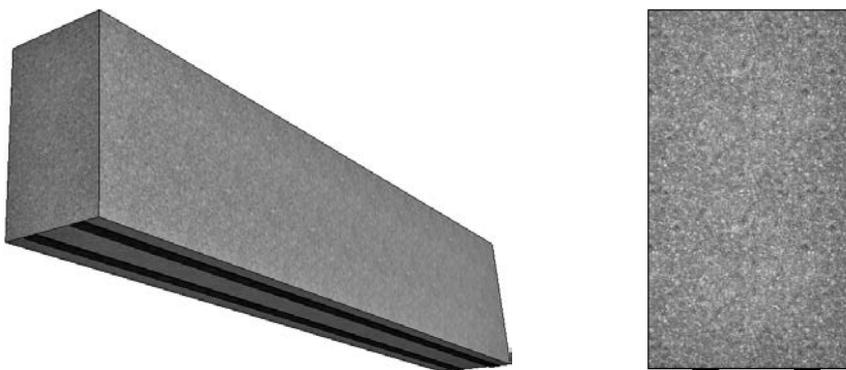


Figura 9.2. Rinforzo a flessione trave in c.a. mediante lamine pultruse in fibra di carbonio

9.2. Rinforzo a taglio trave in c.a.-carbonio

Intervento di rinforzo a taglio di trave in c.a mediante tessuto unidirezionale in fibra di carbonio disposto ad U (Figura 9.3) ed in avvolgimento (Figura 9.4).

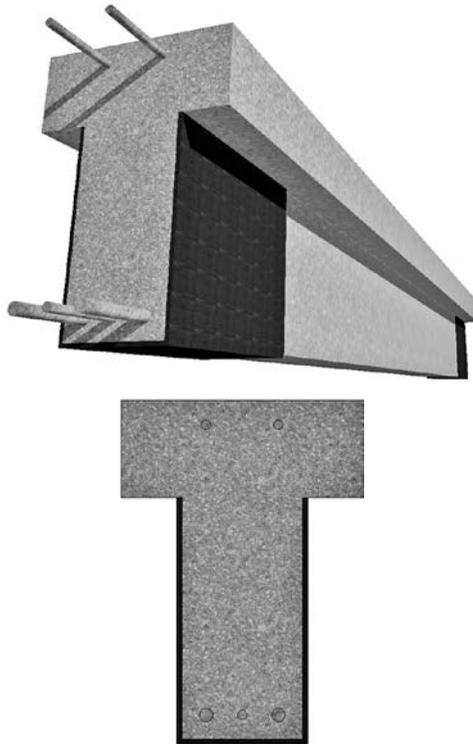


Figura 9.3. *Rinforzo a taglio ad U trave in c.a. mediante tessuto unidirezionale in fibra di carbonio*

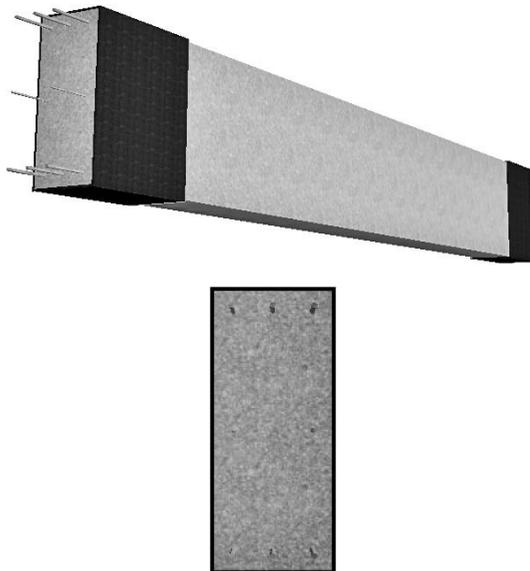


Figura 9.4. *Rinforzo a taglio in avvolgimento trave in c.a. mediante tessuto unidirezionale in fibra di carbonio*

INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE INCLUSO

Note sul software incluso

Il software incluso¹ gestisce i seguenti modelli per la verifica ed il collaudo in cantiere di sistemi FRP per il rinforzo strutturale, a cura del Direttore dei Lavori e del Collaudatore:

- Accettazione in cantiere sistemi di consolidamento FRP – Sistema di rinforzo preformato (Direttore dei Lavori);
- Accettazione in cantiere sistemi di consolidamento FRP – Sistema di rinforzo realizzato in situ (Direttore dei Lavori);
- Collaudo sistemi di consolidamento FRP – Supporto strutture in c.a. (Collaudatore);
- Collaudo sistemi di consolidamento FRP – Supporto strutture in muratura (Collaudatore).

Utilità disponibili con il software:

- **Glossario** (principali termini tecnico-normativi);
- **F.A.Q.** (domande e risposte più frequenti);
- **Test iniziale** (verifica della formazione di base);
- **Test finale** (verifica dei concetti analizzati).

Requisiti hardware e software

- Processore da 2.00 GHz;
- MS Windows Vista/7/8/10 (è necessario disporre dei privilegi di amministratore);
- MS .Net Framework 4 e vs. successive;
- 250 MB liberi sull'HDD;
- 2 GB di RAM;
- MS Word 2007 e vs. successive;
- Accesso ad internet e browser web.

Download del software e richiesta della password di attivazione

1) Collegarsi al seguente indirizzo internet:

http://www.grafill.it/pass/917_8.php

2) Inserire i codici “A” e “B” (vedi ultima pagina del volume) e cliccare [**Continua**].

3) **Per utenti registrati** su www.grafill.it: inserire i dati di accesso e cliccare [**Accedi**], accettare la licenza d'uso e cliccare [**Continua**].

¹ Il software incluso è parte integrante della presente pubblicazione e resterà disponibile nel menu **G-cloud** dell'area personale del sito www.grafill.it.

- 4) **Per utenti non registrati** su www.grafill.it: cliccare su **[Iscriviti]**, compilare il form di registrazione e cliccare **[Iscriviti]**, accettare la licenza d'uso e cliccare **[Continua]**.
- 5) Un **link per il download del software** e la **password di attivazione** saranno inviati, in tempo reale, all'indirizzo di posta elettronica inserito nel form di registrazione.

Installazione ed attivazione del software

- 1) Scaricare il setup del software (file *.exe) cliccando sul link ricevuto per e-mail.
- 2) Installare il software facendo doppio-click sul file **88-8207-918-5.exe**.
- 3) Avviare il software:

Per utenti MS Windows Vista/7/8: **[Start]** > **[Tutti i programmi]** > **[Grafill]**
> **[Direzione e collaudo FRP]** (cartella) > **[Direzione e collaudo FRP]** (icona di avvio)

Per utenti MS Windows 10: **[Start]** > **[Tutte le app]** > **[Grafill]**
> **[Direzione e collaudo FRP]** (icona di avvio)

- 4) Compilare la maschera *Registrazione Software* e cliccare su **[Registra]**.
- 5) Dalla finestra *Starter* del software sarà possibile accedere alle utilità disponibili.



BIBLIOGRAFIA, NORMATIVE E SITI WEB

- Brigante D., *Rinforzo Strutturale con materiali compositi*, I Ed., Grafill, 2012
- Crivelli Visconti I., G. Caprino, A. Langella, *Materiali Compositi Tecnologie – Progettazione – Applicazioni*, Hoepli
- Crivelli Visconti et al., *Tecnologie di produzione meccanica*, Edizioni Cremonese, 1976
- Crivelli Visconti I., *Materiali Compositi. Tecnologie e progettazione*, Tamburini Editore, Milano, 1985
- D’Aprile M., Brigante D., Biccò M., *Criteri, prestazioni e criticità dei materiali compositi fibrorinforzati nel consolidamento di strutture lignee tradizionali in elementi grezzi*
- Brigante D., Crivelli Visconti I., Cigliano C., *Studio e Sperimentazione di un composito a matrice cementizia per rinforzo strutturale «Nono Convegno AITeM», tenutosi a Torino 07-09 settembre 2009»*
- Teseleano G., Brigante D., Cigliano C., De Leo G., Renzulli L., *Innovative Systems in Structural Engineering for Civil and Medical Construction – Composite Materials*, «Project Proposal for International R&D Cooperation Programmes: Opportunities for Collaboration in Energy and Water Treatment», Roma 14 ottobre 2010
- Balsamo A., Colombo A., Manfredi G., Negro P., Prota A., *Seismic behavior of a full-scale RC frame repaired using CFRP laminates*
- Ascione L., Berardi V.P., Feo L., Mancusi G., *Il calcolo delle interazioni nel placcaggio di strutture in C.A. mediante lamine in frp*, Aimeta ‘01
- Brigante D., *Rinforzo Strutturale con materiali compositi*, II Ed., Grafill, 2013
- Manfredi G., Realfonzo R., *Modellazione del comportamento di elementi presso-inflessi in c.a. confinati con tessuti in materiale composito*
- Schwarz M.M., *Composite Materials Handbook*, McGraw Hill, Inc., New York, 1992
- Bagwan D. Agarwal, Lawrence J. Broutman, *Analysis and performance of fiber composites*, John Wiley & Sons, New York, 1980
- Bathe K.J., *Numerical Methods in Finite Element Analysis*, Prentice-Hall, 1976
- Zienkiewicz O.C., *The Finite Element Method in Engineering Science*, vol. I-II-III, Mc Graw-Hill
- D’Aprile M., Brigante D., Biccò M., *Governare l’Innovazione: processi, strutture, materiali & tecnologie tra passato e futuro*, Convegno scienza e beni culturali, ed. Arcadia ricerche, 2011
- Barnes F., *Composites Reinforcement of Steel Structural Members*, *Proceedings of Institute of Mechanical Engineers seminar*, London, 17 November 1994
- Cigliano C., Crivelli Visconti I., Brigante D., De la Feld M., *Innovations in Elements for High Speed Trains Pantographs*, *Proceedings International Conference – Advancing with Composites 2005 AMME-Asmeccanica*, Naples 11-14 October 2005
- Brigante D., *New Composite Materials: Selection, Design, and Application*, Springer, 2013
- Capozucca R., Cerri M.N., Zannarini G., *Resistenza a taglio di murature con blocchi in laterizio*, in *Costruire in laterizio*, n. 84 Nov/Dic. 2001

- Castellani A., Benedetti B., Castaldi A., Faccioli E., Grandori G., Nova R., *Costruzioni in zona sismica*, Masso Italia Editori, Milano, 1981
- Crivelli Visconti I., D'Aprile M., Brigante D., Cigliano C., *Marble sculptures FRP-based reinstating and consolidating practices*, HERITAGE and TECHNOLOGY Mind Knowledge Experience, Le Vie dei Mercanti – XIII Forum Internazionale di Studi
- Marra A., Brigante D., Fabbrocino G., *Safe Monuments 2014*, Convegno scienza e beni culturali, ed. Arcadia ricerche
- Brigante D., *Rinforzi innovativi di strutture in legno con materiali compositi FRP*, Grafill, 2013
- Valluzzi M.R., Tinazzi D., Modena C., *Prove a taglio su elementi murari rinforzati con tessuti in FRP*, Atti Convegno Nazionale Meccanica delle strutture in muratura rinforzate con FRP-materials, IUAV, Venezia, 7-8 dicembre 2000, Ed. Libreria Cortina, Padova

NORMATIVE

- CNR-DT 200-2004 – *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati – Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie*
- CNR-DT 200 R1-2013 – *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati – Materiali, strutture di c.a. e di c.a.p., strutture murarie*
- *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* – Assemblea Generale Consiglio Superiore dei lavori Pubblici
- *Linee guida per la riparazione e il rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni* – Dipartimento Protezione Civile / ReLUIS
- *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* – Assemblea Generale Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici
- *Linee Guida per l'applicazione al patrimonio culturale della normativa tecnica di cui all'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274/2003*

SITI WEB

- www.olympus-frp.com
- www.euro-composites.com
- www.plymouth.ac.uk
- www.espci.fr
- www.wikipedia.it
- www.basaltech.it
- www.kimia.it
- www.cadfil.com
- www.pointblankenterprises.com

