



## TECNICHE INNOVATIVE DI

# CONSOLIDAMENTO STRUTTURALE

1

di **Benedetto Romano**  
[ingb.romano@virgilio.it](mailto:ingb.romano@virgilio.it)

Nell'affrontare il vasto problema del consolidamento strutturale degli edifici, non si può non fare riferimento alle diverse tipologie costruttive ed è quindi opportuno distinguere due grandi classi:

- > edifici in pietra e/o laterizio;
- > edifici in calcestruzzo armato.

La valutazione della resistenza a carichi statici e sismici di strutture esistenti in cemento armato e in muratura è argomento di grande interesse sia scientifico che pratico in tutto il mondo. Tale interesse scaturisce dal fatto che molte strutture esistenti da un lato manifestano differenti livelli di ammaloramento e dall'altro non soddisfano le vigenti raccomandazioni di progetto ed esecuzione in zona sismica. Nelle due tipologie di edifici sono molto diverse sia le cause e i tempi del degrado, gli effetti del dissesto, i materiali da utilizzare per il consolidamento, nonché le tecniche e la preparazione dei supporti.

Le strutture in c.a. esistenti presentano spesso deficienze strutturali perché progettate secondo vecchi criteri di progetto e quindi inadatte a garantire i livelli di sicurezza strutturale previsti dalle normative vigenti (Eurocodici 2 e 8, 1998, International Conference of Building Officials 2000, OPCM 3274/2003 e le più recenti Norme Tecniche per le Costruzioni DM 14/09/2005). Molti dei collassi che si verificano sono

soprattutto legati ad un'insufficiente presenza di staffature (con conseguente carenza di resistenza a taglio), basso confinamento del calcestruzzo ed eccessiva lunghezza libera delle barre. L'altro problema nelle strutture in c.a. è l'ammaloramento dovuto ad agenti ambientali ed umani: tra le cause più ricorrenti vi è la corrosione delle armature con la conseguente perdita di aderenza fra acciaio e calcestruzzo, l'uso di materiali di scarsa qualità, il danneggiamento a seguito di eventi eccezionali, ecc. Le principali conseguenze dei suddetti problemi sono una o più deficienze strutturali: inadeguata resistenza a flessione per le travi e a pressoflessione per le colonne o per i pilastri, inadeguata resistenza a taglio, inadeguata duttilità, inadeguato ancoraggio delle armature, inadeguato confinamento del calcestruzzo, inadeguata protezione allo svergolamento delle armature longitudinali.

Quanto alle strutture in muratura, queste presentano in genere non trascurabili riserve di resistenza. I malfunzionamenti sono spesso imputabili a deficienze locali che fanno venir meno le necessarie collaborazioni tra le diverse porzioni della struttura, con conseguente instabilizzazione di parte o della totalità dell'edificio, mentre più raramente si riscontrano insufficienze a carico dei singoli elementi strutturali.

La muratura in pietra è presente in tutto il territorio nazionale e presenta, pur nella varietà dei materiali e delle tecniche im-

piegate, problematiche ricorrenti per quanto riguarda sia la vulnerabilità nei confronti delle azioni sismiche, sia l'applicabilità delle tecniche di rinforzo più frequentemente impiegate. Nella maggior parte dei casi si tratta di murature costituite essenzialmente da elementi lapidei, spesso mal collegati tra loro, e da malte di scarsa qualità, sia per composizione che per resistenza. Per questo tipo di murature, spesso mal collegate con gli orizzontamenti, gli effetti dovuti ad incuria, al tempo o ad eventi eccezionali, quali un sisma, possono creare condizioni di dissesto legate sia al comportamento fuori piano delle pareti - come effetto globale (ribaltamento) o locale (espulsione del paramento esterno) - che al comportamento nel piano. Nei casi di non adeguato collegamento tra le pareti contigue e tra gli elementi verticali e orizzontali le pareti vengono impegnate, nell'assorbimento delle forze orizzontali, con sollecitazioni flessionali fuori del piano, che portano le stesse al collasso.

L'intervento di rinforzo deve quindi tendere a mantenere efficienti, in caso di azione sismica, i meccanismi resistenti del comportamento strutturale d'insieme dell'edificio, in primo luogo assicurando i collegamenti tra le varie parti ed eventualmente rinforzando alcuni elementi strutturali fondamentali ai fini di tale comportamento. Una buona connessione tra le pareti e tra pareti e solai, insieme alla presenza di orizzontamenti di adeguata rigidità, consente il comportamento scatolare dell'edificio e la trasmissione delle forze orizzontali ai paramenti murari tale che ciascuno di essi possa reagire nella direzione parallela al proprio piano. Nel campo del recupero strutturale, il progetto di un intervento di consolidamento deve considerare sia il comportamento della costruzione nella sua globalità sia la verifica delle prestazioni dei singoli elementi strutturali (muri, solai, copertura).

I dissesti più comunemente osservati nelle costruzioni di muratura riguardano, infatti, meccanismi globali (rotazioni di porzioni di edifici con conseguente fessurazione estesa delle pareti) e meccanismi più localizzati, che possono interessare l'elemento strutturale nel suo insieme (ribaltamento di intere pareti fuori del piano, scorrimenti rigidi degli orizzontamenti) oppure coinvolgere la resistenza del muro in funzione della direzione della sollecitazione rispetto al piano della parete (rotture per taglio e pressoflessione, ribaltamento di porzioni della facciata o espulsione dei paramenti).

La circolare del Ministero dei Lavori Pubblici del 10 aprile 1997, n. 65/AA.GG. (Istruzioni per l'applicazione delle «Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche» di cui al D.M. 16/01/1996) prevede la possibilità di aumentare la resistenza di un elemento murario mediante uno o più dei seguenti provvedimenti:

- > iniezioni di miscele leganti;
- > applicazione di lastre in c.a. o di reti metalliche elettrosaldate e betoncino;
- > inserimento di pilastri in c.a. o metallici in breccia nella muratura;
- > tirantature orizzontali e verticali.

Per quanto riguarda invece le strutture in c.a. la suddetta circolare indica tra le tecniche di consolidamento:

- > iniezioni di miscele leganti;
- > ripristino localizzato con conglomerati;
- > ripristino e rinforzo dell'armatura metallica;
- > cerchiature di elementi strutturali;
- > integrazione di armatura con l'applicazione di lamiere metalliche;
- > rinforzo con tiranti.

Le più recenti Norme tecniche per le costruzioni (D.M. 14/09/2005) non elencano modalità d'intervento per consolidare gli edifici o parti di essi, ma si limitano a classificare gli interventi sulle costruzioni esistenti in:

- > "interventi finalizzati all'aumento della sicurezza della costruzione" (consolidamento e riparazione);
- > "interventi conseguenti a nuove esigenze e/o trasformazioni della costruzione" (adeguamento e miglioramento).

Le tecniche tradizionali e quelle usate più frequentemente negli interventi di adeguamento o di miglioramento negli ultimi vent'anni in Italia, soprattutto negli edifici in muratura (uso indiscriminato di elementi in cemento armato, iniezioni di miscele leganti, ecc.), si scontrano con una serie di problemi come quelli della controllabilità delle operazioni, della scarsa efficacia dell'intervento, dell'invasività dell'operazione e dell'aumento considerevole delle masse sismiche. Da qualche anno vengono utilizzate sempre più spesso due nuove tecniche per il rinforzo strutturale sia degli edifici in muratura sia di quelli in c.a.: il sistema CAM e l'applicazione di materiali compositi fibrorinforzati (FRP).

La necessità di consolidare la massa muraria, spesso caratterizzata da un apparecchio murario disordinato o a doppio paramento, con scarse connessioni trasversali, ha suggerito l'idea di utilizzare un sistema tridimensionale di cuciture, capace di ingabbiare la muratura, fornendo uno stato di pre-

1. Intervento di consolidamento con CFRP su solaio laterocementizio effettuato dalla Interbau srl.
2. Intervento di consolidamento con CFRP su volta a crociera in muratura effettuato dalla Interbau srl.

2





compressione triassiale; è questa l'idea su cui si basa il sistema CAM (Cucitura Attiva Muratura o Cerchiaggio Attivo Manufatti) brevettato dalla TIS SpA di Roma. Esso è realizzato tramite l'applicazione di nastri in acciaio inox, di spessore 0.75-0.8 millimetri e larghezza di 18-20 millimetri, le cui caratteristiche di resistenza a snervamento e a rottura sono pari a 250-300 e 600-700 MPa rispettivamente, con allungamento a rottura pari a più del 40%. Si tratta dunque di una tecnica di consolidamento attivo, in quanto i nastri di acciaio inox svolgono un ruolo attivo, imprimendo alla muratura uno stato di precompressione, sia nel piano della parete, orizzontalmente e verticalmente, sia in direzione trasversale, collegando i paramenti murari; la precompressione ritarda la formazione di lesioni e fessure e rende le armature immediatamente attive e capaci di impedire o limitare significativamente la formazione di grandi lesioni e di sconessioni. I nastri vengono utilizzati per cucire la muratura attraverso due fori a distanza normalmente compresa tra i 100 e i 200 centimetri, richiudendo la singola fascetta ad anello mediante una macchina capace di imprimere una pretensione regolabile al nastro, e dunque una precompressione nella muratura, sia trasversale che complanare alla parete trattata. Il sistema si compone poi di piastre di dimensioni circa 125x125 millimetri anch'esse in acciaio inox, dotate di fori conformati ad imbuto, disposte all'imboccatura del foro. Le piastre svolgono una funzione di distribuzione delle forze di contatto del nastro, che altrimenti sarebbero concentrate nella muratura attorno al foro stesso, e di assorbimento delle tensioni di

trazione prodotte nella muratura attorno al foro da due avvolgimenti contigui. Il sistema è completato da angolari, sempre in acciaio inox, per gli avvolgimenti dei nastri in corrispondenza delle aperture o delle zone terminali delle pareti (angoli, incroci a L e a T). Tramite gli elementi di connessione, i nastri d'acciaio realizzano un sistema continuo di tirantatura, in grado di ripercorrere le irregolarità della muratura, sia in orizzontale, lungo tutta la parete, che in verticale, per tutta l'altezza, secondo maglie quadrate, rettangolari o triangolari, anche irregolari, con la massima flessibilità, in modo da migliorare non solo la resistenza a taglio, ma anche la resistenza flessionale dei singoli maschi murari, risolvendo anche il problema delle connessioni, spesso carenti, tra pareti ortogonali. La tecnica è poco invasiva e totalmente reversibile, il piccolo spessore dei nastri d'acciaio consente l'uso di intonaci tradizionali, negli spessori comuni, in modo tale da non incrementare i pesi strutturali e sfruttando integralmente la resistenza delle armature, non essendo il loro coinvolgimento legato all'aderenza tra la muratura e l'intonaco, ma, al contrario, ad un collegamento meccanico totalmente controllabile. Anche i materiali compositi fibrorinforzati sono sempre più utilizzati nel rinforzo di strutture esistenti. Essi sono stati sviluppati inizialmente in campo militare e aerospaziale; il loro primo utilizzo nelle strutture civili risale agli anni '90 in Giappone sulle costruzioni in cemento armato, in seguito la tecnica è stata ripresa negli Stati Uniti e poi si è diffusa altrove la sperimentazione sulle strutture in muratura. Gli FRP (Fiber Reinforced Polymer) sono materiali composti da una matrice polimerica rinforzata da fibre di varia natura (carbonio, vetro, aramide, polivinilalcol, ecc...).

Sono inoltre in via di sviluppo e perfezionamento nuove metodologie di realizzazione di interventi in FRCM, cioè fibrorinforzati a matrice cementizia anziché con resina polimerica, per assicurare una maggiore traspirabilità delle murature sulle quali vengono applicati. Gli FRP sono utilmente impiegati nella realizzazione di sistemi di rinforzo con le funzioni di:

- > trasmissione degli sforzi di trazione all'interno di singoli elementi strutturali o tra elementi contigui;
- > confinamento di elementi sottoposti a sforzi normali di compressione al fine di incrementare la resistenza e la duttilità.

Nelle strutture in muratura l'applicazione dei laminati in FRP può avvenire nel consolidamento delle volte, nel rinforzo a taglio e a pressoflessione dei maschi murari e nel confinamento dell'edificio a livello di impalcato (intervento alternativo alla cordolatura di piano), mentre nel caso di strutture in calcestruzzo armato e/o precompresso vengono usati nella cerchiatura di pilastri, nel rinforzo di travi e solai o di elementi soggetti a vibrazioni come ponti, strutture ferroviarie, ecc. L'intervento si basa sulla solidarizzazione alla muratura, tramite resine, di strisce di materiale composito previa pulizia e regolarizzazione della superficie e rimozione degli strati ricoperti non portanti, poiché affinché l'intervento sia efficace è molto importante una buona solidarizzazione tra muratura e

fibra. L'applicazione dei rinforzi può avvenire su una o su entrambe le facce della parete (maggiore efficacia nel secondo caso) e con disposizione dei laminati secondo una griglia ortogonale o diagonale (maggiore resistenza a taglio nella seconda ipotesi). L'efficacia del rinforzo dipende fortemente dal meccanismo di aderenza che si instaura all'interfaccia lamina-supporto e dall'eventuale presenza di dispositivi di ancoraggio. Pertanto la delaminazione è una tipica rottura di elementi rinforzati esternamente con lamine in FRP e generalmente si verifica dove c'è un'elevata concentrazione di tensioni. La delaminazione avviene in genere con distacco del rinforzo dal supporto non permettendo il completo sfruttamento delle elevate proprietà meccaniche delle fibre e con una modalità di crisi fragile. Tale modalità di crisi diventa molto probabile quando la lunghezza effettiva di ancoraggio delle fibre è limitata dalle caratteristiche geometriche degli elementi. La tecnica degli FRP permette di incrementare notevolmente i limiti di resistenza della muratura e di attribuirle un comportamento a rottura meno fragile.

Attualmente non esistono formule univoche per la progettazione degli interventi di rinforzo con FRP per cui ci si rifà a modelli analitici.

I vantaggi dell'uso di questa tecnica consistono in:

- > peso ridotto;
- > immunità alla corrosione;
- > adattabilità all'elemento da consolidare;
- > eccellenti proprietà meccaniche di rigidità e resistenza.

Le fibre più usate sono quelle di carbonio (CFRP) presenti sul mercato sotto forma di lamine e tessuti. Le lamine hanno una resistenza a trazione pari a 2400÷3500 MPa, un modulo elastico di 177÷270 GPa e un allungamento pari a 0,8÷1,2 %. I tessuti invece presentano una resistenza pari a 2500÷4800 MPa, un modulo elastico di 240÷640 GPa e un allungamento pari a 0,5÷2 %. A differenza degli interventi basati sulle tecniche tradizionali, i CFRP, grazie alla loro estrema leggerezza, possono essere messi in opera senza l'ausilio di particolari attrezzature o macchinari, in tempi estremamente brevi e spesso senza interrompere l'esercizio della struttura; inoltre, rispetto alla tecnica di placcaggio con piastre metalliche (béton plaqué), l'uso delle lamine o dei tessuti non necessita, solitamente, di sostegni provvisori durante la posa in opera ed elimina tutti i rischi connessi con la corrosione del rinforzo applicato.

Riguardo questa nuova tecnica di intervento il Consiglio Nazionale delle Ricerche ha emanato negli ultimi anni una serie di documenti tecnici sul placcaggio con FRP di strutture di conglomerato cementizio armato o precompresso e murarie (CNR-DT 200/2004), recentemente pubblicato anche in lingua inglese, il placcaggio di strutture lignee (CNR-DT 201/2005) e quello di strutture metalliche (CNR-DT 202/2005). I documenti sono stati redatti al fine di rispondere all'esigenza nazionale di conoscenza e di standardizzazione in uno dei settori emergenti di maggior rilievo dell'ingegneria strutturale, con l'obiettivo di contribuire alla sicurezza

delle strutture e nel contempo di favorire la crescita dell'intero settore industriale. I documenti sono stati prodotti, nell'ambito delle attività normative del CNR, grazie all'impegno comune di esponenti del mondo universitario e di diverse categorie di operatori nel campo del consolidamento delle strutture con il risultato di avere dei testi orientati alla guida nelle applicazioni tecniche ed allo sviluppo del settore, che pone l'Italia all'avanguardia nel quadro normativo internazionale e costituisce una base sicura per i futuri sviluppi tecnici e tecnologici. Inoltre il Ministero dei Beni Culturali e la Protezione Civile hanno recentemente emanato le "Linee Guida per l'applicazione al patrimonio culturale della normativa tecnica di cui all'Ordinanza 3274/2003" in cui, tra le tecniche di intervento contemplate, trova posto di assoluto rilievo il consolidamento mediante materiali compositi fibrorinforzati: in particolare se ne privilegia l'utilizzo sia per le cerchiature esterne che per gli interventi volti a ridurre la spinta di archi e volte, mentre la classica controvolta in calcestruzzo viene sconsigliata a causa dell'aumento delle masse sismiche e viene raccomandata particolare attenzione ai problemi di traspirabilità, durabilità e reversibilità, nonché alla corretta progettazione dell'intervento di consolidamento mediante FRP.

3. Intervento di adeguamento sismico con metodo CAM su pilastro in c.a. effettuato dalla Chimetec sas. 4. Intervento di adeguamento sismico con metodo CAM su parete in muratura effettuato dalla Chimetec sas.

4

