



# Consolidamento delle murature storiche in pietra colpite dal terremoto de L'Aquila mediante iniezione di miscele consolidanti

Massimo Dalla Benetta, Francesca da Porto, Filippo Casarin, Claudio Modena  
*Dipartimento di Costruzioni e Trasporti – Università di Padova. Via Francesco Marzolo 9, 35131 Padova.*

Maria Rosa Valluzzi  
*Dipartimento di Architettura, Urbanistica e Rilevamento – Università di Padova. Via Francesco Marzolo 9, 35131 Padova.*

*Keywords: malta storica, miscela da iniezione, prove soniche, prove di compressione diagonale*

## ABSTRACT

La ricerca presentata in questo lavoro è finalizzata a sviluppare una metodologia per la stabilizzazione ed il consolidamento degli edifici storici colpiti dal sisma del 6 Aprile 2009 a L'Aquila, mediante l'utilizzo di miscele da iniezione sviluppate all'uopo e basate su leganti idraulici naturali. Si sono selezionate e ricavate, da edifici nei paesi di Onna, Tempera e Sant'Eusanio Forconese, alcune porzioni di muratura in pietra a più paramenti, sulle quali sono state condotte prove di iniezione, verificate per mezzo test non distruttivi e distruttivi.

I costituenti originari, in particolare le malte, sono stati caratterizzati dal punto di vista meccanico, petrografico, tessiturale, mineralogico e chimico, per scegliere i prodotti da consolidamento più adeguati. La stessa metodologia è stata adottata per verificare la compatibilità dei prodotti di consolidamento con i materiali originari, vagliata anche a livello microstrutturale, mediante analisi dell'interfaccia tra miscela e materiali originari.

Le porzioni di muratura selezionate sono quindi state caratterizzate mediante prove soniche non distruttive, mentre la loro resistenza e deformabilità a taglio sono state valutate per mezzo di prove di compressione diagonale. Entrambe le tipologie di prova sono state condotte sui pannelli nello stato originario (non-consolidato) e dopo l'iniezione con le miscele consolidanti.

Il lavoro complessivamente è quindi stato mirato a sviluppare protocolli e materiali per il consolidamento. Nel presente contributo vengono mostrati i risultati delle prove distruttive e non distruttive applicate ai pannelli murari.

## 1 INTRODUZIONE

La caratterizzazione meccanica di strutture in muratura in pietra a più paramenti è un tema importante, così come lo sono la progettazione e il controllo dell'efficacia dei rinforzi applicati, specialmente in zona sismica, dove tali tipologie murarie dimostrano un'elevata vulnerabilità. (Binda et al 1997, Valluzzi et al. 2002). L'esperienza abruzzese dell'ultimo terremoto del 6 aprile 2009 conferma quanto già rilevato nei precedenti eventi umbro-marchigiani, (1997), ovvero: i) la mancanza di criteri per la scelta di tecniche adeguate di consolidamento, in relazione alle molteplici tipologie di muratura e agli specifici problemi strutturali, può far ricadere la scelta su sistemi che alterano il comportamento strutturale originario peggiorandolo; ii) scelti i materiali e le tecniche di intervento, è necessario

verificarne la riuscita e l'efficacia (Binda et al. 2006, Valluzzi 2007).

La verifica sperimentale delle proprietà dei materiali costituenti e l'iterazione tra i vari elementi nel complesso è necessaria per incrementare la conoscenza durante il processo di restauro. Studi relativi all'applicazione di iniezione di miscele su muratura a più paramenti, per migliorarne l'omogeneità e la coesione, sono già disponibili in letteratura (Vintzileou and Tassios 1995, Valluzzi et al. 2004, Vintzileou et al. 2008, Kalagri et al. 2010); tuttavia la caratterizzazione meccanica delle diverse tipologie murarie, specialmente per quanto riguarda la resistenza e la rigidezza a taglio, risulta incompleta.

Inoltre, nonostante le iniezioni consolidanti siano uno degli interventi più utilizzati per la muratura in zona sismica l'elevato numero di prodotti in commercio e la mancanza di specifici

protocolli d'intervento rende i risultati di tale procedura incerti e poco accurati.

Questa ricerca s'incentra quindi sulla caratterizzazione di pannelli murari in pietra sotto azioni di taglio. I muri, ottenuti in sito, sono testati sia in condizioni originali che dopo consolidamento, eseguito utilizzando i prodotti proposti da quattro aziende direttamente impegnate sia con la fornitura del materiale sia con l'esecuzione dell'intervento stesso.

L'analisi sperimentale comprende l'esecuzione di test sonici non distruttivi proposti come metodologia di verifica qualitativa degli interventi tramite il confronto tra le velocità soniche dei campioni prima e dopo il loro consolidamento. Dal punto di vista quantitativo si sono indagate le proprietà meccaniche delle sei miscele utilizzate con prove in laboratorio e si sono valutate la resistenza e rigidità a taglio della muratura originaria e consolidata con prove distruttive in sito.

## 2 PROGRAMMA SPERIMENTALE

Lo scopo principale di questa sperimentazione è la caratterizzazione del comportamento di 6 miscele per iniezioni, di 4 produttori, utilizzate per consolidare pareti in pietra irregolare colpite dal sisma del 6 aprile 2009.

Si sono individuati sei edifici gravemente danneggiati soggetti ad ordinanza di demolizione ubicati nei centri abitati di Onna, Tempera e Sant'Eusanio Forconese, nella valle dell'Aterno in provincia de L'Aquila. Da questi, sono state ricavate 21 porzioni di muratura, da sottoporre a prove di compressione diagonale prima o dopo l'iniezione delle sei miscele consolidanti.

Per ciascuna miscela sono state preparate due serie di tre prismi ciascuna, conformi alla UNI EN 196-1 (2005). Metà dei prismi realizzati hanno subito una maturazione in condizioni standard come da normativa, mentre l'altra parte è stata lasciata nei pressi delle pareti oggetto di intervento. Su questi campioni si sono eseguiti test meccanici per la determinazione della resistenza a flessione, la resistenza a compressione e del modulo elastico di Young.

Prima dell'esecuzione di qualsiasi intervento sulle pareti murarie, la loro tessitura è stata accuratamente rilevata. Si è quindi eseguita una caratterizzazione delle velocità soniche di tutti i campioni individuati al loro stato originario non consolidato, ripetendo quindi i test sui campioni di muratura oggetto di iniezione, al fine di

confrontare gli incrementi di velocità con la quantità approssimativa di miscela iniettata.

Su tutti i pannelli di muratura, ad esclusione di un solo campione non consolidato, e risultato molto instabile (08-O\_U), sono stati eseguiti i test distruttivi di compressione diagonale in sito.

Lo spessore delle murature indagate è compreso tra 0.48 e 0.63 m e si sono ricavati dei campioni delle dimensioni di circa 0.80x0.80 m (lunghezza x altezza). Considerando la scarsa coesione degli elementi in pietra nei campioni non consolidati non è stato possibile eseguire i test applicando il carico sugli spigoli di una diagonale del pannello come prescritto dalla ASTM E519 (2010), si è preferito quindi smussare a 45° i due angoli realizzando delle superfici ortogonali alla direzione di applicazione del carico di più rapida realizzazione e che permetta una buona ripartizione del carico stesso, tale soluzione risulta ammissibile per prove in sito di compressione diagonale (AA.VV., 2009). La maggior parte dei campioni è stata testata in condizioni scariche, ovvero con tre lati lasciati liberi, mentre per alcuni campioni la separazione dal resto dell'edificio è stata possibile solo lungo le superfici laterali. In tal caso, si è dovuto prendere in considerazione l'effetto del precarico nell'elaborazione dei risultati di prova.

In seguito, i campioni di muratura saranno così identificati: numero progressivo del campione (1-21), sito dov'è ubicato il campione (O=Onna, S=Sant'Eusanio Forconese, T=Tempera), condizione della muratura (C=consolidato, U=non consolidato) e infine per i campioni consolidati, una sigla indicante il tipo di miscela (A-F).

In altri due lavori (Artioli et al. 2010; 2011), è descritta tutta la parte di caratterizzazione petrografica, tessiturale, mineralogica e chimica delle malte originali e delle miscele da iniezione, e di caratterizzazione microstrutturale dell'interfaccia tra il materiale originario e quello nuovo.

## 3 TIPOLOGIA MURARIA E PROCEDURE DI INIEZIONE

Le murature indagate sono costituite da due paramenti esterni in pietre di calcare, irregolari o leggermente sbazzate, con dimensioni massime di 20-25 cm, posate in modo irregolare con malta contenente un'elevata frazione argillosa e dalle proprietà meccaniche scarse. Il riempimento

compreso tra i due paramenti è di dimensioni limitate, ed è realizzato con piccoli pezzi di pietra di risulta mescolati con la stessa malta utilizzata per la posa delle pietre.

Nelle murature di Sant'Eusanio le pietre sono calcari con presenza di conglomerati, I campioni 19-20-21 presentano dei ricorsi di mattoni equispaziati, tipico delle costruzioni realizzate dopo il terremoto del 1703.

Per consolidare le murature sono stati realizzati dei fori su un lato, dove inserire le cannule d'iniezione, seguendo una disposizione a triangolo equilatero con lato di 25-30 cm circa; sui pannelli consolidati con miscele A e D l'iniezione è stata eseguita da entrambi i lati. Prima dell'esecuzione delle iniezioni i fori sono stati sigillati con malta, le murature sono state pulite con aria compressa e si è idratato il nucleo interno con un lavaggio con acqua sfruttando le cannule di iniezione stesse. Le murature da consolidare sono state ristilate con malte fornite dallo stesso produttore delle miscele utilizzate per il consolidamento.

Le iniezioni sono state eseguite a bassa pressione partendo dal basso delle pareti verso l'alto, durante gli interventi sono stati monitorati i tempi d'iniezione di ogni singolo foro, dato utile per stimare in via approssimata le quantità di miscela iniettata e quindi le percentuali di vuoti iniettati (Tabella 3).

#### 4 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DELLE MISCELE DA INIEZIONE

La caratterizzazione meccanica delle miscele è stata eseguita su terne di prismi di dimensione 40x40x160 mm secondo lo standard per le malte UNI EN 1015-11 (2007). Per ogni prodotto una terna è maturata in condizioni standard (SC) mentre l'altra nelle medesime condizioni ambientali dei pannelli consolidati (EC). Per ogni terna 2 prismi sono stati prima testati a flessione e le due parti ottenute sono state testate a compressione. Dal terzo prisma è stato ricavato il modulo elastico, ottenuto seguendo la norma UNI 6556 (1976), relativa al calcestruzzo, determinando i livelli di tensione sulla base della resistenza a compressione già valutata. Anche questi prismi sono stati quindi testati a flessione e compressione. In Tabella 1 sono riportati i risultati, in termini di valori medi, ottenuti dai test.

Tabella 1. Caratterizzazione meccanica delle miscele.

Codice	Resistenza a Flessione [N/mm <sup>2</sup> ]	Resistenza a Compressione [N/mm <sup>2</sup> ]	Modulo elastico E [N/mm <sup>2</sup> ]
A_SC	1.79	37.70	8800
A_EC	2.01	32.82	7500
B_SC	3.22	27.18	10400
B_EC	1.68	25.14	10400
C_SC	1.07	17.72	5900
C_EC	1.75	13.72	3700
D_SC	4.44	30.90	11000
D_EC	2.20	31.63	10300
E_SC	1.83	5.47	5700
E_EC	1.51	4.78	5600
F_SC	1.88	18.13	8100
F_EC	-	-	-

Nel complesso, le serie EC non presentano risultati sostanzialmente diversi dalle omologhe serie SC, confermando una corretta maturazione delle miscele iniettate. I valori di resistenza a compressione e del modulo elastico per le serie EC sono mediamente il 90% di quelli ottenuti dalle serie SC.

La resistenza a flessione ha dei risultati più dispersi e meno confrontabili essendo fortemente influenzata dalla presenza di fessurazione da ritiro, in alcuni casi molto rilevante per queste tipologie di prodotti con rapporto acqua/legante elevato.

Nel caso della serie F\_EC, le basse temperature registrate al momento dell'intervento d'iniezione hanno compromesso la maturazione della miscela sia all'interno dei casseri che all'interno dei pannelli murari, separando l'acqua d'idratazione dal legante.

Sulla base dei risultati ottenuti dalla compressione e dal modulo elastico è possibile suddividere le sei miscele in 3 gruppi. Un primo gruppo è costituito dalle miscele A, B e D caratterizzato da elevata resistenza (circa 30 N/mm<sup>2</sup>) e rigidità (mediamente quasi 10000 N/mm<sup>2</sup>), valori di un ordine di grandezza superiore rispetto quelli riscontrabili sulle malte storiche. Un secondo gruppo contiene le miscele C ed F con resistenze a compressione inferiori a 18 N/mm<sup>2</sup> per le serie SC ed un modulo elastico compreso tra i 3700 e 8000 N/mm<sup>2</sup>, con valori quindi superiori a quelli delle malte originarie, ma caratterizzati comunque da una migliore compatibilità meccanica.

La miscela E risulta l'unica con proprietà meccaniche simili a quelle delle malte storiche con resistenza a compressione di circa 5 N/mm<sup>2</sup> e modulo elastico di 5700 N/mm<sup>2</sup>. In questo caso,

le caratteristiche corrispondono anche alla tipologia (da un punto di vista chimico) di miscela, costituita da una calce idraulica con additivi pozzolanici naturali e inerte siliceo.

Nel caso delle altre miscele, invece, si è riscontrato che la B, C ed F sono basate su calce aeree, con additivi pozzolanici derivanti da loppe d'altoforno, mentre le miscele A e D sono basate su composti ternari formati da calce idraulica e cemento Portland (Artioli et al. 2010; 2011).

## 5 TEST SONICI NON DISTRUTTIVI

La verifica qualitativa della buona riuscita degli interventi di consolidamento è stata ottenuta mediante test sonici non distruttivi. La procedura prevede la mappatura delle velocità soniche dei pannelli di muratura realizzata con prove dirette (in trasparenza) con una maglia quadrata dei punti di misura con interassi 0.20x0.20 m. La velocità è stata determinata dividendo lo spessore della parete per il tempo di volata dell'onda sonora generata da un martello strumentato e ricevuta da un accelerometro sulla faccia opposta.

Per ogni punto la misura è stata ripetuta 3 volte per poter ottenere un valore medio. L'identificazione così descritta è stata eseguita su tutti i pannelli oggetto di questa ricerca dopo la rimozione dell'intonaco ma prima di qualsiasi intervento di consolidamento. Successivamente, solo per i pannelli consolidati, si è ripetuta la medesima procedura determinando quindi le velocità delle pareti consolidate.

In Tabella 2 sono riportate le velocità medie di ogni pannello originario e dopo il consolidamento; per i pannelli consolidati è riportata la percentuale dei vuoti saturati sul volume totale del pannello. Il numero tra parentesi nell'ultima colonna sta ad indicare il rapporto incrementale rispetto lo stato originale. Si nota che tutti i pannelli presentano un incremento di velocità superiore a 3, tranne i pannelli consolidati con la miscela F, che come già citato hanno presentato problemi di maturazione causati dal gelo. In media, l'incremento di velocità sonora dopo l'iniezione è pari a circa 3,8 volte.

I risultati delle prove soniche risultano significativi nella ricerca di eventuali anomalie esecutive. Ad esempio, in Figura 1 e Figura 2 si può notare come ci sia una corrispondenza tra la scarsa iniettabilità della parte superiore del pannello, dovuta forse alle condizioni ambientali durante le operazioni in sito, e le basse velocità

rilevate dopo l'intervento nella medesima porzione, comparabili con quelle nel muro non consolidato.

In generale, però, confrontando le mappe che riportano gli incrementi di velocità dopo l'iniezione con le mappe che rappresentano le quantità di materiale iniettato, non è sempre possibile trovare correlazioni puntuali. Ciò è legato al fatto che, stante la tipologia muraria e la presenza di numerosi ed ampi vuoti interconnessi tra di loro, il percorso compiuto dalla miscela all'interno delle cavità della muratura arriva talvolta a saturare zone molto lontane dal punto di iniezione. Osservando ad esempio le percentuali di vuoti iniettati dei campioni 06-S\_C/B e 07-S\_C/B, disposti uno a fianco dell'altro nel medesimo maschio murario, si nota che nel primo il valore è quasi doppio rispetto al secondo, mentre gli incrementi delle velocità soniche ottenuti sui due pannelli si invertono. Non conoscendo quindi la distribuzione reale dei vuoti ed i percorsi compiuti dalla miscela, può diventare forviante, come metodo di verifica della buona riuscita dell'intervento, l'utilizzo dei soli rapporti tra tempi/quantità di miscela iniettata in una zona specifica della parete.

Tabella 2. Risultati dei test sonici per i pannelli non consolidati (U) e iniettati (C).

Campione	% vuoti iniettati	Velocità pre [m/s]	Velocità post [m/s]
01-O_C/A*	8.9	461	2357 (5.1)
02-O_C/A*	10.3	405	2599 (6.4)
03-O_U*	-	739	-
04-S_U	-	611	-
05-S_U	-	433	-
06-S_C/B	18.2	456	1793 (3.9)
07-S_C/B	10.2	401	1997 (5.0)
08-O_U	-	585	-
09-O_U*	-	351	-
10-O_C/C*	11.1	336	1608 (4.8)
11-O_C/C*	13.8	454	2148 (4.7)
12-O_U	-	551	-
13-O_U	-	739	-
14-O_C/D	12.4	555	2378 (4.3)
15-O_C/D	12.7	850	2484 (2.9)
16-T_C/E	12.3	369	1926 (5.2)
17-T_C/E	11.9	457	1583 (3.5)
18-T_U	-	402	-
19-O_C/F	15.1	881	2222 (2.5)
20-O_C/F	7.4	767	1156 (1.5)
21-O_U	-	649	-
Media U	-	533	-
Media C	12.0	568	2021 (3.8)

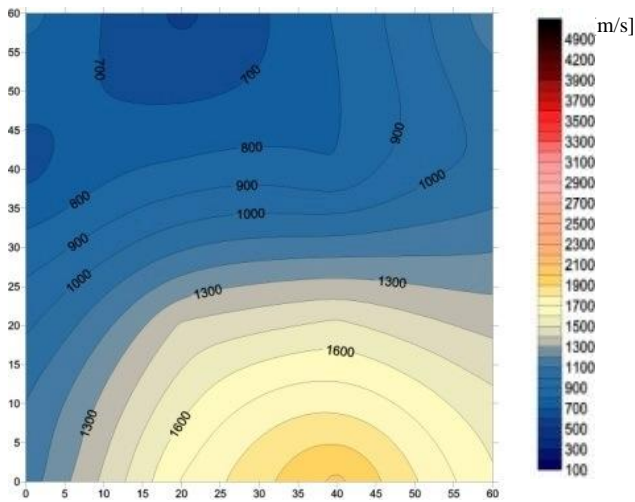


Figura 1 rappresentazione grafica delle velocità soniche post-iniezione per il pannello 20-O\_C/F.

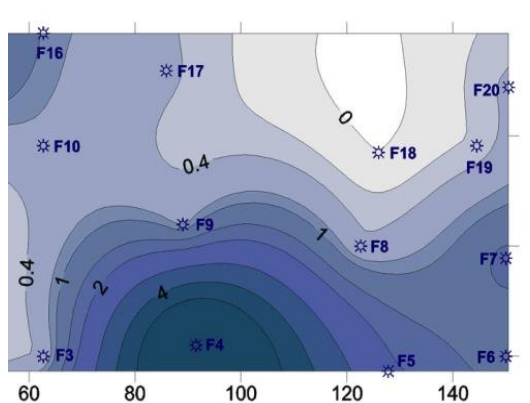


Figura 2 Rappresentazione grafica delle quantità di miscela iniettata nel pannello 20-O\_C/F.

## 6 PROVE DI COMPRESSIONE DIAGONALE

Per l'esecuzione delle prove di compressione diagonale è stato realizzato un apparato composto da tre travi realizzate ciascuna con 2 profili UPN120 accoppiati (Figura 3).

Per l'applicazione del carico sono stati utilizzati 3 martinetti idraulici della portata di 100 kN ciascuno, posizionati tra le due travi poste al vertice del pannello. Due barre filettate M24 collegano le travi di estremità poste ai vertici del pannello realizzando così un sistema auto-contrastato.

La forza applicata è stata misurata con l'ausilio di un trasduttore di pressione in parallelo al circuito idraulico dei tre martinetti, il sistema così composto è stato preventivamente calibrato in laboratorio con l'ausilio di celle di carico.

La misura delle deformazioni delle diagonali del pannello è stata realizzata con 4 trasduttori di spostamento potenziometrici, 2 per ciascun lato.

Tutta la strumentazione è stata connessa ad un sistema di acquisizione portatile collegato ad un

laptop per la visualizzazione e salvataggio dei dati.

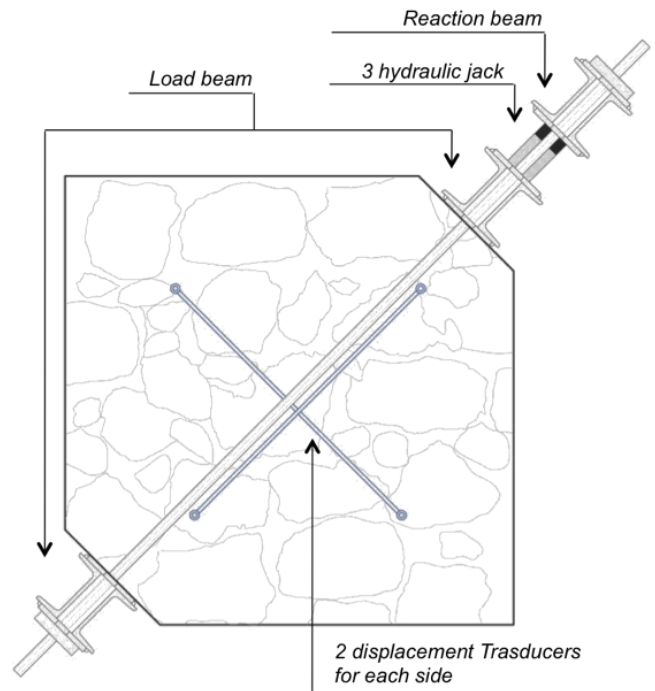


Figura 3. Setup della prova diagonale.



Figura 4. Vista di un campione durante il test.

La resistenza a taglio dei pannelli  $S_s$  [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ] è stata calcolata secondo la formula (1), dove  $P$  [N] è il carico applicato lungo la diagonale,  $A_n$  [ $\text{mm}^2$ ] è l'area netta della sezione orizzontale del pannello:

$$S_s = \frac{11.707 P}{A_n} \quad (1)$$

La deformazione angolare  $\gamma$  [mm/mm] è stata calcolata con l'equazione (2), dove  $\Delta V$  e  $\Delta H$  [mm] sono le deformazioni delle diagonali tese e compresse, e  $g$  [mm] è la lunghezza della diagonale del pannello:



$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \quad (2)$$

Il modulo a taglio  $G$  [N/mm<sup>2</sup>] è il rapporto tra la resistenza a taglio  $S_s$  e la deformazione angolare  $\gamma$ . È stato calcolato con l'equazione (3) a due diversi livelli di tensione, tra 0-30% e 30-60% della tensione massima.

$$G = \frac{S_s}{\gamma} \quad (3)$$

I pannelli (1-2-3; 9-10-11) ricavati da edifici non demoliti presentano la faccia superiore connessa con la muratura soprastante, risultano quindi caricati dal peso proprio della struttura.

La rappresentazione con i cerchi di Mohr dello stato tensionale relativo alla prova così eseguita non risulta quindi centrata sull'origine come avviene nel caso di campioni isolati, quindi il valore della tensione tangenziale  $\tau$  è diversa dalla tensione principale  $\sigma_I$ , come mostrato in Figura 5.

La Figura 6 mostra il diagramma tensione tangenziale/deformazione angolare dei campioni non consolidati (a) e quelli consolidati con iniezioni (b).

La differenza tra i test eseguiti sui campioni isolati e quelli parzialmente confinati è apprezzabile in termini di tensione massima considerando che lo stato tensionale di partenza non influenzi le rigidità a taglio.

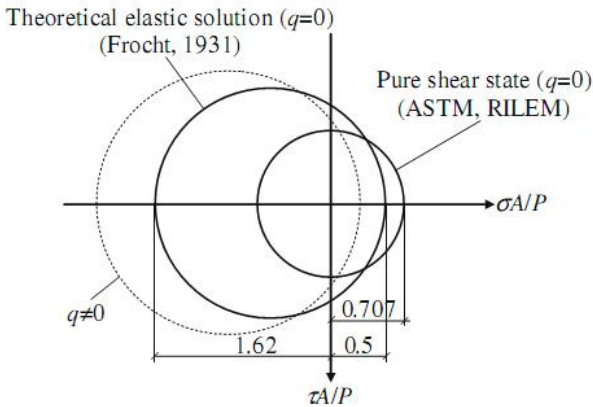


Figura 5. Rappresentazione con i cerchi di Mohr del test di compressione diagonale (da Calderini et al., 2010).

Secondo Frocht (1931), per  $q=0$ , le tensioni seguiranno le leggi:

$$\sigma_x = -0.56 \frac{F}{A} = -0.56 \frac{F\sqrt{2}}{A_{dttaq}} \quad (4)$$

$$\sigma_y = -0.56 \frac{F}{A} = -0.56 \frac{F\sqrt{2}}{A_{dttaq}} \quad (5)$$

$$\tau_x = \tau_y = 1.05 \frac{F}{A} = 1.05 \frac{F\sqrt{2}}{A_{dttaq}} \quad (6)$$

Risolvendo la matrice delle tensioni si ricaverà il coefficiente  $a=0.5$ , così la tensione principale risulterà:

$$\sigma_I = 0.5 \frac{F}{A} = 0.5 \frac{F\sqrt{2}}{A_{dttaq}} \quad (7)$$

e la resistenza a taglio assumerà il valore:

$$\tau = \frac{\sigma_I}{1.5} \quad (8)$$

Per  $q \neq 0$ , le tensioni seguiranno le leggi:

$$\sigma_x = -0.56 \frac{F}{A} = -0.56 \frac{F\sqrt{2}}{A_{dttaq}} \quad (9)$$

$$\sigma_y = -0.56 \frac{F}{A} + q = -0.56 \frac{F\sqrt{2}}{A_{dttaq}} + q \quad (10)$$

$$\tau_x = \tau_y = 1.05 \frac{F}{A} = 1.05 \frac{F\sqrt{2}}{A_{dttaq}} \quad (11)$$

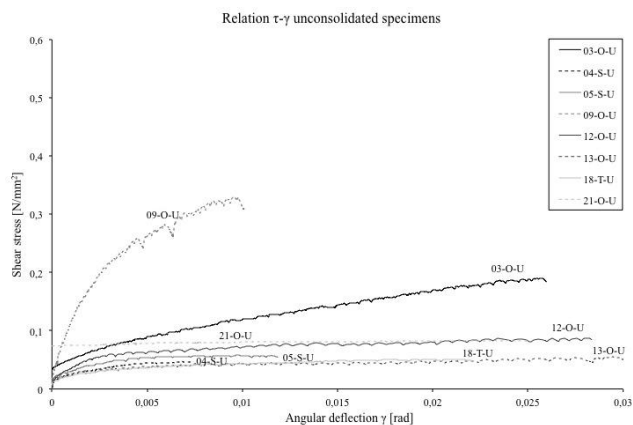
Risolvendo la matrice delle tensioni si ricaverà il coefficiente  $a$ , e la tensione principale sarà pari a:

$$\sigma_I = a \frac{F}{A} = a \frac{F\sqrt{2}}{A_{dttaq}} \quad (12)$$

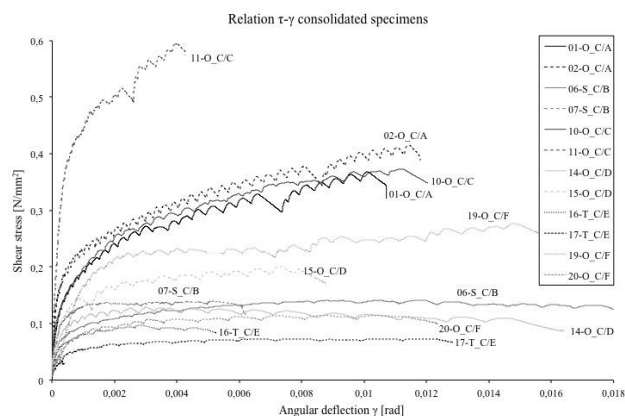
e la resistenza a taglio assumerà il valore:

$$\tau = \frac{\sigma_I}{1.5} \quad (13)$$

Per quanto concerne il modulo di taglio  $G$ , in via semplificativa la procedura è la stessa adottata nel caso di pannelli ricavati da pareti non confinate.



a



b

Figura 6. Diagramma tensione tangenziale/deformazione angolare per i campioni non consolidati (a) e iniettati (b).

In Tabella 2 sono riportati i risultati dei test di compressione diagonale divisi in base all'ubicazione dei pannelli con muratura omogenea e per tipologia di miscela iniettata. I valori tra parentesi indicano il rapporto tra i valori di resistenza o rigidezza dei pannelli consolidati rispetto a quelli non consolidati.

In generale tutti i risultati confermano l'efficacia del consolidamento con iniezioni su tutte le murature testate. Il modulo a taglio incrementa (mediamente 13.5 volte) maggiormente rispetto la resistenza a taglio (mediamente 2.2 volte) dimostrando una maggior coesione degli strati interni della muratura.

Tabella 3. Risultati dei pannelli non consolidati (U) e iniettati (C).

Campione	$\tau_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{0-30\%}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$G_{30-60\%}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
01-O_C/A*	0.13 (2.6)	561 (11.2)	309 (17.3)
02-O_C/A*	0.15 (2.9)	831 (16.5)	479 (26.8)
03-O_U*	0.05	50	18
04-S_U	0.05	45	10
05-S_U	0.06	71	14
06-S_C/B	0.14 (3.0)	909 (20.0)	67 (6.7)
07-S_C/B	0.14 (3.0)	701 (15.5)	249 (24.8)
09-O_U*	0.11	135	80
10-O_C/C*	0.12 (1.1)	875 (6.5)	191 (2.4)
11-O_C/C*	0.22 (2.1)	1202 (8.9)	944 (11.9)

12-O_U	0.09	40	15
13-O_U	0.06	36	4
14-O_C/D	0.13 (1.8)	630 (16.6)	381 (38.7)
15-O_C/D	0.20 (2.9)	747 (19.7)	289 (29.3)
16-T_C/E	0.10 (1.9)	345 (17.7)	159 (25)
17-T_C/E	0.07 (1.4)	120 (6.2)	78 (12.3)
18-T_U	0.05	19	6
19-O_C/F	0.23 (2.8)	160 (4.6)	183 (-)
20-O_C/F	0.11 (1.4)	202 (5.7)	83 (-)
21-O_U	0.08	35	-
Media U	0.07	54	21
Media C	0.15 (2.2)	607 (11.2)	285 (13.5)

## 7 CONCLUSIONI

Dal punto di vista meccanico gli interventi di iniezione così eseguiti hanno dimostrato generalmente la loro efficacia.

Nonostante la percentuale di vuoti iniettati sia compresa tra 7% e 18%, in media 12%, gli incrementi sia in termini di velocità soniche, mediamente salite a valori di circa 2000 m/s corrispondenti al 380% delle velocità originarie, sia per la resistenza a taglio, incrementata tra 140% e 300%, mediamente del 220%, rispetto ai campioni non consolidate, sono molto più elevati. I risultati ottenuti in termini assoluti, resistenza a taglio di 0.15 N/mm<sup>2</sup> dopo l'intervento di iniezione, contraddistingue murature di buona qualità, se confrontati con i valori riportati nella tabella C8A.2.1 della circolare allegata alle NTC2008.

Partendo dai valori indicati nella tabella stessa per questa tipologia di muratura, in pietrame disordinata, si ricava come valore massimo della resistenza a taglio 0,032 N/mm<sup>2</sup>, inferiore alla metà di quanto ricavato dai test di compressione diagonale su pannelli non consolidati (0,07 N/mm<sup>2</sup>).

Considerando il coefficiente correttivo dei parametri meccanici, riportato in tabella C8A.2.2, per muratura in pietrame disordinata consolidata con iniezioni, la campagna sperimentale conferma sostanzialmente il coefficiente pari a 2 per l'incremento di resistenza a taglio. Tale fattore non risulta invece corretto per gli incrementi di rigidezza, che mediamente crescono con un fattore di 11.2 per basse tensioni e di 13.5 tra il 30% e 60% del carico. E' però da osservare che tale incremento, molto più elevato di quello riportato in normativa, si riferisce a valori di partenza estremamente bassi del modulo G, e che quindi i valori di G ottenuti nella presente sperimentazione rientrano tra quelli forniti in normativa solo per le pareti sottoposte ad intervento di consolidamento.

Come visto nel paragrafo 4, le miscele si possono raggruppare in tre gruppi in base alle proprietà meccaniche. Partendo da quella suddivisione e confrontandola con i risultati ottenuti dalle prove di compressione diagonale sui relativi pannelli, si osserva come le miscele (A-B-D), con la resistenza a compressione più alta (tra 27 e 37 N/mm<sup>2</sup>), ottengono incrementi di resistenza a taglio compresi tra 235% e 300%, mentre la miscela E, avente resistenza a compressione più bassa (circa 5 N/mm<sup>2</sup>), ha incrementi in termini di resistenza a taglio inferiori e pari a 165%. Tale risultato è comunque influenzato dalle scarse proprietà meccaniche delle pareti originarie, che nel caso della muratura indagata a Tempera (campione 18) risulta quella con il modulo a taglio (19 N/mm<sup>2</sup>) e con le velocità soniche più basse tra tutti i campioni non consolidati.

Nel caso delle miscele (C-F) con resistenza a compressione di circa 18 N/mm<sup>2</sup>, si ottengono dei valori d'incremento del 160% per la miscela C e del 210% per la F. Il minor incremento tra le due è giustificabile in quanto la muratura consolidata con miscela C presenta al suo stato originario (pannello 9) buone qualità, sia in termini di resistenza a taglio (0.11 N/mm<sup>2</sup>) e modulo a taglio (135 N/mm<sup>2</sup>), più alto tra tutti i campioni indagati, dimostrando la maggior efficacia delle iniezioni quando queste vengano applicate su murature fortemente disomogenee e disgregate.

L'impiego di miscele con proprietà meccaniche elevate non trova giustificazione, in termini di efficacia, rispetto a quelle con proprietà confrontabili con le malte originarie, scontando nel caso dei composti ternari gravi problemi di incompatibilità chimico-fisica. Si può comunque in generale concludere che gli interventi di consolidamento proposti hanno ottenuto in tutti i pannelli testati buoni risultati, garantendo anche in murature fortemente disomogenee e danneggiate il recupero delle proprietà meccaniche.

## RINGRAZIAMENTI

Il lavoro sperimentale presentato è stato reso possibile dalla collaborazione con Basf Construction Chemicals Italia Spa, Tassullo Materiali Spa, Kerakoll Spa, e Mapei Spa. Si desidera ringraziare inoltre gli Ingg. Francesca Breda, Chiara Frasson ed Ermanno Pedron che hanno collaborato alla sperimentazione nell'ambito dello svolgimento della loro tesi di laurea.

## REFERENCES

- AAVV. "Valutazione e riduzione della vulnerabilità di edifici in muratura". Report of the Executive Project 2005-2008, DPC-Reluis, Research Line 1, Task 3b.3. Responsible Modena, C.. Coordinatoor Vignoli, A. March 2009
- Artioli G., Casarin F., Dalla Benetta M., da Porto F., Secco M., Valluzzi M.R. (2011). "Restoration of historic masonry structures damaged by the 2009 Abruzzo earthquake through injection grouts", 9th Australasian Masonry Conference, Queenstown, New Zealand, 15-18 February 2011 (on CD-ROM)
- Artioli G., Secco M., Mazzoli C., Coletti C., Valluzzi M.R. da Porto F., (2010). "Restoration of historic masonry structures damaged by the 2009 Abruzzo earthquake through cement- and polymer-free injection grouts", Proc. of the 2nd Historic Mortars Conference (HCM 2010) & RILEM TC 203-RHM 'Repair mortars for historic masonry' final workshop, Prague, Czech Republic, 22-24 September 2010, pp. 871-882;
- ASTM E519 / E519M Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages (2010)
- Binda, L., Cardani, G., Saisi, A., Valluzzi, M.R. "Vulnerability analysis of the historical buildings in seismic area by a multilevel approach", Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing), Vol. 7, n. 4 (2006) pp. 343-357, pp. 343-357
- Binda, L., Modena, C., Baronio, G., Abbaneo, S., "Repair and investigation techniques for stone masonry walls", Constr Build Mater, Vol. 11, n. 3 (1997), pp. 133-142
- Calderini, C., Cattari, S., Lagomarsino, S., "The use of the diagonal compression test to identify the shear mechanical parameters of masonry". Construction and Building Materials, Vol. 24. (2010), pp. 677-685
- Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 "Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008", Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, pubblicata sulla Gazzetta Ufficiale n. 47 del 26 febbraio 2009 - Suppl. Ordinario n. 27
- DM 14/01/2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni", Ministero delle Infrastrutture, pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 29 del 4 febbraio 2008 - Suppl. Ordinario n. 30
- EN 196-1, "Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength" (2005)
- EN 1015-11, "Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar", (2007)
- Frocht M. M., Ann Arbor, Sept.-Dec., 1931, "Recent Advances in Photoelasticity", Transaction, ASME, Vol. 55, pp. 135-153
- Kalagri, A., Miltiadou-Fezans, A., Vintzileou, E. "Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures" Materials and Structures, (2010), doi: 10.1617/s11527-009-9572-1
- UNI 6556, "Tests of concretes. Determination of static modulus of elasticity in compression" (1976)
- Valluzzi, M.R., "On the vulnerability of historical masonry structures: analysis and mitigation", Materials and Structures, Vol. 40 (2007), pp. 723-743.
- Valluzzi, M.R., Binda, L., and Modena, C., "Experimental and analytical studies for the choice of repair techniques applied to historic buildings", Materials and Structures, Vol. 35, (2002), pp. 285-292.



- Valluzzi, M.R., da Porto, F., Modena, C., "Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls", *Materials and Structures*, Vol. 37, (2004), pp. 184-192
- Vintzileou, E., Miltiadou-Fezans, A., "Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime based grouts". *Eng Struct*, Vol. 30, (2008), pp. 2265– 2276
- Vintzileou, E., and Tassios, T.P., 'Three leaf stone masonry strengthened by injecting cement grouts.' *J. Structural Eng.*, ASCE, Vol. 121, n. 5, (1995), 848-856