
INIEZIONE DI MALTA LIQUIDA IN MURATURA A CASSETTA: RISULTATI SPERIMENTALI E PREVISIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE

Elizabeth N. Vintzileou

Università Tecnica Nazionale di Atene
Dipartimento di Ingegneria Strutturale
Laboratorio di Cemento armato
5, Iroon Polytechniou str., GR 15773 Zografou, Grecia

SOMMARIO. *Questo articolo riassume i risultati sperimentali disponibili come rilevato da test di compressione o compressione diagonale eseguiti su pareti in muratura a cassetta (con e senza iniezione di malta liquida).*

Sulla base dei risultati sperimentali, (a) sono rilevati ed analizzati i parametri che influiscono sul comportamento di una muratura senza iniezione di malta liquida, (b) è studiato il comportamento di una muratura con iniezione di malta liquida.

Poiché i risultati sperimentali mostrano che il parametro fondamentale necessario per ottenere il miglioramento delle caratteristiche meccaniche della muratura non è la resistenza a compressione della malta iniettata, viene attribuita importanza a malte ternarie e a malte idrauliche di natura calcarea: dal punto di vista fisico-chimico, tali materiali sono compatibili con i materiali reperibili in situ; producono inoltre un miglioramento delle caratteristiche meccaniche della muratura grazie alle migliori proprietà che le malte ternarie e idrauliche calcaree mostrano nel legame con i materiali in situ.

Sulla base dei dati sperimentali rilevati sulle pareti, nonché sui dati recenti di test eseguiti su cilindri iniettati con riempitivo, sono state ricavate formule semplici che permettono di calcolare la resistenza della muratura.

1. INTRODUZIONE

La muratura a cassetta (pietra o mattone) è un tipo di costruzione molto diffuso in strutture che rientrano nel patrimonio culturale edilizio europeo: si costruiscono due pareti esterne (in pietra o mattoni) intramezzate da un'intercapedine di spessore variabile. L'intercapedine tra le due pareti esterne viene riempito con un materiale sciolto, a bassa resistenza, formato da piccoli elementi in pietra e/o mattoni e malta. Questo tipo di muratura è molto vulnerabile ad azioni di diverso tipo. Poiché il legame tra la parete esterna e quella interna si deteriora di fatto, o addirittura svanisce nel tempo (a causa del decadimento dei materiali o delle azioni verticali e orizzontali in piano e fuori del piano), la muratura non risulta avere un comportamento unitario. Risulta un aumento della fragilità delle pareti esterne (che sono soggette alla maggior parte dell'azione esercitata), quindi aumenta la probabilità che la muratura venga danneggiata gravemente o addirittura che si verifichino collassi.

L'iniezione di malta liquida è una delle tecniche di intervento più diffuse, applicata soprattutto per migliorare le caratteristiche meccaniche della parete interna debole, nonché per riprodurre il riassetto tra pareti interne ed esterne di una muratura a cassetta. L'efficacia di tale tecnica è stata dimostrata e ben accettata anche dai più conservatori, nonostante sia chiaramente una tecnica non reversibile.

Considerando l'importanza della questione, negli ultimi due decenni sono stati dedicati considerevoli sforzi nella ricerca su questa tecnica, al fine di sviluppare malte idonee per l'iniezione in piccole intercapedini e fessure e di misurare le caratteristiche meccaniche della muratura migliorate dopo l'iniezione di malta liquida.

Quest'articolo presenta una ricerca sulla letteratura relativa alle caratteristiche meccaniche delle murature a cassetta in relazione alla compressione o alla compressione diagonale prima e dopo l'iniezione di malta liquida. Si include inoltre una breve analisi dello sviluppo di vari tipi di malta liquida per evidenziare le tendenze più importanti in questo settore, e anche per giustificare l'enfasi che viene dedicata in quest'articolo alle malte liquide ternarie e idrauliche calcaree.

2. MALTE LIQUIDE IDRAULICHE

Le malte liquide che vengono iniettate per riempire fessure e vuoti in murature, piuttosto che nei pori di materiali *in situ*, sono nella maggior parte dei casi leganti idraulici. Nelle murature storiche, infatti, è discutibile, se non addirittura proibita, l'applicazione di leganti organici, principalmente per lo sviluppo sfavorevole nel tempo delle caratteristiche sia fisiche, che meccaniche dei leganti organici, nonché per la loro incompatibilità fisico-chimica con i materiali *in situ*. Nei test meccanici descritti in quest'articolo, sono quindi utilizzati leganti idraulici poiché, dal punto di vista chimico-fisico e meccanico risultano essere più adeguati per l'utilizzo in murature storiche.

È dimostrato che le malte composte con cemento puro, che costituiscono la prima applicazione in strutture murarie, sono inadeguate per il riempimento di piccoli vuoti e fessure in murature storiche (iniettabilità inadeguata a causa di intasamento). Quest'impedimento riscontrato nelle malte di cemento puro ha portato Miltiadou ([1]) a provare l'aggiunta di materiali ultra fini, basandosi su criteri specifici di granularità). Sono state così sviluppate malte con elevate caratteristiche di iniettabilità e caratteristiche meccaniche adeguate. D'altro canto, è stata riconosciuta la necessità di disporre di malte con ampio spettro di caratteristiche meccaniche, al fine di soddisfare le necessità specifiche di ogni singola struttura storica. Sono state così sviluppate malte binarie (miscele di cemento e calce idratata, pozzolane naturali o

artificiali, fumi silicee, ecc) e malte ternarie (cemento, calce idrata e pozzolane naturali o artificiali). La percentuale di cemento variava tra il 50% e il 75%. Le malte di questo tipo raggiungono resistenze a compressione comprese tra 10,0 e 30,0 N/mm², con un range di resistenza a trazione compreso tra 1,2 e 3,0 N/mm² [1], ed è stata dimostrata la loro efficacia nel migliorare le caratteristiche meccaniche della muratura in cui vengono iniettate [2]. Tuttavia, test meccanici (vedi paragrafo 3.4) non hanno confermato la necessità di disporre di malte con elevata percentuale di cemento. Si stima, inoltre, che malte con minore percentuale di cemento siano più favorevoli a proteggere mosaici, affreschi ed elementi decorativi su superfici in muratura, poiché prevengono l'incompatibilità fisico-chimica con i materiali *in situ*. Si prevede quindi una migliore durata nel tempo dell'intervento. Tutto ciò ha portato a sviluppare e indagare su miscele alternative, le cosiddette malte ternarie con ridotta percentuale di cemento.

Sono state sviluppate malte ternarie composte da più di due costituenti, precisamente cemento (in una percentuale ridotta, diciamo compresa tra il 30% e il 50%), calce, pozzolane (naturali o artificiali), materiali ultra fini (come cenere volatile o fumo siliceo). Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche ottenute, per una percentuale di cemento pari al 30% sul peso totale, si possono ottenere resistenze a compressione fino a 10,0 N/mm² e resistenze a trazione dell'ordine di 3,0 N/mm² ([3] e [4]).

Solo recentemente sono state eseguite ricerche sull'uso di malte a base di calce idraulica (calce idraulica pura o combinata con un materiale pozzolanico), sebbene la loro similitudine con i materiali *in situ* possa offrire una soluzione promettente, ammesso che se ne dimostri anche la loro efficacia dal punto di vista meccanico (vedi paragrafo 3.4).

Le malte idrauliche iniettate in campioni di muratura descritte in quest'articolo soddisfano un gruppo di requisiti, precisamente requisiti reologici, fisici, chimici e meccanici, connessi alle caratteristiche meccaniche auspicabili della muratura iniettata di malta liquida (ad esempio le caratteristiche di resistenza e deformabilità), che dipendono dallo stato effettivo della muratura, dalle azioni applicate, dallo schema generale degli interventi, ecc.

3. CARATTERISTICHE MECCANICHE DI UNA MURATURA PRIMA E DOPO L'INIEZIONE DI MALTA LIQUIDA

3.1. Dati sperimentali disponibili

Nonostante l'importanza della questione, il numero di dati sperimentali disponibili in letteratura è piuttosto scarso. Si premette che sono riassunti e commentati solo i risultati sperimentali ottenuti da test su campioni ridotti, quindi rappresentativi solo del comportamento del materiale che costituisce la muratura e non della parete muraria vera e propria.

Vintzileou et al. [2], Toumbakari [3], Valluzzi [5] e Vintzileou et al. [4] hanno testato la compressione e/o la compressione diagonale su pareti di muratura a cassetta o in mattoni, prima e dopo l'iniezione di malta liquida. Nella Tabella 1 sono riportate le proporzioni di miscelazione delle malte utilizzate per l'iniezione nei campioni. Come malte sono state utilizzate diverse combinazioni di materiali (da malte a base di cemento puro a malte idrauliche calcaree pure), tenendo conto di un'ampia gamma di caratteristiche meccaniche di base. Nella Tabella 2, insieme ai risultati degli esperimenti, sono riportate le caratteristiche geometriche delle pareti, nonché le caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati per la costruzione dei campioni.

3.2. Meccanica di muratura a cassetta in compressione, prima e dopo l'iniezione di malta liquida

Nelle murature a cassetta sottoposte a compressione, il carico applicato è diretto soprattutto sulle pareti esterne (Figura 1). La resistenza a compressione, infatti, così come il modulo di elasticità, del materiale di riempimento è normalmente di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quella delle pareti esterne. Di conseguenza, come dimostrato per via sperimentale da Egermann [6] e da Binda et al. [7], le pareti esterne sopportano la maggior parte del carico applicato. Inoltre, data l'incompatibilità delle deformazioni delle pareti, (a) il legame tra le pareti della muratura e il materiale di riempimento può rompersi e (b) le pareti esterne sono soggette a deformazioni orizzontali (fuori del piano) a causa della maggiore dilatanza laterale del materiale di riempimento.

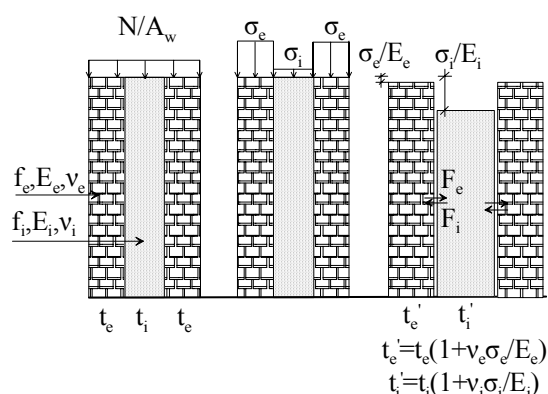


Figura 1: Stress e deformazioni nelle pareti esterne e nel materiale di riempimento di una muratura a cassetta sottoposta a compressione (non in scala)

Quest'ultimo, al contrario, beneficia della costrizione creata dalle pareti esterne, che ne migliorano così in qualche modo le scarse caratteristiche meccaniche. Questo comportamento porta al modo di cedimento che era stato osservato in tutti i campioni sottoposti a compressione (Figura 2): aumentando il carico sulla muratura, si vede l'instaurarsi del fenomeno di cracking sulle due facce e sui due lati delle pareti. Le fessure verticali sulle facce dei campioni attraversano i giunti in malta, oppure le pietre e i mattoni, con incidenza che dipende dalle resistenze relative dei materiali. D'altro canto, lungo l'interfaccia tra parete esterna e parete interna appaiono soprattutto fessure trasversali (verticali), mentre in un certo numero di casi le fessure si aprono anche all'interno del materiale di riempimento. Il meccanismo che produce il cedimento della muratura può essere individuato osservando lo sviluppo delle fessure verticali nella muratura.

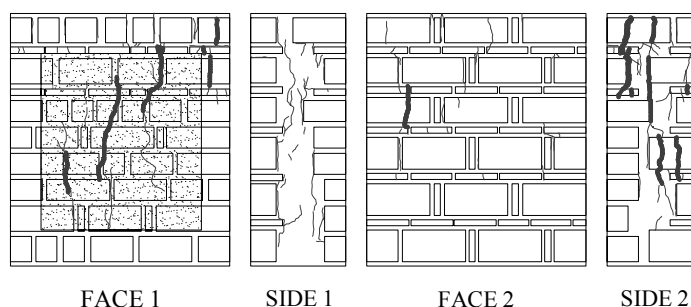


Figura 2. Modo di cedimento tipico di muratura a cassetta in compressione [4]

Come illustrato nella Tabella 2, infatti, l'apertura di fessure trasversali è decisamente maggiore di quella delle fessure sulle facce della muratura. Ciò evidenzia chiaramente che dopo la formazione di fessure trasversali, ogni parete si comporta in modo pressoché indipendente rispetto alle altre. Poiché la debolezza di ogni singola parete è sostanzialmente maggiore di quella dell'elemento nel suo insieme, man mano che aumenta il carico di compressione, si manifesta con evidenza maggiore la deformazione fuori del piano delle pareti esterne. Questo fenomeno è accentuato dalle deformazioni orizzontali imposte dal materiale di riempimento (Figura 1).

Quando si inietta la malta nella muratura (utilizzando una malta ad alta iniettabilità), tutti i vuoti e le fessure vengono riempiti fino a ridursi a dimensioni di alcune decine di millimetri. La maggior parte del materiale iniettato migliora il comportamento del materiale di riempimento e di quello delle interfacce, migliorando collateralmente anche le caratteristiche delle pareti esterne. La muratura risulta così più o meno omogeneizzata. Ne consegue (a) un aumento del contributo del materiale di riempimento alla resistenza al carico di compressione. Si riducono così le tensioni sulle pareti esterne. D'altro canto, (b) diminuisce la differenza delle caratteristiche di deformabilità delle pareti. Si riducono così anche le deformazioni orizzontali aggiuntive sulle pareti esterne dovute alla dilatanza laterale del materiale di riempimento. Infine, un fattore da non sottovalutare, (c) la malta contribuisce al miglioramento del legame lungo le interfacce di pareti consecutive. Ne consegue un ritardo nell'apertura di fessure trasversali (critiche) e un miglioramento della resistenza a compressione della muratura. Il ritardo con cui si manifestano le prime fessure trasversali è osservato in risultati sperimentali. Infatti, come illustrato nella Tabella 2, sebbene prima dell'iniezione di malta, nel momento in cui viene raggiunta la resistenza a compressione della muratura non iniettata ($f_{wc,0}$), siano state misurate aperture trasversali (w_{trans}) dell'ordine di parecchi millimetri, per uno stesso valore di stress di compressione, l'apertura di fessure trasversali nelle pareti iniettate ($w_{trans,fwc0}$) è praticamente uguale a zero. Tuttavia, nel momento in cui si raggiunge la resistenza delle interfacce (iniettate), ha inizio la separazione tra le pareti ed il meccanismo finale di cedimento è simile a quello che si riscontra nella muratura prima dell'iniezione di malta o in una muratura spessa a parete singola.

3.3. Caratteristiche meccaniche di una muratura non iniettata in compressione

Sulla base dei risultati sperimentali riassunti nella Tabella 2, si possono produrre i commenti seguenti:

(a) La resistenza a compressione di unità in muratura non è un parametro fondamentale per la resistenza a compressione di una muratura non iniettata di malta: come esempio si possono confrontare i valori di resistenza a compressione della muratura misurati da Vintzileou et al. [2] su pareti in pietra, la cui resistenza a compressione è uguale a 100 N/mm^2 , con quelli ottenuti da Toumbakari [3], dove la resistenza a compressione delle pietre è pari a 55 N/mm^2). Al contrario,

(b) sembra che la resistenza a compressione della malta e quella del materiale di riempimento influiscano in modo più importante sulla resistenza a compressione della muratura. Le pareti testate da Toumbakari [3], infatti, raggiungevano in generale resistenze a compressione più alte di quelle delle pareti testate da Vintzileou et al., grazie proprio alla maggiore resistenza a compressione di materiale di riempimento e malta.

(c) I valori di resistenza a compressione della muratura, misurate su pareti identiche, mostrano una differenza pari a circa il 30% tra il valore minimo e il valore

massimo. Nel Capitolo 4, dove si tenta di stimare la resistenza a compressione di una muratura, si tiene conto proprio di questo fattore.

(d) Il rapporto tra modulo di elasticità (misurato ad un livello di tensione pari a circa $0,3 f_{wc,0}$) e resistenza a compressione di una muratura non iniettata sembra essere molto discontinuo (Figura 3). Come riscontrato anche in murature moderne, la maggior parte dei valori di tale rapporto risulta comunque essere compreso tra 500 e 1500.

(e) I valori di deformazione verticale corrispondenti alla resistenza a compressione della muratura prima dell'iniezione di malta sono molto discontinui (Figura 4). Escludendo i valori massimi del limite di deformazione misurati da Valluzzi [5], sembra tuttavia che per i tipi di muratura testati all'interno dei programmi in esame, i valori più frequenti di $\epsilon_{wu,0}$ siano compresi tra 0,001 e 0,0025.

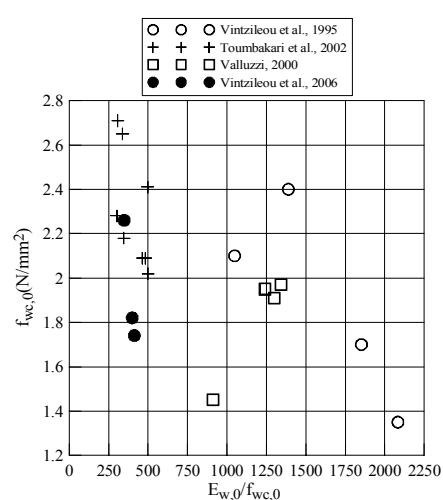


Figura 3. Modulo di elasticità di muratura non iniettata, normalizzato alla resistenza a compressione di muratura vs. resistenza a compressione di muratura non iniettata.

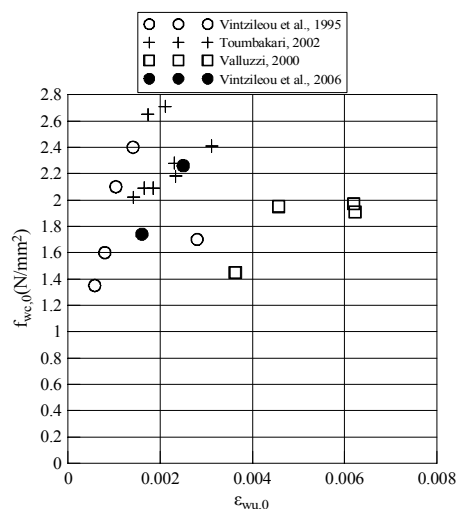


Figura 4. Relazione tra resistenza a compressione di muratura non iniettata e deformazione corrispondente.

3.4. Caratteristiche meccaniche di una muratura iniettata in compressione

(a) Come nel caso della resistenza a compressione della muratura prima dell'iniezione di malta, i dati riportati nella Tabella 2 dimostrano che in ogni singola serie di test, dopo l'iniezione, si osserva una differenza dell'ordine del 30% tra la resistenza a compressione minima e massima. Ciò influisce sul grado di precisione da applicare nella stima della resistenza a compressione di una muratura iniettata con ogni tipo di modello, sia questo empirico o analitico.

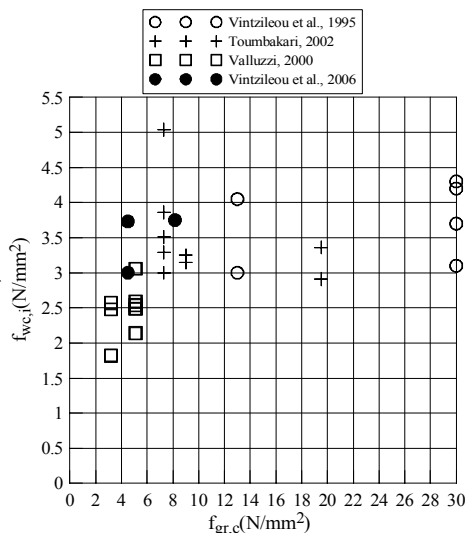


Figura 5. Relazione tra resistenza a compressione della malta e resistenza a compressione ottenuta nella muratura iniettata di malta.

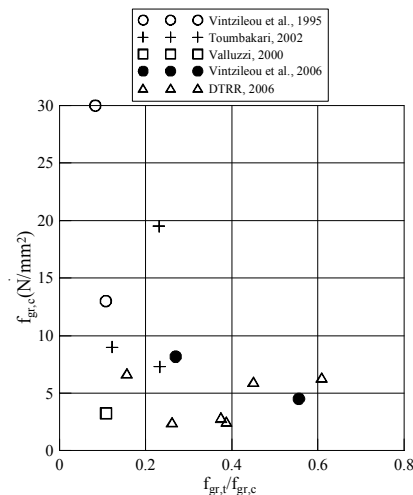


Figura 6. Rapporto tra resistenza a trazione e resistenza a compressione della malta liquida in funzione della resistenza a compressione della malta liquida.

(b) La Figura 5 illustra la relazione tra resistenza a compressione della malta e la resistenza a compressione corrispondente della muratura iniettata di malta. Si può osservare che vi è una netta tendenza all'aumento della resistenza a compressione della muratura iniettata parallelamente all'aumento della resistenza a compressione della malta, $f_{gr,c}$, fino a che quest'ultima non supera i 10 N/mm^2 circa. Per valori $f_{gr,c}$ superiori, non si osserva un ulteriore aumento importante della resistenza a compressione della muratura. Si deve notare che malte con resistenza a compressione fino a circa 10 N/mm^2 sono malte ternarie con percentuale di cemento ridotta (inferiore al 50% sul peso totale) oppure malte idrauliche calcaree, mentre le malte cementizie mostrano resistenze a compressione comprese tra 15 N/mm^2 e 30 N/mm^2 . Questa importante osservazione suggerisce che la proprietà chiave che influisce sulle caratteristiche meccaniche di una muratura iniettata con malta non sia la resistenza a compressione della malta.

(c) Toumbakari [3] ha ipotizzato nel suo lavoro che il parametro chiave per il miglioramento delle caratteristiche meccaniche della muratura a cassetta siano le caratteristiche di legame delle interfacce tra malta liquida e materiali *in situ*, poiché il miglioramento delle caratteristiche di legame lungo le interfacce pareti esterne - materiale di riempimento contribuisce a ritardare la formazione di fessure trasversali che, come descritto nel paragrafo 3.2, causano il cedimento della muratura. Test di taglio su tali interfacce [3] hanno di fatto dimostrato che la resistenza massima di legame ottenuta da malte liquide ternarie, con minore resistenza a compressione, era uguale o addirittura superiore alla resistenza di legame di interfacce malta liquida cementizia, con maggiore resistenza a compressione, - materiali *in situ*. Questo risultato è stato confermato in pieno da un'indagine sperimentale sistematica eseguita da Adami et al. [8]. I due test diretti di tensione e taglio eseguiti sulle interfacce malta liquida - pietra o mattone hanno dimostrato un migliore comportamento delle malte liquide ternarie (resistenza medio-bassa) rispetto alla malta liquida cementizia. Come illustrato nella Figura 7, infatti, il coefficiente di frizione mobilitato lungo le interfacce malta liquida - travertino è superiore nelle malte liquide G2 e G4 di quanto sia per la malta liquida cementizia di riferimento G1. Si deve notare che le malte liquide G2 e G4 sono malte ternarie (cemento-calce-metacaolino o cemento-calce-

pozzolana) con resistenza a compressione uguale a 13,6 e 7,6 MPa (dopo 90 giorni), mentre la resistenza a compressione corrispondente della malta liquida cementizia G1 è uguale a 17,9 MPa.

Poiché le caratteristiche di legame dipendono dalla resistenza a trazione del materiale legante, ci si potrebbe attendere una correlazione migliore tra la resistenza a compressione della muratura iniettata di malta liquida e la resistenza a trazione della malta liquida. Un primo segnale positivo della validità di tale presupposto consiste nel fatto che, come illustrato nella Tabella 1 e nella Figura 6, il rapporto tra resistenza a compressione e resistenza a trazione della malta liquida non è costante. Si evidenzia piuttosto una netta tendenza all'aumento del rapporto $f_{gr,t}/f_{gr,c}$ con la diminuzione della resistenza a compressione della malta liquida. Come illustrato nella stessa Figura 6, si deve notare che per una resistenza a compressione della malta liquida variabile tra 3,0 e 10,0 N/mm² (relativamente a malte liquide ternarie e idrauliche calcaree), i valori del rapporto $f_{gr,t}/f_{gr,c}$ variano tra 0,20 e 0,60. Basandosi sui dati disponibili, non è tuttavia possibile trovare una relazione tra la resistenza a compressione della malta liquida ed il rapporto $f_{gr,t}/f_{gr,c}$.

(d) Nella Figura 8, inoltre, è illustrato il plot dei valori sperimentali di resistenza a compressione rispetto alla resistenza a trazione della malta liquida corrispondente. Considerando le differenze a livello di geometria, qualità dei materiali utilizzati, dettagli costruttivi, ecc. tra una serie di test e le altre, la correlazione relativamente lineare tra $f_{wc,s}$ e $f_{gr,t}$ può essere considerata soddisfacente. Questo risultato spiega (i) il fatto che le malte liquide ad elevata resistenza a compressione non sono così efficaci come ci si potrebbe attendere dal punto di vista meccanico e, cosa ancora più importante, (ii) prova che le malte liquide ternarie e idrauliche calcaree, che si prevede soddisfino i requisiti di durata, possono migliorare anche le caratteristiche meccaniche di murature a cassetta ad un livello tale da portarle a soddisfare i requisiti di capacità portante imposti per strutture storiche.

(e) I risultati sperimentali dimostrano che in linea generale la rigidità di una muratura iniettata di malta liquida (espressa dal modulo di elasticità) è superiore alla rigidità di pareti non iniettate. Sebbene da questo punto di vista i risultati sperimentali siano relativamente discontinui, la maggior parte dei valori $E_{wc,s}/E_{wc,0}$ non supera 1,60. I dati della Tabella 2, inoltre, mostrano che il miglioramento della resistenza è superiore al miglioramento della rigidità. Il rapporto tra modulo di elasticità e resistenza a compressione della muratura dopo l'iniezione di malta liquida è dunque, in genere, minore rispetto al rapporto corrispondente prima dell'iniezione di malta liquida.

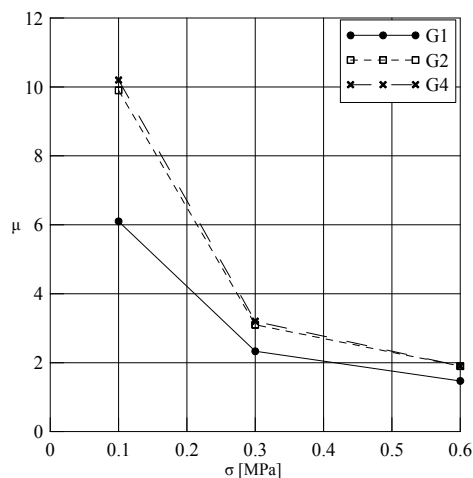


Figura 7: Effetto di tensione normale sul coefficiente di frizione lungo interfacce malta liquida – travertino (età = 90 giorni)

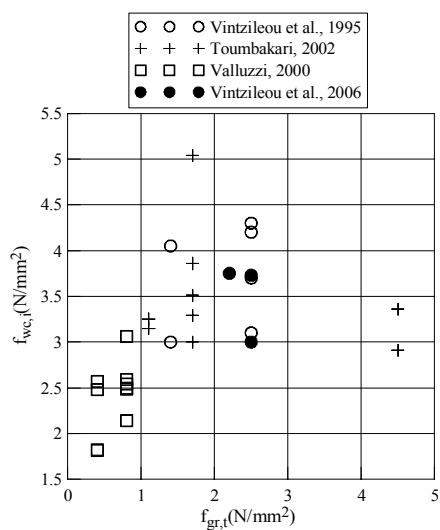


Figura 8. Relazione tra resistenza a trazione di malta liquida e resistenza a compressione ottenuta in muratura iniettata di malta liquida.

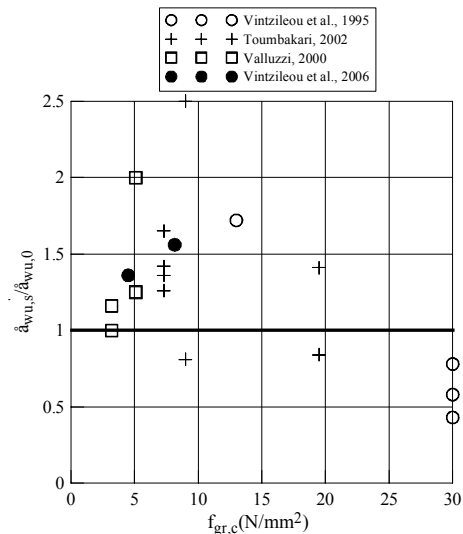


Figura 9. Relazione tra resistenza a compressione di malta liquida e deformazione a resistenza di muratura iniettata di malta liquida normalizzata alla deformazione corrispondente di muratura non iniettata.

- (f) Nella Figura 9 è illustrata un'altra scoperta importante: se si usa una malta liquida con resistenza medio-bassa, vale a dire una malta liquida con percentuale di cemento ridotta, oppure una malta liquida idraulica calcarea, la deformazione corrispondente alla resistenza a compressione della muratura iniettata di malta liquida è superiore a quella della muratura non iniettata. Nel caso delle malte cementizie si verifica esattamente il contrario. Sembra, quindi, che l'iniezione di miscele cementizie produca un comportamento più friabile della muratura, mentre malte liquide ternarie e idrauliche calcaree permettono alla muratura di sopportare deformazioni di compressione superiori prima di raggiungere la propria resistenza massima. Questo può essere considerato un altro segnale a favore dell'utilizzo di malte liquide con resistenza medio-bassa.

3.5. Caratteristiche meccaniche di una muratura iniettata di malta liquida in tensione diagonale o in taglio

L'effetto dell'iniezione di malta liquida sulla resistenza di taglio di una muratura a cassetta è stato misurato testando pareti sotto carico verticale e forza orizzontale ([9] e [10]), oppure testando pareti in compressione diagonale (vedi i dati della Tabella 4). Come illustrato nella Tabella 4, sebbene i risultati disponibili siano limitati, è chiaro che l'iniezione di malta liquida produce un notevole miglioramento nella resistenza. Anche in questo caso si può osservare che l'aumento di resistenza in definitiva non è proporzionale alla resistenza a compressione della malta liquida. L'importante aumento della tensione a cedimento ottenuto con malte liquide a bassa-media resistenza suggerisce che anche in questo caso il parametro decisivo è il legame tra malta liquida e materiali *in situ*.

Tomazevic et al., [9] hanno ottenuto risultati simili eseguendo test di taglio su pareti sottoposte contemporaneamente a un carico verticale. La muratura era stata costruita in diversi modi, al fine di simulare quelli delle strutture storiche della Slovenia. Le pareti sono state iniettate con malta cementizia. Nella maggior parte dei casi, gli autori hanno riscontrato un aumento della resistenza a taglio variabile tra il 110% e il 250%, associato a una riduzione piuttosto lieve dello spostamento orizzontale alla massima resistenza di taglio (compreso tra il 10% ed il 30%). Si deve notare che le pareti, sottoposte a forze orizzontali cicliche, hanno mostrato un comportamento relativamente stabile, senza indebolimento importante nella risposta alla forza per l'applicazione di distorsioni angolari fino all'1%.

Si deve notare che i risultati sperimentali disponibili, relativi al comportamento a taglio di murature o pareti iniettate e non iniettate di malta liquida, sono piuttosto scarsi e non permettono di prevedere in modo affidabile l'efficacia dell'iniezione di malta liquida.

4. PREVISIONE DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE DI UNA MURATURA A CASSETTA PRIMA E DOPO L'INIEZIONE DI MALTA LIQUIDA

Numerosi ricercatori hanno tentato di eseguire una modellazione analitica di pareti di muratura a cassetta con l'utilizzo di metodi ad elementi finiti (vedi tra gli altri, [7], [11] e [12]). In parecchi casi, i ricercatori sono stati in grado di riprodurre le curve sperimentali tensione-deformazione in modo relativamente preciso. I loro lavori pregevoli, sebbene contribuiscano alla comprensione del comportamento di una muratura a cassetta, non sono tuttavia stati in grado di ottenere modelli di engineering congrui, applicabili a progetti di intervento su murature storiche che prevedono l'utilizzo di malte liquide. Rimane quindi sempre la necessità di individuare modelli fisici semplici che permettano di prevedere la resistenza a compressione di una muratura prima e dopo l'iniezione di malta liquida. Sebbene nel caso di monumenti importanti sia possibile o consigliabile eseguire dei test al fine di determinare le caratteristiche meccaniche della muratura in modo attendibile, nel caso generale di interventi su strutture storiche più o meno importanti o edifici che appartengono a nuclei urbani, non si dispone né del tempo né dei fondi necessari per svolgere una tale campagna sperimentale. Risulta pertanto di grande importanza la disponibilità di formule semplici, ma valide dal punto di vista fisico.

Nella parte che segue si descrive il tentativo fatto per applicare le formule esistenti ai risultati sperimentali disponibili, nonché per migliorare gli stessi, considerando il comportamento osservato e descritto nei paragrafi precedenti.

4.1. Stima della resistenza a compressione di una muratura a cassetta prima dell'iniezione di malta liquida

Anche le semplici formule disponibili, che permettono di stimare la resistenza a compressione di una muratura a cassetta iniettata di malta liquida, necessitano della stima della resistenza a compressione della muratura non iniettata. A tale scopo, Valluzzi [13] suggerisce di misurare *in situ* la resistenza a compressione delle pareti esterne, applicando la tecnica dei martinetti piatti. La resistenza a compressione del materiale di riempimento può essere misurata in laboratorio su parti interne prelevate *in situ*. Successivamente serve un modello ingegneristico che permetta di calcolare la resistenza a compressione della muratura a cassetta.

A tale scopo si potrebbe usare il modello semplice proposto da Egermann, [6]. Per tenere conto dell'interazione tra pareti esterne e materiale di riempimento, se viene

utilizzato questo modello è però necessario stimare due parametri, come descritto nella Figura 1. Come afferma lo stesso Egermann, lo stato attuale della conoscenza non permette tuttavia di effettuare una stima precisa di questi due parametri.

Tassios [14] ha ricavato formule ristrette per la stima della resistenza a compressione di una muratura non iniettata, le quali si basano sul modello di Egermann [6] e tengono conto dei dati sperimentali disponibili. Le formule di Tassios sono riuscite a prevedere in modo abbastanza soddisfacente le resistenze a compressione misurate da Valluzzi [5], Toumbakari [3] e Vintzileou et al., [2].

4.2. Stima della resistenza a compressione di una muratura a cassetta dopo l'iniezione di malta liquida

(a) Vintzileou et al. [2] hanno sviluppato una formula semplice che permette di calcolare la resistenza a compressione di una muratura a cassetta dopo l'iniezione di malta liquida. La formula è stata sviluppata sulla base del presupposto seguente: l'iniezione di malta liquida non influisce in modo importante sulle caratteristiche meccaniche delle pareti esterne. In realtà, se la muratura presenta uno stato fessurativo, la malta liquida va a riempire le fessure e i vuoti della malta, ma in un certo qual modo anche i pori dei materiali. Risulta tuttavia più sicuro supporre che l'iniezione di malta liquida ripristini la resistenza a compressione iniziale delle pareti esterne.

Al contrario, l'iniezione di malta liquida contribuisce al notevole miglioramento delle caratteristiche meccaniche del tamponamento. L'aumento della resistenza del tamponamento è considerato proporzionale alla radice quadrata della resistenza a compressione della malta liquida (intesa come indicatore della sua resistenza a trazione), poiché il cedimento della muratura è dovuto alla comparsa di fessure verticali. Questo tipo di cedimento è controllato dalla resistenza a trazione dei materiali, piuttosto che dalla loro resistenza a compressione. Il contributo del materiale di tamponamento rinforzato alla resistenza a compressione della muratura è proporzionale al rapporto V_i/V_w (V_i indica il volume del materiale di tamponamento nel volume totale, V_w , della parete). È stata così derivata la formula seguente:

$$f_{wc,i} = f_{wc,0} \left(1 + 1.25 \frac{V_i}{V_w} \frac{\sqrt{f_{gr,c}}}{f_{wc,0}} \right) \quad (1)$$

Questa formula è stata applicata ai risultati sperimentali disponibili riportati nella Tabella 2 (Figura 10). In linea generale, sembra che la formula sovrastimi la resistenza a compressione della muratura iniettata. Tuttavia, applicando un valore γ_{Rd} pari a 1,35, la formula riesce a ottenere valori di sicurezza per il progetto di una muratura a cassetta iniettata di malta liquida.

(b) Valluzzi [13] offre una versione modificata dell'equazione (1). Per riuscire a prevedere la resistenza a compressione del materiale di tamponamento iniettato, era stata proposta una formula empirica basata sui risultati ottenuti dai cilindri di test costruiti con materiale di riempimento e iniettati con malte idrauliche calcaree:

$$f_{i,s} = 0.31 f_{gr,c}^{1.18} \quad (2)$$

Quindi, l'espressione seguente permette di calcolare la resistenza a compressione della muratura:

$$f_{wc,i} = f_{wc,0} \left(1 + \frac{V_i}{V_w} \frac{f_{i,s}}{f_{wc,0}} \right) \quad (3)$$

Nella maggior parte dei casi, l'equazione (3) sovrastima la resistenza a compressione della muratura a cassetta iniettata. Per ottenere valori idonei per il progetto di muratura iniettata, ai valori previsti si deve infatti applicare un valore γ_{Rd} pari a 1,80.

(c) Per derivare un'espressione per la resistenza a compressione del materiale di riempimento iniettato, sono stati valutati i risultati disponibili ottenuti dai cilindri di materiale di riempimento testati prima e dopo l'iniezione di malta liquida (Tabella 4), vale a dire i risultati presentati in [1], [13], [4] e [15]. Considerando (i) le osservazioni fatte nel paragrafo 3.4 e (ii) il fatto che esiste una netta tendenza a utilizzare per murature storiche solo malte liquide ternarie o idrauliche calcaree, lo sforzo di mettere in relazione la resistenza a compressione del materiale di riempimento iniettato con la resistenza a trazione della malta liquida viene compiuto solo per quei cilindri che sono stati iniettati con malta ternaria o con malta idraulica calcarea. È stata così derivata l'espressione seguente:

$$f_{i,s} = 1.60 + 0.50f_{gr,t} \quad (4)$$

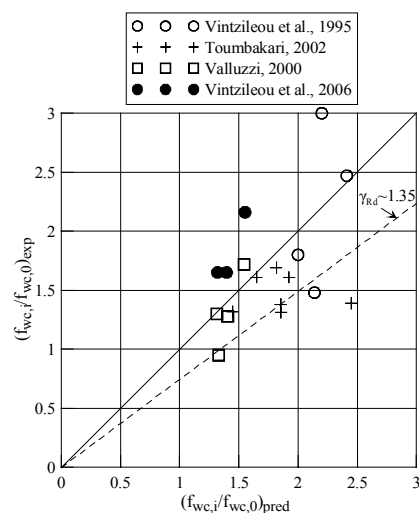


Figura 10: Confronto tra miglioramento previsto e miglioramento sperimentale della resistenza, sulla base dell'equazione (1).

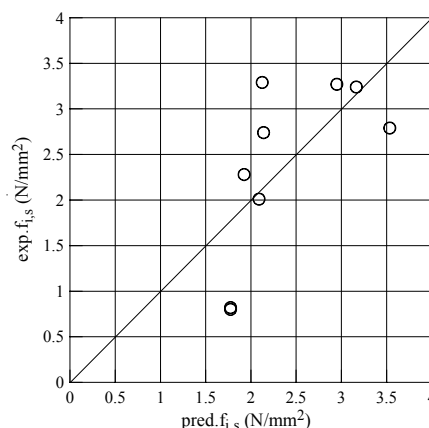


Figura 11: Confronto tra valori sperimentali e valori previsti della resistenza a compressione del materiale di riempimento iniettato (equazione (4)).

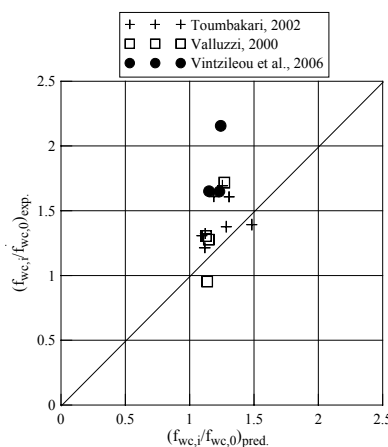


Figura 12: Confronto tra miglioramento previsto e miglioramento sperimentale della resistenza, sulla base dell'equazione (2). La resistenza a compressione del materiale di riempimento iniettato è calcolata in base all'equazione (4).

dove,

$f_{gr,t}$ indica la resistenza a trazione della malta liquida.

Nella Figura 11 è illustrato il confronto tra i valori previsti $f_{i,s}$ (usando l'equazione (4)) ed i valori sperimentali. Sembra che i valori previsti combacino con relativa precisione con quelli sperimentali.

Sulla base del presupposto adottato da Vintzileou et al. [2], si può così applicare l'equazione (3), prelevando $f_{i,s}$ dall'equazione (4). Applicando ai risultati sperimentali disponibili questa espressione alternativa, si ottiene quanto illustrato nella Figura 12. Questa espressione sembra offrire una stima piuttosto conservativa della resistenza a compressione di una muratura iniettata di malta liquida, utilizzabile in un progetto.

5. CONCLUSIONI

L'analisi della letteratura presentata in questo articolo permette di trarre le conclusioni seguenti:

1. Muratura a cassetta sottoposta a compressione: in tutti i casi ha mostrato lo stesso comportamento e lo stesso modo di cedimento. Nonostante i dati sperimentali siano intrinsecamente discontinui, è stato analizzato e spiegato l'effetto di parametri, quali le caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti, la resistenza del materiale di riempimento, ecc., sulla resistenza a compressione della muratura non iniettata.
2. Tutti i risultati sperimentali hanno dimostrato l'effetto positivo dell'iniezione di malta sia sulla resistenza a compressione, sia sulla resistenza a trazione della muratura a cassetta, nonché sul suo comportamento generale. Inoltre,
3. È stata inoltre dimostrata la preponderanza di malte liquide ternarie e idrauliche calcaree, poiché permettono di ottenere un importante miglioramento della resistenza a compressione associato a un notevole aumento della deformazione a resistenza. Al contrario, le malte liquide cementizie (di uguale iniettabilità e con resistenza a compressione decisamente superiore) non contribuiscono ad aumentare ulteriormente la resistenza a compressione della muratura, bensì producono un comportamento piuttosto friabile.
4. I vantaggi delle malte ternarie e idrauliche calcaree sono dovuti alle migliori caratteristiche di legame con i materiali *in situ*. Tali tipi di malta liquida diventano più interessanti per la loro compatibilità fisico-chimica con i materiali esistenti.
5. È stata dimostrata l'adeguatezza di semplici formule empiriche, basate comunque sulla meccanica della muratura a cassetta, per la previsione della resistenza a compressione di una muratura iniettata di malta liquida. Si deve comunque notare che è necessario approfondire la ricerca in direzione dello sviluppo di modelli fisici in grado di descrivere il comportamento di una muratura a cassetta prima e dopo l'iniezione di malta liquida.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Miltiadou A. 1990. *Etude des coulis hydrauliques pour la réparation et le renforcement des structures et des monuments historiques en maçonnerie*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France. Published in 1991 by LCPC in Collection «Etudes et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées», série Ouvrages d'art, ISSN 1161-028X, Paris, France

-
- [2] Vintzileou, E. and Tassios, T.P. 1995. *Three-leaf stone masonry strengthened by injecting cement grouts*. Journal of Structural Engineering, Vol.121, No.5, May, pp. 848-856.
- [3] Toumbakari E.-E. 2002. *Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls*. Doctor Thesis, Katholieke Universiteit Leuven.
- [4] Vintzileou E., Miltiadou-Fezans A. 2006. *Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime based grouts*. Submitted to Engineering Structures.
- [5] Valluzzi M.-R. 2000. *Comportamento meccanico di murature storiche consolidate con materiali e tecniche a base di calce*. Doctor Thesis, University of Trieste.
- [6] Egermann R. 1993. *Investigation on the load bearing behavior of multiple leaf masonry*. Proceedings IABSE Symposium “Structural Preservation of the Architectural Heritage”, Rome, pp. 305-312.
- [7] Binda L., Pina-Henriques J., Anzani A., Fontana A., Lourenco P.B. 2006. *A contribution for the understanding of load-transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls : Testing and modelling*. Elsevier, Engineering Structures, 28, pp. 1132-1147.
- [8] Adami C.-E., Vintzileou E., 2007. *Interventions to historic masonries: Investigation of the bond mechanism between stones or bricks and grouts*. To be published in Materials and Structures, RILEM.
- [9] Tomazevic M., Sheppard P. 1982. *The strengthening of stone-masonry buildings for revitalization in seismic regions*. 7th European Conference on Earthquake Engineering, Athens, Vol. 5, pp. 275-282
- [10] Tomazevic M., Apih V. 1993. *The strengthening of stone-masonry walls by injecting the masonry-friendly grouts*. European Earthquake Engineering, 1, pp. 10-20
- [11] Binda L., Fontana A., Anti L. 1991. *Load transfer in multiple-leaf masonry walls*. Proceedings, 9th International Brick Block Masonry Conference, pp. 1488-1497.
- [12] Binda L., Fontana A., Mirabella Roberti G. 1994. *Mechanical behaviour and stress distribution in multiple-leaf walls*. Proceedings, 10th International Brick Block Masonry Conference, pp. 51-59.
- [13] Valluzzi M.-R. 2004. *Consolidamento di murature in pietra. Iniezioni di calce idraulica naturale*. Collana Scientifica REFICERE, Gruppo Editoriale Faenza Editrice S.p.a., 128pp.
- [14] Tassios,T.P. 2004. *Rehabilitation of three-leaf masonry*. In Evoluzione nella sperimentazione per le costruzioni, Seminario Internazionale, 26 Sept- 3Oct., Centro Internazionale di Aggiornamento Sperimentale – Scientifico (CIAS)
- [15] DTRR (Directorate for Technical Research on Restoration)/Hellenic Ministry of Culture. 2006. Unpublished data.

APPENDICE Sommario dei dati sperimentali relativi a muratura a cassetta prima e dopo l'iniezione di malta liquida

Denominazione malta liquida	Proporzioni miscelazione (wt)						Proprietà meccaniche	
	Calce	Fumo siliceo	Pozzolana	Cemento	Super-plasticizzante	Acqua	$f_{gr,c}^{(1)}$ (N/mm ²)	$f_{gr,i}^{(2)}$ (N/mm ²)
Vintzileou et al. [2]								
A	0,0	25,0	0,0	75,0	1,33	90,0	30,0	2,5
B	27,5	22,5	0,0	60,0	1,66	100,0	13,0	1,4
Toumbakari [3]								
13b0	17,5	0,0	52,5	30,0			7,3	1,7
13b10	17,5	10,0	42,5	30,0			9,0	1,1
Cb0	0,0	0,0	0,0	100,0			19,5	4,5
Valluzzi [13]								
FEN-X/B Prodotto commerciale	100,0	0,0	0,0	0,0			3,23	0,35
FEN-X/A+F	100,0	0,0	0,0	0,0			5,10	-(³)
Vintzileou et al. [4]								
Malta liquida ternaria	25,0	0,0	45,0	30,0	1,0	80,0	8,16	2,2
Malta liquida a base di NHL	100,0	0,0	0,0	0,0	1,0	80,0	4,5	2,5
Note: (1) resistenza a compressione di malta liquida al momento del test sui campioni di muratura, (2) resistenza a flessione della malta liquida al momento del test sui campioni di muratura, (3) valore non riportato nella pubblicazione corrispondente								

Tabella 1: Proporzioni di miscelazione e caratteristiche meccaniche di malte liquide utilizzate per l'iniezione di campioni di muratura a cassetta

Parete	Dimensioni (m)	$t_e/t_i/t_e$	$f_{c,units}$ (N/mm ²)	$f_{m,c}$ (N/mm ²)	$f_{i,c}$ (N/mm ²)	$f_{gr,c}/f_{gr,t}$ (N/mm ²)	V_{gr}/V_w (%)
Vintzileou et al. [2]							
1 ⁽¹⁾	0,6x0,4x1,2	130/140/130	100	1,70	0,15	30/2,5	43,8
2	0,6x0,4x1,2	130/140/130	100	1,70	0,15	-	-
3 ⁽¹⁾	0,6x0,4x1,2	130/140/130	100	1,70	0,15	30/2,5	67,0
4	0,6x0,4x1,2	130/140/130	100	1,70	0,15	30/2,5	31,75
5	0,6x0,4x1,2	130/140/130	100	1,70	0,15	30/2,5	34,72
6	0,6x0,4x1,2	130/140/130	100	1,70	0,15	13/1,4	29,8
7	0,6x0,4x1,2	130/140/130	100	1,70	0,15	30/2,5	29,8
8	0,6x0,4x1,2	130/140/130	100	1,70	0,15	13/1,4	29,8
Toumbakari [3]							
BC1	0,6x0,4x1,2	90/220/90	25	3,40	1,00	7,3/1,7	31,0
BC2	0,6x0,4x1,2	90/220/90	25	3,40	1,00	9,0/1,1	23,0
BC3	0,6x0,4x1,2	90/220/90	25	3,40	1,00	19,5/4,5	19,0
BC4	0,6x0,4x1,2	90/220/90	25	3,40	1,00	7,3/1,7	25,0
BC5 ⁽¹⁾	0,6x0,4x1,2	90/220/90	25	3,40	1,00	7,3/1,7	
SC1	0,6x0,4x1,2	130/140/130	55	3,40	1,00	9,0/1,1	50,0
SC2	0,6x0,4x1,2	130/140/130	55	3,40	1,00	19,5/4,5	46,0
SC3	0,6x0,4x1,2	130/140/130	55	3,40	1,00	7,3/1,7	
SC4	0,6x0,4x1,2	130/140/130	55	3,40	1,00	7,3/1,7	30,0
Valluzzi [5]							
5I1	0,8x0,5x1,4	180/140/180	164			5,1/0,8	54,2
6I1	0,8x0,5x1,4	180/140/180	164	1,57		5,1/0,8	54,2
13I1	0,8x0,5x1,4	180/140/180	164	1,57		5,1/0,8	41,5
11I2	0,8x0,5x1,4	180/140/180	164	1,57		3,2/0,4	54,2
8I2	0,8x0,5x1,4	180/140/180	164	1,57		3,2/0,4	47,8
16I2	0,8x0,5x1,4	180/140/180	164	1,57		3,2/0,4	47,8
12I1T	0,8x0,5x1,4	180/140/180	164	1,57		5,1/0,8	54,2
14I1R	0,8x0,5x1,4	180/140/180	164	1,57		5,1/0,8	60,6
17I1RT	0,8x0,5x1,4	180/140/180	164	1,57		5,1/0,8	47,8
Vintzileou et al. [4]							
1	1,0x0,45x1,2	190/120/140	25	4,35	0,15	4,5/2,5	32,8
2	1,0x0,45x1,2	190/120/140	25	4,35	0,15	8,16/2,2	40
3	1,0x0,45x1,2	190/120/140	25	4,35	0,15	4,5/2,5	36,4
Nota: (1) Campioni con pareti di muratura trasversali							

Tabella 2: Muratura a cassetta in compressione. Sommario dei risultati sperimentali.

Parete	$f_{wc,0}$ (N/mm ²)	$f_{wc,i}$ (N/mm ²)	E_{w0} (N/mm ²)	E_{ws} (N/mm ²)	$\epsilon_{wu,0}$ (‰)	$\epsilon_{wu,s}$ (‰)
Vintzileou et al. [2]						
1 ⁽¹⁾	2,10	3,10	7000	6250	0,00104	0,0006
2	1,30	-	2706	-	-	-
3 ⁽¹⁾	2,40	4,30	5000	5971	0,00141	0,0011
4	1,60	-	4442	-	0,0008	-
5	1,70	4,20	5670	7778	0,0028	0,0012
6	1,35	4,05	5625	8438	0,00058	0,0010
7	-	3,70	-	15413	-	0,0009
8	-	3,00	-	3333	-	0,0009
Toumbakari [3]						
BC1	-	5,04	-	2238,2	-	0,00242
BC2	241	3,15	729,6	1564,9	0,00312	0,00254
BC3	2,09	2,91	1018,3	1404,8	0,00185	0,00155
BC4	2,18	3,00	1097,6	1040,4	0,00234	0,00294
BC5 ⁽¹⁾	2,28	3,86	1144,9	1170,2	0,00231	0,00314
SC1	2,02	3,25	720,4	1622,2	0,00142	0,00355
SC2	2,09	3,36	1138,7	1558,6	0,00165	0,00233
SC3	2,65	3,51	1374,8	1187,6	0,00173	0,00245
SC4	2,71	3,29	1443,3	1014,5	0,00211	0,00349
Valluzzi [5]						
5I1	1,45	2,49	2390	2273	0,00363	0,00726
6I1	1,95	2,49	2029	3093	0,00457	0,00571
13I1	-	2,54	-	3992	-	0,00991
11I2	1,97	2,57	1450	3449	0,0062	0,00625
8I2	1,91	1,82	1559	2367	0,00622	0,0072
16I2	-	2,48	-	1223	-	0,0107
12I1T	-	2,59	-	1336	-	0,00818
14I1R	-	2,14	-	1617	-	0,00821
17I1RT	-	3,06	-	1772	-	0,00824
Vintzileou et al. [4]						
1	1,82	3,00	1000	1200	-	
2	1,74	3,75	1440	1550	0,0016	0,0025
3	2,26	3,73	1500	1300	0,0025	0,0039

Tabella 2 (segue)

Walette	W_{vert} (mm)	W_{trans} (mm)	$W_{\text{trans, fwc,0}}$ (mm)	$W_{\text{trans, fwc,i}}$ (mm)	$E_{w0}/$ $f_{wc,0}$	$E_{ws}/$ $f_{wc,s}$	$f_{wc,i}/$ $f_{wc,0}$	$E_{ws}/$ E_{w0}	$\epsilon_{wu,s}/$ $\epsilon_{wu,0}$
Vintzileou et al. [2]									
1	1,00	0,231	0,00	0,00	3333	1048	1,48	0,89	0,58
2		0,27	-	-	2081				
3	3,00				2083	1389	1,80	1,19	0,78
4		2,533	-	-	2776				
5	1,50	7,59	0,00	1,035	3335	1852	2,47	1,37	0,43
6		1,81	0,00	1,325	4167	2083	3,00	1,50	1,72
7		-	-	1,3		4166			
8		-	-	0,125		1111			
Toumbakari [3]									
BC1				1,17		444			
BC2		7,07	0,15	5,04	302,7	497	1,31	2,14	0,81
BC3		2,69	0,86	2,59	487,2	483	1,39	1,38	0,84
BC4		2,32	0,38	4,03	503,5	347	1,38	0,95	1,26
BC5		2,00	0,03	1,80	502,1	303	1,69	1,02	1,36
SC1		2,89	0,03	2,19	356,6	499	1,61	2,25	2,50
SC2		6,9	0,01	0,60	544,8	464	1,61	1,37	1,41
SC3		3,63	0,51	2,33	518,8	338	1,32	0,86	1,42
SC4		2,84	1,01	2,98	532,6	308	1,21	0,70	1,65
Valluzzi [5]									
5I1		2,25	0,002	4,59	1648	913	1,72	0,95	2,00
6I1		9,2	0,0015	8,55	1040	1242	1,28	1,52	1,25
13I1			0,06	13,85		1572			
1I2		3,97	0,16	3,67	736	1342	1,30	2,37	1,00
8I2		5,9	0,04	4,95	816	1300	0,95	1,52	1,16
16I2			0,11	9,45		493			
12I1T			0,02	7,95		516			
14I1R			0,01	9,8		756			
17I1RT			0,0005	10,95		579			
Vintzileou et al. [4]									
1	0,78	8,2	0,0	3,2	550	400	1,65	1,20	-
2	0,26	4,8	0,0	1,3	828	413	2,16	1,08	1,56
3	1,55	4,0	0,0	2,6	655	349	1,65	0,87	1,36

Tabella 2 (segue)

Denominazioni	
t_e	Spessore parete(i) esterna(e)
t_i	Spessore materiale di riempimento
$f_{c,units}$	Resistenza a compressione di unità in muratura (pietre o mattoni)
$f_{m,c}$	Resistenza a compressione della malta
$f_{i,c}$	Resistenza a compressione del materiale di riempimento prima dell'iniezione di malta liquida
$f_{gr,c}/f_{gr,t}$	Resistenza a compressione della malta liquida/resistenza a flessione della malta liquida (misurata al momento dei test sulle rispettive pareti)
V_{gr}/V_w	Volume malta liquida rapportato a volume muratura
$f_{wc,0}$	Resistenza a compressione della muratura prima dell'iniezione di malta liquida
$f_{wc,i}$	Resistenza a compressione della muratura dopo l'iniezione di malta liquida
E_{w0}	Modulo di elasticità della muratura prima dell'iniezione di malta liquida, misurato a ~30% della rispettiva resistenza a compressione
E_{ws}	Modulo di elasticità della muratura dopo l'iniezione di malta liquida, misurato a ~30% della rispettiva resistenza a compressione
$\epsilon_{wu,0}$	Deformazione a $f_{wc,0}$
$\epsilon_{wu,s}$	Deformazione a $f_{wc,i}$
W_{vert}	Apertura di fessure verticali a metà altezza della faccia della parete non iniettata, a $f_{wc,0}$
W_{trans}	Apertura di fessure trasversali a metà altezza della faccia della parete non iniettata, a $f_{wc,0}$
$W_{trans, fwc,0}$	Apertura di fessure trasversali a metà altezza della faccia della parete iniettata con malta liquida, a $f_{wc,0}$
$W_{trans, fwc,i}$	Apertura di fessure trasversali a metà altezza della parete iniettata con malta liquida, a $f_{wc,i}$

Test	Caratteristiche meccaniche di cilindri non iniettati di malta liquida		Caratteristiche meccaniche della malta liquida		Caratteristiche meccaniche di cilindri iniettati di malta liquida			
	$f_{i,c}$ (MPa)	E_i (GPa)	$f_{gr,c}$ (MPa)	$f_{gr,t}$ (MPa)	$f_{i,c,s}$ (MPa)	$E_{i,s}$ (GPa)	λ_f	λ_E
Valluzzi [13] ⁽¹⁾								
C7-C8	(0,15)		3,23	0,35	0,82	0,343	(5,47)	
C9-10(A)	(0,15)		3,23	0,35	0,80	0,245	(5,33)	
C11-C12	(0,15)		5,10		1,99	1,518	(13,27)	
C13(A)	(0,15)		5,10		2,15	1,201	(14,33)	
C14-C15	(0,15)		3,21		1,43	1,499	(9,53)	
C17-C18	(0,15)		3,65		1,38	1,253	(9,20)	
C27-C28	(0,15)		3,35		1,71	1,747	(11,40)	
C26(A)	(0,15)		3,35		1,39	1,354	(9,27)	
Miltiadou [1]								
Vuoti 32%	1,71	3,87	30,00 ⁽²⁾	2,50	13,4	20,45	7,84	5,28
			30,00 ⁽³⁾	2,50	17,0	15,30	9,94	3,95
			13,00 ⁽²⁾	1,40	9,5	19,80	5,56	2,45
Vuoti 40%	0,48	1,10	30,00 ⁽²⁾	2,50	8,8	13,70	18,33	12,45
			30,00 ⁽³⁾	2,50	10,5	10,5	21,87	9,55
			13,00 ⁽²⁾	1,40	16,3	16,60	33,95	15,10
DTRR-HMC [15] ⁽⁴⁾								
(A) T	0,15		10,58	3,13	3,24	1,36	21,6	
(B) NHL5+SP	0,15		6,36	3,87	2,79	1,38	18,6	
(C) NHL5	0,15		6,00	2,70	3,27	0,79	21,8	
(D) Chaux blanche+SP	0,15		6,72	1,05	3,29	1,78	21,93	
(E) Calx Romana	0,15		2,88	1,08	2,74	0,94	18,27	
(F) Calce Albazzana	0,15		2,49	0,65	2,28	1,12	15,20	
(G) Unilit B Fluid 0	0,15		2,53	0,98	2,01	0,445	13,40	
<p>(1) Percentuale di vuoti ~40%. La resistenza del materiale di riempimento prima dell'iniezione della malta liquida non è stata misurata. Viene comunque stimata basandosi sulle caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti e considerando la percentuale di vuoti.</p> <p>(2) Iniezione di cilindri non danneggiati</p> <p>(3) Iniezione di cilindri prima del danno</p> <p>(4) Percentuale media di vuoti: (A) (7 cilindri)=39,5%, (B) (5 cilindri)=42,2%, (C) (6 cilindri)=41,30%, (D) (3 cilindri)=42%, (E) (3 cilindri)=38%, (F) (2 cilindri)=35,5%, (G) (2 cilindri)=42,5%</p>								
<p>$f_{i,c}$, E_i: Resistenza a compressione e modulo di elasticità del cilindro non iniettato</p> <p>$f_{gr,c}$ e $f_{gr,t}$: Resistenza a compressione e resistenza a flessione della malta liquida</p> <p>$f_{i,c,s}$ e $E_{i,s}$: Resistenza a compressione e modulo di elasticità del cilindro iniettato</p> <p>$\lambda_f = f_{i,c,s} / f_{i,c}$, $\lambda_E = E_{i,s} / E_i$</p>								

Tabella 3: Sommario dei risultati sperimentali sulle caratteristiche meccaniche di materiale di riempimento non iniettato e iniettato con malta liquida

Campione	Dimensioni (m)	Caratteristiche meccaniche di campioni non iniettati di malta liquida			Caratteristiche meccaniche della malta liquida		Caratteristiche meccaniche di campioni iniettati di malta liquida			
		f_t (MPa)	ε_v (‰)	w_{hor} (mm)	f_c (MPa)	$f_{t,fl}$ (MPa)	$f_{t,f}$ (MPa)	$\varepsilon_{v,f}$ (‰)	$w_{hor,ft}$ (mm)	λ_f
Toumbakari [3]										
SDC1	0,8x0,8x0,4	0,47	0,9	0,85	15,9	3,4	0,50	1,36	0,47	1,1
SDC2	0,8x0,8x0,4	0,34	1,2	0,71	19,5	4,5	0,68	1,17	0,05	2,0
SDC3	0,8x0,8x0,4	0,28	1,5	1,20	7,8	2,5	0,59	2,65	0,02	2,1
BDC1	0,8x0,8x0,4	0,44	0,8	0,50	7,8	2,5	0,60	1,56	0,17	1,4
BDC2	0,8x0,8x0,4	0,34	0,3	1,07	15,9	3,4	0,73	1,07	0,02	2,2
BDC3	0,8x0,8x0,4	0,35	0,6	0,50	19,5	4,5	0,75	1,02	0,02	2,1
Vintzileou et al. [2]										
9		(0,15)			30		0,64			
10		(0,15)			30		0,64			
Vintzileou et al. [4]										
4	1,0x1,0x0,45	0,10	2,1	5,2	4,5	2,52	0,22	1,00	0	2,2
5	1,0x1,0x0,45	0,10	1,1	0,2	8,2	2,29	0,34	0,80	0	3,4
6	1,0x1,0x0,45	0,10	1,0	1,5	4,5	2,52	0,23	1,40	0	2,3

f_t e ε_v : resistenza a trazione e rispettiva deformazione verticale di campione non iniettato, f_c e $f_{t,fl}$: resistenza a compressione e resistenza a flessione di malta liquida, $f_{t,f}$ e $\varepsilon_{v,f}$: resistenza a trazione e rispettiva deformazione verticale di campione iniettato, w_{hor} : somma di aperture fessurative verticali sulla faccia del campione non iniettato (a f_t), $w_{hor,ft}$: somma di aperture fessurative verticali sulla faccia del campione iniettato (a f_t), $\lambda_f = f_{t,f}/f_t$

Tabella 4. Sommario dei risultati sperimentali: pareti sottoposte a compressione diagonale
