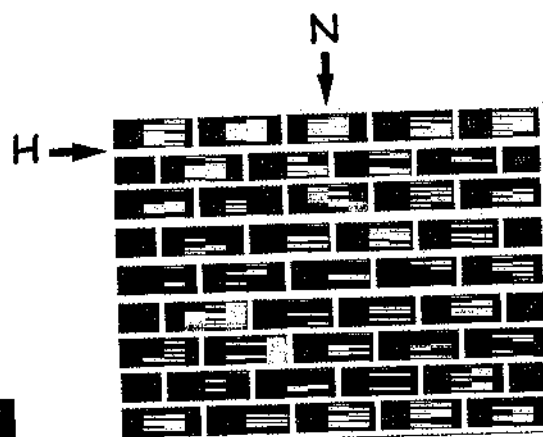


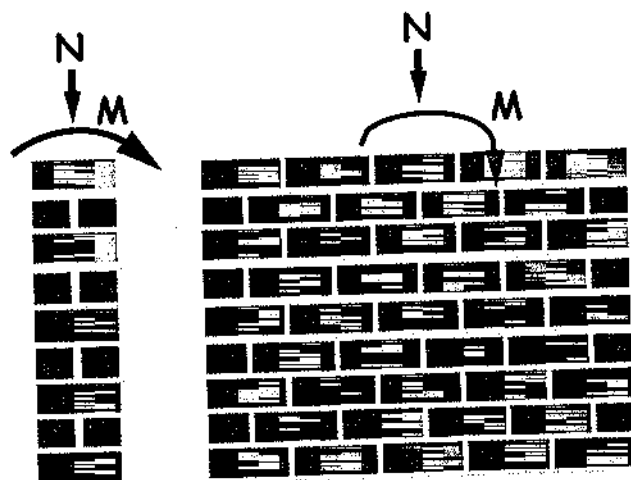
## Il consolidamento dei paramenti murari

# FRP

(a)



(b)



di **Roberto Troli**  
Enca (Engineering Concrete)  
Spesimo, Treviso  
rob@enca.it

**Mario Collepardi**  
Politecnico di Milano,  
Facoltà di Ingegneria,  
mario.collepardi@polimi.it

L'utilizzo di materiali compositi ad altissime prestazioni, noti con l'acronimo FRP (Fiber Reinforced Polymers) ha avuto, in Italia, un notevole impulso nelle operazioni di restauro strutturale e adeguamento statico degli edifici esistenti. Ciò è accaduto a partire dalla seconda metà degli anni '90, alla stregua di quanto era già avvenuto in precedenza in Giappone e negli Stati Uniti. Il maggior numero di interventi eseguiti con questi materiali, almeno fino al 1998, ha riguardato il consolidamento di strutture in cemento armato, mentre solo in pochi casi si è intervenuto su edifici in muratura.

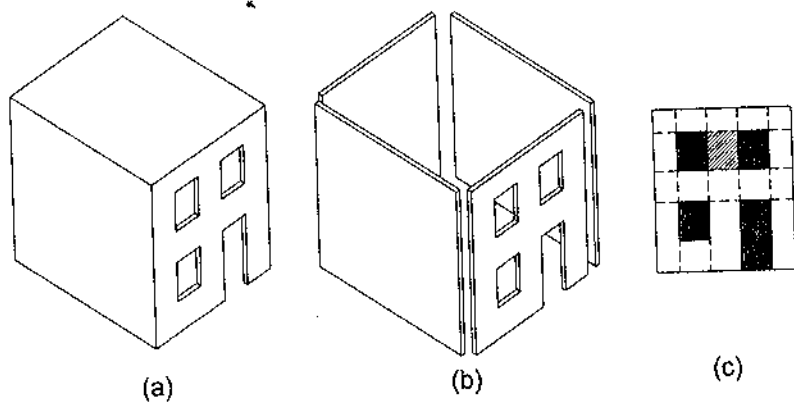
Gli eventi sismici del 1997, nelle Marche e in Umbria, hanno, una volta di più, messo in evidenza l'incapacità di buona parte degli edifici in muratura, sia storici che di recente costruzione, di resistere alle azioni derivanti dal sisma e hanno sottolineato l'inadeguatezza di alcune tecniche di consolidamento antisismico ampiamente utilizzate nel recente passato.

Questi fattori hanno indotto molti progettisti a prevedere l'uso di rinforzi esterni in FRP in svariati interventi di consolidamento e di adeguamento antisismico, sia in fase preventiva che a seguito di dissesto, sfruttando le doti di leggerezza di questi mate-

riali, che non aumentano le masse sismiche in gioco, e la loro capacità di migliorare il comportamento della muratura senza stravolgerne il funzionamento.

Altro fattore che ha favorito il diffondersi di queste tecniche di intervento, soprattutto negli edifici di un certo interesse storico, è stato anche il mutato atteggiamento delle soprintendenze. Esse hanno abbandonato lo storico atteggiamento di rifiuto nei confronti dell'utilizzo di materiali, ritenuti a torto, "non compatibili" con quelli presenti nelle murature antiche, e hanno riconosciuto le spiccate caratteristiche di "non invasività" e di quasi completa reversibilità di queste tecniche di intervento. Da questo punto di vista si può affermare che il grande volano dell'utilizzo dei materiali compositi nelle murature antiche siano stati gli interventi di messa in sicurezza, prima, e di consolidamento, poi, delle volte della basilica di S. Francesco ad Assisi [1] in buona parte realizzati ricorrendo all'uso di rinforzi in FRP.

Tuttavia, molti progettisti, pur manifestando interesse verso queste tecniche di intervento, rinunciano al loro utilizzo per la totale mancanza di normative di riferimento e di una metodologia di calcolo



consolidata. Questo articolo si propone di eseguire una breve panoramica sulle varie tipologie di intervento che possono essere messe in atto nel consolidamento di elementi murari, mediante applicazione di rinforzi esterni in FRP, cercando di evidenziarne i limiti di applicazione ed alcuni accorgimenti da prendere in fase progettuale ed esecutiva per ovviare, in particolare, alla mancanza di modelli di calcolo completamente affidabili.

### I pannelli murari

I metodi più diffusi per il calcolo e la verifica statica delle murature partono dalla suddivisione ideale di un organismo edilizio in paramenti murari e di ciascun paramento in pannelli (figura 1). Il singolo pannello murario, isolato dal contesto, risulterà sollecitato da azioni verticali (peso proprio e delle elevazioni sovrastanti) e da azioni orizzontali, che potranno derivare dal sisma, dalla spinta di elementi voltati e dall'interazione con pannelli murari adiacenti. Nella schematizzazione di calcolo si suole trattare separatamente il caso del pannello soggetto ad azioni tutte contenute nel proprio piano (figura 2a) e quello di pannello sottoposto ad azioni cosiddette fuori dal piano, anche se la dizione più esatta sarebbe quella di azioni ortogonali al piano del pannello". (figura 2b).

Con riferimento alla prima condizione di carico, se immaginiamo di aumentare la forza orizzontale  $H$ , fino alla crisi, questa si manifesterà, come è noto, con formazione di una lesione obliqua che si propagerà, prevalentemente, lungo i giunti di malta (figura 3a). L'andamento puntuale della lesione dipenderà dalla tessitura muraria del pannello e dalle caratteristiche meccaniche della malta e dei conci, ma la sua inclinazione media sarà funzione dal rapporto assunto a rottura tra  $H_{lim}$  e  $N$ . Il tipo di crisi che si verifica in questi casi prende il nome di collasso per taglio-compressione.

Volendo consolidare un pannello murario soggetto a taglio-compressione, utilizzando rinforzi esterni in FRP, si potrà procedere disponendo, su entrambe le facce del muro, rinforzi con le fibre disposte a cavallo dei possibili piani di frattura. Normalmente, si opera disponendo una serie di strisce di rinforzi di tipo unidirezionale, sia in direzione verticale, che in direzione orizzontale (figura 3b). Prove sperimentali di compressione diagonale (ASTM E 519-81) e di taglio-compressione, eseguite su pannelli murari in pietra e in laterizio, isolati da murature reali e rinforzati con tessuti in fibra di vetro o carbonio [2], hanno evidenziato un aumento della tensione tangenziale massima, a rottura del 60% rispetto al valore valutato nel pannello non rinforzato. L'incremento osservato è risultato indipendente dal tipo di fibra utilizzato (vetro o carbonio) in quanto, in tutti i casi, la crisi è avvenuta per distacco

SOPRA

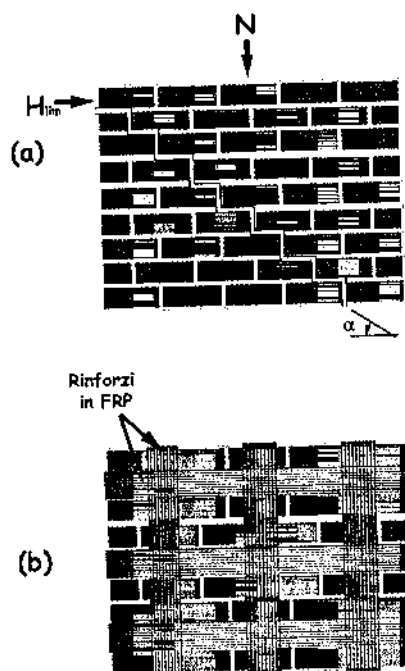
1. Schematizzazione di un organismo edilizio in pannelli murari.

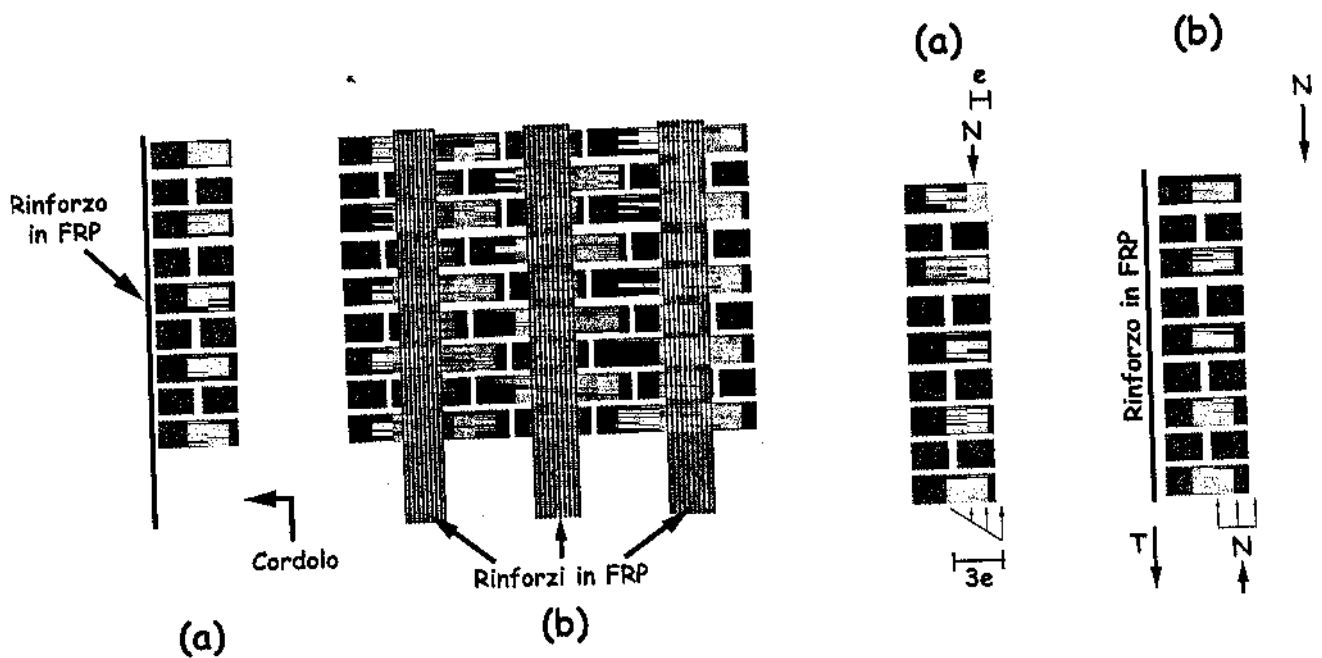
IN APERTURA

2. Schematizzazione delle sollecitazioni che possono interessare i pannelli murari: azioni contenute nel piano (a); schematizzazione delle sollecitazioni che possono interessare i pannelli murari: azioni "fuori dal piano" (b).

SOTTO

3. Tipo di collasso per un pannello sottoposto a taglio-compressione (a); esempio di ripristino con rinforzi esterni in FRP (b).





4. Disposizione dei rinforzi in un pannello soggetto ad azioni "fuori dal piano".

5. Schema di funzionamento di una muratura non armata soggetta a presso-flessione (a); schema di funzionamento di una muratura rinforzata con FRP, soggetta a presso-flessione (b).

all'interfaccia tra la muratura e la malta cementizia che era stata utilizzata per regolarizzare la superficie muraria. La presenza di questo "anello debole", nella catena fibra-resina-malta-muratura, ha impedito, pertanto, il pieno sfruttamento delle risorse di resistenza dei rinforzi.

Il dimensionamento delle sezioni di rinforzo e la verifica statica del sistema appaiono tutt'altro che agevoli, sebbene la scelta del tipo e dell'orientamento dei rinforzi per il consolidamento di pannelli murari, sollecitati nel proprio piano, sia semplice ed intuitiva. Infatti, poichè la crisi avviene, quasi sempre, per perdita di aderenza tra rinforzi e muratura, un dimensionamento della sezione dei rinforzi, eseguito facendo semplicemente riferimento alle trazioni in gioco, porta a sovrastimare la capacità portante ultima del pannello. Il problema, come sarà meglio evidenziato nel seguito, nasce dal fatto che, tranne che in condizioni di carico molto semplici ed irreali per le murature, non si conosce una soluzione analitica in forma chiusa e sufficientemente attendibile per valutare lo stato tensionale all'interfaccia tra rinforzo ed elemento rinforzato. A. Rocco e altri [3] hanno studiato una simulazione numerica del comportamento di pannelli murari sollecitati nel proprio piano, rinforzati esternamente con fibre disposte secondo direzioni variabili. I risultati ottenuti sono interessanti ed evidenziano i tipi di collasso raggiunti in funzione del tipo, della quantità e dell'orientamento del rinforzo fibroso. Tuttavia, la tecnica analitica, per la sua complessità, non si presta ad un utilizzo nei calcoli "di ogni giorno" e, soprattutto, è soggetta alla limitazione che le fibre sono pensate come distribuite

uniformemente su tutta la superficie del pannello. Nella pratica progettuale, quindi, si finisce per operare con approccio empirico, imponendo una forte limitazione alle deformazioni ammissibili nel rinforzo (ad esempio, si ipotizza una deformazione limite dello 0.7% per il carbonio ad alta resistenza o dell'1.0% per il vetro e l'aramide). Questa limitazione serve, nella maggior parte dei casi, a scongiurare una crisi per distacco tra rinforzo e muratura, ma equivale, ovviamente, a ridurre fortemente le tensioni di calcolo a rottura nel rinforzo.

**Le murature sollecitate "fuori dal piano"** Nei pannelli murari, sottoposti ad azioni "fuori dal piano", le lesioni, come è comprensibile, tendono a formarsi lungo superfici orizzontali (o pseudo-orizzontali, in caso di apparecchiature murarie irregolari) a partire dalle zone soggette alla massima sollecitazione flettente. Negli interventi di consolidamento o ripristino con FRP, quindi, si dispone un certo numero di rinforzi uniassiali in direzione verticale (figure 4a,b) sulla faccia soggetta a trazione o su entrambe le facce, in caso di azione ciclica come quella derivante dal sisma. Come risultato del rinforzo si ottiene un sistema composto muratura-FRP sollecitato a presso-flessione che, contrariamente a quanto avviene per le murature ordinarie (figura 5a), risulta in grado, grazie alla presenza dell'armatura esterna, di sopportare una sollecitazione con risultante  $N$  esterno alla sezione di base del pannello (figura 5b).

Campagne sperimentali condotte su pannelli murari di vario tipo, rinforzati con fibre di vetro e sottoposti a presso-flessione con componente fletten-

te variabile ciclicamente, a simulare l'azione sismica [4], hanno evidenziato la grande capacità dei sistemi misti muratura-FRP di assorbire carichi flettenti e di esibire deformazioni laterali di un ordine di grandezza maggiori di quelle massime ammesse nei codici statunitensi per la muratura non armata. Anche in questo caso, la crisi nei pannelli sottoposti a prova è avvenuta, quasi sempre, per distacco tra rinforzo e muratura (delaminazione).

Il calcolo di un pannello murario, armato con rinforzi esterni in FRP, e/o sollecitato a pressoflessione, può essere condotto con i metodi classici utilizzati per il calcolo delle travi in c.a. opportunamente adattate alle caratteristiche meccaniche della muratura. Eshani e altri [5], hanno analizzato il comportamento di pannelli in muratura di laterizio, caratterizzati da vari rapporti altezza/spessore, rinforzati con rinforzi in fibra di vetro, appoggiati ad entrambe le estremità e sottoposti ad una pres-

**Le murature a sacco** Le tecniche di intervento sopra descritte possono non portare a risultati apprezzabili se applicate a tipologie murarie, peraltro molto ricorrenti in passato, come i "muri a sacco". Il punto debole di questo tipo di murature, infatti, sta nello scarso collegamento che, spesso, si verifica tra le due fodere esterne del corpo murario. Per questo motivo, nel caso di eccessive sollecitazioni verticali, il muro tende a "spanciare" lateralmente, mentre nel caso di azioni orizzontali dinamiche, come quelle dovute al sisma, i tre elementi che compongono il muro (il sacco e le due fodere) tendono a comportarsi come elementi a sè stanti, determinando, spesso, una crisi per crollo della fodera esterna (figura 6). Gli interventi di ripristino o consolidamento di murature a sacco, quindi, devono porsi come primo obiettivo il raggiungimento di un comportamento sufficientemente "monolitico" da parte del muro. Il metodo più utilizzato in questi casi è

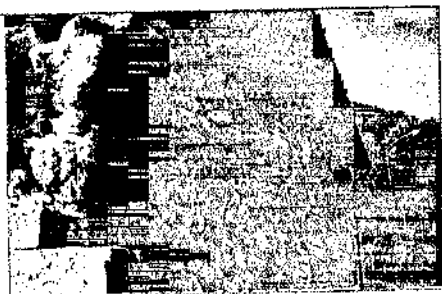
quello basato sull'iniezione di miscele cementizie all'interno della muratura [6]. Se, operando in questo modo, si riesce a conferire sufficiente monoliticità alla muratura a sacco, nel caso necessiti un ulteriore intervento per migliorare la portanza flessionale o a taglio del muro, si potrà pensare di intervenire mediante applicazione di rinforzi esterni in FRP, secondo le tecniche sopra descritte. Qualora, invece, la qualità della muratura a sacco sia tale da non consentire il raggiungimento di

un sufficiente grado di monoliticità dell'insieme, in seguito a semplici iniezioni cementizie, l'aumento della portanza flessionale e a taglio del paramento potrà essere ottenuto soltanto con tecniche di intervento più invasive, come quella basata sulla realizzazione di due intonaci armati (sulle due facce del paramento), collegati con cuciture trasversali, ottenute mediante serie di barre metalliche inserite nella muratura [6].

I singoli pannelli murari, finora considerati isolati, sono, in realtà, parte integrante di un paramento (fig. 1c). La disposizione dei rinforzi in FRP, pertanto, dovrà essere pensata non solo con riferimento alle necessità statiche del singolo pannello nei confronti delle azioni su di esso agenti, ma anche in modo da garantire il corretto collegamento tra i singoli pannelli e il funzionamento d'insieme del paramento. Nel caso di una facciata che presenti varie aperture, ad esempio, occorrerà operare in modo da garantire il funzionamento "a telaio" dell'insieme nel piano della muratura (figura 7).

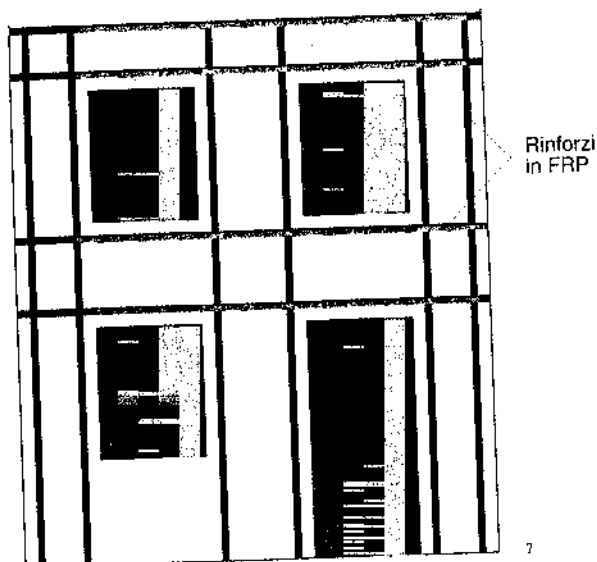
Una tecnica convenzionale di consolidamento, per

6. Crollo della fodera esterna in una muratura a sacco di un edificio soggetto al sisma del '97 in Umbria.



sione laterale uniformemente distribuita. Essi hanno evidenziato come un calcolo basato su un approccio agli stati limite, considerando una deformazione ultima dello 0,3% per la muratura e del 2% per il rinforzo, porta ad una sovrastima della capacità portante effettiva del pannello valutata mediante prove sperimentali.

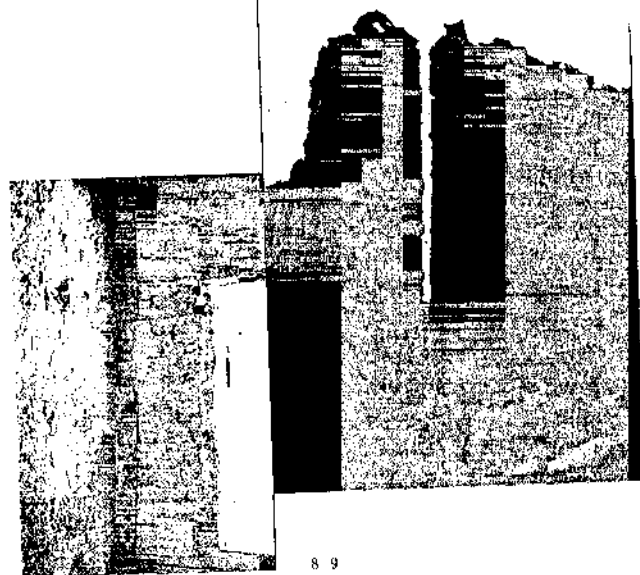
Secondo gli autori ciò sarebbe dovuto al fatto che la crisi di queste strutture è governata dalla delaminazione del rinforzo dalla muratura e che questo fenomeno avviene quando entrambi i materiali sono ancora lontani dalla loro deformazione limite. Sempre secondo gli autori, quindi, il calcolo di questi sistemi può essere condotto considerando, ragionevolmente, un comportamento elastico lineare per entrambi i materiali e utilizzando le normali formule per il dimensionamento delle sezioni in cemento armato, inflesse con il metodo delle tensioni ammissibili. Per prevenire problemi di delaminazione, gli autori suggeriscono di considerare una deformazione massima ammissibile per il rinforzo pari all'1%.



7. Schematizzazione della possibile disposizione di rinforzi esterni in FRP per garantire il funzionamento "a telaio" di una facciata in muratura.

8. Insufficiente grado di ammorsamento tra paramenti murari in una giunzione d'angolo.

9. Testata d'angolo disintegrata da un evento sismico a causa del cattivo collegamento tra i due paramenti murari.



ottenere questo tipo di risultato, consiste nell'eseguire perforazioni a secco che attraversino tutta la muratura nel proprio piano, sia in direzione verticale che orizzontale, nelle quali vengono inserite catene e tiranti metallici. È evidente come l'intervento eseguito mediante utilizzo di rinforzi esterni in FRP risulti meno invasivo per l'organismo edilizio che, a volte, subisce danni a causa di estese e fitte trivellazioni. Inoltre, non richiedendo complesse e costose attrezzature, questo tipo di operazione risulta più facile da porre in atto e, in buona parte, removibile.

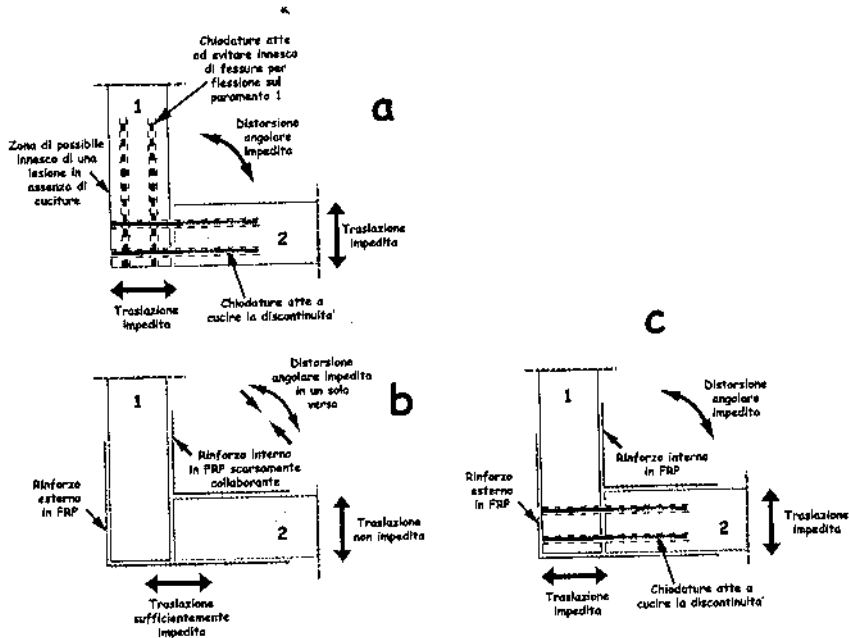
### Organismo edilizio e rigidità scatolare

Il buon comportamento in campo sismico di un edificio in muratura è legato al conseguimento di una sufficiente rigidità scatolare, la quale dipende, non solo da una corretta distribuzione dei setti murari lungo le due direzioni ortogonali, ma anche, e soprattutto, dal buon livello di "ammorsamento" che si registra tra gli stessi.

È ben noto che molti edifici storici, in ragione delle modifiche e degli ampliamenti subiti nel corso della loro esistenza, o solo perché costruiti in adiacenza ad edifici preesistenti, presentano, spesso, giunzioni tra setti murari caratterizzate da uno scarso grado di ammorsamento (fig. 8). In caso di sisma, pannelli murari ortogonali non bene ammorsati, subiscono deformazioni diverse in base alla rigidità flessionale che ciascuno di essi possiede nella direzione di provenienza del sisma. L'interazione che ne deriva, all'interfaccia tra i due pannelli, può portare anche alla disintegrazione del giunto (fig. 9).

L'intervento di consolidamento tipico, in caso di scarso ammorsamento tra pannelli murari ad angolo, consiste nell'inserire all'interno della muratura delle chiodature realizzate con barre metalliche ad aderenza migliorata (figura 10 a). Normalmente, oltre alle chiodature poste in modo da cucire la discontinuità presente nel giunto ed unire i due pannelli murari, si provvede ad inserire delle chiodature anche in direzione ortogonale, lungo il piano del pannello di testa (pannello I in figura 10 a). Queste chiodature hanno il compito di evitare l'apertura di fessure dovute sia alla concentrazione delle tensioni prodotte dalle barre poste in direzione ortogonale alla lesione, sia per effetto di possibili deformazioni di distorsione angolare tra i due pannelli, che provocano l'insorgere di sollecitazioni di flessione.

Molti progettisti si sono adoperati nel cercare di sostituire gli interventi di cucitura dei giunti tra pannelli murari, con tecniche meno onerose ed invasive, legate all'utilizzo di rinforzi esterni in FRP. Il problema non è di agevole soluzione in quanto, come è facilmente comprensibile, i rinforzi in lamine di FRP non sono in grado di resistere ad azioni agenti al di fuori del loro piano (come si può notare in figura 10b, dove viene schematizzato un possibile intervento su un giunto d'angolo con rinforzi esterni in FRP). Infatti, il rinforzo applicato all'interno del giunto non è in grado di opporsi a deformazioni che tendano ad aprire l'angolo tra i paramenti e, per motivi di aderenza, non collabora sufficientemente ad impedire i movimenti traslatori relativi in entrambe le direzioni. Dal canto suo, il rinforzo posto all'esterno del giunto d'angolo può opporsi soltanto a movimenti traslatori in direzione ortogonale al piano del-



le discontinuità, e a distorsioni angolari che portano ad una chiusura dell'angolo compreso tra i due pannelli, mentre non può offrire alcun contributo per impedire gli altri movimenti. L'utilizzo di rinforzi in FRP in aggiunta alla chiodatura principale (quella che attraversa la discontinuità), però, può risolvere il problema di distribuire meglio le tensioni trasmesse dalle barre, consentendo l'eliminazione delle chiodature in direzione ortogonale (figura 10c).

Nel caso di giunto a T, per le ragioni già evidenziate, non è pensabile eseguire un consolidamento usando rinforzi esterni in FRP in sostituzione, anche parziale, delle classiche chiodature (fig. 11 a,b).

Di recente, sono stati realizzati interventi di chiodatura di giunti murari, in cui al posto delle normali barre in acciaio ad aderenza migliorata sono state introdotte barre pultruse in FRP (in fibra di vetro o aramide). Allo stato attuale, però, non sembra che questa sostituzione possa portare vantaggi, dal punto di vista tecnico, rispetto alla soluzione classica con rinforzi metallici, tali da giustificare il consistente aumento dei costi che comporta.

### La scelta del tipo di rinforzo

Nelle pagine precedenti è stato più volte messo in evidenza come, nei pannelli murari placcati con rinforzi in FRP, la crisi sia governata dal problema della perdita di aderenza tra rinforzo e muratura e che, nelle varie esperienze condotte in laboratorio o su pannelli isolati da murature reali, quasi mai si sia riscontrata una crisi per rottura a trazione nei rinforzi. Analoghi risultati sono stati registrati nel placcaggio con FRP di volte a botte e a crociera [7] dove,

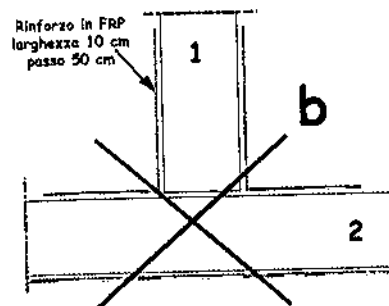
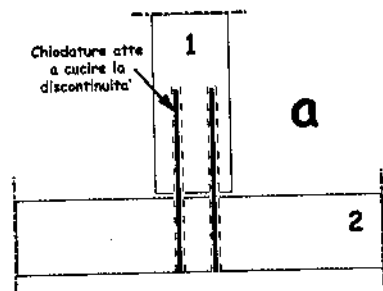
inoltre, elaborando un modello di calcolo, si è riscontrato che il meccanismo di collasso e il carico portato a rottura non dipendono dal modulo elastico dei rinforzi ma solo, teoricamente, dalla loro resistenza a trazione.

In Tabella 1 sono riportate le caratteristiche meccaniche dei più comuni tipi di fibre disponibili sul mercato per il rinforzo strutturale. Se si confrontano, ad esempio, le prestazioni del carbonio ad alta resistenza con quelle del vetro E, ci si accorge che queste differiscono soprattutto nel modulo elastico che nel carbonio è circa 3,3 volte maggiore rispetto al vetro. La resistenza meccanica a trazione del carbonio, invece, risulta circa 1,7 volte quella del vetro. Ciò vuol dire che, a parità di sezione resistente e a parità di deformazioni impresse, le fibre di carbonio attingono a tensioni più che triple rispetto a quelle di vetro e quindi sono, da un punto di vista statico, più efficienti. Per questo motivo, il carbonio ad alta resistenza rappresenta attualmente il materiale più utilizzato nel rinforzo e nell'adeguamento statico delle strutture in cemento armato.

Passando agli edifici in muratura, l'utilizzo delle fibre in carbonio, negli interventi di ripristino e consolidamento, non è sempre giustificato. Il maggior tasso di

10a. Intervento classico per cucire un giunto d'angolo con doppia chiodatura.  
 10b. Intervento errato con rinforzi esterni in FRP.  
 10c. Intervento misto con chiodature e rinforzi esterni in FRP, corretto.

		CARBONIO AD ALTA RESISTENZA	KEVLAR 29	VETRO E
Resistenza trazione	MPa	4600	2800	2650
Modulo elastico	GPa	230	90	75
Deformazione a rottura	%	2.0	3.5	3.5
Massa Volumetrica	Kg/m <sup>3</sup>	1800	1440	2550



11. Intervento classico per cucire un giunto a T (a); impossibilità di intervenire con rinforzi esterni in FRP (b).

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Balsano, "Sorella resina salta S. Francesco", *Eno Journal*, n°5, 1948.
- [2] A. Bortì, in: Corradi, e. Vignoli, "Tecniche di rinforzo delle murature", L'Edilizia, De Lettera, n°5/6, 2000.
- [3] A. Rocca, S. Sorace, G. Terenzi, "Simulazione numerica della risposta di pannelli murari consolidati mediante materiali compositi", L'Edilizia, De Lettera.
- [4] M.R. Ehsani, H. SaadTma-nesh, J.A. Velasquez-Dimas, "Behavior of retrofitted URM walls under simulated earthquake loading", *J. of Composites for construction*, ASCE, agosto, 1999.
- [5] J.A. Velasquez-Dimas, M.R. Ehsani, "Modeling out-of-plane-behavior of URM walls retrofitted with fiber composites", *J. of Composites for construction*, ASCE, novembre, 2000.
- [6] L. Coppola, "Consolidare gli edifici in muratura", *Cosmizzioni, La Fiaccola* n° 5, 1998.
- [7] P. Faccio, P. Foraboschi, "Analisi agli stati limite ultimi di volte in muratura con rinforzi in FRP", L'Edilizia, De Lettera, n°5/6, 2000.
- [8] A.M. Malek, H. SaadTma-nesh, M.R. Ehsani, "Prediction of failure load of R/C beams strengthened with FRP plate due to stress concentration at the plate end", *ACI Structural Journal*, Marzo-Aprile 1998.

sforzo portato, a parità di deformazioni impresse, comporta, infatti, maggiori sollecitazioni taglianti trasmesse, a parità di superficie di ancoraggio alla muratura, determinando crisi per debonding o peeling della muratura che possono avvenire per deformazioni molto limitate (rottura fragile), ossia quando le tensioni nel rinforzo sono ancora lontane dal valore a rottura. In buona sostanza, in molti casi si verifica che l'utilizzo di una fibra più efficiente e pregiata, venga vanificato dalla scarsa qualità ottenibile nell'adesione tra rinforzo e muratura e che, quindi, costosi rinforzi in fibra di carbonio finiscano per fornire la stessa performance di più economici rinforzi in fibre di vetro. L'aramide (Kevlar), infine, non sembra fornire vantaggi apprezzabili rispetto agli altri due tipi di fibra in quanto, ad un costo simile a quello del carbonio ad alta resistenza, associano prestazioni meccaniche non dissimili da quelle del vetro. Per quanto visto sopra, si comprende facilmente come convenga preferire l'utilizzo di rinforzi caratterizzati da bassi valori di "grammatura", ossia di peso di fibra per unità di superficie, e cercare di evitare, laddove possibile, di sovrapporre più strati di rinforzo.

Per quanto riguarda la tipologia di rinforzo da preferire, se il tessuto da impregnare direttamente in opera o la lamina pultrusa già impregnata da incollare con resina in pasta al sottofondo, non esistono in linea di massima preclusioni o preferenze. Solo nel caso in cui occorra eseguire dei risvolti o seguire delle curvature accentuate per assecondare la geometria dell'elemento da rinforzare, non è possibile ricorrere all'uso di elementi pultrusi. Vale la pena far notare, però, come l'utilizzo di lamine pultruse costringa più spesso all'applicazione di generosi strati di materiale all'interfaccia tra rinforzo e muratura, per rendere piana la superficie spesso troppo irregolare della muratura. Questi strati di regolarizzazione vanno poi a costituire, come già visto, l'anello debole del sistema, in quando al loro interno si concen-

trano notevoli deformazioni dovute al trasferimento delle tensioni tra rinforzo ed elemento rinforzato [8]. Per questo motivo, qualora non si potesse prescindere dall'applicazione di strati di regolarizzazione di notevole spessore, è bene non realizzarli con malte cementizie, troppo deboli e caratterizzate da scarsa capacità di adesione alla muratura. E' preferibile ricorrere a sistemi epossidici caricati con inerti di granulometria compatibile con lo spessore da raggiungere, al fine di diminuire i costi e il calore di reazione del legante.

#### Conclusioni

Il consolidamento statico di elementi murari, mediante applicazione di rinforzi esterni in FRP, presenta in molti casi notevoli vantaggi sia in termini di maggiore facilità di applicazione che di minore invasività dell'intervento rispetto ad altre tecniche tradizionalmente utilizzate.

Purtroppo, la scarsa conoscenza dei meccanismi che regolano il trasferimento dei carichi tra rinforzo e muratura e, di conseguenza, della distribuzione degli sforzi all'interfaccia tra i due materiali, rende impossibile un approccio rigoroso al problema del dimensionamento dei rinforzi e alla conseguente verifica degli elementi rinforzati, a meno che non si faccia ricorso a complesse modellazioni numeriche. In assenza di una modellazione analitica del problema dell'aderenza, che tenga presente i vari parametri in gioco, e che sfoci in una o più formule che consentano l'esecuzione di semplici, ma attendibili verifiche di aderenza, per il momento, nel calcolo "di tutti i giorni", conviene affidarsi a generose limitazioni delle deformazioni massime ammissibili per il rinforzo. Inoltre, è consigliabile operare una scelta sensata del tipo e delle caratteristiche del rinforzo da utilizzare e attenersi, in fase esecutiva, al rispetto di alcuni accorgimenti per migliorare l'adesione e il trasferimento degli sforzi.