

FRANCESCO FOCACCI

# **RINFORZO DELLE MURATURE CON MATERIALI COMPOSITI**

**PROGETTAZIONE – CALCOLO – ESEMPI APPLICATIVI**



### SERVIZI GRATUITI ON LINE

Questo libro dispone dei seguenti servizi gratuiti disponibili on line:

- filodiretto con gli autori
- le risposte degli autori a quesiti precedenti
- files di aggiornamento al testo e/o al programma allegato
- possibilità di inserire il proprio commento al libro.

L'indirizzo per accedere ai servizi è: [www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF8197](http://www.darioflaccovio.it/scheda/?codice=DF8197)

**Indice**

<b>Presentazione</b> .....	pag. IX
<b>Elenco dei simboli</b> .....	» XI
<b>1. Rinforzi di materiale composito</b>	
1.1. Generalità .....	» 1
1.2. Materiali di rinforzo .....	» 2
1.3. Istruzioni e normativa.....	» 9
1.4. Caratteristiche meccaniche di calcolo .....	» 10
<b>2. Aspetti generali del rinforzo delle murature con materiali compositi</b>	
2.1. Criteri generali di rinforzo .....	» 13
2.1.1. Muratura non rinforzata .....	» 13
2.1.1.1. Esempi.....	» 18
2.1.1.2. Osservazioni .....	» 34
2.1.2. Muratura rinforzata .....	» 35
2.1.2.1. Esempi.....	» 42
2.2. Aderenza con il supporto .....	» 57
2.2.1. Applicazione delle formule .....	» 68
2.2.2. Osservazioni .....	» 70
<b>3. Rinforzo di pannelli murari</b>	
3.1. Aspetti generali .....	» 75
3.2. Pressoflessione .....	» 80
3.2.1. Muratura con legame costitutivo “elastoplastico” .....	» 82
3.2.1.1. Rottura lato muratura .....	» 83
3.2.1.2. Rottura lato rinforzo .....	» 85
3.2.1.3. Dominio di resistenza .....	» 87
3.2.2. Formulazione semplificata a “stress block” .....	» 88
3.2.2.1. Rottura lato muratura .....	» 89
3.2.2.2. Rottura lato rinforzo .....	» 91
3.2.2.3. Dominio di resistenza .....	» 92
3.2.3. Osservazioni .....	» 93
3.3. Taglio .....	» 96
3.3.1. Rinforzi nella direzione dello sforzo di taglio.....	» 96
3.3.1.1. Aste di parete tese (rinforzo) .....	» 98
3.3.1.2. Aste di parete compresse (muratura) .....	» 102
3.3.1.3. Applicazione delle formule.....	» 103
3.3.1.4. Osservazioni .....	» 105

3.3.2.	Rinforzi diagonali .....	»	107
3.3.2.1.	Osservazioni .....	»	110
3.4.	Esempi .....	»	112
3.4.1.	Rinforzo di un maschio murario per sollecitazioni nel piano .....	»	112
3.4.1.1.	Sezione di sommità .....	»	115
3.4.1.2.	Sezione di base .....	»	121
3.4.2.	Rinforzo di una fascia di piano per sollecitazioni nel suo piano .....	»	127
3.4.3.	Rinforzo della sezione di una volta .....	»	136
<b>4.</b>	<b>Rinforzo di strutture voltate</b>		
4.1.	Introduzione .....	»	141
4.2.	Rinforzi di estradosso e intradosso.....	»	141
4.2.1.	Delaminazione del rinforzo .....	»	142
4.2.2.	Altre considerazioni .....	»	144
4.3.	Estensione del rinforzo .....	»	145
4.3.1.	Rinforzo su una parte dell'estradosso .....	»	148
4.3.2.	Rinforzo su tutto l'estradosso .....	»	152
4.3.2.1.	Primo approccio .....	»	154
4.3.2.2.	Secondo approccio .....	»	157
4.3.2.3.	Terzo approccio.....	»	162
4.3.2.4.	Quarto approccio.....	»	164
4.3.3.	Osservazioni.....	»	168
4.4.	Verifica a taglio.....	»	169
4.5.	Presenza del rinfianco.....	»	171
4.6.	Azione del sisma.....	»	173
4.7.	Alcuni esempi.....	»	175
4.7.1.	Volta a botte soggetta a carichi verticali .....	»	175
4.7.1.1.	Definizione di geometria e carichi .....	»	176
4.7.1.2.	Portanza in condizione non rinforzata .....	»	177
4.7.1.3.	Portanza in condizione rinforzata .....	»	190
4.7.1.3.1.	Rinforzo di una parte dell'intradosso .....	»	190
4.7.1.3.2.	Rinforzo di tutto l'intradosso.....	»	201
4.7.2.	Volta a botte soggetta ad azione sismica .....	»	210
4.7.2.1.	Definizione di geometria e carichi.....	»	210
4.7.2.2.	Portanza in condizione non rinforzata .....	»	212
4.7.2.3.	Portanza in condizione rinforzata .....	»	223
4.7.3.	Sistema volta-piedritti soggetto a carichi verticali .....	»	233
4.7.3.1.	Definizione di geometria e carichi.....	»	234
4.7.3.2.	Portanza in condizione non rinforzata .....	»	238
4.7.3.3.	Portanza in condizione rinforzata .....	»	243
4.7.3.3.1.	Rinforzo dell'estradosso di un'imposta.....	»	243
4.7.3.3.2.	Rinforzo dell'estradosso di entrambe le imposte .....	»	248
4.7.3.3.3.	Rinforzo di una parte dell'intradosso .....	»	255
4.7.4.	Sistema volta-piedritti soggetto ad azione sismica .....	»	262
4.7.4.1.	Definizione di geometria e carichi.....	»	263
4.7.4.2.	Portanza in condizione non rinforzata .....	»	266
4.7.4.3.	Portanza in condizione rinforzata .....	»	273

---

4.7.4.3.1. Rinforzo di una parte dell'intradosso .....	»	273
4.7.4.3.2. Rinforzo di una parte dell'intradosso e di una parte dei piedritti.....	»	282
4.7.5. Volta ellittica soggetta ad azione sismica .....	»	287
4.7.5.1. Definizione di geometria e carichi.....	»	287
4.7.5.2. Portanza in condizione non rinforzata .....	»	290
4.7.5.3. Portanza in condizione rinforzata .....	»	296
4.7.5.3.1. Rinforzo di una parte dell'estradosso .....	»	296
4.7.5.3.2. Rinforzo di tutto l'estradosso .....	»	306
<b>Bibliografia .....</b>	<b>»</b>	<b>317</b>

## PRESENTAZIONE

Il presente testo di Francesco Focacci tratta con rigore scientifico i problemi della progettazione dei rinforzi delle strutture murarie con i materiali compositi.

Sono aspetti nuovi la cui letteratura scientifico-tecnica è ancora presente in gran parte su canali specialistici e questo testo ha il grande merito di stabilire un ponte fra ricerca scientifica ed esigenze della pratica progettuale.

I materiali compositi a matrice polimerica ed armatura di fibre continue ad alto modulo hanno fatto il loro ingresso nella pratica tecnica del rinforzo strutturale delle murature storiche circa dieci anni fa, quando dopo il sisma dell'Umbria le tecnologie FRP (*Fiber Reinforced Polymers*) erano già disponibili per le prime esperienze fatte con il rinforzo del conglomerato cementizio armato.

Da allora molta strada è stata fatta con la comparsa delle istruzioni CNR specifiche e l'utilizzo di nuove tipologie di compositi a matrice cementizia modificata da polimero dette FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*).

Le conoscenze nel settore dei rinforzi delle murature sono in Italia molto avanzate per la contemporanea evenienza della sussistenza del grande patrimonio architettonico storico monumentale e del rischio sismico molto diffuso nel nostro territorio. D'altra parte il livello tecnologico del nostro paese consente di assumere una posizione leader in campo internazionale. Molte Soprintendenze ai beni architettonici hanno cautamente ormai accettato la tecnica del rinforzo delle murature con compositi, con la tecnologia FRP e più recentemente con la tecnologia FRCM.

Nel presente volume la tematica è anche trattata con le più recenti concezioni di meccanica strutturale che tengono in conto i meccanismi di collasso a fronte della potenziale funzione inibitoria sostenuta dai compositi.

La notevole esperienza acquisita dall'autore nel Laboratorio di Scienza delle Costruzioni della Università IUAV di Venezia ha consentito allo stesso di proporre una visione concreta e pratica del comportamento della muratura rinforzata con compositi.

L'apporto di conoscenze offerto dall'autore nel settore è di grande spessore e potrà ben supportare i progettisti che si cimentano in questo nuovo campo.

Venezia, 10 maggio 2008

*Angelo Di Tommaso*

Presidente AICO (Associazione Italiana Compositi per le Costruzioni)

Direttore del LabSCo (Laboratorio di Scienza delle Costruzioni)

Università IUAV di Venezia

## ELENCO DEI SIMBOLI

**Nota.** Nei casi in cui a due diversi simboli è associata la stessa descrizione e nei casi in cui lo stesso simbolo rappresenta quantità diverse, il contesto in cui i simboli sono utilizzati chiarisce la differenza.

### LATINO MAIUSCOLO

#### *A*

<i>A</i>	Rotazione della sezione di imposta di un arco o di una volta per effetto di una forza unitaria applicata
<i>A<sub>f</sub></i>	Sezione di fibre in un rinforzo a flessione
<i>A<sub>fv</sub></i>	Sezione di fibre in un rinforzo a taglio

#### *B*

<i>B</i>	Larghezza di una sezione di muratura
<i>B</i>	Rotazione della sezione di imposta di un arco o di una volta per effetto di un momento flettente unitario applicato alla sezione di imposta

#### *C*

<i>C</i>	Insieme delle posizioni delle cerniere che costituiscono un meccanismo di collasso cinematicamente ammissibile per una struttura non rinforzata
<i>C</i>	Generica risultante di compressione
<i>C<sub>R</sub></i>	Insieme delle posizioni delle cerniere che costituiscono un meccanismo di collasso cinematicamente ammissibile per una struttura rinforzata

#### *E*

<i>E<sub>f</sub></i>	Modulo elastico a trazione in direzione delle fibre di un materiale composito
<i>E<sub>m</sub></i>	Modulo elastico della muratura

#### *F*

<i>F</i>	Generica forza applicata
<i>F<sub>f</sub></i>	Massima forza di trazione in un rinforzo (forza di rottura o di delaminazione)
<i>F<sub>fd</sub></i>	Resistenza a trazione di calcolo (forza) di un rinforzo (forza di rottura o di delaminazione)
<i>F<sub>fi</sub></i>	Forza di trazione in una certa sezione di rinforzo ( $i = 1, 2, 3$ )

---

$F_{fpd}$	Forza di trazione di calcolo che produce la delaminazione di un rinforzo dal supporto su una superficie curva
$F(\gamma)$	Forza di trazione nel rinforzo nella sezione identificata da $\gamma$
<hr/>	
<i>H</i>	
$H$	Altezza di un edificio
$H$	Altezza di un pannello murario
$H$	Reazione vincolare orizzontale
$H_A$	Reazione vincolare orizzontale per il punto $A$
$H_B$	Reazione vincolare orizzontale per il punto $B$
$H_d$	Reazione vincolare orizzontale
$H_i$	Altezza di un piedritto
$H_{max}(R_{vs})$	Reazione orizzontale che produce il ribaltamento di un piedritto (si evidenzia la dipendenza da $R_{vs}$ )
$H_p$	Quota di imposta di una volta dallo spiccatto di fondazione
$H_s$	Reazione vincolare orizzontale
<hr/>	
<i>L</i>	
$L$	Generica lunghezza di incollaggio di un materiale composito
$L$	Altezza della sezione di un pannello di muratura
$L_c$	Lavoro virtuale compiuto da un rinforzo
$L_{eff}$	Lunghezza di trasferimento efficace
$L_F$	Lavoro virtuale compiuto dalla generica forza $F$
$L_{pp}$	Lavoro virtuale compiuto dal peso proprio di una struttura
$L_q$	Lavoro virtuale compiuto dal generico carico $q$
$L_{rp}$	Lunghezza di un connettore (proiezione sulla verticale)
$L_v$	Lavoro virtuale (totale)
<hr/>	
<i>M</i>	
$M$	Momento flettente
$M_O(\chi, x)$	Momento delle tensioni di compressione su una sezione rispetto al baricentro (si evidenzia la dipendenza da $\chi$ e da $x$ )
$M_{Rd}$	Momento resistente di calcolo di una sezione di muratura rinforzata
$M_{Rdb}$	Momento resistente di calcolo della sezione di base di un pannello rinforzato
$M_{Rd}(N_{sd})$	Momento resistente di calcolo di una sezione di muratura rinforzata (si evidenzia la dipendenza da $N_{sd}$ )
$M_{Rd}^\infty$	Momento resistente di calcolo di una sezione di muratura rinforzata sotto l'ipotesi di resistenza e rigidezza a compressione infinite della muratura
$M_{Rd}^\infty(N)$	Momento resistente di calcolo di una sezione di muratura rinforzata sotto l'ipotesi di resistenza e rigidezza a compressione infinite della muratura (si evidenzia la dipendenza da $N$ )
$M_{Rd}^\infty(N(\gamma))$	Momento resistente di calcolo di una sezione di muratura rinforzata sotto l'ipotesi di resistenza e rigidezza a compressione infinite della muratura (si evidenzia la dipendenza da $N$ e da $\gamma$ )

---

$M_{Sd}$	Momento sollecitante di calcolo in una sezione di muratura
$M_{Sdv}$	Momento sollecitante di calcolo nella sezione identificata da $\gamma_v$
$M_v$	Momento flettente valutato rispetto all'estradosso nella sezione identificata da $\gamma_v$
$M_x(\chi, x)$	Momento delle tensioni di compressione su una sezione rispetto all'asse neutro (si evidenzia la dipendenza da $\chi$ e da $x$ )
$M(z)$	Momento flettente (si evidenzia la dipendenza dall'ascissa $z$ )
$M(\gamma)$	Momento flettente valutato rispetto all'estradosso (si evidenzia la dipendenza dal parametro $\gamma$ )
$M_0$	Momento flettente all'imposta di un arco o di una volta (incognita iperstatica)
$M^\infty$	Massimo momento flettente in una sezione rinforzata, considerando la muratura infinitamente rigida e resistente a compressione
$M^*$	Massa partecipante
<hr/>	
$N$	
$N$	Sforzo normale
$N_f$	Sforzo normale nelle aste tese di parete dell'ideale traliccio resistente a taglio
$N_m$	Sforzo normale nelle aste compresse di parete dell'ideale traliccio resistente a taglio
$N_{Rd}$	Sforzo normale resistente di calcolo di una sezione di muratura rinforzata
$N_{Rdf}$	Sforzo normale di rottura delle aste tese di parete dell'ideale traliccio resistente a taglio
$N_{Rdm}$	Sforzo normale di rottura delle aste compresse di parete dell'ideale traliccio resistente a taglio
$N_{Sd}$	Sforzo normale sollecitante di calcolo in una sezione di muratura
$N_{Sdb}$	Sforzo normale sollecitante di calcolo nella sezione di base di un pannello
$N_{Sdv}$	Sforzo normale sollecitante di calcolo nella sezione identificata da $\gamma_v$
$N_{Sd}(z)$	Sforzo normale sollecitante di calcolo di una sezione di muratura (si evidenzia la dipendenza dall'ascissa $z$ )
$N_{Sd}(\gamma)$	Sforzo normale sollecitante di calcolo di una sezione di muratura (si evidenzia la dipendenza dal parametro $\gamma$ )
$N_v$	Sforzo normale nella sezione identificata da $\gamma_v$
$N(x)$	Sforzo normale nel rinforzo (si evidenzia la dipendenza dall'ascissa $x$ )
$N(z)$	Sforzo normale (si evidenzia la dipendenza dall'ascissa $z$ )
$N(\gamma)$	Sforzo normale (si evidenzia la dipendenza dal parametro $\gamma$ )
<hr/>	
$P$	
$P$	Peso di un pannello murario
$P$	Generica forza di trazione applicata ad un rinforzo
$P_d(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ la risultante del carico sulla parte di struttura identificata da $\gamma$
$P_{db}$	Forza di trazione che produce la delaminazione del rinforzo dal supporto
$P_{db}(L)$	Forza di trazione che produce la delaminazione del rinforzo dal supporto (si evidenzia la dipendenza da $L$ )
$P_{d,db}$	Valore di calcolo della massima forza di trazione che produce la delaminazione del rinforzo dal supporto

---

$P_{d,dbv}$	Valore di calcolo della massima forza di trazione che produce la delaminazione del rinforzo a taglio dal supporto
$P_{d,dbL}(L)$	Valore di calcolo della forza di trazione che produce la delaminazione del rinforzo dal supporto (si evidenzia la dipendenza da $L$ )
$P_{di}$	Risultante del carico distribuito su una parte di arco o di volta ( $i = 1, 2, 3$ )
$P_i$	Peso di una parte di un arco o di una struttura di muratura ( $i = 1, 2, 3$ )
$P_p$	Peso di un piedritto
$P_{ps}$	Peso di un piedritto
$P_{rini}$	Peso di rinfiacco su un concio di un arco o di una volta di muratura ( $i = 1, 2, 3$ )
$P_{rin}(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ il peso di rinfiacco sulla parte di struttura identificata da $\gamma$
$P_{ta}$	Peso totale delle masse di una struttura coinvolte in un meccanismo di collasso
$P_{td}$	Risultante del carico distribuito coinvolto in un meccanismo di collasso
$P_{trin}$	Peso totale delle masse del rinfiacco coinvolte in un meccanismo di collasso
$P_{tot}$	Peso totale delle masse coinvolte in un meccanismo di collasso
$P_{u,db}$	Massima forza di delaminazione dal supporto
$P_v$	Peso di una volta
$P(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ il peso della parte di struttura identificata da $\gamma$

---

**R**

$R$	Raggio di curvatura di una superficie
$R_c$	Risultante di compressione su una sezione di muratura rinforzata
$R_c(x)$	Risultante di compressione su una sezione di muratura rinforzata (si evidenzia la dipendenza da $x$ )
$R_c(\chi, x)$	Risultante di compressione su una sezione di muratura rinforzata (si evidenzia la dipendenza da $\chi$ e da $x$ )
$R_c(\gamma)$	Risultante di compressione su una sezione di muratura rinforzata (si evidenzia la dipendenza dal parametro $\gamma$ )
$R_e$	Raggio dell'estradosso di un arco o di una volta
$R_i$	Raggio dell'intradosso di un arco o di una volta
$R_t(x)$	Risultante di trazione su una sezione di muratura rinforzata (si evidenzia la dipendenza da $x$ )
$R_t(\chi, x)$	Risultante di trazione su una sezione di muratura rinforzata (si evidenzia la dipendenza da $\chi$ e da $x$ )
$R_v$	Reazione vincolare verticale
$R_{vs}$	Reazione vincolare verticale (vincolo a sinistra)
$R_{vd}$	Reazione vincolare verticale (vincolo a destra)
$R_{v1}$	Reazione vincolare verticale (cerniera 1)
$R_{v4}$	Reazione vincolare verticale (cerniera 4)
$R_x$	Raggio di una volta ellittica, direzione $x$
$R_y$	Raggio di una volta ellittica, direzione $y$

---

**S**

$S$	Fattore che tiene conto del tipo di suolo
-----	---

***T****T* Generica risultante di trazione***V*** $V_A$  Reazione vincolare verticale per il punto *A* $V_B$  Reazione vincolare verticale per il punto *B* $V_{Rd}$  Taglio resistente di calcolo di una sezione di muratura $V_{Rdb}$  Taglio resistente di calcolo della sezione di base di un pannello di muratura $V_{Rdf}$  Taglio che produce la rottura delle aste di parete tese dell'ideale traliccio resistente a taglio $V_{Rdm}$  Contributo della muratura alla resistenza a taglio $V_{Rdmax}$  Taglio che produce la rottura delle aste di parete compresse dell'ideale traliccio resistente a taglio $V_{Rd}(\gamma)$  Taglio resistente di calcolo di una sezione di muratura (si evidenzia la dipendenza dal parametro  $\gamma$ ) $V_{Sd}$  Taglio sollecitante di calcolo in una sezione di muratura $V_{Sdb}$  Taglio sollecitante di calcolo nella sezione di base di un pannello $V(\gamma)$  Taglio (si evidenzia la dipendenza dal parametro  $\gamma$ )***Z****Z* Distanza del baricentro delle masse coinvolte in un meccanismo di collasso dallo spiccato di fondazione**LATINO MINUSCOLO*****a*** $a_g$  Accelerazione sismica $a_s$  Domanda di accelerazione spettrale $a_0$  Accelerazione spettrale di attivazione di un meccanismo di collasso***b*** $b_f$  Larghezza di un rinforzo di materiale composito $b_{1f}$  Larghezza di un singolo elemento di rinforzo di materiale composito***c*** $c_1$  Coefficiente per la valutazione dell'energia di frattura dell'interfaccia***d*** $d$  Distanza del baricentro della sezione di un rinforzo dal lembo compresso di una sezione $d_c$  Distanza dal lembo compresso della risultante di compressione in una sezione di muratura***e*** $e$  Eccentricità dello sforzo normale nella pressoflessione retta

$e_{max}$	Massima eccentricità possibile per un dato sforzo normale
$e_{Rd}^{\infty}$	Valore di calcolo della massima eccentricità dello sforzo normale in una sezione rinforzata, considerando la muratura infinitamente rigida e resistente a compressione
$e_{Rd}^{\infty}(\gamma)$	Valore di calcolo della massima eccentricità dello sforzo normale in una sezione rinforzata, considerando la muratura infinitamente rigida e resistente a compressione (si evidenzia la dipendenza dal parametro $\gamma$ )
$e_{Sd}$	Eccentricità dello sforzo normale sollecitante di calcolo
$e_{Sdb}$	Eccentricità dello sforzo normale sollecitante di calcolo sulla sezione di base di un pannello
$e(z)$	Eccentricità dello sforzo normale (si evidenzia la dipendenza dall'ascissa $z$ )
$e(\gamma)$	Eccentricità dello sforzo normale (si evidenzia la dipendenza dal parametro $\gamma$ )
$e^{\infty}$	Massima eccentricità dello sforzo normale in una sezione rinforzata, considerando la muratura infinitamente rigida e resistente a compressione
$e^*$	Frazione di massa partecipante

**f**

$f_b$	Massima tensione tangenziale di interfaccia
$f_{d,db}$	Tensione di trazione di calcolo che produce il distacco del composito dal supporto nel caso di delaminazione di estremità
$f_{fd}$	Resistenza di calcolo di un rinforzo di materiale composito (rottura o delaminazione)
$f_{fdm}$	Tensione di trazione di calcolo che produce il distacco del composito dal supporto nel caso di delaminazione intermedia
$f_{fk}$	Resistenza a trazione caratteristica di un materiale composito (in direzione delle fibre)
$f_{fpd}$	Tensione di trazione di calcolo che produce il distacco di un rinforzo di materiale composito dal supporto su una superficie curva nel caso di delaminazione di estremità
$f_{fpdm}$	Tensione di trazione di calcolo che produce il distacco di un rinforzo di materiale composito dal supporto su una superficie curva nel caso di delaminazione intermedia
$f_{fRd}$	Resistenza a trazione di calcolo di un materiale composito (in direzione delle fibre)
$f_{fu}$	Tensione di rottura a trazione di un materiale composito (in direzione delle fibre)
$f_i$	Freccia di una volta
$f_m$	Resistenza a compressione della muratura
$f_{mbd}$	Resistenza a compressione della muratura in direzione delle aste diagonali compresse dell'ideale traliccio resistente a taglio
$f_{md}$	Resistenza a compressione di calcolo della muratura
$f_{mk}$	Resistenza a compressione caratteristica della muratura
$f_{mtd}$	Resistenza a trazione di calcolo della muratura
$f_{mtm}$	Resistenza a trazione dei blocchi costituenti una muratura (valore medio)

---

$f_{u,db}$	Tensione di trazione che produce la delaminazione del composito dal supporto
$f_{vd}$	Valore di calcolo della resistenza a taglio della muratura
$f_{vd,db}$	Tensione di trazione di calcolo che produce la delaminazione di un rinforzo a taglio di materiale composito dal supporto
$f_{vd0}$	Valore di calcolo della resistenza a taglio della muratura in assenza di sforzo normale
$f_{vk}$	Valore caratteristico della resistenza a taglio della muratura
$f_{vk0}$	Valore caratteristico della resistenza a taglio della muratura in assenza di sforzo normale
$f_0$	Minima tensione tangenziale di interfaccia che produce scorrimento rispetto al supporto
<hr/>	
$h$	
$h_{rim}(\gamma)$	Altezza di rinfiango sopra la sezione identificata da $\gamma$
$h_{rm}$	Altezza di rinfiango sopra la sezione di chiave
<hr/>	
$i$	
$i_f$	Interasse tra i singoli elementi di rinforzo di materiale composito
<hr/>	
$k$	
$k$	Rapporto tra deformazione alla fine del ramo elastico e deformazione ultima della muratura
$k_{cr}$	Coefficiente di delaminazione intermedia
$k_j$	Rapporto tra due rotazioni relative tra conci di archi o volte di muratura
<hr/>	
$n$	
$n$	Rapporto tra modulo elastico del rinforzo e modulo elastico della muratura
$n_{st}$	Numero di strati di materiale composito
<hr/>	
$p$	
$p_d$	Valore di progetto di un carico uniformemente distribuito
$p_f$	Peso di fibre in un materiale composito per unità di superficie di materiale
$p_f$	Interasse dei rinforzi a taglio
$p_{ft}$	Peso totale di fibre in un materiale composito bidirezionale, per unità di superficie di materiale
$p_{fx}$	Peso delle fibre in direzione $x$ in un materiale composito bidirezionale, per unità di superficie di materiale
$p_{fy}$	Peso delle fibre in direzione $y$ in un materiale composito bidirezionale, per unità di superficie di materiale
<hr/>	
$q$	
$q$	Generico carico distribuito (per unità di lunghezza o per unità di superficie)
$q$	Fattore di struttura
<hr/>	
$s$	
$s$	Spessore di un arco o di una volta

---

$s$	Scorrimento all'interfaccia tra rinforzo e supporto
$s_F$	Scorrimento tra rinforzo e supporto all'estremo libero del rinforzo
$s_L$	Scorrimento tra rinforzo e supporto all'estremo caricato del rinforzo
$s_{pd}$	Spessore di un piedritto
$s_{ps}$	Spessore di un piedritto
$s_v$	Spessore di una volta
$s(x)$	Scorrimento all'interfaccia tra rinforzo e supporto (si evidenzia la dipendenza da $x$ )
$s(\gamma)$	Spessore di un arco o di una volta (si evidenzia la dipendenza dal parametro $\gamma$ )
$s_1$	Scorrimento corrispondente alla tensione tangenziale massima
$s_2$	Scorrimento corrispondente alla tensione tangenziale nulla
<hr/>	
$t$	
$t$	Spessore della sezione di un pannello di muratura
$t_f$	Spessore nominale di un materiale composito
$t_{fv}$	Spessore nominale di un rinforzo a taglio di materiale composito
$t_{fx}$	Spessore nominale di un materiale composito bidirezionale, relativo alle fibre parallele all'asse $x$
$t_{fy}$	Spessore nominale di un materiale composito bidirezionale, relativo alle fibre parallele all'asse $y$
$t_{lf}$	Spessore nominale di un singolo strato di materiale composito
<hr/>	
$u$	
$u(\gamma)$	Distanza del centro di pressione dall'estradosso di un arco o di una volta, considerata positiva se il centro di pressione è sopra all'estradosso (si evidenzia la dipendenza dal parametro $\gamma$ )
$u_f(x)$	Spostamento di un punto di rinforzo giacente sull'interfaccia (si evidenzia la dipendenza da $x$ )
$u_m(x)$	Spostamento di un punto di muratura giacente sull'interfaccia (si evidenzia la dipendenza da $x$ )
$u_{Rd}^\infty$	Valore di calcolo della massima distanza del centro di pressione dall'estradosso di un arco o di una volta, considerata positiva se il centro di pressione è sopra all'estradosso nell'ipotesi di muratura con resistenza e rigidità a compressione infinite
$u_{Rd}^\infty(\gamma)$	Valore di calcolo della massima distanza del centro di pressione dall'estradosso di un arco o di una volta, considerata positiva se il centro di pressione è sopra all'estradosso nell'ipotesi di muratura con resistenza e rigidità a compressione infinite (si evidenzia la dipendenza dal parametro $\gamma$ )
$u_v$	Distanza del centro di pressione dall'estradosso in corrispondenza della sezione identificata da $\gamma_v$
<hr/>	
$x$	
$x$	Ascissa generica
$x$	Distanza dell'asse neutro dal lembo compresso in una sezione di muratura

---

$x_A$	Ascissa del punto $A$
$x_B$	Ascissa del punto $B$
$x_d(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ l'ascissa della risultante del carico applicato sulla parte di struttura identificata da $\gamma$
$x_{di}$	Ascissa della risultante del carico applicato su una parte di struttura di muratura ( $i = 1, 2, 3$ )
$x_e(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ l'ascissa dell'estradosso della sezione identificata da $\gamma$
$x_F$	Ascissa del punto di applicazione della generica forza $F$
$x_{gj}$	Ascissa del baricentro di una parte di struttura di muratura ( $i = 1, 2, 3$ )
$x_{grin}(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ l'ascissa baricentro del peso del rinfianco sulla parte di struttura identificata da $\gamma$
$x_g(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ l'ascissa del baricentro della parte di struttura identificata da $\gamma$
$x_{gp}$	Ascissa baricentro di un piedritto
$x_{gv}(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ l'ascissa del baricentro della parte di volta identificata da $\gamma$
$x_i$	Ascissa della posizione di una cerniera ( $i = 1, 2, 3, 4$ )
$x_i(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ l'ascissa dell'intradosso della sezione identificata da $\gamma$
$x_m(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ l'ascissa del baricentro della sezione identificata da $\gamma$
$x_p(\gamma)$	Ascissa del centro di pressione nella sezione identificata da $\gamma$
$x_{pd}$	Ascissa del baricentro di un piedritto
$x_{ps}$	Ascissa del baricentro di un piedritto
$x_{rini}$	Ascissa del baricentro del rinfianco su una parte di arco o di volta ( $i = 1, 2, 3$ )
$x_{2ass}$	Ascissa della posizione del centro di rotazione di un concio di un arco o di una volta
<hr/>	
$y$	Ordinata generica
$y_{di}$	Ordinata della risultante del carico applicato su una parte di struttura di muratura ( $i = 1, 2, 3$ )
$y_d(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ l'ordinata della risultante del carico applicato sulla parte di struttura identificata da $\gamma$
$y_e(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ l'ordinata dell'estradosso della sezione identificata da $\gamma$
$y_{gj}$	Ordinata del baricentro di una parte di struttura di muratura ( $i = 1, 2, 3$ )
$y_{gp}$	Ordinata baricentro di un piedritto
$y_{grin}(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ l'ordinata baricentro del peso del rinfianco sulla parte di struttura identificata da $\gamma$
$y_{gv}$	Ordinata baricentro di una volta
$y_g(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ l'ordinata del baricentro della parte di struttura identificata da $\gamma$

---

$y_i$	Ordinata della posizione di una cerniera ( $i = 1, 2, 3, 4$ )
$y_i(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ l'ordinata dell'intradosso della sezione identificata da $\gamma$
$y_m(\gamma)$	Funzione che associa al parametro $\gamma$ l'ordinata baricentro della sezione identificata da $\gamma$
$y_p(\gamma)$	Ordinata del centro di pressione nella sezione identificata da $\gamma$
$y_{rini}$	Ordinata del baricentro del rinfiango su una parte di arco o di volta ( $i = 1, 2, 3$ )
$y_{tot}$	Ordinata del baricentro delle masse coinvolte in un meccanismo di collasso
$y_{2ass}$	Ordinata della posizione del centro di rotazione di un concio di un arco o di una volta

---

$z$	
$z$	Ascissa che identifica la sezione di un pannello
$z$	Braccio della coppia interna

**GRECO MAIUSCOLO** $I$ 


---

$I_f$	Energia di frattura dell'interfaccia
$I_{fd}$	Valore di calcolo dell'energia di frattura dell'interfaccia

 $\Delta$ 


---

$\Delta x$	Dimensione della maglia del traliccio ideale resistente a taglio
------------	--

 $\theta$ 


---

$\theta$	Inclinazione delle aste di parete compresse nell'ideale traliccio resistente a taglio
----------	---

**GRECO MINUSCOLO** $\alpha$ 


---

$\alpha$	Coefficiente di forma del legame costitutivo a compressione della muratura
$\alpha$	Inclinazione di un rinforzo a taglio
$\alpha_c$	Coefficiente di riduzione dell'aderenza per effetto della curvatura della superficie

 $\beta$ 


---

$\beta$	Coefficiente di forma del legame costitutivo a compressione della muratura
---------	--

 $\gamma$ 


---

$\gamma$	Parametro che identifica la sezione di una struttura
$\gamma_d$	Valore del parametro $\gamma$ che identifica una sezione che delimita una parte di struttura in cui è applicato un carico distribuito
$\gamma_f$	Coefficiente parziale di sicurezza per la resistenza a trazione di un materiale composito

---

$\gamma_F$	Valore del parametro $\gamma$ che identifica la sezione sulla quale è applicata la forza $F$
$\gamma_{fd}$	Coefficiente parziale di sicurezza relativo alla delaminazione
$\gamma_{fibre}$	Peso specifico delle fibre di un materiale composito
$\gamma_{imp}$	Fattore di importanza
$\gamma_{in}$	Valore del parametro $\gamma$ che identifica la sezione di base di un piedritto
$\gamma_{ini}$	Valore del parametro $\gamma$ che identifica la sezione di imposta in un arco o di una volta
$\gamma_M$	Coefficiente parziale di sicurezza della muratura
$\gamma_m$	Peso specifico della muratura
$\gamma_{mini}$	Valore del parametro $\gamma$ per il quale il luogo dei centri di pressione è stazionario o ha la stessa derivata di $u_{Rd}^\infty(\gamma)$ , $i = 1, 2, 3$
$\gamma_p$	Valore del parametro $\gamma$ che identifica la sezione di imposta in un arco o di una volta
$\gamma_R$	Valore di $\gamma$ che identifica una sezione fino alla quale deve essere esteso un rinforzo
$\gamma_r$	Valore di $\gamma$ che identifica una sezione terminale di un rinforzo di materiale composito
$\gamma_r$	Valore del parametro $\gamma$ che identifica una sezione che delimita una parte di struttura in cui è applicato il rinfianco
$\gamma_{Rd}$	Coefficiente parziale di un modello di resistenza
$\gamma_{ri}$	Valore di $\gamma$ che identifica una sezione terminale di un rinforzo di materiale composito ( $i = 1, 2, 3, 4$ )
$\gamma_{rin}$	Peso specifico di un rinfianco
$\gamma_v$	Valore di $\gamma$ che identifica una sezione in cui l'eccentricità dello sforzo normale è massima o minima
$\underline{\gamma}$	Vettore contenente i valori del parametro $\gamma$ che identificano le sezioni in cui sono presenti le cerniere
<hr/>	
$\delta$	
$\delta_{di}$	Spostamento orizzontale del punto di applicazione della risultante di un carico applicato ( $i = 1, 2, 3$ )
$\delta_i$	Spostamento orizzontale di un punto generico (in genere baricentro di un cono di muratura, $i = 1, 2, 3$ )
$\delta_{rimi}$	Spostamento orizzontale del punto di applicazione del peso del rinfianco su una parte di struttura ( $i = 1, 2, 3$ )
<hr/>	
$\varepsilon$	
$\varepsilon_{d,db}$	Dilatazione di delaminazione di calcolo di un materiale composito
$\varepsilon_{fd}$	Dilatazione di calcolo di un rinforzo di materiale composito (rottura o delaminazione)
$\varepsilon_{fdv}$	Dilatazione di calcolo di un rinforzo a taglio di materiale composito
$\varepsilon_{fk}$	Dilatazione di rottura caratteristica di un materiale composito (in direzione delle fibre)
$\varepsilon_{fpd}$	Dilatazione di calcolo che produce il distacco di un rinforzo di materiale composito dal supporto su una superficie curva nel caso di delaminazione di estremità

---

$\varepsilon_{fpdm}$	Dilatazione di calcolo che produce il distacco di un rinforzo di materiale composito dal supporto su una superficie curva nel caso di delaminazione intermedia
$\varepsilon_{fRd}$	Dilatazione di rottura di calcolo di un materiale composito (in direzione delle fibre)
$\varepsilon_{fu}$	Dilatazione di rottura di un materiale composito (in direzione delle fibre)
$\varepsilon_m$	Deformazione della muratura al lembo compresso di una sezione
$\varepsilon_{mu}$	Deformazione ultima della muratura
$\varepsilon_{m0}$	Deformazione della muratura alla fine del ramo elastico
$\varepsilon_{u,db}$	Dilatazione del rinforzo che ne produce la delaminazione dal supporto
$\varepsilon_{vd,db}$	Dilatazione di delaminazione di calcolo di un rinforzo a taglio di materiale composito
$\varepsilon(x)$	Dilatazione del rinforzo (si evidenzia la dipendenza dall'ascissa $x$ )

 $\eta$ 


---

$\eta_a$	Fattore di conversione ambientale
$\eta_{di}$	Spostamento verticale del punto di applicazione della risultante di un carico applicato ( $i = 1, 2, 3$ )
$\eta_F$	Spostamento verticale del punto di applicazione della generica forza $F$
$\eta_i$	Spostamento verticale di un punto generico (in genere baricentro di un concio di muratura, $i = 1, 2, 3$ )
$\eta_{rini}$	Spostamento verticale del punto di applicazione del peso del rinfiacco su una parte di struttura ( $i = 1, 2, 3$ )

 $\lambda$ 


---

$\lambda$	Generico moltiplicatore di collasso per meccanismo
$\lambda_c$	Moltiplicatore di collasso per meccanismo relativo ad una struttura di muratura non rinforzata
$\lambda_{cR}$	Moltiplicatore di collasso per meccanismo relativo ad una struttura di muratura rinforzata
$\lambda_{sd}$	Moltiplicatore di progetto del carico accidentale
$\lambda_z$	Moltiplicatore di collasso per meccanismo (si evidenzia la dipendenza dall'ascissa $z$ )
$\lambda_{\underline{\gamma}}$	Generico moltiplicatore di collasso (si evidenzia la dipendenza da $\underline{\gamma}$ )

 $\mu$ 


---

$\mu$	Valore caratteristico del coefficiente di attrito della muratura
$\mu_d$	Valore di calcolo del coefficiente di attrito della muratura

 $\xi$ 


---

$\xi$	Rapporto tra la deformazione della muratura alla fine del ramo elastico e la dilatazione di calcolo del rinforzo
-------	--

 $\sigma$ 


---

$\sigma_b$	Tensione normale di interfaccia
------------	---------------------------------

---

$\sigma_{cn}$	Tensione normale media nella zona compressa della sezione di un pannello
$\sigma(x)$	Generica tensione normale nel rinforzo (si evidenzia la dipendenza da $x$ )
$\sigma_0$	Tensione normale media in una sezione di muratura
<hr/>	
$\tau$	Tensione tangenziale di interfaccia
$\tau_{max}$	Massima tensione tangenziale di interfaccia
$\tau(s)$	Tensione tangenziale di interfaccia (si evidenzia la dipendenza da $s$ )
$\tau(s(x))$	Tensione tangenziale di interfaccia (si evidenzia la dipendenza da $s$ e da $x$ )
$\tau(x)$	Tensione tangenziale di interfaccia (si evidenzia la dipendenza da $x$ )
<hr/>	
$\varphi$	Rotazione di un elemento di muratura
$\varphi_p$	Rotazione della sezione di imposta di un arco o di una volta per effetto del peso proprio
$\varphi_1$	Rotazione di un elemento di muratura
$\varphi_2$	Rotazione di un elemento di muratura
$\varphi_{21}$	Rotazione relativa tra due elementi di muratura connessi da una cerniera
$\varphi_{23}$	Rotazione relativa tra due elementi di muratura connessi da una cerniera
$\varphi_3$	Rotazione di un elemento di muratura
<hr/>	
$\chi$	Curvatura
<hr/>	
$\psi$	Inclinazione sull'orizzontale di una sezione di una struttura di muratura ( $i = 1, 2, 3, 4$ )
$\psi_R$	Inclinazione sull'orizzontale di una sezione fino alla quale deve essere esteso un rinforzo
$\psi_{ri}$	Inclinazione sull'orizzontale di una sezione in cui si ha un estremo di un rinforzo ( $i = 1, 2$ )
$\psi(\gamma)$	Inclinazione sull'orizzontale di una sezione di una struttura di muratura (si evidenzia la dipendenza dal parametro $\gamma$ )

# 1. RINFORZI DI MATERIALE COMPOSITO

## 1.1. GENERALITÀ

Dall'inizio degli anni Novanta le applicazioni di rinforzo di strutture con materiali compositi sono aumentate vertiginosamente sia per gli indubbi vantaggi offerti da questo tipo di materiali (efficacia degli interventi, rapidità di esecuzione, peso e ingombro contenutissimi), sia per l'aumento dell'offerta di prodotti sul mercato e conseguente diminuzione dei prezzi.

In generale, il rinforzo di una struttura si rende necessario in occasione di alcune circostanze, tra le quali le più frequenti sono:

- danneggiamento dovuto a un carico eccezionale (sisma, incendio, impatto, ecc.);
- necessità di aumento dei carichi permanenti o accidentali, per adeguamento normativo o cambio di uso della struttura;
- adeguamento o miglioramento sismico;
- degrado dei materiali, in particolare corrosione delle armature metalliche nelle strutture di calcestruzzo armato;
- errori di progettazione o di esecuzione (tipicamente, errata disposizione delle armature o scarsa qualità del conglomerato in strutture di calcestruzzo armato).

In Italia, la diffusione di interventi di rinforzo di strutture di muratura con materiali compositi è notevolmente aumentata negli ultimi anni, in particolare dopo il sisma che ha colpito l'Umbria e le Marche nel settembre del 1997. Nello stesso periodo, si assiste anche a un rapido incremento di studi sia di carattere teorico che sperimentale. Con specifico riferimento alle strutture di muratura, possono citarsi i seguenti interventi tipici di rinforzo con materiali compositi (figura 1.1):

- a) rinforzo di archi e volte, in particolare in presenza di azioni sismiche, carichi verticali concentrati o disposti in modo non simmetrico;

- b) rinforzo di pannelli murari per le sollecitazioni derivanti da azioni sismiche nel piano e fuori dal piano;
- c) rinforzo a compressione per confinamento di colonne murarie;
- d) realizzazione di cinturazioni di piano;
- e) realizzazione di collegamento tra i paramenti di murature a sacco;
- f) realizzazione o miglioramento del collegamento tra pannelli di muratura ortogonali.

Nei casi a), b), c) e d) il rinforzo consiste, in genere, nell'incollaggio di un prodotto bidimensionale di materiale composito sulla superficie dell'elemento da rinforzare (figura 1.1); nei casi e) ed f) è invece più frequente l'utilizzo di barre.

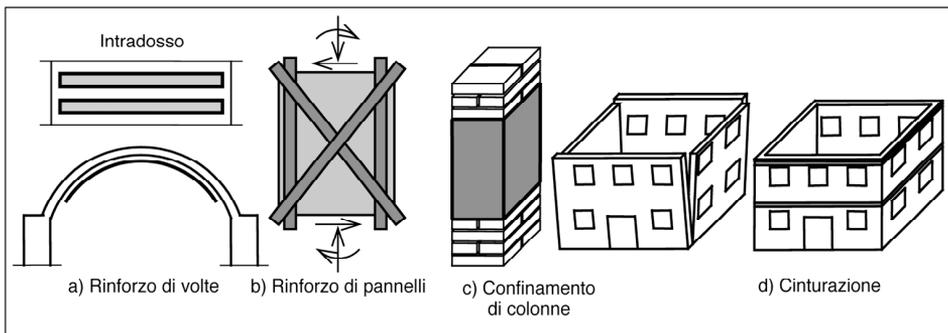


Figura 1.1

In questo testo vengono trattati in dettaglio gli aspetti della progettazione e del calcolo relativamente ai punti a) e b). Utili indicazioni relative agli altri interventi citati possono essere reperite ad esempio in [1], [2], [3], [4], [5].

## 1.2. MATERIALI DI RINFORZO

I prodotti di materiale composito comunemente utilizzati per il rinforzo delle strutture sono costituiti da *fibre* lunghe immerse in una fase continua, detta *matrice*. Le fibre sono dotate di elevate resistenza a trazione e rigidità assiale e costituiscono l'effettivo rinforzo degli elementi strutturali; la matrice deve invece garantire una uniforme distribuzione degli stati tensionali tra le singole fibre. In molti casi la matrice stessa funge anche da legante tra il supporto (superficie dell'elemento strutturale da rinforzare) e le fibre, garantendo il trasferimento degli stati tensionali tra supporto e fibre (aderenza).

Le fibre sono, in genere, di carbonio, di vetro o aramidiche, anche se esisto-

no prodotti realizzati con altri tipi di fibre (PVA, PBO). La matrice è costituita da un materiale polimerico (frequentemente resina epossidica). I prodotti di rinforzo costituiti da fibre lunghe immerse in matrici polimeriche sono comunemente identificati con l'acronimo FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). L'aggettivo "lunghe" indica che le fibre sono continue all'interno del manufatto.

Recentemente è stato proposto l'utilizzo di speciali matrici a base cementizia nelle quali sono immerse reti di fibre, per la realizzazione di compositi detti FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*). Questi prodotti, rispetto agli FRP tradizionali sono in genere (ma non necessariamente) meccanicamente meno efficienti a parità di superficie coperta dal rinforzo, ma offrono indubbi vantaggi in termini di semplicità di applicazione, traspirabilità del manufatto e resistenza alle alte temperature. Inoltre, relativamente alle strutture di muratura, l'elevata traspirabilità consente di coprire con il rinforzo superfici maggiori e quindi di compensare (parzialmente o totalmente) la minore efficienza meccanica del sistema.

Esistono poi altri compositi a fibre corte (metalliche o non metalliche, della lunghezza di qualche centimetro) immerse direttamente in malte o nel calcestruzzo, prima della fase di indurimento, per formare una malta o un calcestruzzo fibrosi. Questi prodotti sono meno frequentemente usati per il rinforzo di strutture esistenti, e non sono considerati nella presente trattazione.

Una schematica classificazione dei prodotti fibrosi utilizzati per il rinforzo delle strutture, basata sulla morfologia, è riportata di seguito.

NASTRI O FOGLI	Prodotti costituiti da sole fibre parallele, di spessore generalmente inferiore a 1 mm, con piccolissima rigidità flessionale; i nastri si applicano impregnandoli con la matrice all'atto dell'incollaggio sulla struttura da rinforzare; la matrice (in genere resina epossidica) ha quindi anche la funzione di rendere aderente il rinforzo alla struttura.
----------------	---

TESSUTI	Prodotti costituiti da sole fibre (senza matrice) disposte in diverse direzioni (almeno due tra loro ortogonali, trama e ordito), di spessore generalmente inferiore a 1 mm, con piccolissima rigidità flessionale; anche i tessuti si applicano impregnandoli con la matrice all'atto dell'incollaggio sulla struttura da rinforzare; la
---------	---

matrice (in genere resina epossidica) ha quindi anche la funzione di rendere aderente il rinforzo alla struttura.

**RETI DI FIBRE**

Prodotti costituiti da sole fibre raccolte in piccoli mazzi e disposti in modo da formare una rete a maglia quadrata o rettangolare (di dimensioni generalmente poco superiori al centimetro), di spessore inferiore a 1 mm, con piccolissima rigidità flessionale; le reti sono impregnate con la matrice all'atto dell'incollaggio sulla struttura da rinforzare; la matrice (in genere resina epossidica, ma anche malta a base cementizia) ha quindi anche la funzione di rendere aderente il rinforzo alla struttura.

**LAMINE O LAMELLE**

Prodotti costituiti da fibre parallele e matrice, generalmente ottenuti per pultrusione, di spessore superiore a 1 mm, dotate di una certa rigidità flessionale; le lamelle vengono di solito incollate alla struttura da rinforzare mediante resina epossidica.

Si osserva che, nel caso di nastri, tessuti e reti, il materiale composito (inteso come accoppiamento di fibre e matrice) è realizzato in situ, all'atto dell'incollaggio sulla struttura, mentre nel caso delle lamelle il rinforzo che viene incollato sulla struttura è già un composito.

Esistono poi barre di materiale composito (prodotte per pultrusione) che possono essere utilizzate come armature per il calcestruzzo, anche se in Italia questo utilizzo è scarsamente diffuso. Nel rinforzo delle murature le barre possono essere vantaggiosamente utilizzate per la realizzazione di connettori che aumentino la collaborazione tra i nastri, tessuti e reti e la struttura da rinforzare, o come elementi trasversali di collegamento, ad esempio nel caso di murature a più paramenti e nel caso del confinamento di colonne con sezione rettangolare avente una dimensione nettamente prevalente sull'altra (rapporto tra i lati superiore a 2).

I nastri, i tessuti e le reti, grazie alla modestissima rigidità flessionale, si prestano bene ad essere applicati anche su superfici con piccoli raggi di curvatura (comunque sempre superiori a  $20 \div 30$  mm), mentre le lamelle sono di più agevole applicazione se la superficie è molto regolare.

Avendo fibre disposte in diverse direzioni, i tessuti sono in grado di soppor-

tare trazioni in diverse direzioni, mentre i nastri e le lamelle sopportano solo le trazioni nell'unica direzione delle fibre.

I rinforzi di materiale composito hanno elevate resistenza e rigidità esclusivamente a trazione nella direzione delle fibre (proprietà governate dalle caratteristiche meccaniche delle fibre), essendo molto modeste la resistenza a compressione (governata da fenomeni di instabilità delle fibre), a trazione in direzione ortogonale alle fibre e a taglio (governate dalle proprietà meccaniche della matrice). È pertanto di interesse tecnico il legame costitutivo a trazione in direzione delle fibre che è, con ottima approssimazione, elastico lineare fino a rottura. Meccanicamente quindi un rinforzo di materiale composito è caratterizzato da due delle seguenti quantità:

$\varepsilon_{fu}$  = dilatazione di rottura  
 $f_{fu}$  = resistenza a trazione  
 $E_f$  = modulo elastico a trazione in direzione delle fibre.

Questi parametri meccanici sono riferiti a una sezione nominale o, equivalentemente (pensando ad una larghezza unitaria), a uno *spessore nominale*, talvolta denominato anche *spessore di calcolo*.

Nel caso dei prodotti impregnati in situ (nastri, tessuti, reti), lo spessore nominale è relativo alle sole fibre presenti in una certa direzione e si determina con la relazione:

$$t_f = \frac{p_f}{\gamma_{fibre}} \quad (1.1)$$

in cui  $p_f$  è il peso di fibre in una certa direzione, per unità di superficie di rinforzo e  $\gamma_{fibre}$  è il peso specifico delle fibre.

Ad esempio, un nastro di fibre di carbonio di peso  $310 \text{ g/m}^2$ , di cui  $p_f = 300 \text{ g/m}^2$  è il peso delle fibre, ha spessore nominale (relativo all'unica direzione delle fibre):

$$t_f = \frac{p_f}{\gamma_{fibre}} = \frac{300}{1,8 \cdot 10^6} = 1,67 \cdot 10^{-4} \text{ [m]} = 0,167 \text{ [mm]} \quad (1.2)$$

essendo  $\gamma_{fibre} = 1,8 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3$  il peso specifico delle fibre di carbonio.

Analogamente, un tessuto con fibre di carbonio disposte lungo due direzioni ortogonali  $x$  e  $y$ , con peso totale di fibre  $p_{ft} = 400 \text{ g/m}^2$  e quantità di fibre doppia in direzione  $y$  rispetto alla direzione  $x$  ha gli spessori nominali, relativi alle direzioni  $x$  e  $y$ :