

Prove sperimentali su campioni di varie dimensioni volte alla determinazione delle caratteristiche meccaniche delle vecchie murature

(Experimental tests on samples of various sizes for determining the mechanical characteristics of old masonry).

R.Mattone, G.Pasero, M.Pavano, G.Pistone, R.Roccati.

Istituto di Scienza delle Costruzioni - Facoltà di Architettura - Politecnico di Torino, Italia.

Sommario - Nel quadro generale di una ampia indagine sperimentale in corso da diversi anni, vengono descritte e commentate diverse prove di compressione su elementi in muratura originaria e ricostituita, intese a permettere una determinazione approssimata delle caratteristiche meccaniche delle vecchie murature.

Abstract - According a general research program in progress since 1978 authors illustrate and comment several compression tests on masonry elements, original or reassembled, aimed to establish, by inductive way, the mechanical characteristics of ancient masonry.

1. OBIETTIVI DELLA RICERCA

La presente comunicazione si colloca nel contesto di una ricerca più ampia che ha come obiettivi a lungo termine:

- a) studio delle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali componenti le vecchie costruzioni in muratura;
- b) indagine sul comportamento di singoli elementi strutturali;
- c) interpretazione del comportamento di insieme dei vecchi organismi murari.

Più in particolare, nell'ambito del punto a) è stata intrapresa una campagna di prove sperimentali su materiali provenienti da vecchie costruzioni allo scopo di portare contributi al chiarimento di alcuni aspetti fondamentali, fino ad ora non molto noti, concernenti le vecchie murature e nell'intento di rispondere ai seguenti quesiti:

- data la difficoltà di prelevare campioni indisturbati di medie ed anche di molte dimensioni da costruzioni esistenti, può portare utili indicazioni la confezione di saggi costituiti da mattoni recuperati e malte nuove al fine di valutare le caratteristiche meccaniche della muratura originale?
- in caso affermativo, quali malte è opportuno usare per riprodurre in modo adeguato le proprietà complessive della muratura originale?
- quali sono le malte contemporanee che meglio si adattano ai mattoni antichi, qualora si intenda reimpiegare questi ultimi nelle opere di consolidamento dei vecchi edifici?
- nel caso sia possibile prelevare campioni indisturbati, quali sono le dimensioni minime ed il numero minimo che permettono di stimare le caratteristiche reali della muratura in opera?
- quali relazioni si possono istituire tra campioni di diverse dimensioni al fine di valutare correttamente le caratteristiche della muratura?

2. DESCRIZIONE DELLA CAMPAGNA DI PROVE

2.1. Provenienza dei materiali

La campagna sperimentale in corso è condotta su materiali prelevati dall'edificio sede dell'ex Ospizio di Carità di Torino in occasione della ristrutturazione di un padiglione per l'insediamento del Centro di Calcolo C.S.I.

Il grandioso complesso, significativa espressione del razionalismo architettonico piemontese, fu progettato e costruito da C.Caselli (allievo di A.Antonelli) tra gli anni 1881 e 1887; esso è senza dubbio rappresentativo, sia per i materiali impiegati sia per la loro lavorazione, delle modalità costruttive delle strutture murarie in Piemonte alla fine del secolo XIX ⁽¹⁾ (v.figg. 1-2).

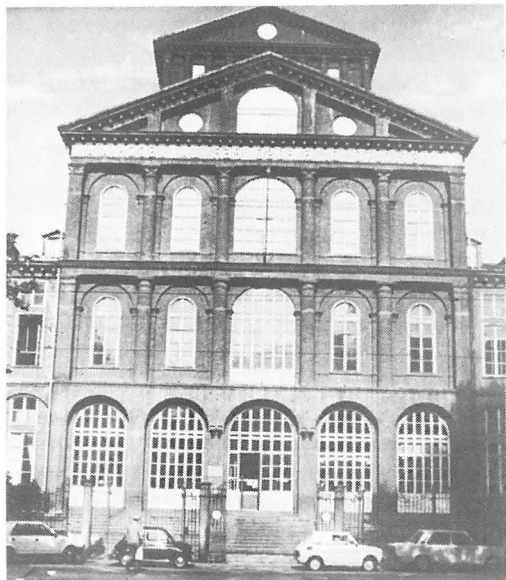


Fig.1 - Edificio sede ex
Ospizio di Carità di Torino

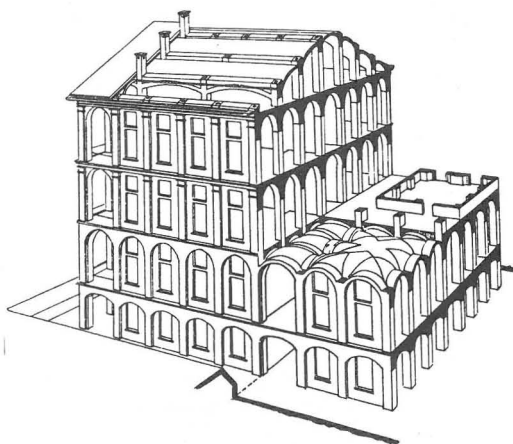


Fig.2 - Disegno assonometrico di
un padiglione tratto dal Milani (2)

2.2. Prove eseguite

Le indagini sperimentali finora eseguite riguardano:

- I)- n. 120 provini costituiti da cubetti di 5 cm di spigolo ricavati da mattoni originali [8]
- II)- n. 30 provini costituiti da mattoni originali [8]

(1) F.Rosso "L'Ing. Crescentino Caselli e l'Ospizio di Carità di Torino (1881-1887)" rivista "Atti e Rassegna Tecnica" della Società degli Ingegneri e degli Architetti in Torino, nn 4-5, 1979.

(2) La figura 2 è stata tratta da G.B.Milani "L'ossatura murale", Crudo ed. Torino, 1920.

III)- n. 3 muretti di muratura prelevati in situ di dimensioni circa 50x37 e spessore 11,5 cm (v. fig. 3)

IV)- n.15 muretti ricostruiti con mattoni originali e malte nuove di differente composizione; le dimensioni (50x37x11,5 cm) presentavano misure sensibilmente costanti, compatibilmente con i lati irregolari dei mattoni originali pressati a mano; lo spessore dei giunti era di 1 cm, le malte utilizzate erano di tre tipi:

- tipo A: malta ottenuta con calce di Casale in zolle spenta in laboratorio e confezionata nel rapporto calce:sabbia = 1:3;
- tipo B: malta ottenuta con le modalità di cui al punto precedente, ma con aggiunta del 7% in peso di cemento Portland, allo scopo di riprodurre il carattere debolmente idraulico dell'antica calce di Casale;
- tipo C: malta bastarda ottenuta con la calce di cui ai punti precedenti e cemento Portland, in rapporto calce:cemento:sabbia = 1 : 1 : 6.

Per ogni tipo di malta sono stati ricavati n. 5 provini da sottoporre a trazione e n. 5 provini da assoggettare a flessione e compressione.

3. MODALITA' DI PROVA

Mentre rimandiamo, per il commento alle indagini I e II a quanto già pubblicato dagli autori (vedesi riferimento bibliografico [8]) descriviamo e commentiamo in appresso le indagini sperimentali III e IV.

Osserviamo anzitutto che le prove relative sono state eseguite dopo due anni dalla confezione dei saggi al fine di permettere una completa maturazione delle malte caratterizzate da una presa estremamente lenta.

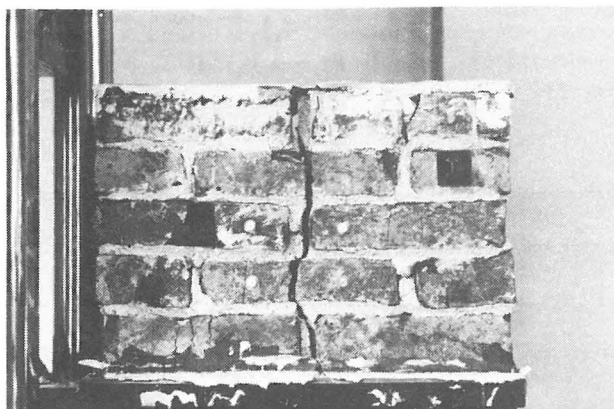
La macchina utilizzata è stata una pressa da 100 t. Per la valutazione delle deformazioni assiali dei muretti sono stati impiegati per ogni campione n. 4 deformometri meccanici centesimali utilizzando una base media di 140 mm; le deformazioni trasversali complessive di ogni campione sono state misurate con n. 2 deformometri meccanici centesimali applicati orizzontalmente in posizione centrale, utilizzando una base media di 470 mm; ulteriori quattro misurazioni delle deformazioni trasversali sono state compiute con estensimetri meccanici di tipo Staeger posti a cavallo dei giunti di malta (n. 2 basi da 100 mm) e sui mattoni (n. 2 basi da 100 mm); lo schema della strumentazione è riportato nei diagrammi delle figure 4-5-6-7.

Il comportamento dei campioni è stato studiato applicando il carico secondo cicli di intensità crescente, il che ha permesso:

- di distribuire i gradienti di carico nel tempo in analogia a quanto avveniva nelle vecchie costruzioni nelle quali, per il tipo di lavorazione, i carichi massimi venivano raggiunti in tempi lunghi, con probabili ridistribuzioni della situazione tensionale;
- di stimare il lavoro di deformazione plastica assorbito dalla muratura nei vari cicli;
- di distinguere entro i limiti apprezzabili per questo tipo di materiali, la fase essenzialmente elastica dalla fase elasto-plastica.

I gradienti di carico di ogni ciclo sono stati mediamente dell'ordine di 0,9 MPa fino al valore di circa 7 MPa; a tale tensione infatti venivano, di norma, a verificarsi fessurazioni tali da interessare in modo irreversibile il provino: pertanto, a partire da questo valore, si procedeva gradualmente fino a rottura senza ulteriori cicli di carico e scarico.

Fig.3- Muretto tipo
dopo rottura



4. I DATI RICAVATI E LA LORO ELABORAZIONE

La tabella n. 1 riporta i valori della tensione di rottura media dei provini per ciascuno dei tre tipi di malta impiegata.

La tabella n. 2 riporta i valori delle tensioni corrispondenti ai carichi di prima fessurazione ed ai carichi di rottura per ciascun saggio di muratura indisturbata e per i muretti ricostruiti; in essa sono pure evidenziate le tensioni medie corrispondenti e gli scarti quadratici medi.

Nelle figure 4-5-6-7 sono riportati i diagrammi tensione-deformazione per ciascun tipo di provino.

La figura 8 pone a confronto le curve medie tensione-deformazione per i tre tipi di muretto e per i muretti indisturbati.

La figura 9 pone a confronto i valori di deformazione residui a carico nullo in funzione dei cicli di carico.

Sono state inoltre ricavate le curve tensione - modulo di elasticità secante per ciascun tipo di provino (figure 10-11-12-13) confrontandone i valori medi nella figura 14.

La figura 15 pone infine a confronto le curve medie rappresentative tensione-modulo di elasticità tangente.

Tipo Malta	A	B	C
\bar{f}'_m [MPa]	4.7	5.8	9.8

Tab. 1 - Resistenze medie a rottura dei provini di malta

5. DISCUSSIONE

5.1. Tensione di rottura (Tabella n. 2)

L'esame dei risultati ottenuti denota una sostanziale corrispondenza del valore della tensione di rottura relativa ai muretti confezionati sia con malta del tipo A, sia con malta del tipo B; i muretti confezionati con malta del tipo C presentano invece un incremento di resistenza media, rispetto ai tipi A e B di circa il 35%.

(1)	Resistenza a fessurazione	Resistenza a rottura	Resist. media a fessurazione	Resist. media a rottura	Scarto a fessurazione	Scarto a rottura
	f'_f	f'	\bar{f}'_f	\bar{f}'	n	n
MURETTI CON MALTA TIPO A	5.1	8.5				
	7.1	8.9				
	5.8	10.0	6.0	9.5	1.0	0.9
	7.3	10.9				
	4.7	9.1				
MURETTI CON MALTA TIPO B	4.4	8.7				
	5.3	7.4				
	7.2	9.9	5.9	9.4	2.0	1.3
	3.6	11.2				
	9.0	9.9				
MURETTI CON MALTA TIPO C	7.1 (2)	10.7 (2)				
	8.9	12.4				
	10.4	12.3	10.1	12.9	0.7	1.3
	10.5	15.1				
	10.7	11.9				
CAMPIONI INDISTURBATI	6.3	9.4				
	5.2	- (3)	5.8	9.2	-	-
	-	9.0				

(1) Valori espressi in MPa

(2) Valori relativi ad un campione provato a 28 gg. dalla confezione (non utilizzati nel computo delle medie e degli scarti)

(3) Dato mancante

Tab. 2 - Confronto fra le resistenze di muretti confezionati con diversi tipi di malta e campioni indisturbati di muratura storica (dimensioni medie 50 x 37 cm e spessore 11,5 cm).

Gli scarti quadratici medi raggiungono il valore massimo per le malte tipo B e C di 1.3 MPa pari rispettivamente al 13.8% e al 10% delle resistenze medie a rottura; la dispersione dei valori è pertanto da ritenersi assai limitata.

Il confronto con i valori di resistenza relativi ai campioni indisturbati porterebbe a ritenere che - almeno nel caso in esame - permettano di simulare in modo soddisfacente, per quanto concerne la resistenza ultima, la muratura originale: in effetti la differenza fra i valori medi è rispettivamente di 0.3 e 0.2 MPa - pari al 2,1% e al 3,1%.

Ulteriori elementi di giudizio possono essere desunti dalle prove a suo tempo effettuate sui campioni di mattoni storici interi o su cubetti ricavati dagli stessi (vedasi riferimento [8]).

Per le serie di mattoni interi (a facce spianate con malta di cemento) erano stati ricavati valori medi della tensione di rottura pari a $\bar{f}'_b = 26.4$ MPa (scarto 6.9 MPa): per i cubetti di 5 cm di lato ricavati da mattoni della stessa provenienza i valori medi ricavati erano pari a $\bar{f}'_b = 25$ MPa (scarto 8,9 MPa).

Sulla scorta di queste serie di prove gli sperimentatori avevano ritenuto di poter dedurre - sia pure con tutte le cautele del caso - che il tipo di provino non avesse una rilevante influenza sulla determinazione della resistenza del materiale in esame.

Pertanto, anche in presenza di scarti quadratici medi sensibili dei valori di base sopradetti, si è ritenuto che la ridistribuzione delle tensioni in un provino di muratura potesse giocare un ruolo di compensazione nei riguardi dei

valori stessi: pertanto è stato giudicato interessante ricavare per via teorica le resistenze a rottura sulla base delle formule proposte da diversi studiosi [1] e [5] per poter effettuare un confronto con i dati sperimentali ottenuti (tabella 3).

Autori	Guidi	Suenson e Dührkop	Ekblad
A	9.0	8.9	10.7
B	9.4	9.3	11.8
C	10.6	10.6	16.6

Tab. 3 - Resistenze a rottura calcolate teoricamente utilizzando le resistenze medie di rottura di malta e mattoni (valori espressi in MPa).

Le formule proposte da Guidi e Suenson-Dührkop appaiono approssimare in forma soddisfacente i valori ricavati sperimentalmente per i provini confezionati con le malte A,B; mentre appaiono conservative per quelli confezionati con malta di tipo C; la formula di Ekblad per contro appare approssimata per eccesso per tutti i tipi di provini. [1] [5]

5.2. Tensione di fessurazione

Anche per quanto concerne la tensione di prima fessurazione i provini confezionati con malta di tipo A e B sono sostanzialmente analoghi, con un incremento del 70% per la malta di tipo C.

Gli intervalli tra la tensione di fessurazione e la tensione di rottura sono assai più consistenti nel caso delle malte A e B (3.5 MPa) che nel caso della malta di tipo C (2.8 MPa); la riserva di resistenza dopo la fessurazione risulta, comunque mediamente alta, pari, rispettivamente, al 60% della tensione di fessurazione per le malte di tipo A e B e al 28% circa per la malta di tipo C.

Gli scarti quadratici medi alquanto contenuti nei muretti di tipo A e B (1 MPa pari al 17% circa di f'_f per la malta di tipo A) si elevano a 2 MPa per la malta di tipo C.

Il confronto con i campioni di muratura indisturbata dimostra ancora una sostanziale analogia tra le murature di tipo A e B e quella originale, con differenze molto contenute.

5.3. Relazione tensione deformazione

L'esame dei diagrammi dimostra che l'applicazione di cicli di carico incrementati fino a rottura non comporta sostanziali anomalie nella curva involucro tensione-deformazione e permette di apprezzare il lavoro di deformazione plastica assorbito ad ogni ciclo (v. figg. 4-5-6-7).

Dal confronto tra le curve medie tensione-deformazione, le rigidità appaiono crescere in funzione del tipo di malta ($A < B < C$): per altro, mentre le curve A e B non si discostano molto fra loro nella forma e nei valori, la curva C de-

nota una rigidezza della muratura decisamente superiore sia per l'andamento che per i valori estremi raggiunti.

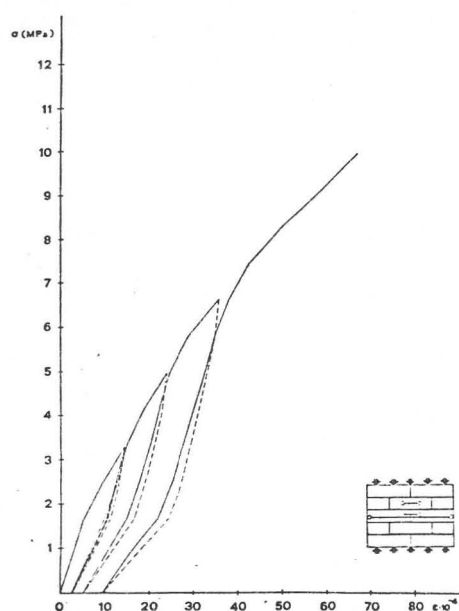


Fig. 4 - Diagramma tensione-deformazione di un campione (malta tipo A)

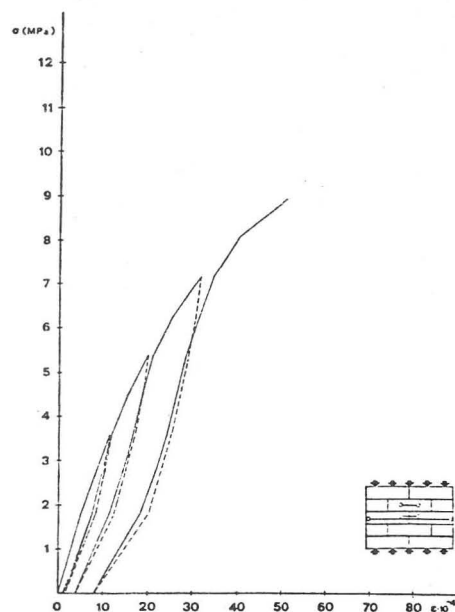


Fig. 5 - Diagramma tensione-deformazione di un campione (malta tipo B)

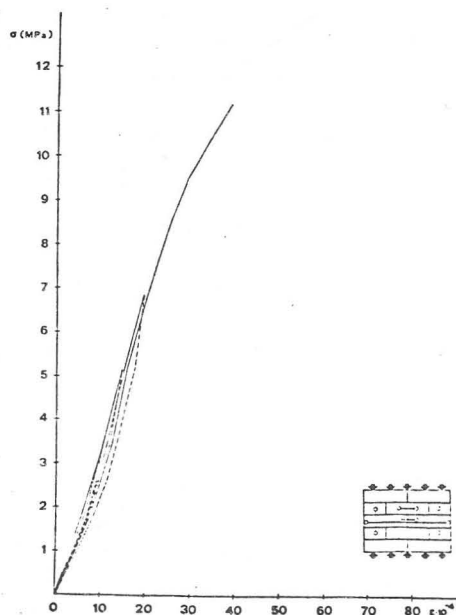


Fig. 6 - Diagramma tensione-deformazione di un campione (malta tipo c)

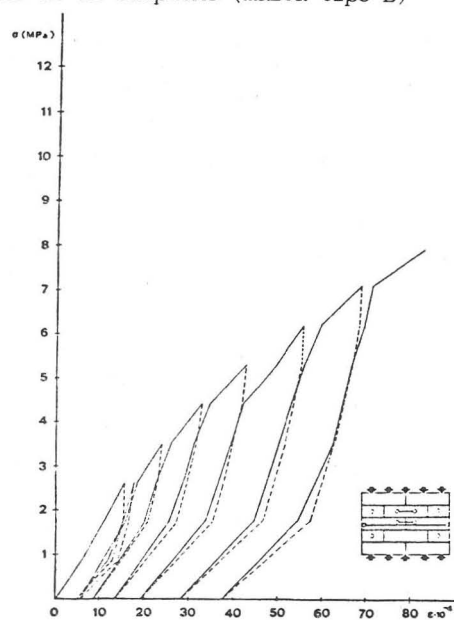


Fig. 7 - Diagramma tensione-deformazione di un campione (muratura indisturbata)

Il confronto di questi diagrammi con quello relativo alla muratura indisturba dimostra come le murature ottenute con malte nuove siano, in ogni caso, assai più rigide della muratura originale: è da osservare, tuttavia, come in queste ultime il valore degli assestamenti anelastici iniziali risulti assai più rilevante (v. figg. 8-9).

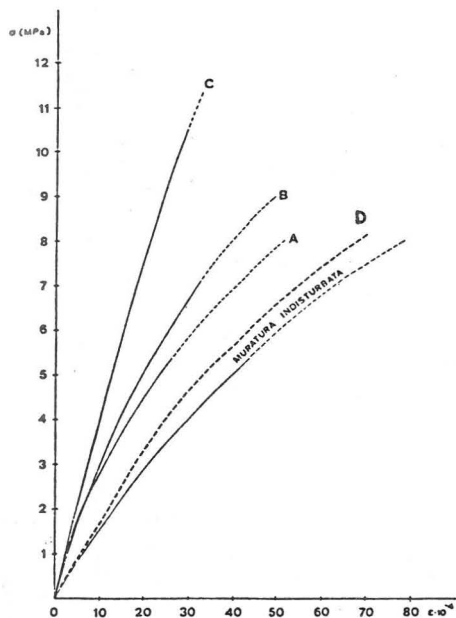


Fig. 8 - Confronto tra le curve tensione-deformazione

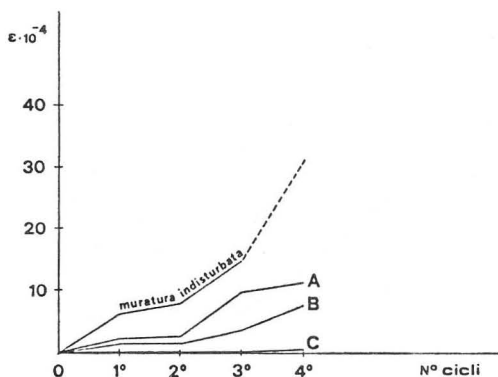


Fig. 9 - Confronto fra le deformazioni residue a carico nullo in funzione del numero dei cicli.

Depurando la curva dagli assestamenti anelastici verificatisi nel primo ciclo è stata ricavata una curva D (indicata col tratteggio in fig. 8) che maggiormente si approssima alla curva A.

5.4. Modulo elastico

Il modulo di elasticità secante è risultato funzione decrescente della tensione applicata: nel caso delle malte A e B la variazione totale è stata consistente (rispettivamente una contrazione del 55% e del 42% circa); nel caso della malta C essa si è ridotta all'8% (v. figg. 10-11-12-13-14-15).

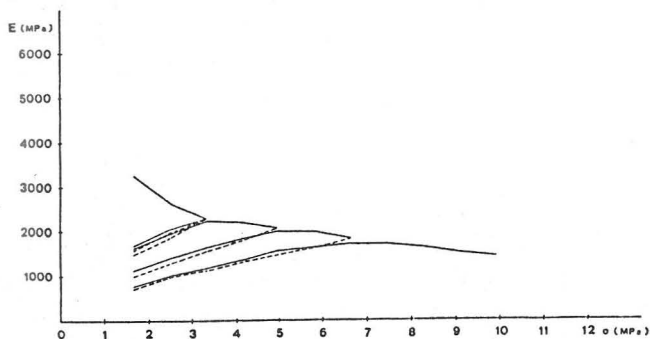


Fig. 10 - Diagramma del modulo elastico secante di un campione in funzione della tensione applicata (malta tipo A).

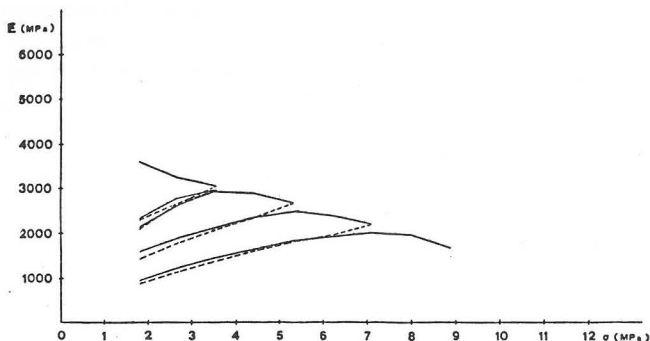


Fig.11- Diagramma del modulo elastico secante di un campione in funzione della tensione applicata (malta tipo B).

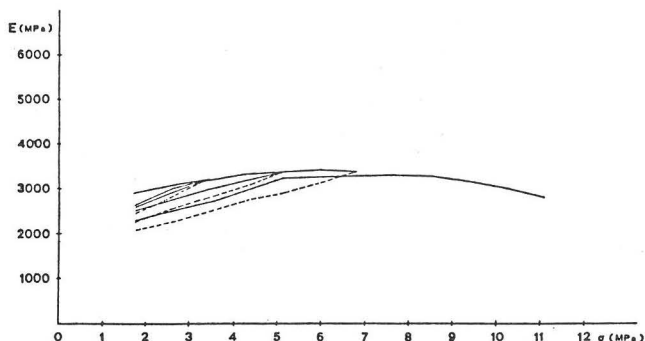


Fig.12 - Diagramma del modulo elastico secante di un campione in funzione della tensione applicata (malta tipo C).

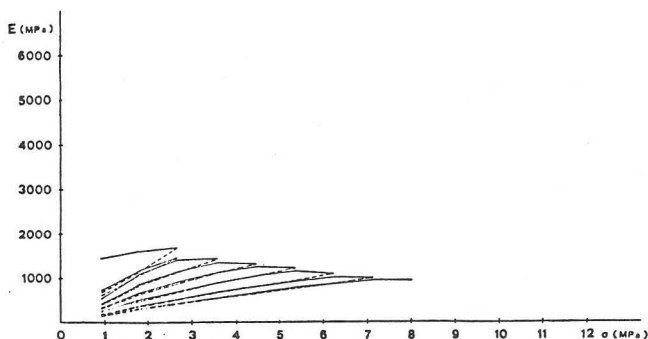


Fig.13 - Diagramma del modulo elastico secante di un campione in funzione della tensione applicata (muratura indisturbata).

Per quanto riguarda la curva relativa ai campioni di muratura indisturbata, può ripetersi quanto detto al punto 5.3: l'abbassamento del modulo elastico è incrementato dall'effetto degli assestamenti iniziali anelastici; la curva depurata di tali assestamenti è riportata in tratteggio nella fig. 14 (curva D).

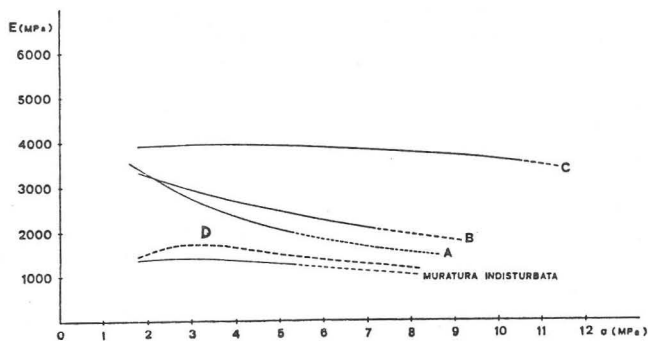


Fig. 14 - Confronto tra le curve rappresentative modulo elastico secante - tensione applicata.

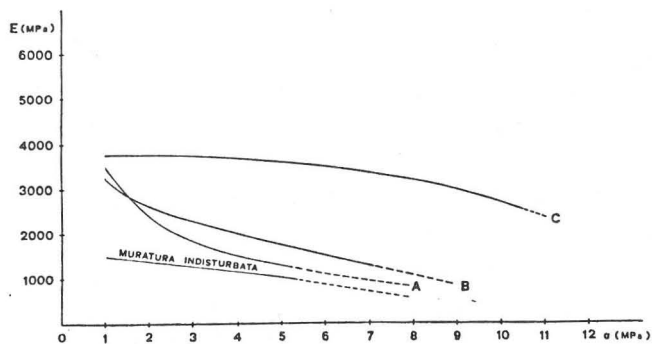


Fig. 15 - Confronto tra le curve rappresentative modulo elastico tangente - tensione applicata.

6. CONCLUSIONI

a) La tensione media di rottura non assume valori sostanzialmente differenti per i provini di muratura confezionati con malta A e B, mentre si ha un aumento del 35% nel caso di malta C; le dispersioni risultano contenute in tutti i casi.

b) La tensione media di fessurazione risulta praticamente coincidente per le malte di tipo A e B e pari al 64% circa della tensione di rottura; per la malta di tipo C essa è del 78% circa; a fronte di un incremento di resistenza si ha pertanto un comportamento più fragile della muratura in quest'ultimo caso.

c) La muratura originale risulta ben rappresentata, sia nei riguardi della tensione di fessurazione che della tensione di rottura, dai provini confezionati con le malte A e B.

d) La resistenza ultima della muratura originale può essere perciò scandagliata con una certa approssimazione a mezzo di prove su campioni confezionati con mattoni originali legati da malte tipo A e B.

Del pari si può giungere a buoni risultati orientativi per via teorica, grazie alle formule di Guidi e Suenson - Dührkop utilizzando i dati di base relativi ai mattoni originali e dalle malte di tipo A e B.

e) Le curve tensione-deformazione mostrano rigidzze crescenti per i provini A,B,C; la curva tensione -deformazione dei provini di malta A risulta inoltre la più prossima, sia pure per difetto, alla curva tensione-deformazione della muratura originale.

f) I moduli elastici secanti risultano funzione decrescente della tensione applicata; le riduzioni più consistenti riguardano i provini di malta A (55%) e B (42%) mentre per la malta C si ha solamente l'8%.

g) Agli effetti della determinazione della resistenza di fessurazione e di rottura le malte A e B si dimostrerebbero adeguate, mentre agli effetti del comportamento complessivo della muratura risulterebbe più adatta la malta A. Quanto alla malta C è evidente il suo effetto positivo nei riguardi delle caratteristiche meccaniche dei provini: peraltro la maggior rigidzza che essa offre sul piano deformazionale ne consiglia un uso cautelativo quando sia di primaria importanza la congruenza del comportamento elasto-plastico tra murature originali e ricostruite.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il prof. Giacomo Donato per aver gentilmente offerto la possibilità di prelievo dei materiali da sottoporre a prova.

BIBLIOGRAFIA

- [1] - S.Sahlin "Structural masonry" - Prentice-Hall, Inc. New Jersey 1971.
- [2] - H.R. Hodgkinson, B.Powell, H.W.H. West, "The design of a Wall-testing Machine and Comparative Tests". Proc. of the British Ceramic Society, 11, July 1968.
- [3] - M.E.C., Stedham, "Quality Control for Load-bearing Brickwork- II. 9-in. Cube Tests: Further Results", Proc. of the British Ceramic Society, 4, July 1965.
- [4] - D.G.Beech, "The Concept of Characteristic Strength", Proc. of the British Ceramic Society, 27, December 1978.
- [5] - F.Laner, "Contributo alla conoscenza della resistenza di base delle murature in laterizio in funzione della qualità della malta e dei mattoni", L'Industria Italiana dei Laterizi, n. 3 - 1977.
- [6] - A.Bernardini, C.Modena, V.Vescovi, "Ricerca sperimentale sui parametri di resistenza e deformabilità di murature in laterizio normale e alveolato". Costruire n. 109 - 1978.
- [7] - F.Zago, "Ricerche sperimentali su murature del Centro Storico veneziano" - Atti del II° Corso di informazione A.S.I.R.C.CO "Il restauro delle costruzioni in muratura" - Venezia, 21-22-23 maggio 1980.
- [8] - R.Mattone, G.Pasero, G.Pistone, R.Roccati, "On the Possibility of Reusing Old Masonry" - Vth International Brick Masonry Conference, 5-10 Ottobre, 1979 - Washington.

- [9] - "International Recommendations for Masonry Structures" CIB-Publication 58 of Working Commission W23A Load Bearing Walls.
- [10] "Raccomandazioni per la progettazione ed il calcolo delle costruzioni a mu ratura portante in laterizio" - ANDIL, Sezione murature in laterizio, maggio 1981.