

## **Ricerche sperimentali sulla resistenza e deformabilità, per sollecitazioni nel piano, di pareti di muratura ordinaria**

(An experimental research on the resistance and deformability of ceramics bricks masonry walls)

A. Bernardini, C. Modena, U. Vescovi

Istituto di Costruzioni, Ponti e Strade, Università di Padova, Italia

Sommario - Il programma di prove sperimentali è indirizzato alla determinazione di dati concernenti la resistenza e deformabilità di murature non armate, sollecitate nel proprio piano, con particolare riguardo a:

- a) confronto fra pannelli confezionati con blocchi di laterizio normale o alveolato;
- b) influenza dell'anisotropia e della disomogeneità sulla resistenza per stati biassiali di sollecitazione;
- c) confronto fra tipi diversi di prove per la determinazione della resistenza alle azioni orizzontali.

Abstract - The experimental program was addressed to determine the influence of some important parameters on the resistance and deformability of plain masonry walls, subjected to forces acting in the middle plane.

The following aspects have been investigated:

- a) the comparison between walls assembled using normal or lightweight ceramic units;
- b) the influence of anisotropic or not-homogeneous masonry characteristics;
- c) the comparison between different test methods to determine the resistance to horizontal forces.

### 1. INTRODUZIONE

Presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Padova, è in corso da alcuni anni una ricerca basata su un esteso programma di indagini sperimentali, sul comportamento di strutture a pareti portanti di muratura sottoposte a rilevanti azioni orizzontali di origine sismica.

Tale ricerca si è sviluppata, fino ad oggi, prevalentemente nel campo della muratura ordinaria.

Il particolare interesse per questo sistema costruttivo è apparso ampiamente giustificato dal suo diffuso impiego, in Italia, anche nelle costruzioni in zone soggette ad elevato rischio sismico, e dalla difficoltà di eseguire correttamente controlli sul loro livello di sicurezza in mancanza di adeguate conoscenze sperimentali.

Il primo obiettivo delle indagini svolte, è stato infatti la determinazione dei valori caratteristici della resistenza e della deformabilità di pannelli murari, ai quali far riferimento nelle verifiche di sicurezza degli interventi di riparazione e rinforzo degli edifici di muratura lesionati da terremoti.

Notevole importanza si attribuisce, inoltre, alla possibilità di eseguire, sulla base dei dati raccolti, analisi dinamiche di edifici a muratura portante, al fine di ottenere indicazioni attendibili circa l'entità delle azioni orizzontali prevedibili in relazione ad eventi sismici di data intensità.

Infine, si ritiene che la conoscenza delle caratteristiche meccaniche di base della muratura ordinaria costituisca un supporto indispensabile per lo studio della muratura armata.

La ricerca in questo campo sarà sviluppata a Padova nell'ambito di un programma coordinato dall'ANDIL, finalizzato alla introduzione in Italia di sistemi costruttivi a muratura armata nelle zone di media e alta intensità sismica, in particolare con riferimento ai sistemi ad armatura "diffusa" con l'impiego di blocchi con foratura verticale, di bassa resistenza meccanica ed elevata resistenza termica.

## 2. OBIETTIVI DELLA RICERCA

Le prove sono state condotte su quattro gruppi di provini, allo scopo di indagare, rispettivamente, sui seguenti problemi:

- 1- confronto fra le caratteristiche meccaniche di resistenza e deformabilità del materiale base e di pannelli sollecitati nel proprio piano, composti con blocchi forati di laterizio normale ed alleggerito /1/, /2/;
- 2- confronto fra tre diversi metodi di prova a rottura per taglio di pannelli, composti ancora con i due tipi di materiale indicati, in relazione alla determinazione dei valori di resistenza, deformabilità e stabilità a cicli ripetuti di carico /2/, /3/;
- 3- effetti dell'anisotropia e della disomogeneità sulla resistenza per stati di tensione biassiale /4/;
- 4- influenza dell'apparecchiatura ad una o due teste sulle caratteristiche di resistenza e deformabilità /5/.

## 3. PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEI MATERIALI IMPIEGATI

Sono stati impiegati blocchi forati di laterizio normale, nel formato doppio UNI, e blocchi forati di laterizio alveolato (alleggerito in pasta) aventi le seguenti caratteristiche:

Pannello tipo :	A	P
Blocchi laterizio	Normale	Alveolato
Dimensioni medie	12 x 25 x 11 cm	19.5 x 41 x 25 cm
Percentuale di foratura	41.5%	40.1%
Densità apparente <sup>1</sup>	104 kg/dm <sup>3</sup>	0.76 kg/dm <sup>3</sup>
Resistenza meccanica sull'area lorda		
... valore medio	24.7 MPa	9.1 MPa
... valore caratteristico	20.7 MPa	8.4 MPa

Tab. 1 - Caratteristiche dei blocchi impiegati

Ai primi tre gruppi di provini appartenevano pannelli di muratura ad una testa (complessivamente 44 confezionati con blocchi doppio UNI e 44 con blocchi alleggeriti), dei quali sono riportate in Fig. 1a) e 1b) le caratteristi-

che geometriche. Alcuni provini del terzo gruppo sono stati sagomati opportunamente per consentire l'applicazione di carichi concentrati inclinati rispetto ai letti di malta.

I provini del quarto gruppo (24 complessivamente), le cui caratteristiche geometriche sono riportate in Fig. 1c) e 1d), erano confezionati con blocchi doppio UNI.

#### 4. DESCRIZIONE DELLE PROVE ESEGUITE SUI PANNELLI

Sono state eseguite prove a rottura, con rilevazione delle deformazioni, secondo le seguenti modalità /1/, /2/, /4/, /5/.

##### A- Compressione uniforme (UC Test):

I provini sono stati sottoposti prevalentemente a carichi nella direzione della foratura; due provini appartenenti al terzo gruppo sono stati portati a rottura per carico nella direzione ortogonale.

##### B- Compressione concentrata:

sono stati applicati cicli di carico concentrato di compressione secondo la direzione di una diagonale (B Test) e secondo direzioni inclinate di 45°, 60°, 90° rispetto alla giacitura dei letti di malta.

##### C- Spinta orizzontale:

C<sub>1</sub> - sono stati applicati cicli di carico unidirezionale secondo le modalità illustrate in Fig. 2a) (S Test), o bidirezionale secondo le modalità illustrate in Fig. 2b) (IS Test), e variabile lentamente, a carico verticale pressochè costante;

C<sub>2</sub> - sono stati applicati cicli di carico orizzontale, a carico verticale pressochè costante, ottenuti mediante l'imposizione di cicli sinusoidali, di ampiezza crescente, di deformazione imposta con frequenza prossima a quelle predominanti nelle azioni sismiche (1 Hz); di queste prove, eseguite presso il laboratorio ZRMK di Lubiana, risultano particolarmente interessanti, oltre alla possibilità di scegliere la frequenza dei cicli e di imporre la deformazione, la costanza del carico verticale e la simmetria delle condizioni di vincolo delle facce caricate (D Test), Fig. 2c).

#### 5. PRINCIPALI RISULTATI DELLE PROVE ESEGUITE

La sperimentazione, svolta su un numero sufficiente di provini per consentire alcune significative elaborazioni statistiche, ha fornito utili indicazioni sul comportamento dei pannelli murari confezionati con materiali che trovano grande diffusione in Italia.

Nelle Figg. 3a), b), c), d), e), f) sono riportati diagrammi tipici carico-spostamento fino a rottura per ogni tipo di prova eseguita.

Alcune utili osservazioni sugli effetti dell'anisotropia, delle fessurazioni e degli scorrimenti sono state ottenute confrontando il comportamento reale, definito anche attraverso misure locali di deformazione, con quello di modelli elastici lineari /1/, /2/.

##### 5.1 Prove a spinta

La ricerca ha evidenziato la possibilità di ricorrere a prove relativamente semplici, del tipo descritto ai punti B e C<sub>1</sub> del §4, per determinare i parametri di resistenza e deformabilità per sollecitazioni taglianti nel piano del-

le pareti murarie, come si può dedurre dall'analisi dei risultati delle prove eseguite ("B Test", "S Test", "D Test").

Assumendo infatti come parametro caratteristico della resistenza la tensione principale di trazione  $\sigma_n$  al centro del pannello /6/, supposto di materiale elastico, isotropo ed omogeneo, in condizioni di appoggio unilaterali sulle facce superiore ed inferiore /3/, si può osservare (Tab. 2) che la dispersione dei valori corrispondenti, per ciascun tipo di materiale, alle tre prove, risulta dell'ordine della variabilità statistica ( $\approx 10\%$ ) dei risultati rilevati per ciascuna prova.

I risultati mostrano inoltre una sostanziale coincidenza delle curve inviluppo (H- $\delta$ ) di cicli unidirezionali lenti (S Test) e delle curve dei massimi valori di H associati ai livelli prefissati di spostamento  $\delta$ , nei cicli bidirezionali con frequenza pari ad 1 Hz (D Test), e 5 ripetizioni per ogni livello di spostamento imposto.

Sono risultati inoltre confrontabili, dell'ordine del 10%, per livelli di spinta fino a  $\approx 2/3$  della massima, i valori del coefficiente di damping viscoso equivalente (assunto come parametro caratteristico della capacità di assorbimento di energia durante cicli ripetuti di carico) valutati nel D Test e IS Test.

$$\frac{\sigma_n}{\sigma_0} = -\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{(\tau_0/\sigma_0)^2}{4}} \quad b = 1541 - 8470 \left(\frac{E_A}{E_0}\right)$$

PANNELLI DI LATERIZIO DOPPIO UNI							
GRUPPI DI PANNELLI	D TEST			S TEST			B TEST
	$\sigma_0$	$\tau_0$	$\sigma_n$	$\sigma_0$	$\tau_0$	$\sigma_n$	$\sigma_n$
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
I	0,85	0,98	0,48				0,45
	0,73	0,80	0,43				0,40
	0,71	0,58	0,40				0,48
	$\bar{x}_I$ 0,43						
II	1,50	0,78	0,52	1,85	0,78	0,50	
	1,50	0,80	0,52	1,41	0,67	0,42	
	1,50	0,73	0,47	1,36	0,59	0,36	
	$\bar{x}_{II}$ 0,50			$\bar{x}_{II}$ 0,43			
III				2,32	0,80	0,44	
				2,32	0,78	0,42	
				2,54	0,91	0,51	
				$\bar{x}_{III}$ 0,46			
IV				3,44	1,08	0,97	
				3,37	1,03	0,53	
				3,10	1,02	0,55	
				$\bar{x}_{IV}$ 0,55			
$\bar{x}_D = 0,47$				$\bar{x}_S = 0,49$ $\bar{x}_B = 0,45$			
$S = 0,050$				$S = 0,076$ $S = 0,043$			
$V = 0,10$				$V = 0,16$ $V = 0,10$			

PANNELLI DI LATERIZIO ALVEOLATO							
GRUPPI DI PANNELLI	D TEST			S TEST			B TEST
	$\sigma_0$	$\tau_0$	$\sigma_n$	$\sigma_0$	$\tau_0$	$\sigma_n$	$\sigma_n$
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
I	0,44	0,41	0,28	0,40	0,40	0,27	0,22
	0,46	0,37	0,26	0,47	0,39	0,27	0,26
	0,46	0,41	0,28	0,39	0,39	0,27	0,27
	$\bar{x}_I$ 0,27			$\bar{x}_I$ 0,27			
II	0,84	0,46	0,30	0,81	0,38	0,22	
	0,84	0,49	0,33	0,87	0,38	0,23	
	0,84	0,49	0,33	0,84	0,44	0,28	
	$\bar{x}_{II}$ 0,32			$\bar{x}_{II}$ 0,25			
III				1,29	0,46	0,26	
				1,39	0,49	0,27	
				1,47	0,55	0,32	
				$\bar{x}_{III}$ 0,28			
IV							
$\bar{x}_D = 0,30$				$\bar{x}_S = 0,27$ $\bar{x}_B = 0,25$			
$S = 0,027$				$S = 0,028$ $S = 0,028$			
$V = 0,09$				$V = 0,10$ $V = 0,11$			

Parametri statistici  
dei risultati (D+S+B)

$\bar{x} = 0,47$   $S = 0,057$   $V = 0,12$

$\bar{x} = 0,27$   $S = 0,031$   $V = 0,11$

Tab. 2 - Riassunto dei valori di resistenza al taglio.

## 5.2 Prove a compressione

I risultati delle prove a compressione uniforme in direzione parallela e ortogonale ai fori (Fig. 4), e delle prove a compressione concentrata, hanno

consentito di individuare l'effetto dell'anisotropia, collegata alla presenza dei giunti di malta e alla foratura dei blocchi in percentuale elevata, sulla resistenza per stati di tensione biassiale.

Le prove hanno dimostrato come tale effetto non sia riducibile alla sola variazione delle caratteristiche geometriche ma dipenda anche dalle diverse modalità del meccanismo di deformazione e di rottura, che, nel caso di compressione normale ai fori, comporta distacchi fragili delle cartelle esterne (Fig. 5)?

Nella Fig. 6 sono riportati i valori della massima tensione principale di trazione, rilevati nelle prove di compressione concentrata, al variare dell'inclinazione  $\alpha$  dei letti di malta rispetto alla direzione dello sforzo applicato.

Come si può osservare, tale parametro cresce sensibilmente con  $\alpha$ , come già rilevato da altri autori su muratura piena /7/ o con fori iniettati /8/, /9/.

In Fig. 7 sono indicate le modalità per la rappresentazione semplificata di un possibile campo di resistenza, utilizzando i risultati sperimentali relativi a 4 prove: 2 a compressione uniforme (ad es. parallela e normale ai fori) e 2 a compressione concentrata (ad es. a  $90^\circ$  e  $45^\circ$  rispetto ai letti di malta).

Si sono usate le seguenti ipotesi semplificative: a) variazione lineare con  $\alpha$  della tensione principale di compressione e delle rette poste a limitazione del campo per stati biassiali con tensioni principali di segno opposto; b) resistenze per stati biassiali con tensioni principali dello stesso segno pari a quelle negli stati monoassiali corrispondenti.

La rappresentazione, data la sua semplicità, potrebbe essere utilizzata come criterio di sicurezza per le murature, basato sulla limitazione della tensione principale di trazione tenendo conto dell'anisotropia del materiale.

Il criterio può, ad esempio, essere applicato allo stato di tensione al centro di un pannello (ove si innesca la rottura per taglio) nelle condizioni di carico e di vincolo previste dalle prove descritte ai punti  $C_1$  e  $C_2$  del § 4, al fine di valutarne la resistenza come indicato nel § 5.1.

Nella Fig. 8 vengono riportati i risultati dell'applicazione dei tre seguenti criteri di sicurezza /4/:

- I) limitazione delle massime tensioni principali di compressione e di trazione dedotte rispettivamente dalla prova di compressione uniforme e di compressione concentrata a  $45^\circ$ ;
- II) limitazione, indipendente dall'inclinazione dei giunti, di una combinazione lineare delle stesse;
- III) limitazione, con coefficienti dipendenti linearmente dalla inclinazione dei giunti, utilizzando i risultati di 4 prove secondo il criterio sopra esposto.

Le teorie I e II non consentono una descrizione accurata delle condizioni di rottura in stato biassiale, per tutto il campo dei rapporti fra le tensioni principali, per muratura fortemente anisotropa, in particolare per quella realizzata con blocchi ad alta percentuale di foratura non iniettati.

Ciò è soprattutto evidente nel caso di tensioni principali dello stesso segno ma può essere rilevante anche per la valutazione della resistenza a taglio nel caso di forte carico verticale.

Come sembra indicare anche la Tab. 2, la riduzione, al crescere del carico verticale, dell'angolo fra la tensione principale di compressione a rottura e la direzione di foratura, comporta un certo aumento della resistenza.

La teoria III permette inoltre di meglio simulare, con procedure di calcolo ad elementi finiti non lineari, le leggi costitutive della muratura.

### 5.3 Influenza dell'apparecchiatura ad una o due teste

Il confronto fra pannelli ad una e due teste ha messo in rilievo una diminuzione di resistenza e rigidità di questi ultimi in tutte le prove eseguite.

Ciò appare, ad esempio, nella Tab. 3 ove sono riportati i valori medi della resistenza a compressione uniforme, della massima tensione principale di trazione calcolata al centro del pannello per le prove di compressione concentrata con carico parallelo ai fori o diagonale e per le prove a spinta.

Tipo di prova	Compressione			Prova a spinta
	uniforme (UC Test)	diagonale	concentrata ( $\alpha = 90^\circ$ )	
Apparecchiatura	$\sigma_o$ (MPa)	$\sigma_n$ (MPa)	$\sigma_{pt}$ (MPa)	$\sigma_n$ (MPa)
una testa	7,22	0,38	0,47	0,52
due teste	5,46	0,24	0,32	0,47
diminuzione di resistenza	24 %	38 %	32 %	11 %

Tab. 3 - Confronto fra i valori medi della resistenza per i due tipi di apparecchiatura.

Tale fatto non trova generalmente riscontro nelle normative nazionali o internazionali (CIB) salvo poche eccezioni /10/ e indica la necessità di un approfondimento dell'influenza, sul meccanismo di rottura, del numero e della disposizione dei giunti e delle dimensioni dei blocchi relativamente alle dimensioni dei muri.

### 5.4 Parametri di deformabilità

Per quanto riguarda la deformabilità, i dati sperimentali indicano una fase iniziale sostanzialmente elastica, seguita da una fase caratterizzata da crescenti scorrimenti e distacchi dei giunti di malta e fessurazioni dei blocchi, particolarmente significativa nel caso di presenza di tensioni tangenziali agenti sul piano dei giunti di malta.

La prima fase può essere schematizzata con il comportamento di un pannello linearmente elastico, isotropo ed omogeneo, assumendo opportuni valori delle costanti elastiche.

Tali valori risultano peraltro diversi per stati di tensione diversi. In particolare, ad esempio, il modulo tangenziale  $G$  per stati di tensione composti da rilevanti tensioni tangenziali sul piano dei giunti di malta, risulta nettamente inferiore a quello deducibile teoricamente attraverso la misura di  $(E, \nu)$  nelle prove di compressione uniforme in direzione parallela ai fori /3/.

## 6. CONCLUSIONI

La conoscenza sempre più ampia di dati affidabili sulla resistenza e deformabilità delle diverse tipologie di muratura, consente la messa a punto di metodi di controllo della sicurezza, basati sull'analisi strutturale, anche degli edifici a pareti portanti in muratura.

Tale fatto è particolarmente importante in Italia, dove manca ancora una normativa tecnica ufficiale per le costruzioni in muratura, sia nelle zone sismiche che in quelle non sismiche.

Dalla ricerca sopra esposta sono emerse indicazioni circa la opportunità di ulteriori approfondimenti relativi all'influenza, sulla resistenza e deformabilità delle dimensioni dei blocchi, nonché dell'apparecchiatura.

La ricerca ha inoltre evidenziato alcuni aspetti sulla collaborazione fra i materiali di base, sui meccanismi di deformazione e rottura, che consentono di orientare le future ricerche sulla muratura armata verso soluzioni che portino ad un reale miglioramento delle prestazioni, aumentando la resistenza e soprattutto riducendo i pericoli di rottura fragile.

Tale tecnologia, già largamente impiegata in molti paesi soprattutto per murature di blocchi di calcestruzzo iniettati o anche di laterizio di alta e media resistenza, sembra la soluzione più adeguata per i moderni edifici in muratura, soprattutto nelle zone ad alto rischio sismico.

Un rilevante e rapido sviluppo in Italia di tale tecnologia sembra però possibile solo con l'utilizzazione di blocchi di laterizio ad alta percentuale di foratura (e quindi elevata coibenza termica) e resistenza relativamente bassa, attualmente prodotti in Italia ed impiegati nella ricerca esposta.

#### BIBLIOGRAFIA

- / 1/ A. Bernardini, C. Modena, U. Vescovi, "Ricerca sperimentale sui parametri di resistenza e deformabilità di murature in laterizio normale e alveolato", Costruire, n. 109 1978.
- / 2/ Idem, II parte, Costruire, n. 114, 1979.
- / 3/ A. Bernardini, C. Modena, V. Turnšek, U. Vescovi, "A comparison of three laboratory test methods to determine the shear resistance of masonry walls", Proc. VII WCEE, vol. VII, Istanbul 1980.
- / 4/ A. Bernardini, G. Nardi, "Analisi sperimentale su un criterio di rottura per muratura soggetta a stati di tensione biassiali, con tensioni principali di segno opposto". R.I. Istituto di Costruzioni, Ponti e Strade, Padova 2/1981
- / 5/ A. Bernardini, G. Nardi, U. Vescovi, "L'Influenza dell'apparecchiatura ad una o due teste sulla resistenza di pannelli murari", R.I. Istituto di Costruzioni, Ponti e Strade, Padova 1981.
- / 6/ V. Turnšek, F. Čačovič, "Some experimental results on the strength of brick masonry walls", Proc. SIBMAC, London 1971.
- / 7/ F.B. Johnson, J.N. Thompson, "Development of diametral testing procedures to provide a measure of strength characteristics of masonry assemblages", Proc. First Int Conf. on Masonry Struct. Systems, Austin, 1967.
- / 8/ R.G. Drysdale, A.A. Hamid, A.C. Heidebrecht, "Tensile strength of concrete masonry", Proc. ASCE, v. 105, ST7, 1979.
- / 9/ G.A. Hegemier, R.O. Nunn, S. K. Arya, "Behavior of concrete masonry under biaxial stresses", Proc. North American Masonry Conf. Boulder, 1978.
- / 10/ British Standards Institution "Code of practice for structural masonry, Part. 1, Unreinforced masonry."



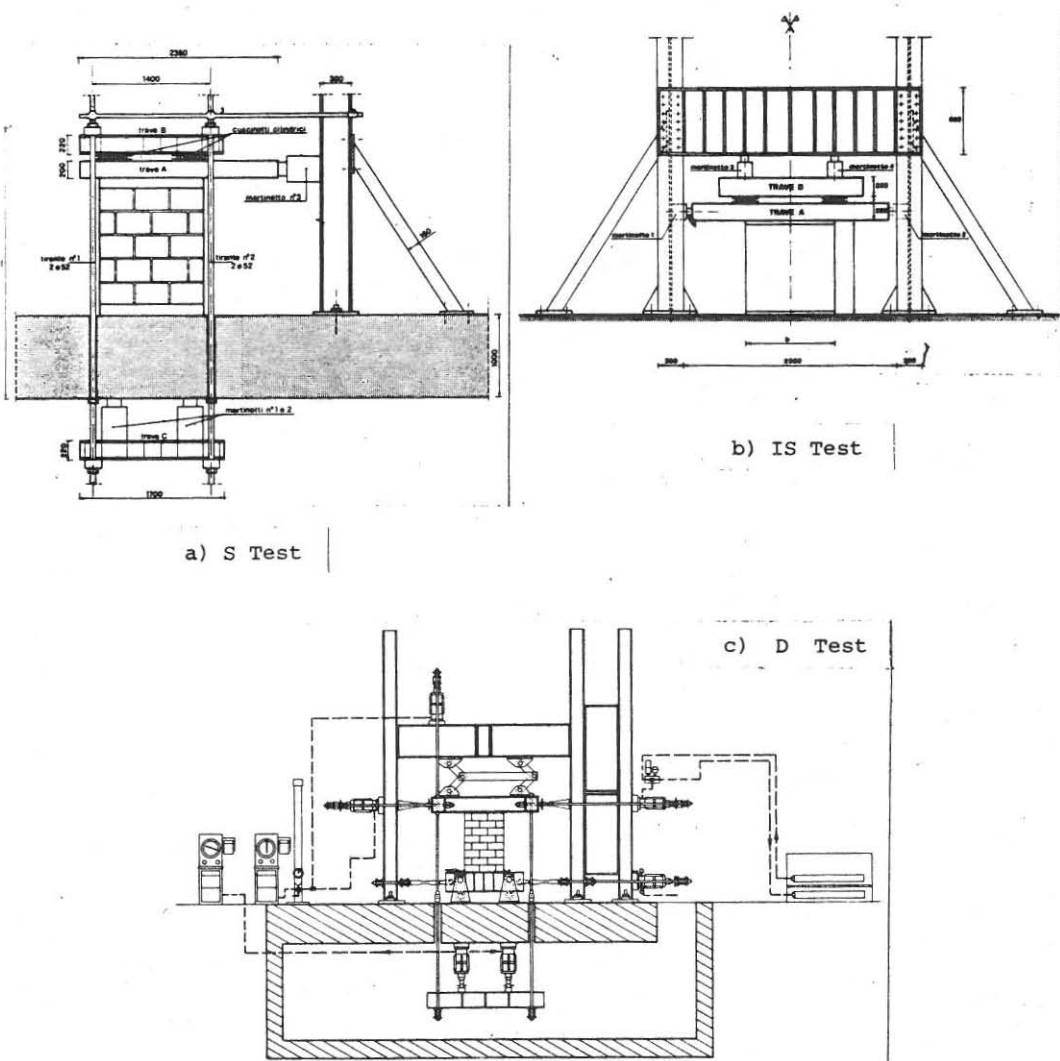
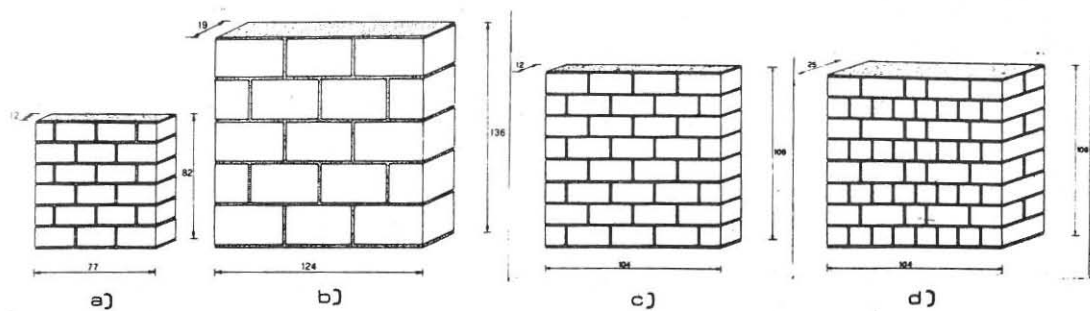
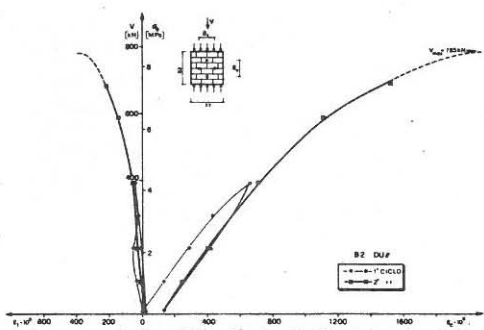
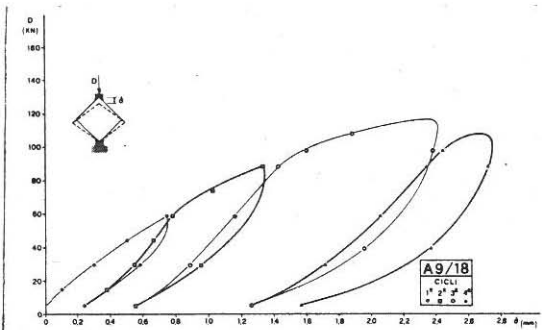


Fig. 2 - Caratteristiche delle macchine per le prove a spinta.

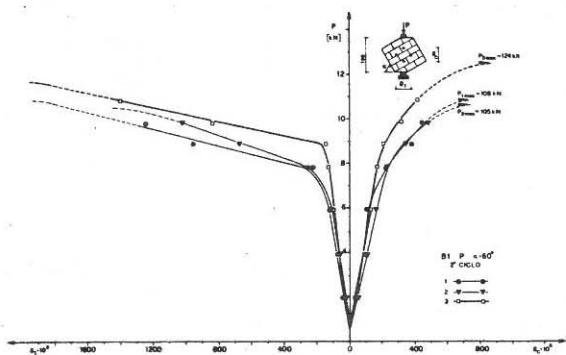




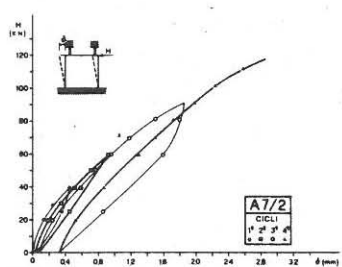
a) compressione uniforme



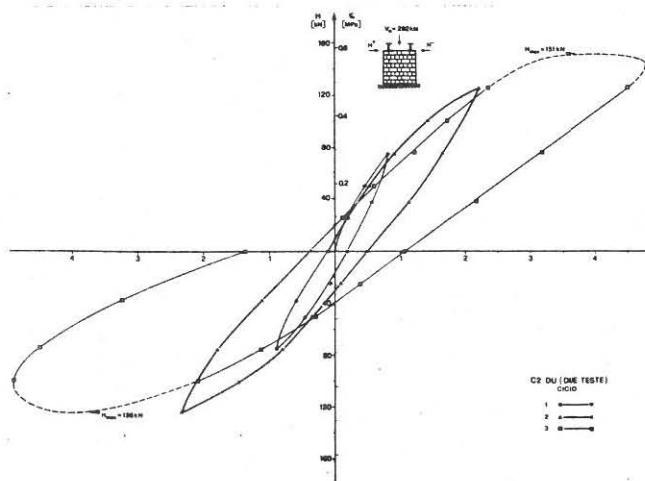
b) compressione diagonale



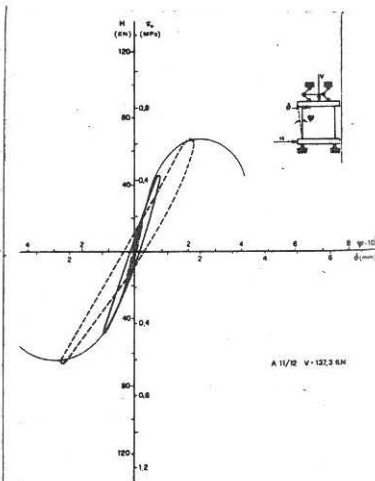
c) compressione concentrata ( $\alpha = 60^\circ$ )



d) S Test



e) IS Test



f) D Test

FIG. 3-Diagrammi carico-spostamento di alcune tipiche prove eseguite.

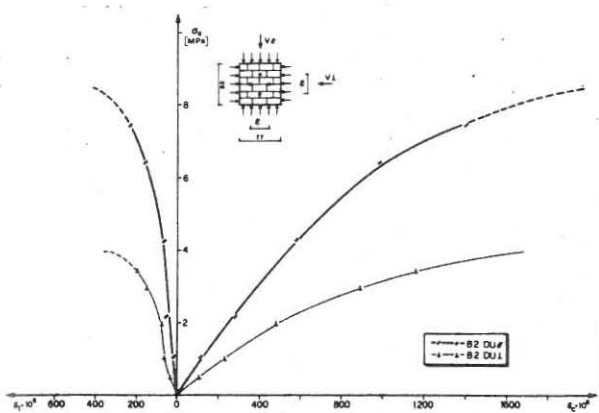


Fig. 4 - Confronto dei diagrammi carico-spostamento per le prove di compressione uniforme nelle 2 direzioni principali.

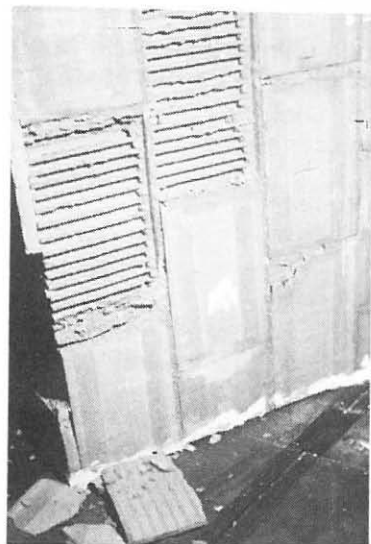


Fig. 5 - Rottura per compressione uniforme con sforzo parallelo ai letti di malta.

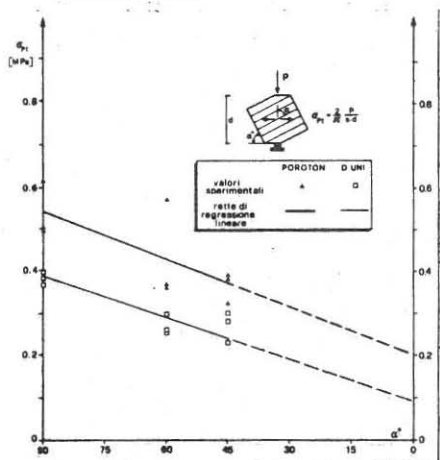


Fig. 6 - Influenza della inclinazione dei giunti.

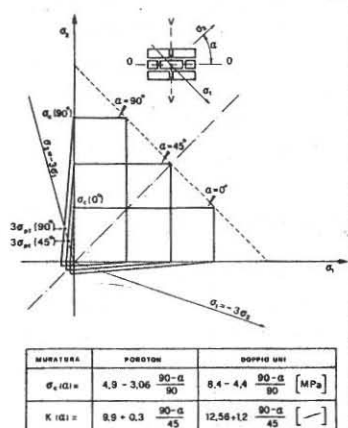


Fig. 7 - Costruzione di un campo di resistenza.

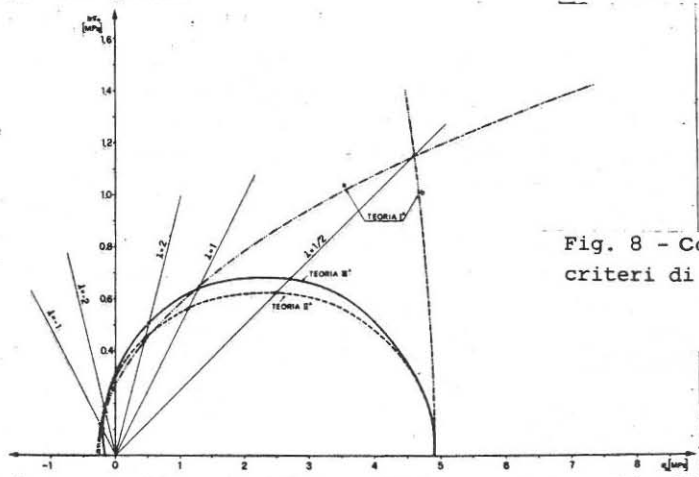


Fig. 8 - Confronti fra tre diversi criteri di resistenza.