



Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici
Servizio Tecnico Centrale

**Linea Guida per la progettazione, l'esecuzione e la manutenzione di
interventi di consolidamento strutturale mediante l'utilizzo di sistemi di
rinforzo FRCM**

Ottobre 2019

SOMMARIO

PREMESSA	3
1 SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE	3
2 CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL RINFORZO.....	4
2.1 Utilizzo delle caratteristiche meccaniche nei problemi di verifica e progetto.....	6
2.2 Valori di progetto	7
2.3 Verifica in caso di incendio.....	7
3 RINFORZO DI STRUTTURE MURARIE.....	8
3.1 Rinforzo di pareti sollecitate nel loro piano.....	8
3.2 Rinforzo di pareti fuori dal piano	12
3.3 Realizzazione di cordoli sommitali	13
3.4 Strutture a semplice e doppia curvatura.....	14
3.5 Confinamento di colonne di muratura sollecitate a compressione centrata	15
3.5.1 Confinamento di colonne circolari	16
3.5.2 Confinamento di colonne rettangolari	17
4 RINFORZO DI STRUTTURE DI CALCESTRUZZO ARMATO.....	18
4.1 Rinforzo a flessione per carichi gravitazionali	18
4.1.1 Verifica allo SLU.....	18
4.1.2 Verifica allo SLE.....	18
4.2 Rinforzo a taglio	19
4.2.1 Resistenza efficace.....	20
4.3 Confinamento di colonne di calcestruzzo armato sollecitate a compressione centrata.....	21
4.3.1 Confinamento di colonne rettangolari	21
5 DETTAGLI COSTRUTTIVI.....	21
6 MANUTENZIONE E RIPARAZIONE	24
7 CONTROLLO	25
8 PROVE SPERIMENTALI SU ELEMENTI STRUTTURALI	25

PREMESSA

Ai compositi fibrorinforzati FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), realizzati con fibre lunghe di acciaio ad alta resistenza (Ultra High Tensile Strength Steel, UHTSS), arammide, basalto, carbonio, poliparafenilenbenzobisoxazolo (PBO), vetro alcali resistente (AR), o altri materiali, immersi in matrici polimeriche (quali le resine epossidiche), si affiancano, negli interventi di riabilitazione strutturale, i compositi fibrorinforzati FRCM (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*). Tali compositi sono il risultato dell'accoppiamento di reti (nel prosieguo anche denominate tessuti), realizzate con fibre dei materiali sopra elencati, e di una matrice inorganica.

La matrice inorganica, a base di malta cementizia o di calce può risultare vantaggiosa rispetto a quella organica, soprattutto per le applicazioni alle fabbriche murarie, attesa la sua maggiore affinità con questo tipo di supporti. Inoltre, per le sue caratteristiche di rimovibilità e traspirabilità, la rendono adatta per le applicazioni su edifici di interesse storico ed artistico.

La presente Linea Guida recepisce i risultati cui è pervenuto il Gruppo di studio insediato dalla *Commissione CNR per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni*, il quale ha operato in stretta connessione con il Gruppo di lavoro istituito presso il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, che ha predisposto la “*Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti*”.

La presente Linea Guida propone, quindi, principi e regole di applicazione relativi al progetto ed alla verifica degli interventi più comuni realizzabili con i sistemi di rinforzo FRCM.

Per quanto non trattato nella presente Linea Guida è possibile utilizzare il documento CNR-DT 215/2018 “*Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica*”, e suoi successivi aggiornamenti, e/o altri documenti internazionali di comprovata validità, nel rispetto delle disposizioni del D.M. 17.01.2018 Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni e della Circolare Applicativa delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni n.7 del 21.01.2019.

1 SCOPO E CAMPO DI APPLICAZIONE

Scopo della presente Linea Guida è fornire principi e regole di applicazione per la progettazione, la verifica, il collaudo e la manutenzione di interventi di rinforzo strutturale con materiali compositi fibrorinforzati a matrice inorganica, di seguito denominati FRCM (*Fabric Reinforced Cementitious Matrix*).

Tali materiali – di seguito anche chiamati sistemi di rinforzo FRCM o più semplicemente sistemi FRCM o anche rinforzi FRCM – sono utilizzati per il miglioramento delle prestazioni strutturali di costruzioni esistenti, sia in muratura, che in calcestruzzo armato.

I sistemi FRCM possono essere realizzati utilizzando vari tipi di reti o tessuti, costituiti da fibre di arammide, basalto, carbonio, PBO e vetro alcali resistente (AR), oppure anche fili o trefoli di acciaio ad alta resistenza (UHTSS), abbinati a matrici inorganiche, realizzate con leganti a base di calce o di cemento, con eventuale aggiunta di additivi e promotori di adesione.

L'elevato rapporto fra resistenza e peso dei sistemi FRCM consente di migliorare le prestazioni meccaniche dell'elemento rinforzato, contribuendo essenzialmente ad assorbire le tensioni di trazione, senza incrementarne la massa o modificarne significativamente la rigidità.

I rinforzi FRCM mostrano, in generale, buona resistenza alle alte temperature, compatibilità chimico-fisica con i substrati in muratura e in calcestruzzo, una certa permeabilità al vapore; inoltre possono essere preparati ed applicati con semplicità mediante procedure fondamentalmente tradizionali, anche su superfici umide.

In particolare, per le loro proprietà meccaniche, i rinforzi FRCM sono particolarmente indicati nelle applicazioni per le quali sia richiesta la mobilitazione di deformazioni modeste, come tipicamente accade per il rinforzo di murature.

Nei successivi paragrafi sono illustrate le regole di progetto relative alle principali applicazioni strutturali, per le quali sono disponibili in letteratura modelli di calcolo ampiamente condivisi dalla comunità tecnica e scientifica, sia a livello nazionale che internazionale.

Applicazioni diverse devono essere necessariamente suffragate da approfondite indagini preliminari in laboratorio su elementi strutturali in scala reale e da verifiche di tipo numerico.

Per gli aspetti legati alla identificazione, qualificazione e accettazione in cantiere, nonché per gli aspetti connessi alla durabilità, trasporto, stoccaggio, movimentazione, utilizzo, si rimanda alla *“Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”*, emessa dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, ai Certificati di Valutazione Tecnica (CVT), ed ai manuali di installazione dei sistemi, obbligatori per questi materiali.

2 CARATTERISTICHE MECCANICHE DEL RINFORZO

Il tipico legame costitutivo tensione-deformazione di un sistema FRCM in una prova di trazione monoassiale, è assimilabile ad una polilinea costituita da tre rami consecutivi (Figura 1), corrispondenti, nell'ordine, allo stadio di campione non fessurato (Stadio A), a quello in fase di fessurazione (Stadio B) e a quello fessurato (Stadio C).

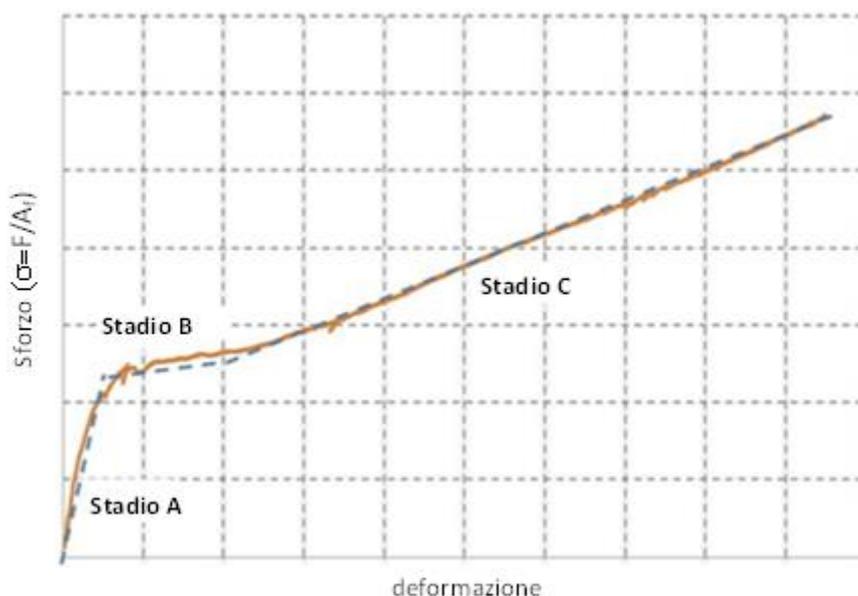


Fig. 1- Legame costitutivo tipo a trazione uniassiale di un provino di FRCM (A_f area del tessuto senza matrice inorganica)

Tale legame non è sufficiente a caratterizzare il comportamento meccanico di un sistema FRCM, in quanto l'impiego di quest'ultimo come rinforzo di un elemento strutturale porta a dover considerare i molteplici meccanismi di crisi che possono verificarsi in seguito all'interazione supporto-rinforzo, di seguito elencati e descritti in Figura 2:

- A. il distacco con rottura coesiva del supporto del rinforzo;
- B. il distacco all'interfaccia matrice-supporto;
- C. il distacco all'interfaccia matrice-tessuto;
- D. lo scorrimento del tessuto nella matrice;
- E. lo scorrimento del tessuto e fessurazione dello strato di malta più esterno;
- F. la rottura a trazione del tessuto.

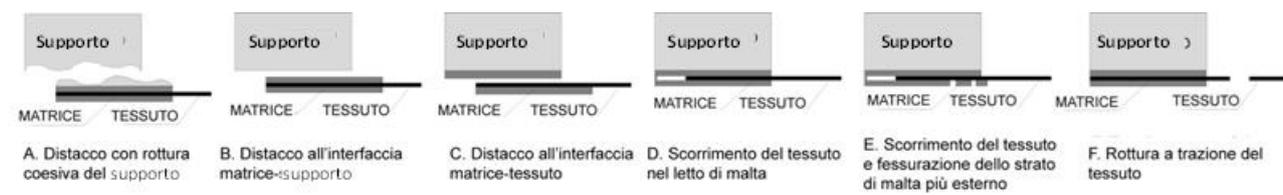


Fig. 2 – Meccanismi di crisi

Per questi motivi, è necessario che la caratterizzazione meccanica includa, oltre alla prova di trazione del sistema FRCM e del tessuto senza matrice inorganica, anche la prova di distacco dal supporto, ed eventuali altre prove appropriate, in relazione alle caratteristiche specifiche del sistema.

Ai fini della presente Linea Guida, i rinforzi FRCM sono caratterizzati dalle seguenti proprietà meccaniche:

- a) tensione limite convenzionale, $\sigma_{lim,conv}$ (valore caratteristico) e deformazione limite convenzionale, $\varepsilon_{lim,conv}$, come di seguito definita (entrambe le proprietà sono variabili in funzione del supporto);
- b) modulo elastico a trazione del campione nello stadio A, se rilevabile (E_f , valore medio);
- c) tensione ultima σ_u (valore caratteristico) e deformazione ultima ε_u (valore medio) del composito FRCM a rottura per trazione;
- d) tensione ultima, σ_{uf} (valore caratteristico) del tessuto senza matrice inorganica a rottura per trazione;
- e) modulo elastico E_f del tessuto senza matrice inorganica (valore medio);
- f) deformazione ultima a trazione, ε_{uf} , del tessuto senza matrice inorganica ($\varepsilon_{uf} = \sigma_{uf}/E_f$);
- g) resistenza a compressione della matrice/malta, $f_{c,mat}$, caratteristica o nominale (quest'ultima assunta come caratteristica).

Le tensioni sono riferite, per convenzione, all'area della sezione trasversale del tessuto senza matrice inorganica (A_f), prescindendo cioè dalla presenza della matrice/malta.

2.1 Utilizzo delle caratteristiche meccaniche nei problemi di verifica e progetto

La tensione limite convenzionale $\sigma_{lim,conv}$, per uno specifico sistema FRCM, rappresenta la resistenza del sistema di rinforzo ricavata mediante prove di distacco da supporti convenzionali e come tale è dipendente dal tipo di supporto: essa corrisponde al valore caratteristico dei picchi della forza traente registrati durante le prove di distacco dal supporto (vedere *Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti*). La deformazione limite convenzionale è pari a $\varepsilon_{lim,conv} = \sigma_{lim,conv}/E_f$ (Figura 3).

L'impiego della deformazione limite convenzionale consente di progettare interventi di rinforzo FRCM evitando di condurre esplicitamente la verifica di distacco dall'estremità, altrimenti necessaria nei casi in cui tale modalità di crisi sia possibile. Ciò accade, ad esempio, quando la sollecitazione nel sistema di rinforzo è massima in corrispondenza dell'estremità dello stesso, situazione che si verifica usualmente negli interventi di rinforzo a flessione di travi o pilastri soggetti ad azioni orizzontali (tipicamente le azioni sismiche), oppure in quelli di rinforzo a taglio di travi di calcestruzzo armato.

Qualora invece il rinforzo possa essere esteso fino ad una distanza adeguata dalla sezione maggiormente sollecitata, come ad esempio nel caso di rinforzo di pannelli murari sollecitati fuori dal piano oppure di travi di calcestruzzo armato, rinforzate per incrementarne la capacità nei confronti dei carichi gravitazionali, viene ridotta la probabilità di crisi per distacco dall'estremità. La crisi per distacco intermedio (cioè lungo l'elemento), o per rottura nel rinforzo, può avvenire solo per valori di deformazione significativamente superiori alla deformazione limite convenzionale.

Ciò premesso, ai fini della presente Linea Guida, i valori dei parametri da impiegare nelle verifiche controllate dai fenomeni di distacco di estremità sono quelli limite convenzionali sopra definiti: $\sigma_{lim,conv}$, $\varepsilon_{lim,conv}$.

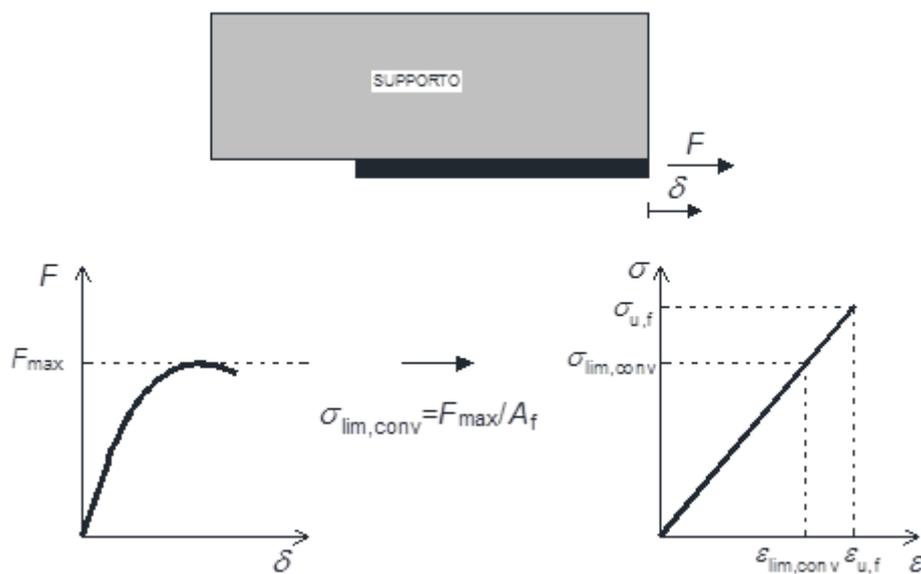


Fig. 3- Determinazione della $\sigma_{lim,conv}$ e della $\varepsilon_{lim,conv}$

Nelle verifiche governate dai fenomeni di distacco intermedio, invece, i valori da impiegare sono i seguenti: $\varepsilon_{\text{lim,conv}}^{(\alpha)} = \alpha \cdot \varepsilon_{\text{lim,conv}}$ e $\sigma_{\text{lim,conv}}^{(\alpha)} = E_f \cdot \varepsilon_{\text{lim,conv}}^{(\alpha)}$.

Il coefficiente di amplificazione α deve essere assunto pari a 1,5 per tutti i sistemi FRCM ad eccezione di quelli per i quali il punto di ordinata $\sigma_{\text{lim,conv}}$ ricada nello stadio A della curva media tensione-deformazione di cui sopra. Per questi ultimi si deve assumere $\alpha = 1,0$.

Valori di α superiori, rispettivamente a 1,5 e a 1,0, sono possibili, ma devono essere supportati da opportune prove sperimentali su elementi strutturali, come descritti nel § 8.

Qualora gli elementi strutturali sottoposti a prova prevedano l'adozione di connettori meccanici, il Fabbricante è tenuto a sottoporre al Servizio Tecnico Centrale, fin dalla fase di qualificazione, la richiesta di CVT per il kit complessivo costituito dal composito FRCM e dai connettori meccanici - allo scopo dettagliatamente descritti, sia dal punto di vista geometrico, che delle proprietà materiali e meccaniche - e il CVT, ove rilasciato, riguarnerà il kit complessivo.

In ogni caso il valore di $\sigma_{\text{lim,conv}}^{(\alpha)}$ deve essere minore o al più uguale a σ_u .

Nelle situazioni governate dalla resistenza della rete/tessuto e non dalla capacità di adesione del rinforzo FRCM al supporto, o dallo scorrimento della rete all'interno della matrice, i valori da impiegare nel progetto sono la tensione e la deformazione di rottura del tessuto senza matrice inorganica: σ_{uf} , ed ε_{uf} .

2.2 Valori di progetto

Il valore di calcolo X_d della generica proprietà di resistenza o di deformazione di un sistema di rinforzo FRCM è espresso mediante una relazione del tipo:

$$X_d = \eta \cdot \frac{X_k}{\gamma_m} \quad (2.1)$$

dove η è un opportuno fattore di conversione, X_k è il valore caratteristico della proprietà in questione e γ_m è il fattore parziale corrispondente.

Quest'ultimo è pari a 1,5 per gli Stati Limite Ultimi (SLU); a 1,0 per gli Stati Limite di Esercizio (SLE).

Per le verifiche nei confronti degli Stati Limite Ultimi vanno tenuti in conto gli effetti dei fattori ambientali attribuendo al fattore di conversione, in mancanza di dati più specifici, i valori η , qualunque sia la natura della rete, esposti nella Tabella 3.1 del documento CNR-DT 215/2018 e successive modificazioni ed aggiornamenti citato in Premessa. Valori superiori, fino all'unità, sono possibili purché suffragati da specifiche prove di laboratorio eseguite dal Fabbricante, in cui si tenga conto anche della fessurazione della matrice, come indicato nel § 8.

Per quanto attiene alle verifiche nei confronti degli Stati Limite di Esercizio, previste per gli interventi su strutture di c.a., si deve tener conto del fenomeno della fatica statica come prescritto al § 4.1.2.

2.3 Verifica in caso di incendio

Nel caso di incendio la struttura rinforzata, ove non siano previsti specifici sistemi di protezione al fuoco, deve essere verificata in assenza di rinforzo: le azioni devono essere quelle previste per la combinazione quasi permanente della normativa vigente; le capacità degli elementi devono essere calcolate con valori unitari dei fattori parziali dei materiali.

3 RINFORZO DI STRUTTURE MURARIE

Il rinforzo delle strutture in muratura rappresenta una delle applicazioni più importanti per i sistemi FRCM. Tali rinforzi possono essere estesi all'intera superficie del pannello murario, su porzioni opportunamente dimensionate.

I compositi FRCM possono inoltre essere impiegati quali presidi antisismici per vincolare i meccanismi di ribaltamento fuori dal piano delle pareti perimetrali della costruzione, disponendo fasce orizzontali e/o verticali in adesione al paramento esterno oppure a quello interno dei muri, in combinazione con sistemi di connessione la cui efficacia deve essere supportata da opportune evidenze sperimentali. Infine, interventi di riparazione o rinforzo locale (che non alterino significativamente il comportamento globale della costruzione così come stabilito dalla normativa vigente), possono essere realizzati con i compositi FRCM posti in opera su limitate porzioni della costruzione e applicati ad entrambi i paramenti murari oppure ad uno solo di essi. In ogni caso dovranno essere installati connettori secondo quanto indicato al § 5 della presente Linea Guida.

Le verifiche di sicurezza possono essere condotte nei confronti dei soli Stati Limite Ultimi come di seguito indicato.

L'incremento della capacità di un elemento murario rinforzato con FRCM non può eccedere il 50% di quella dello stesso elemento non rinforzato. La limitazione non si applica per le azioni sismiche.

Allo scopo di incrementare la portanza a taglio di pareti sollecitate nel proprio piano, si può prevedere l'applicazione di rinforzi FRCM disposti preferibilmente in modo simmetrico sulle due facce, ed estesi solitamente all'intera loro superficie con le fibre preferibilmente dirette nelle direzioni verticale e orizzontale. Ai fini del progetto del rinforzo a taglio si considera l'area delle fibre disposte parallelamente alla forza di taglio; in ogni caso, per garantire l'efficacia di tale rinforzo, anche a seguito di fessurazione, è consigliabile prevedere anche fibre disposte ortogonalmente alla forza di taglio.

Nei casi di murature di elevato spessore, di murature a sacco o di murature con caratteristiche meccaniche scadenti, è necessario valutare l'opportunità di rinforzare il muro (preventivamente all'applicazione dei rinforzi FRCM) anche con altri tipi di intervento, allo scopo di ricreare la monoliticità della sezione e permettere il corretto trasferimento degli sforzi al rinforzo FRCM.

Il progettista potrà utilizzare metodi di calcolo che impiegano modelli meccanici di resistenza alternativi rispetto a quello della presente Linea Guida, purché forniti da documenti tecnico-scientifici di comprovata validità e/o validati attraverso opportune campagne sperimentali.

3.1 Rinforzo di pareti sollecitate nel loro piano

Allo scopo di incrementare la resistenza a taglio di pareti sollecitate nel proprio piano, si può prevedere l'applicazione di rinforzi FRCM preferibilmente disposti simmetricamente sui due lati del muro.

Interventi volti al miglioramento della resistenza a taglio realizzati su un solo paramento dovranno essere attentamente valutati dal progettista, tenendo opportunamente conto della eccentricità indotta dalla disposizione non simmetrica del rinforzo, in riferimento alla capacità resistente del pannello rinforzato, alla interazione di tale pannello con il resto della struttura, e agli effetti sul comportamento globale della costruzione.

La verifica nei confronti dello Stato Limite Ultimo per taglio è soddisfatta se:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} = \min \{ V_{t,Rd}; V_{t,c} \} \quad (3.1)$$

in cui

- V_{Ed} è il taglio sollecitante;
- V_{Rd} è il taglio resistente, calcolato sulla base di un meccanismo a traliccio costituito da elementi resistenti tesi (la muratura rinforzata con FRCCM) ed elementi resistenti compressi (bielle di muratura);
- $V_{t,Rd}$ è la resistenza a taglio della muratura rinforzata per crisi dell'elemento teso, fornita dalla (3.2);
- $V_{t,c}$ è il valore della resistenza a taglio della muratura rinforzata per crisi della biella compressa di muratura, fornita dalla (3.4).

Il valore di $V_{t,Rd}$ è calcolato come somma del contributo della muratura non rinforzata (V_t), valutato in accordo con la normativa vigente, e di quello del rinforzo FRCCM ($V_{t,f}$), valutato attraverso la relazione (3.3):

$$V_{t,Rd} = V_t + V_{t,f} \quad (3.2)$$

$$V_{t,f} = n_f \cdot t_{vf} \cdot l_f \cdot \alpha_t \cdot \epsilon_{fd} \cdot E_f / \gamma_K \quad (3.3)$$

in cui:

- $\gamma_K > 1$ è un coefficiente di modello, da assumersi pari al valore indicato nel documento CNR-DT 215/2018 e successivi aggiornamenti;
- n_f è il numero totale degli strati di rinforzo disposti sulle facce della parete;
- t_{vf} è lo spessore equivalente di uno strato di tessuto con fibre disposte in direzione parallela alla forza di taglio;
- l_f è la dimensione di calcolo del rinforzo misurata ortogonalmente alla forza di taglio. Essa coincide con la dimensione del pannello nel caso di applicazioni a completo ricoprimento, oppure, nel caso di applicazioni discrete (cioè in strisce), equivale alla somma delle larghezze delle strisce di rinforzo FRCCM. In ogni caso, l_f è da assumersi non superiore alla dimensione H della parete nella direzione ortogonale alla forza di taglio;
- ϵ_{fd} è la deformazione di progetto del sistema di rinforzo FRCCM, calcolata per il tramite della (2.1);
- $0,8 \leq \alpha_t \leq 1$ è un coefficiente riduttivo che tiene conto della ridotta resistenza estensionale delle fibre quando sollecitate a taglio, da determinare sulla base delle sperimentazioni disponibili nella letteratura scientifica attraverso opportune procedure di trattamento statistico dei dati di prova;
- E_f è il modulo elastico del tessuto senza matrice inorganica.

In presenza di rinforzo su un solo lato della parete, il contributo $V_{t,f}$ deve essere ridotto, per tener conto della eccentricità indotta dalla asimmetria sulla risposta dell'elemento strutturale rinforzato, almeno del 30% e i connettori devono essere inseriti seguendo le indicazioni riportate al § 5. Il valore di calcolo del taglio sollecitante che produce lo schiacciamento diagonale della muratura, $V_{t,c}$, è fornito dalla relazione (3.4), nella quale intervengono esclusivamente le proprietà della muratura non rinforzata in quanto, in base al modello di resistenza a traliccio adottato, il rinforzo FRCCM non contribuisce alla resistenza a compressione della muratura:

$$V_{t,c} = 0,25 \cdot f_{md} \cdot t \cdot d_f \quad (3.4)$$

in cui:

- f_{md} è la resistenza a compressione di progetto della muratura;
- t è lo spessore della parete;
- d_f è la distanza tra l'estremo lembo compresso della muratura e l'estremo lembo teso del rinforzo FRCM.

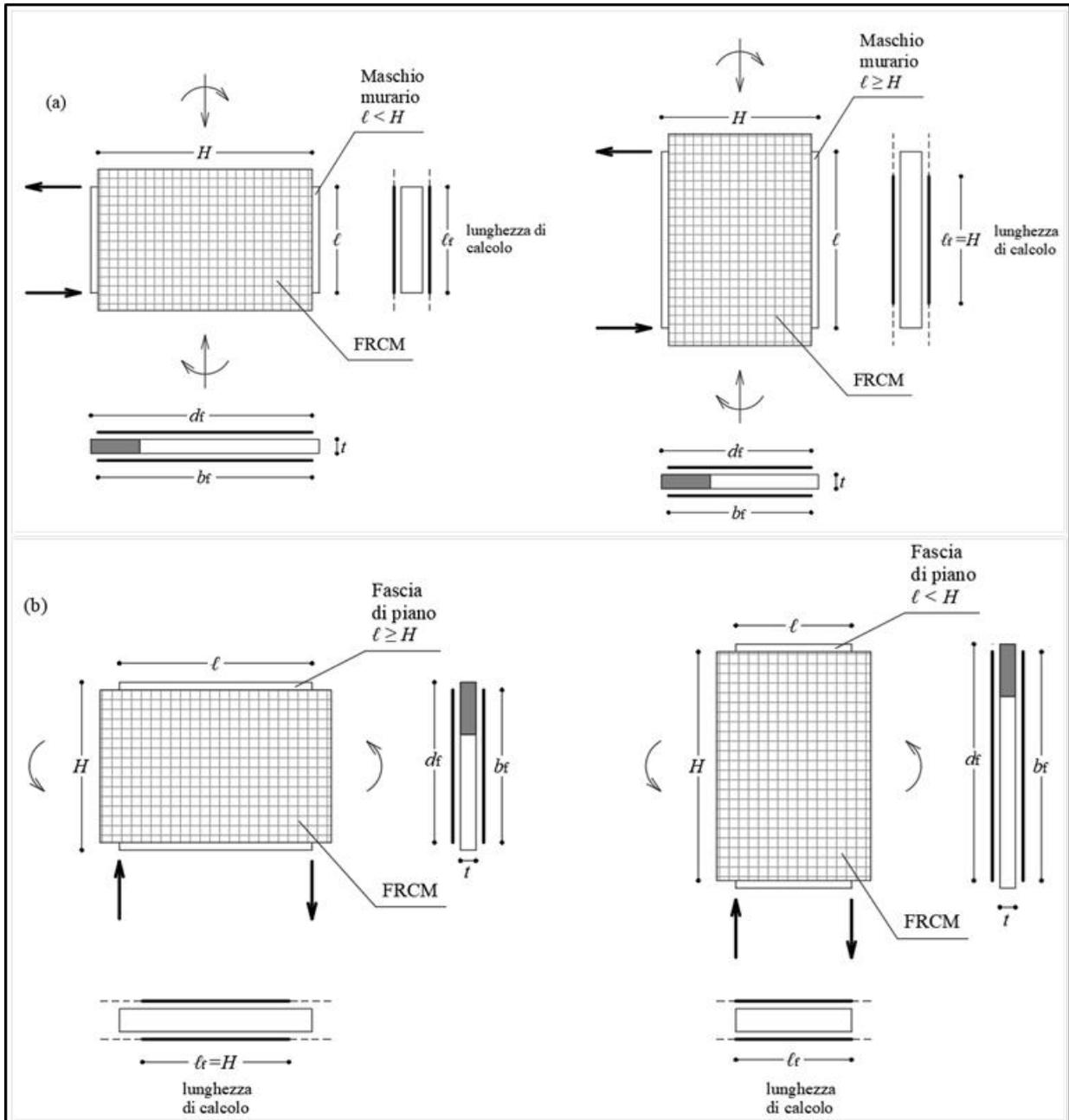


Fig. 4- Rinforzo con FRCM di pannelli sollecitati nel piano:

(a) rinforzo di un maschio murario;

(b) rinforzo di una fascia di piano

In maniera semplificata, il calcolo della capacità della muratura rinforzata può essere effettuato incrementando forfettariamente, mediante opportuni coefficienti moltiplicativi, la resistenza media a taglio della muratura non rinforzata in assenza di tensioni normali. Tali coefficienti amplificativi, utilizzabili solo per spessori di muratura non superiori a 400 mm, nel caso

di rinforzi disposti simmetricamente sull'intera superficie delle due facce delle pareti e soddisfacenti la limitazione $\sigma_{u,rf} \geq q_{u,f}$, sono esposti nella Tabella 3.1, in cui $q_{u,f}$ rappresenta il limite tensionale del tessuto senza matrice inorganica.

Tipologia di muratura	Rinforzo in FRM disposto simmetricamente sui due lati del pannello murario	$\bar{q}_{u,f}$ (N/mm)
Muratura di pietrame disordinato (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	44,60
Muratura a conci sbozzati con paramento di spessore disomogeneo	1,5	44,60
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,0	32,20
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	2,0	44,60
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	2,0	44,60
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	44,60
Muratura di mattoni pieni e malta di calce	1,7	24,50
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es. doppio UNI foratura $\leq 40\%$)	1,3	44,60

Tabella 3.1 – Coefficienti correttivi delle proprietà meccaniche della muratura rinforzata

Nel caso in cui siano eseguiti più interventi di consolidamento, i corrispondenti coefficienti migliorativi potranno essere fra loro moltiplicati, fatti salvi i limiti superiori previsti dalla normativa vigente, con particolare riferimento al paragrafo C8.5.3.1 della Circolare Applicativa delle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni n.7 del 21.01.2019.

Il rinforzo FRM fornisce un incremento della capacità resistente della parete in muratura non solo rispetto alle sollecitazioni taglianti ma anche a quelle di pressoflessione prodotte dai carichi laterali agenti nel piano del muro. La verifica a pressoflessione nel piano è soddisfatta se, nella sezione trasversale maggiormente sollecitata:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \quad (3.5)$$

Il momento resistente M_{Rd} , può essere calcolato assumendo come valide le seguenti ipotesi:

- conservazione della planarità delle sezioni rette;
- perfetta aderenza tra rinforzo FRM e supporto murario.

Nella maggior parte delle applicazioni ingegneristiche possono essere utilizzati i seguenti legami costitutivi per stati tensionali monoassiali (σ - ϵ):

- muratura: resistenza a trazione nulla; comportamento elastico-plastico con deformazione ultima a compressione limitata; si assume cioè un comportamento lineare fino alla resistenza di progetto f_{md} , cui compete il valore $\bar{\epsilon}_m$ della deformazione; tensione costante, pari a f_{md} , per deformazioni comprese nell'intervallo $\bar{\epsilon}_m \leq \epsilon \leq \epsilon_{mu}$ (essendo ϵ_{mu} la deformazione ultima); tensione nulla per deformazioni maggiori a ϵ_{mu} . In assenza di dati sperimentali, la deformazione ultima di progetto può essere assunta pari a $\epsilon_{mu}=3,5\%$. In maniera

semplificata, può anche essere adottata una distribuzione uniforme di tensioni (stress-block), purché rimangano invariate la risultante degli sforzi di compressione e la sua posizione sulla sezione trasversale.

- rinforzo FRCCM: comportamento a trazione elasto-fragile, lineare con modulo elastico E_f e deformazione ultima di progetto ε_{fd} , il che corrisponde ad una tensione massima nel rinforzo pari a $E_f \cdot \varepsilon_{fd}$; tensione nulla per deformazioni superiori a ε_{fd} ; resistenza a compressione nulla.

La deformazione di progetto ε_{fd} del sistema FRCCM è determinata dalla $\varepsilon_{lim,conv}^{(\alpha)}$ per il tramite della relazione $\varepsilon_{lim,conv}^{(\alpha)} = \alpha \cdot \varepsilon_{lim,conv}$ (§ 2.1).

In generale, ai fini della verifica, si possono definire due regioni di rottura, nel senso che la condizione limite si ottiene, o per raggiungimento della deformazione di progetto (ε_{fd}) del rinforzo FRCCM, o per raggiungimento della deformazione ultima (ε_{mu}) della muratura a compressione. La posizione dell'asse neutro nella sezione trasversale è individuata mediante l'equazione di equilibrio alla traslazione, da scriversi nella direzione verticale oppure orizzontale, in funzione del piano di inflessione considerato, particolarizzata alla pertinente regione di rottura.

Determinata la posizione dell'asse neutro, sulla base delle ipotesi di calcolo e dei legami costitutivi adottati, si determina la risultante degli sforzi di compressione della muratura e quella degli sforzi di trazione nel rinforzo FRCCM e la loro posizione nella sezione.

In condizioni di Stato Limite Ultimo, il valore di calcolo del momento resistente della parete rinforzata con FRCCM (M_{Rd}) da considerare nelle verifiche strutturali è fornito dalla relazione:

$$M_{Rd} = M_{0d} + (M_{1d} - M_{0d}) / \gamma_{Rd} \quad (3.6)$$

in cui M_{0d} ed M_{1d} sono i momenti resistenti, rispettivamente, della parete non rinforzata e di quella rinforzata, da calcolarsi sulla base delle ipotesi di calcolo e dei legami costitutivi adottati, e $\gamma_{Rd} \geq 1$ è un coefficiente di modello, da assumersi pari al valore indicato nel documento CNR-DT 215/2018 e successivi aggiornamenti.

3.2 Rinforzo di pareti fuori dal piano

I rinforzi con FRCCM sono spesso utilizzati per migliorare la resistenza dei pannelli murari alle azioni fuori dal piano, tipicamente nel caso di azioni sismiche.

Con riferimento ad una striscia di parete di muratura di larghezza unitaria (sviluppo lineare), la verifica nei confronti dello Stato Limite Ultimo per pressoflessione dell'elemento rinforzato, sia in direzione verticale (come tipicamente avviene nel caso di pareti vincolate alla base ed in sommità) che in direzione orizzontale, è soddisfatta se, nella sezione trasversale maggiormente sollecitata:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \quad (3.7)$$

dove il momento resistente specifico, M_{Rd} , si determina adottando le ipotesi di calcolo, i legami costitutivi e le formulazioni previsti per le verifiche a pressoflessione nel piano.

Con riferimento ad una striscia di parete di muratura di larghezza unitaria (sviluppo lineare), in aggiunta alla verifica a pressoflessione, deve essere inoltre verificato che il valore del taglio specifico sollecitante, V_{Ed} , nella concomitante condizione di carico, non ecceda in alcuna sezione quello resistente:

$$V_{Rd,m}=1 \cdot y_n \cdot f_{vd} \quad (3.8)$$

in cui f_{vd} è la resistenza di progetto a taglio della muratura non rinforzata, valutata in accordo con la normativa vigente, in funzione della tensione normale media calcolata come rapporto tra la risultante degli sforzi di compressione e l'area della superficie compresa tra l'estremo lembo compresso e l'asse neutro (y_n).

3.3 Realizzazione di cordoli sommitali

Tra le tecniche di rinforzo delle strutture murarie sono da annoverare i cordoli sommitali di muratura armata mediante sistemi FRCCM. Il tessuto del sistema FRCCM è disposto orizzontalmente all'interno dei giunti di malta tra i filari degli elementi lapidei o in laterizio. L'applicazione del rinforzo in un numero adeguato di giunti fornisce al cordolo resistenza a trazione e a flessione, senza che questo produca una variazione significativa della rigidità della muratura. La larghezza della sezione trasversale del cordolo sommitale, in generale, è pari allo spessore della parete muraria sottostante. Il tessuto di rinforzo è disposto su tutta la larghezza della sezione trasversale del cordolo.

La resistenza a trazione ($N_{t,Rd}$) del cordolo può essere stimata per mezzo della (3.9):

$$N_{t,Rd} = n_f \cdot t_f \cdot b \cdot \varepsilon_{fd} \cdot E_f \quad (3.9)$$

in cui:

- n_f è il numero degli strati di rinforzo disposti nel cordolo;
- t_f è lo spessore equivalente del sistema FRCCM (riferito ad un solo strato);
- b è la larghezza della sezione trasversale del cordolo;
- ε_{fd} è la deformazione di progetto del sistema di rinforzo FRCCM;
- E_f è il modulo elastico del tessuto senza matrice inorganica.

Il prodotto $n_f \cdot t_f \cdot b$ è pari alla sezione equivalente complessiva del rinforzo FRCCM disposto nel cordolo, mentre il prodotto $\varepsilon_{fd} \cdot E_f$ fornisce la massima tensione nel rinforzo FRCCM.

La resistenza a trazione del cordolo può essere messa in conto nella verifica dei meccanismi locali di collasso a condizione che, in corrispondenza degli incroci o degli angoli fra le pareti, venga osservata una sovrapposizione del tessuto di rinforzo di lunghezza adeguata ed estesa, in larghezza, a tutto lo spessore del cordolo, e comunque non inferiore a 300 mm, adottando, ove possibile, soluzioni di ancoraggio la cui efficacia sia supportata da idonee campagne sperimentali (§ 8). Per cordoli di larghezza inferiore a 300 mm, è sempre necessario adottare sistemi di ancoraggio. Inoltre, il trasferimento dello sforzo di trazione del cordolo alla muratura sottostante deve essere garantito per mezzo di idonee impernature verticali.

La resistenza a flessione del cordolo in muratura armata con sistemi FRCCM, sia per azioni fuori dal piano che per azioni nel piano della parete, può essere stimata assumendo le medesime ipotesi di calcolo e adottando gli stessi legami costitutivi dei materiali richiamati al § 3.1.

3.4 Strutture a semplice e doppia curvatura

Come noto, il collasso degli elementi strutturali a singola o a doppia curvatura non rinforzati avviene, in genere, quando si forma un numero di cerniere tale da dar luogo ad un cinematismo. In alcune situazioni si possono avere però anche meccanismi di taglio-scorrimento, più insidiosi in quanto meno percepibili nella loro evoluzione, che tipicamente portano al collasso attraverso lo scorrimento dei conci.

Altro caso che si può presentare, specie per le volte non strutturali (ma non solo per esse), è la crisi per instabilità di una porzione della volta. Più rari, negli elementi strutturali curvi, sono i casi di collasso per crisi a compressione della muratura.

L'impiego di sistemi di rinforzo FRCCM, fornendo agli archi e volte in muratura la resistenza a trazione di cui difettano, consente di migliorare il comportamento strutturale di tali elementi, andando ad ostacolare la formazione delle cerniere e quindi impedendo o limitando l'attivazione di cinematismi.

Occorre però ricordare che tali interventi modificano in modo sostanziale la risposta di queste strutture in termini di gerarchia dei meccanismi. Infatti, ostacolati i cinematismi per rotazione, possono verificarsi meccanismi di taglio-scorrimento, che in genere richiedono azioni più rilevanti per attivarsi ed evolversi, e che comunque devono essere debitamente valutati.

Relativamente agli interventi per ostacolare i cinematismi si ricorda che operando con rinforzi FRCCM all'estradosso di un arco o di una volta è opportuno collegare i rinforzi con le strutture verticali, in modo da impedire la formazione di cerniere anche alle imposte.

Nel caso di applicazione di rinforzi FRCCM all'intradosso di un arco o di una volta si deve sempre prevedere la messa in opera di connettori capaci di impedire il distacco del rinforzo dalla superficie della struttura.

Nella struttura rinforzata, i meccanismi di collasso che possono avvenire coinvolgono i limiti di resistenza dei materiali costituenti, ed in generale si possono presentare quattro differenti meccanismi di crisi:

- a) rottura a trazione del rinforzo;
- b) rottura a compressione della muratura;
- c) distacco del rinforzo (debonding);
- d) rottura a taglio-scorrimento (tipicamente alle imposte).

La verifica per le azioni di progetto deve prevenire la formazione di questi quattro meccanismi di crisi.

Nelle usuali applicazioni relativamente ai meccanismi "a" e "b" occorre verificare la capacità della struttura rispetto alle azioni attese e valutare la resistenza a compressione della muratura, tenendo presente che nel caso "b" potrebbe essere necessario prevedere un intervento che incrementi la sezione resistente a compressione.

Relativamente al meccanismo "c", ove non siano sufficienti le caratteristiche dei rinforzi FRCCM, devono essere previsti opportuni ed adeguati connettori tra i rinforzi e la muratura.

Infine, con riferimento al meccanismo "d", non essendo in genere i sistemi di rinforzo FRCCM idonei ad incrementare la resistenza nei confronti del taglio della muratura, si deve ricorrere ad ancoraggi meccanici, finalizzati a raccordare il rinforzo direttamente con le strutture verticali.

Da notare che la mancanza di un adeguato collegamento tra i rinforzi e le strutture murarie verticali nella zona delle imposte, può comportare scorrimenti delle estremità della volta, fino alla fuoriuscita dagli appoggi. Questo problema viene amplificato quando, a causa di un sisma, si

verificano spostamenti relativi orizzontali delle imposte; in questi casi può risultare utile l'uso congiunto dei rinforzi in FRCC e di incatenamenti inseriti per ostacolare gli spostamenti relativi tra le pareti.

Nel caso di volte non portanti, che hanno un peso modesto, le azioni sismiche possono causare facilmente lo scarico o addirittura il sollevamento di un appoggio, facilitando lo scorrimento alle imposte. Occorre quindi dedicare particolare attenzione ai collegamenti delle estremità delle volte con le murature perimetrali.

Con riferimento al rinforzo a strisce di volte a botte, in assenza di specifiche modellazioni, il passo dei rinforzi estradossali dovrà rispettare la regola:

$$p_f \leq 5t + b_f$$

dove:

p_f = passo del rinforzo;

t = spessore della volta;

b_f = larghezza del rinforzo

3.5 Confinamento di colonne di muratura sollecitate a compressione centrata

Il confinamento con FRCC di elementi strutturali di muratura, sottoposti a prevalente sollecitazione di sforzo assiale, si attua attraverso la predisposizione di un rivestimento continuo di composito a matrice inorganica, le cui fibre siano prevalentemente disposte in direzione ortogonale all'asse dell'elemento, in modo da contrastarne la dilatazione trasversale e conferire alla colonna un benefico stato di compressione triassiale. La lunghezza di sovrapposizione delle fibre è consigliata per almeno un quarto della circonferenza/perimetro della sezione trasversale e comunque per non meno di 300mm. Simili interventi sono praticabili sia per la riparazione di elementi danneggiati o deteriorati, sia per il rinforzo di elementi integri in vista di un miglioramento statico o sismico della struttura di appartenenza. Il confinamento con FRCC deve essere realizzato ricoprendo interamente la superficie dell'elemento da rinforzare.

La verifica dell'elemento confinato, soggetto a compressione centrata, consiste nell'accertare che sia soddisfatta la seguente limitazione:

$$N_{Ed} \leq N_{Rmc,d} \quad (3.10)$$

essendo N_{Ed} il valore di progetto dell'azione assiale sollecitante (da valutarsi, per le diverse combinazioni di carico prevedibili, come prescritto dalla Normativa vigente) e $N_{Rmc,d}$ il valore di progetto della resistenza dell'elemento confinato.

La resistenza assiale di progetto, $N_{Rmc,d}$, è definita come segue:

$$N_{Rmc,d} = A_m \cdot f_{mcd} \geq A_m \cdot f_{md} \quad (3.11)$$

dove il simbolo A_m rappresenta l'area della sezione trasversale dell'elemento confinato, f_{md} è la resistenza a compressione della muratura non confinata e f_{mcd} è il valore di progetto della resistenza a compressione della muratura confinata.

Alla resistenza di progetto, f_{mcd} , di un elemento confinato soggetto ad un valore f_1 della pressione di confinamento, di seguito definita e limitata dalle prestazioni meccaniche della matrice,

il cui danneggiamento influenza l'efficacia dell'interazione con le fibre di rinforzo, contribuisce soltanto una quota parte di quest'ultima, $f_{l,eff}$, detta "pressione efficace di confinamento" che dipende dalle caratteristiche della colonna di muratura:

$$f_{mcd} = f_{md} \cdot \left[1 + k' \cdot \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{md}} \right)^{\alpha_1} \right] \quad (3.12)$$

dove k' è un coefficiente (adimensionale) di incremento della resistenza ed α_1 è un esponente al quale, in mancanza di comprovati risultati sperimentali, può essere assegnato il valore 0,5.

Il valore del coefficiente di incremento della resistenza k' può essere stabilito sulla base di risultati sperimentali ottenuti su provini di muratura dalle caratteristiche analoghe a quelle da confinare. In alternativa, è possibile avvalersi della seguente relazione:

$$k' = \alpha_2 \cdot \left(\frac{g_m}{1000} \right)^{\alpha_3}, \quad (3.13)$$

essendo g_m la densità di massa della muratura espressa in kg/m^3 ed α_2 e α_3 coefficienti ai quali cautelativamente può essere attribuito il valore 1,0, in mancanza di risultati sperimentali che giustificano assunzioni diverse.

3.5.1 Confinamento di colonne circolari

Nel caso di colonne circolari di diametro D , confinate con n strati di rinforzo, aventi lo spessore equivalente delle fibre nella direzione ortogonale all'asse dell'elemento, t_f , e la cui matrice sia caratterizzata da un valore $f_{c,mat}$ della resistenza caratteristica a compressione, la pressione efficace di confinamento, $f_{l,eff}$, può essere calcolata come:

$$f_{l,eff} = k_H \cdot f_l \quad (3.14)$$

$$f_l = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot E_f \cdot \varepsilon_{ud,rid}}{D} \quad (3.15)$$

essendo f_l la pressione di confinamento, k_H il coefficiente di efficienza orizzontale, da assumersi per le colonne circolari rivestite con continuità pari a 1, e $\varepsilon_{ud,rid}$ la deformazione di calcolo del composito FRCM, appresso definita. Quest'ultima è assunta pari a:

$$\varepsilon_{ud,rid} = \min \left(k_{mat} \cdot \eta_a \cdot \frac{\varepsilon_{uf}}{\gamma_m}; 0,004 \right) \quad (3.16)$$

con:

$$k_{mat} = \alpha_4 \left(\rho_{mat} \cdot \frac{f_{c,mat}}{f_{md}} \right)^2 \leq 1 \quad (3.17)$$

$$\rho_{\text{mat}} = \frac{4 \cdot t_{\text{mat}}}{D} \quad (3.18)$$

essendo t_{mat} lo spessore complessivo del rinforzo FRCM e k_{mat} il coefficiente adimensionale di efficacia del confinamento che tiene conto della presenza della matrice inorganica.

In mancanza di risultati sperimentali che giustificano assunzioni diverse, Il coefficiente α_4 può essere assunto pari a 1,81.

3.5.2 Confinamento di colonne rettangolari

Il confinamento mediante FRCM di elementi a sezione quadrata o rettangolare consente di conseguire solo modesti incrementi della resistenza a compressione. Applicazioni di questo genere devono pertanto essere attentamente vagliate ed analizzate.

In assenza di adeguate prove sperimentali, che ne comprovino l'efficacia, non va considerato l'effetto del confinamento esterno su sezioni rettangolari (Figura 5) per le quali $b/h > 2$.

Prima dell'applicazione del sistema FRCM è opportuno procedere ad un arrotondamento degli spigoli della sezione, allo scopo di evitare pericolose concentrazioni di tensione localizzate in corrispondenza degli stessi, che potrebbero provocare una rottura prematura del sistema. Tale arrotondamento può non essere necessario per tessuti in acciaio, anche in relazione a quanto dichiarato dal produttore.

Il raggio di curvatura dello spigolo deve soddisfare la seguente limitazione:

$$r_c \geq 20 \text{ mm.} \quad (3.19)$$

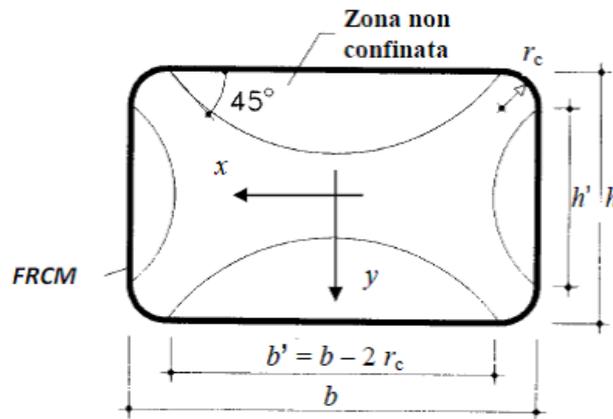


Fig. 5 - Confinamento di colonne rettangolari

Possono essere utilizzate le formule già introdotte per le sezioni circolari, con le sole seguenti varianti:

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 \cdot A_m}, \quad A_m = b \cdot h \quad (3.20)$$

$$D = \text{diagonale della sezione rettangolare o quadrata.} \quad (3.21)$$

4 RINFORZO DI STRUTTURE DI CALCESTRUZZO ARMATO

Si esaminano di seguito gli interventi di rinforzo, sia a flessione che a taglio, di elementi di conglomerato cementizio armato, nonché di confinamento di elementi, sempre di c.a., prevalentemente compressi. Le formule predittive suggerite, atteso l'attuale stato delle conoscenze, sono proposte unicamente per il rinforzo di elementi strutturali con deficienze nei confronti dei carichi gravitazionali. Nei confronti delle azioni sismiche, e limitatamente agli elementi strutturali che possono essere interessati dalle sollecitazioni da esse indotte, deve essere effettuata, e risultare soddisfatta, una verifica in assenza di rinforzo: le azioni devono essere quelle previste per la combinazione quasi permanente della Normativa vigente; le capacità degli elementi devono essere calcolate con valori unitari dei fattori parziali dei materiali.

Per le applicazioni in cui risulta determinante l'aderenza al supporto, la resistenza media a compressione del calcestruzzo non deve essere inferiore a 15 N/mm^2 .

Di regola, l'incremento della capacità di calcolo dell'elemento rinforzato con FRCC non può risultare superiore del 50% rispetto a quella dell'elemento non rinforzato.

4.1 Rinforzo a flessione per carichi gravitazionali

Sono previste sia verifiche in esercizio che allo stato limite ultimo.

4.1.1 Verifica allo SLU

Con riferimento ad un elemento inflesso rinforzato, la verifica allo S.L.U. è soddisfatta se:

$$M_{Ed} \leq M_{Rd} \quad (4.1)$$

essendo M_{Ed} e M_{Rd} rispettivamente i momenti di calcolo sollecitante e resistente.

Il valore del momento resistente, M_{Rd} , dell'elemento inflesso rinforzato è esprimibile in funzione delle caratteristiche meccaniche del conglomerato, dell'acciaio delle armature preesistenti e del composito FRCC, assumendo come valide le seguenti ipotesi:

- (i) conservazione della planarità delle sezioni rette;
- (ii) perfetta aderenza tra rinforzo FRCC e supporto.

Non sono ammesse deformazioni del conglomerato compresso superiori a 0,0035.

Il momento resistente di calcolo va computato considerando come limite di deformazione ε_{fd} ottenuta dalla (2.1). Non si deve tener conto del composito FRCC compresso.

Deve essere altresì effettuata la verifica del rinforzo nei confronti del distacco di estremità. Quest'ultima si ritiene soddisfatta se, in assenza di opportuni dispositivi meccanici, la tensione di trazione che sollecita il rinforzo, nella sezione a partire dalla quale il rinforzo stesso è necessario per incrementarne il momento resistente, non è maggiore di $\sigma_{fd} = E_f \cdot \varepsilon_{fd}$, senza alcuna amplificazione della deformazione $\varepsilon_{lim,conv}$, da cui la ε_{fd} è ricavata applicando la (2.1), ed inoltre la distanza della suddetta sezione dai bordi dell'elemento inflesso rinforzato è almeno pari a quella di ancoraggio. Per la valutazione della tensione nelle fibre, da confrontare con la σ_{fd} , può essere opportuno applicare la regola della traslazione del diagramma del momento flettente.

4.1.2 Verifica allo SLE

Sotto i carichi di esercizio la tensione massima nell'acciaio delle armature tese non può eccedere l'80% della corrispondente tensione di progetto.

Inoltre, in mancanza di analisi più dettagliate, allo scopo di tener conto degli effetti dovuti al fenomeno della fatica statica, la massima tensione di trazione nel rinforzo FRCM non deve eccedere il valore esposto nella Tabella 4.1 in funzione del tipo di fibra.

Tipo di Fibra					
UHTSS	Vetro AR	Arammide	Basalto	Carbonio	PBO
$0,55 \sigma_{uf}$	$0,20 \sigma_{uf}$	$0,30 \sigma_{uf}$	$0,20 \sigma_{uf}$	$0,55 \sigma_{uf}$	$0,30 \sigma_{uf}$

Tabella 4.1 – Limite superiore della tensione di trazione nel rinforzo FRCM per carichi di lunga durata

4.2 Rinforzo a taglio

La resistenza di progetto a taglio dell'elemento rinforzato può essere valutata attraverso la seguente relazione:

$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rd,s} + V_{Rd,f}, V_{Rd,c} \} \quad (4.2)$$

dove $V_{Rd,s} + V_{Rd,f}$ è il taglio-trazione, essendo $V_{Rd,s}$ il contributo dell'armatura metallica e $V_{Rd,f}$ quello del sistema di rinforzo FRCM; $V_{Rd,c}$ è il taglio-compressione del calcestruzzo. Le capacità a taglio del calcestruzzo e dell'armatura trasversale devono essere calcolate in accordo con la Normativa vigente; la capacità a taglio-trazione del composito deve essere calcolata come di seguito indicato.

Nel caso di disposizione ad U o in avvolgimento su una sezione rettangolare, il contributo del sistema di rinforzo FRCM, $V_{Rd,f}$, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch mediante la seguente equazione:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0,9d \cdot f_{fed} \cdot 2t_f \cdot (\cot \theta + \cot \beta) \cdot \frac{b_f}{p_f} \cdot \sin^2 \beta \quad (4.3)$$

dove:

- d è l'altezza utile della sezione,
- θ è l'angolo di inclinazione della fessura di taglio rispetto all'asse longitudinale dell'elemento, che può essere valutato in via semplificata trascurando la presenza del rinforzo,
- β è l'angolo di inclinazione delle fibre rispetto all'asse longitudinale dell'elemento,
- f_{fed} è la resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo, da valutarsi come indicato di seguito,
- t_f è lo spessore equivalente del tessuto,
- b_f e p_f sono, rispettivamente, la larghezza e il passo delle strisce, misurati ortogonalmente alla direzione longitudinale delle fibre (nel caso di strisce poste in adiacenza si assume $b_f/p_f=1.0$),
- γ_{Rd} è un fattore parziale di modello da assumere pari a 1.5.

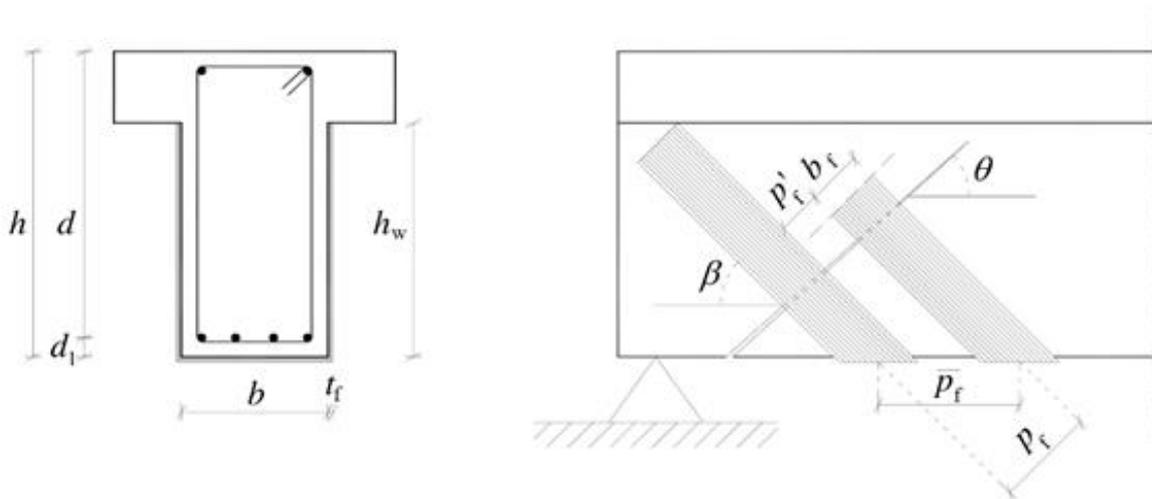


Fig. 6 – Simbologia adottata per il rinforzo a taglio

4.2.1 Resistenza efficace

In assenza di una valutazione rigorosa dello stato tensionale nel composito in corrispondenza delle fessure di taglio, è possibile avvalersi della procedura semplificata descritta di seguito. Essa si basa sull'utilizzo di una "tensione efficace" del sistema di rinforzo, indicata con f_{fed} e definita come tensione di trazione media nel composito che attraversa una fessura di taglio in condizioni di collasso incipiente. Se il collasso di un elemento rinforzato a taglio con FRCM è governato dalla perdita di aderenza tra rinforzo e supporto, la tensione efficace f_{fed} deve essere valutata sulla base dei risultati della prova di distacco ed in particolare della $\sigma_{lim,conv}$, come appresso riportato. In caso contrario, la tensione efficace f_{fed} può essere valutata sulla base della resistenza a trazione del rinforzo $\sigma_{u,f}$, attraverso una adeguata sperimentazione.

Nel caso di disposizione ad U su una sezione rettangolare o a T, la tensione efficace di calcolo del sistema di rinforzo, f_{fed} , è fornita dalla relazione:

$$f_{fed} = \begin{cases} \sigma_{fd} \frac{L_{max}}{l_{ed}} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{L_{max}}{l_{ed}} \right) & \text{se } L_{max} \leq l_{ed} \\ \sigma_{fd} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{l_{ed}}{L_{max}} \right) & \text{se } L_{max} > l_{ed} \end{cases} \quad (4.4)$$

dove:

$$L_{max} = \frac{\min \{0.9 \cdot d, h_w\}}{\sin \beta}$$

- σ_{fd} è la tensione di progetto del composito FRCM (ricavata dalla $\sigma_{lim,conv}$ o dalla $\sigma_{u,f}$),
- l_{ed} è la lunghezza efficace di ancoraggio, da assumersi pari a 300 mm in assenza di specifiche valutazioni;
- h_w è l'altezza dell'anima della trave, che deve essere rinforzata con l'FRCM ad U per tutta la sua altezza.

Per alcuni compositi FRCM la legge di aderenza matrice-fibra è caratterizzata dalla presenza di una tensione tangenziale residua. Questa tensione viene mantenuta fino a scorrimenti molto elevati ed il suo contributo potrebbe non essere trascurabile. Alcuni studi recenti mostrano come tener conto di tale contributo.

4.3 Confinamento di colonne di calcestruzzo armato sollecitate a compressione centrata

La verifica di colonne prevalentemente compresse di conglomerato cementizio armato, sia circolari che rettangolari o quadrate, confinate con FRCM segue le stesse regole delle colonne in muratura, salvo le varianti di seguito elencate.

La resistenza assiale di progetto, $N_{Rcc,d}$, è definita come segue:

$$N_{Rcc,d} = A_c \cdot f_{ccd} + A_s \cdot f_{yd}, \quad (4.5)$$

essendo A_c l'area di calcestruzzo, A_s l'area di acciaio presente, f_{ccd} la resistenza di progetto del calcestruzzo confinato, f_{yd} la tensione di progetto dell'acciaio delle armature.

La resistenza di progetto del calcestruzzo confinato, f_{ccd} , può essere valutata come segue:

$$\frac{f_{ccd}}{f_{cd}} = 1 + 2.6 \cdot \left(\frac{f_{l,eff}}{f_{cd}} \right)^{2/3}, \quad (4.6)$$

essendo:

- f_{cd} la tensione di progetto del calcestruzzo non confinato,
- $f_{l,eff}$ la pressione efficace di confinamento.

Il coefficiente k_{mat} per le colonne di conglomerato cementizio armato è assunto pari a:

$$k_{mat} = 0,217 \cdot \left(\rho_{mat} \cdot \frac{f_{c,mat}}{f_{cd}} \right)^{3/2} \leq 1. \quad (4.7)$$

4.3.1 Confinamento di colonne rettangolari

Il confinamento mediante FRCM di elementi a sezione quadrata o rettangolare di conglomerato cementizio armato segue le stesse regole delle colonne in muratura, salvo la variante di seguito elencata:

$$k_H = 1 - \frac{b'^2 + h'^2}{3 \cdot A_c}, \quad A_c = b \cdot h \quad (4.8)$$

5 DETTAGLI COSTRUTTIVI

I dettagli costruttivi da curare nella messa in opera di un sistema di rinforzo FRCM dipendono dalla geometria della struttura, dalla natura e consistenza del supporto e dal livello tensionale al quale è sottoposto.

L'utilizzatore deve attenersi scrupolosamente alle istruzioni contenute nel manuale di installazione, che il Fabbrikante è tenuto a fornire insieme con il sistema di rinforzo.

Poiché la qualificazione dei sistemi FRCM è fatta con riferimento a supporti convenzionali, è consigliato, soprattutto per interventi di rilevante importanza strutturale, il ricorso a prove di distacco dallo specifico supporto da rinforzare. Le prove devono essere condotte secondo lo standard prescritto nella "Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti".

In particolare, i meccanismi di rottura di distacco dal supporto e di sfilamento delle fibre dalla matrice possono essere mitigati osservando le seguenti regole di dettaglio.

In tutti i casi in cui il sistema di rinforzo FRCM debba essere applicato intorno a spigoli, quest'ultimi devono essere opportunamente arrotondati ed il raggio di curvatura dell'arrotondamento deve essere almeno pari a 20 mm. Tale arrotondamento può non essere necessario per tessuti in acciaio, anche in relazione a quanto dichiarato dal Fabbricante, purché suffragato da prove sperimentali. Il progettista dovrà richiamare l'attenzione a quanto indicato nel manuale di installazione del prodotto che sarà utilizzato anche in relazione al dispositivo di piegatura che deve essere utilizzato per realizzare le piegature.

Deve essere assicurata un'adeguata lunghezza di ancoraggio, che in mancanza di più accurate indagini deve essere di almeno 300 mm.

Deve essere assicurata un'adeguata sovrapposizione delle reti di rinforzo. Negli interventi di confinamento la lunghezza di sovrapposizione deve essere almeno pari a 300 mm. Particolari indicazioni devono essere fornite per interventi di confinamento con reti di acciaio; in considerazione dello spessore e della conseguente rigidità flessionale di questi sistemi di rinforzo, tali indicazioni dovranno tenere in considerazione anche gli effetti flessionali del disallineamento tra gli strati sovrapposti soggetti a trazione. Tutte le suddette indicazioni dovranno trovare riscontro nei manuali di installazione forniti dai Fabbricanti dei sistemi che saranno messi in opera.

Negli altri tipi di intervento, benché sconsigliate, sono possibili lunghezze di sovrapposizione inferiori a 300 mm, purché qualificate dal Fabbricante in occasione del conseguimento del CVT.

L'utilizzo di più strati di rinforzo all'interno del sistema FRCM deve essere giustificato dal progettista.

Qualora fosse previsto l'utilizzo di più strati, il processo di messa in opera dovrà seguire le modalità previste nel manuale di installazione.

In presenza di più strati di rinforzo, le sovrapposizioni devono essere opportunamente sfalsate. Sono sconsigliati sfalsamenti inferiori alla metà dello spessore dell'elemento rinforzato, con un minimo di 300 mm.

Negli interventi di solo confinamento, può essere opportuno lasciare una zona non rinforzata alle estremità, allo scopo di evitare che pressioni di contatto locale possano causare fenomeni di rottura fragile e distacco dal supporto.

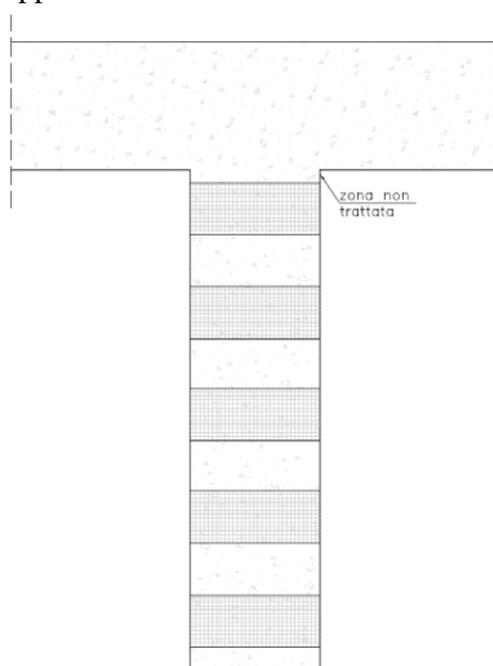


Fig. 7- Dettaglio di intervento di solo confinamento (prospetto)

Il progetto dovrà contenere indicazioni sull'utilizzo di eventuali connettori. L'uso dei connettori può infatti risultare, in funzione dei casi specifici di applicazione, utile o anche indispensabile. Si forniscono al riguardo i seguenti suggerimenti di dettaglio.

Se il sistema di rinforzo FRCM è applicato su una sola faccia del pannello, è obbligatorio adottare connettori di lunghezza tale da penetrare all'interno dello strato più esterno del paramento non rinforzato.

Nel caso di rinforzo su due facce di murature a sacco o con paramenti scollegati, o in assenza di diatoni in numero adeguato, è obbligatorio adottare connettori passanti.

Valori di riferimento del numero dei connettori da utilizzare variano tra 2 e 4 al mq di superficie, in funzione dello spessore murario e della qualità muraria, disposti a quinconce come illustrato in Figura 8. E' inoltre opportuno infittire i connettori in corrispondenza dei cantonali e dei martelli murari, come esemplificativamente mostrato nella Figura 9.

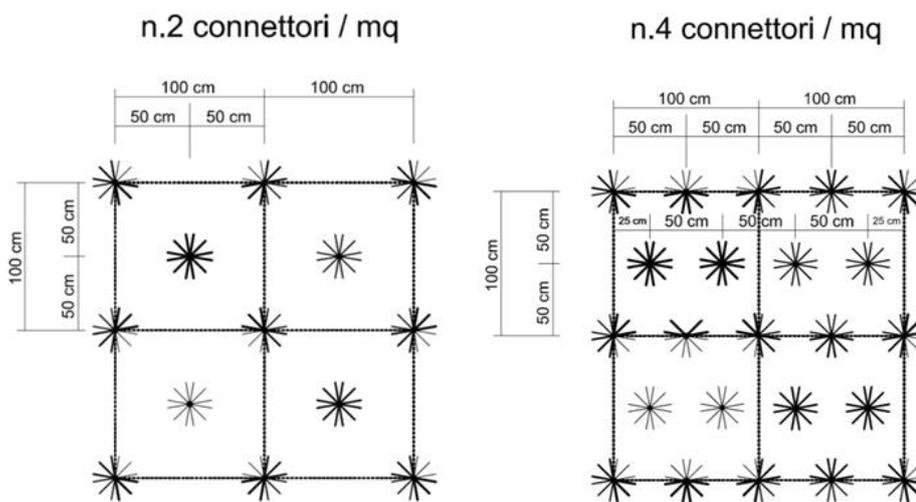


Fig. 8- Schemi esemplificativi di disposizione dei connettori

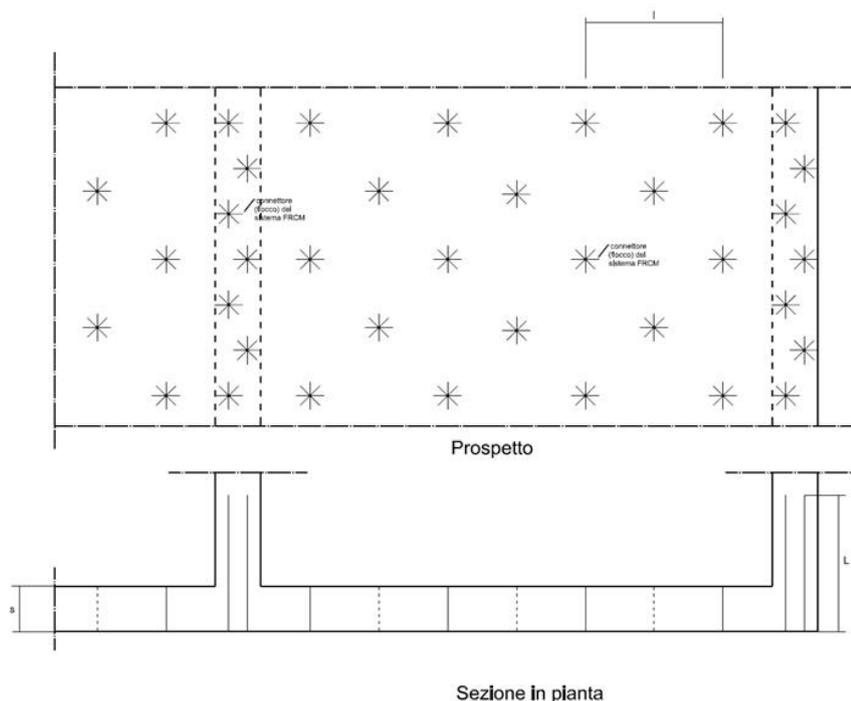


Fig. 9- Intervento di rinforzo di parete in muratura con sistema FRCM e connettori (prospetto e pianta)

In alcuni casi può risultare necessario trasferire le azioni di trazione del sistema di rinforzo anche attraverso un maschio murario ovvero in un cantonale, per realizzare una fascia di piano. In questi casi il progettista dovrà valutare attentamente il dettaglio costruttivo, al fine di garantire la continuità o l'ancoraggio in modo adeguato, anche utilizzando tipologie di sfioccamento o di sovrapposizione. Tali indicazioni dovranno trovare riscontro nei manuali di installazione forniti dai Fabbricanti dei sistemi che saranno messi in opera.

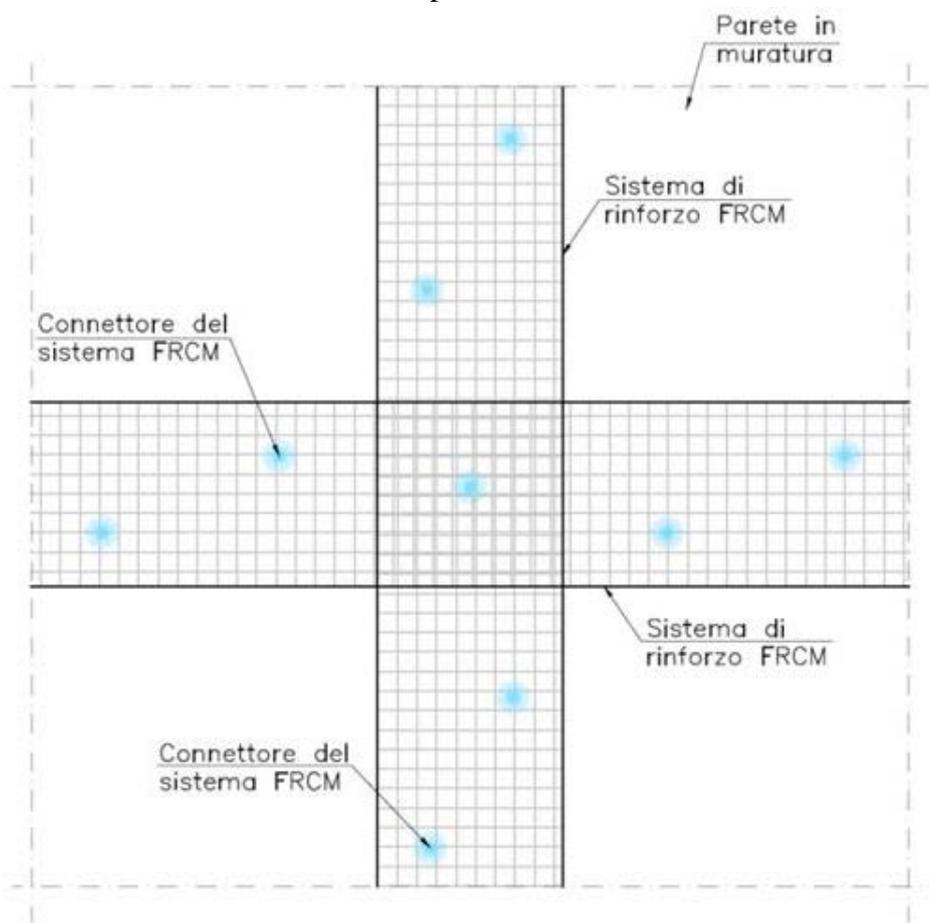


Fig. 10- disposizione dei connettori nelle fasce di rinforzo nel caso di cordolature di piano (prospetto)

6 MANUTENZIONE E RIPARAZIONE

Gli interventi di riparazione con FRCM devono essere monitorati nel tempo con verifiche periodiche, dipendenti dalle condizioni di esposizione e dall'impegno strutturale del rinforzo. In tali occasioni devono essere rilevati eventuali danneggiamenti, di cui vanno individuate le cause ed i possibili rimedi. A tal fine possono risultare utili, oltre che indagini non distruttive, quali ispezioni visive, indagini ultrasoniche e indagini termografiche, anche indagini distruttive o parzialmente distruttive.

Gli interventi di riparazione del sistema di rinforzo dipendono dalla causa del danneggiamento nonché dal tipo di FRCM e dalla tipologia ed estensione del danno, e devono essere oggetto di specifico progetto.

Nel caso di rifacimento delle superfici protettive (intonaci), può essere necessario ispezionare il sistema di rinforzo FRCM per valutare eventuali danni allo stesso a seguito della rimozione della superficie protettiva.

7 CONTROLLO

Il controllo del sistema di rinforzo deve essere svolto sia per l'accettazione dei prodotti in cantiere che per accertare la qualità della messa in opera del sistema stesso. Una volta che l'intervento di rinforzo sia stato realizzato, è necessario procedere al suo controllo ai fini del collaudo e, in seguito, al suo eventuale monitoraggio nel tempo. In entrambi i casi è possibile ricorrere sia a prove non distruttive che a prove parzialmente distruttive. Le prove devono essere eseguite da personale qualificato.

Qualora la configurazione del rinforzo lo consenta, come ad esempio nel caso di applicazioni in avvolgimento, ovvero in presenza di idonei dispositivi di ancoraggio, talune verifiche a carico del substrato possono essere omesse.

Per la trattazione estesa della tipologia e modalità dei controlli si rimanda alla normativa vigente e ai documenti citati in Premessa, ed in particolare alla "*Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti*", e al documento CNR-DT 215/2018 e successive modificazioni ed aggiornamenti.

8 PROVE SPERIMENTALI SU ELEMENTI STRUTTURALI

Per l'esecuzione di prove sperimentali sui sistemi di rinforzo FRCM si può fare utile riferimento a quanto indicato nella "*Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti*", relativamente al tipo e alle modalità delle prove per la caratterizzazione del comportamento meccanico dei sistemi.

La suddetta Linea Guida prende in considerazione l'applicazione dei rinforzi unicamente su supporti in calcestruzzo o muratura; le modalità di prova e di analisi ivi descritte possono comunque essere un utile riferimento anche per la sperimentazione su elementi strutturali di diverso materiale.

Nel caso di applicazioni differenti da quelle indicate ai paragrafi 3 e 4 del presente documento (rinforzo di elementi strutturali in muratura o calcestruzzo), la progettazione dell'intervento deve essere integrata da prove da condurre nel rispetto di quanto indicato al punto 4.5.12. "Progettazione integrata da prove e verifica mediante prove" delle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni e delle procedure illustrate nella Appendice D della UNI EN 1990. Tali prove possono essere previste in due casi:

- Sperimentazione a carattere generale condotta dal Fabbricante per permettere applicazioni al di fuori di quanto previsto nei paragrafi citati e resa disponibile ai Progettisti. Il documento sperimentale/analitico che deriva da questa campagna deve avere valore almeno nazionale, ed indicare anche i limiti di applicazione in termini di tipo e quantità di rinforzo, le caratteristiche meccaniche/geometriche della classe di elementi che si possono rinforzare, i limiti massimi in termini di incremento di capacità portante o deformativa raggiungibili. È responsabilità del Progettista verificare la corretta interpretazione delle prove condotte e l'applicabilità dei risultati ottenuti dal Fabbricante al caso in esame.

- Sperimentazione *una tantum* prevista dal Progettista (o dal Direttore dei Lavori) per l'approvazione di un progetto specifico. Il Fabbricante non è necessariamente coinvolto. Il programma di prove è ridotto potendosi considerare noti i valori di molti dei parametri quali quelli riscontrati nella specifica applicazione.

Come indicato nel paragrafo 4.5.12. delle Norme Tecniche per le costruzioni, la resistenza e la funzionalità dell'intervento di rinforzo deve essere misurata attraverso prove su campioni di

adeguata numerosità. I risultati delle prove, eseguite su opportuni campioni, devono essere trattati con i metodi dell'analisi statistica, in modo tale da ricavare parametri significativi quali media, deviazione standard e quando possibile fattore di asimmetria della distribuzione, sì da caratterizzare adeguatamente un modello probabilistico descrittore delle quantità indagate (considerate come variabili aleatorie).

Per quanto riguarda i dettagli ed metodi operativi completi per la progettazione integrata da prove, reperibili nella Appendice D della UNI EN 1990, si sottolineano i seguenti aspetti (la variabilità dei parametri va esplorata nel caso di sperimentazione a carattere generale condotta dal Fabbricante):

- Prove su elementi strutturali rinforzati con FRCM sono da intendersi ai sensi di quanto dettagliato al punto d) del Paragrafo D3 (Tipi di prove), ed in particolare *“prove per ridurre le incertezze nei parametri impiegati nei modelli di resistenza; per esempio, le prove degli elementi strutturali o degli assemblaggi di elementi strutturali”*. Pertanto, il comma (2) del citato paragrafo indica che *“I valori di progetto da impiegare nelle prove dovrebbero, ove possibile, essere derivati dai risultati delle prove applicando tecniche statistiche consolidate. Vedere da D5 a D8”*;

- Il paragrafo D4 – Pianificazione dei test indica le modalità di impostazione e gli scopi della campagna sperimentale; in particolare, i campioni e le modalità di prova devono, per quanto possibile, riprodurre condizioni prossime a quelle delle applicazioni reali, in termini di materiali (dell'elemento strutturale e del rinforzo), di modalità di applicazione del carico, di dimensioni dei provini, in modo da ridurre il più possibile l'insorgenza di differenti modalità di rottura dovute all'effetto scala. Inoltre, le proprietà dei materiali base utilizzati nelle prove devono essere specificate con adeguato dettaglio ed essere analoghe per quanto possibile con quelle dei materiali riscontrati nelle applicazioni.

- La procedura deve innanzitutto condurre a definire un modello di resistenza per l'applicazione oggetto di test, e riferita alla tipologia di elemento strutturale da rinforzare, in grado di riprodurre con buona affidabilità, ed eventualmente introducendo ipotesi a favore di sicurezza, i valori dei test sperimentali.

- I due possibili metodi di derivazione dei valori di progetto dalle risultanze sperimentali sono descritti al Paragrafo D5 – Derivazione dei valori di progetto delle citate UNI EN 1990. Tipicamente, nelle usuali situazioni, è applicabile il metodo (a) *“stimando un valore caratteristico, che è quindi diviso per un coefficiente parziale e possibilmente moltiplicato, se necessario, per un coefficiente di conversione esplicito (vedere D7.2 e D8.2)”*. I criteri per ricavare i valori caratteristici ed i fattori parziali relativi allo specifico modello di resistenza sono illustrati nel paragrafo D6 – “Principi generali per valutazioni statistiche” e dettagliati nel paragrafo D8 – “Determinazione statistica dei modelli di resistenza”.

- I passi da seguire per formulare e calibrare un modello di resistenza funzione di un prefissato numero di variabili (parametri meccanici o geometrici) statisticamente indipendenti e descrivibili da una funzione gaussiana o log-normale, sulla base di un numero sufficiente di risultati di test sperimentali, sono illustrati nel Paragrafo D8 delle citate UNI EN 1990. Devono essere esplorate tutte le dipendenze più significative dalle variabili, e per ogni combinazione prescelta dei parametri devono essere realizzati almeno tre test al fine di ridurre le incertezze di tipo sperimentale. Nella calibrazione del modello di resistenza, devono essere utilizzati i valori dei parametri di ingresso effettivamente misurati sui prototipi realizzati.