

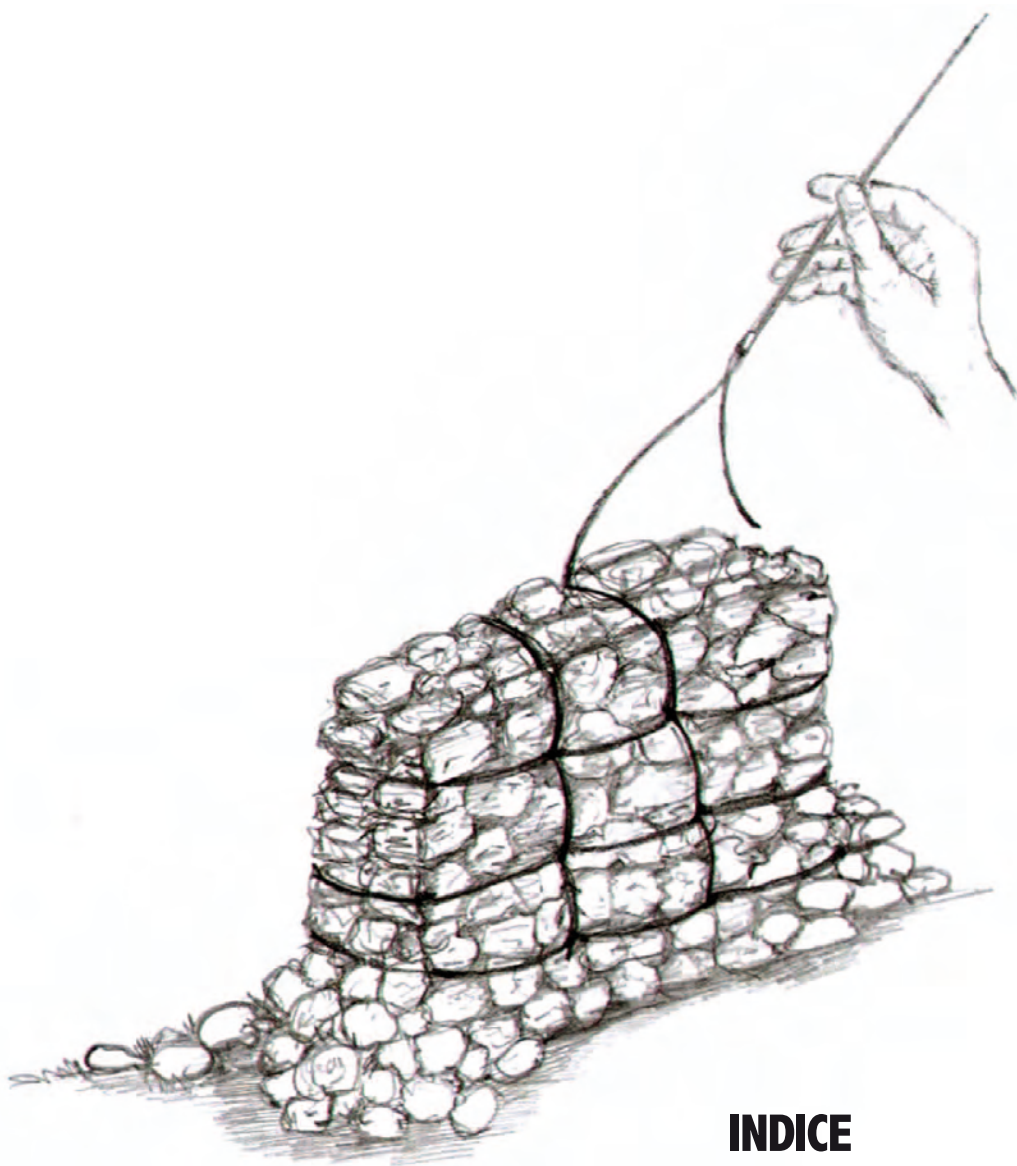
CUCIRE LA PIETRA CON LA PIETRA SISTEMA TICO RAPSIMO[®]

Cuciture continue in fibra di basalto per il consolidamento di murature storiche
Reversibile, efficace, veloce, economico

IL SISTEMA DI CONSOLIDAMENTO IN OPERA GARANTISCE I SEGUENTI VANTAGGI

- Incremento dei pesi praticamente trascurabile ;
- Facilità di messa in opera ;
- Massima removibilità ;
- Sistema traspirante ;
- consolidamento realizzato "pietra con pietra" ;
- Il linea con il principio del minimo intervento ;
- Consolidamento tale da rendere le rotture per resistenza ultima dei materiali originali ;
- Resistente al fuoco ;
- Non fa lavorare la muratura in maniera pretensionata, non ossida e non provoca incompatibilità con le malte ;
- Resistente ad aggressioni chimiche ;
- Particolarmente appropriato per il rinforzo di murature faccia a vista di edifici vincolati e di manufatti di interesse storico-architettonico ;
- Utilizzabile anche per la messa in sicurezza in urgenza ;
- In grado di integrare la muratura e non di sostituirla, e quindi compatibile con la conservazione materica del manufatto ;
- Perfettamente adattabile a superfici irregolari di ogni tipologia ;
- Utilizzabile anche a secco senza l'uso di malte e resine





INDICE

pg.5_ INTRODUZIONE

pg.6_ L'IDEA DELLE CUCITURE IN FIBRA DI BASALTO

pg.8_ IL RINFORZO: CORDE IN FIBRA DI BASALTO

pg.9_ LA SPERIMENTAZIONE IN LABORATORIO

pg.15_ LE ANALISI NUMERICHE

pg.16_ LE PROVE DI COMPRESSIONE DIAGONALE IN SITU

pg.18_ BIBLIOGRAFIA



INTRODUZIONE

In caso di sisma gli edifici storici in muratura non manifestano un chiaro comportamento strutturale globale, molto più realistica è una analisi per “macroelementi” ossia porzioni di muratura che per forma e dimensioni reagiscono autonomamente al terremoto, riconoscibili e catalogabili sulla base delle esperienze del passato. Questo approccio, proposto da vari autori (Giuffrè, 1991; Doglioni et al., 1994), risulta ormai consolidato anche all’interno del quadro normativo che regola gli interventi sulle costruzioni esistenti in muratura in genere (Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008; Circolare del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici n°617 del 2 febbraio 2009) e anche sugli edifici di interesse storico ed architettonico (Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011: Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008).

La risposta al sisma dell’edificio storico in muratura è quindi quella offerta dai suoi macroelementi: il loro moto

durante l’azione sismica definisce i cosiddetti “cinematismi di collasso attivabili” dei quali è possibile verificare la sicurezza rispetto all’azione sismica attesa e, quindi, progettare e dimensionare opportuni presidi per scongiurarne l’attivazione. Un’ipotesi imprescindibile che sta alla base della teoria della discretizzazione dell’edificio in macroelementi è quella di poter considerare queste parti di edificio come monolitiche e, quindi, che la muratura che li compone sia di “buona qualità” (Figura 1).

Il livello di “qualità” dell’opera muraria storica si può ricondurre a quanto questa riporti nella sua fattura le prescrizioni della cosiddetta “regola dell’arte”, ossia: la presenza di diatoni (cioè di elementi passanti da parte a parte della parete), di filari orizzontali, di giunti verticali sfalsati, l’utilizzo di elementi squadrati, di dimensioni adeguate ricavate da materiali resistenti, legati con malta di buona qualità. Quando mancano queste caratteristiche nell’apparecchio murario (es. murature in ciottoli e pietre erratiche ed irregolari disposte in maniera disordinata con

malta di scarse caratteristiche o murature multiparamento - “a sacco” - con doppia cortina esterna e nucleo interno incoerente) prima ancora di procedere con un’analisi strutturale si rende necessario **intervenire per conferire ai pannelli murari portanti la monoliticità mancante.** Da questo assunto nasce l’idea di mettere a punto una tecnica di consolidamento in grado di rendere monolitica una muratura costruita con modalità lontane da quelle della “regola dell’arte” in linea con i principi che regolano gli interventi sul costruito storico, vale a dire: tendenza al minimo intervento, ricerca della compatibilità, reversibilità dell’intervento, rispetto dell’autenticità, conservazione della materia, controllo dell’impatto visivo e riconoscibilità degli interventi. Criteri non sempre rispettati se si interviene con le tecniche di consolidamento tradizionali (intonaco armato, perfori armati, iniezioni di legante, ecc.) e solo parzialmente con quelle più innovative (fasciature con compositi fibrorinforzati).

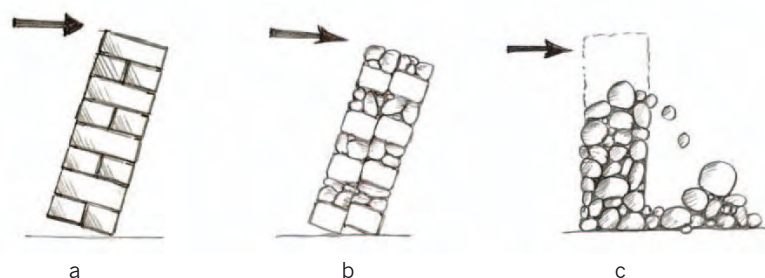


Figura 1: Risposta della muratura ad azioni orizzontali fuori dal piano: se è di “buona qualità” (a) ci si può aspettare un comportamento monolitico, al contrario, se è di “scarsa qualità” (b) si disgrega caoticamente. In caso di “media qualità” dell’apparecchio murario (c), ci si deve aspettare un comportamento intermedio. L’attivazione di meccanismi di collasso in caso di sisma è subordinata alla capacità della muratura di comportarsi in maniera monolitica.

L'IDEA DELLE CUCITURE CONTINUE IN FIBRA DI BASALTO

Un elemento continuo e flessibile cinge la muratura sui due lati dopo averne attraversato lo spessore

D alla constatazione che una delle vulnerabilità più pericolose per una muratura è la mancanza di monoliticità, nasce l'idea di conferire questa importante caratteristica attraverso **un sapiente gioco di trama e ordito in cui elementi flessibili (trama) in pietra - basalto - tengono assieme i vari conci (ordito).**

Il sistema TICORAPSIMO® nasce infatti da un'invenzione dei proff. S. Lenci ed E. Quagliarini (Domanda di brevetto italiano per invenzione industriale "METODO PER RINFORZARE OPERE EDILI ED OPERE RINFORZATE COSÌ OTTENUTE" depositata in data 07 giugno 2011 al n. B02011A000327) del Dipartimento DICEA dell'Università Politecnica delle Marche e dal successivo percorso di trasferimento tecnologico intrapreso con il Geom. A. Battaglia di Restauri Innovativi Tecnologici® S.r.l. (titolare della domanda), con la collaborazione dell'Ing. F. Monni. La tecnica proposta e testata attraverso test in laboratorio, in situ e successive analisi numeriche, ha

l'obiettivo di consolidare i pannelli murari confinandoli e al tempo stesso collegandone le facce attraverso cuciture continue flessibili."

In pratica, un elemento continuo e flessibile cinge la muratura sui due lati dopo averne attraversato lo spessore in più punti, proprio come se venisse "cucita" dal "filo" di rinforzo. (Figura 2).

Nel dettaglio, le fasi della lavorazione possono venir riassunte come di seguito descritto:

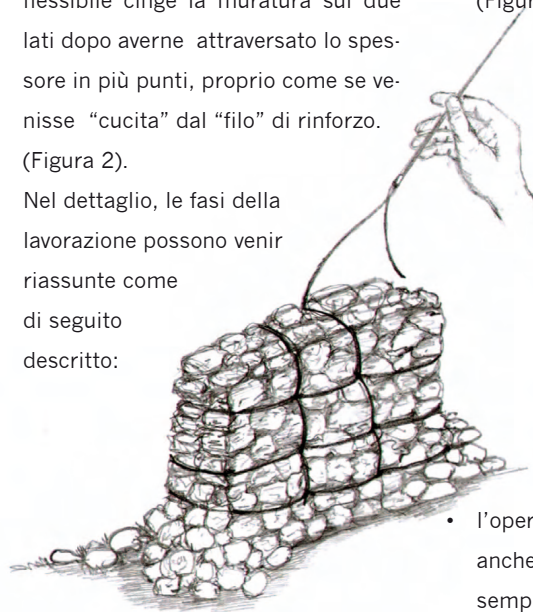


Figura 2: L'idea delle cuciture per consolidare la muratura: il sistema TICORAPSIMO®. In pratica, un elemento continuo e flessibile cinge la muratura sui due lati dopo averne attraversato lo spessore in più punti, proprio come se venisse, appunto, "cucita" dal "filo" di rinforzo.

- fori passanti di diametro contenuto vengono praticati sulla muratura da consolidare. La dislocazione viene stabilita dopo un attento esame della tessitura muraria (Figura 3a);

- il rinforzo continuo e flessibile (corda in fibra di basalto), viene fatto passare sulle due facce e nello spessore del pannello murario come se andasse a "cucirlo". L'applicazione viene eseguita con una minima pre-tensione, quella esercitata a mano dall'operatore; (Figura 3b)

- l'operazione può essere ripetuta anche in più direzioni, sfruttando sempre gli stessi fori, con il risultato di aver confinato la muratura con una maglia di elementi continui connessi tra loro (Figura 3c, 3d).

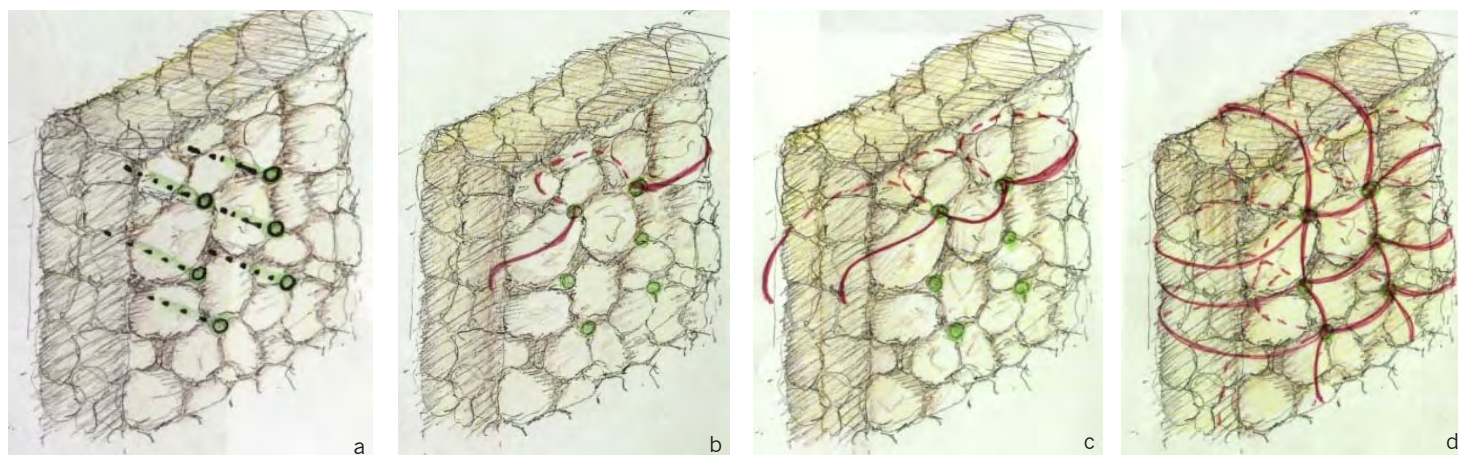


Figura 3: le fasi dell'intervento con TICORAPSIMO®: esecuzione di fori passanti (a), inserimento della corda in fibra di basalto (b) in modo da creare una "maglia" con funzione di collegamento e contenimento degli elementi costituenti la muratura (c, d).

Se necessario il rinforzo può essere occultato alla vista, localizzandolo all'interno dei giunti di malta, nel rispetto del mantenimento dell'aspetto originario.

Il metodo proposto, può essere utilizzato anche sull'edificio inteso come complesso, ad esempio per ripristinare la continuità di una muratura in presenza di lesioni, per potenziare il collegamento tra parti di muratura fra loro non ben ammassate o per migliorare le connessioni strutturali tra murature e solai e coperture. (Figura 4) Inoltre, per la sua velocità e versatilità può essere utilizzato anche per una eventuale messa in sicurezza in casi di emergenza, come presidio di urgenza per scongiurare crolli locali o l'evolversi di meccanismi di collasso di porzioni murarie (Figura 5).

VANTAGGI

I principali vantaggi rispetto alle tecniche oggi utilizzabili possono essere sinteticamente così riassunti:

- integra ma non sostituisce o trasforma la materia originaria, in maniera **reversibile** poiché può essere messo in opera anche "a secco". In questo caso **non contempla l'uso di sostanze tossiche o dannose per la salute, non necessita di particolari accorgimenti per lo smaltimento dei residui** delle lavorazioni o all'atto della dismissione per fine servizio. Risulta così all'avanguardia sia dal punto di vista della sostenibilità ambientale che della sicurezza dei lavoratori;
- **è compatibile** con il supporto in muratura: **la pietra che cuce la pietra**;
- rispettoso del minimo intervento, può essere localizzato anche nei giunti di malta. Impiegabile quindi su murature delle quali si voglia salvaguardare l'aspetto "faccia a vista";
- **è economico**: anche se applicato su murature irregolari, prevede fasi di lavorazione e tempi di applicazione ridotti rispetto a tecniche alternative;
- **è durevole** e con elevata resistenza al fuoco, al contrario delle fasciature con FRP in cui la resina rappresenta il punto debole nei confronti delle alte temperature.

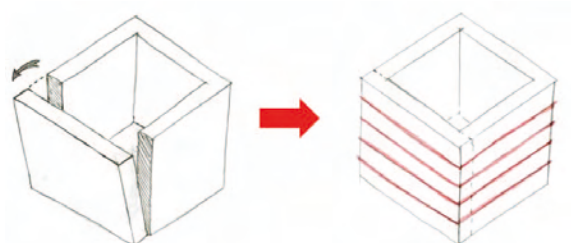
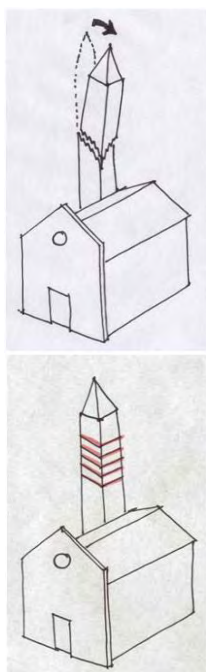


Figura 5: TICORAPSIMO® è ideale anche per una eventuale messa in sicurezza in casi di emergenza

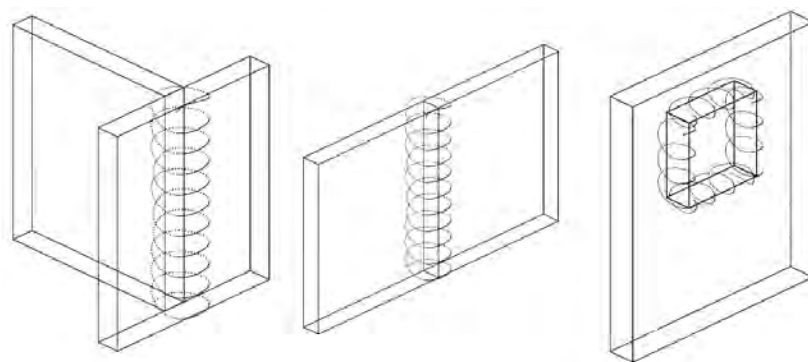


Figura 4: TICORAPSIMO® può essere utilizzato anche per ripristinare la continuità della muratura in presenza di lesioni o carenza di ammassamento e per migliorare le connessioni strutturali tra murature e solai e coperture

IL RINFORZO: CORDE IN FIBRA DI BASALTO

Un materiale durevole resistente alle alte temperature ed agli agenti chimici



Figura 6:

Dalla fusione della pietra basaltica si ottengono fibre continue con ottime proprietà meccaniche che possono essere intessute per ricavare corde. La fibra di basalto può vantare un'alta resistenza alle temperature elevate ed agli attacchi chimici.

I basalto è una roccia derivata dalla solidificazione della lava vulcanica con un punto di fusione di circa 1400°C, è stato usato fin dall'antichità per la sua durezza per lastricare le strade e, come riempimento, nelle costruzioni (Militky J. et al., 2002-2007). Le rocce con determinate composizioni chimiche hanno alcune caratteristiche fisiche che le rendono adatte all'**estrusione di filamenti continui di vari diametri** (9÷24 µm). Attualmente le fibre di basalto, prodotte a livello industriale nei paesi asiatici e dell'Europa dell'Est, vengono principalmente utilizzate nel settore automobilistico e delle attrezzature sportive (Zhu L. et al., 2010). Le fibre di basalto, sotto forma di fibra continua, di tessuto o di rete, sono usate anche infatti come rinforzo per la produzione di fibrorinforzati laminati o pultrusi (barre) o come rinforzo da impregnare in situ con matrici di vario tipo per la creazione di compositi strutturali nelle opere civili. Le fibre "sciolte" (chopped) di

basalto, costituiscono un ottimo rinforzo per evitare la fessurazione nei getti di conglomerato cementizio. In forma di tessuto impregnato con matrice di tipo epossidico, sono utilizzate come rinforzo per strutture in calcestruzzo, in alternativa alle più comuni fibre di vetro, carbonio o aramidiche (Sim, J. et al., 2005). Impieghi più recenti le hanno testate in laboratorio in forma di tessuto bidirezionale impregnato con matrice cementizia, per il confinamento di colonne in muratura (Fahmy M.F.M. et al., 2010). Infine, sotto forma di lana, possono costituire pannelli e tappetini con ottime caratteristiche di isolamento termo-acustico. Per produrre la fibra di basalto è necessario portare la roccia alla temperatura di fusione (circa 1400 °C) in una fornace; il fuso è quindi estruso per produrre filamenti continui. Le fibre così ottenute, che risultano avere **caratteristiche meccaniche** comprese tra quelle delle fibre di vetro e quelle delle fibre di carbonio (Wu Z. et al.,

2010), possono essere sottoposte a lavorazioni di "tessitura" che consentono di realizzare anche corde (Figura 6), per le quali esiste una procedura di caratterizzazione e che mostrano buone prestazioni in termini di resistenza (Quagliarini E. et al., 2012).

Il basalto è un materiale durevole: risultati di test di laboratorio riportati in letteratura (Van de Velde, K. et al., 2003; Wei, B. et al., 2010) mostrano come l'esposizione ad ambienti aggressivi (acidi e basici), danneggia maggiormente le fibre di vetro che non quelle di basalto. **L'esposizione alle alte temperature non penalizza le prestazioni** in termini di resistenza delle fibre delle basalto quanto quelle di vetro e di carbonio (Sim, J. et al., 2005). Compositi che utilizzano le fibre di basalto come rinforzo (continuo o discreto) immerso in matrici di tipo organico o inorganico, sono stati infatti testati nello sviluppo di sistemi passivi di protezione al fuoco (Landucci G. et al., 2009).

Prove di compressione e taglio su provini di muratura “a sacco”

LA SPERIMENTAZIONE IN LABORATORIO

L'efficacia della tecnica proposta è stata testata in laboratorio con prove di compressione e taglio su provini di muratura multi-paramento con doppia cortina esterna in mattoni e nucleo interno incoerente (muratura comunemente detta “a sacco”). È stata scelta volutamente questa tipologia, per altro fortemente diffusa nel patrimonio edilizio storico italiano, perché risulta vulnerabile ad azioni orizzontali nel piano e fuori dal piano e soggetta a fenomeni d'instabilità delle cortine sotto le azioni verticali a causa della mancanza di omogeneità della struttura e di collegamenti tra le parti. L'obiettivo che ci si prefiggeva era quello di collegare le cortine (impedendone quindi l'instabilità per carichi verticali) e conferire al pannello un comportamento monolitico. Il tutto nel rispetto del principio del “minimo intervento” e mantenendo quindi l'aspetto “faccia a vista” originale. Per ottenere tutto questo, sfruttando le proprietà della corda in fibra di basalto, flessibile e versatile, sono state progettate due diverse disposizioni delle corde (Figura 7).

Nel primo caso sono stati interessati dal rinforzo solo i giunti orizzontali (rinforzo “RO”), opportunamente scarniti e puliti, nel secondo, disponendo le corde sia nei giunti orizzontali che verticali si è venuto a creare un “reticolo” (rinforzo “RR”). In questo secondo caso volendo comunque

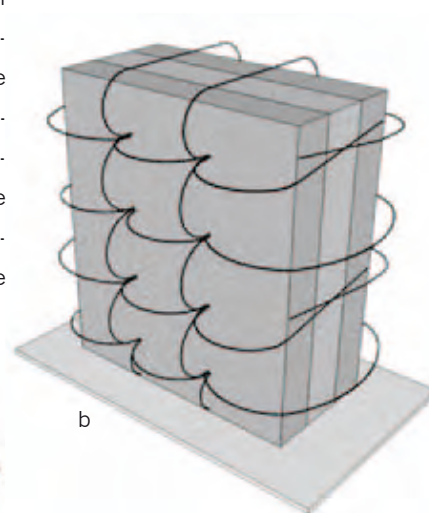
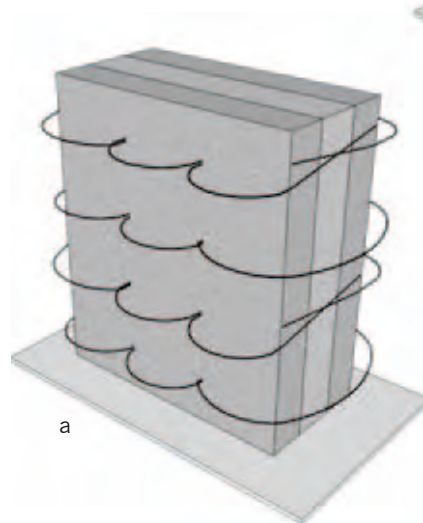


Figura 7: le due diverse disposizioni del rinforzo applicate nei provini testati in laboratorio: localizzato solo nei giunti di malta orizzontali “RO” (a) o sia nei giunti orizzontali che verticali, disposizione denominata “a reticolo”, “RR” (b).

mantenere l'aspetto “faccia a vista” stata effettuata una piccola fresatura dei laterizi che si interponevano tra il giunto verticale di un filare e l'altro, operazione che risulta occultabile con appositi trattamenti (e comun-

que evitabile in caso di murature intonacate). Una volta alloggiata nelle sedi così create, la corda può essere agevolmente nascosta ricoprendola con una malta compatibile con il supporto murario (Figura 8).



Figura 8:

le fasi applicative del sistema TICORAPSIMO®: esecuzione di fori passanti in corrispondenza dei giunti da rinforzare (a), scarnitura e pulizia dei giunti dove localizzare il rinforzo (b), eventuale fresatura dei laterizi in caso di disposizione “a reticolo” (c), inserimento della corda in fibra di basalto (d), ristillatura dei giunti con malta compatibile in modo da occultare alla vista l'intervento e ripristinare l'aspetto originale (e), immagini ad applicazione ultimata in caso di disposizione “RO” (f) e “RR” (g).

Utilizzando materiali quanto più possibile vicini a quelli delle costruzioni storiche (mattoni di modesta resistenza e malta di calce aerea) sono stati così realizzati 12 provini di muratura “a sacco”, metà dei quali sono stati sottoposti a prove di compressione verticale mentre l'altra metà a prove di taglio (Figura 9).

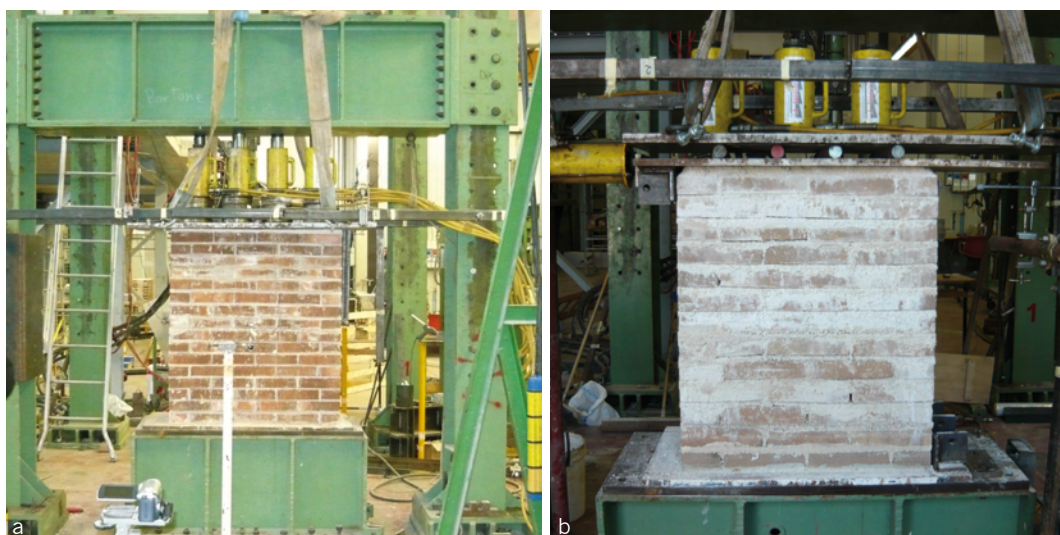


Figura 9: dispositivi di prova allestiti in laboratorio per l'esecuzione di prove di compressione verticale (a) e di prove a taglio (b).

All'interno di ogni gruppo di provini due sono stati portati a rottura senza l'applicazione di alcun consolidamento (“NC”), altri **due sono stati rinforzati con TICORAPSIMO® “RO”**, i restanti due con **TICORAPSIMO® “RR”**.

Dalle prove di compressione emergono i seguenti risultati:

- i pannelli “NC” sotto sforzi di compressione collassano per il sopraggiungere dell'instabilità di una delle due cortine esterne (Figura

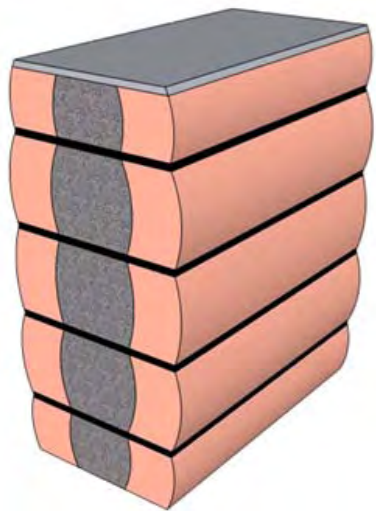


Figura 1: l'applicazione di TICORAPSIMO® fornisce monoliticità al pannello murario: si modifica la modalità di rottura, scongiurando rotture per instabilità delle cortine esterne, consentendo di sfruttare al meglio i materiali costituenti la muratura.

10), caratterizzate da un'elevata snellezza e soggette anche all'azione fuori dal piano del riempimento che, per sua natura è altamente più deformabile. Gli strati costituenti il pannello si oppongono quindi al carico senza collaborare tra loro (alla fine della prova risultano significativamente divisi). Tale modalità di rottura determina un andamento delle deformazioni trasversali (ossia misurate nella direzione dello spessore del pannello) che conosce una forte crescita anche per modesti incrementi di tensione;

- l'applicazione del **rinforzo “RO”** è sufficiente per determinare una variazione della modalità di rottura: il collasso del provino in questo caso non avviene più per fenomeni di instabilità a carico di una delle due cortine esterne ma per il **raggiungimento della resistenza ultima dei materiali** costituenti la muratura (Figura 11).

In questo caso le cortine collaborano nel sostenere il carico e al termine della prova risultano ancora unite

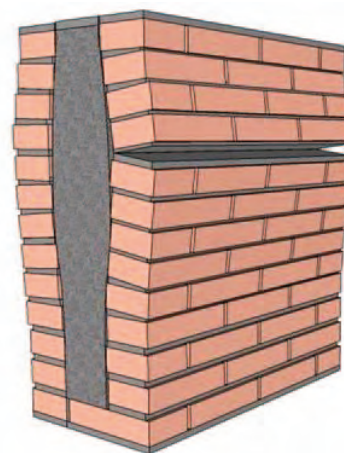


Figura 10: modalità di rottura tipica delle murature multi-paramento con nucleo incoerente: una delle due cortine viene interessata da fenomeni di instabilità che provoca il collasso del pannello.

tra loro (Figura 12) con fessurazioni contenute: il pannello acquista monoliticità. Le deformazioni trasversali risultano inferiori del 70% rispetto al caso “NC” (figura 13) ;

- nel caso di applicazione del rinforzo “RR” si osserva la stessa variazione della modalità di rottura del caso precedente (figura 11) e lo stesso comportamento monolitico; le deformazioni trasversali vengono contenute addirittura dell'80% rispetto al caso “NC” (figura 13).



Figura 12: provini di muratura “a sacco” dopo la prova a compressione: i “non consolidati” (a) presentano le cortine esterne vistosamente deformate e distaccate dal nucleo centrale al contrario di quelli consolidati con TICORAPSIMO® “RO” (b) e “RR” (c)

Per quanto riguarda le prove a taglio emerge invece che:

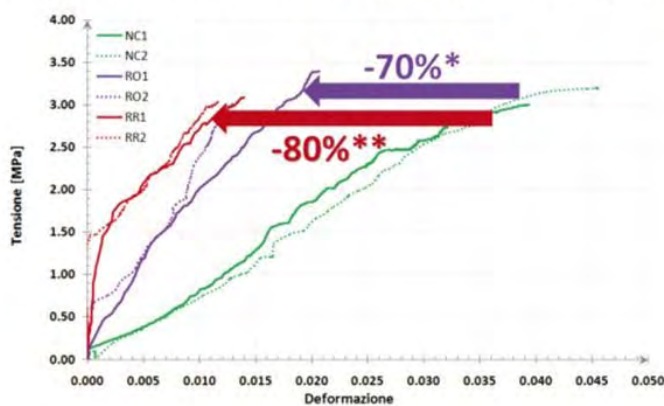
- nei provini “NC”, si attiva un meccanismo nel piano del pannello che porta gradualmente alla creazione del quadro fessurativo tipico di

questo genere di sollecitazioni, con fessure che si diramano per tutta la faccia del provino, inclinate, a partire dal vertice che, bloccato dal dispositivo di prova, diventa sede della “cerniera cilindrica” che rego-

la il meccanismo (Figura 14a). Al termine della prova gli strati costituenti il pannello risultano divisi;

- il rinforzo “RO”, pur non modificando la modalità di rottura (Figura 14b) determina una **maggiore col-**

Deformazioni trasversali di provini sottoposti a prova di compressione



* provini rinforzati con TICORAPSIMO® localizzato nei giunti orizzontali
 ** provini rinforzati con TICORAPSIMO® disposto a “reticolo”

Figura 13: Confronto dei grafici tensione/deformazione trasversale (misurata nella direzione dello spessore) dei provini di muratura “a sacco” testati a compressione. Si nota chiaramente come l’applicazione di TICORAPSIMO® contribuisca, rispetto al caso “non consolidato” (curve in verde), a ridurre le deformazioni e quindi a fornire la monoliticità mancante ai pannelli.

laborazione tra le cortine rispetto al caso “NC” che, a fine prova si presentano ancora unite tra loro;

- il rinforzo “RR”, oltre a modificare la modalità di rottura dei pannelli, consente a questi di sopportare un quadro fessurativo importante, con lesioni di alcuni centimetri di ampiezza a forma di “S” concentrate nella parte centrale del provino (Figura 14c), e di assumere un comportamento quasi “elastico” recuperando, al termine della prova, parte delle deformazioni. Inoltre, con questa tipologia di rinforzo, i pannelli mostrano, rispetto al caso non rinforzato, un aumento medio degli spostamenti massimi (Figura 15), con un incremento della pseudo-duttilità (Marcarì G. et al., 2007) del 43% risultando così in grado di dissipare maggiore energia in caso di sollecitazioni nel piano.

I risultati di questa campagna testimoniano l’efficacia della tecnica nel collegare trasversalmente i paramenti della muratura, conferendole monoliticità, e consentendo di sfruttare al massimo le risorse dei materiali.

In particolare la capacità di scongiurare l’attivazione di fenomeni di instabilità a carico delle cortine esterne e “spostare” il collasso sul raggiungimento della resistenza ultima dei materiali, risulta molto significativo se si pensa di applicare la tecnica su murature reali, con luci libere di inflessione ben più elevate di quelle dei provini testati, con guadagni prevedibili in termini di carico ultimo molto consistenti.

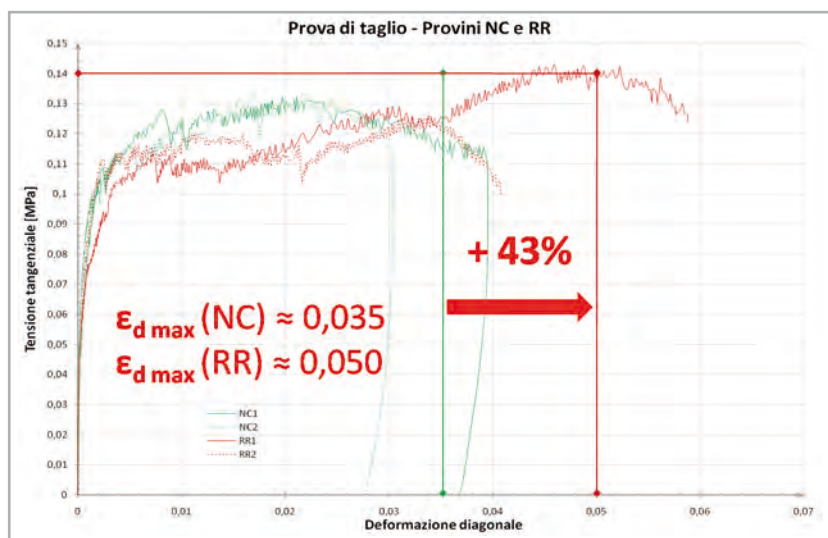


Figura 15: confronto dei grafici tensione tangenziale/deformazione diagonale dei provini di muratura “a sacco” sottoposti a prova di taglio. Nei provini rinforzati con TICORAPSIMO “RR” (curve in rosso) si nota rispetto al caso “non consolidato” (curve in verde), un aumento degli spostamenti ed un’incremento della pseudo-duttilità.



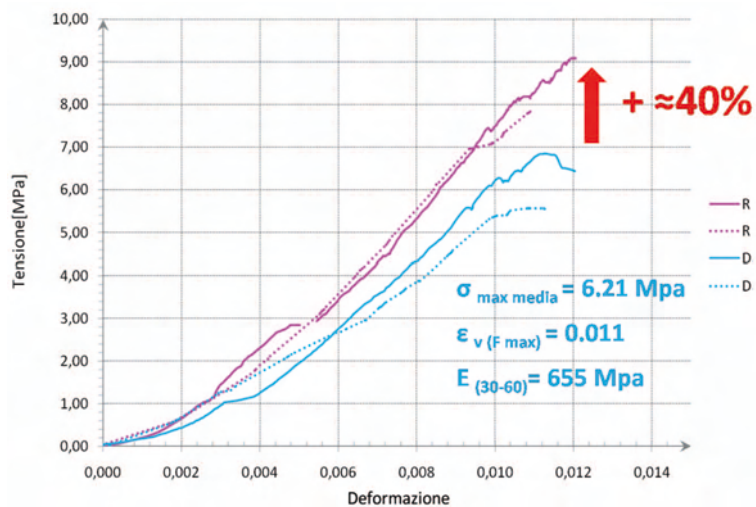
Figura 14: provini sottoposti a prova a taglio nel caso “non consolidato” (a), applicazione di rinforzo localizzato nei giunti orizzontali “RO” (b) e rinforzo con disposizione “a reticolo”, “RR” (c).

Per verificare questa ipotesi sono stati testati ulteriori provini di muratura a sacco (Quagliarini E. et al., 2011), con dimensioni maggiori di quelli della prima sessione di prove (chiaramente nei limiti dei dispositivi di prova disponibili). I 6 provini realizzati sono stati sottoposti a prova di compressione dopo essere stati suddivisi in tre gruppi :

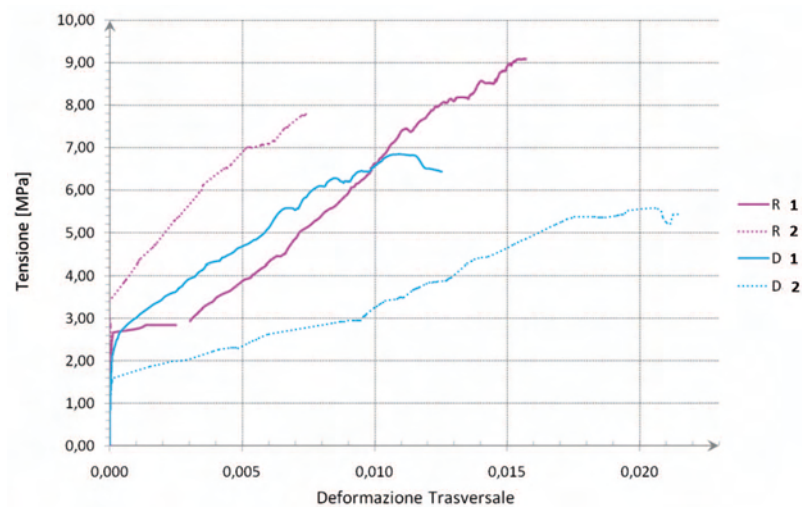
- n.2 provini sono stati portati a rottura senza trattamenti (integri: "I");
- n.2 provini sono stati portati a rottura dopo aver subito un processo di danneggiamento (danneggiati: "D") mediante l'esecuzione di perfori nello spessore e sui fianchi;
- n.2 provini, dopo aver subito lo stesso processo di danneggiamento descritto sopra, successivamente sono stati rinforzati nei giunti orizzontali

("R"). Anche in questo caso i provini integri e quelli danneggiati hanno raggiunto la rottura per il sopraggiungere dell'instabilità di una delle cortine esterne per i "danneggiati" è stato sufficiente un carico minore che per gli "integri", cosa che non si è verificata invece in quelli consolidati, che hanno collassato e seguito delle rotture diffuse che hanno afflitto i materiali costituenti la muratura. In questa seconda sessione di prove, oltre ad incrementare di circa il 40% la tensione massima di rottura (Figura 16a) il rinforzo determina anche una sostanziale riduzione delle deformazioni trasversali (Figura 16b), e risulta in grado di riportare i "danneggiati" a prestazioni paragonabili a quelle dei provini "integri". In questa seconda sessione di prove è stato pre-

so in considerazione anche l'utilizzo di resina epossidica tixotropica per ricoprire le corde di rinforzo, possibilità che appare praticabile ogni volta che il paramento non si riveli di particolare pregio e vengano meno quindi le istanze tipiche del restauro.



a



b

Figura 16: confronto dei grafici tensione/deformazione verticale (a) e tensione/deformazione trasversale (b) dei provini di muratura "a sacco" testati nella seconda sessione di prove.

Modellazione agli elementi finiti
per interpretare i risultati sperimentali

LE ANALISI NUMERICHE

La modellazione di murature multiparamento, caratterizzate da interazioni complesse difficili da tenere in considerazione, è sempre risultata una materia ostica e ad oggi, in letteratura si dispongono solo di limitati studi scientifici in materia (Binda et al., 2006). Tuttavia, utilizzando un software commerciale agli elementi finiti, **è stato messo a punto un modello numerico per tentare di riprodurre i risultati degli esperimenti** condotti che tenesse in considerazione tutti i materiali costituenti la muratura (mattoni, malta, riempimento) operando così una “micro-modellazione” (Figura 17).

Inoltre, per cogliere al meglio gli effetti deformativi di instabilità dovuti al carico applicato alla muratura multiparamento, è stato necessario fare in modo che l’analisi contemplasse anche **i grandi spostamenti**, e che ope-

rasse anche in campo “**non lineare**”. Con il modello così realizzato **sono state simulate le esperienze di laboratorio relative ai test di compressione ed i risultati sono stati confrontati con quelli sperimentali ottenendo un’ottima vicinanza tra loro**, consentendo così l’analisi di altri aspetti che non potevano essere colti dalle sole prove sperimentali. Tra questi il più significativo è stato il poter accertare che, a tensioni prossime al collasso del pannello murario, **le corde di rinforzo vengono sollecitate da una forza che risulta pari ad un terzo di quella massima sostenibile**, garantendo così che in esercizio queste si mantengano sempre lontane dal punto di rottura, evitando collassi improvvisi ed imprevedibili.

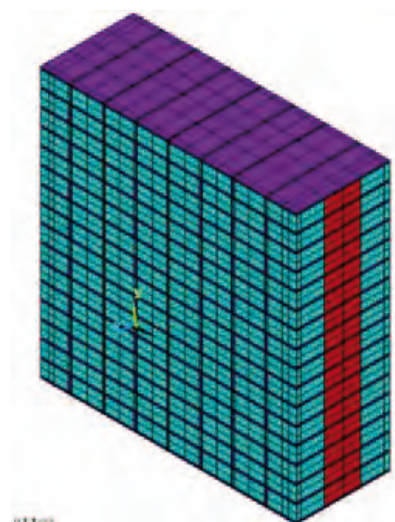


Figura 17:
modello FEM utilizzato per riprodurre le
prove sperimentali eseguite in laboratorio.

PROVE DI COMPRESSIONE DIAGONALE IN SITU

Onna (Aq), terremoto 6 Aprile 2009

A

I fine di verificare l'efficacia della tecnica anche su un'altra tipologia di apparecchio murario e di verificare anche la facilità di cantierizzazione del sistema, sono state condotte anche delle **prove in situ sulle murature di L'Aquila, nella località di Onna**

tristemente nota per essere stata una delle più colpite dal sisma del 2009. La muratura aquilana si presenta composta di ciottoli e pietre, irregolari sia per forma che per dimensione, disposte in maniera



Figura 18:
le due pareti di Onna (AQ) dalle
quali sono stati ricavati i pannelli
per le prove di compressione
diagonale.



Figura 19:
i pannelli di muratura in pietra (rinforzati e non)
sottoposti a prova di compressione diagonale.

disordinata, carenti di collegamenti nello spessore (diatoni) e legate con malta di scarse caratteristiche.

Tra quelle non crollate dopo l'evento sismico, sono state scelte due pareti per effettuare i test (Figura 18). Da ognuna di queste sono stati isolati due pannelli di forma pressoché quadrata da sottoporre a prova di compressione diagonale (Figura 19), per valutare il contributo del sistema di rinforzo.

Dopo una preventiva rimozione degli strati di finitura per portare a vista la tessitura muraria, sono stati eseguiti i fori passanti localizzati in posizioni strategiche, in modo da “abbracciare” le pietre di maggiori dimensioni.

Successivamente si è proceduto con l'inserimento della corda in fibra di basalto: ogni “trama” della maglia è continua dall'inizio alla fine del suo percorso.

Anche in questo caso si ha la possibilità di mantenere l'aspetto originale della muratura, ricoprendo con uno strato di intonaco le corde di rinforzo o occultandole nei giunti malta, disponendo opportunamente i fori.

I risultati delle prove di compressione diagonale, oltre a determinare un incremento della massima **tensione di rottura di circa il 30%** (Figura 20) hanno mostrato come il rinforzo contribuisca a **ridurre la fessurazione** esercitando un effetto di confinamento sulla muratura, **evitando l'espulsione di pietre e fenomeni di disgregazione del muro.**

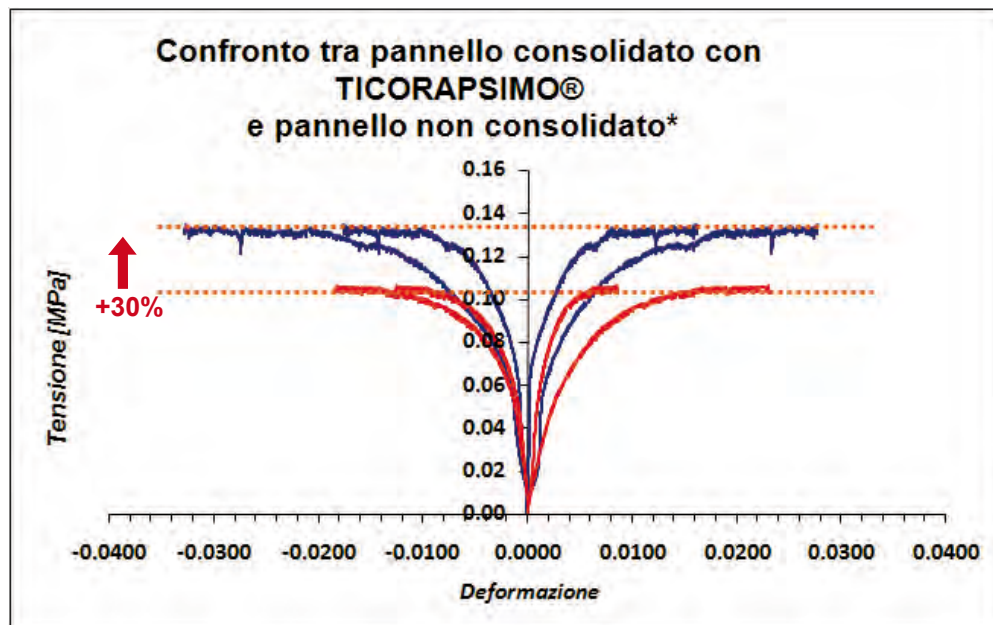


Figura 20:
Confronto tra pannello rinforzato con
TICORAPSIMO® e pannello non rinforzato
sottoposti a prova di compressione diagonale
confinata secondo le condizioni in situ

BIBLIOGRAFIA

- Domanda di brevetto italiano per invenzione industriale intitolata "METODO PER RINFORZARE OPERE EDILI ED OPERE RINFORZATE COSÌ OTTENUTE" depositata in data 07 giugno 2011 al n. BO2011A000327 a nome: RES.IN.TEC. ITALIA S.r.l., Via Statale, 88, 44040 Cento (FE), designando, quali inventori i Proff.: LENCI Stefano, QUAGLIARINI Enrico.
- Binda L. et al., *A contribution for the understanding of load-transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modeling*, Engineering Structures 28, 2006.
- Doglioni F. et al., *Le chiese e il terremoto (a cura di)*, ed. LINT, Trieste, 1994.
- Fahmy M.F.M., Wu Z., *Evaluating and proposing models of circular concrete columns confined with different FRP composites*, Composites: Part B 41, 2010.
- Giuffrè A., *Lecture sulla meccanica delle murature Storiche*, Roma, Kappa, 1991.
- Landucci G. et al., *Design and testing of innovative materials for passive fire protection*, Fire Safety Journal 44, 2009.
- Marcari G. et al., *In-plane shear performance of masonry panels strengthened with FRP*, Composites: Part B 38, 2007.
- Militky J. et al., *Influence of thermal treatment on tensile failure of basalt fibers*, Engineering Fracture Mechanics 69, 2002.
- Militký J. et al., *Mechanical Properties of Basalt Filaments*, Fibres & Textiles in Eastern Europe, Vol. 15, No. 5 – 6, 2007.
- Quagliarini E. et al., *Strengthening three-leaf masonry panel with basalt fibre ropes. first experimental data*, Proceedings of 5th International Conference Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin, Istanbul, Turkey, Novembre 2011
- Quagliarini E. et al., *Tensile characterization of basalt fiber rods and ropes: A first contribution*. Construction and Building Materials 34, 2012.
- Sim J. et al., *Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures*, Composites: Part B 36, 2005.
- Van de Velde K. et al., *Basalt Fibres as Reinforcement for Composites*, Proceedings of 10th International Conference on Composites/Nano Engineering, University of New Orleans, New Orleans, LA, USA, 20–26 July 2003
- Wei B. et al., *Environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers*, Materials Science and Engineering A 527, 2010.
- Wu Z. et al., *Tensile fatigue behaviour of FRP and hybrid FRP sheets*, Composites: Part B 41, 2010.
- Zhu L. et al., *Constitutive equations of basalt filament tows under quasi-static and high strain rate tension*, Materials Science and Engineering A 527, 2010.

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- *Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008*
- *Circolare del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici n°617 del 2 febbraio 2009*
- *Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri del 9 febbraio 2011: Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008*

Il sistema "TICORAPSIMO®" può essere utilizzato per murature sia regolari che irregolari, sia a livello locale, ad esempio per singoli pannelli murari di edifici esistenti, sia a livello globale, ovvero come metodo di rinforzo di una costruzione in muratura nel suo comportamento di insieme, con particolare, ma non esclusivo, riferimento al comportamento in presenza di sisma. Il metodo proposto può essere utilizzato anche per ripristinare la continuità di una muratura in presenza di fessure/lesioni, o per ammorsare efficacemente murature o parti di muratura fra loro non ben ammorsate o non del tutto ammorsate. Il sistema "Ticorapsimo®" è in grado di migliorare le connessioni strutturali fra impalcati e murature e di incrementare le caratteristiche meccaniche, sia di resistenza a compressione, che a taglio, come anche le capacità flessionali per azioni nel piano e ortogonali

al piano della muratura, di incrementare la capacità di collegare, in modo diffuso, le lesioni, le pareti verticali tra loro e le pareti verticali con gli orizzontamenti e coperture; di fornire alla muratura quella resistenza a trazione che nel caso di murature irregolari (dove spesso si hanno giunti verticali allineati) non riesce a beneficiare nemmeno dell'"effetto catena" presente nelle murature regolari con ortostati e giunti ben sfalsati. Il sistema "Ticorapsimo®" è in grado di fornire il collegamento trasversale tra i paramenti della muratura, essendo le corde trasversali disposte come diatoni artificiali capaci di conferire monoliticità al pannello murario, opponendosi al distacco tra i paramenti e fornendo una adeguata resistenza a trazione (necessaria anche in presenza dei soli carichi verticali) e a taglio (necessaria anche per non far scorrere tra loro i paramenti).

Nata dalle migliori tradizioni e professionalità del restauro unite alle nuove sperimentazioni di tecnologie innovative insieme all'amore e alla passione del restauro conservativo e del consolidamento.

Questa è:



Restauri Innovativi Tecnologici® S.r.l.

Via Serra, 22 - 40012 Calderara di Reno (BO)
Tel. +39 051 725763 - Fax: +39 051 3167983

info@restaurioconsolidamento.it
www.restaurioconsolidamento.it



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
DICEA - Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura

Via Breccie Bianche - 60130 - Ancona
Tel. +39 071 2204248 - Fax: +39 071 2204378

e.quagliarini@univpm.it
s.lenci@univpm.it
f.monni@inivpm.it

