

# RECUPERO DI MURATURE TRI-STRATO

Theodossios Tassios

## SOMMARIO

In primo luogo si pone in evidenza l'importanza dell'argomento, quindi si riportano alcuni dati sperimentali di dettaglio relativi alle caratteristiche strutturali delle murature tri-strato (prima e dopo l'iniezione di malta liquida). D'altro lato, si citano le espressioni empiriche che mirano a prevedere separatamente le resistenze e la deformabilità di una muratura mono-strato e del materiale di riempimento prima dell'iniezione di malta liquida. Gli effetti dell'iniezione di malta liquida su una muratura mono-strato e sui materiali di riempimento vengono quindi esaminati per mezzo di semplici espressioni e sottoposte a controllo sulla base dei dati sperimentali. Si passa poi a studiare l'interazione tra "strati esterni iniettati di malta liquida" e un "riempimento iniettato di malta liquida"; a tale scopo si sono desunti idonei fattori di riduzione. Le espressioni finali di previsione del comportamento strutturale di murature tri-strato iniettate con malta liquida vengono quindi calibrate sulla base dei dati sperimentali disponibili. Il rapporto si conclude con una breve descrizione di un Metodo analitico, che dovrebbe ulteriormente razionalizzare meglio la previsione del comportamento strutturale di murature tri-strato non armate o iniettate.

## INTRODUZIONE

a) Non è necessario enfatizzare eccessivamente l'importanza dell'argomento: moltissime dei vecchi edifici in muratura sono costruiti con pareti tri-strato, avendo utilizzato tecniche e materiali di costruzione molto diversi. L'entità di tale variabilità è tale, per cui risulta vano ogni tentativo di trovare un metodo razionale e quindi preciso che spieghi il comportamento strutturale di tali murature, come invece sarebbe necessario. Infatti, per poter prevedere la resistenza alla compressione semplice di una muratura mono-strato non armata, sarebbero necessari i dati seguenti:

- (i) resistenza e volumi del blocco e della malta degli strati esterni;
- (ii) natura e granulosità del materiale di riempimento, nonché suo indice di porosità finale, insieme alla struttura dell'interfaccia, in modo da poter quantificare
- (iii) diversi dati strutturali del riempimento (come resistenza alla compressione e resistenza alla trazione, deformabilità e caratteristiche di legame sull'interfaccia). Infine, (iv) è necessaria una buona conoscenza dei meccanismi di interazione tra strati esterni e il riempimento, connessi in modo più specifico alla

compatibilità della loro dilatanza trasversale. Il vasto numero di parametri che entrano in gioco può scoraggiare l'indagine sperimentale ed analitica della questione.

**b)** I pochi lavori di ricerca sperimentale dettagliati disponibili sono esaminati nella sezione seguente, insieme ai dati relativi alle due situazioni, prima e dopo l'iniezione di malta liquida. L'iniezione di malta liquida rappresenta comunque un'altra fonte potenziale di incertezza, anche se si conosce il volume della malta liquida iniettata e si riesce a misurare con precisione la sua resistenza alla compressione. Infatti, l'efficacia strutturale di una malta liquida è influenzata drasticamente dalle seguenti condizioni importanti:

- una combinazione di fluidità e capacità di penetrazione attraverso aperture ridotte, senza segregazione (vedi Miltiadou, Tassios, 2003);
- capacità di sviluppare legami considerevoli con entrambi gli “aggregati” del riempimento e dei blocchi dello strato esterno; a tale scopo è necessario conoscere la giusta composizione chimica del legante;
- stabilità nel tempo della resistenza alla trazione, che in alcune malte liquide speciali può tendere a ridursi nel tempo (vedi Toumbakari, 2002, p.175),
- condizioni di invecchiamento post-iniezione, che si sono dimostrate molto importanti per la qualità finale in loco della malta liquida (Toumbakari, 2002, p.200).

Oltre ad avere una composizione idonea (in genere una miscela di leganti), una malta deve essere accuratamente miscelata – se possibile tramite tecnica ad ultrasuoni - altrimenti può risultare compromessa l'ottenibilità della maggior parte delle condizioni sopra citate.

Questo è un ulteriore motivo per cui i risultati di iniezioni apparentemente “simili” non sono assolutamente confrontabili; inoltre rappresenta un'altra difficoltà nel tentativo di quantificare tali risultati in termini di caratteristiche strutturali finali delle murature tri-strato.

**c)** In conclusione, ci si attende che il tentativo di produrre espressioni semplici di previsione di tali caratteristiche sia altamente aleatorio: si tratta di un'autocritica di questo stesso documento. Lo stesso autore ha prodotto in passato alcune espressioni empiriche da utilizzare allo scopo:

- per muratura mono-strato

$$- f_{wc,s} = f_{wc,o} \left[ 1 + 20 \frac{G_{gr}}{G_w} \right] \quad \text{in Tassios, 1982}$$

$$- f_{wc,s} = f_{wc,o} [1 + 0.013(100G_{gr} \cdot G_w)^3] \quad \text{in Vintzileou, Tassios, 1995}$$

- per muratura tri-strato

$$- f_{wc,s} = f_{wc,o} [1 + 1.25(V_i/V_w)(f_{gr,c}^{1/2} / f_{wc,o})] \quad \text{in Vintzileou, Tassios, 1995}$$

In queste espressioni

$f_{wc,s}$  = resistenza alla compressione della muratura consolidata

$f_{wc,o}$  = sua resistenza prima dell'iniezione di malta liquida

$G_{gr}$  = peso della malta liquida iniettata nella muratura

$V_i$  = volume del riempimento

$G_w, V_w$  = peso, volume di tutta la parete prima dell'iniezione di malta liquida

$f_{gr,c}$  = resistenza alla compressione della malta liquida

Come per ogni espressione empirica, queste formule sono servite per il campo specifico di applicazioni dal quale sono state derivate. Ciononostante, qualora fosse nota la resistenza iniziale della muratura tri-strato, l'ultima delle formule sopra riportate sembra sia in grado di prevedere l'effetto del consolidamento prodotto dall'iniezione di malta liquida in maniera piuttosto soddisfacente. (Tabella 1, Fig.1).

Tabella 1: Controllo dell'espressione previsionale del 1995 relativa alla resistenza alla compressione di muratura tri-strato iniettata

$$f_{wc,s}; f_{wc,o} = 1 + 1.25(V_i/V_w)(f_{gr,c}^{1/2} / f_{wc,o}) \quad (1)$$

[Legenda: Brick = mattone; Stone = pietra]

Fig.1: Sembra che l'effetto del consolidamento ottenuto con diverse iniezioni di malta liquida sia previsto in modo accettabile dalla formula empirica di Vintzileou, Tassios, 1995

**d)** Nella descrizione che segue, l'approccio è sempre di tipo empirico, ma si cerca di tenere sempre presenti tutti i parametri che influiscono sui meccanismi di sviluppo della resistenza, quali

- resistenze dei materiali costituenti (blocchi, malta e malta per iniezione)
- natura e dimensione delle scaglie gettate nel riempimento, nonché stima approssimativa della quantità di scarti di malta utilizzati
- modulo di elasticità degli strati esterni e del riempimento
- quantità della malta liquida iniettata.

Tenendo presente ciò, si tenterà di produrre espressioni empiriche per le resistenze seguenti:

- dello strato esterno, prima dell'iniezione
- del riempimento, prima dell'iniezione
- della muratura tri-strato, prima dell'iniezione
- dello strato esterno, dopo l'iniezione
- del riempimento, dopo l'iniezione
- della muratura tri-strato dopo l'iniezione, registrando tutti i singoli parametri che entrano in gioco nella formazione della resistenza finale della muratura tri-strato iniettata.

In tale operazione, tuttavia, saremo obbligati talvolta a sopperire alle carenze dei dati con la valutazione tecnica; questo sarà il punto debole dell'indagine. Nonostante la metodologia empirica seguita come spiegato, si spera almeno che l'esito (debitamente calibrato fino ad un certo limite) sia quello di un campo di applicazione più ampio rispetto a quello delle formule pronte ipersemplificate utilizzate in passato.

---

<sup>1</sup>  $V_i/V_w$  valori desunti da Tabella 3;  $f_{wc,o}$ , da Tabella 2.

e) Infine, nell'ultima parte di questo rapporto, ai fini di un'ulteriore migliore razionalizzazione della soluzione del problema, si descriverà brevemente e in via indicativa una metodologica più analitica.

## 1. DATI SPERIMENTALI

Nella Tabella 2 sono elencati i risultati numerici delle indagini sperimentali disponibili relativi alle caratteristiche strutturali di pareti e dei loro componenti, prima e dopo l'iniezione di malta liquida. Nella Tabella 3 sono riassunti i consumi di malta liquida in alcuni di questi casi.

Pur essendo chiaramente insufficienti nel numero, questi dati sperimentali costituiscono, comunque, una base importante per una stima razionale dei vantaggi previsti nell'applicazione dell'iniezione di malta liquida in murature tri-strato.

**Nota 1:** non è noto il volume di malta di ciascuno strato. In prima approssimazione, comunque, si può supporre quanto segue:

Strato esterno, indice di porosità, mattoni  $n_e = 0,15$   
pietre  $n_e = 0,07$

Riempimento, compreso tra  $n_i = 0,25$  e  $n_i = 0,45$ .

$$V_{gr,e} = \frac{2t_e \cdot n_e}{2t_e n_e + t_i n_i} V_{gr} \quad e \quad V_{gr,i} = \frac{t_i \cdot n_i}{2t_e n_e + t_i n_i} V_{gr}$$

**Nota 2:** Prima dell'iniezione di malta liquida, si dovrebbe tentare di dedurre l'indice di porosità delle due parti costituenti la muratura. Dopo l'iniezione il consumo di malta osservato servirà come indicatore ottimale per l'indice di porosità, in particolare del materiale di riempimento.

Quindi,  $V_{gr}/V_i = n_i \pm 0,05$ .

## 2. CARATTERISTICHE STRUTTURALI DI UNA MURATURA MONO-STRATO

### 2.1. Prima dell'iniezione di malta liquida

a) Resistenza a compressione (in MPa) (Tassios, Chronopoulos, 1986)

$$f_{wc,o} \cong \left\{ \frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} + k_1 f_{mc} - k_2 \right\} : \left[ 1 + 3.5 \left( \frac{V_m}{V_w} - 0.3 \right) \right]$$

dove

$V_m, V_w$  = volume della malta edilizia utilizzata e volume totale della muratura ( $V_m/V_w > 0,3$ )

$f_{bc}$  = resistenza alla compressione dei blocchi utilizzati  $\leq 100$  MPa

$f_{mc}$  = resistenza alla compressione della malta utilizzata

- $k_1 = 0,6$  per muratura in pietra grezza  
 $0,2$  per muratura in mattoni o in pietra a blocchi regolari  
 $k_2 = 0,0$  MPa per muratura in mattoni o in pietra a blocchi regolari  
 $0,5$  MPa per muratura in pietra a blocchi semiregolari  
 $2,5$  MPa per muratura grezza

**b) Resistenza alla trazione**

Piano di rottura parallelo ai giunti orizzontali

$$f_{wt}^- = \lambda \cdot f_{mc} / 10$$

Piano di rottura perpendicolare ai giunti orizzontali

$$f_{wt}^\perp = \lambda \cdot f_{mc} / 5$$

dove

$$\lambda = 1 - 0.2 \sqrt{f_{mc}} \text{ (MPa)}$$

$f_{mc}$  = resistenza alla compressione della malta

**c) Resistenza alla trazione - separazione diagonale**

$$f_{wv,d} = \frac{2}{3} \cdot f'_{wt} \sqrt{1 + \frac{3/4 \cdot \sigma_o}{f'_{wt}}}$$

dove

$$f'_{wt} = \lambda \cdot f_{mc} / 7$$

$\sigma_o$  = sollecitazione normale verticale

**d) Resistenza allo slittamento per sforzo di taglio**

$$f_{wv} = 0.1 \cdot f_{mc} + \frac{3}{4} \left( 0.2 + \frac{f_{mc}}{20} \right) \cdot \sigma_o$$

**e) Costanti elastiche**

$$E_{we} = \zeta_e \cdot f_{wc}$$

$$G_{we} = 0,4 E_{we}$$

$$\nu = 0,20$$

dove

$\zeta_e = 500$  per muratura grezza

1000 per muratura in mattoni e pietra ordinaria

1500 per muratura in pietra a blocchi molto regolari

## 2.2. Dopo l'iniezione di malta liquida

**a) Resistenza alla compressione (<sup>2</sup>)**

$$f_{wc,s} \approx f_{wc,o} [1 + 0.01(100G_{gr} \cdot G_w)^3]$$

dove  $G_{gr}$ ,  $G_w$  denotano il peso della malta iniettata e il peso iniziale della parete mono-strato.

---

<sup>2</sup> Da Vintzileou, Tassios, 1995.

**b) Costanti elastiche**

Non sono disponibili dati sperimentali attendibili al riguardo. Si suggerisce semplicemente di utilizzare al momento le relazioni ipersemplicate di cui al §2.1.e.

### **3. CARATTERISTICHE STRUTTURALI DEL MATERIALE DI RIEMPIMENTO**

#### **3.1. Prima dell'iniezione di malta liquida**

**a) Resistenza alla compressione**

L'elevata variabilità di questa resistenza corrisponde all'estrema varietà delle modalità di realizzazione di un riempimento:

(i) grossi frammenti di blocco (> 5 cm) e piccole quantità di malta in eccedenza gettati dai costruttori; in un caso di questo tipo, si può praticamente assumere  $f_{wi} \sim 0$ ;

(ii) scaglie medio-piccole (1 ÷ 5 cm) di blocchi e gettata frequente di malta edilizia. In un caso di questo tipo, il materiale di riempimento si comporta come un "calcestruzzo" poroso con indice di porosità alto, compreso tra  $n_i = 0,45$  e  $n_i = 0,25$ ; la sua resistenza alla compressione può essere stimata con l'espressione empirica <sup>(3)</sup>

$$f_{wc,i} \approx f_o \cdot e^{-10n_i} \quad [\text{MPa}]$$

dove  $f_o \sim 35$  MPa per malte forti ( $f_{mc} \sim 10$  MPa)

20 MPa per malte medie ( $f_{mc} \sim 4$  MPa)

10 MPa per malte deboli ( $f_{mc} \sim 1$  MPa)

**b) Modulo di elasticità**

$$E_{wi} \approx 2000 \cdot f_{wi} \quad (4)$$

#### **3.2. Dopo l'iniezione di malta liquida**

**a) Resistenza alla compressione <sup>(5)</sup>**

$$f_{wi,s} \approx f_{wi,o} + n_i \cdot f_{gr,c}$$

dove  $f_{gr,c}$  = resistenza alla compressione della malta

$n_i$  = indice di porosità del riempimento

**b) Modulo di elasticità <sup>(6)</sup>**

$$E_{wi,s} \sim \begin{cases} 500f_{wi,s} & f_{wi,o} < 0.5 \\ 1500f_{wi,s} & f_{wi,o} > 1.5 \end{cases}$$

---

<sup>3</sup> Derivata dai pochi dati sperimentali di Miltiadou, 1990, Vintzileou, Tassios, 1995 e Toumbakari, 2002.

<sup>4</sup> Da un numero insufficienti di dati (Miltiadou, 1990).

<sup>5</sup> Basata su dati numerici contenuti in Valluzzi, da Porto, Modena, 2001.

<sup>6</sup> Basata sui dati di Valluzzi, 2000 e Miltiadou, 1990.

## 4. ESPRESSIONI APPROSSIMATIVE DI PREVISIONE DELLA RESISTENZA DI MURATURA TRI-STRATO

### 4.1. Prima dell'iniezione di malta liquida

[Infill = Riempimento; External leaf = Strato esterno]

Fig.2: Schizzo di sezione di muratura tri-strato

a) Un approccio ipersemplificato non considera il ruolo dell'interfaccia, mentre prende in considerazione le resistenze alla compressione di ciascuno strato, come se gli strati fossero indipendenti.

Quindi, la resistenza (media) dell'intera parete può essere stimata come indicato dall'espressione seguente:

$$f_{wo}(2t_e+t_i)=\lambda_e 2t_e f_{wc,e}+\lambda_i t_i f_{wc,i}$$

oppure

$$f_{wo}=(2\lambda_e \delta f_{wc,e}+\lambda_i f_{wc,i}):(1+2\delta)$$

dove

$f_{wc,e}$  = resistenza alla compressione dello strato esterno della muratura

$f_{wc,i}$  = resistenza alla compressione del riempimento

$\delta$  =  $t_e : t_i$ , rapporto degli spessori relativi

$\lambda_e, \lambda_i$  = fattori di correzione (vedi §b, c sotto)

b) Nonostante l'approssimazione grossolana di questo approccio empirico, poiché viene trascurata l'interfaccia degli strati, al suo posto è necessario ricorrere ad una correzione considerevole.

Il fenomeno più importante da considerare a questo proposito è l'espansione laterale del riempimento, dovuta alla sua precedente fessurazione verticale (longitudinale) sulla faccia laterale (vedi Vintzileou, Tassios, 1995 e Toumbakari, 2002).

Sulla base dei presupposti formali della Fig. 3, si può approssimare la stima seguente:

- sollecitazione alla compressione longitudinale differenziale tra strato esterno e strato interno:

$$1/2\varepsilon_{c,max}\sim 0.5\cdot 10^{-3}$$

- scorrimento max. per sforzo di taglio lungo la fessurazione verticale:

$$s = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot h/4$$

- dilatanza laterale  $w = 0,6s^{2/3}$  [mm], (espressione derivata da calcestruzzo, vedi Tassios, Vintzileou, 1987).

- spostamento orizzontale 'a<sub>o</sub>' imposto allo strato esterno a metà della sua altezza

$$a_o = 0.6(0.5 \cdot 10^{-3} \cdot h_w / 4)^{2/3} = 0.015 \cdot h_w^{2/3} \text{ [mm]}$$

- data la reazione laterale corrispondente 'p', che agisce sul riempimento (e vice versa), si produce una deflessione finale 'a' dello strato esterno:

$$a = 0.013 \cdot p h_w^4 : \left( E_{we} \cdot \frac{t_e^3}{12} \right)$$

- quindi, sul riempimento si attua una deformazione da compressione (a<sub>o</sub>-a)

$$a_o - a = \frac{t_i}{2} \cdot \frac{p}{E_i} \quad \text{o} \quad 0.015 h_w^{2/3} - 0.156 \left( \frac{h_w}{t_e} \right)^3 h_w \frac{p}{E_{we}} = \frac{t_i}{2} \cdot \frac{p}{E_i}$$

che porta a

$$p = 0.03 h_w^{2/3} : \left[ \left( \frac{h_w}{t_e} \right)^3 h_w \frac{0.31}{E_{we}} + \frac{t_i}{E_i} \right]$$

- d'altra parte, si trova la seguente curvatura corrispondente imposta sullo strato esterno:

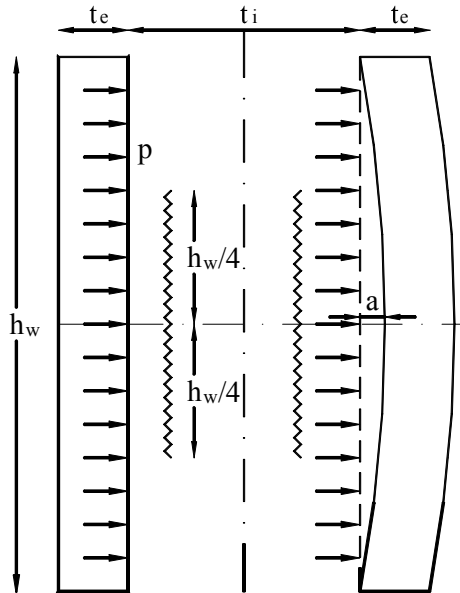


Fig.3: Faccia laterale della parete, dopo fessurazione verticale del riempimento vicino all'interfaccia

esterno:

$$a \cdot 2r = \left( \frac{h_w}{2} \right)^2$$

oppure

$$\frac{t_e}{r} = \frac{8at_e}{h_w^2}$$

mentre

$$\frac{t_e}{r} = 2\Delta\varepsilon_{we} = 2 \frac{\Delta\sigma_{we}}{E_{we}} = \frac{2}{\zeta_e} \cdot \frac{\Delta\sigma_{we}}{f_{we}}$$

oppure

$$\frac{\Delta\sigma_{we}}{f_{we}} = 4\zeta_e \frac{at_e}{h_w^2}$$

( $\zeta_e$  come in §2.1.e)

- esistenza residua dello strato esterno dopo la dilatanza nociva del riempimento

$$f'_{we} = f_{we} - \Delta\sigma_{we} = \lambda_e \cdot f_{we}$$

dove

$$\lambda_e = 1 - \left[ 4\zeta_e \cdot \frac{t_e}{h_w} \cdot \frac{0.156}{E_{we}} \left( \frac{h_w}{t_e} \right)^3 \cdot 0.03 h_w^{2/3} \right] : \left[ \frac{0.31(h_w/t_e)^3 h_w}{E_{we}} + \frac{t_i}{E_i} \right]$$



o

$$\lambda_e = 1 - \left[ \frac{0.018 \left( \frac{h_w}{t_e} \right)^2}{f_{we}} \cdot h_w^{2/3} \right] : \left[ \frac{0.31(h_w/t_e)^3 h_w}{E_{we}} + \frac{t_i}{E_i} \right]$$

( $t_e, t_i, h_w$  in mm).

Di fatto si tratta di una approssimazione grossolana; questi valori  $\lambda_e$  possono essere puramente indicativi. D'altra parte, trascurando il secondo termine del denominatore, abbiamo

$$\lambda_e \approx 1 - 0.06 \zeta_e t_e h_w^{-4/3}, \quad (t_e, h_w \text{ in mm})$$

dove  $\zeta_e = E_{we} : f_{wc,e}$

c) Tenendo conto della pressione di interfaccia 'p', si ha la possibilità di ottenere una restrizione laterale del riempimento. Ma, data la limitatezza dei valori "p" e lo stato delle sollecitazioni sul piano (non triassiale), tale restrizione non può aumentare effettivamente le caratteristiche strutturali del riempimento. Quindi, si consiglia di considerare

$$\lambda_i \approx 1$$

Tuttavia, grazie alla presenza delle suddette sollecitazioni normali (per quanto piccole possano essere), si può produrre un effetto frizione-legame soddisfacente (vedi § 6).

d) Per quel che riguarda le costanti elastiche della muratura tri-strato prima dell'iniezione di malta liquida, qui non si fa alcun tentativo di effettuare una stima più razionale. Si consiglia di continuare ad utilizzare l'approccio precedente  $E_{wc} = \zeta_w f_{wc}$ , anche se si tratta di una dispersione considerevole (molto maggiore che con i valori  $f_{wc}$ ).

Quindi, si consiglia di considerare

$$\zeta_w = 500-1500$$

[Nel caso di Vintzileou, Tassios, 1995, è stata fatta un'eccezione a questa regola, per cui per gli strati esterni ben costruiti (robusti blocchi di pietra calcarea) e spessi ( $t_e=t_i=t_o$ ) è stato trovato un valore  $\zeta_w$  pari a 3000].

e) Seguendo le stesse linee di praticità, avremo approssimativamente

$$f_{wt,o} \sim \frac{1}{7} f_{wc,o}$$

**Nota:** Il fattore correttivo " $\lambda_e$ " indica un importante effetto scala. Test su piccola scala di muratura tri-strato non si riferiscono direttamente a muri tri-strato effettivi.

## 4.2. Dopo l'iniezione di malta liquida

a) Utilizzando le espressioni empiriche introdotte nei §§ 2.2, 3.2, a questo punto si può scrivere la formula semplice di §4.1 come segue:

seguendo le stesse linee di praticità, avremo approssimativamente

$$f_{wc,s} = \left\{ 2\lambda'_e \cdot \delta \cdot f_{wc,e} \left[ 1 + 0.01(100G_{gr} / G_w)^3 \right] + \lambda'_i (f_{wc,i} + n_i \cdot f_{gr,c}) \right\} : (1 + 2\delta)$$

dove

$$f_{wc,e} = \left[ \frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} + k_1 f_{mc} - k_2 \right] : \left[ 1 + 3.5 \left( \frac{V_m}{V_w} - 0.3 \right) \right]$$

e

$$f_{wc,i} = f_o \cdot e^{-10n_i}$$

(ulteriore annotazione trova spiegazione ai §§ 2.1, 2.2, 3.1 e 3.2).

**b)** In linea di principio ora sono necessari dei nuovi valori per i fattori di correzione  $\lambda'_e, \lambda'_i$  (confrontati a  $\lambda_e, \lambda_i$ ), poiché dopo l'iniezione di malta liquida si è prodotto un cambiamento sostanziale nell'interfaccia.

Facendo di nuovo riferimento al § 4.1.b, le fessure verticali sulla faccia laterale di una parete tri-strato iniettata con malta liquida si manifestano ora ad uno stadio molto tardivo ed hanno lunghezze inferiori. Si tratta di una chiara conclusione delle due indagini sperimentali di base sull'argomento, vale a dire Vintzileou, Tassios, 1995 e Toumbakari, 2002 (vedi Fig.5). Di conseguenza, si presume che la dilatanza laterale dei riempimenti sia inferiore. Al momento, per tenere conto di tale miglioramento, si può utilizzare una stima approssimativa, vale a dire

$$1 - \lambda'_e = \frac{3}{4}(1 - \lambda_e) \quad \text{o} \quad \lambda'_e = 0.75\lambda_e + 0.25$$

**c)** A questo punto, dopo l'iniezione di malta liquida, in opposizione allo stato di murature tri-strato non iniettate, le caratteristiche strutturali del riempimento possono aumentare rispetto a quelle degli strati esterni. Inoltre, come dimostrato da Miltiadou, 1990, il materiale di riempimento iniettato è essenzialmente più duttile dello strato esterno friabile. Quindi, se mancano gli strati esterni, l'intero sistema fallisce – senza potersi avvantaggiare completamente del contributo residuo del riempimento consolidato. Le sollecitazioni al cedimento di questi strati ora sono rispettivamente uguali a circa  $0,9 \cdot 10^{-3}$  e  $1,3 \cdot 10^{-3}$  (Miltiadou, 1990, p.174-178).

Ecco perché alla fine si propone per la resistenza del riempimento iniettato un “fattore di partecipazione”  $\lambda'_i = \frac{1}{2}$  approssimativo, se  $f_{wi,s} \gg R_{we,s}$ . Altrimenti, vale un valore  $\lambda'_i$  uguale all'unità, comunque con un valore medio empirico di 2/3, se

$$0.8 < f_{wi,s} / R_{we,s} < 1.2$$

Nelle condizioni suddette

$f_{wi,s}$  = la resistenza del riempimento, dopo l'iniezione di malta liquida

$R_{we,s}$  = la capacità portante degli strati esterni, considerando la riduzione in loco  $\lambda'_e$

**d)** A questo stadio, non viene fatto alcun tentativo di trovare una previsione più razionale del modulo di elasticità di pareti tri-strato iniettate.

In pratica sembra essere sufficiente una relazione approssimativa quale

$$E_{wc,s} \sim (1.0-1.5)E_{wc,o}$$

e) Analogamente, in pratica assumeremo

$$f_{wt,s} = \frac{1}{7} f_{wc,s}$$

## 5. CALIBRAZIONI

a) I dati sperimentali disponibili nella letteratura internazionale sono appena sufficienti per una prima calibrazione delle espressioni proposte in § 4. Inoltre, la precisione delle espressioni empiriche è prevedibilmente piuttosto bassa, dato l'elevato numero di parametri e relative incertezze.

Ciononostante, nell'Allegato I sono presentate parecchie applicazioni numeriche seguendo i dati delle indagini sperimentali disponibili come illustrato in § 1. La validità pratica delle espressioni di previsione proposte in § 4 è quindi testata nelle Figg. 4 e 5 e sembra essere accettabile per il momento.

Vale la pena notare a questo punto che l'espressione (§ 4.2) proposta in questo rapporto sembra essere più utile della formula del 1995 verificata in Tabella 1 e Fig. 1, in quanto nella nuova versione "si suppone" di non conoscere la resistenza alla compressione iniziale della parete tri-strato, ma questa viene comunque "calcolata" con l'espressione analitica proposta in § 4.1.

b) Si deve, comunque, affermare che le previsioni "dopo l'iniezione di malta liquida" di cui si tratta fanno riferimento a pareti precedentemente testate fino alla rottura e quindi successivamente iniettate con malta liquida. Come si può ragionevolmente prevedere, queste pareti hanno subito danni plastici irreversibili che non potevano essere eliminati completamente applicando la sola iniezione di malta liquida. Di conseguenza, si prevede che l'iniezione in pareti tri-strato non danneggiate sia più efficace rispetto al caso di pareti riparate.

Di fatto sussiste un'indicazione sperimentale<sup>(7)</sup> che suggerisce che la muratura tri-strato in mattoni adeguatamente iniettata "in virgo" può mostrare resistenze superiori del 50% rispetto alle previsioni di § 4.2. Se è così, gli otto punti di Fig. 5 si troverebbero leggermente più in alto, riducendo la stima apparentemente in eccesso di questa figura.

---

<sup>7</sup> Toumbakari, 2002: Parete non testata precedentemente BC1,  $f_{wc,s} = 5,04$ , rispetto a parete identica pre-testata BC4 (iniettata con la stessa malta liquida  $f_{gr,c} = 7,3$ ),  $f_{wc,s} = 3,00$  MPa.

## 6. INTRODUZIONE AD UN APPROCCIO PIU' RAZIONALE

### 6.1. Comportamento strutturale fondamentale

a) Come è stato osservato nei capitoli precedenti, la capacità portante di una muratura tri-strato prima dell'iniezione di malta liquida è decisamente inferiore alla somma delle capacità dei suoi strati costituenti. La ragione di ciò è stata attribuita alla notevole differenza della compressibilità tra strati interni ed esterni; quindi, lungo le interfacce si attuano considerevoli sollecitazioni di legame, che portano ad una prima fessurazione da taglio sulla faccia laterale del sistema. Il distacco per sforzo di taglio verticale 's' sull'interfaccia causa una dilatanza 'w' dello stesso ordine di grandezza ( $w \approx s$ ) risultante nelle deflessioni laterali di ciascuno strato esterno. A causa di questa ulteriore flessione, la capacità portante verticale degli strati esterni è notevolmente ridotta. Infine, se le larghezze degli strati sono equiparabili, un iniziale cedimento di uno strato esterno può indurre ad una fragilità al cedimento dell'intero sistema.

b) A questo punto, se un'iniezione adeguata potesse penetrare completamente nel riempimento e coprire i vuoti sulle interfacce esterne strato-rimpimento, questa omogeneizzazione drastica del sistema ridurrebbe considerevolmente la compressibilità differenziale degli strati e posticiperebbe altrettanto considerevolmente la fessurazione da sforzo di taglio della faccia laterale. Di conseguenza, senza una dilatanza "parassita" fuori del piano, tutti gli strati sarebbero in grado di far contribuire meglio le rispettive resistenze alla compressione alla capacità portante dell'insieme. A condizione però che la resistenza del riempimento non abbia raggiunto il livello di resistenza degli strati esterni; se questo fosse il caso, rientrerebbe in gioco l'incompatibilità delle compressibilità e la collaborazione potrebbe restringersi di nuovo.

c) In ogni caso, diventa chiaro che l'effetto favorevole dell'iniezione di malta liquida non è proporzionale alla resistenza alla compressione della malta liquida. Questo valore contribuirà alla resistenza del riempimento (in proporzione uguale forse al suo indice di porosità); inoltre l'importanza definitiva di tale contributo è di nuovo legata alla condizione di ottenimento di una resistenza di legame idonea sull'interfaccia.

Ecco perché, concludendo, l'effetto favorevole di una malta liquida iniettata sembra che non dipenda con esattezza dalla resistenza alla compressione.

d) Una prossima analisi razionale dovrebbe quindi basarsi maggiormente sulle conoscenze disponibili circa le caratteristiche di legame della malta da iniettare.

[brick-wall = parete in mattoni; stone-wall = parete in pietra;  
initial = iniziale; grouted = iniettata]

Fig.6: "Rapporto Pseudo-Poisson" di pareti tri-strato, prima e dopo l'iniezione, (valori medi), (derivati dai dati di Toumbakari, 2002).

## 6.2. Evidenza sperimentale e modelli analitici

a) Nella Fig. 6 è illustrata l'importanza della fessurazione per sforzo di taglio della muratura tri-strato, con evidenza dei risultati sperimentali di diverse pareti testate prima e dopo l'iniezione di malta liquida (Toumbakari, 2002). Concentrandosi su un rapporto di Poisson tradizionale pari a 0,5 (indicazione approssimativa di plastificazione imminente), appare chiaro che il danno interno di murature tri-strato può diventare irreversibile ad un livello che si aggira sul 50% della sua resistenza alla compressione nominale, contrariamente a quanto accade in pareti tri-strato (con le stesse caratteristiche) adeguatamente iniettate, le quali subiscono danni di tale livello solo se vengono caricate a valori molto vicini alla loro rispettiva resistenza alla compressione (altrimenti già ridotta). Ciò può spiegare anche la ben nota vulnerabilità di murature tri-strato per quanto riguarda il fluage.

b) Nella Fig. 7, invece, è illustrato come sia la resistenza allo sforzo di taglio della malta legata (sull'interfaccia con un blocco di mattoni o di pietra calcarea) a tenere sotto controllo l'espansione fuori piano nociva della parete; una malta la cui resistenza all'adesione è superiore a 0,35 MPa (<sup>8</sup>) è in grado di assicurare che al 50% di  $f_{wc}$ , l'espansione fuori piano in una parete tri-strato spessa 40 cm non supererà i 100  $\mu$ m. Raddoppiando però la sua resistenza all'adesione (vale a dire un valore  $f_{gr,c} = 18,0$  MPa), la condizione di sicurezza suddetta potrebbe essere garantita fino ad un livello di carico pari all'80%  $f_{wc}$ .

c) Tutte queste indicazioni mostrano quale sia l'importanza delle caratteristiche di adesione di legame delle malte utilizzate. Ecco perché questo rapporto conclude con un altro paio di risultati già disponibili sulla questione: una regola costitutiva semplificata per la resistenza a frizione del legame ' $\tau$ ', mobilitata dopo un dato spostamento per sforzo di taglio ' $s$ ' (Fig. 9), e un "coefficiente di frizione" come funzione della "sollecitazione normale" agente (Fig. 10).

Sulla base di questi dati e tenendo conto delle deformabilità verticali e orizzontali degli strati (nonché di possibili micro-fessure interne causate da rotture locali da taglio nel legame), un carico incrementale deve descrivere sia le deformazioni generali sia la stabilità del sistema. Questo approccio è già stato seguito, se pur solo in parte, da Toumbakari, 2002.

[bricks = mattoni; limestone = pietra calcarea; ext. leaf = strato esterno]

Un altro approccio promettente è stato quello sviluppato da Miltiadou, 1995, sulla base della teoria degli Elementi Finiti e dei criteri di rottura della Teoria della Plasticità.

---

<sup>8</sup> Ottenibile con una malta con  $f_{gr,c} = 7$  MPa secondo Fig. 8a.

Fig. 7: Sollecitazione verticale necessaria per produrre una data deformazione (fuori piano) trasversale  $\varepsilon_\gamma$  di una parete tri-strato consolidata ( $b_w = 40$  cm), come funzione della resistenza di legame a taglio tra malta e sottostrato sull'interfaccia. (Derivata dai dati di Toumbakari, 2002).

a) b)  
[grout = malta; substratum = substrato]

Fig. 8: Interfaccia malta/substrato alle condizioni di invecchiamento favorevoli seguenti:

- a) Coesione di legame  $(\tau_{gr,u})_0$  in condizioni di sollecitazione normale zero.
- b) Resistenza alla perdita di adesione  $f_{gr,d}$ , solo per il substrato di pietra calcarea; nel caso di mattoni vecchi, questo valore è stato limitato a 0,6 MPa. (Derivata dai dati di Toumbakari, 2002).

Fig. 9: Regola costitutiva “resistenza a frizione mobilitata” ‘ $\tau$ ’ contrapposta a “distacco per sforzo di taglio” ‘ $s$ ’ sull'interfaccia tra malta e substrato (mattono o pietra). (Derivata dai dati di Toumbakari, 2002).

Fig. 10: Coefficiente di frizione malta-substrato ‘ $\mu$ ’ come funzione della sollecitazione normale ‘ $\sigma$ ’ agente sull'interfaccia.

$$\mu \approx \frac{1}{4} \left( \frac{\sigma}{f_{c,gr}} \right)^{-2/3}$$

(Derivato dai dati di Toumbakari, 2002).

## RINGRAZIAMENTI

Sono dovuti ringraziamenti ai Dr. Miltiadou, Dr. Toumbakari e Prof. Vintzileou per il loro lungo e assiduo lavoro di ricerca in questo campo, nonché alla Sig.ra Vassilopoulou per il controllo e la redazione di questo rapporto.

## RIFERIMENTI

1. Miltiadou A.: “Contribution à l' étude des coulis hydrauliques pour réparation et le renforcement des structures et des monuments historiques en moçonnerie”, Thèse de Doctorat, Ecole Nat. Des Ponts et Chaussées, Paris, 1990.
2. Miltiadou A., Tassios T.: “Penetrability of hydraulic grouts in structural strengthening”, Structural Research, Pécs (Hungary), 2003.
3. Tassios T.P.: “Repair and strengthening of structures and monuments against earthquakes”, General Report, 7<sup>th</sup> Eur. Conf. On Earthquake Engrg., Tech. Chamber of Greece, 1982.
4. Tassios T.P., Chronopoulos M.: “Aseismic dimensioning of interventions on low-strength masonry buildings”, Middle East and Mediterranean Regional Conf. on Low-Strength masonry in seismic areas, Middle East Univ., Ankara, 1986.

5. Tassios T.P., Vintzileou E.: “Concrete-to-concrete friction”, J. Str. Engng., ASCE, Aprile, 1987.

6. Toumbakari E.: “Lime-pozzolan-cement grouts and their structural effects on composite masonry walls”, Doctor Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2002.

7. Valluzzi M., da Porto F., Modena C.: “Modelling of the mechanical properties of injected multi-leaf stone masonry walls”, STRUMAS, Roma 18-20/04/2001.

8. Valluzzi M.-R.: “Comportamento meccanico di murature storiche consolidate con materiali e tecniche a base di calce”, Doctor Thesis, Università di Trieste, 2000.

9. Valluzzi M.-R, da Porto F., Modena C.: “Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls”, Materials and Structures, April 2004 (Note: only geometrical and grout consumption data were taken from this paper).

10. Vintzileou E., Tassios T.P.: “Three leaf stone masonry strengthened by injecting cement grouts”, Journal of Struct. Engng., ASCE, Maggio 1995.

## ALLEGATO I

### APPLICAZIONI NUMERICHE

#### a. Prima dell'iniezione di malta liquida

##### Vintzileou, Tassios, 1995

- Strato esterno  $h_w = 1200$  mm,  $t_e = 130$ ,  $(t_i = 140, \delta = \frac{130}{140} = 0.93)$

$$f_{wc,e} = \left[ \frac{2}{3} \sqrt{100} + 0.2 \cdot 1.7 - 0 \right] : 1 = 7.0$$

$$E_{we} = 1000 \cdot 7.0 = 7000$$

- Riempimento ( $f_{mc} = 1,7$ )

$$f_{wc,i} = 10 \cdot e^{-10 \cdot 0.4} = 0.18$$

$$E_{wi} = 2000 \cdot 0.18 = 360$$

- Parete tri-strato (No 5 e 6)

$$f_{wc,o} = (2 \cdot 0.4 \cdot 0.93 \cdot 7.0 + 1 \cdot 0.18) : (1 + 2 \cdot 0.93) = 1.88$$

$$t_e = 130, t_i = 140, \delta = \frac{130}{140} = 0.93$$

$$\text{dove } \lambda_e \approx 1 - 0.06 \cdot 1000 \cdot 130 \cdot 1200^{-4/3} = 0.4$$

## Toumbakari, 2002

a) Strato esterno; mattoni:  $h_w = 1200$  mm,  $t_e = 90$ , ( $t_i = 220$ ,  $\delta = \frac{90}{220} = 0.41$ )

- $f_{wc,e} = \left[ \frac{2}{3} \sqrt{25} + 0.2 \cdot 3.4 - 0 \right] : 1 = 4.0$
- Riempimento ( $f_{mc} = 3.4$ )  
 $f_{wc,i} = 20 \cdot e^{-10 \cdot 0.3} = 1.0$   
 $E_{wi} = 2000 \cdot 1.0 = 2000$
- $f_{wc,o} = (2 \cdot 0.58 \cdot 0.41 \cdot 4.0 + 1 \cdot 1.0) : (1 + 2 \cdot 0.41) = 1.59$   
dove  $\lambda_e \approx 1 - 0.06 \cdot 1000 \cdot 90 \cdot 1200^{-4/3} = 0.58$

b) Strato esterno; pietre ordinarie  $t_e = 130$ , ( $t_i = 140$ ,  $\delta = \frac{130}{140} = 0.93$ )

- $f_{wc,e} = \left[ \frac{2}{3} \sqrt{55} + 0.2 \cdot 3.4 - 0 \right] : 1 = 5.62$
- Riempimento, come sopra
- $f_{wc,o} = (2 \cdot 0.4 \cdot 0.93 \cdot 5.62 + 1 \cdot 1.0) : (1 + 2 \cdot 0.93) = 1.81$   
dove  $\lambda_e \approx 1 - 0.06 \cdot 1000 \cdot 130 \cdot 1200^{-4/3} = 0.4$

## Valluzzi et al., 2001 (dati aggiuntivi della Valluzzi et al., 2004)

- Strato esterno  $h_w = 1400$  mm,  $t_e = 180$ , ( $t_i = 140$ ,  $\delta = \frac{140}{180} = 0.78$ )

( $f_{bc} = 160$ , così  $f_{bc}$  è pari a 100 MPa)

$$f_{wc,e} = \left[ \frac{2}{3} \sqrt{100} + 0.3 \cdot 1.6 - 0.5 \right] : 1 = 6.65$$

dove veniva preso per pietre semi-regolari

$k_1 \approx 0.3$  e  $k_2 = 0.5$

$$E_{we} = 1000 \cdot 6.65 = 6650$$

- Riempimento ( $f_{mc} = 1.6$ ,  $f_o = 12$ )

La stima della porosità di questo riempimento si basa sul fatto che, in media, i vuoti del muro erano uguali a 0.125 (10 a 15%). Considerando che  $n_e = 0.07$ , sarà

$$0.07 \cdot \frac{2 \cdot 0.180}{0.500} + n_i \cdot \frac{0.140}{0.500} = 0.125$$

Così,  $n_i \approx 0.27$ .

Di conseguenza:



$$f_{wc,i} = 12 \cdot e^{-10 \cdot 0.27} = 0.81$$

- Pareti tri-strato (1) e (2)

$$f_{wc,o} = (2 \cdot 0.3 \cdot 0.78 \cdot 6.65 + 1 \cdot 0.81) : (1 + 2 \cdot 0.78) = 1.53$$

dove  $\lambda_e \approx 1 - 0.06 \cdot 1000 \cdot 180 \cdot 1400^{-4/3} = 0.3$   
 $\lambda_i = 1$

## b. Dopo l'iniezione di malta liquida

### Vintzileou, Tassios, 1995

- Pareti tri-strato dopo l'iniezione di malta liquida [campione 5]

$$f_{wc,s} = \left\{ 2 \cdot 0.55 \cdot 0.93 \cdot 7.0 \left[ 1 + 0.01(100 \cdot 0.019)^3 \right] + \frac{1}{2} \cdot (0.18 + 0.4 \cdot 36.0) \right\} : (1 + 2 \cdot 0.93) = 5.22$$

dove

$$- n_e = 0.07 \quad n_i = 0.4 \quad \frac{V_{gr,e}}{V_w} = \frac{2 \cdot 130 \cdot 0.07}{2 \cdot 130 \cdot 0.07 + 140 \cdot 0.40} \cdot 0.122 = 0.030$$

$$- \frac{G_{gr,e}}{G_w} \sim \frac{1.6 V_{gr,e}}{2.5 V_w} = 0.019$$

$$- \lambda'_e = 0.75 \cdot 0.4 + 0.25 = 0.55, \quad \lambda'_i = 1/2 \text{ poiché } R_{we,s} < f_{wi,s}$$

- Pareti tri-strato dopo l'iniezione di malta liquida [campione 6]

$$f_{wc,s} = \left\{ 2 \cdot 0.55 \cdot 0.93 \cdot 7.0 \left[ 1 + 0.01(100 \cdot 0.016)^3 \right] + 1 \cdot (0.18 + 0.4 \cdot 13.0) \right\} : (1 + 2 \cdot 0.93) = 4.48$$

### Toumbakari, 2002

Pareti tri-strato dopo l'iniezione di malta liquida

a) Campioni BC2, BC4 (valori medi)

$$f_{wc,s} = \left\{ 2 \cdot 0.69 \cdot 0.41 \cdot 4.0 \left[ 1 + 0.01(100 \cdot 0.022)^3 \right] + \frac{2}{3} \cdot (1.0 + 0.3 \cdot 8.0) \right\} : (1 + 2 \cdot 0.41) = 2.62$$

dove

$$\begin{aligned}
- \quad n_e=0.15 \quad n_i=0.3 \quad \frac{V_{gr,e}}{V_w} &= \frac{2 \cdot 90 \cdot 0.15}{2 \cdot 90 \cdot 0.15 + 220 \cdot 0.30} \cdot 0.12 = 0.035 \\
- \quad \frac{G_{gr,e}}{G_w} &\sim \frac{1.6}{2.5} \frac{V_{gr,e}}{V_w} = 0.022 \\
- \quad \lambda'_e &= 0.75 \cdot 0.58 + 0.25 = 0.69, \quad \lambda'_i = 2/3 \text{ poiché } R_{we,s} \approx f_{wi,s}
\end{aligned}$$

**b) Campione BC3**

$$f_{wc,s} = \left\{ 2 \cdot 0.69 \cdot 0.41 \cdot 4.0 \left[ 1 + 0.01(100 \cdot 0.020)^3 \right] + \frac{1}{2} \cdot (1.0 + 0.3 \cdot 19.5) \right\} : (1 + 2 \cdot 0.41) = 3.22$$

**c) Campione SC1, SC3 (valori medi)**

$$f_{wc,s} = \left\{ 2 \cdot 0.55 \cdot 0.93 \cdot 5.62 \left[ 1 + 0.01(100 \cdot 0.025)^3 \right] + 1 \cdot (1.0 + 0.3 \cdot 8.0) \right\} : (1 + 2 \cdot 0.93) = 3.52$$

dove

$$\begin{aligned}
- \quad n_e=0.07 \quad n_i=0.3 \quad \frac{V_{gr,e}}{V_w} &= \frac{2 \cdot 130 \cdot 0.07}{2 \cdot 130 \cdot 0.07 + 140 \cdot 0.30} \cdot 0.13 = 0.039 \\
- \quad \frac{G_{gr,e}}{G_w} &\sim \frac{1.6}{2.5} \frac{V_{gr,e}}{V_w} = 0.025 \\
- \quad \lambda'_e &= 0.75 \cdot 0.40 + 0.25 = 0.55, \quad \lambda'_i = 1 \text{ poiché } R_{we,s} > f_{wi,s}
\end{aligned}$$

**d) Campione SC2**

$$f_{wc,s} = \left\{ 2 \cdot 0.55 \cdot 0.93 \cdot 5.62 \left[ 1 + 0.01(100 \cdot 0.026)^3 \right] + \frac{2}{3} \cdot (1.0 + 0.3 \cdot 19.5) \right\} : (1 + 2 \cdot 0.93) = 3.96$$

**Valluzzi et al, 2001 (dati aggiuntivi della Valluzzi et al, 2004)**

- Pareti tri-strato dopo l'iniezione di malta liquida [spec.1]

$$f_{wc,s} = \left\{ 2 \cdot 0.475 \cdot 0.78 \cdot 6.65 \left[ 1 + 0.01(100 \cdot 0.038)^3 \right] + 1 \cdot (0.80 + 0.27 \cdot 5.10) \right\} : (1 + 2 \cdot 0.78) = 3.82$$

$$\begin{aligned}
- \quad n_e=0.07 \quad n_i=0.27 \quad (\text{vedi stime del paragrafo precedente inerenti i dati "prima dell'iniezione di malta liquida"}) \\
- \quad \frac{V_{gr,e}}{V_w} &= \frac{2 \cdot 180 \cdot 0.07}{2 \cdot 180 \cdot 0.07 + 140 \cdot 0.27} \cdot 0.125 = 0.05
\end{aligned}$$

- $\frac{G_{gr,e}}{G_w} \sim \frac{1.6}{2.5} \frac{V_{gr,e}}{V_w} = 0.038$
- $\lambda'_e = 0.75 \cdot 0.3 + 0.25 = 0.475$
- Riguardo  $\lambda'_i$ :  
 $R_{we,s} = 0.475 \cdot 6.65 = 3.15 > 2.18$   
 $(f_{wi,s} = 0.80 + 0.27 \cdot 5.10 = 2.18)$   
 quindi,  $\lambda'_i = 1$

- Pareti tri-strato dopo l'iniezione di malta liquida [spec.2]

$$f_{wcs} = \left\{ 2 \cdot 0.475 \cdot 0.78 \cdot 6.65 \left[ 1 + 0.01(100 \cdot 0.038)^3 \right] + 1 \cdot (0.80 + 0.27 \cdot 3.23) \right\} : (1 + 2 \cdot 0.78) = 3.62$$

## ALLEGATO II

### ELENCO DELLE FORMULE E DEI SIMBOLI

#### 1. Resistenza alla compressione di muratura tri-strato prima dell'iniezione di malta liquida

$$f_{wc,o} = \left\{ 2\lambda'_e \cdot \delta \cdot f_{wc,e} + \lambda'_i f_{wc,i} \right\} : (1 + 2\delta)$$

dove

- $f_{wc,e} = \left[ \frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} + k_1 f_{mc} - k_2 \right] : \left[ 1 + 3.5 \left( \frac{V_m}{V_w} - 0.3 \right) \right]$

resistenza alla compressione dello strato esterno.

$f_{bc}$  = resistenza alla compressione dei blocchi utilizzati nello strato esterno  $\leq 100$  MPa

$f_{mc}$  = resistenza alla compressione della malta utilizzata

$k_1$  = 0.6 per muratura grezza

0.2 per muratura in mattoni o pietre regolari

$k_2$  = 0.0 MPa per muratura in mattoni o pietre regolari

0.5 MPa per blocchi di pietra semiregolari

2.5 MPa per muratura grezza

$V_m, V_w$  = volume della malta edilizia utilizzata e volume totale della parete ( $V_m/V_w > 0.3$ )

- $f_{wc,i} = f_0 e^{-10n_i} \cdot \xi$

$f_0$  = 35MPa per malte forti ( $f_{mc} \sim 10$  MPa)

20MPa per malte medie ( $f_{mc} \sim 4$  MPa)

10MPa per malte deboli ( $f_{mc} \sim 1$  MPa)

$\xi_i =$  1 se il riempimento viene effettuato con scaglie medio-piccole di blocchi, e gettata frequente di malta da edilizia j altrimenti 0.

$n_i =$  indice di porosità degli “aggregati” del riempimento

- $\delta = t_e : t_i$ , rapporto dello spessore rispettivamente dello strato esterno e del riempimento

$$\lambda_e = 1 - \left[ \frac{0.018}{f_{wc,e}} \cdot \left( \frac{h_w}{t_e} \right)^2 \cdot h_w^{2/3} \right] \cdot \left[ \frac{0.31(h_w / t_e)^3 h_w}{E_{we}} + \frac{t_i}{E_i} \right]$$

$t_e, t_i, h_w$  in (mm)

o in approssimazione

$$\lambda_e \approx 1 - 0.06 \zeta_e t_e h_w^{-4/3}, \quad (t_e, h_w \text{ in mm})$$

$$\zeta_e = E_{we} \cdot f_{wc,e}$$

=500 per muratura grezza

=1000 per muratura in mattoni e pietra ordinaria

=1500 per muratura in pietra molto regolare

- $\lambda_i = 1$

## 2. Resistenza alla compressione di muratura tri-strato dopo l'iniezione di malta liquida

$$f_{wc,s} = \left\{ 2\lambda'_e \cdot \delta \cdot f_{wc,e} \left[ 1 + 0.01(100G_{gr} / G_w)^3 \right] + \lambda'_i (f_{wc,i} + n_i \cdot f_{gr,c}) \right\} \cdot (1 + 2\delta)$$

dove

- $f_{wc,e} \left[ 1 + 0.01(100G_{gr} / G_w)^3 \right]$  è la resistenza alla compressione ( $f_{wc,e,s}$ ) dello strato esterno dopo l'iniezione; per  $f_{wc,e}$  vedi § II1 sopra.
- $G_{gr}, G_w$ , denotano il peso della malta iniettata nello strato esterno e il peso iniziale di questo strato.
- $f_{wc,e}, f_{wc,i}$ , come in § II1 sopra
- $(f_{wc,i} + n_i \cdot f_{gr,c})$  è la resistenza alla compressione ( $f_{wc,i,s}$ ) del riempimento dopo l'iniezione; per  $f_{wc,i}$  vedi § II1 sopra
- $f_{gr,c}$  = resistenza alla compressione della malta
- $\delta, n_i$ , come in II1 sopra
- $\lambda'_e = 0.75\lambda_e + 0.25$  ( $\lambda_e$ , come in § II1 sopra)
- $\lambda'_i = 1.0$  se  $f_{wc,i,s} : R_{wc,e,s} < 0.8$   
 $\quad \quad 2/3$  se  $0.8 < f_{wc,i,s} : R_{wc,e,s} < 1.2$   
 $\quad \quad 1/2$  se  $1.2 < f_{wc,i,s} : R_{wc,e,s}$

## **ALLEGATO III**

### **INDICE**

#### **Sommario**

#### **Introduzione**

#### **1. Dati sperimentali**

#### **2. Caratteristiche strutturali di muratura mono-strato**

##### **2.1 Prima dell'iniezione di malta liquida**

##### **2.2 Dopo l'iniezione di malta liquida**

#### **3. Caratteristiche strutturali del materiale di riempimento**

##### **3.1 Prima dell'iniezione di malta liquida**

##### **3.2 Dopo l'iniezione di malta liquida**

#### **4. Espressioni approssimative di previsione della resistenza della muratura tri-strato**

##### **4.1 Prima dell'iniezione di malta liquida**

##### **4.2 Dopo l'iniezione di malta liquida**

#### **5. Calibrazione**

#### **6. Introduzione ad un approccio razionale**

##### **6.1 Comportamento strutturale fondamentale**

##### **6.2 Evidenza sperimentale e modelli analitici**

#### **Ringraziamenti**

#### **Riferimenti**

#### **Allegato I**

##### **Applicazioni numeriche**

#### **Allegato II**

##### **Elenco delle formule e dei simboli**

#### **Allegato III**

##### **Elenco dei contenuti**

P.S. Eventuali differenze tra il testo in inglese e la traduzione sono imputabili ad un aggiornamento del testo originale con i dati pervenuti dalla D.ssa Valluzzi di Padova.

