

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale

**Impostazione delle recenti normative  
per le costruzioni in muratura esistenti:  
rilevo, prove in situ e livelli di  
conoscenza.**

**Prof. Giuseppe Campione**



**Giornata di Studio Ordine Ingegneri di Trapani 27 maggio 2011**

# INTRODUZIONE

Per gli edifici esistenti, la valutazione dello stato di fatto assume un ruolo imprescindibile nella corretta progettazione dell'intervento di miglioramento o adeguamento e richiede che vengano acquisite informazioni su molteplici aspetti della costruzione, inclusi dati dimensionali relativi a elementi strutturali, difetti locali presenti nei materiali o nei particolari costruttivi, collegamenti e caratteristiche meccaniche dei materiali impiegati.

La quantità e qualità dei dati raccolti attraverso varie fonti determina il metodo di analisi e l'onerosità dei coefficienti parziali di sicurezza da impiegarsi nel calcolo.

L'acquisizione dei dati può avvenire anche attraverso prove e verifiche da svolgersi direttamente in sito sui materiali e particolari costruttivi.

## RIFERIMENTI NORMATIVI

Le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/1/2008) e le relative Istruzioni (Circ. Min. n. 617 del 2/2/2009) adottano per le costruzioni in zona sismica l'impostazione concettuale dell'OPCM e dell'Eurocodice 8, delineando principi generali che necessitano di criteri e metodologie applicative specifiche per i vari sistemi costruttivi e per le varie tipologie strutturali.

In questo ambito, particolare importanza ricopre la fase di conoscenza della struttura esistente sia in termini di caratteristiche geometriche e tecnologiche che di proprietà meccaniche dei materiali. Il livello di conoscenza influenza sia i metodi di calcolo che possono essere impiegati che i valori delle resistenze dei materiali tramite opportuni fattori di confidenza.

Le particolari caratteristiche delle strutture esistenti possono richiedere in molti casi l'applicazione di metodi di calcolo non lineari per l'analisi del comportamento sotto azione sismica.

Le prove distruttive e non distruttive sono ammesse a questi scopi e ad oggi metodologie e tecniche di indagine diversificate sono disponibili per eseguire prove anche su edifici esistenti in muratura, in maniera efficace, affidabile ed economica, allo scopo di fornire dati utili allo strutturista.

Tra le principali, si nominano:

- l'endoscopia;
- le prove con i martinetti piatti;
- compressione diagonale in situ;
- i microcarotaggi;
- lo sclerometro;
- il penetrometro.



(Hotel Patria Palermo)

Una delle principali finalità della valutazione in situ delle proprietà meccaniche delle murature è quella di fornire legami costitutivi, costanti elastiche e valori di resistenza ultima da utilizzare come dati d'ingresso per l'applicazione di codici di calcolo a elementi finiti.

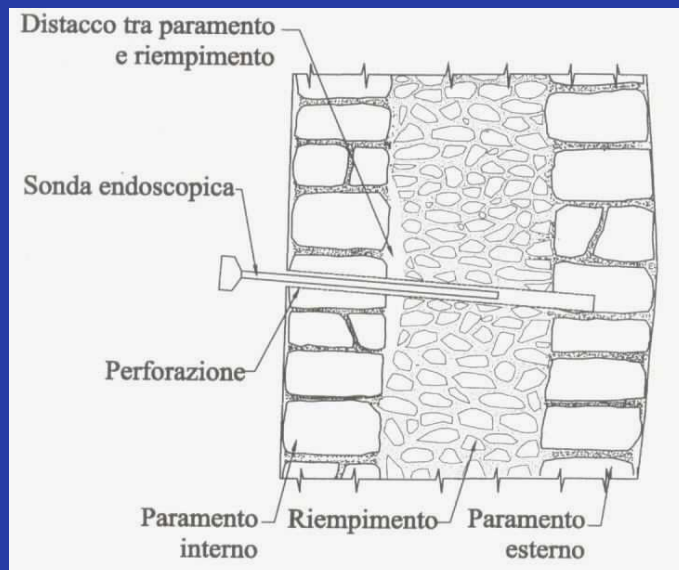
Questo approccio può fornire risultati significativi se ricorrono le condizioni per impiegare tecniche di omogeneizzazione, che permettono di trattare la muratura come solido omogeneo, con proprietà meccaniche globali.

Conseguentemente, è necessario avere una prima informazione della situazione complessiva della struttura muraria in esame. Infatti è molto frequente la presenza, nelle strutture esistenti, di zone di muratura costruite in tempi diversi e con tecniche e materiali differenti, per effetto di ampliamenti, ristrutturazioni precedenti, chiusura di aperture, costruzione di nuovi paramenti in appoggio a murature preesistenti ed altro ancora.

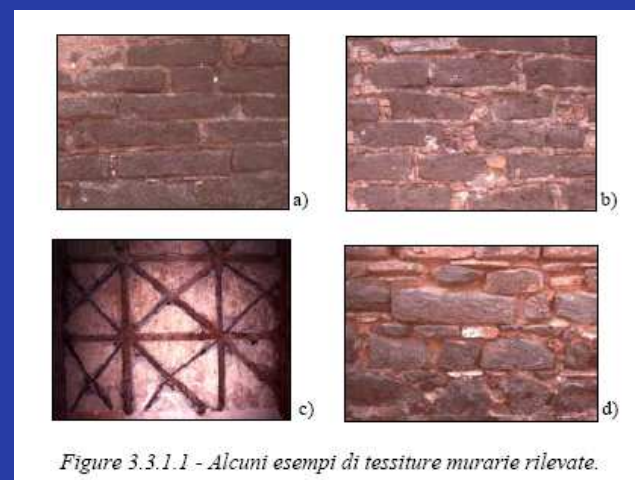
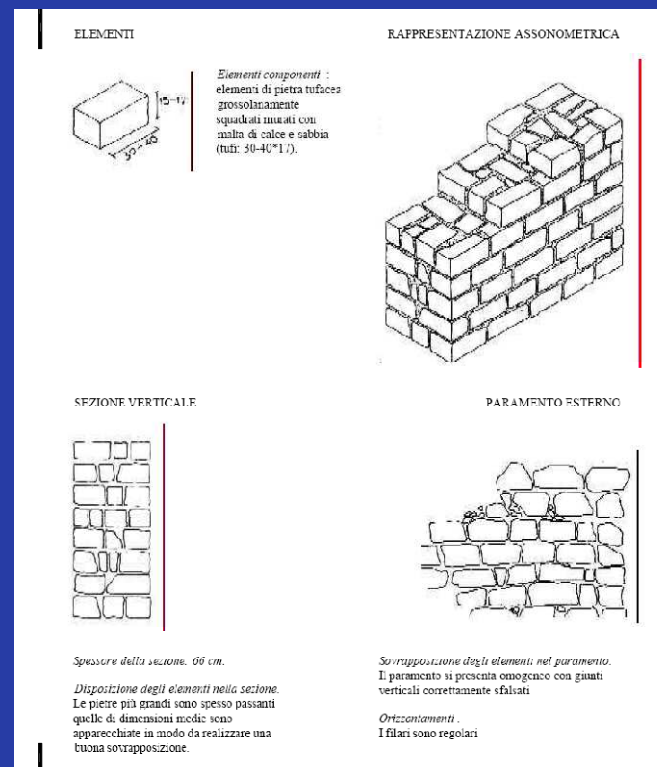
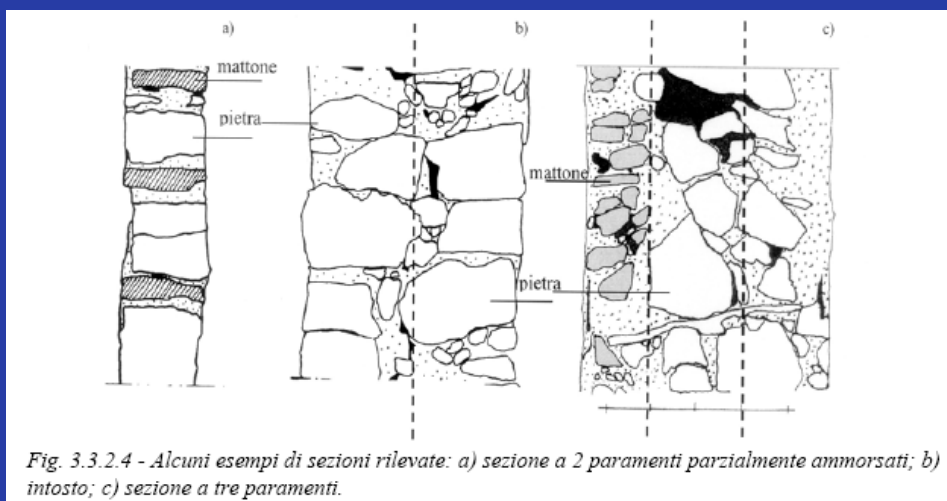
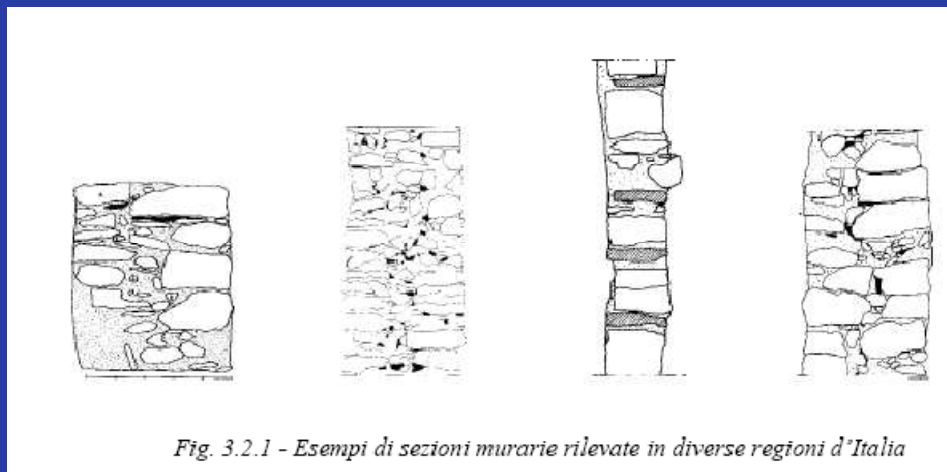
A questo scopo la prima indagine deve essere di tipo visivo, con analisi e documentazione fotografica delle diverse tipologie di muratura e della loro localizzazione e misura degli spessori. In questa fase possono essere di grande aiuto le riprese fotogrammetriche, che permettono di ottenere un rilievo spaziale della struttura e di definire con buona precisione irregolarità, cedimenti e fuori-piombo.

Tecniche come la termografia e il georadar sono molto efficaci per l'individuazione di disomogeneità, vuoti, inclusioni, soprattutto quando l'indagine visiva e il rilievo sono ostacolati dalla presenza di intonaci e rivestimenti. Altre tecniche utilizzabili a questo fine sono quelle basate sulla propagazione di onde elastiche, come le indagini ultrasoniche, soniche e impact-echo.

L'endoscopia è una tecnica molto utile per esaminare “dall'interno” i paramenti murari per studiarne la struttura intrinseca e la presenza di difetti, per individuare cavità, canne fumarie, intercapedini, nicchie ed altro.



# Esempi di tessiture murarie rilevate



# Esempi di strutture in muratura esaminate



## PROVE SULLE MURATURE

### Prove meccaniche su campioni estratti

In linea di principio, da una muratura esistente si potrebbero ricavare campioni di muratura simili a quelli prescritti dalle norme tecniche per prove di compressione o di taglio. In realtà, è abbastanza raro che si riescano a prelevare campioni indisturbati, e quindi rappresentativi. Le operazioni di prelievo vengono normalmente eseguite con motoseghe adeguate a materiali lapidei, ma durante il taglio e l'estrazione si possono provocare distacchi tra malta e mattone. Anche il trasporto può essere causa di danneggiamento. In edifici di particolare pregio architettonico, poi, il prelievo di campioni è improponibile.

### Prove con martinetti piatti

Nella tecnica con due martinetti, questa prova permette di mettere in compressione una porzione di muratura senza estrarla. Strumentando opportunamente la zona in esame, è possibile definire il legame costitutivo della muratura, stimare le costanti elastiche medie e valutare la tensione di prima fessurazione.

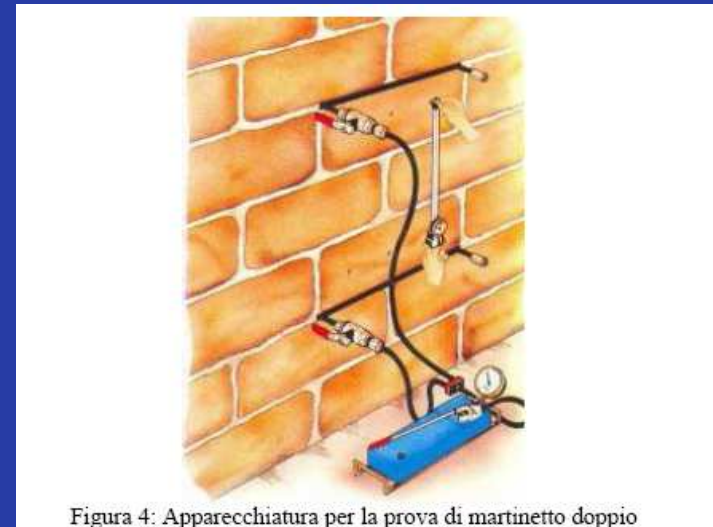
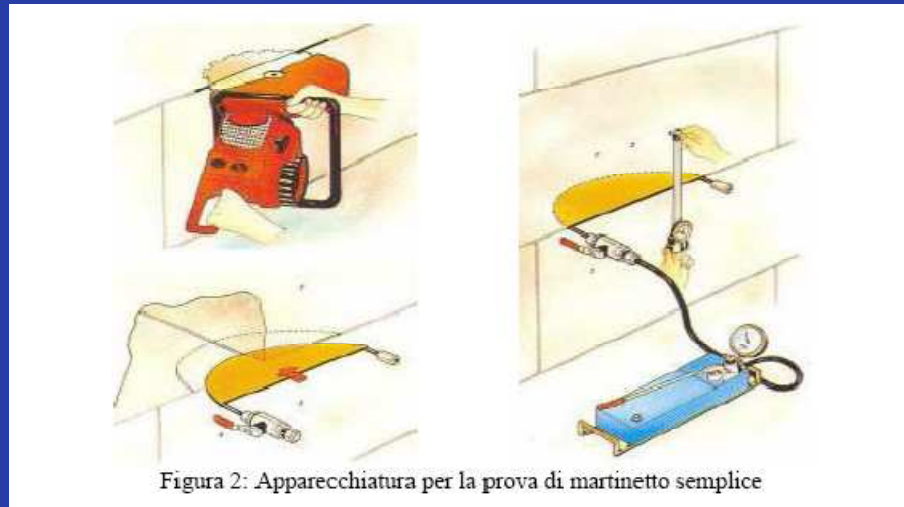
Un altro aspetto conoscitivo importante è quello legato alla valutazione dello stato di sollecitazione esistente. A volte infatti possono essere presenti stati di sollecitazione anomali, dovuti a cedimenti delle fondazioni, spinte di coperture, aperture ricavate in tempi successivi alla costruzione, fessurazioni e degradi localizzati. Si tratta di valutazioni non sempre possibili, e comunque generalmente difficili. E' noto infatti a chi si occupa di sperimentazione che la tensione non è una grandezza fisica misurabile direttamente.

Le tecniche che permettono di ottenere informazioni su uno stato di tensione esistente sono quelle basate sul "rilascio delle tensioni". Si tratta cioè di misurare le deformazioni conseguenti all'annullamento della tensione presente in una zona della muratura.

PROVE CON I MARTINETTI PIATTI

Il metodo di più comune impiego a questo fine è quello del martinetto piatto, che, nella tecnica ad un solo martinetto, permette appunto di ottenere una stima della componente normale di tensione nella direzione ortogonale ai giunti di malta. Nella versione con martinetto doppio lo scopo della prova è quello di:

- Distinguere la fase essenzialmente elastica da quella caratterizzata da deformazioni irreversibili;
- Individuare il modulo elastico della muratura;
- Individuare la tensione di prima fessurazione;
- Individuare la tensione di collasso del blocco murario.



## MARTINETTO PIATTO SINGOLO

L'indagine con il martinetto piatto singolo consiste nell'eseguire un taglio in un elemento strutturale (malta) per poi applicare sulle superfici del taglio una pressione nota che porti al ripristino delle condizioni iniziali del corpo.

L'esecuzione di un taglio piano in direzione normale alla superficie di un elemento provoca una richiusura dei lembi della fessura; introducendo un martinetto piano all'interno della fessura (ossia introducendo una tasca metallica molto sottile nella quale si può iniettare olio a pressione nota) è possibile riportare i lembi della fenditura nelle condizioni iniziali.

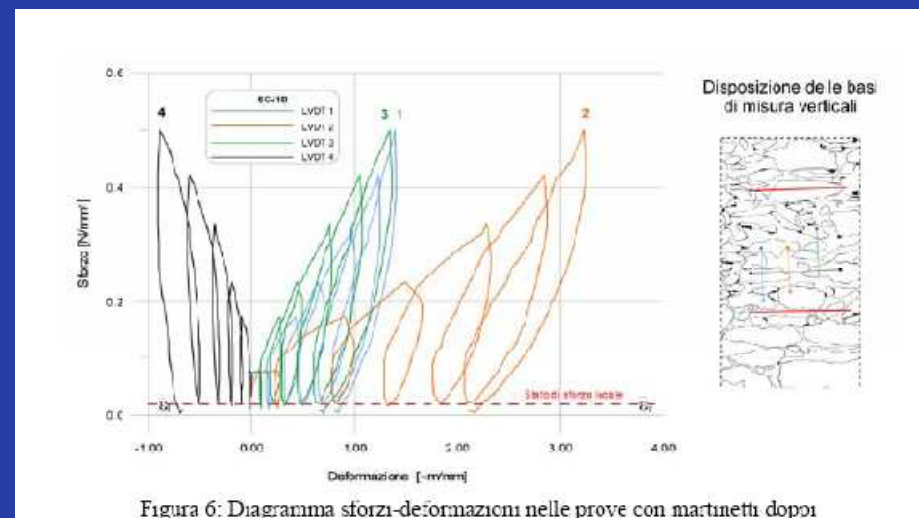
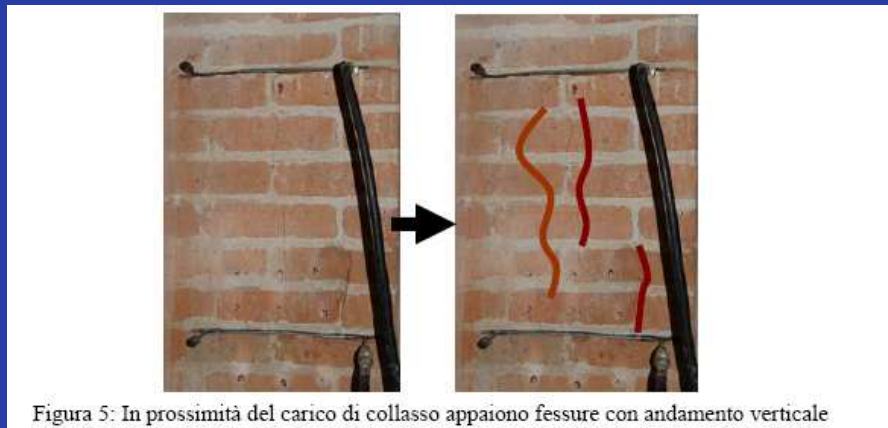
Dalla forza esercitata del martinetto per ripristinare la situazione iniziale è possibile individuare lo stato tensionale originariamente presente nella muratura (in situ stress). Si tratta in definitiva di una applicazione del metodo di "liberazione delle tensioni" già noto in altri settori di ricerca.



Figura 1: Taglio, installazione del martinetto singolo e lettura della convergenza a cavallo del taglio

## MARTINETTO PIATTO DOPPIO

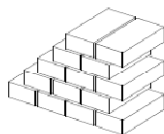
L'indagine con doppio martinetto piatto si basa sul fatto di eseguire due tagli paralleli nella muratura a debita distanza, indicativamente da 40 a 80 cm, a seconda della muratura, all'interno dei quali posizionare due martinetti piatti. Mandando contemporaneamente in pressione i due martinetti si provoca uno stato di tensione monoassiale sulla porzione di muratura compresa fra i due martinetti, riproducendo quindi una prova in condizioni simili a quelli di un test uniassiale convenzionale. La misura degli spostamenti va effettuata con comparatori collocati nella zona compresa tra i due martinetti. La prova può proseguire fino al raggiungimento di pressioni molto superiori a quelle iniziali, in modo da ottenere indicazioni sulle caratteristiche di resistenza a collasso della muratura.



# COMPRESSIONE DIAGONALE IN SITU

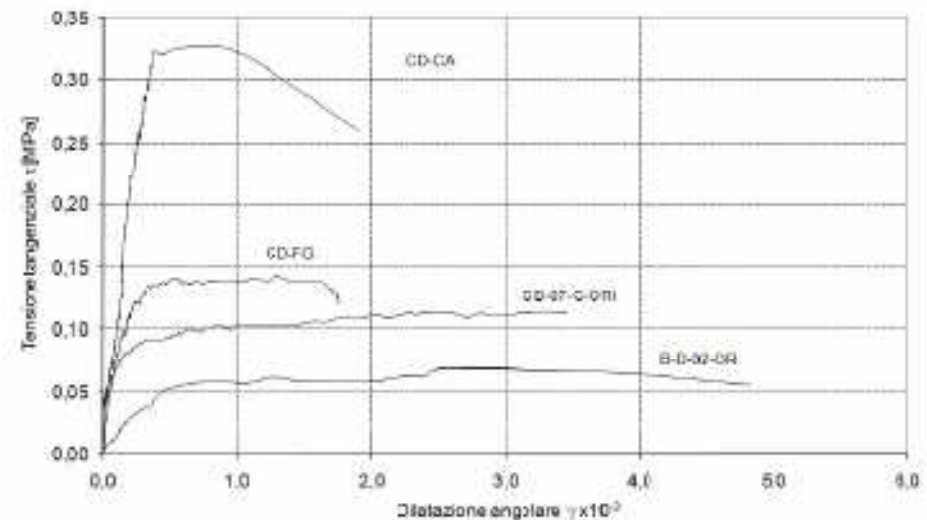
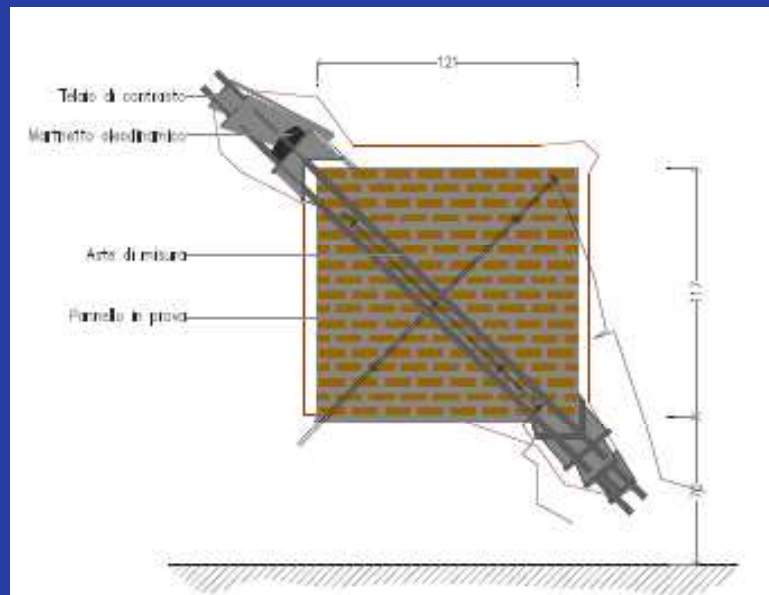
La prova di compressione diagonale, analogamente alla prova di taglio-compressione, ha il fine di determinare la resistenza e la rigidezza a taglio di pannelli in muratura. La prova, nella versione di laboratorio, è codificata dalle specifiche statunitensi ASTM E 519-81, ed è generalmente realizzata su pannelli quadrati di dimensioni 120x120 cm e di spessore mediamente variabile tra 20 e 60 cm.

Nella versione in situ il pannello viene isolato dalla parete circostante mediante quattro tagli realizzati con filo diamantato o con sega circolare. La prova in situ si differenzia da quella di laboratorio per la parte inferiore di pannello che resta ammorsata alla muratura della parete per una lunghezza di circa 50 cm; analisi teoriche e numeriche hanno tuttavia indicato che tale ammorsatura, almeno in fase elastica, ha influenza trascurabile sui risultati.



L'attrezzatura di prova consiste in una serie di elementi in acciaio disposti ai due spigoli di una delle diagonali del pannello. In uno dei due spigoli è disposto un martinetto che agisce tra due elementi metallici di cui, quello interno è appoggiato allo spigolo del pannello e quello esterno è collegato, tramite barre in acciaio, all'elemento metallico disposto sullo spigolo opposto al primo. Si realizza quindi un sistema chiuso in cui il martinetto sollecita il pannello lungo una diagonale. Il pannello è strumentato con quattro trasduttori induttivi (LVDT) disposti lungo le diagonali sui due lati, al fine di misurare le deformazioni sotto carico.

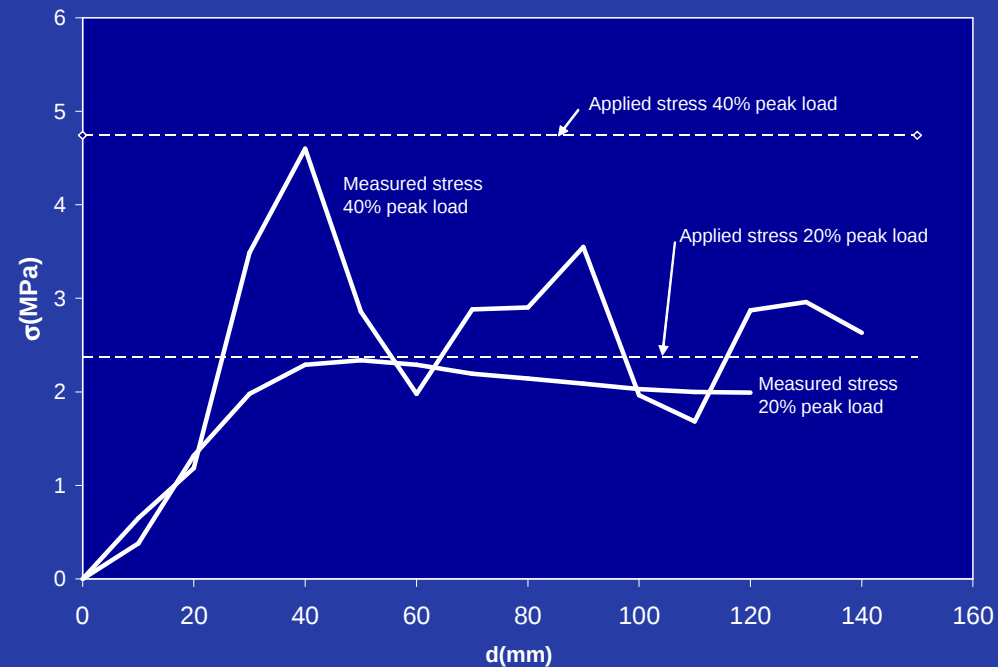
$$f_{vk0,nom}^{diag} = \tau_{k,nom}^{diag} \cong \frac{P_{ult}}{A\sqrt{2}}$$



MICROCAROTAGGI

Un altro metodo consiste nel prelievo di carote in zone di muratura precedentemente strumentate con estensimetri elettrici.

Il rilascio della tensione dovuto all'estrazione della carota provoca deformazioni la cui misura permette di risalire ad una stima dello stato tensionale presente nella muratura in quel punto (esempio c.a.)



La fase conoscitiva si deve estendere anche al rilievo dello stato fessurativo eventualmente presente.

E' importante anche eseguire un monitoraggio esteso per un periodo sufficientemente lungo, per valutare se la situazione è stabile o se il processo è ancora in atto.

A questo fine si possono impiegare sistemi che vanno dai più semplici ed economici fessurimetri a sensori di spostamento elettrici, a corda vibrante o a fibra ottica.

Naturalmente, un progetto di riabilitazione strutturale non può prescindere da un'indagine conoscitiva sul terreno sottostante e sulla consistenza delle fondazioni.

FESSURIMETRI

## Fessurimetri da muro

Il fessurimetro da muro è costituito da due placchette planari o angolari, che, una volta installate si sovrappongono consentendo di rilevare l'incremento dei movimenti e il verso del movimento.

Su una placchetta è disegnato un reticolo millimetrato con valori positivi e negativi lungo i due assi, sull'altra placchetta è riportato un crocino rosso che consente di leggere, in trasparenza sul reticolo millimetrato, il valore del movimento.



### LOGISTICA

I fessurimetri vengono installati in edifici

### COSA MONITORARE

Vengono utilizzate per monitorare le crepe in edifici e manufatti di vario tipo

### OBIETTIVI

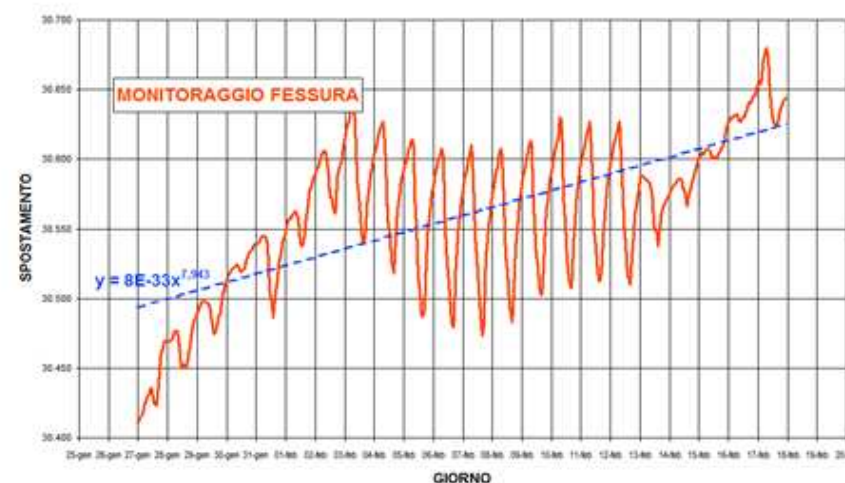
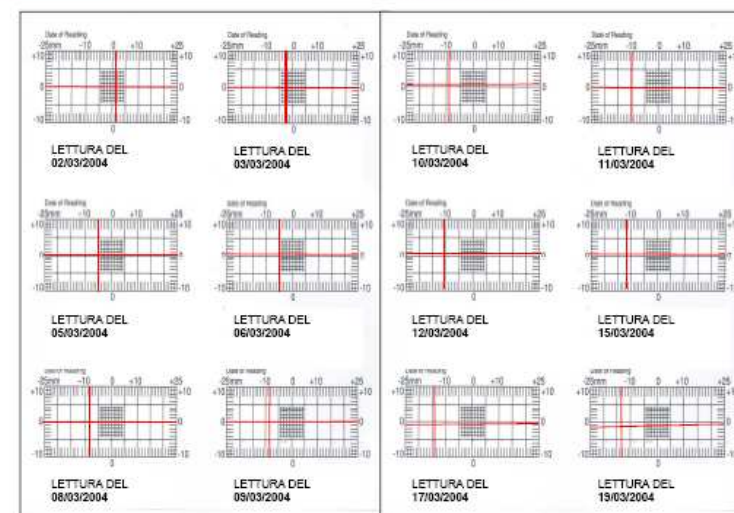
Misurare le variazioni gli incrementi, in entrambi i versi, del movimento relativo fra due blocchi a cavallo di fessure e crepe

### COSTI

I fessurimetri in plastica costano circa € 20,00

## MONITORAGGIO

## FESSURIMETRO



# TESTO UNICO PER LE COSTRUZIONI 2008

|          |                                                                               |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------|
| <b>8</b> | <b>COSTRUZIONI ESISTENTI .....</b>                                            |
| 8.1      | OGGETTO .....                                                                 |
| 8.2      | CRITERI GENERALI.....                                                         |
| 8.3      | VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA .....                                             |
| 8.4      | CLASSIFICAZIONE DEGLI INTERVENTI.....                                         |
| 8.4.1    | <i>Intervento di adeguamento .....</i>                                        |
| 8.4.2    | <i>Intervento di miglioramento .....</i>                                      |
| 8.4.3    | <i>Riparazione o intervento locale .....</i>                                  |
| 8.5      | PROCEDURE PER LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA E LA REDAZIONE DEI PROGETTI..... |
| 8.5.1    | <i>Analisi storico-critica .....</i>                                          |
| 8.5.2    | <i>Rilievo .....</i>                                                          |
| 8.5.3    | <i>Caratterizzazione meccanica dei materiali.....</i>                         |
| 8.5.4    | <i>Livelli di conoscenza e fattori di confidenza.....</i>                     |
| 8.5.5    | <i>Azioni .....</i>                                                           |
| 8.6      | MATERIALI .....                                                               |
| 8.7      | VALUTAZIONE E PROGETTAZIONE IN PRESENZA DI AZIONI SISMICHE .....              |
| 8.7.1    | <i>Costruzioni in muratura.....</i>                                           |
| 8.7.2    | <i>Costruzioni in cemento armato o in acciaio .....</i>                       |
| 8.7.3    | <i>Edifici misti.....</i>                                                     |
| 8.7.4    | <i>Criteri e tipi d'intervento .....</i>                                      |
| 8.7.5    | <i>Progetto dell'intervento .....</i>                                         |

## **8.5 PROCEDURE PER LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA E LA REDAZIONE DEI PROGETTI**

Nelle costruzioni esistenti le situazioni concretamente riscontrabili sono le più diverse ed è quindi impossibile prevedere regole specifiche per tutti i casi. Di conseguenza, il modello per la valutazione della sicurezza dovrà essere definito e giustificato dal Progettista, caso per caso, in relazione al comportamento strutturale attendibile della costruzione, tenendo conto delle indicazioni generali di seguito esposte.

### **8.5.1 ANALISI STORICO-CRITICA**

Ai fini di una corretta individuazione del sistema strutturale esistente e del suo stato di sollecitazione è importante ricostruire il processo di realizzazione e le successive modificazioni subite nel tempo dal manufatto, nonché gli eventi che lo hanno interessato.

### **8.5.2 RILIEVO**

Il rilievo geometrico-strutturale dovrà essere riferito sia alla geometria complessiva dell'organismo che a quella degli elementi costruttivi, comprendendo i rapporti con le eventuali strutture in aderenza. Nel rilievo dovranno essere rappresentate le modificazioni intervenute nel tempo, come desunte dall'analisi storico-critica.

Il rilievo deve individuare l'organismo resistente della costruzione, tenendo anche presente la qualità e lo stato di conservazione dei materiali e degli elementi costitutivi.

Dovranno altresì essere rilevati i dissesti, in atto o stabilizzati, ponendo particolare attenzione all'individuazione dei quadri fessurativi e dei meccanismi di danno.

### 8.5.3 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI MATERIALI

Per conseguire un'adeguata conoscenza delle caratteristiche dei materiali e del loro degrado, ci si baserà su documentazione già disponibile, su verifiche visive in situ e su indagini sperimentali. Le indagini dovranno essere motivate, per tipo e quantità, dal loro effettivo uso nelle verifiche; nel caso di beni culturali e nel recupero di centri storici, dovrà esserne considerato l'impatto in termini di conservazione del bene. I valori delle resistenze meccaniche dei materiali vengono valutati sulla base delle prove effettuate sulla struttura e prescindono dalle classi discretizzate previste nelle norme per le nuove costruzioni.

#### Caratterizzazione meccanica dei materiali

*Per il calcolo delle capacità degli elementi si utilizzano i valori medi delle proprietà dei materiali esistenti, come ottenuti dalle prove in situ e da eventuali informazioni aggiuntive, divisi per il Fattore di Confidenza. Quest'ultimo è un coefficiente che dipende dal livello di approfondimento (livello di conoscenza) delle indagini effettuate preliminarmente alla valutazione del livello di sicurezza. Si osservi che la definizione dei valori medi dipende dal livello di conoscenza che si vuole raggiungere come sarà più chiaro nel seguito. Il motivo per cui si utilizzano i valori medi invece che i valori caratteristici sta nel fatto che in genere i valori ottenibili sperimentalmente per le resistenze, a causa della disomogeneità dei materiali, sono dispersi con deviazione standard non facilmente definibile.*

Esistono 3 diversi livelli di conoscenza denominati rispettivamente, dal più elevato al meno elevato, LC3, LC2 ed LC1.

Il livello di conoscenza raggiunto dipende dalla tipologia delle indagini effettuate per la definizione dei dettagli costruttivi e delle caratteristiche meccaniche dei materiali, inoltre richiede la determinazione della geometria.

In particolare la determinazione della geometria consiste in: -.....*rilievo, piano per piano, di tutti gli elementi in muratura e di eventuali nicchie, cavità, canne umarie, il rilievo delle volte (spessore e profilo), dei solai e della copertura (tipologia e orditura), delle scale (tipologia strutturale), la individuazione dei carichi gravanti su ogni elemento di parete e la tipologia delle fondazioni. La rappresentazione dei risultati del rilievo verrà effettuata attraverso piante, alzati e sezioni;*

- *rappresentazione .... dell'eventuale quadro fessurativo, classificando ciascuna lesione secondo la tipologia (distacco, rotazione, scorrimento, spostamenti fuori del piano, ...), e deformativo (evidenti fuori piombo, rigonfiamenti, depressioni nelle volte, ...).*

La finalità è di consentire, nella successiva fase diagnostica, l'individuazione dell'origine e delle possibili evoluzioni delle problematiche strutturali dell'edificio.

I dettagli costruttivi da esaminare sono:

- a) qualità del collegamento tra pareti verticali;
- b) qualità del collegamento tra orizzontamenti e pareti ed eventuale presenza di cordoli di piano o di altri dispositivi di collegamento;
- c) esistenza di architravi strutturalmente efficienti al di sopra delle aperture;
- d) presenza di elementi strutturalmente efficienti atti ad eliminare le spinte eventualmente presenti;
- e) presenza di elementi, anche non strutturali, ad elevata vulnerabilità;
- f) tipologia della muratura (a un paramento, a due o più paramenti, con o senza collegamenti trasversali, ...), e sue caratteristiche costruttive (eseguita in mattoni o in pietra, regolare, irregolare, ...).

#### 8.5.4 LIVELLI DI CONOSCENZA E FATTORI DI CONFIDENZA

Sulla base degli approfondimenti effettuati nelle fasi conoscitive sopra riportate, saranno individuati i “livelli di conoscenza” dei diversi parametri coinvolti nel modello (geometria, dettagli costruttivi e materiali), e definiti i correlati fattori di confidenza, da utilizzare come ulteriori coefficienti parziali di sicurezza che tengono conto delle carenze nella conoscenza dei parametri del modello.

| Livello di conoscenza | Geometria           | Verifiche in situ per i dettagli costruttivi | Indagini in situ per le proprietà dei materiali | Metodo di analisi | Fattore di confidenza |
|-----------------------|---------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| LC1                   | rilievo strutturale | limitate                                     | limitate                                        | tutti             | 1.35                  |
| LC2                   |                     | estese ed esaustive                          | estese                                          | tutti             | 1.20                  |
| LC3                   |                     |                                              | esaustive                                       | tutti             | 1.00                  |

Tab.2. Fattori di confidenza ottenibili in funzione del grado di approfondimento delle indagini sui materiali e sulla geometria

Dalla Tabella 2 si evince che il livello di conoscenza LC3 si intende raggiunto quando siano stati effettuati: il rilievo strutturale, le verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi, le indagini in situ esaustive sulle proprietà dei materiali.

Il livello di conoscenza LC2 si intende raggiunto quando siano stati effettuati, oltre al rilievo strutturale, le verifiche in situ estese ed esaustive sui dettagli costruttivi e le indagini in situ estese sulle proprietà dei materiali.

Infine il livello di conoscenza LC1 si intende raggiunto quando, oltre al rilievo strutturale, siano state effettuate le verifiche in situ limitate sui dettagli costruttivi e le indagini in situ limitate sulle proprietà dei materiali.

Dalla Tabella 2 si evince che il livello di conoscenza LC3 si intende raggiunto quando si hanno informazioni complete

Al fine di definire i valori medi delle caratteristiche meccaniche della muratura da utilizzare per l'analisi, in generale, bisogna combinare i risultati delle Indagini in situ con le indicazioni della Tabella 3 di seguito riportata (rif. allegato 11.D.)

| Tipologia di muratura                                                                    | $f_m$<br>(N/cm <sup>2</sup> ) | $\tau_n$<br>(N/cm <sup>2</sup> ) | E<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | G<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $w$<br>(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.)                              | 90-120                        | 2,8-4,2                          | 900-1260                  | 150-210                   | 16                          |
| Muratura a blocchi lapidei squadrati                                                     | 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                                       | 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

$\tau_n$  = resistenza media a taglio

E = valore medio del modulo di elasticità normale

G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale

W = peso specifico medio

Tab. 3. Valori di riferimento dei parametri meccanici di diverse tipologie di muratura (riferiti alle seguenti condizioni: malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi, paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata)

$$LC1 \rightarrow f_m = f_{inf}, E_d = E_{inf}$$

$$LC2 \rightarrow f_m = \frac{f_{inf} + f_{sup}}{2}, E_d = \frac{E_{inf} + E_{sup}}{2}$$

$$LC3 \left[ \begin{array}{l} \text{disponibili 3 o} \\ \text{più (n) valori} \\ \text{di resistenza} \\ \text{sperimentale} \end{array} \right] \rightarrow f_m = \tilde{f} = \frac{f_1 + f_2 + f_3 + \dots + f_n}{n}, E_d = \begin{cases} \frac{E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n}{n} \text{ (se disponibili)} \\ \text{oppure} \\ \frac{E_{inf} + E_{sup}}{2} \end{cases}$$

$$LC3 \left[ \begin{array}{l} \text{disponibili 2 valori di} \\ \text{resistenza sperimentale} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} \tilde{f} \leq f_{inf} \rightarrow f_m = \tilde{f}, E_d = \begin{cases} \frac{E_1 + E_2}{2} \text{ (se disponibili)} \\ \text{oppure} \\ \frac{E_{inf} + E_{sup}}{2} \end{cases} \\ f_{inf} < \tilde{f} < f_{sup} \rightarrow f_m = \frac{f_{inf} + f_{sup}}{2}, E_d = \begin{cases} \frac{E_1 + E_2}{2} \text{ (se disponibili)} \\ \text{oppure} \\ \frac{E_{inf} + E_{sup}}{2} \end{cases} \\ f_{sup} < \tilde{f} \rightarrow f_m = f_{sup}, E_d = \begin{cases} \frac{E_1 + E_2}{2} \text{ (se disponibili)} \\ \text{oppure} \\ \frac{E_{inf} + E_{sup}}{2} \end{cases} \end{array} \right.$$

$$LC3 \left[ \begin{array}{l} \text{disponibile 1 valore di} \\ \text{resistenza sperimentale} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{l} f_1 \leq f_{inf} \rightarrow f_m = f_1 \\ f_{inf} < f_1 \leq f_{sup} \rightarrow f_m = \frac{f_{inf} + f_{sup}}{2}, E_d = \begin{cases} E_1 \text{ (se disponibile)} \\ \text{oppure} \\ \frac{E_{inf} + E_{sup}}{2} \end{cases} \\ f_{sup} < f_1 \rightarrow f_m = \frac{f_{inf} + f_{sup}}{2} \end{array} \right.$$

## **Caratteristiche della muratura in compressione**

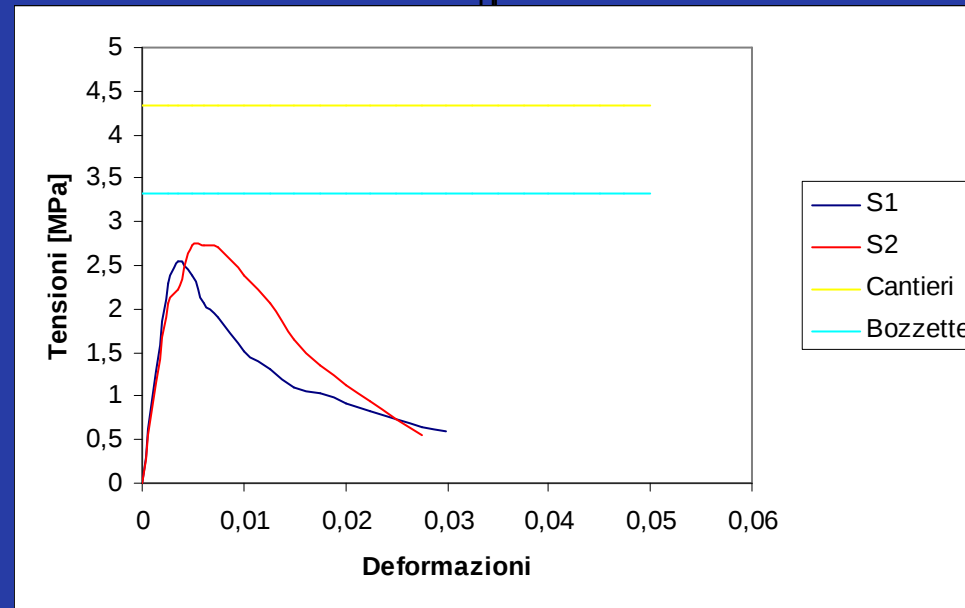
I dati riportati si riferiscono a prove sperimentali di compressione presenti in letteratura, effettuate su vari tipi di materiali utilizzati nella costruzione di molte delle murature storiche dell'Italia meridionale.

Ci riferiamo a studi sui seguenti tipi di muratura:

- Muratura in tufo;
- Muratura in terra battuta;
- Muratura in calcarenite.

# Muratura in tufo (Calderoni et al.)

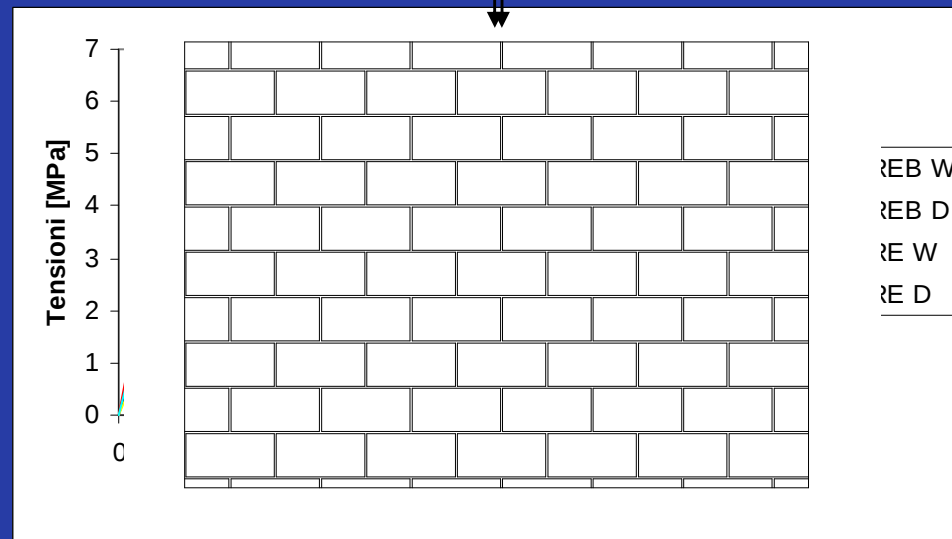
- Muratura cantieri → Realizzata con elementi in pietra distribuiti casualmente su spessi letti di malta. Realizzata con pareti formate da pietre costituite da calce miscelata con macerie.
- Muratura bozzette → bozzette, lavorate su tutte le facce tranne su quella interna. Realizzata da pareti formate da pietre
- Muratura sacco → lavorate solo esternamente e da una massa interna formata da ghiaia e malta.



# Muratura in terra battuta (Venkatarama et al.)

- Muratura RE  $\Rightarrow$  Realizzata tramite la compattazione di terra, sabbia e ghiaia in strati successivi in una cassaforma temporanea.
- Muratura REB  $\Rightarrow$  Realizzata tramite mattoni di terra battuta collegati da strati di malta.

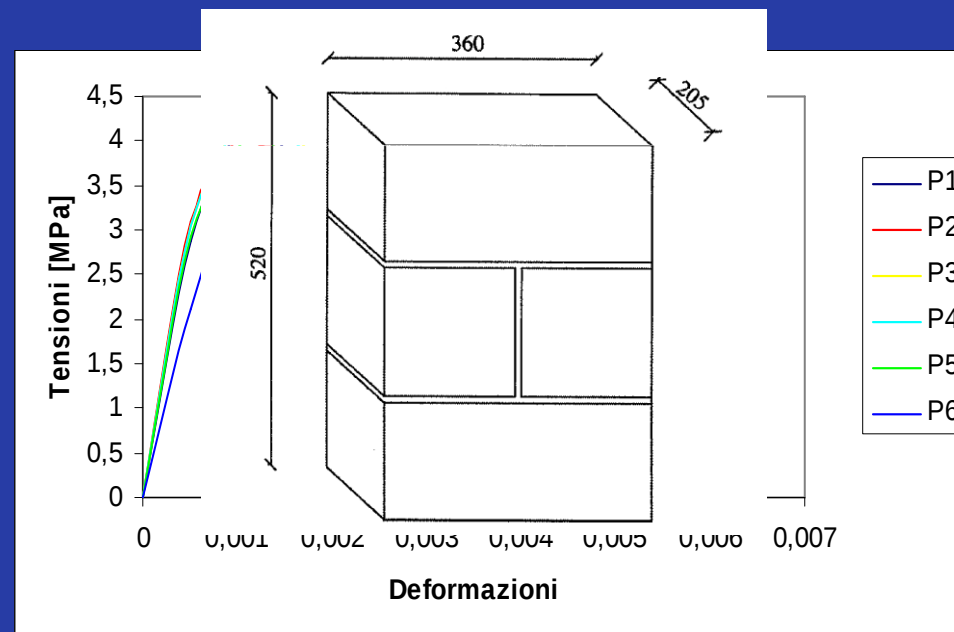
Nella determinazione delle curve sperimentali si sono considerati i due casi: condizioni sature (W) e condizioni asciutte (D).



## Muratura in calcarenite (Cavaleri et al.)

- Muratura composta da blocchi di calcarenite (proveniente da cave siciliane) addizionati con malta.

Si sono ottenute le seguenti curve sperimentali.



# Modelli analitici per il calcolo delle curve $\sigma$ - $\varepsilon$

## Modelli di riferimento

Sargin (1971) Hendry e Khalaf (2001)

$$\frac{\sigma_{md0}}{f_{md0}} = 2 \left( \frac{\varepsilon_{ma}}{\varepsilon_{mau}} \right) - \left( \frac{\varepsilon_{ma}}{\varepsilon_{mau}} \right)^2$$

$$\tilde{\sigma} = \frac{A\tilde{\varepsilon} + (D-1)\tilde{\varepsilon}^2}{1 + (A-2)\tilde{\varepsilon} + D\tilde{\varepsilon}^2}$$

Pume (1994)

$$\sigma = \left[ \frac{(K\eta - \eta^2)}{[1 + (K-2)\eta]} \right] \sigma_{\max}$$

$$\sigma = \sigma_{\max} [a \cdot \ln(\eta) + b]$$

Lu et al. (2004)

$$\hat{\sigma} = E\hat{\varepsilon} \cdot e^{\beta\hat{\varepsilon}}$$

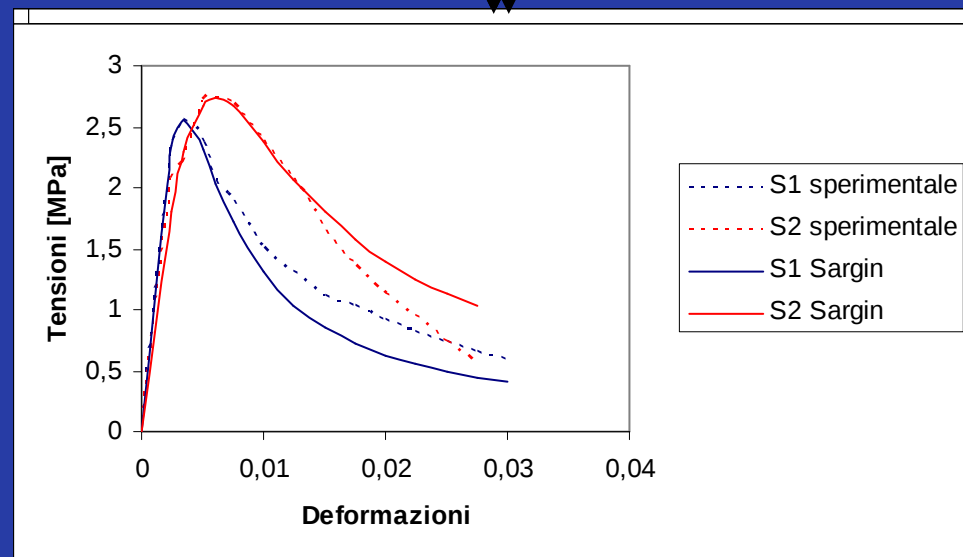
Nielsen (1995)

$$\sigma = \varepsilon \cdot \frac{\sigma_m \alpha}{\varepsilon_m} \cdot \frac{1}{\alpha - 1 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \right)^\alpha}$$

# Confronto con i dati sperimentali

## Muratura in tufo

- Muratura cantieri  $\Rightarrow$  Sargin, Hendry e Khalaf, Pume, Lu et al., Nielsen.
- Muratura bozzette  $\Rightarrow$  Sargin, Hendry e Khalaf, Pume, Lu et al., Nielsen.
- Muratura sacco  $\Rightarrow$  Sargin, Hendry e Khalaf, Pume, Lu et al., Nielsen.



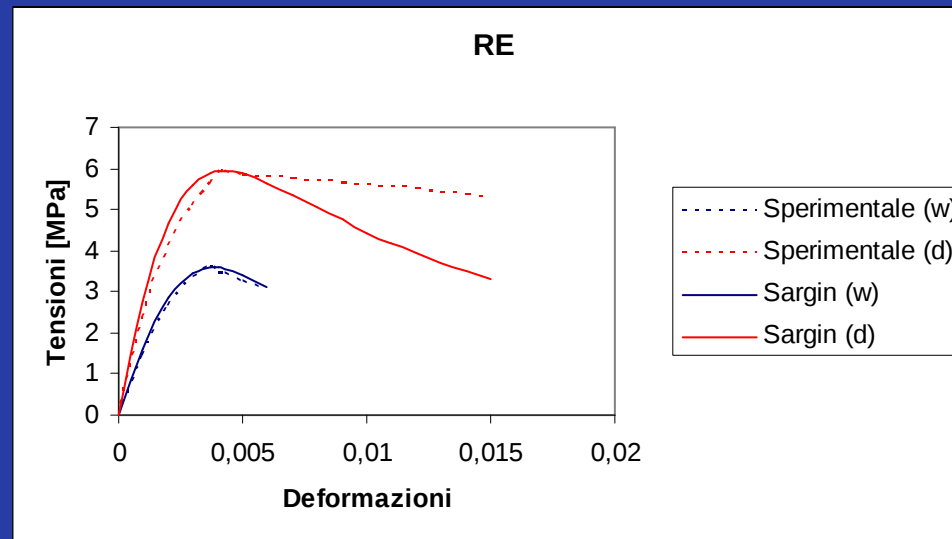
# Confronto con i dati sperimentali

## Muratura in terra battuta

- Muratura RE  $\Rightarrow$  Sargin, Pume, Lu et al., Nielsen.
- Muratura REB  $\Rightarrow$  Sargin, Pume, Lu et al., Nielsen.

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |

RE



# Confronto con i dati sperimentali

## Muratura in calcarenite

Sargin, Hendry e Khalaf, Pume, Lu et al., Nielsen.

