



PARAMETRI CHE INFLUENZANO LA RESISTENZA A COMPRESSIONE E LA DEFORMAZIONE CRITICA DELLA MURATURA

T.P. Tassios

Università Tecnica Nazionale, Atene

*In memoria di
Prof. N. Ambrazeys*

Sommario

Viene ribadita l'importanza del tema, poiché sia la progettazione che la riprogettazione di strutture in muratura sono principalmente basate su caratteristiche di resistenza alla compressione. I parametri che influenzano f_{wc} e ε_{wcu} vengono di seguito enumerati; si sostiene che formule empiriche che predicono questi valori di base dovrebbero necessariamente prendere in considerazione tutti i parametri di cui sopra. In questa memoria, per ciascuno di questi parametri, viene presentata una breve analisi, che tenta di offrire una possibile quantificazione – anche se in modo molto approssimato. Inoltre, vengono discusse le modifiche di f_{wc} dovute a condizioni di sollecitazione biassiale; vengono esaminate ulteriori modifiche di queste caratteristiche meccaniche sotto carico ciclico. Infine, viene brevemente presentato il concetto di "volume critico di collasso".

1. SIGNIFICATO DEL SOGGETTO

I metodi tradizionali o moderni di progettazione e di riprogettazione di strutture in muratura, si basano normalmente sulla resistenza alla compressione e sulla deformabilità della muratura: moduli di elasticità e resistenza alla trazione vengono empiricamente espressi come funzioni del f_{wc} , laddove la capacità rotazionale della muratura in analisi non-lineare è collegata all'ultima deformazione della muratura ε_{wcu} sotto compressione uniassiale.

Nonostante la loro fondamentale importanza, tuttavia, queste due caratteristiche sono normalmente stimate mediante espressioni **empiriche** piuttosto dubbiose – soprattutto nel caso di vecchie strutture in muratura. Tutto questo può essere epistemologicamente inaccettabile per confrontare gli effetti dell'azione (derivati da sofisticati FEM sotto carico dinamico), con una resistenza trovata mediante una formula empirica, supponendo di predire la forza di compressione di una tradizionale muratura con blocchi irregolari rinforzata con legname.

Il chiaro squilibrio di affidabilità dei due lati della disuguaglianza è evidente, e dovrebbe aver incoraggiato la ricerca intensiva della disuguaglianza sulla parte della resistenza. Ma questo non sembra essere il caso, forse per i seguenti motivi. Una tale ricerca:

- potrebbe essere matematicamente troppo complicata;
- non è assoggettabile a brevetti, che portino allo sfruttamento commerciale;
- e, di conseguenza, non attira molti finanziamenti...

È tuttavia sostenibile che, a causa della sua importanza fondamentale, è necessaria una concentrazione delle attività di ricerca in materia e deve essere iniziato in un ampio contesto europeo, con la mira di un esame approfondito delle caratteristiche strutturali di una grande varietà di muratura.

Questa relazione vuole essere solo un promemoria dei parametri di base che plasmano le caratteristiche suddette, e un tentativo per una pseudo-quantificazione della loro influenza.

Nota: vengono considerate solo le forze **locali** gli effetti di instabilità non sono presi in considerazione.

2. RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE IN CONDIZIONI STATICHE

In ciò che segue, verrà brevemente ripetuta una descrizione della composizione della muratura, sarà dato un promemoria dei parametri che influenzano la resistenza a compressione della muratura, verrà ricordata una teoria sulla resistenza a compressione della muratura in blocchi di forma rettangolare (estesa al caso di blocchi molto irregolari), sarà presentata un'approssimazione elementare sulle conseguenze del legame dei blocchi, e infine sarà discusso molto brevemente il ruolo delle condizioni di sollecitazione biassiale.

2.1. Composizione delle murature

E' di fondamentale importanza ricordare che il termine generico "muratura" è inadeguato per descrivere l'enorme varietà di possibili realtà strutturali – un fatto che non viene rilevato in altri materiali da costruzione, quali legno, acciaio, calcestruzzo o materiali compositi. Basta qui enumerare il gran numero di parametri di tale varietà:

- uso di malta, sua natura e sua quantità;
- la natura, la forma e l'orditura dei blocchi, sia in piano o trasversalmente;
- esistenza di legname da costruzione di rinforzo;
- possibilità di muratura a secco;
- variabilità locali (anche all'interno di un dato muro).

Le conseguenze strutturali di ciascuno di questi parametri (e la loro combinazione) può essere sproporzionatamente grande, e questo fatto non si riflette nel termine generico di "muratura".

Ecco perché, nel caso di strutture murarie esistenti, è necessaria una descrizione **completa**, sostenuta per quanto possibile da diverse misure in situ (prove non distruttive e altri metodi). La speranza che in assenza di tale descrizione completa i "calcoli" siano in grado di prevedere il vero comportamento strutturale sta al di là della scienza.

2.2. Parametri che interessano la resistenza alla compressione della muratura

E' importante prendere in considerazione il maggior numero possibile di parametri che possono influenzare la resistenza della muratura sotto compressione uniassiale. Alcuni di questi parametri sono elencati qui sotto, seguendo l'ordine della loro importanza.

- Orditura trasversale di blocchi
- Orditura di blocchi in piano
- Resistenza dei blocchi
- Uniformità delle sedi dei blocchi
- Spessore normalizzato dello strato orizzontale della malta
- Riempimento di giunti verticali
- Resistenza della malta
- Variabilità delle dimensioni dei blocchi
- Condizioni di durabilità.

Lo stato dell'arte non consente un calcolo razionale dell'influenza di ciascuno di questi fattori sulla resistenza della muratura. In sostituzione sono disponibili un gran numero di formule empiriche che prevedono una f_{wc} , che tuttavia tengono conto di un numero relativamente piccolo dei suddetti parametri; più frequentemente, sono considerati solo la resistenza del blocco e della malta. Questo può essere sufficiente per murature a blocchi rettangolari, con orditura trasversale perfetta. Ma è chiaramente insufficiente in una moltitudine di casi di edifici esistenti in muratura con varie altre tipologie.

Determinazioni di resistenza in situ e misurazioni in laboratorio su possibili repliche (vedere, tra l'altro TP Tassios et al.: "Evaluation of Monuments, Experimental methods and Tests", Int. Symposium SHH07, Antalya, Settembre 2007) possono far fronte a questa situazione infelice.

Di seguito, tuttavia, viene fatto un tentativo di offrire soluzioni quasi-quantitative, sia come semplice invito a metodi più dettagliati, sia per essere ulteriormente sviluppati.

2.3. Resistenza uniaassiale a compressione della muratura a blocchi rettangolari

In questo caso il principale meccanismo di controllo dell'integrità dei componenti della muratura è la generazione di sollecitazioni di trazione orizzontale agenti sui blocchi, a causa dei grandi spostamenti orizzontali della malta (grazie alla sua deformazione Poisson)¹.

Con le notazioni di fig. 1, le tensioni trasversali possono essere espresse come segue.

$$\varepsilon_{bx} = \frac{1}{E_b} [\sigma_{bx} + \nu_b (\sigma_z - \sigma_{by})]$$

$$\varepsilon_{by} = \frac{1}{E_b} [\sigma_{by} + \nu_b (\sigma_z - \sigma_{bx})]$$

Malta:

$$\varepsilon_{mx} = \frac{1}{E_m} [-\sigma_{mx} + \nu_m (\sigma_z + \sigma_{my})]$$

$$\varepsilon_{my} = \frac{1}{E_m} [-\sigma_{my} + \nu_m (\sigma_z + \sigma_{mx})]$$

dove E e ν indicano rispettivamente le costanti elastiche dei blocchi (b) e della malta (m). D'altra parte, $\varepsilon_{bx} = \varepsilon_{mx}$ and $\varepsilon_{by} = \varepsilon_{my}$.

Per l'equilibrio la forza di tensione totale che agisce sul blocco deve essere uguale alla forza totale di compressione agente sulla malta, cioè:

$$\sigma_{bx} d t_b = \sigma_{mx} d t_m, \quad \text{quindi } \sigma_{bx} = \alpha \cdot \sigma_{mx}$$

$$\sigma_{by} b t_b = \sigma_{my} d t_m, \quad \text{quindi } \sigma_{by} = \alpha \cdot \sigma_{my}$$

dove $\alpha = t_m : t_b < 1$

Risulta (per $\beta = E_m : E_b < 1$)

$$\sigma_{my} = \sigma_{by} = \left[\frac{\alpha (\nu_m - \beta \nu_b)}{(1 - \nu_m) + \alpha \beta (1 - \nu_b)} \right] \times \sigma_z = \sigma_t \quad (1)$$

A causa di queste tensioni di trazione orizzontale, la resistenza a compressione verticale (f_{bc}) del blocco viene ridotta secondo la seguente espressione approssimata (fig. 2.):

$$\frac{\sigma_{zu}}{f_{bc}} + \frac{\sigma_t}{\lambda f_{bc}} = 1 \quad (2)$$

dove

$$\lambda = f_{bt} : f_{bc} < 1$$

σ_{zu} = la resistenza a compressione della muratura

¹ La presentazione che segue si basa su Hendry AW: "Structural brickwork", The Macmillan Press, 1981, come modificata in T.P. Tassios: "Meccanica delle murature", Liguori, 1988.

Combinando Equ. 1 e 2, e mettendo $\sigma_{zu} = f_{wc}$, troviamo

$$\frac{f_{wc}}{f_{bc}} = 1 : \left\{ 1 + \frac{\alpha(v_m - \beta v_b)}{\lambda[(1 - v_m) + \alpha\beta(1 - v_b)]} \right\} \quad (3)$$

Un'applicazione numerica di Equ. 3 è mostrata in fig. 3 per due qualità di malta, come segue:

malta forte: $\beta = 1:3$, $v_b = 0,15$, $v_m = 0,25$, $\lambda = 1:15$ (dove “ λ ” come in Equ. 3a)

malta debole: $\beta = 1:10$, $v_b = 0,15$, $v_m = 0,35$, $\lambda = 1:15$

D'altra parte, per una data larghezza di giunto t_m , la relazione tra f_{wc} da una parte e f_{bc} , f_{mc} , dall'altra, può essere derivata da Equ. 3a (versione semplificata di Equ. 3)

$$\frac{f_{wc}}{f_{bc}} = 1 : \left(1 + \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \xi \right) \quad (3a)$$

$$\text{dove } \xi = \frac{v_m - \beta v_b}{1 - v_m} > 0, \quad \alpha = \frac{t_m}{t_b}, \quad \beta = \frac{E_m}{E_b}, \quad \lambda = \frac{f_{bt}}{f_{bc}}$$

Frequentemente, le costanti elastiche vengono espresse in termini di rispettive resistenze a compressione, ad esempio nella forma seguente:

$$v = 0,5 - k \cdot \sqrt[3]{f_c : f_{c0}}$$

(dove “ k ” f_{c0} e “ n ” sono costanti numeriche)

$$E = n \cdot f_c$$

Dal momento che queste "interpretazioni" sono piuttosto aleatorie, si può prevedere che la relazione usuale $f_{wc} = \psi(f_{bc}, f_{mc})$ non può essere abbastanza preciso. Questo è anche il caso di espressioni semplici come quelle che seguono, valide per muratura di mattoni pieni e con orditura completa (Tassios, 1988)

$$\text{Quando } f_{bc} > f_{mc} : \quad f_{wc} = [f_{mc} + 0,4(f_{bc} - f_{mc})] \cdot (1 - 0,8\sqrt[3]{\alpha}) \quad (4)$$

$$\text{Quando } f_{mc} > f_{bc} : \quad f_{wc} = f_{bc} \cdot (1 - 0,8\sqrt[3]{\alpha})$$

dove $\alpha = t_m : t_b$

E' comunque di fondamentale importanza notare che né il campo di applicazione né la precisione di queste espressioni sono conosciuti adeguatamente.

2.4. Il caso di pietre molto irregolari

A differenza del caso precedente, un blocco irregolare potrebbe essere posizionato in extremis sulla sua pietra di sostegno su un solo punto (fig. 4), generando sollecitazioni di trazione trasversale σ_{bt} . Segue una soluzione pseudo-quantitativa, solo come indicazione del tipo di ricerca necessaria sull'argomento.

Assumendo un'area d'appoggio sul punto di contatto, le tensioni di trazione trasversale possono essere stimate come:

$$\sigma_{bt} \approx 2P : 3h_b \cdot 1$$

D'altra parte, le sollecitazioni di flessione " σ_0 " potrebbero anche essere sovrapposte a queste trazioni:

$$\sigma'_{bt} \approx 2P : 3h_b \cdot 1 + \sigma_0$$

dove σ_0 indica un aumento di stress difficilmente valutato.

D'altra parte, la resistenza alla trazione f_{bt} della pietra può in questo caso essere aumentata grazie ad una mobilitazione parziale della reazione della malta di riempimento dei giunti verticali:

$$eff\ f_{bt} = f_{bt} + k_1 f_{mc}$$

Mettendo $\sigma'_{bt} = eff\ f_{bt}$, e $P = l_b \cdot f_{wc} \cdot 1$,

risulta

$$f_{wc} = \frac{3}{2} \frac{h_b}{l_b} (f_{bt} - \sigma_0 + k_1 f_{mc})$$

Oppure, per $h_b : l_b \approx 2/3$ e $f_{bt} \approx \frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}}$ [MPa],

$$f_{wc} = \frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} - \sigma_0 + k_1 f_{mc} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

Questa può essere un'indicazione favorevole sulla validità della seguente formula **empirica**², applicabile alla muratura in **pietra** con orditura normale:

$$f_{wc} = \left\{ \frac{2}{3} \sqrt{f_{bc}} - \sigma_0 + k_1 f_{mc} \right\} : \left\{ 1 + 3,5 \left(\frac{V_m}{V_w} - 0,3 \right) \right\} \quad (6)$$

dove

f_{bc} = resistenza a compressione (MPa) della pietra

σ_0 = 2,5 MPa, blocchi irregolari

0,5 MPa, pietre semi-squadrate

k_1 = 0,6 per blocchi irregolari

0,2 per pietre semi-squadrate

Il denominatore è una correzione che riflette gli effetti negativi di giunti di malta di grande ampiezza (di cui al § 2.3), in cui:

V_m = volume di malta contenuto in un volume di muratura uguale a V_w , dove

$V_m : V_w \notin 0,3$.

Ancora una volta è importante notare che il campo di applicazione e la precisione di questa formula non è ben definita.

² Tassios P.T., Chronopoulos M.: "Aseismic dimensioning of interventions on low-strength masonry buildings", Middle East Mediterranean Conference "Earthen and low strength masonry buildings", Ankara, 1986.

2.5. Conseguenze strutturali della orditura dei blocchi

L'orditura dei blocchi di muratura è una caratteristica strutturale di base. Un tentativo di quantificare un "fattore di orditura" δ_{bg} è illustrato in fig. 5. Lunghezze sovrapposte " u_i " vengono sommate, lungo una sezione quasi verticale a-a di malta.

Considerando approssimativamente "n" strati, tale fattore può essere definito come segue:

$$\delta_{bg} \equiv \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (u_i : l_{bi}) \quad (7)$$

$$(0 \leq \delta_{bg} \leq 1)$$

Ci si aspetta che i valori più elevati di δ_{bg} assicurino una migliore uniformità delle tensioni interne nella muratura e più ampie possibilità di bloccare la formazione delle fessure.

Fino a quando le ricerche (analitiche e sperimentali) non saranno effettuate, può essere adottata una stima indiretta dell'importanza dell'orditura. Questa sarà la sollecitazione di compressione verticale " σ_{wr} " che inizia con fessure quasi verticali sulla muratura, (fig. 6). Poiché un migliore orditura corrisponde a maggiori valori σ_{wr} , il rapporto di queste tensioni può essere considerato pari al rapporto delle resistenze finali delle murature stesse.

$$f'_{wc} (forte) \approx \frac{\sigma'_{wr}}{\sigma_{wr}} \cdot f_{wc} (debole) \quad (8)$$

Una stima semplificata della prima sollecitazione di fessurazione σ_{wr} e' basata sulle deformazioni orizzontali della muratura.

a) Nel caso di orditura-zero (fig. 6a):

- Deformazione orizzontale della muratura $\nu_w \sigma_{wr} : E_w$
- Estensibilità orizzontale della malta $f_{mt} : E_m$
- Compatibilità delle deformazioni $\nu_w \sigma_w : E_w = f_{mt} : E_m$

Conseguentemente
$$\sigma_{wr} = \frac{1}{\nu_w} \cdot \frac{E_w}{E_m} \cdot f_{mt} \quad (9)$$

b) Nel caso di una orditura determinato (fig. 6b).

– Forza resistente di fessurazione verticale

$$F = f_{mt} H + \frac{H}{h_b} \cdot \mu \sigma'_{wr} \cdot c$$

dove "c" indica una lunghezza media di sovrapposizione

(e, finchè $\delta_{bg} = 2 \frac{c}{l_b}$, sarà $c = \frac{\delta_{bg}}{2} \cdot l_b$),

mentre "μ" è un coefficiente di attrito.

- Aumento nominale della resistenza alla trazione delle giunzioni verticali

$$F : H = f_{mr} + \mu \frac{c}{h_b} \cdot \sigma'_{wr}$$

– Compatibilità di deformazioni

$$\frac{1}{E_m} \left(f_{mr} + \mu \frac{c}{h_b} \cdot \sigma'_{wr} \right) = v_m \cdot \frac{\sigma'_{wr}}{E_w}$$

$$\text{oppure} \quad \sigma'_{wr} = \sigma_{wr} : \left(1 - \frac{\mu}{v_m} \cdot \frac{E_w}{E_m} \cdot \frac{c}{h_c} \right) \quad (10)$$

Il rapporto tra le due tensioni di fessurazione può ora essere scritto come

$$k_2 = \frac{\sigma_{wr}}{\sigma'_{wr}} = \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\mu}{v_m} \cdot \frac{E_w}{E_m} \cdot \frac{l_b}{h_b} \right) \cdot \delta_{bg} \right] \quad (11)$$

oppure

$$\left. \begin{aligned} k_2 &= 1 - \frac{1}{2} \gamma \cdot \delta_{bg} \\ \text{dove } \gamma &= \frac{\mu}{v_m} \cdot \frac{E_w}{E_m} \cdot \frac{l_b}{h_b} \end{aligned} \right\} \quad (11a)$$

Ora, seguendo l'assunzione di Equ. 8, $f_{wc, \delta=0} = k_2 \cdot f_{wc, \delta=\delta}$, e considerando che i valori di resistenza "f_{wc}" stimati attraverso Equ. 4 e Equ. 6 siano validi per $\delta_{bg}=1$, (cioè per $k_2 = 1 - \frac{\gamma}{2}$), possiamo scrivere

$$f_{wc, \delta_{bg}} = \frac{1 - \gamma / 2}{1 - \gamma \delta_{bg} / 2} \cdot f_{wc} \quad , \quad (0 \leq \delta_{bg} < 1) \quad (12)$$

È tuttavia ammesso che questo approccio sia molto semplificato e sia stato seguito solo come un tentativo di identificare i parametri di base che regolano le conseguenze di un orditura inadeguata. Così, per il momento, l'uso diretto di Equ. 1 non è raccomandato; darebbe l'impressione di una precisione fittizia. Invece, può essere suggerito usare un'espressione certamente approssimativa assumendo $\gamma \sim 1$, valida per condizioni medie, però con una dispersione molto grande.

$$\text{Così, } k_2 \sim 1 - \frac{\delta_{bg}}{2}, \quad \text{e} \quad f_{wc, \delta_{bg}} = f_{wc} : 2 \left(1 - \frac{\delta_{bg}}{2} \right) \quad (13)$$

2.6. Orditura trasversale

Anche se le murature a due e tre strati non sono oggetto di questo articolo, è importante cercare di quantificare (anche se in un modo piuttosto semplice) le conseguenze strutturali della orditura trasversale tra le due "facce" di muratura ad uno strato. La fig. 7 è un richiamo alla vulnerabilità delle pareti trasversalmente non aderenti. Blocchi sporgenti oltre l'asse verticale della sezione trasversale della parete, contribuiscono alla

collaborazione strutturale delle sue due "facce". Ecco perché un "fattore di orditura trasversale" potrebbe essere definito³ come segue (vedi fig. 8).

$$\delta_{tr} = \left(\sum l_i \right) : H, \quad 0 < \delta_{tr} < 1^{(4)} \quad (14)$$

Tentando di quantificare le conseguenze strutturali dell'orditura inadeguata trasversale, può essere seguito lo stesso approccio di § 2.5: si cercheranno valori delle sollecitazioni verticali " σ_w " iniziando la fessurazione quasi-verticale vicino all'asse della sezione trasversale. Qui verrà seguito un approccio chiaramente semplificato, essendo il suo scopo soprattutto quello di individuare solo i parametri più importanti.

A tal fine, si suppone che (accidentalmente oppure a causa di disomogeneità interne) l'intero carico $\sigma_w \cdot b_w$ agisca eccentricamente solo su una metà della larghezza del muro, generando un accorciamento differenziale lungo l'asse verticale della sezione trasversale

$$\varepsilon = \zeta \cdot 2\sigma_w : E_w$$

dove " ζ " è un fattore numerico variabile.

La corrispondente deformazione di taglio massima lungo la lunghezza "vulnerabile" $H(1-\delta_{tr})$ è:

$$s_{crit} = \zeta \frac{2\sigma_w}{E_w} H(1-\delta_{tr})$$

A questo valore critico di slittamento (s_{crit}), l'attrito supera la deformabilità laterale della parete, e viene prodotta una fessura verticale interna, portando ad una rapida destabilizzazione del muro. La sollecitazione di compressione verticale che agisce " σ_{wr} " in questa fase viene presa come un pre-stimatore della resistenza a compressione $f_{wc, \delta_{tr}}$ di una parete che dispone di un fattore trasversale di legame δ_{tr} .

Situazione critica

$$\sigma_{wr} \sim \left(\frac{s_{crit} \cdot E_w}{2\zeta H} \right) : (1-\delta_{tr})$$

Stima pseudo-quantitativa di

$$\sigma_{wr} \sim \sigma_0 : (1-\delta_{tr}) \quad (15)$$

dove $\sigma_0 = s_{crit} \cdot E_w : 2\zeta H$, una costante.

Come è stato precedentemente osservato in vere e proprie pareti, il valore massimo possibile di t_{tr} è vicino a 0,5, corrispondente ad un valore massimo possibile di $\sigma_{wr} = 2\sigma_0$.

³ Le necessarie misurazioni in situ, tuttavia, sono estremamente difficili. Salvo non abbia avuto luogo un'indagine georadar approfondita, le informazioni riguardanti la sezione trasversale di una parete in muratura vengono raccolte mediante asportazione locale di pietre, soprattutto in prossimità dei lati di porte e finestre.

⁴ In pareti di reale muratura, tuttavia, a causa della loro orditura, il valore massimo di t_{tr} è pari a 0,5.

Di conseguenza, poiché valori σ_{wr} sono stati considerati come pre-stime dei valori f_{wc} , si può scrivere

$$f_{wc,\delta_r} = \frac{1}{2(1-\delta_r)} \cdot f_{wc} \quad , \quad (0 \leq \delta_r \leq 0,5) \quad (16)$$

dove “ f_{wc} ” indica la resistenza a compressione della muratura in orditura completa (resistenza come quella empiricamente prevista da Equ. 4 e Equ. 6).

Nota 1

Tuttavia, in considerazione della immaturità dello stato dell’arte in materia, invece dei suddetti tentativi di “calcolare” le conseguenze strutturali delle condizioni di orditura (piano e trasversale), sembra più pratico cercare di far corrispondere una data parete in muratura, con uno dei “modelli” di fig. 9. Successivamente, verranno applicati appropriati fattori di riduzione della resistenza, derivanti da esperienza o da analoghe prove di laboratorio. E questa è la tendenza nelle Linee Guida Italiane.

Nota 2

Come è noto, il problema della compressione bidiagonale affronta due complicazioni. La prima è legata alla pronunciata ortotropia della muratura, cioè le proprietà strutturali notevolmente diverse lungo un asse verticale e orizzontale. E la seconda, è la biassialità di sollecitazioni (compressione diagonale, sotto una tensione perpendicolare simultanea), che inducono una notevole riduzione della resistenza a compressione diagonale. Questa riduzione è convenzionalmente considerata uguale al 40%, ma molto dipende dalla forma della curva “critica” nella regione di compressione-tensione (una linea retta nel criterio-Tresca, un’ellisse in Von-Mises, o una curva rigonfia suggerita da Page, e poi confermata empiricamente da noi).

Nota 3

La presenza di legname di rinforzo all’interno del corpo della muratura, offre un considerevole aumento sia della resistenza che della duttilità, tramite meccanismi strutturalmente simili a quelli che disciplinano la muratura rinforzata in acciaio (vedere per esempio Psilla e Tassios: “Design models of reinforced masonry walls under monotonic and cyclic loading”, Eng. Structures, Dicembre 2008).

Nota 4

Le murature a due o tre strati non sono state incluse in questo articolo. Tuttavia, un recente stato dell’arte può essere trovato in Vintzileou E.: “Three-leaf masonry in compression, a review of literature”, Int. J. of Arch. Heritage, 5, 2011”.

3. RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE SOTTO AZIONI SISMICHE

Le azioni di compressione su muratura in condizioni sismiche possono essere distinte come segue:

- Compressione ripetitiva sul corpo di muratura intatto.

- Compressione ripetitiva su muratura tensionalmente fessurata in precedenza.
- Compressione ripetitiva su muratura diagonalmente fessurata in precedenza.

Lo stato dell'arte non è ricco. Questo articolo si limiterà ad una breve considerazione qualitativa del solo primo caso. In fig. 10, quando “ ε_{wc} ” ripetutamente imposti sono più piccoli di $\varepsilon_{wc,u}$ (sotto carico monotónico), si osserva una degradazione di risposta relativamente piccola (Δf_{wc}), accompagnata da un aumento ($\Delta \varepsilon_{wc,u}$) della deformazione in picco $\varepsilon_{wc,u}$.

In fig. 11, quando le azioni ripetitive iniziano **dopo** il collasso statico, si osserva una degradazione di risposta estremamente rapida, e le “resistenze” residue σ'_{wc} possono essere trascurabili.

Mancano sistematici dati numerici su questi temi per i vari tipi di muratura ...

4. DEFORMABILITA'

4.1. Caratteristiche pseudo-elastiche

a) Modulo di elasticità secante:⁵

$$E_w = \left[1 + \left(0,9 \frac{\sigma_0}{f_{wc}} - 0,6 \right) \cdot \frac{V}{V_{cr}} \right] \cdot E_{w0}$$

dove

$$E_w \sim (500 - 1500) \cdot f_{wc}$$

σ_0 , tensione di compressione agente sulla muratura (non maggiore di $\frac{2}{3} f_{wc}$)

V = forza di taglio attiva

$$V_{cr} = b_w l_w \left(\frac{2}{3} f_{wt} \sqrt{1 + \sigma_0 / f_{wt}} \right)$$

forza di taglio in fessurazione diagonale

f_{wt} , resistenza alla trazione orizzontale della muratura

$$f_{wt} = \min (1,5 f_{mt}, \sigma_0, f_{bt} / 2)$$

(una proprietà estremamente incerta)

b) Modulo di taglio:

Prima della fessurazione $G_w = 0,3$ to $0,4 E_{w0}$

Dopo la fessurazione $G_w = 0,2 E_{w0}$

Distorsione angolare

– all'inizio della fessurazione

$$\gamma_{cr,0} = \frac{V_{cr}}{A_w} : G$$

⁵ Psilla, Tassios: “Design models of reinforced masonry walls under monotonic and cyclic loading”, Eng. Structures, Dec. 2008.

- dopo fessurazione visibile

$$\gamma_{cr} \sim 1,5\gamma_{cr,0}$$

4.2. Deformazione di picco “ ε_{wcu} ” sotto compressione

a) Questa caratteristica strutturale della muratura è di fondamentale importanza nell'applicazione di analisi non lineari di strutture murarie. E anche se certi comportamenti duttili di queste strutture sono di origine **sistemica**, la deformazione ultima del materiale è molto significativa.

I valori “ ε_{wcu} ” sono **ridotti** in caso di:

- malta a maggiore resistenza
- blocchi di resistenza maggiore
- migliore orditura in-piano
- migliore aderenza blocco/malta
- migliore completezza dei giunti
- tensione trasversale
- caricamento rapido.

E **umentano** in caso di:

- migliore orditura trasversale
- precedente piccola fessurazione
- precarico di compressione
- rafforzamento disponibile con legname da costruzione
- muratura confinata perimetralmente
- prestazioni di livello inferiore (più alto livello di danneggiamento accettabile)

b) I valori numerici sotto carico monotono (dati di NTUA):

- Muratura di blocchi irregolari
 - Valore di picco $\varepsilon_{wcu} = 2 \text{ to } 3 \cdot 10^{-3}$
 - Dopo un 30% degradazione di risposta di tensione $\varepsilon_{wcu} = 3 \text{ to } 5 \cdot 10^{-3}$
- Muratura in mattoni pieni ($f_{wc} = 3 \text{ to } 8 \text{ MPa}$) $\varepsilon_{wcu} = 4 \cdot 10^{-3}$
- Muratura in mattoni forati
 - Compressione ($f_{wc} = 2 \text{ to } 3 \text{ MPa}$) $\varepsilon_{wcu} = 1,5 \text{ to } 3,5 \cdot 10^{-3}$
 - Compressione diagonale ($f_{wc} = 3 \text{ to } 4 \text{ MPa}$) $\varepsilon_{wcu} = 1 \text{ to } 2 \cdot 10^{-3}$
- Murature rinforzate con legname da costruzione di tutte le categorie $\varepsilon'_{wcu} \sim 3 \cdot \varepsilon_{wcu}$

c) Muratura a sacco:

- Strati esterni e riempimento ben costruiti

$$f_{wc} = 6 \text{ MPa}, \quad \varepsilon_{wcu} = 3 \text{ to } 4 \cdot 10^{-3} \text{ (Binda)}$$

- Muratura bizantina sub-normale
 - prima delle iniezioni ($f_{wc} = 2,0 \text{ MPa}$)
 $\varepsilon_{wcu} = 1,5 \cdot 10^{-3}$ (Vintzileou, Miltiadou)
 - dopo delle iniezioni ($f_{wc} = 3,5 \text{ MPa}$)
 $\varepsilon_{wcu} = 3,5 \cdot 10^{-3}$
- Compressione diagonale $\varepsilon_{wcu} = 1 \cdot 10^{-3}$

A questo proposito, va notato che alcune applicazioni di analisi non lineare, trascurando la suddetta grande variabilità di queste deformazioni critiche, non possono essere a favore della sicurezza e dell'economia. Ciononostante, si deve ammettere che indagini sistematiche sperimentali e di analisi anche in questa materia sono piuttosto scarse ...

Nota

Un metodo razionale per stimare le capacità di rotazione di muratura varia come le travi a pennacchio, si possono trovare, tra l'altro in T.P. Tassios: "Seismic Engineering of Monuments", The first Prof. N. Ambraseys distinguished lecture, Bull. Earthquake Eng., 8/2010.

APPENDICE A

In conclusione, salvo vengano eseguite prove di resistenza in situ e in laboratorio, la resistenza a compressione della **muratura in pietra** legata con malta, può essere stimata (molto approssimativamente) mediante la seguente espressione empirica

$$f_{wc} = f_{wc0} \cdot \psi_1 \cdot \psi_2 \cdot \psi_3$$

dove

f_{wc0} ~ resistenza in caso di buona esecuzione, muratura con buona orditura, prevista da qualsiasi espressione affidabile e empiricamente calibrata
(oppure, altrimenti, $f_{wc0} = \frac{2}{3} \sqrt{f_b} + k_1 f_m - \sigma_0$, [MPa], Equ. 6)

ψ_1 ~ correzione per giunti di malta di spessore.

$$\text{Forse } \psi_1 = 1 + 3,5 \left(\frac{V_m}{V_w} - 0,3 \right), \text{ Equ. 6}$$

ψ_2 ~ correzione per difetto nell'orditura in-piano.

$$\text{Forse } \psi_2 = \frac{1 - \gamma \delta_{bg} / 2}{1 - \gamma / 2}, \text{ Equ. 12}$$

ψ_3 ~ correzione per difetto nell'orditura trasversale tra le due facce della muratura.

$$\text{Forse } \psi_3 = 2(1 - \delta_{tr}), \text{ Equ. 16}$$

ADDENDICE B

a) Resta inteso che i controlli della disuguaglianza in termini di sicurezza di sollecitazioni di compressione **locale**, devono essere effettuati per sollecitazioni in media all'interno di un volume di muratura compatibile con lo sviluppo del meccanismo del collasso locale. Il concetto di un tale "volume critico di collasso" (VCC) è di fondamentale importanza: una sollecitazione di compressione che agisce su un punto matematico è priva di significato fisico; in ogni caso, solo la forza totale che agisce su un blocco (come pure l'eccentricità di questa forza) influenzerà il comportamento strutturale del blocco e dei suoi dintorni. La massima sollecitazione "matematica" dovrebbe forse essere confrontata con la resistenza del blocco, non della muratura!

b) Nonostante l'importanza fondamentale (sia per la teoria che per la progettazione), il concetto di VCC non è sufficientemente discusso in letteratura.

Segue una presentazione molto breve del concetto:

(i) Dopo l'avvio della fessurazione (con malta e/o blocco), la possibilità di **bloccare la fessurazione** nella zona, o un gradiente ripido di sollecitazione locali, possono limitare le fessurazioni ad un piccolo volume (V_1).

- (ii) Nonostante la riduzione della risposta di sollecitazione che si verifica in quest'area, la **redistribuzione** della sollecitazione nei dintorni può ripristinare l'equilibrio (disturbo limitato all'interno di un volume di V_2).
 - (iii) Dopo un ulteriore aumento del carico esterno, l'arresto della fessurazione può essere superato e il danno può essere diffuso e intensificato, mentre la redistribuzione delle sollecitazioni a livello locale non è più fattibile. In questa fase, il criterio del "livello di danno accettabile " è utilizzato, al fine di prendere in considerazione una situazione di carico come "ultima".
Il volume del materiale danneggiato in questa fase viene definito come "volume critico di collasso"; all'interno di questo volume, le sollecitazioni possono essere mediate.
- c) Per l'attuale stato dell'arte tuttavia, nel caso di muratura, una stima approssimativa della dimensione di un VCC, (ad un livello di prestazione di "protezione della vita"), può essere indicativamente basata sulle dimensioni di due blocchi consecutivi.

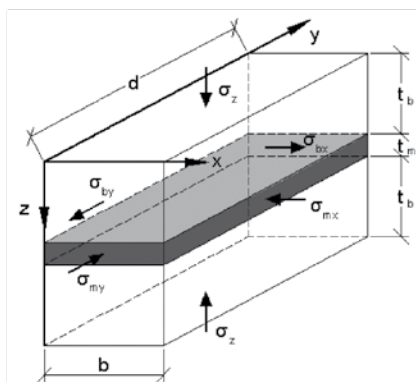


Fig. 1: Sollecitazioni endogene in un elemento di muratura sotto compressione uniaxiale esterna σ_z

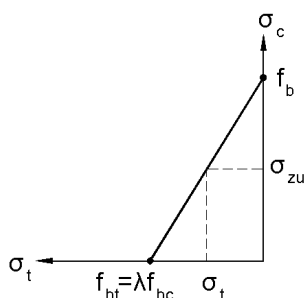


Fig. 2: Combinazione critica di sollecitazioni di compressione e di trazione agenti sul blocco

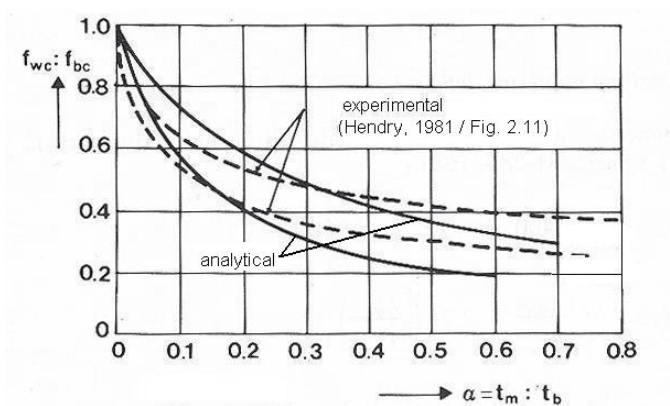


Fig. 3: Riduzione della resistenza a compressione della muratura di mattoni, a causa di maggiori larghezze di giunti di malta

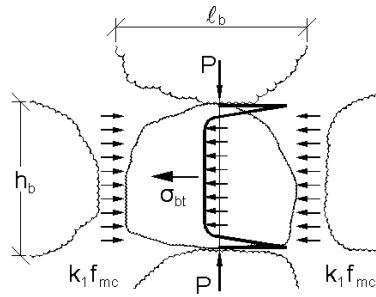


Fig. 4: In extremis, un blocco irregolare può essere posizionato sulla sua pietra di sostegno solo su un punto

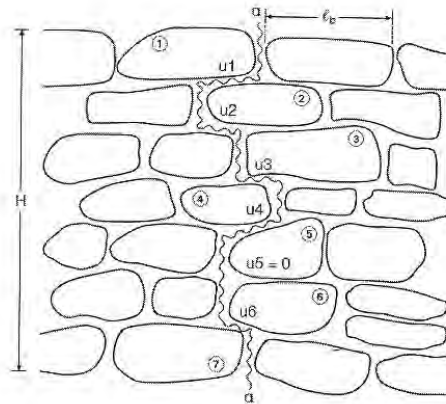


Fig. 5: La orditura può essere quantificata sommando le lunghezze sovrapposte "u_i" lungo una sezione quasi verticale α - α

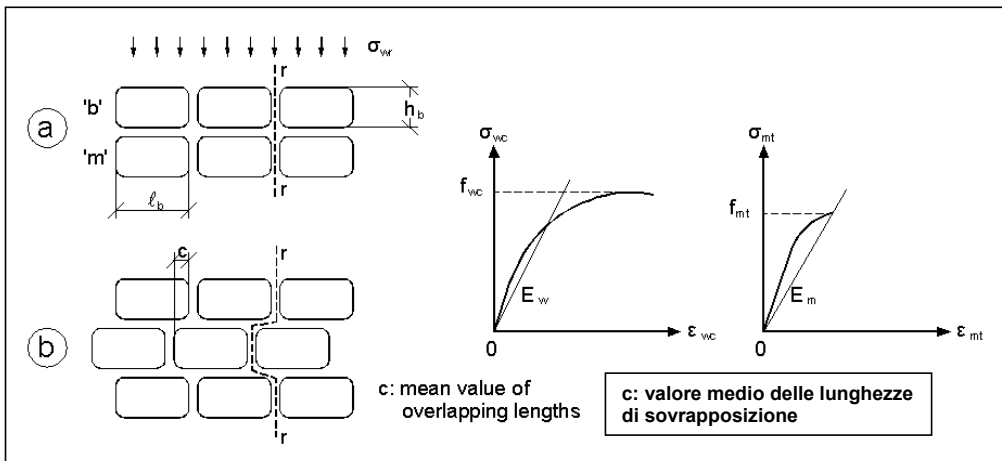


Fig. 6: Generazione di una fessura verticale r-r all'interno della malta, dovuta all'incompatibilità di deformazioni

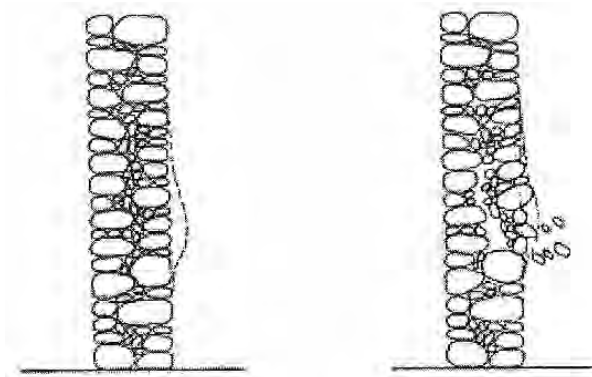


Fig. 7: Possibile rigonfiamento su pareti di muratura non legate (A. Giuffrè)

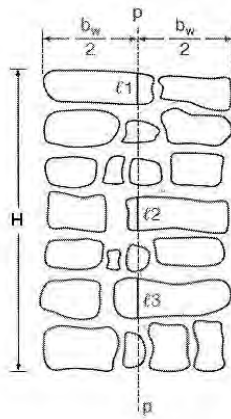


Fig. 8: L'asse verticale p-p della sezione trasversale interseca lunghi blocchi solo relativamente (lunghezze l_1, l_2, l_3)

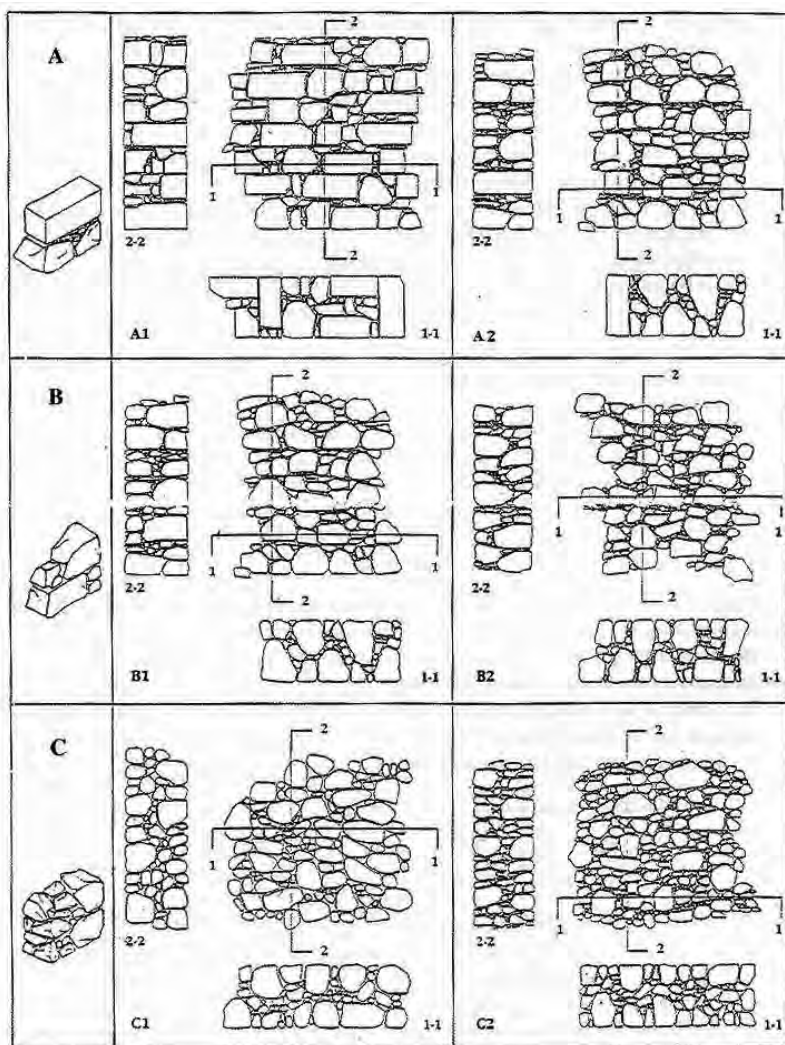


Fig. 9: Modelli di orditura utili per “calibrare” una data parete in muratura e “classificarla” in un’adeguata classe di qualità A, B o C. (Linee Guida Italiane)

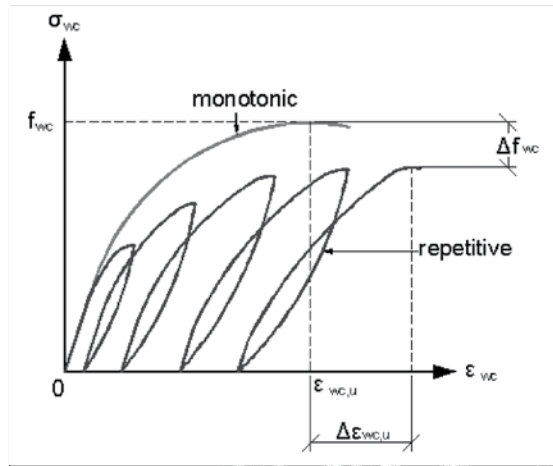


Fig. 10: Compression ripetitiva applicata fin dall'inizio del carico

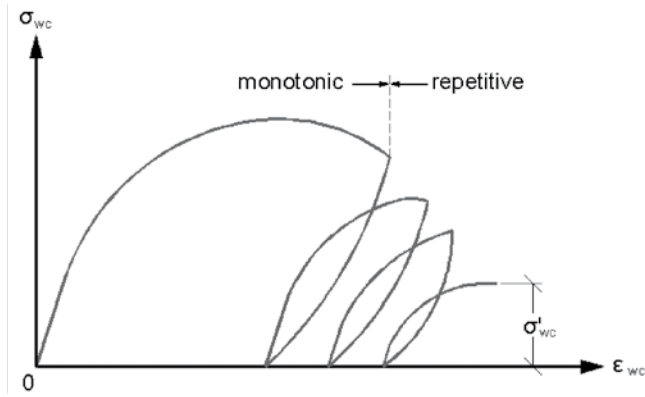


Fig. 11: Compression ripetitiva applicata dopo il collasso