

# **VERIFICA SISMICA DI EDIFICI ESISTENTI IN MURATURA**

**prof. Ing. Bruno Calderoni**

Dipartimento di Ingegneria Strutturale - Università di Napoli Federico II



## Indice (1/3)

- 1 - Il materiale "muratura" e la valutazione delle caratteristiche meccaniche
- 2 - Le tipologie degli edifici in muratura esistenti e la concezione strutturale dell'edificio moderno
- 3 - Le prescrizioni generali delle norme attuali:  
D.M.14/01/2008 e O.P.C.M.3274-3431
- 4 - I dissesti tipici e i danni sismici negli edifici in muratura



## Indice (2/3)

- 5 - La conoscenza dell'edificio
- 6 - Dalla conoscenza dell'edificio ad una prima valutazione della vulnerabilità
- 7 - La valutazione della sicurezza: verifica per i carichi verticali e verifica sismica
- 8 - La verifica sismica di un edificio esistente con l'analisi lineare
- 9 - La verifica sismica con l'analisi statica non lineare



## Indice (3/3)

- 10 - La valutazione della vulnerabilità sismica
- 11 - Gli aggregati edilizi
- 12 - L'adeguamento sismico di un edificio esistente con l'analisi lineare
- 13 - La valutazione della vulnerabilità sismica di un edificio esistente
- 14 - Gli interventi di riparazione, consolidamento e rinforzo





# **VERIFICA SISMICA DI EDIFICI ESISTENTI IN MURATURA**

## **Parte 1:**

### **IL MATERIALE "MURATURA" E LA VALUTAZIONE DELLE CARATTERISTICHE MECCANICHE**



## IL MATERIALE MURATURA

(definizione morfologica)

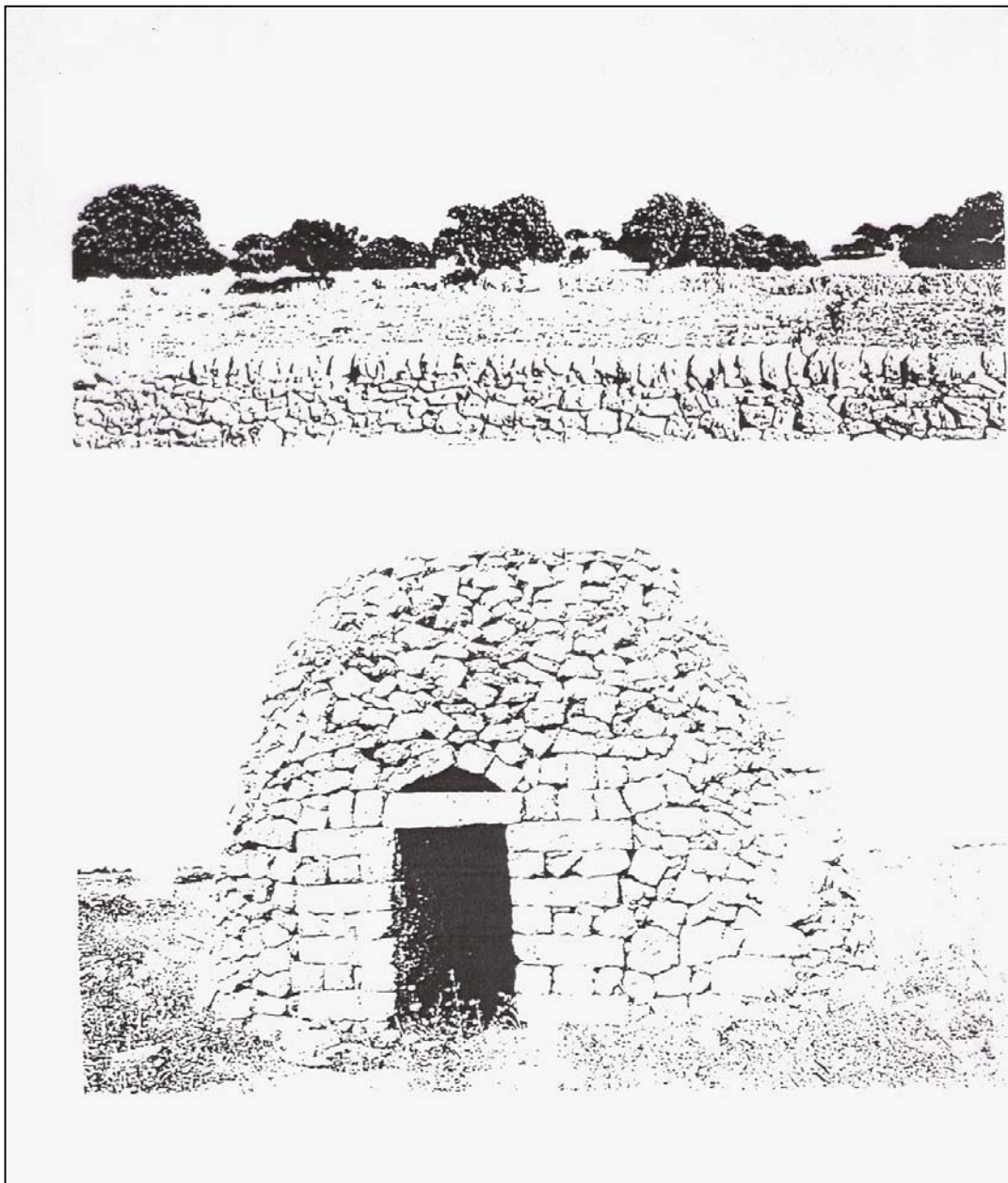
"Aggregato più o meno organizzato di elementi lapidei (naturali o artificiali) uniti con un legante"



LA MURATURA SI PUÒ PRESENTARE IN TIPOLOGIE NOTEVOLMENTE DIVERSE:

- COMPOSIZIONE:
  - o Elementi lapidei utilizzati
  - o Malta utilizzata (o non utilizzata)
- MODALITÀ DI ASSEMBLAGGIO DEI COMPONENTI
- EPOCA STORICA DI REALIZZAZIONE
- AREA GEOGRAFICA DI APPARTENENZA

## Murature molto antiche "a secco"



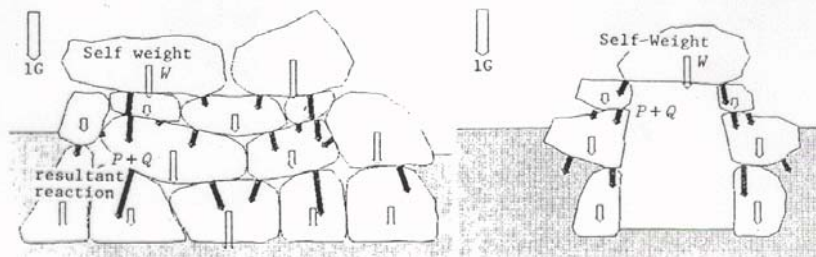


Fig.6 Ishibutai, Node Reaction due to Self Weight

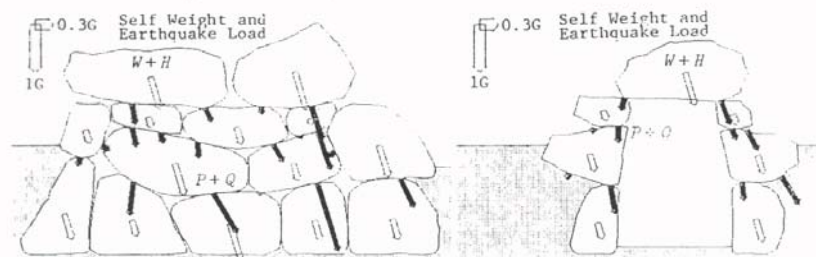


Fig.7 Ishibutai, Node reaction due to Self Weight and 0.3G Lateral Load

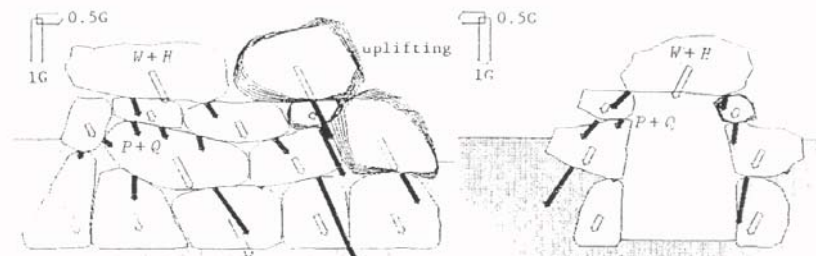


Fig.8 Ishibutai, Node Reaction due to Self Weight and 0.5G Lateral Load

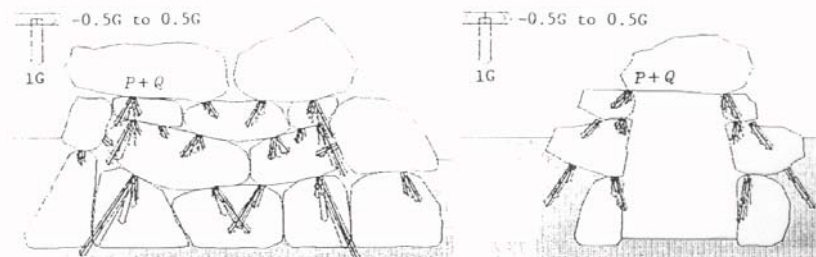
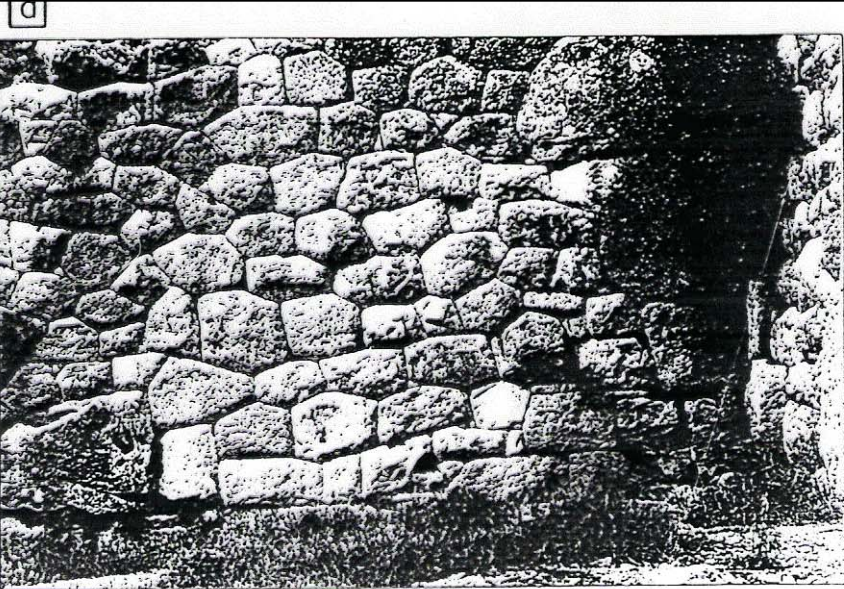


Fig.9 Ishibutai, Variation of Node Reaction



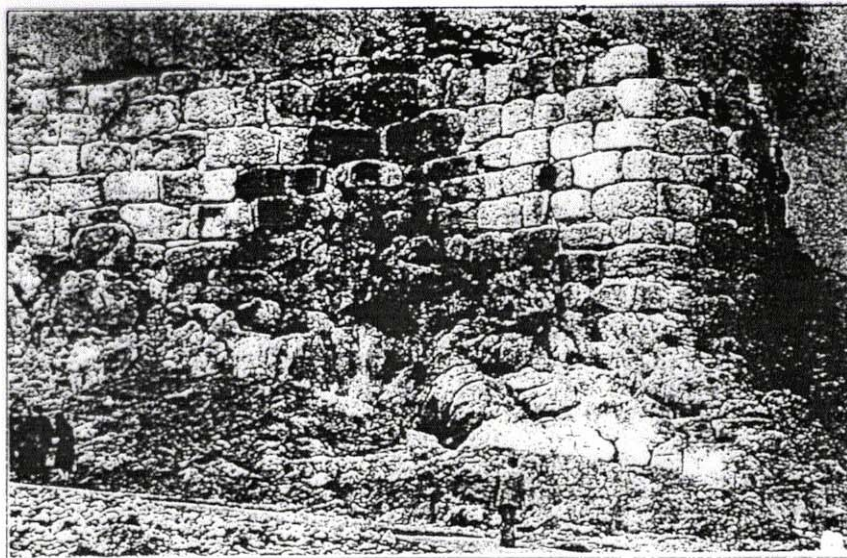
## Murature antiche "a secco"



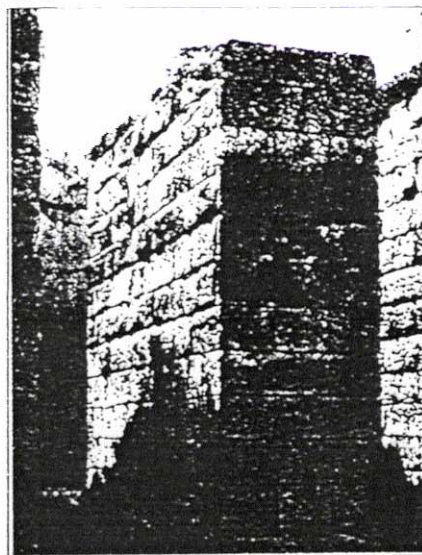


# Murature antiche "legate"

a



b



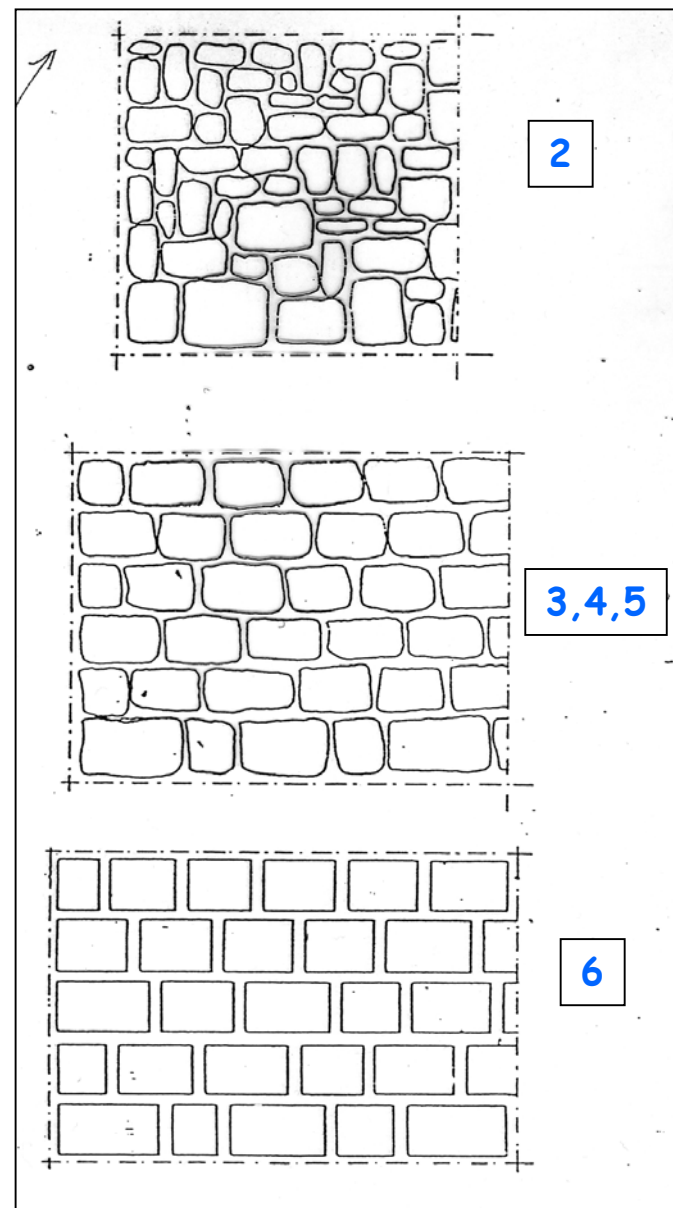
c



# TIPI DI MURATURA

(Classificazione in base alla tecnologia di posa in opera - CESUN 1983)

	TIPO DI MURATURA
1	Muratura a secco (senza malta).
2	Muratura con pietre alla rinfusa poco lavorate.
3	Muratura a strati con pietre lavorate.
4	Muratura non regolare a strati o corsi.
5	Muratura regolare a strati (es. normale muratura di tufo).
6	Muratura a conci di pietra.
7	Muratura a conci di pietra con rinforzi in mattoni di laterizio nelle spalle dei vani, negli spigoli, o listata.
8	Muratura in pietra da taglio, con blocchi squadrati con cura (quasi senza malta) ma con grappe metalliche.
9	Muratura in mattoni di laterizio pieni.





# TIPI DI MURATURA

(CNR-GNDT-Rilevamento della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura - dopo i terremoti del 1976 e del 1980)

A	Muratura a sacco formata da pietre di pezzature molto varie, male intessuta e priva di collegamento tra i due fogli.
B	Muratura a sacco formata da pietre di pezzature più regolare, bene intessuta e priva di collegamento tra i due fogli oppure come A con spigoli, mazzette e/o ricorsi in pietra squadrata o mattoni pieni.
C	Muratura di pietra sbozzata in presenza di irregolarità.
D	Muratura di pietra sbozzata con spigoli, mazzette e/o ricorsi in mattoni pieni e/o pietra squadrata.
E	Muratura di pietra arrotondata o ciottoli di fiume di pezzatura varia senza mazzette e/o ricorsi in mattoni pieni e/o pietra squadrata
F	Come E con spigoli, mazzette e/o ricorsi in mattoni pieni e/o pietra squadrata.
G	Muratura in blocchetti di tufo o pietra da taglio di dimensioni costanti.
H	Muratura in blocchetti di calcestruzzo prefabbricati, con inerti ordinari.
I	Muratura in blocchetti di calcestruzzo prefabbricati, con inerti leggeri (argilla espansa, etc), omogenei in tutta la sua estensione.
L	Muratura in laterizio di buona qualità, pieno o semipieno (% di foratura < 45%).
M	Muratura in laterizio con foratura >45%

muratura a sacco

in pietra sbozzata

in pietra arrotondata

in pietra da taglio

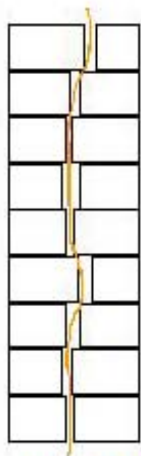
moderne in blocchi

in mattoni di laterizio



## Tipologia A

muro  
di cattiva fattura

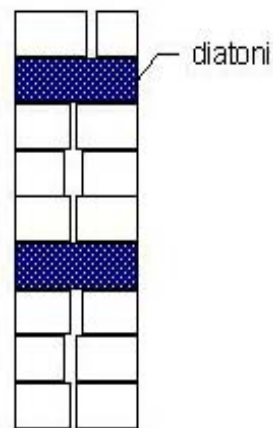


possibile  
separazione



## Tipologia B

muro di  
buona fattura



Castelvetere sul Calore  
Sezioni murarie tipo

TIPO  
E



~40 cm



~50 cm



~60 cm

TIPO  
B

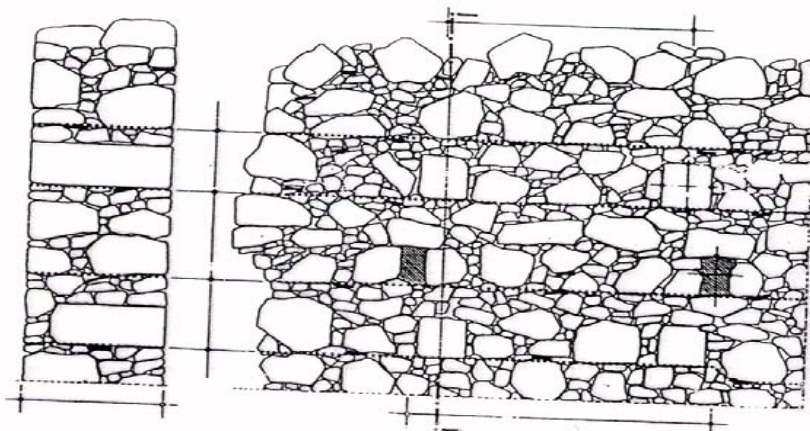
Ortigia - Siracusa  
Sezioni murarie tipo

TIPO  
D



TIPO  
C

TIPO  
D

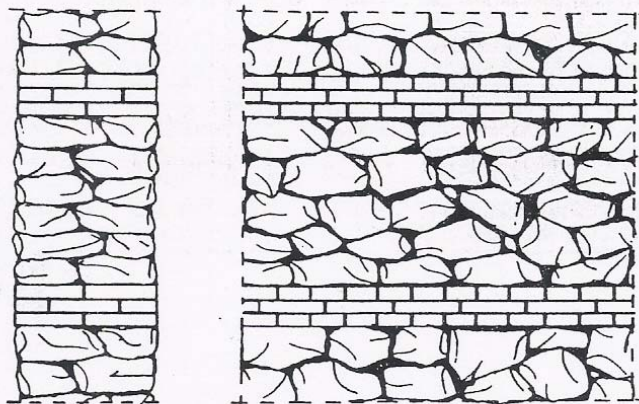


A	Muratura a sacco formata da pietre di pezzature molto varie, male intessuta e priva di collegamento tra i due fogli.
B	Muratura a sacco formata da pietre di pezzature più regolare, bene intessuta e priva di collegamento tra i due fogli oppure come A con spigoli, mazzette e/o ricorsi in pietra squadrata o mattoni pieni.
C	Muratura di pietra sbazzata in presenza di irregolarità.
D	Muratura di pietra sbazzata con spigoli, mazzette e/o ricorsi in mattoni pieni e/o pietra squadrata.
E	Muratura di pietra arrotondata o ciottoli di fiume di pezzatura varia senza mazzette e/o ricorsi in mattoni pieni e/o pietra squadrata.
F	Come E con spigoli, mazzette e/o ricorsi in mattoni pieni e/o pietra squadrata.
G	Muratura in blocchetti di tufo o pietra da taglio di dimensioni costanti.
H	Muratura in blocchetti di calcestruzzo prefabbricati, con inerti ordinari.
I	Muratura in blocchetti di calcestruzzo prefabbricati, con inerti leggeri (argilla espansa, etc), omogenei in tutta la sua estensione.
L	Muratura in laterizio di buona qualità, pieno o semipieno (% di foratura < 45%).
M	Muratura in laterizio con foratura >45%



## Tipologia D

- A Muratura a sacco formata da pietre di pezzature molto varie, male intessuta e priva di collegamento tra i due fogli.
- B Muratura a sacco formata da pietre di pezzature più regolare, bene intessuta e priva di collegamento tra i due fogli oppure come A con spigoli, mazzette e/o ricorsi in pietra squadrata o mattoni pieni.
- C Muratura di pietra sbazzata in presenza di irregolarità.
- D Muratura di pietra sbazzata con spigoli, mazzette e/o ricorsi in mattoni pieni e/o pietra squadrata.
- E Muratura di pietra arrotondata o ciottoli di fiume di pezzatura varia senza mazzette e/o ricorsi in mattoni pieni e/o pietra squadrata.
- F Come E con spigoli, mazzette e/o ricorsi in mattoni pieni e/o pietra squadrata.
- G Muratura in blocchetti di tufo o pietra da taglio di dimensioni costanti.
- H Muratura in blocchetti di calcestruzzo prefabbricati, con inerti ordinari.
- I Muratura in blocchetti di calcestruzzo prefabbricati, con inerti leggeri (argilla espansa, etc), omogenei in tutta la sua estensione.
- L Muratura in laterizio di buona qualità, pieno o semipieno (% di foratura < 45%).
- M Muratura in laterizio con foratura >45%

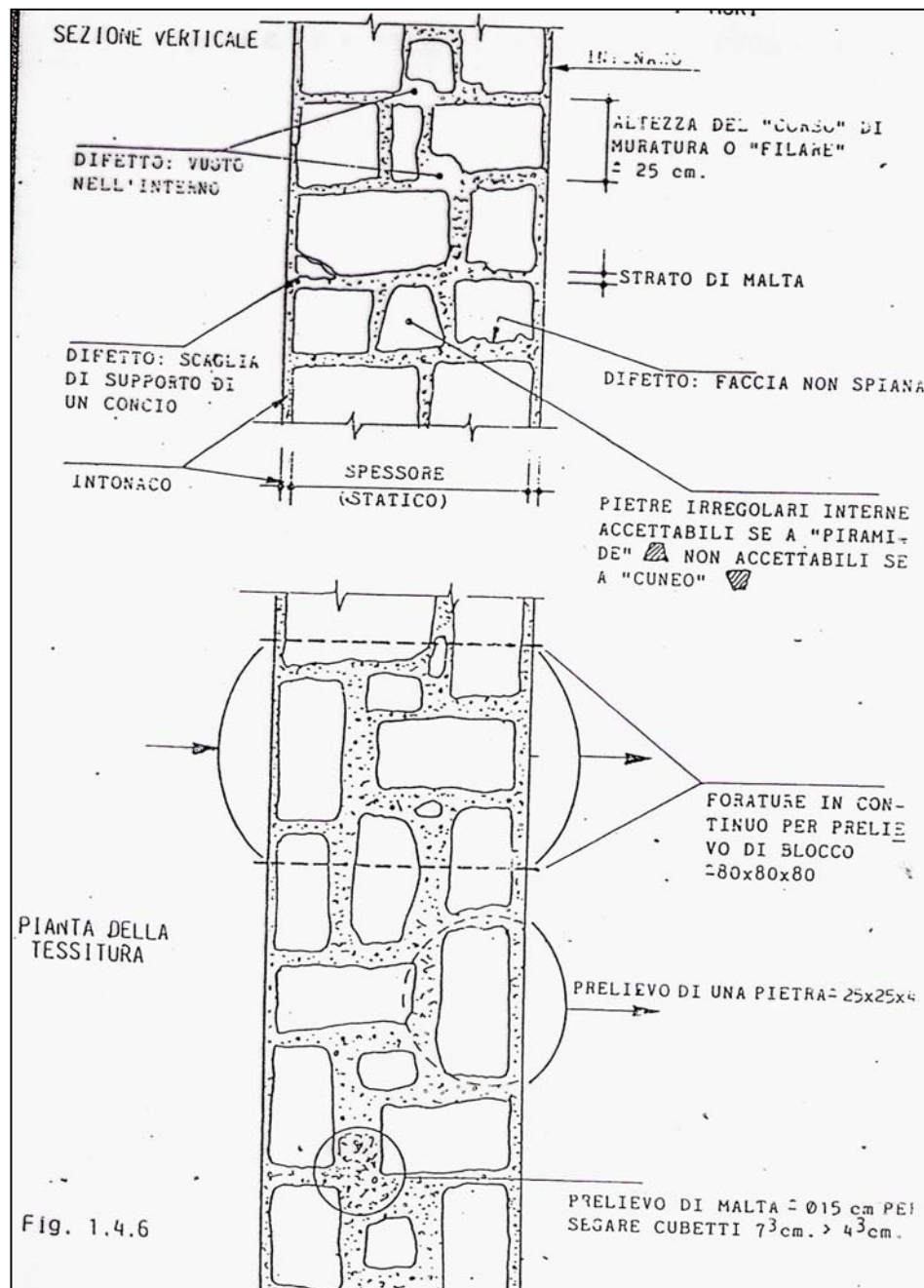




# Muratura di tufo - Tipologia C o G



A	Muratura a sacco formata da pietre di pezzature molto varie, male intessuta e priva di collegamento tra i due fogli.
B	Muratura a sacco formata da pietre di pezzature più regolare, bene intessuta e priva di collegamento tra i due fogli oppure come A con spigoli, mazzette e/o ricorsi in pietra squadrata o mattoni pieni.
C	Muratura di pietra sbozzata in presenza di irregolarità.
D	Muratura di pietra sbozzata con spigoli, mazzette e/o ricorsi in mattoni pieni e/o pietra squadrata.
E	Muratura di pietra arrotondata o ciottoli di fiume di pezzatura varia senza mazzette e/o ricorsi in mattoni pieni e/o pietra squadrata.
F	Come E con spigoli, mazzette e/o ricorsi in mattoni pieni e/o pietra squadrata.
G	Muratura in blocchetti di tufo o pietra da taglio di dimensioni costanti.
H	Muratura in blocchetti di calcestruzzo prefabbricati, con inerti ordinari.
I	Muratura in blocchetti di calcestruzzo prefabbricati, con inerti leggeri (argilla espansa, etc), omogenei in tutta la sua estensione.
L	Muratura in laterizio di buona qualità, pieno o semipieno (% di foratura < 45%).
M	Muratura in laterizio con foratura >45%



La tessitura di una muratura di tufo

# Tipologia L

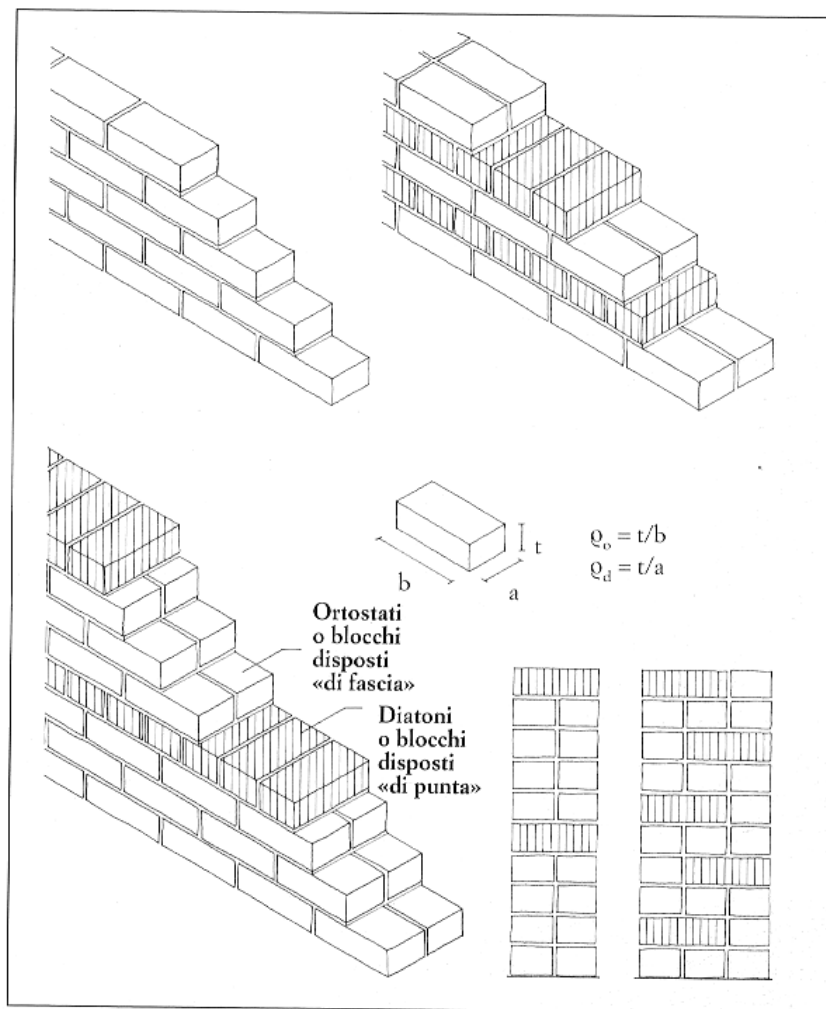
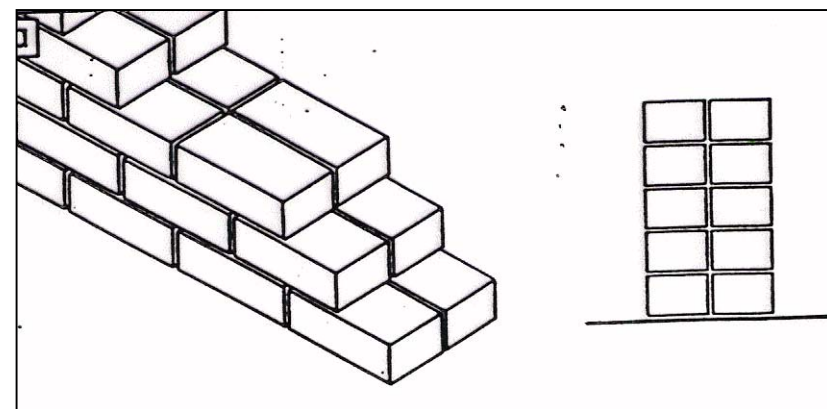


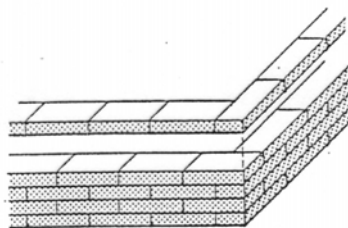
Fig. 10. «Opus quadratum»: differenti disposizioni della tessitura isodoma.

← SI

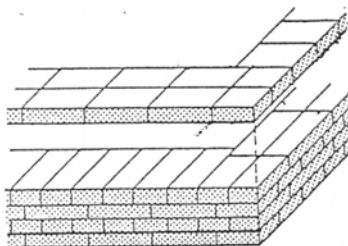
NO ↓



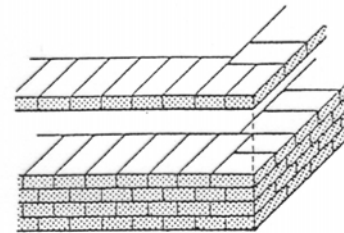
## Tipologia L - tessitura ed incroci (1)



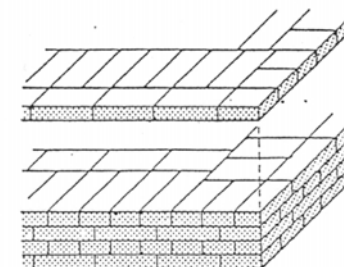
a) Muratura a una testa. Disposizione a fascia



b) Muratura a due teste. Disposizione in blocco



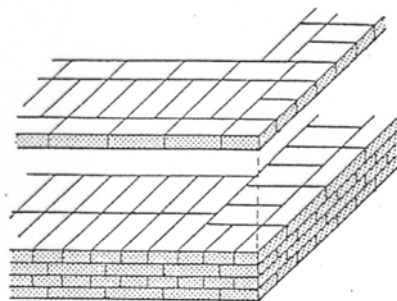
a) Muratura a due teste. Disposizione in chiave



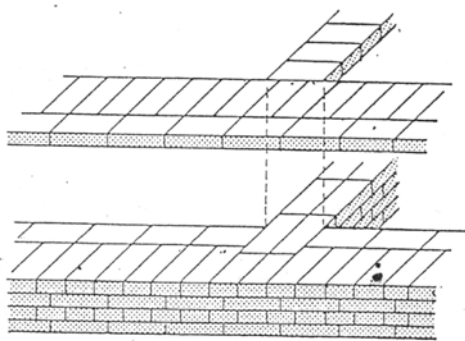
b) Muratura a tre teste. Disposizione a blocco



## Tipologia L - tessitura ed incroci (2)

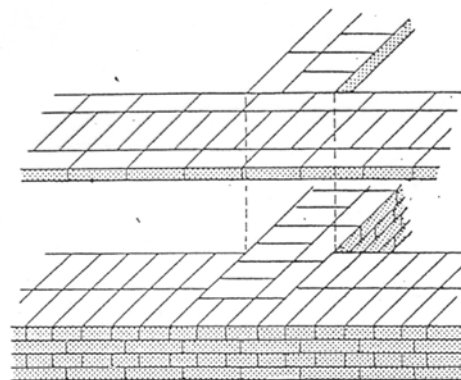


a) Muratura a quattro teste



b) Muratura di spina a due teste e muratura perimetrale a tre teste

Fig. 1.4.35



Muratura di spina a tre teste e muratura perimetrale a quattro teste

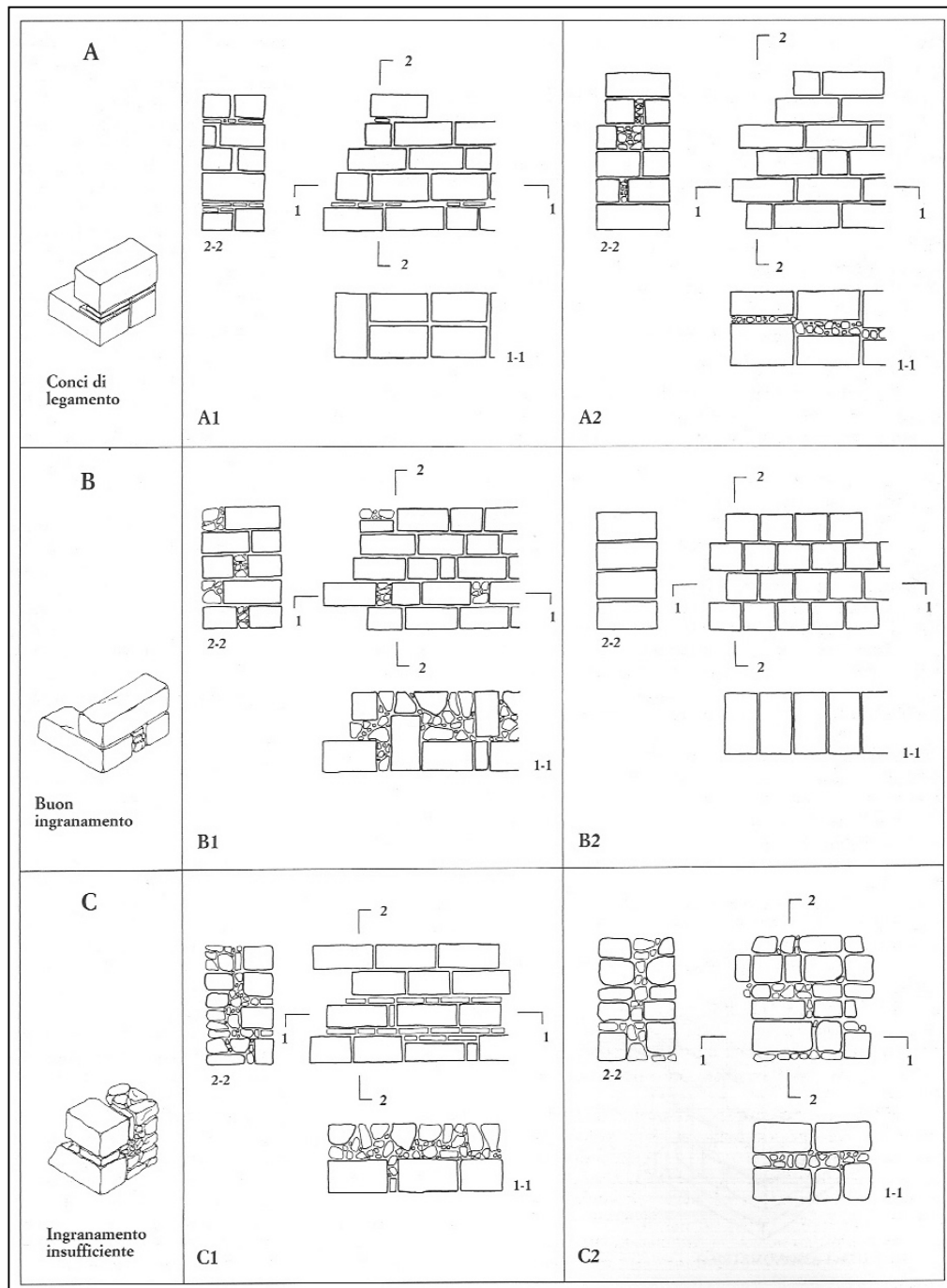
Fig. 1.4.36



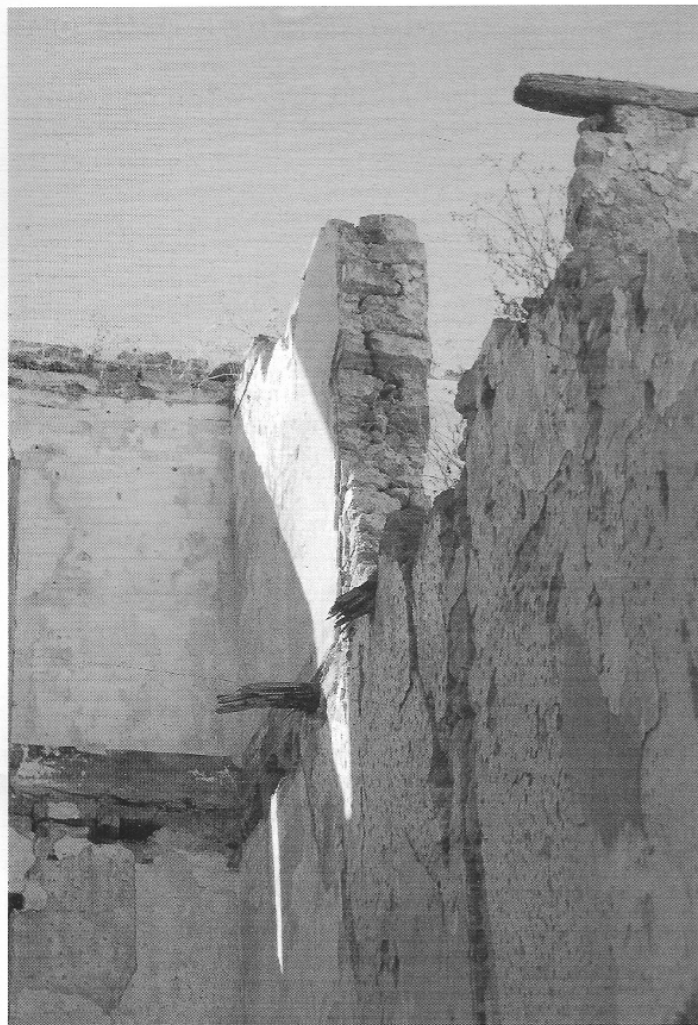
# TIPI DI MURATURA

Classificazione in sei tipologie  
delle murature storiche in  
calcarenite di Palermo  
(Giuffrè-Carocci 1999)

Passando dal tipo A  
al tipo C peggiora il  
collegamento  
trasversale e  
quindi il  
comportamento  
meccanico



## Muratura Tipo A2 (Palermo)



Ammorsature trasversali con elementi disposti di punta



## Muratura Tipo B2 (Palermo)



Esiguo sfalsamento verticale dei giunti

## Muratura Tipo C (Palermo)



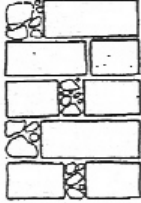
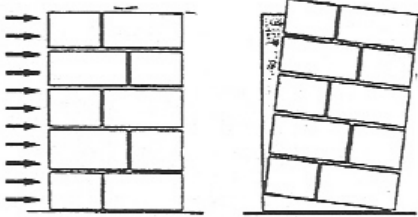
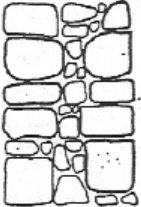
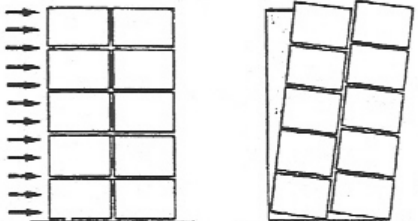
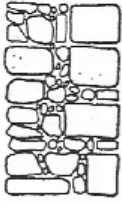
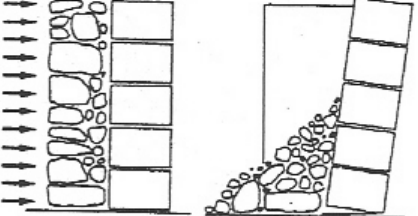
Tipo C1 - paramento interno  
in pietrame sbozzato di  
pezzatura ridotta



Tipo C2 - mancano i  
collegamenti  
trasversali

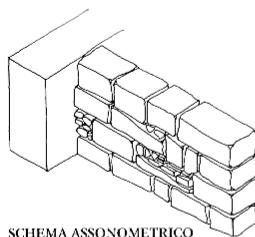


# Giudizio meccanico qualitativo (Giuffrè 1999)

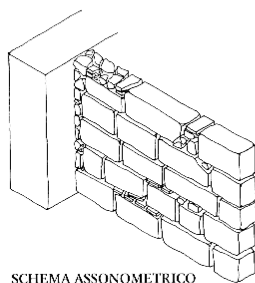
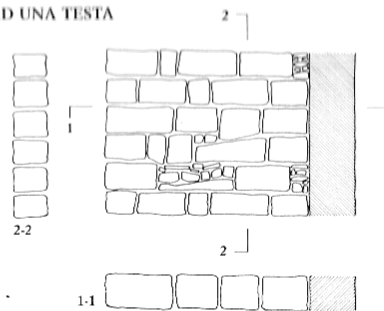
	RILIEVO	MODELLO MECCANICO
1		
2		
3		

La mancanza di collegamenti trasversali e la presenza di elementi minuti riducono la monoliticità del muro e quindi la resistenza al di fuori del proprio piano

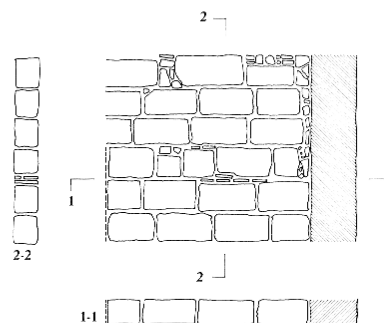
### PARETI MURARIE AD UNA TESTA



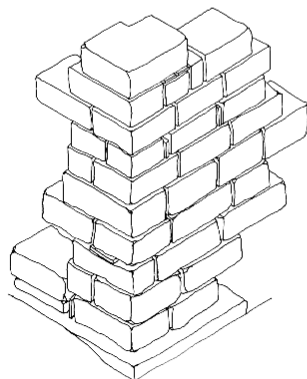
SCHEMA ASSONOMETRICO



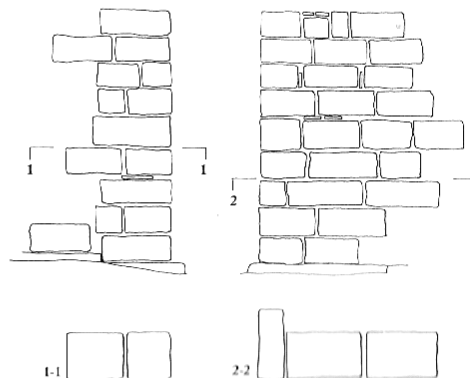
SCHEMA ASSONOMETRICO



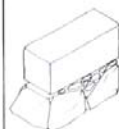
### ORGANIZZAZIONE DEL CANTONALE



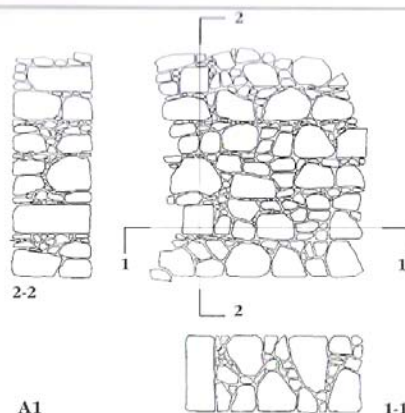
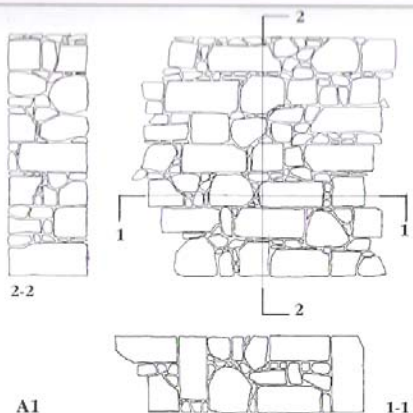
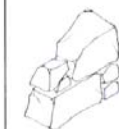
SCHEMA ASSONOMETRICO



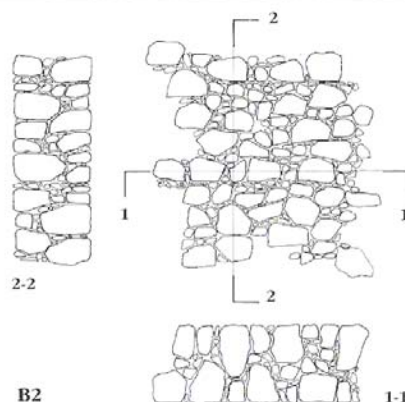
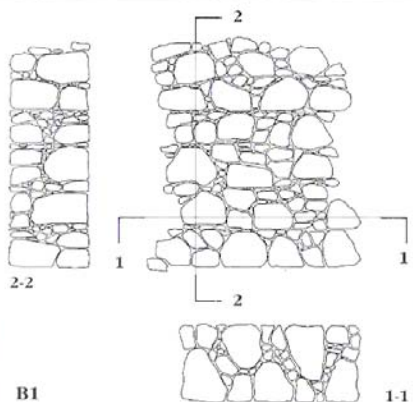
Dettagli di  
tessiture murarie  
di muri ad una  
testa e di cantonali  
(Palermo)

**A**

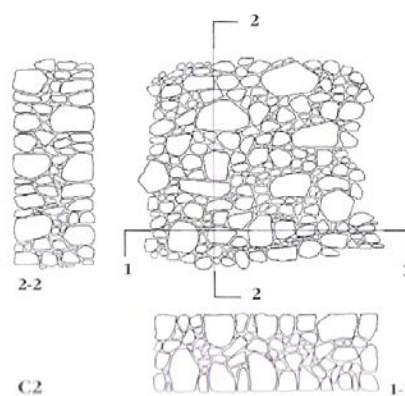
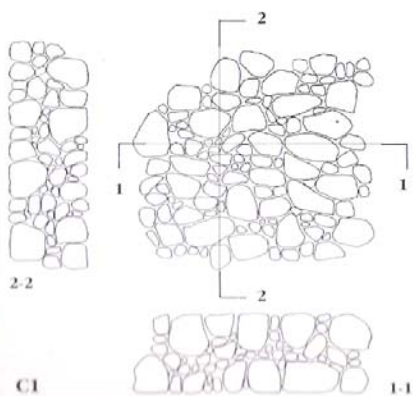
Conci di legamento

**B**

Buon ingranamento

**C**

Ingranamento insufficiente



## TIPI DI MURATURA

Classificazione in sei tipologie  
delle murature storiche in  
calcare duro di Ortigia  
(Giuffrè-Carocci 1993)

Passando dal tipo A al  
tipo C peggiora il  
collegamento  
trasversale, la  
sbozzatura delle pietre e  
l'organizzazione in filari  
e quindi il  
comportamento  
meccanico



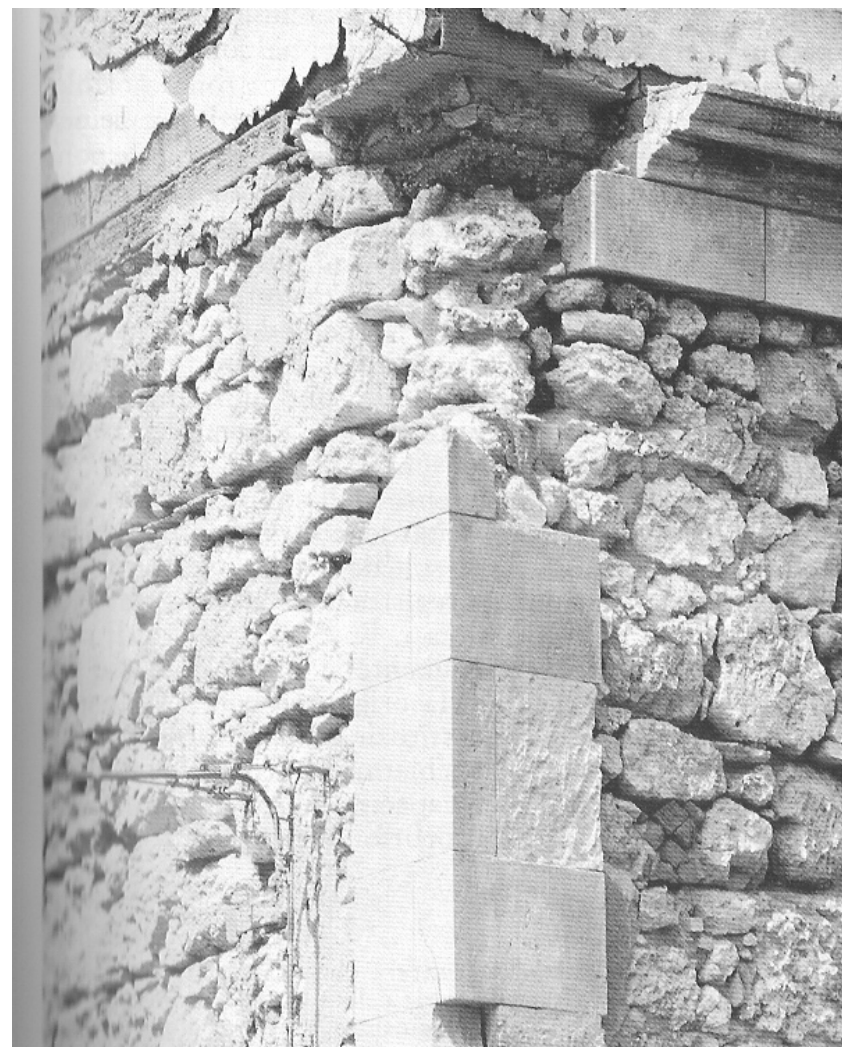
## Muratura Tipo A1-A2 (Ortigia)



Presenza di pietre sbozzate di forma parallelepipedica



## Muratura Tipo B1-B2 (Ortigia)



Filari meno regolari e pietre rustiche

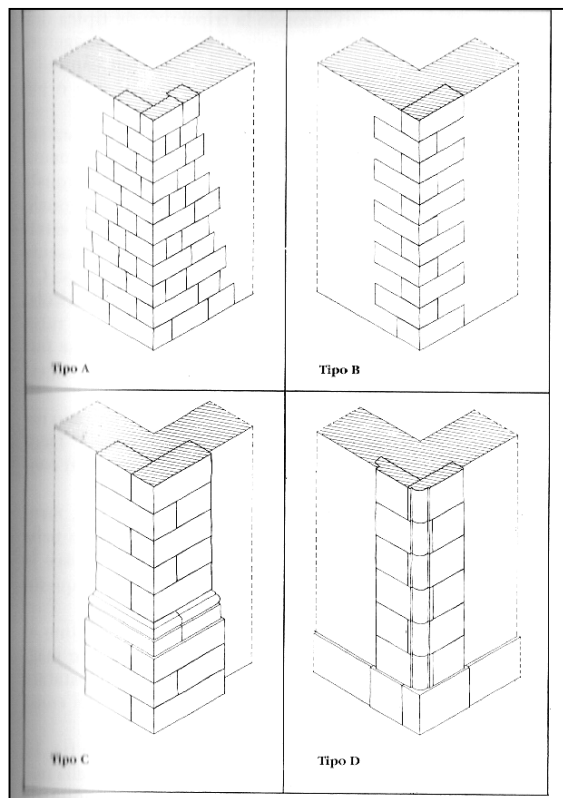
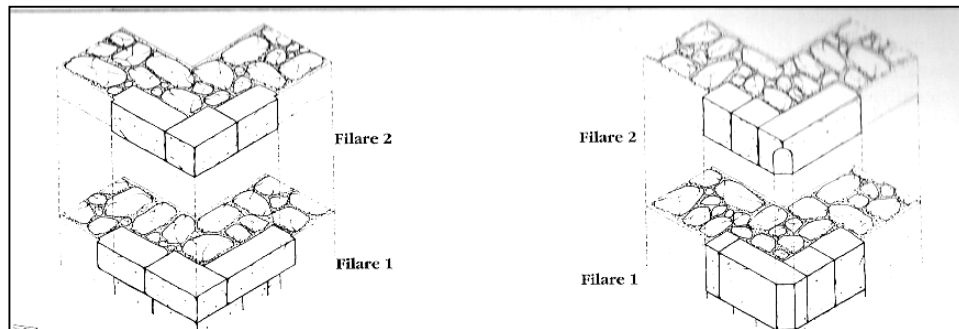
## Muratura Tipo C2 (Ortigia)



Molte pietre rustiche piccole - carenza di malta



# Organizzazioni murarie nei cantonali (Ortigia)



# TIPI DI MURATURA Classificazione riportata nell'OPCM 3431(GNDT-SSN 2000)

murature antiche

A	Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)
B	Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno
C	Muratura in pietre a spacco con buona tessitura
D	Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)
E	Muratura a blocchi lapidei squadriati
F	Muratura in mattoni pieni e malta di calce
G	Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI)
H	Muratura in blocchi laterizi forati (perc. foratura < 45%)
I	Muratura in blocchi laterizi forati, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)
L	Muratura in blocchi di calcestruzzo (perc. foratura tra 45% e 65%)
M	Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni

in pietrame non lavorato

in pietra sbozzata

in pietra a spacco

in pietra da taglio

in mattoni pieni

murature moderne

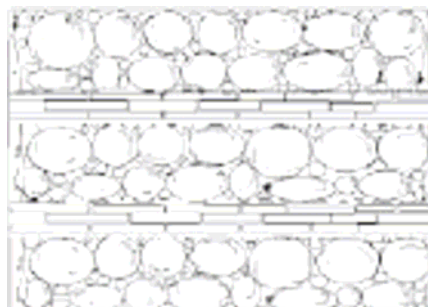
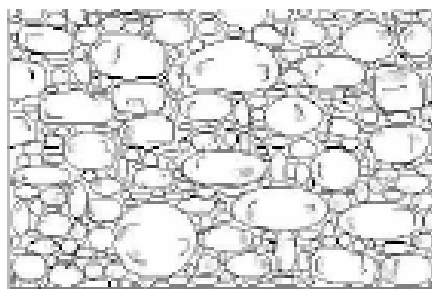
Passando dal tipo A al tipo B, C, D... migliora la qualità della muratura e quindi il suo comportamento meccanico

# TIPI DI MURATURA

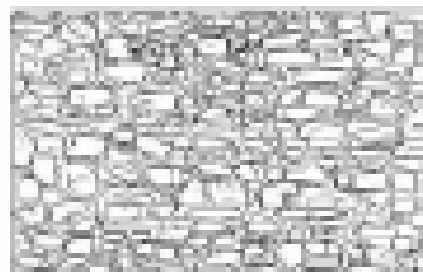
## ULTERIORE SUDDIVISIONE PER LE MURATURE ANTICHE

### A - pietrame irregolare, a sacco, male intessuta...

A1 - pietra arrotondata o ciottoli di fiume di piccole o medie dimensioni con o senza listature o ricorsi



A2 - pietra grezza o pietrame (scaglie e pietre di pezzatura varia) con o senza listature o ricorsi



# TIPI DI MURATURA

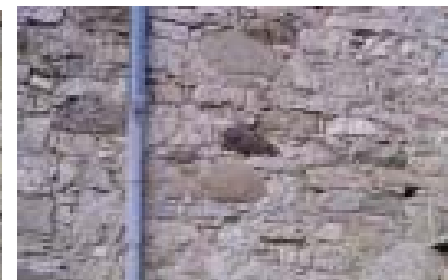
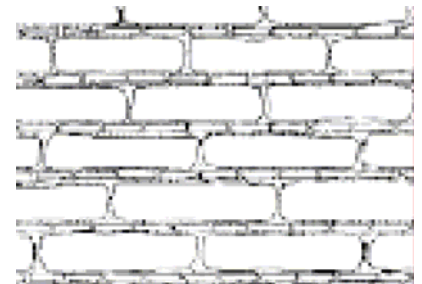
## ULTERIORE SUDDIVISIONE PER LE MURATURE ANTICHE

B - conci sbozzati semi-regolare, a sacco, bene intessuta..

B1 - elementi lastriformi  
semilavorati con tessitura  
ordinata con o senza listature o  
ricorsi



B2 - elementi semilavorati quasi  
regolari di dimensioni maggiori  
con tessitura ordinata con o  
senza listatura o ricorsi





## TIPI DI MURATURA

### ULTERIORE SUDDIVISIONE PER LE MURATURE ANTICHE

C - pietre a spacco con buona tessitura (muratura regolare)

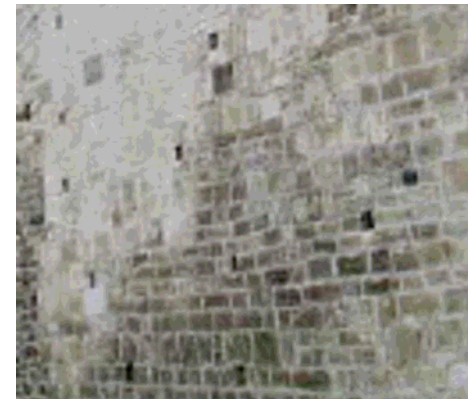
C1 - con apparecchiatura a corsi irregolari anche con zeppe in pietra



C2 - con apparecchiatura più regolare



C3 - con apparecchiatura a corsi orizzontali



## IL MATERIALE MURATURA

(definizione strutturale)

" Materiale con resistenza a compressione molto maggiore di quella a trazione (e a taglio) "



IL MATERIALE MURATURA È STATO IMPIEGATO, NELLA TRADIZIONE COSTRUTTIVA, IN MODO DA SFRUTTARE OPPORTUNAMENTE LE SUE CARATTERISTICHE DI RESISTENZA MECCANICA:

tipologie strutturali specifiche (di tipo scatolare) con elementi portanti estesi (pareti murarie o pannelli murari), soggetti prevalentemente a compressione.



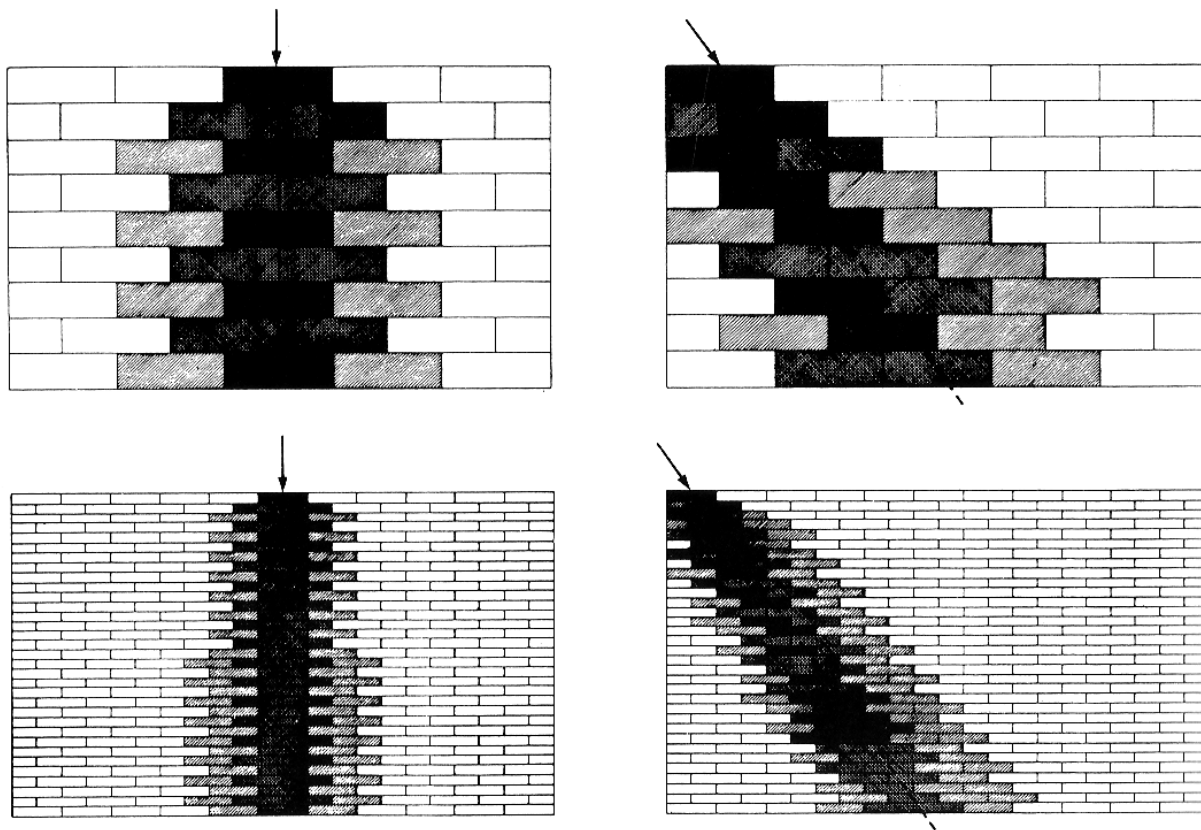
ELEMENTI PORTANTI (MURI MAESTRI)



ELEMENTI PORTATI



## La diffusione di carichi concentrati all'interno della parete



da: Sicurezza e Conservazione dei Centri Storici - Giuffè

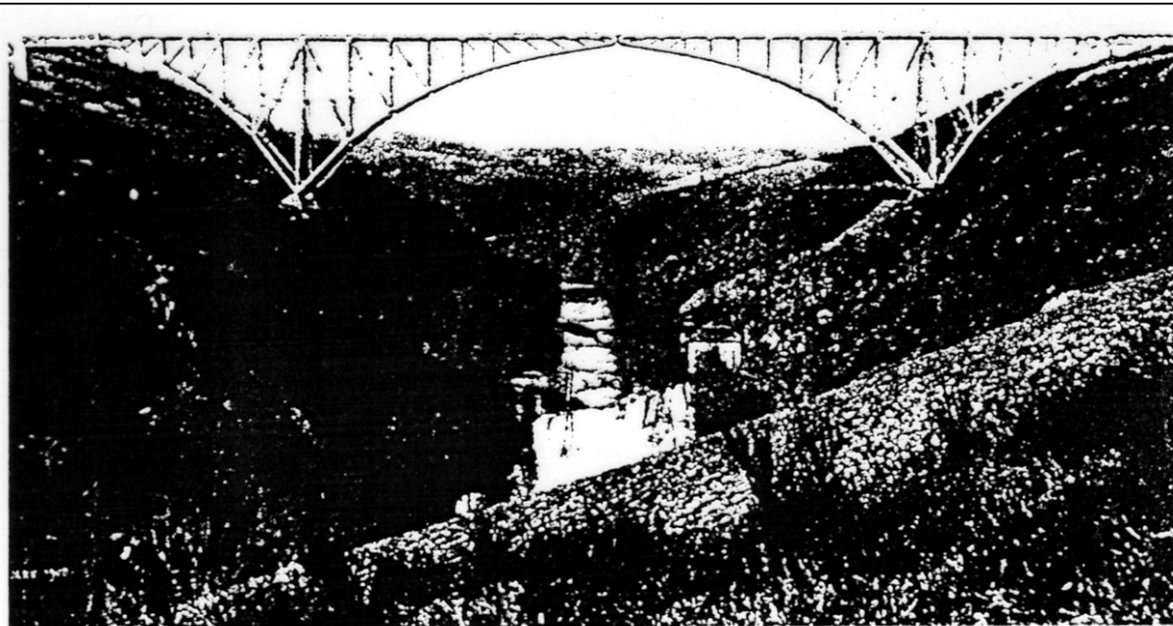


Fig. XIV-11. Viadotto di Vaur. Soc. Const. des Batignolles.  
Da « Arch. of Bridges », E. Mock.

La sagoma delle  
strutture  
moderne non  
deve contenere  
necessariamente  
la curva delle  
pressioni

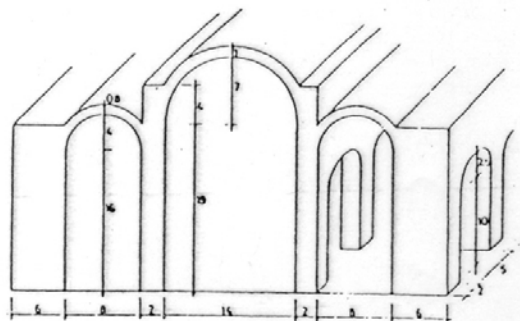
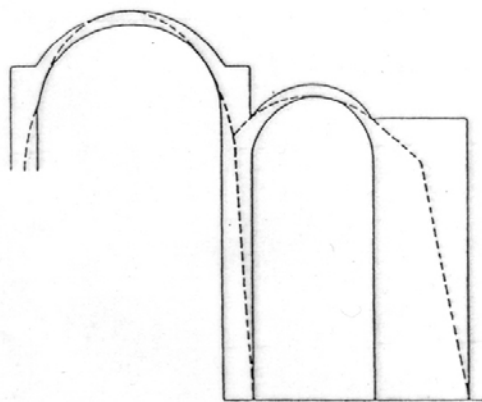


fig. 20

La curva delle pressioni nelle  
volte e nei contrafforti nella  
condizione di collasso

La sagoma delle  
strutture  
murarie deve  
contenere  
sempre la curva  
delle pressioni

Resistenza a  
compressione degli  
elementi  
(pietre naturali o  
mattoni artificiali)

## INITIAL TESTS FOR BRICK/BLOCK

### A) FOR NATURAL STONE BLOCK :

- THE STONE BLOCKS OF EACH QUARRY HAVE TO BE PERIODICALLY TESTED FOR ENSURING THE MAINTENANCE OF THE RESISTANCE PROPERTIES.
- EACH TIME 30 ~~SEE~~ ELEMENTS SHALL BE BROKEN IN COMPRESSION FOR EVALUATING THE CHARACTERISTIC COMPRESSIVE STRENGTH ( $f_{bk}$ ):

$$f_{bk} = 0.75 f_{bm}$$

↳ mean value of the 30 results

- FOR TUFF BLOCK, IN PARTICULAR, IT NEEDS THAT

$$f_{bm} \geq 2.0 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{bmin} > 1.5 \quad "$$

### B) FOR ARTIFICIAL CLAY BRICK :

(WITH OR WITHOUT HOLLOW)

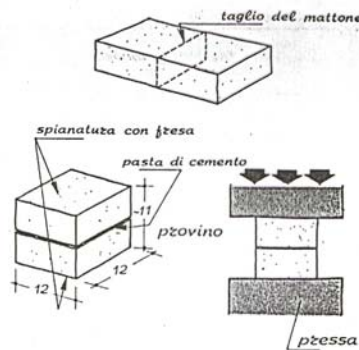
THE PRODUCTION HAS TO BE CERTIFIED (AS WELL AS STEEL AND CEMENT) BY MEANS OF OFFICIAL CONTROLS PERFORMED ONCE IN A YEAR. COMPRESSIVE TESTS ARE CARRIED OUT BY LOADING THE BRICK ~~ALONG~~ TWO DIFFERENT DIRECTION :

- a) THE DIRECTION OF LOADS IN THE ACTUAL WALL
- b) THE DIRECTION ORTHOGONAL TO THE ONE OF LOADS IN THE WALL



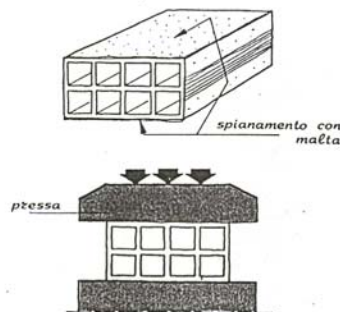
# BRICK COMPRESSIVE TEST

## BRICKS W/O HOLES

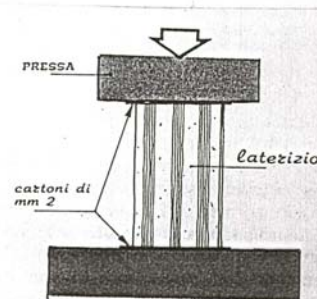


TESTING  
PROCEDURE

## HOLLOW BRICKS



TESTING ALONG  
THE ACTUAL LOAD  
DIRECTION



TESTING ALONG  
THE DIRECTION  
ORTHOGONAL  
TO THE ACTUAL  
LOAD

Prove di rottura a compressione su elementi artificiali (mattoni e blocchi)

Prove di rottura a compressione su elementi artificiali (mattoni e blocchi)

## EVALUATION OF CHARACTERISTIC VALUE ( $f_{bk}$ )

- FOR COMPRESSION ALONG WALL LOADING DIRECTIONS:

$$f_{bk} = f_{bm} - 1.64 s \quad (f_{bk} = 0.75 f_{bm})$$

↑  
FOR NATURAL STONE BLOCK

where :

$f_{bm}$  = mean value of compressive resistance obtained by at least 30 tests.

$s$  = standard deviation

it must be verified :

$$\frac{s}{f_{bm}} \leq 0.2$$

- FOR COMPRESSION ORTHOGONAL TO THE WALL LOADING DIRECTION :

$$\bar{f}_{bk} = 0.7 \bar{f}_{bm}$$

where :

$\bar{f}_{bm}$  = mean value of compressive resistance obtained by at least 6 tests

## Resistenza a compressione delle rocce più comuni

R O C C E	Carichi di rottura su cubetti in Kgcm <sup>-2</sup>			
	scadenti di scarto	normali	ottimi	medie generali
GRANITI	572-1000 non rari	1000-2000 comuni	2000-4144 frequenti	1635
SIENITI	879			1478
DIORITI	1300			1840
PORFIDI	620-1000 non rari	1000-2500 comuni	2500 frequenti	1909
TRACHITI	149-800	1000-1800	2251	1500 *
R.cce LEUCITICHE	1189-1500 più freq.	1500-2000 comuni	2000-2357 non rari	1748
BASALTI	835-2000 non rari	2000-4000 molto com.	4000-5071 piut. freq.	3241
TUFI VULCANICI **	3-30 freq.	30-70 molto comun.	70-187 rari	71
CALCARI (cal.dol.)	45-500 rari	500-1500 comuniss.	1500-2200 non rari	845
DOLOMIE	390			1098
TUFI CALCAREI (arenar. Conchig.)	7-56	9-455 i più comuni	38-455	86
TRAVERTINI	38			458
ALABASTRI	531		1200	680
QUARZITI	2580		3200	2862
Congl. (brecce breg. le pudd.)	89-800 freq.	800-1500 comuni	1500 freq.	750
ARENARIE	70-400 non rari	400-1300 comuni	1300 non rari	790
MARMI	190-1000 rari	1000-1400 molto com.	1400 freq.	1113
CIPOLLINO	1150	1500	1500	1325
GNEISS	530	800-1900	1950	1104
ALTRI SCISTI	290		1500	700 ?
SERPENTINI	680		2654	1560

(\*) Non tenendo conto dei valori troppo bassi.

(\*\*) Per murature correnti si potrà considerare un carico di rottura medio di 40 Kgcm<sup>-2</sup>, avendo accertato che la malta ha consistenza non inferiore al tufo e non esistono vuoti.



## Resistenza a trazione delle rocce più comuni

R O C C E	SCADENTE E DI SCARTO	Carico di rottura a trazione in $\text{Kgcm}^{-2}$			$f_t/f_c$
		NORMALE	OTTIMO	MEDIA	
GRANITI	6,4 - 20 non rari	20-60 molto com.	60-81 non rari	37	1/40
PORFIDI		51	70	60	1/30
TRACHITI		25	45	35	1/40
TUFI VULCANICI				7,7	1/10
CALCARI	9 - 30 non rari	30-70 molto com.	70-103 più freq.	50	1/20
DOLOMIE	10	28		21	1/50
ARENARIE	4,2-10 non rari	10-40 comuniss.	40-101 rari	19	1/40
MARMI	30		90	40	1/30
SERPENTINO	56	104		80	1/20
BASALTI					

Per le murature di tufo eseguite prima del 1950 con la tecnologia corrispondente all'impiego di pietre sbozzate, accertata una efficiente tessitura nell'ambito dei filoni, si può adottare una resistenza ultima a trazione pari a  $4 \text{ Kgcm}^{-2}$ .

## Resistenza delle malte

- WITH REFERENCE TO COMPOSITION, RESISTANCE PROPERTIES OF MORTAR HAVE TO BE OBTAINED BY TESTING :
  - FLEXURAL TENSILE STRENGTH
  - ULTIMATE COMPRESSIVE STRENGTH
- THE TESTING PROCEDURE ARE THE SAME USED FOR CEMENT : (D.M. 3/6/68)
  - AT LEAST 3 SPECIMENS ( $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$  SIZED) HAVE TO BE TESTED, FIRSTLY IN BENDING AND THEN IN COMPRESSION (ON THE OBTAINED 6 PARTS).
- THE MORTARS ARE CLASSIFIED DEPENDING ON THE COMPRESSIVE RESISTANCE :

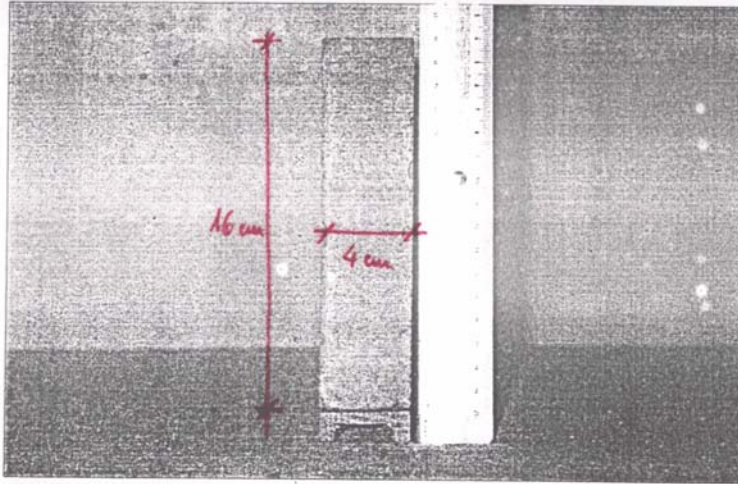
GROUP	RESISTANCE ( $\text{N/mm}^2$ )
M1	> 12
M2	> 8
M3	> 5
M4	> 2.5

OR ACCORDING THEIR COMPOSITION (BY VOLUME)

	CEMENTO	CALCE AEREA	CALCE IDRAULICA	SABBIA	POZZOLANA
M1 - CEMENTIZIA	1	—	—	3	—
M2 - CEMENTIZIA	1	—	0.5	4	—
M3 - BASTARDA	1	—	1	5	—
M4 - BASTARDA	1	—	2	9	—
M4 - POZZOLANICA	—	1	—	—	3
M4 - IDRAULICA	—	—	1	3	—

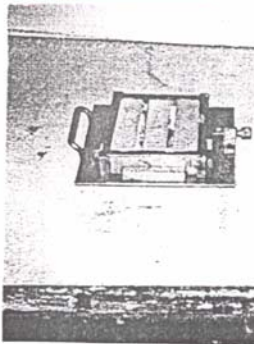
# CEMENT RESISTANCE TEST

SAMPLE FOR TESTING

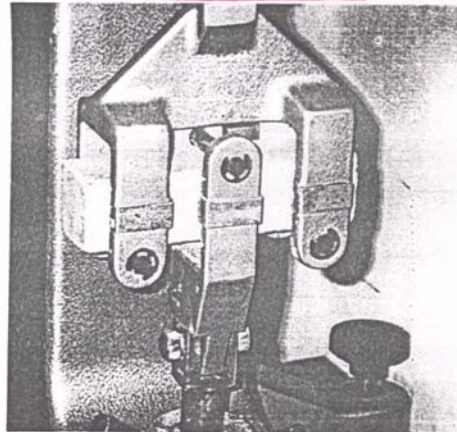


Prove di resistenza  
sulle malte

PREPARATION  
OF SAMPLES



TENSILE RESISTANCE  
FOR BENDING TEST



THE TWO PARTS OBTAINED FROM BENDING TEST  
ARE USED FOR COMPRESSIVE RESISTANCE TEST.



Prove su malte e  
mattoni  
durante la  
costruzione

THE "DIRECTOR OF WORKS" HAS TO CHECK  
BEFORE AND DURING CONSTRUCTION THE  
RESISTANCE PROPERTIES OF :

- MORTAR
- BRICK
- MASONRY

#### A) TESTS ON MORTAR

PERIODICALLY COMPRESSIVE ~~TEST~~ TEST ON  
THREE SPECIMENS HAS TO BE CARRIED OUT  
FOR CHECKING THE UNIFORMITY OF THE  
MORTAR PRODUCTION.

#### B) TESTS ON BRICK/BLOCK

EACH SUPPLY OF BRICKS CAN BE CHECKED  
BY COLLECTING AT LEAST THREE ELEMENTS  
TO TEST IN COMPRESSION.

FOR ACCEPTING THE SUPPLY IT ~~MUST~~ BE HAPPEN:

$$f_{bm} \geq 1.20 f_{bk}$$

$$f_{bmin} \geq 0.90 f_{bk}$$

where :

$f_{bm}$  = mean value of compressive resistance  
obtained by the 3 tests

$f_{bmin}$  = minimum obtained value

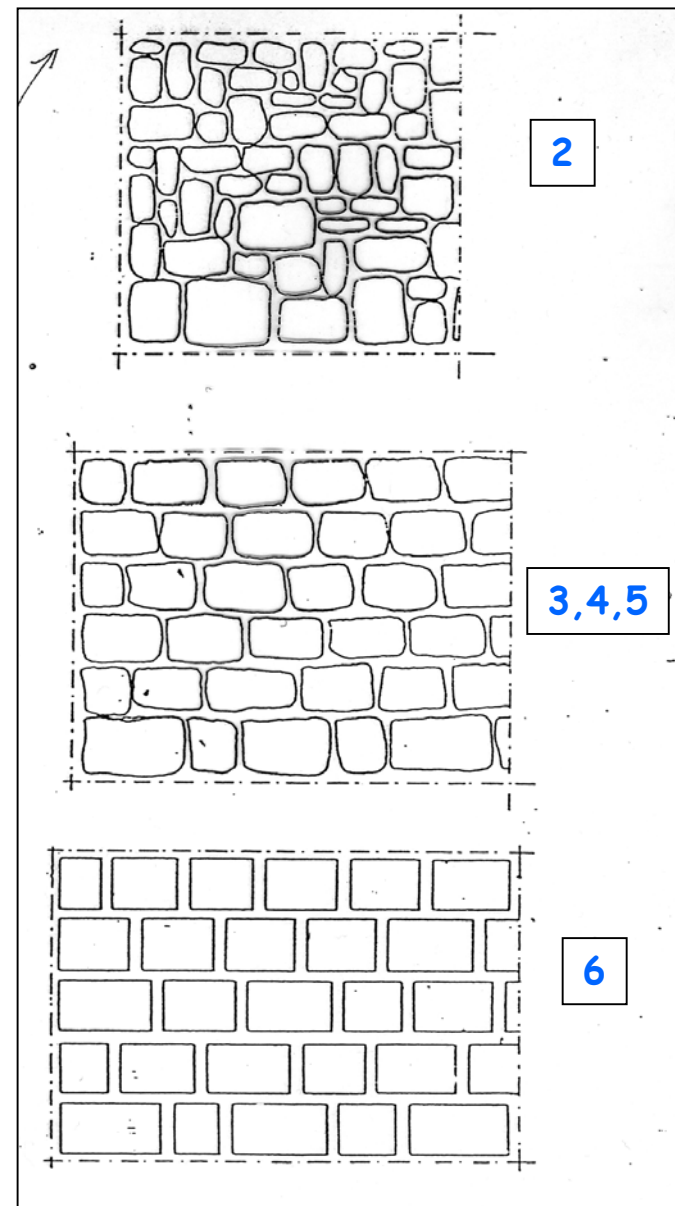
$f_{bk}$  = compressive characteristic resistance  
prescribed in design.

# Resistenza della muratura

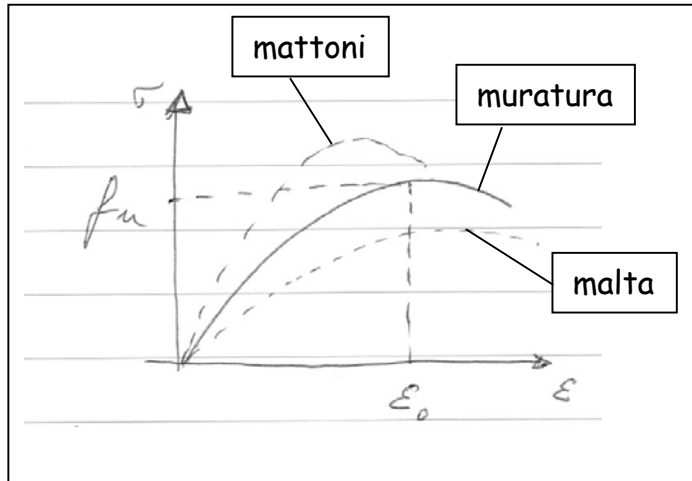
## TIPI DI MURATURA

(Classificazione statica - CESUN 1983)

	TIPO DI MURATURA	$\sigma_{AMM}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]
1	Muratura a secco (senza malta).	1
2	Muratura con pietre alla rinfusa poco lavorate.	2
3	Muratura a strati con pietre lavorate.	3
4	Muratura non regolare a strati o corsi.	4
5	Muratura regolare a strati (es. normale muratura di tufo).	5
6	Muratura a conci di pietra.	6
7	Muratura a conci di pietra con rinforzi in mattoni di laterizio nelle spalle dei vani, negli spigoli, o listata.	7
8	Muratura in pietra da taglio, con blocchi squadrate con cura (quasi senza malta) ma con grappe metalliche.	8
9	Muratura in mattoni di laterizio pieni.	6-10



# Resistenza a compressione della muratura (normale ai letti di malta)



## Fattori influenzanti:

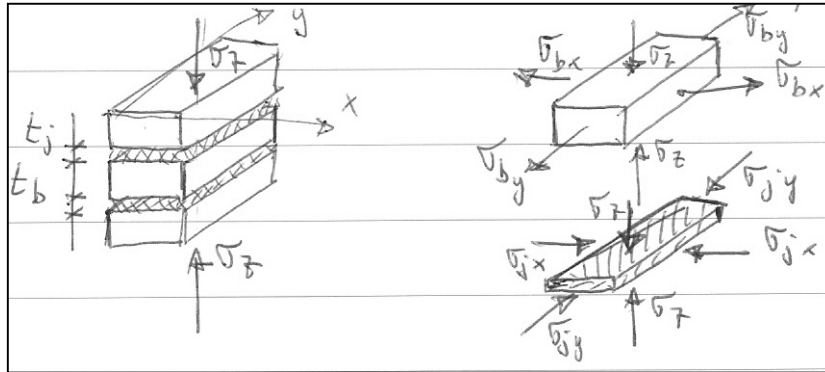
- ELEMENTI (resistenza, geometria, deformabilità)
- MALTA (resistenza, deformabilità, spessore giunti)
- ACQUA (assorbimento mattoni, ritenzione malta)
- GEOMETRIA (tessitura, sistema costruttivo)

## Crisi per compressione:

- Sviluppo progressivo di **fessure verticali** negli elementi (per **trazione ortogonale** alla compressione)
- La trazione è dovuta alla **coazione tra malta ed elementi** a causa del diverso comportamento deformativo
- La malta è confinata dagli elementi e quindi nasce uno stato di **compressione triassiale**
- Per questo motivo la muratura (e quindi anche la malta) può resistere a sforzi di compressione **maggiori della resistenza monoassiale della malta**



# Resistenza a compressione della muratura: modello teorico elastico (Haller, Francis, Tassios...)



## Ipotesi:

- **MATTONI**
- **MALTA**



Omogenei ed isotropi a comportamento elastico lineare

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{bx} &= \frac{1}{E_b} [\sigma_{bx} + \nu_b (\sigma_z - \sigma_{by})] \\ \varepsilon_{by} &= \frac{1}{E_b} [\sigma_{by} + \nu_b (\sigma_z - \sigma_{bx})] \end{aligned} \right\} \text{mattoni}$$

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{jx} &= \frac{1}{E_j} [-\sigma_{jx} + \nu_j (\sigma_z + \sigma_{jy})] \\ \varepsilon_{jy} &= \frac{1}{E_j} [-\sigma_{jy} + \nu_j (\sigma_z + \sigma_{jx})] \end{aligned} \right\} \text{malta}$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{bx} \cdot t_b &= \sigma_{jx} \cdot t_j \xrightarrow{\alpha = t_j/t_b} \sigma_{bx} = \alpha \sigma_{jx} \\ \sigma_{by} \cdot t_b &= \sigma_{jy} \cdot t_j \rightarrow \sigma_{by} = \alpha \sigma_{jy} \end{aligned} \right]$$

$$\varepsilon_{bx} = \varepsilon_{jx} \quad \varepsilon_{by} = \varepsilon_{jy}$$

Equilibrio

Congruenza

Tensione di trazione sui mattoni:

$$\sigma_{bx} = \sigma_{by} = \frac{\alpha (\nu_j - \beta \nu_b)}{1 + \alpha \beta - \nu_j - \alpha \beta \nu_b} \cdot \sigma_z$$

dove:

$$\beta = E_j / E_b$$

# Resistenza a compressione della muratura: modello teorico elastico (Haller, Francis, Tassios..) (cont.)

Ipotesi sulla rottura  
della muratura



La crisi del mattone per trazione ( $\sigma_t$ )  
corrisponde alla rottura della muratura

Tensione di trazione nel mattone



$$\sigma_t = \sigma_{bx} = \sigma_{by}$$

Resistenza a **compressione** monoassiale del mattone



$$f_{bc}$$

Resistenza a **trazione** monoassiale del mattone



$$f_{bt} = \lambda \cdot f_{bc}$$

Criterio di **rottura del mattone**  
(in condizioni triassiali)



$$\frac{\sigma_z}{f_{bc}} + \frac{\sigma_t}{\lambda \cdot f_{bc}} = 1$$

Resistenza della muratura

$$f_u = \frac{1}{1 + \alpha(v_j - \beta v_b)} \cdot \frac{\lambda(1 + \alpha\beta - v_j - \alpha\beta v_b)}{\lambda} \cdot f_{bc}$$

## Aspetti positivi:

- La rottura a compressione deriva dalle coazioni fra i materiali
- Corretta influenza dello spessore dei giunti

## Aspetti negativi:

- Necessaria conoscenza quantitativa delle costanti elastiche ( $v$  ed  $E$ )
- Comportamento elastico lineare fino a rottura

# Resistenza a compressione della muratura: modello teorico elastico (Hilsdorf)

## Stesse ipotesi sul comportamento elastico dei materiali

### Diversa ipotesi sulla rottura della muratura



La rottura della muratura si ha quando contemporaneamente si perviene alla crisi per comp.-trazione dei mattoni e per compressione triassiale della malta

Criterio di rottura del mattone  
(in condizioni triassiali)



$$\frac{\sigma_z}{f_{bc}} + \frac{\sigma_t}{1 \cdot f_{bc}} = 1$$

Criterio di rottura della malta  
(in condizioni triassiali)



$$\sigma_z = f_j + 4,1 \cdot \sigma_{jx}$$

Resistenza a compressione  
monoassiale della malta

### Resistenza della muratura

$$f_m = \frac{f_{bc}}{\mu_m} \cdot \frac{(f_{bt} + \alpha' f_j)}{(f_{bt} + \alpha' f_{bc})}$$

dove:

$$\alpha' = t_j / (4,1 \cdot t_b)$$

$$\mu_m = 1,1 \div 2,5$$

coeff. di non uniformità degli sforzi nel  
mattoni e nei giunti (diminuisce  
all'aumentare della resistenza della malta)



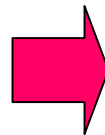
# Resistenza a compressione della muratura: conclusioni sui modelli teorici

- La resistenza **aumenta** all'aumentare di quella dei componenti, ma in modo **non proporzionale**
- Se la **malta** è molto **buona**, l'aumento della **resistenza** degli **elementi** fa aumentare velocemente la resistenza della muratura (se invece la **malta** è **scadente** più lentamente)
- La resistenza della muratura **aumenta** molto più **lentamente** all'aumentare della **resistenza della malta**
- La resistenza **diminuisce** all'aumentare dello **spessore dei giunti** (tanto più quanto più la malta è scadente)

Influenzano la resistenza anche:

- i giunti verticali
- la tessitura degli elementi
- l'esecuzione della malta
- la qualità dei giunti

**(FATTORI EMPIRICI)**



## FORMULAZIONI SEMI-EMPIRICHE

EC6

$$f_k = k \cdot f_b^2 \cdot f_m^\beta$$

Coef. per il tipo di  
elementi (0.4-0.6)

Resistenza  
elementi

Resistenza  
malta

D.M.87

N.T.C.08

Valori tabellati

$F(f_b, f_m)$

- LA RESISTENZA CARATTERISTICA A COMPRESSIONE ( $f_k$ ) SI PUO' DETERMINARE ANCHE IN BASE ALLE CARATTERISTICHE DEI COMPONENTI ( $f_{bk}$  - TIPO DI MALTA) SEMPRECHE':

- I GIUNTI ORIZZONTALI E VERTICALI SIANO RIEPIITI COMPLETAMENTE DI MALTA CON SPESSORE  $5 \text{ mm} \leq \text{SP.} \leq 15 \text{ mm}$ .

TIPO DI MALTA	M4	M3	M2	M1
SOLO PER ELEMENTI NATURALI				
1.5	1.0	1.0	1.0	1.0
2.0	1.2	1.2	1.2	1.2
3.0	2.0	2.2	2.2	2.2
5.0	3.0	3.3	3.4	3.5
7.5	3.5	4.1	4.5	5.0
10.0	4.1	4.7	5.3	6.2
15.0	5.1	6.0	6.7	8.2

( $\text{N/mm}^2$ )

- RESISTENZA CARATTERISTICA A TAGLIO:

$$f_{vk} = f_{vko} + 0.4 \sigma_m < f_{vklim} = 1.4 f_{bk}$$

resistenza caract. a taglio in opera di cordoli verticali

tensione media di compressione

resistenza caract. a compressione in dir. oriz. (solo per elementi artificiali)

SI DETERMINA SPERIMENTALMENTE O IN BASE ALLE CARATTERISTICHE DEI COMPONENTI

	$f_{bk} (\text{N/mm}^2)$	TIPO DI MALTA	$f_{vko} (\text{N/mm}^2)$
MURATURE CON ELEMENTI ARTIFICIALI IN LATERIZIO	$\leq 15$	M1-M2-M3-M4	0.2
	$> 15$	M1-M2-M3-M4	0.3
MURATURE CON ELEMENTI ARTIFICIALI IN CALCESTRUZZO	$\leq 3$	M1-M2-M3	0.1
		M4	0.1
O CON ELEMENTI IN PIETRA NATURALE SQUA.	$> 3$	M1-M2-M3	0.2
		M4	0.1

Resistenza della muratura secondo D.M. 20/11/87  
Valori tabellari

Sostanzialmente confermati dalle N.T.C. 08

Resistenza della  
muratura secondo  
D.M. 20/11/87  
Prove su muretti

### C) TEST FOR MASONRY

- **CHARACTERISTIC COMPRESSIVE STRENGTH ( $f_k$ )**

- IT IS OBTAINED BY TESTING ENTIRE "LITTLE WALLS" ~~CONSTRUCTED~~ BUILT UP IN THE SAME WAY OF THE ACTUAL WALL;
- AT LEAST 6 WALLS ARE TO BE TESTED IN COMPRESSION
- THE CHARACTERISTIC VALUE IS GIVEN BY:

$$f_k = f_m - K s$$

where:

$f_m$  = mean value

$s$  = standard deviation

$K$  = coefficient depending on number of specimens →

$n$	$K$
6	2.33
8	2.19
10	2.10
20	1.93

- **CHARACTERISTIC SHEAR STRENGTH ( $f_{vk0}$ )**

- IT IS OBTAINED BY MEAN OF DIAGONAL COMPRESSIVE TESTS ON "LITTLE WALLS"
- AT LEAST 6 WALLS ARE TO BE TESTED
- THE CHARACTERISTIC VALUE IS GIVEN BY:

$$f_{vk0} = 0.7 f_{vm}$$

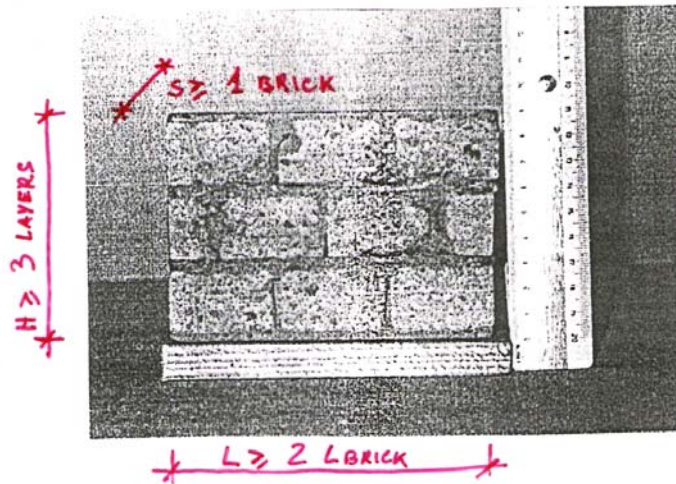
↳ mean value

- THE CHARACTERISTIC OBTAINED VALUES HAVE TO COMPLY WITH THE ONES PRESCRIBED BY DESIGNER



## COMPRESSIVE TEST ON WALL

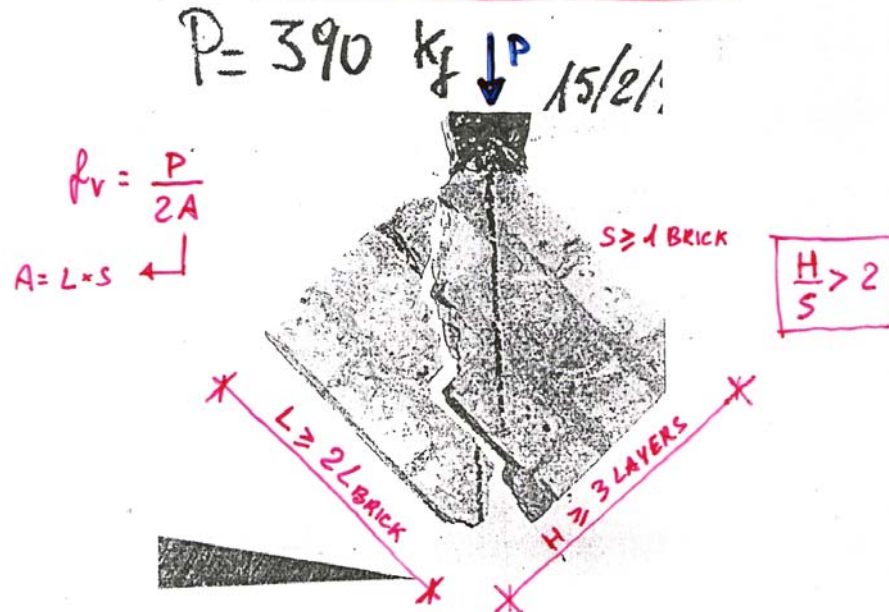
### SAMPLE DIMENSION



$$2.4 < \frac{H}{S} < 5$$

## DIAGONAL COMPRESSIVE TEST ON WALL

### SAMPLE AFTER FAILURE



Resistenza della  
muratura secondo  
D.M. 20/11/87

Prove su muretti

# Resistenza della muratura

Circolare Min.LL.PP. 30/7/81:

"Istruzioni relative alla normativa tecnica per la riparazione..... degli edifici in muratura danneggiati dal sisma"

	TIPO DI MURATURA	$\tau_k$ ( $t/m^2$ )	$\sigma_k$ ( $t/m^2$ )
MURATURE NON CONSOLIDATE NON LESIONATE	Mattoni pieni Malta bastarda	12	300
	Blocco modulare (con caratteristiche rispondenti alle prescrizioni DM 3-3-1975) (29 x 19 x 19 cm) Malta bastarda	8	250
	Blocco in argilla espansa o calcestruzzo Malta bastarda	18	300
	Murature in pietra (in presenza di ricorsi di mattoni estesi a tutto lo spessore del muro, il valore rappresentativo di $\tau_k$ può essere incrementato del 30%)		
	a) pietrame in cattive condizioni	2	50
	b) pietrame grossolanamente squadrato e ben organizzato	7	200
	c) a sacco in buone condizioni	4	150
	Blocchi di tufo di buona qualità	10	250
MURATURE NUOVE	Mattoni «pieni» con fori circolari Malta cementizia $R_m \geq 1450 \text{ t/m}^2$	20	500
	Forati doppio UNI rapp. vuoto/pieno = 40% Malta cementizia $R_m \geq 1450 \text{ t/m}^2$	24	500
MURATURE CONSOLIDATE	Mattoni pieni, pietrame squadrato, consolidate con 2 lastre in calcestruzzo armato da cm 3 (minimo)	18	500
	Pietrame iniettato Murature in pietra a sacco consolidate con due lastre in cls armato da cm 3 (minimo)	$\frac{11}{11}$	$\frac{300}{300}$

# Resistenza della muratura

## OPCM 3431/2005 per gli edifici esistenti

Tabella 11.D.1 Valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura, riferiti alle seguenti condizioni: malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata.

Tipologia di muratura	$f_m$ (N/cm <sup>2</sup> )	$\tau_0$ (N/cm <sup>2</sup> )	E (N/mm <sup>2</sup> )	G (N/mm <sup>2</sup> )	$w$ (kN/m <sup>3</sup> )
	min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	60 90	2,0 3,2	690 1050	115 175	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	110 155	3,5 5,1	1020 1440	170 240	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	150 200	5,6 7,4	1500 1980	250 330	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	80 120	2,8 4,2	900 1260	150 210	16
Muratura a blocchi lapidei squadriati	300 400	7,8 9,8	2340 2820	390 470	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	180 280	6,0 9,2	1800 2400	300 400	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI)	380 500	24 32	2800 3600	560 720	15
Muratura in blocchi laterizi forati (perc. foratura < 45%)	460 600	30,0 40,0	3400 4400	680 880	12
Muratura in blocchi laterizi forati, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2580 3300	430 550	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	2200 2800	440 560	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni	300 440	18,0 24,0	2700 3500	540 700	14

$f_m$  = resistenza media a compressione della muratura

$\tau_0$  = resistenza media a taglio della muratura

E = valore medio del modulo di elasticità normale

G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale

$w$  = peso specifico medio della muratura



# Resistenza della muratura

## OPCM 3431/2005 per gli edifici esistenti

### COEFFICIENTI INCREMENTATIVI

Tabella 11.D.2 Coefficienti correttivi dei parametri meccanici (indicati in Tabella 11.D.1) da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone o ottime; presenza di ricorsi o listature; presenza sistematica di connessioni trasversali; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato.

Tipologia di muratura	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Iniezioni di malta	Intonaco armato
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	1,3	1,5	2	2,5
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	1,4	1,2	1,5	1,7	2
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	1,1	1,3	1,5	1,5
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,5	-	1,5	1,7	2
Muratura a blocchi lapidei squadriati	1,2	-	1,2	1,2	1,2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,5	-	1,3	1,5	1,5
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI)	1,3	-	-	-	1,3
Muratura in blocchi laterizi forati (perc. foratura < 45%)	1,3	-	-	-	1,3
Muratura in blocchi laterizi forati, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	1,3	-	-	-	1,3
Muratura in blocchi di calcestruzzo (perc. foratura tra 45% e 65%)	1,3	-	-	-	1,3
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni	1,3	-	-	-	1,3

Tipologia di muratura	$f_m$ (N/cm <sup>2</sup> )	$\tau_0$ (N/cm <sup>2</sup> )	E (N/mm <sup>2</sup> )	G (N/mm <sup>2</sup> )	w (kN/m <sup>3</sup> )
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadriati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura $\leq 40\%$ )	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

**Resistenza  
della  
muratura**  
Istruzioni  
N.T.C. 08  
per gli edifici  
esistenti

# Resistenza della muratura

## Istruzioni N.T.C. 08 per gli edifici esistenti

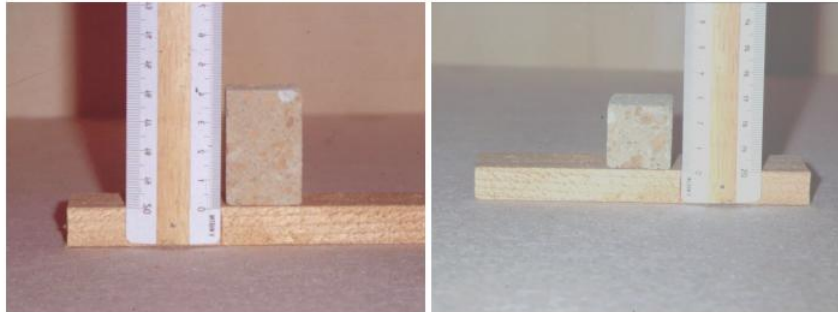
### COEFFICIENTI INCREMENTATIVI E RIDUTTIVI

Tipologia di muratura	Malta buona	Giunti sottili (<10 mm)	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Nucleo scadente e/o ampio	Iniezione di miscele leganti	Intonaco armato *
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	-	1,3	1,5	0,9	2	2,5
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e	1,4	1,2	1,2	1,5	0,8	1,7	2
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	-	1,1	1,3	0,8	1,5	1,5
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,5	1,5	-	1,5	0,9	1,7	2
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	1,2	-	1,2	0,7	1,2	1,2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,5	1,5	-	1,3	0,7	1,5	1,5

\* Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p.es. > 70 cm).

## Mattoncini di tufo giallo napoletano

scala 1/10



$$f_{bm}^1 = 31.4 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{bm}^2 = 40.2 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{bk} = 0.75 \times 40.2 = 30.0 \text{ kg/cm}^2$$

## Malte

- A) – cementizia (M1)
- B) – pozzolanica di calce (<M4)
- C) – premiscelata ad alta resistenza (>M1)



Resistenza a compressione delle malte

Malta	A	B	C
f (MPa)	12.5	1.56	42.5

## Muratura di tufo "moderna"

Prove di resistenza  
sui componenti  
per provini di  
muratura in scala  
ridotta (1/10)



## Resistenza a compressione della muratura



Risultati delle prove di schiacciamento su muretti a filari orizzontali

Malta	Valori di $f_t$ ottenuti nelle singole prove (MPa)								$f_m$ (MPa)	$f_k$ (MPa)
A	2.47	2.77	2.71	3.69	2.92	3.51	-	-	3.01	1.99
B	1.69	1.97	1.63	1.82	1.79	2.21	-	-	1.85	1.36
C	2.34	2.25	2.52	2.28	2.49	2.86	3.17	3.02	2.62	1.85

## Muratura con filari inclinati



Risultati delle prove di schiacciamento su muretti a filari inclinati

Malta	Inclinazione	Valori di $f_t$ ottenuti nelle singole prove (MPa)					$f_m$ (MPa)
A	10°	3.84	2.92	2.61	-	-	3.12
A	20°	3.14	2.34	2.80	-	-	2.76
A	30°	2.92	3.23	2.77	3.60	-	3.13
A	40°	4.09	2.92	2.89	2.92	-	3.21
B	10°	2.25	2.15	-	-	-	2.20
B	20°	2.28	2.55	1.75	-	-	2.19
B	30°	2.62	2.00	2.03	2.09	-	2.18

La variazione della resistenza non è proporzionale alla resistenza della malta

I risultati migliori si ottengono con la malta di qualità media

L'inclinazione dei filari non influenza la resistenza a compressione

## Pilastrini in muratura



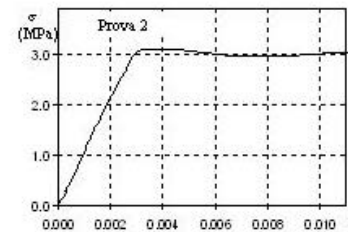
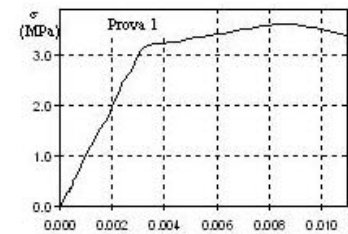
$$f_b = 64 - 72 \text{ kg/cm}^2$$



$$f_{bm} \approx 70 \text{ kg/cm}^2$$

La resistenza è molto influenzata dalla tessitura muraria e dalla forma del provino

## Modulo elastico (prova a deformazione controllata)



$$E_m \approx 10000 \text{ kg/cm}^2$$

## Resistenza a trazione della muratura



$$f_{tm} \approx 3.0 \text{ kg/cm}^2$$

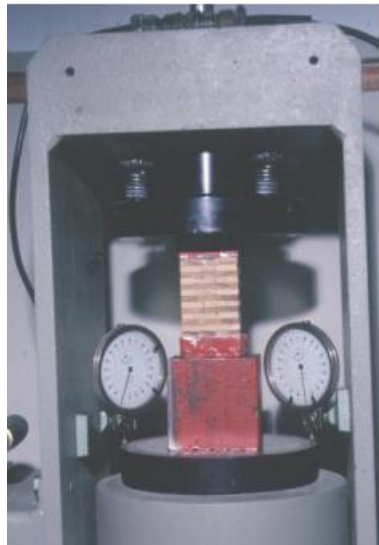
$$\text{solidità: } \rho = f_{tm}/f_{cm} \approx 0.10$$

## Prove di resistenza a compressione su muratura "di legno"

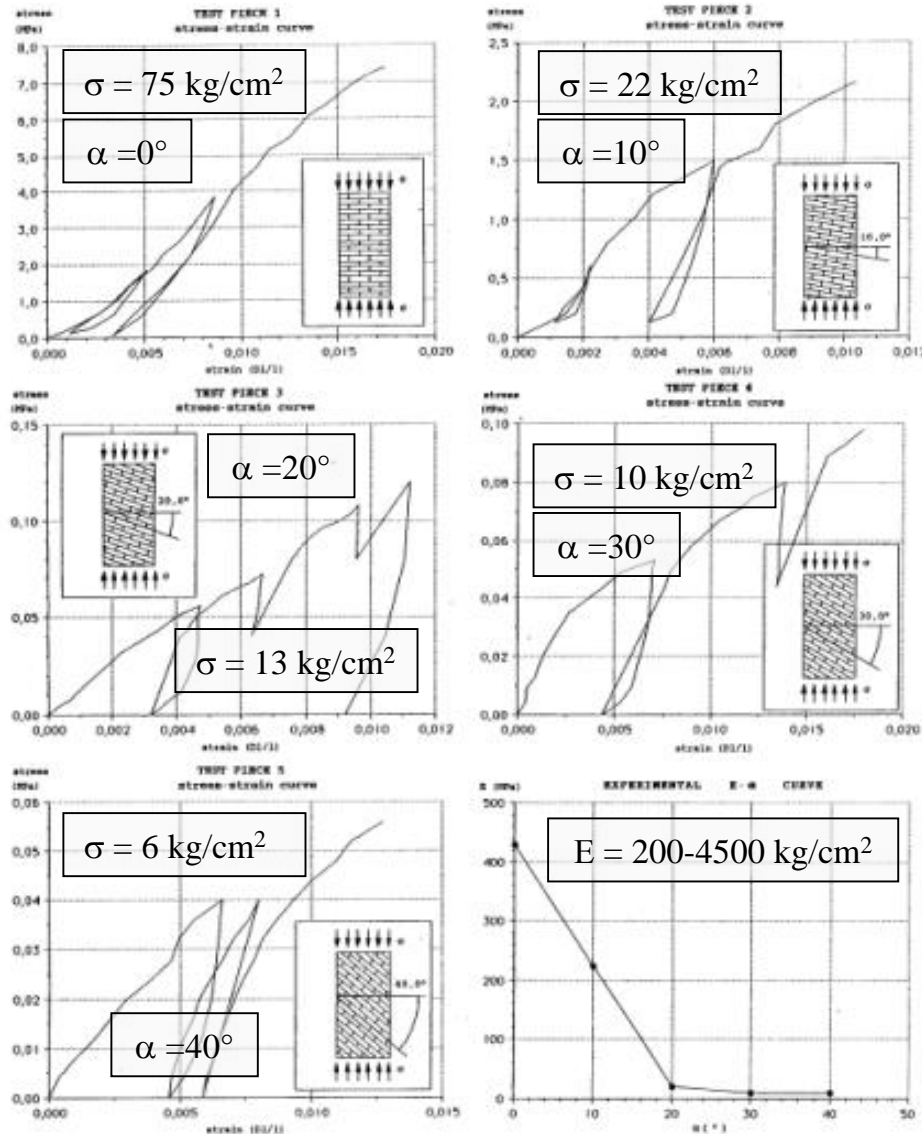




## Prove a compressione



# L'inclinazione dei filari influenza notevolmente la resistenza e la rigidezza



Il comportamento è analogo a quello della muratura di mattoni pieni (blocchi molto più resistenti della malta)

Sia la resistenza ( $\sigma$ ) che il modulo elastico ( $E$ ) si riducono fortemente con l'inclinazione dei filari rispetto alla direzione del carico

# Le murature storiche napoletane in tufo giallo

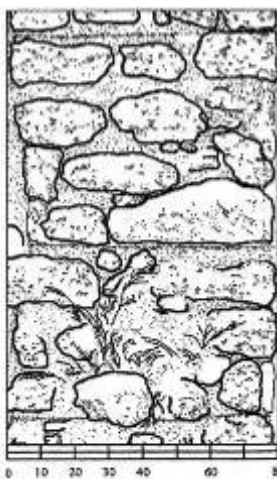
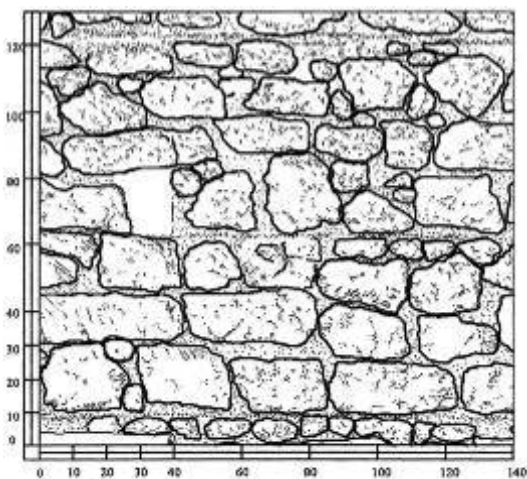


Le murature a  
"cantiere"  
XVI-XVII  
secolo

Pietre a spacco  
unite con strati di  
malta grossolani

La malta di calce è  
realizzata con  
inerti grossi  
(scaglie di pietra)

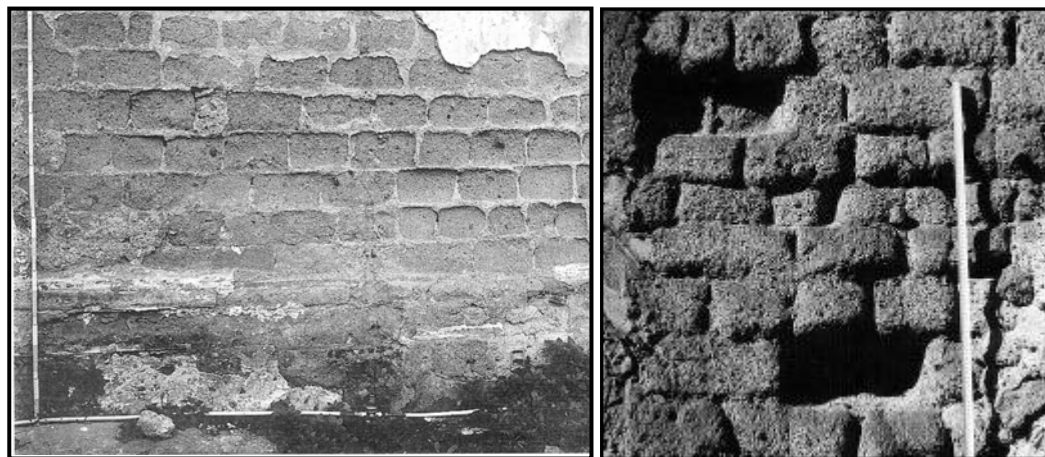
Buona connessione  
trasversale



il cantiere  
35-60 cm



# Le murature storiche napoletane in tufo giallo



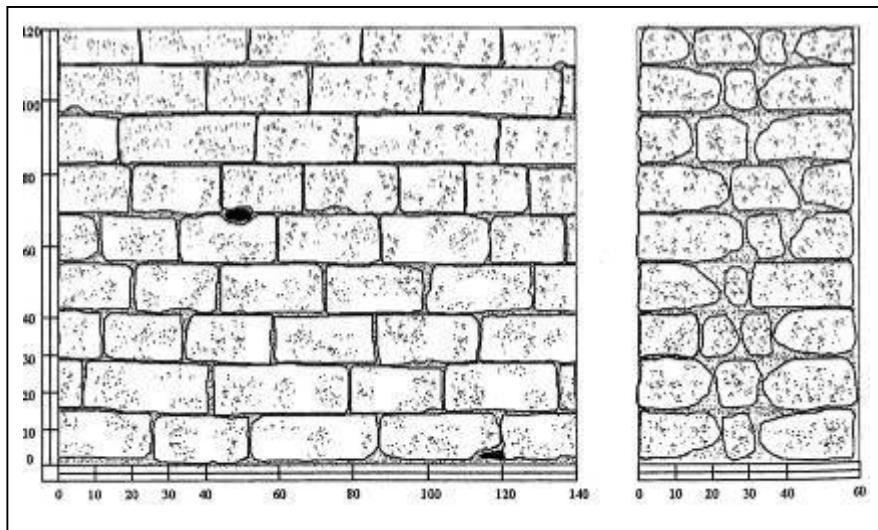
Le murature a  
filari di  
"bozzette"  
XVIII secolo

Pietre lavorate su tre  
facce disposte in filari  
regolari (h=13-15cm)

Malta povera in calce

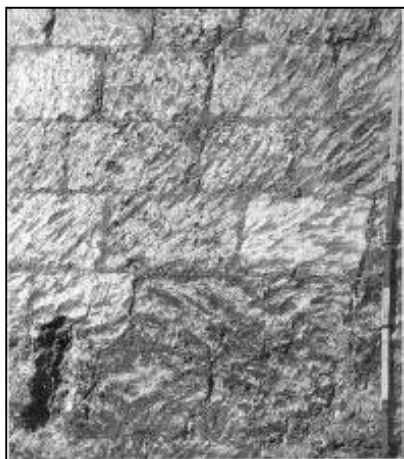
Nucleo interno con  
elementi poco lavorati

Discreta connessione  
trasversale

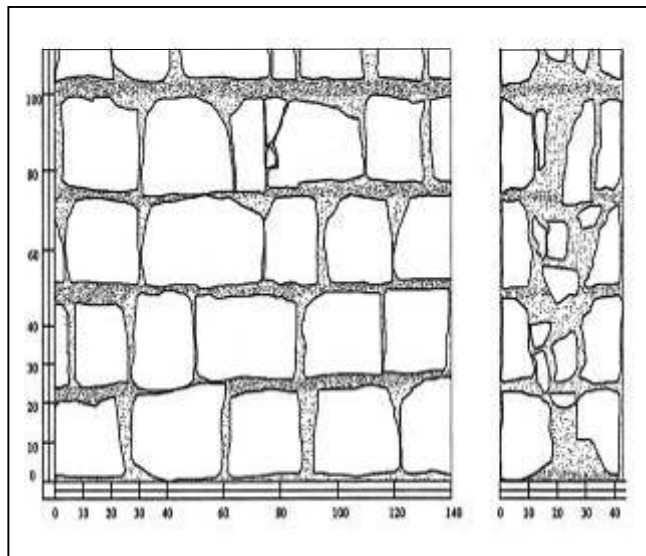




## Le murature storiche napoletane in tufo giallo



Le murature a filari di  
"blochetti a sacco"  
XIX-XX secolo



Pietre lavorate solo sulla faccia  
esterna disposte in filari  
regolari ( $h=20-25\text{cm}$ )

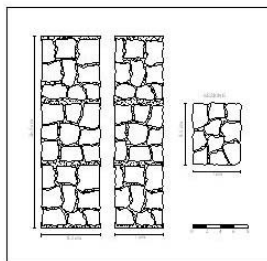
Malta povera in calce

Masso interno con elementi di  
pietrame a spacco, asche e malta

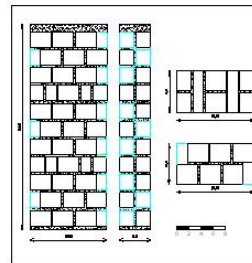
Scarsa connessione trasversale

# Prove di murature storiche napoletane in tufo giallo su provini in scala ridotta (1/10)

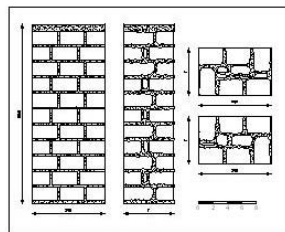
A – Muratura “a cantieri” (secoli XVI e XVII)



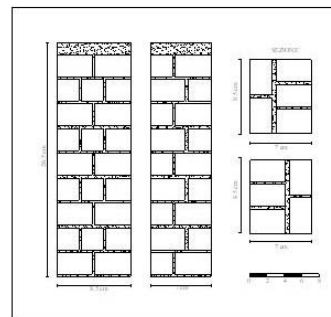
B – Muratura “a bozzette” (secolo XVIII)



C – Muratura “a sacco” (secolo XIX)



D – Muratura ordinaria (secolo XX)



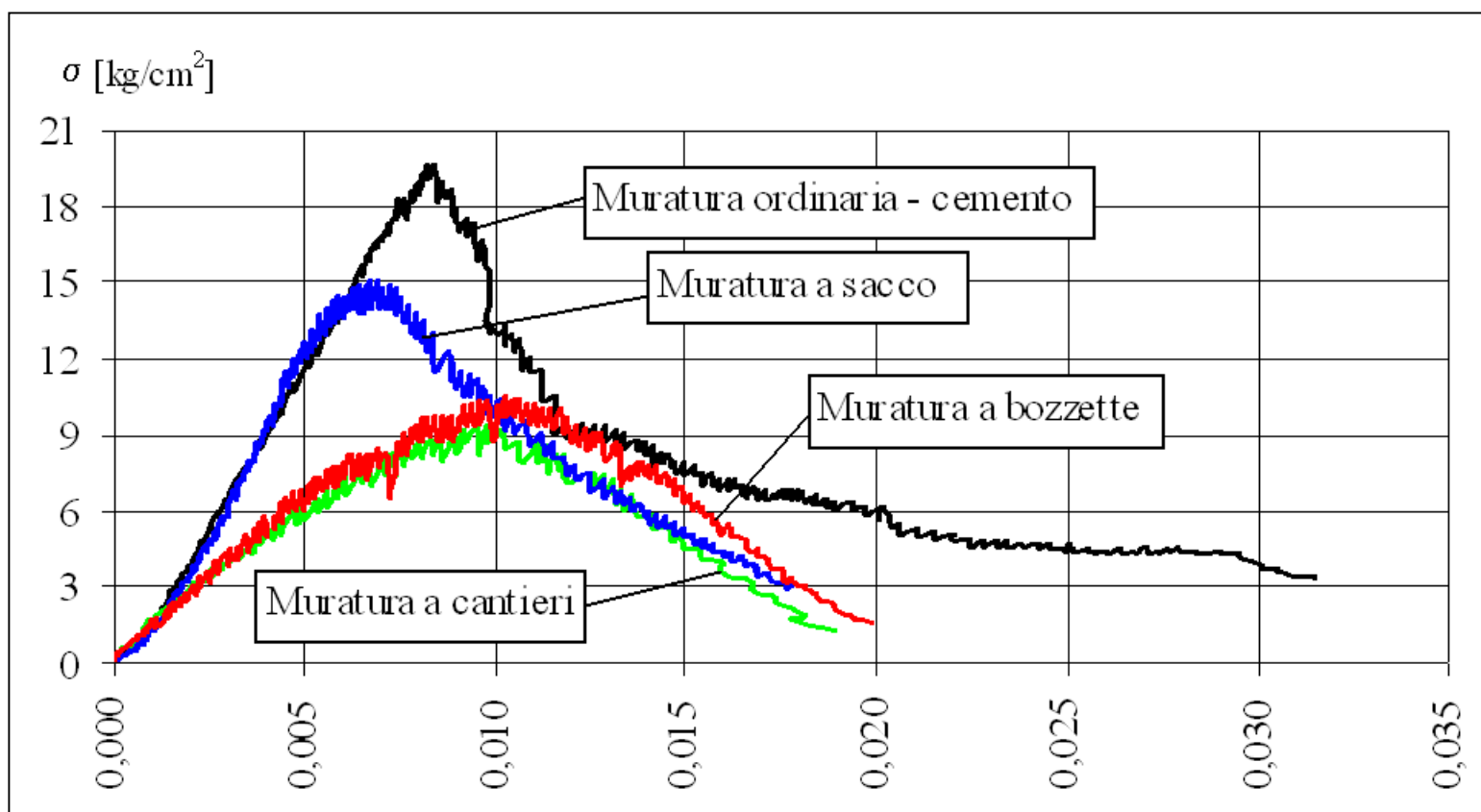
## Prove di compressione a controllo di spostamento



provino	tipologia di muratura	$f_{co}$ [kg/cm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_{co}$	$\varepsilon_{mu}$
1	a cantieri	9.45	0.0098	0.0189
2	a cantieri	5.83	0.0083	0.0183
3	a cantieri	8.57	0.0090	0.0204
4	a sacco	15.01	0.0067	0.0178
5	a sacco	14.89	0.0100	0.0205
6	a sacco	13.97	0.0102	0.0153
7	a bozzette	11.03	0.0062	0.0131
8	a bozzette	15.51	0.0081	0.0143
9	a bozzette	10.90	0.0104	0.0198
10	a bozzette con diatoni	13.38	0.0131	0.0206
11	a sacco	9.61	0.0077	0.0169
12	a cantieri	7.05	0.0045	0.0148
13	a cantieri	8.04	0.0074	0.0181
16	a sacco	6.85	0.0090	0.0210
21	ordinaria	12.97	0.0061	0.0288
22	ordinaria	19.70	0.0084	0.0314
23	ordinaria	13.32	0.0061	0.0225
24	ordinaria	17.22	0.0067	0.0400

## Confronto tra le diverse tipologie di murature storiche

### Diagrammi $\sigma$ - $\varepsilon$ per i provini in scala ridotta





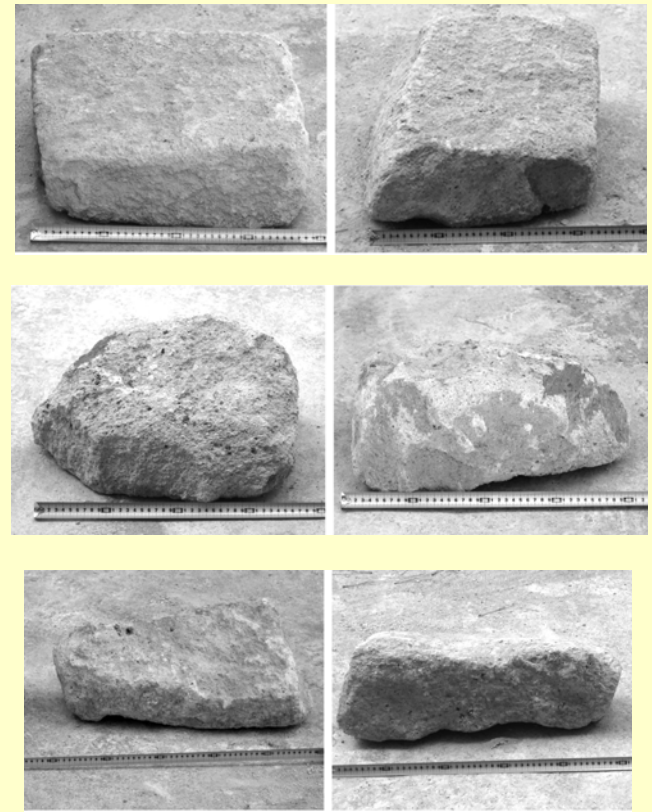
# Prove in scala reale su murature storiche napoletane in tufo giallo

I campioni sono stati preparati con pietre di tufo estratte da cave originarie (XVII-XVIII secolo) o prelevate da costruzioni dell'epoca (XIX secolo)

## Le pietre "di Vanvitelli"

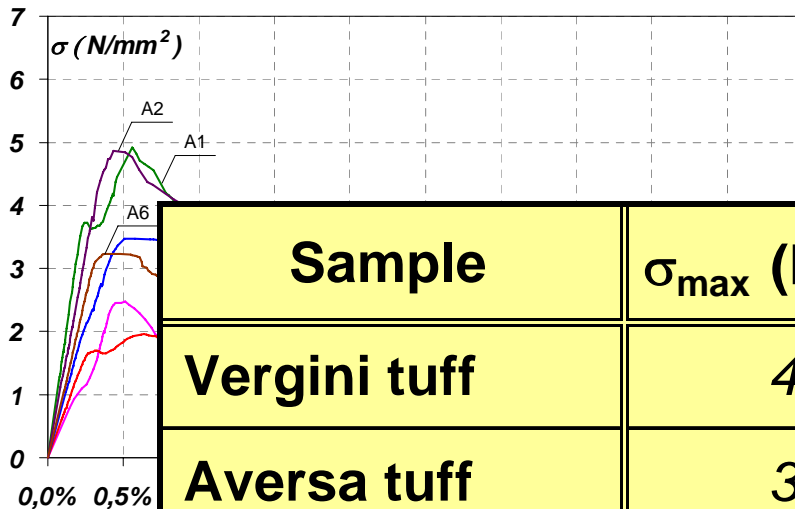


## Le forme delle pietre

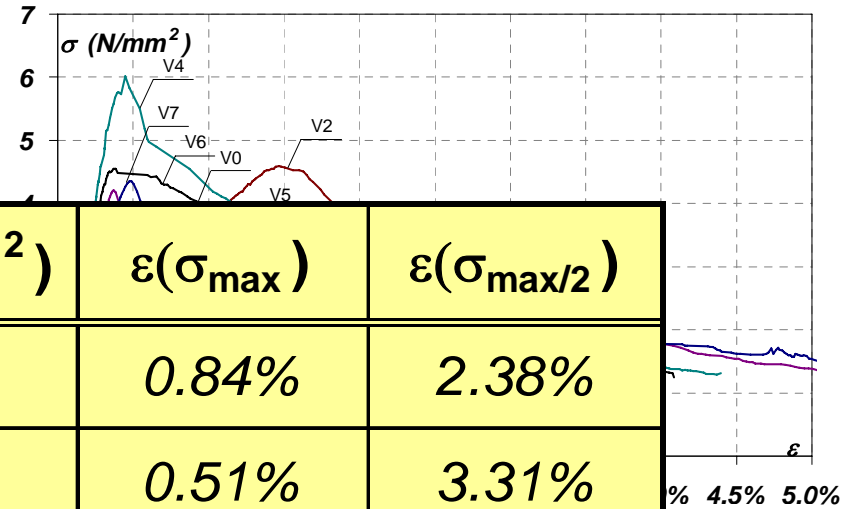


# I risultati delle prove su pietre e malte

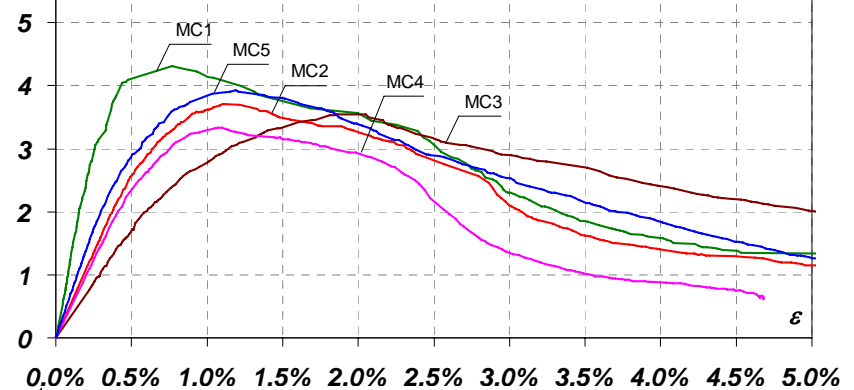
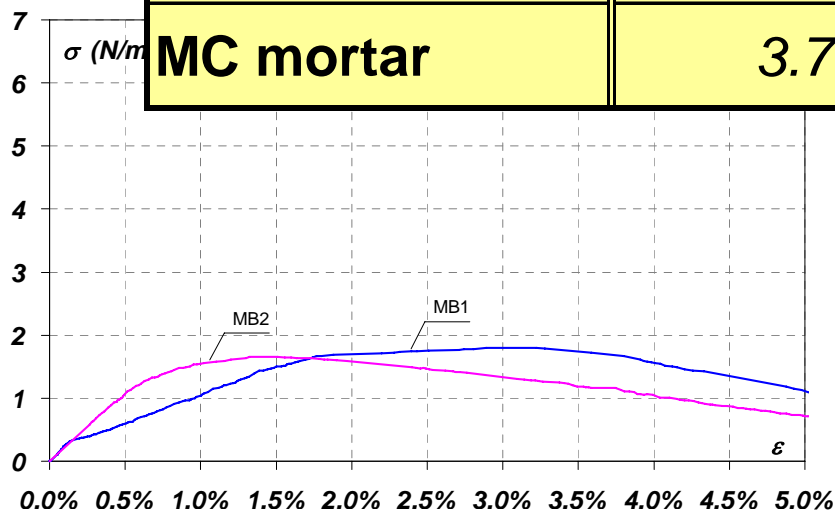
## Tufo di Aversa



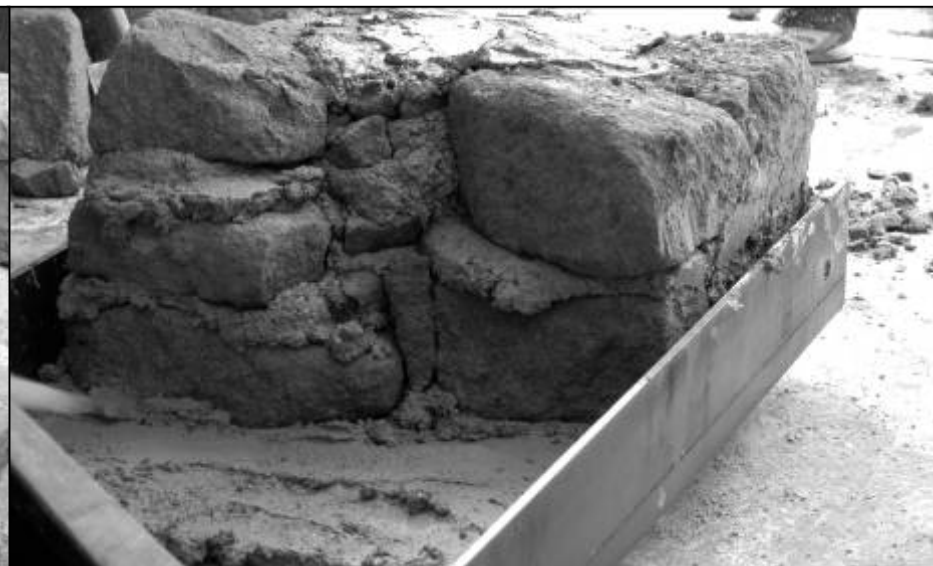
## Tufo dei Vergini



Sample	$\sigma_{\max}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\varepsilon(\sigma_{\max})$	$\varepsilon(\sigma_{\max/2})$
Vergini tuff	4.30	0.84%	2.38%
Aversa tuff	3.49	0.51%	3.31%
MB mortar	1.85	2.90%	5.00%
MC mortar	3.76	1.24%	3.86%



## La costruzione dei provini in muratura "a cantiere"





# La costruzione dei provini in muratura "a filari di bozzette"





# La costruzione dei provini in muratura "a filari di blocchetti a sacco"



# Prove di compressione a controllo di spostamento

Muratura a "cantiere"



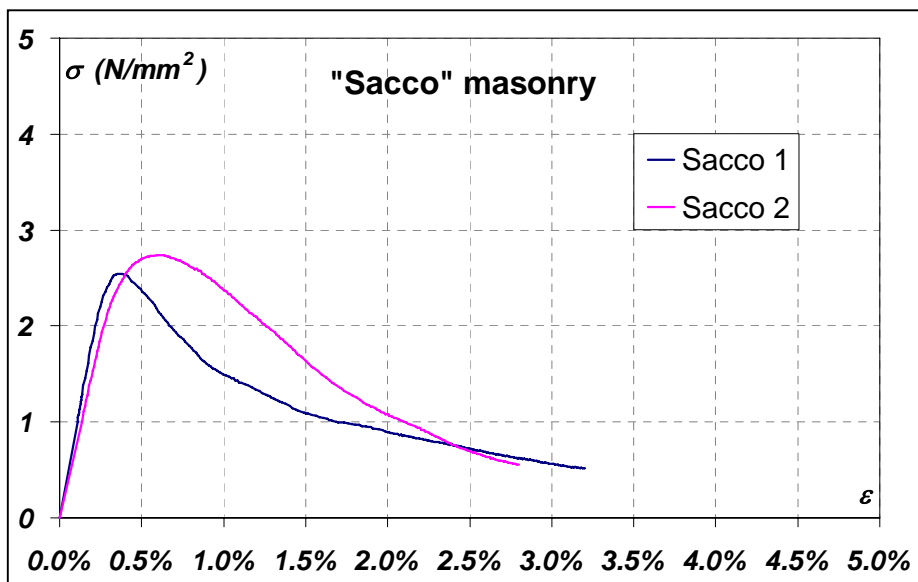
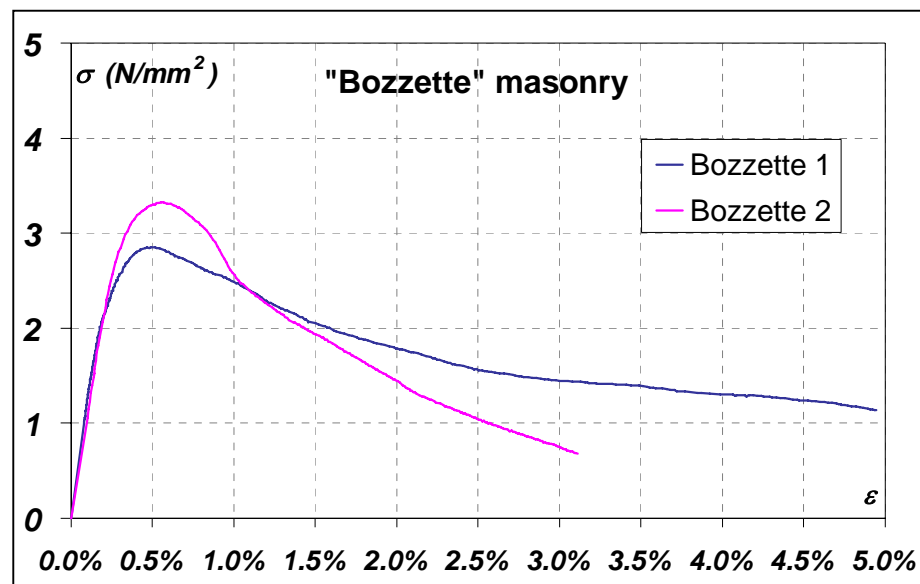
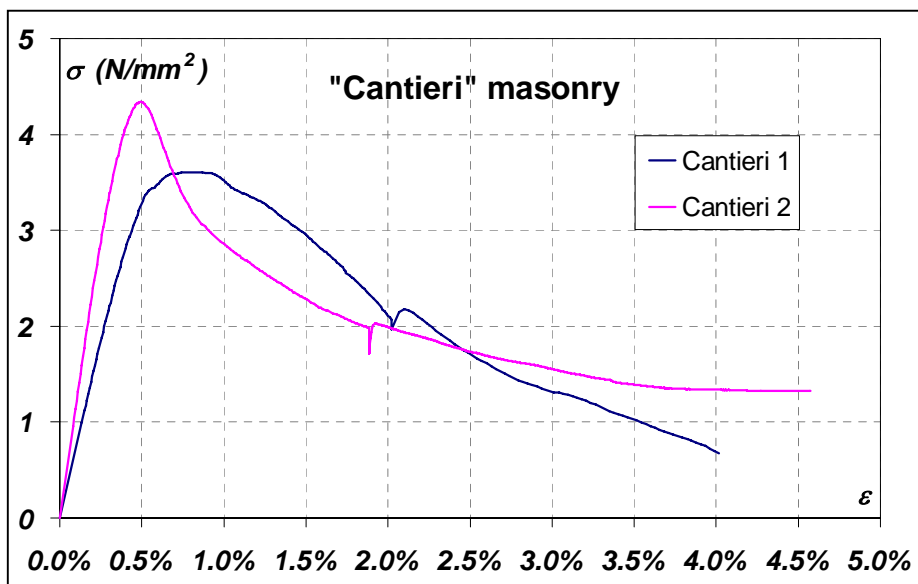
Muratura a "bozzette"



Muratura a "sacco"



# Diagrammi $\sigma$ - $\varepsilon$ per i campioni in scala reale



Resistenza massima  
 $2.55 \div 4.34 \text{ N/mm}^2$

$\varepsilon(\sigma_{\max}) = 0.35 \% \div 0.88 \%$

Modulo elastico  
 $(240 \div 380) \times \sigma_{\max}$

Deformazione massima ( $\sigma = \sigma_{\max}/2$ )  
 $1.26 \% \div 3.10 \%$

## Formulazione teorica dei diagrammi $\sigma$ - $\varepsilon$

Si basa sui parametri meccanici sperimentali:  $\sigma_{max}$  -  $\varepsilon_p$  -  $\sigma_u$  -  $\varepsilon_u$

Per  $0 < \eta < 1.2$  si utilizza il modello valido per il cls (EC2)

$$\sigma = \left[ \frac{(K \cdot \eta - \eta^2)}{[1 + (K - 2) \cdot \eta]} \right] \cdot \sigma_{max} \quad K = 1.35 \cdot \frac{E_o \cdot \varepsilon_p}{\sigma_{max}} \quad \eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \quad [1]$$

$E_o$  modulo secante all'origine  
 $\varepsilon_p$  deformazione di picco

$\sigma_{max}$  resistenza di picco  
 $\varepsilon_u$  deformazione ultima

Per  $\eta > 1.2$  (ramo decrescente)

$$\sigma = \sigma_{max} [a \cdot \ln(\eta) + b] \quad a = \frac{1}{\sigma_{max}} \left[ \frac{\sigma_u - \sigma_s}{\ln \eta_u - \ln(1.4)} \right] \quad b = \frac{\sigma_s}{\sigma_{max}} - a \cdot \ln(1.2) \quad \eta_u = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_p}$$

$\sigma_s$  tensione ottenuta dalla [1] per  $\eta = 1.2$

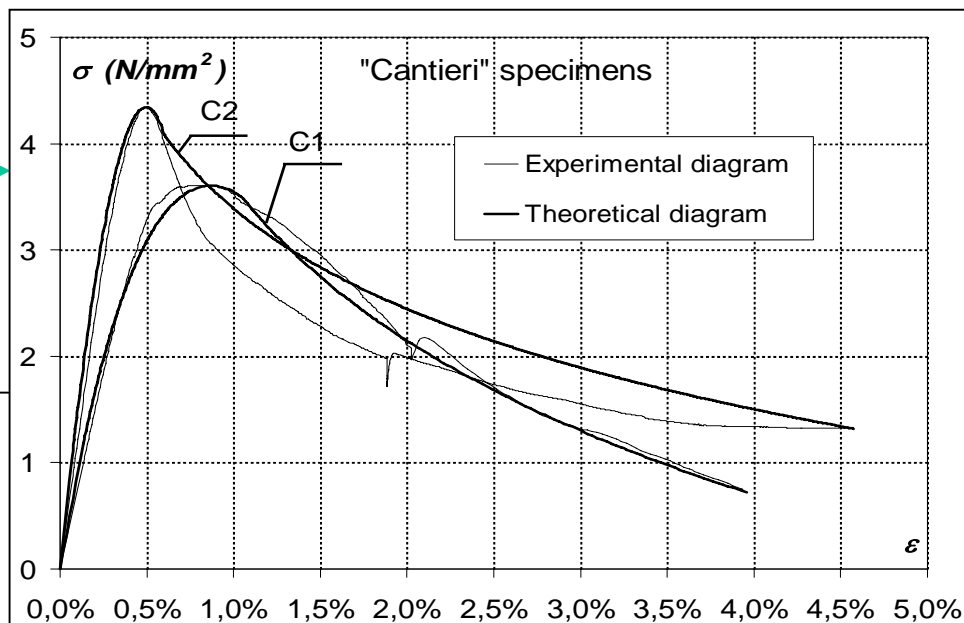
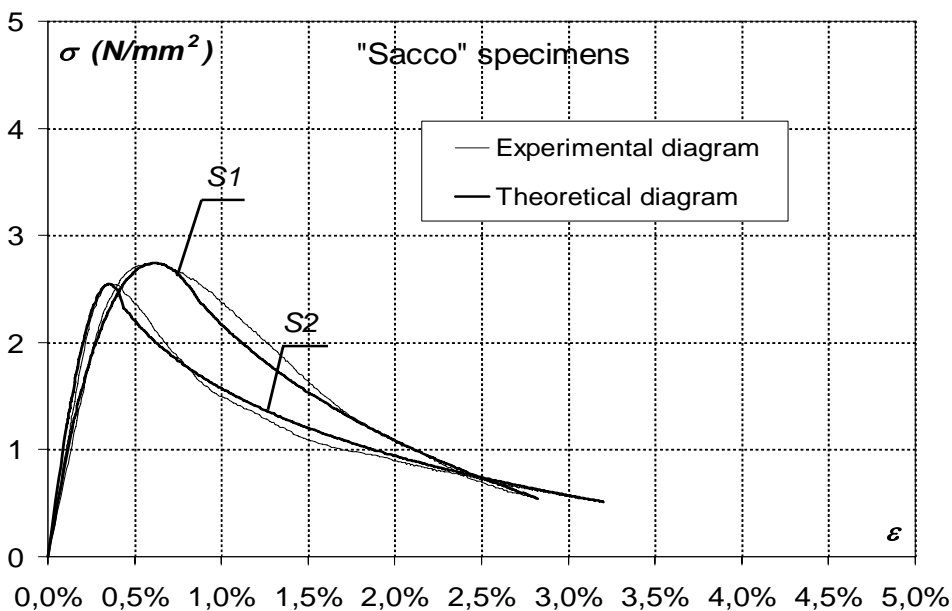
$\sigma_u$  tensione corrispondente alla deformazione ultima



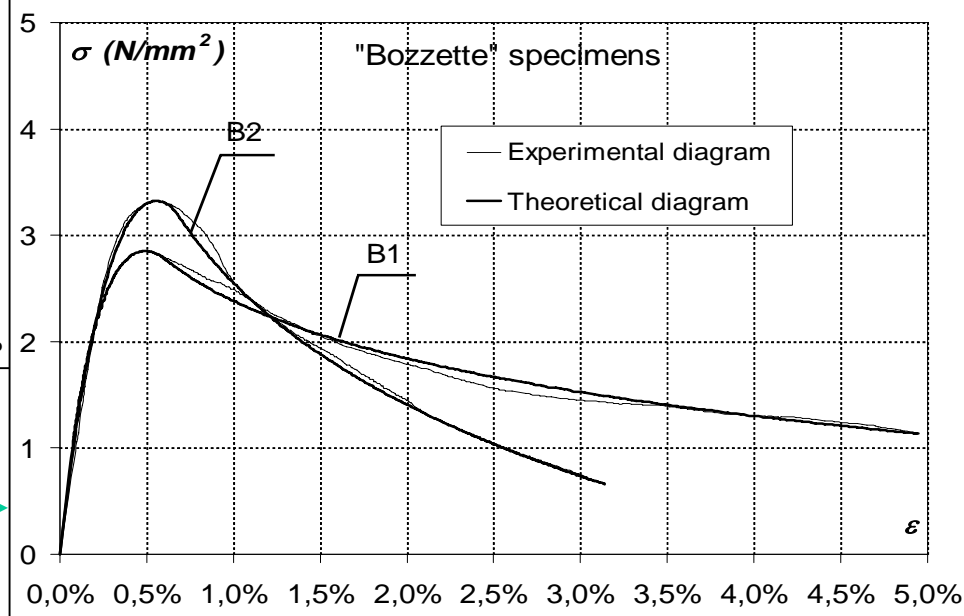
# Diagrammi $\sigma$ - $\varepsilon$ teorici e sperimentali - confronto

Muratura a "cantiere"

Muratura a "sacco"

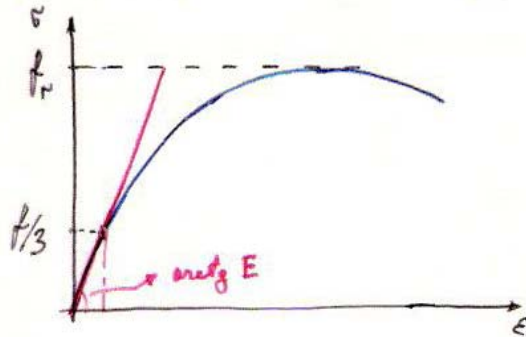


Muratura a "bozzette"



## CARATTERISTICHE DI DEFORMAZIONE

### • DIAGRAMMA $\sigma$ - $\epsilon$ SPERIMENTALE



- MODULO DI ELASTICITA'  $E$  (a breve termine)

• DALLE PROVE SPERIMENTALI:

$E \rightarrow$  MODULO SECANTE AD UN TERZO DI  $f_r$

• DA VALUTAZIONI EMPIRICHE:

$$E = 1000 f_k \quad G = 0.4 E \quad \left( \frac{E}{G} = 2.5 \right)$$

### • DIAGRAMMA $\sigma$ - $\epsilon$ DI PROGETTO

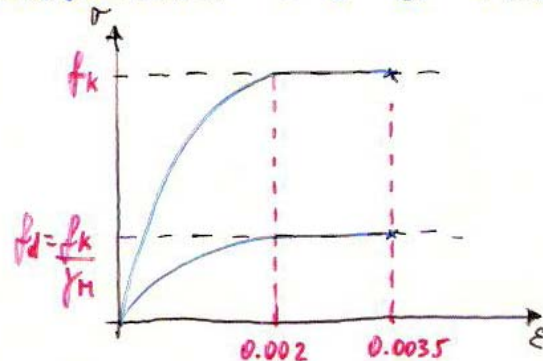


Diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$   
secondo EC6

Da utilizzarsi per  
la muratura  
armata