



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

Corso di Laurea in Ingegneria Edile

COMPORTAMENTO DI MURATURA  
MODERNA CON INTONACI RINFORZATI  
MODERN MASONRY WITH REINFORCED  
PLASTERS

*Relatore:*  
**Prof. Ing. Roberto Capozucca**

*Tesi di Laurea di:*  
*Fiordelmondo Sofia*



---

# INDICE

<i>Introduzione</i> .....	4
<b>1. Comportamento statico delle murature</b> .....	6
1.1 – Meccanismi di rottura a taglio di pannelli murari.....	8
1.2 - Criterio di rottura di Mohr-Coulomb.....	12
<b>2. Prove sperimentali</b> .....	15
2.1 – Prove in sito .....	15
2.2 – Prove in laboratorio .....	21
<b>3. Interventi strutturali</b> .....	26
3.1 - Incatenamenti.....	28
3.2 - “Scuci e cucì” .....	29
3.3 – Tecnica di intervento tramite FRP .....	31
3.4 – Tecnica di intervento tramite FRCM.....	33
3.5 – Altri tipi di intervento.....	35
<b>4. Sperimentazione</b> .....	38
4.1 – Materiali.....	39
4.1.1 – La malta.....	39
4.1.2 Elementi lapidei .....	41
4.2 – Confezionamento dei provini e strumentazione utilizzata .....	46
4.3 – Elaborazione e analisi dei dati sperimentali dei provini .....	55
4.3.1 – Sperimentazione su Forato da 8 cm – Provino B0.....	55
4.3.2 – Sperimentazione su Poroton – Provino A0 .....	59
4.4 – Sperimentazione con pannelli rinforzati.....	63
<b>5. Conclusione</b> .....	66

---

---



---

# Introduzione

Questo lavoro di tesi si prefigge l'obiettivo di indagare il comportamento di due provini in muratura, realizzati con tipologie di laterizio diverse. La sperimentazione condotta in laboratorio ha previsto la realizzazione di due prove di compressione diagonale attraverso le quali è stato possibile determinare i valori di resistenza meccanica e il modulo di rigidezza a taglio della muratura. In seguito alla determinazione dei valori di resistenza dei provini, si sono confrontati i risultati ottenuti con quelli forniti dalla sperimentazione condotta su entrambi i campioni, ma ai quali erano state applicate diverse tipologie di intonaci rinforzanti.

L'indagine si sviluppa in cinque capitoli dove si affrontano i seguenti argomenti.

Nel capitolo 1 si analizza come la muratura si comporta dal punto di vista statico e si descrivono in linea generale i principali meccanismi di rottura.

Nel capitolo 2 si studiano le tipologie di prove sperimentali a cui sottoporre la muratura: distruttive e non, svolte in sito o in laboratorio.

Nel capitolo 3 si forniscono alcune nozioni generali riguardo i principali interventi di risanamento e rinforzo della muratura.

Il Capitolo 4, corpo centrale dell'elaborato, in cui viene presentata la sperimentazione eseguita. In quest'ultimo infatti, oltre alle modalità di preparazione dei campioni, la strumentazione utilizzata e i dati ottenuti dalle prove, si descrivono anche i risultati ottenuti dalle prove effettuate in precedenza alla sperimentazione in esame.

Il capitolo 5, conclude il presente elaborato, riportando le conclusioni relative alle analisi sperimentali e numeriche condotte ed alle prestazioni fornite dai diversi sistemi di consolidamento analizzati.

---

---

---

# 1. Comportamento statico delle murature

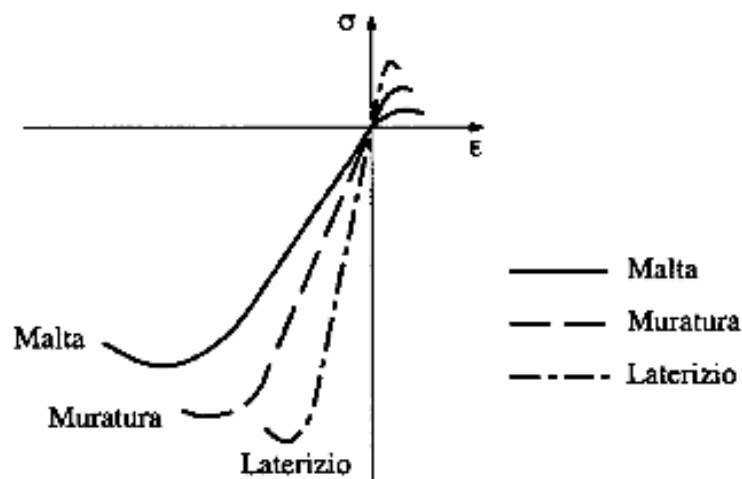
La muratura è la tecnica costruttiva più antica e diffusa, assieme a quella delle costruzioni in legno. La parola “muratura” indica tecniche assai diverse per tipo e forma dei materiali e per modalità costruttive.

L’Italia è uno dei paesi che vanta di un enorme patrimonio culturale sotto forma di edifici storici in muratura e nonostante gli anni e gli effetti dovuti a catastrofi naturali, alcuni di questi sono ancora in grado di sopportare queste sollecitazioni.

La muratura è per definizione un materiale non resistente a trazione, pertanto la capacità di resistenza a compressione è la grandezza meccanica più importante da valutare per progettare correttamente strutture in muratura. Nella prassi progettuale tuttavia si idealizza il materiale come continuo omogeneo macroscopicamente equivalente al materiale composito, ottenuto dalla sovrapposizione di elementi resistenti, i mattoni tenuti assieme mediante l’interposizione tra di essi di uno strato di malta le cui principali caratteristiche sono:

- la disomogeneità
- l’anisotropia
- il diverso comportamento a compressione e a trazione
- la non linearità del legame sforzi-deformazioni

Il comportamento meccanico è il risultato dell’interazione fra gli elementi e la malta, attraverso la loro interfaccia (che per fenomeni fisico-chimici tende a sviluppare un comportamento diverso da quello dei singoli componenti).

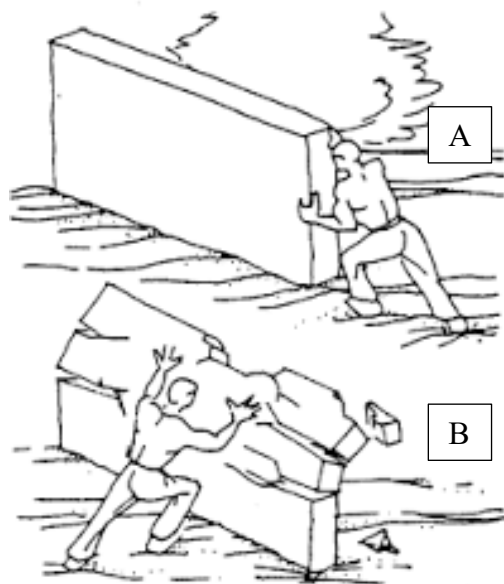


L’ edificio in muratura portante deve essere concepito e realizzato come un assemblaggio tridimensionale di muri (che svolgono la funzione portate o di controventamento) e solai (che servono

---

a ripartire le azioni dei carichi tra i muri di controventamento), garantendo il **funzionamento scatolare**, e conferendo quindi l'opportuna stabilità e robustezza all'insieme.

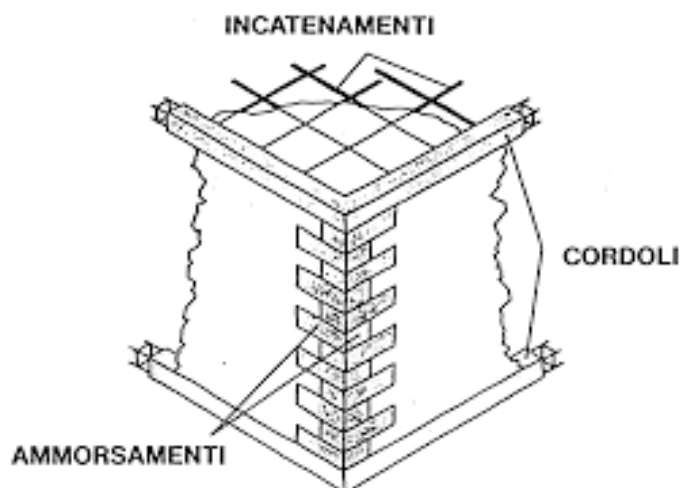
La resistenza dei muri a forze agenti parallelamente al piano del muro è molto maggiore rispetto a quella nel caso di forze agenti ortogonalmente al piano, e quindi è maggiore la loro efficacia come elementi di controventamento.



*Figura 1.1 A: setto resistente e rigido nel piano; B: setto non resistente e non rigido fuori piano.*

La stabilità alle azioni orizzontali richiede muri disposti secondo almeno due direzioni ortogonali. La capacità dei muri di resistere alle azioni orizzontali è favorevolmente influenzata dalla presenza di forze verticali stabilizzanti (in particolare per i muri non armati). Si riconosce quindi che lo schema “cellulare”, in cui tutti i muri strutturali hanno funzione portante e di controventamento, è quello più efficiente dal punto di vista statico, e che meglio realizza un effettivo comportamento di tipo “scatolare”.

Un requisito fondamentale è che i muri portanti, i muri di controventamento e i solai devono essere efficacemente collegati tra loro. Tale collegamento può essere effettuato mediante cordoli continui in cemento armato lungo tutti i muri, all'altezza dei solai di piano e di copertura, ammorsamenti ed incatenamenti.



*Figura 1.2 Illustrazione delle tipologie di collegamento tra muri portanti, di controventamento e solai.*

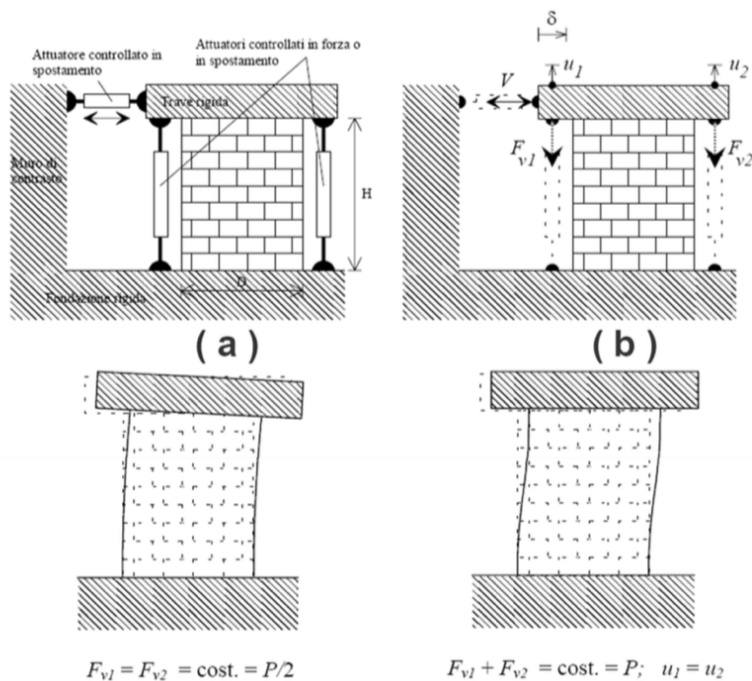
I cordoli svolgono una funzione di vincolo alle pareti sollecitate ortogonalmente al proprio piano, ostacolandone il meccanismo di ribaltamento. Inoltre, un cordolo continuo in c.a. consente di collegare longitudinalmente muri di controvento complanari, consentendo la redistribuzione delle ortogonali devono essere efficacemente ammortati tra loro lungo le intersezioni verticali, mediante una opportuna disposizione degli elementi. Il buon ammortamento tra l'altro tende a realizzare una maggiore redistribuzione dei carichi verticali fra i muri fra loro ortogonali anche nel caso di solai ad orditura prevalente in una direzione. In generale, una buona concezione strutturale ed una corretta realizzazione dei dettagli strutturali (la cosiddetta "regola d'arte") garantisce un comportamento strutturale soddisfacente nella maggior parte dei casi. Questo principio giustifica la sostanziale stabilità di strutture costruite nel passato, ben prima che esistessero i moderni modelli analitici dell'ingegneria strutturale. Ciò è riconosciuto dalle normative, che, nel caso di edifici con particolari caratteristiche di regolarità geometrica, di altezza massima e di sezione muraria complessiva, e nel rispetto di alcune regole costruttive, consentono di applicare regole di verifica estremamente semplificate, omettendo di fatto l'analisi strutturale.

## **1.1 – Meccanismi di rottura a taglio di pannelli murari**

La resistenza a taglio delle pareti murarie influenza significativamente la capacità resistente globale degli edifici in muratura sottoposti alle azioni sismiche. È dunque di fondamentale importanza, per una corretta progettazione in zona sismica, la conoscenza della resistenza dei pannelli alle azioni di taglio. Nello studio di pannelli murari soggetti a forze orizzontali vengono, in genere, presi in considerazione due condizioni di vincolo della sezione di testa:

- il caso di estremo superiore libero (a)
- il caso di estremo superiore impedito di ruotare (b)

Questi rappresentano due casi limite della reale condizione di vincolo dei pannelli inseriti in uno schema strutturale complesso.



Nella configurazione (a), il pannello murario è soggetto ad un carico verticale distribuito di risultante  $P$ , applicato alla sommità, mantenuto costante e centrato. Successivamente viene applicato uno spostamento monotono o ciclico in testata che genera una forza tagliante  $V$ , mantenendo la base superiore del muro libera di ruotare. La configurazione (b) prevede, invece, che la traversa superiore trasli rigidamente senza ruotare, realizzando così una condizione di “doppio incastro” che porta le risultanti di compressione alla base superiore ed inferiore ad avere eccentricità di segno opposto, crescenti al crescere della forza tagliante  $V$ . Dalla prova si ottengono due fondamentali tipi di comportamento:

- (a) associato alla rottura per tensioni normali (ribaltamento e/o schiacciamento della muratura compressa);
- (b) associato a meccanismi di rottura per taglio.

Fra i meccanismi di rottura per taglio si può avere un meccanismo di scorrimento lungo linee di frattura orizzontali e un meccanismo di rottura con fessurazioni diagonali che si sviluppano in modo abbastanza esteso lungo l'altezza del pannello. Tali fessure diagonali possono interessare prevalentemente i giunti oppure i conci a seconda della resistenza relativa dei giunti e dei conci e a seconda del livello di compressione media applicata. Il calcolo della resistenza del pannello murario

è in funzione del meccanismo di rottura nel piano associato: *Rottura per pressoflessione o ribaltamento, Rottura per taglio con fessurazione diagonale, Rottura per taglio-scorrimento.*

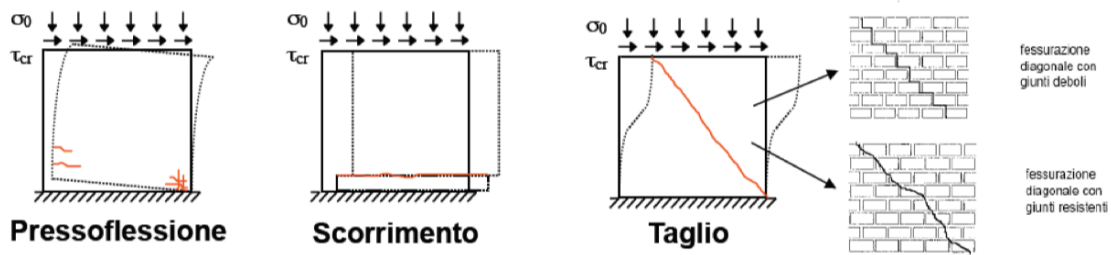


Figura 1.3 Meccanismi di rottura del maschio murario

La rottura per pressoflessione o ribaltamento avviene quando il momento flettente  $M$  in una delle sezioni estreme della parte deformabile pannello murario raggiunge il valore ultimo  $V_{max}$ .

$$V_{max} \cdot H_0 = M_u \quad [1.1]$$

dove

$H_0$  è la distanza dalla base della sezione di momento nullo;

$M_u$  è il momento ultimo.

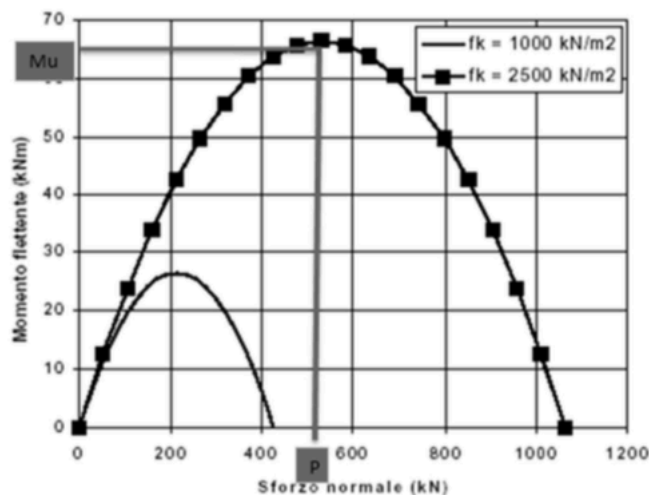


Figura 1.4 Generico dominio di resistenza - pressoflessione

Nella rottura per taglio-scorrimento si assume che la rottura del pannello murario per scorrimento avvenga lungo un letto di malta in corrispondenza di una delle sezioni estreme della parte deformabile.

Infine la rottura per taglio con fessurazione diagonale avviene quando il taglio  $V$  nel pannello murario

raggiunge il valore ultimo  $V_u$ . Nel caso di rottura per taglio, si suppone che nell'elemento abbiano luogo deformazioni taglianti plastiche in cui viene posto un limite alla deformazione angolare

$$\theta = \varphi + \gamma \quad [1.2]$$

oltre il quale la resistenza si annulla. La deformazione angolare  $\theta$  è espressa come somma della deformazione flessionale  $\varphi$  e di quella a taglio  $\gamma$ .

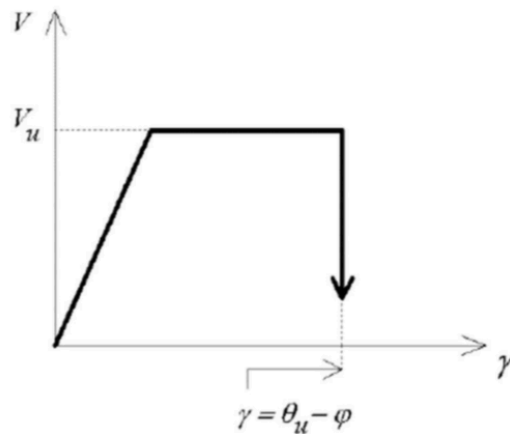


Figura 1.5 Comportamento anelastico dell'elemento murario nel caso di rottura per taglio

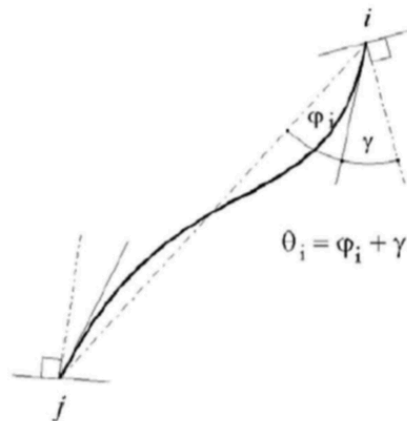


Figura 1.6 Deformazioni angolari pertinenti all'estremo i di un elemento

Secondo quanto appena detto, la rottura di un pannello murario può avvenire per una rottura a flessione, rottura a taglio per scorrimento e rottura a taglio con fessurazione diagonale. Unendo in un unico diagramma i tre comportamenti otteniamo un *diagramma ultimo* in funzione della forza orizzontale e dello sforzo normale.



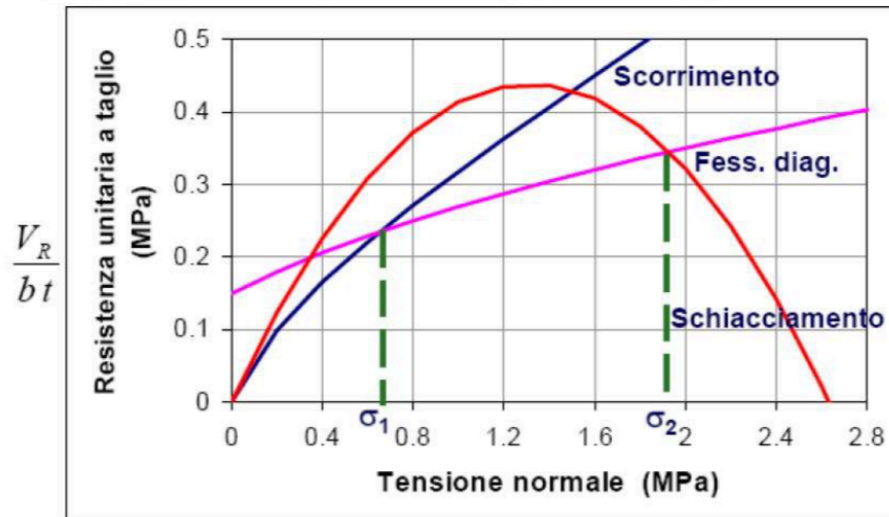


Figura 1.7 Diagramma taglio ultimo-sforzo normale del pannello murario

Dove:  $V_R$  è la resistenza a taglio;  $b$  e  $t$  sono rispettivamente la lunghezza e lo spessore del pannello murario.

Si può osservare che qualunque sia il meccanismo di collasso, la resistenza è condizionata dallo sforzo normale.

- La curva rossa determina il dominio dovuto al comportamento presso- flessionale
- La curva blu determina la resistenza limite a scorrimento
- La curva viola determina la resistenza a fessurazione diagonale.

Si vengono a definire così tre campi in funzione di  $\sigma$  (ossia lo sforzo normale sul pannello) che governano il comportamento a taglio.

$\sigma \leq \sigma_1$  meccanismo per scorrimento

$\sigma_1 < \sigma \leq \sigma_2$  meccanismo per fessurazione diagonale

$\sigma > \sigma_2$  meccanismo per schiacciamento.

## 1.2 - Criterio di rottura di Mhor-Coulomb

Il criterio di rottura è un modo per descrivere le possibili condizioni che conducono alla crisi di un materiale. Nell'ambito della resistenza della muratura sottoposta a stadi combinati di compressione e taglio, il criterio di resistenza che viene comunemente utilizzato per il controllo della resistenza della muratura è il criterio di resistenza di Coulomb:

$$\tau_R = \tau_0 + \sigma_R \cdot \tan\varphi \quad [1.3]$$

La resistenza a taglio,  $\tau_R$ , disponibile su un piano di possibile scorrimento, è funzione della tensione normale,  $\sigma_R$ , agente su tale piano e delle caratteristiche del materiale  $\tau_0$  e  $\varphi$  che rappresentano, rispettivamente, coesione e angolo di attrito. L'equazione è rappresentata sul piano  $\tau - \sigma$  da una retta. I punti sulla retta rappresentano stati tensionali a rottura, mentre i punti al di sotto individuano uno stato di tensione con un certo margine di sicurezza rispetto alla situazione di rottura. I punti al di sopra della retta non hanno invece significato fisico, poiché quello stato tensionale non può verificarsi nella realtà per quel particolare materiale.

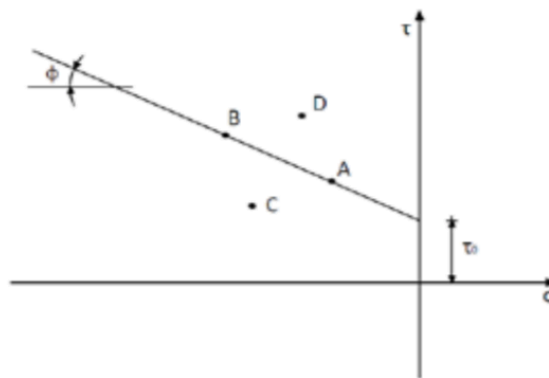


Figura 1.8 Equazione di Coulomb sul piano  $\sigma - \tau$

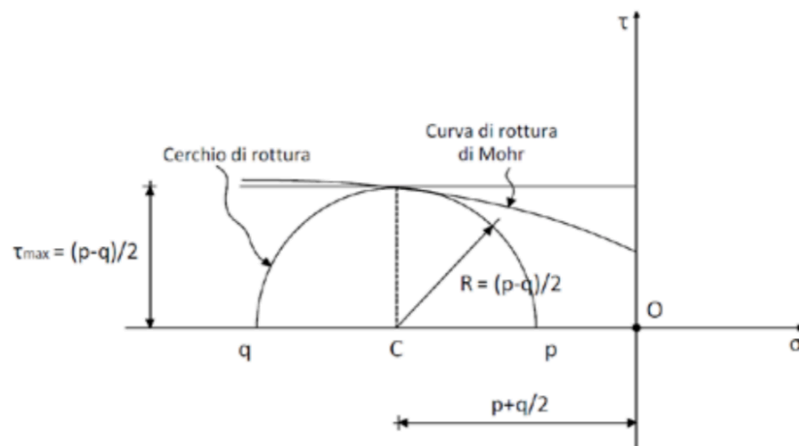


Figura 1.9 Costruzione del cerchio di Mohr con la curva di involuppo

Alla relazione di Coulomb viene associato il criterio di rottura di Mohr-Coulomb espresso da una funzione della tensione normale  $f(\sigma)$  sempre sul piano  $\sigma - \tau$ . Il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb considera la tensione tangenziale come funzione della tensione normale e prevede la rottura nel materiale quando la tensione di taglio in un punto, su un qualsiasi piano, raggiunge un valore ultimo, che dipende linearmente dalla tensione normale agente su quel piano. La condizione di rottura per questo criterio può essere definita in termini di curva di involuppo, cioè di curva tangente ai cerchi di rottura. Il criterio di Mohr Coulomb, permette di interpretare i modi di rottura che possono avvenire

nella muratura ed in generale nei materiali non resistenti a trazione. La rottura può verificarsi in due modi:

- Per trazione, nel campo delle tensioni normali positive, a causa del raggiungimento delle capacità di resistenza a trazione del materiale e formazione di fessure normali alla direzione della tensione massima di trazione;
- Per scorrimento, dovuto a taglio nelle zone di tensione normali di compressione, con un piano di fessurazione inclinato di  $(\pi/4; \pi/2)$ .

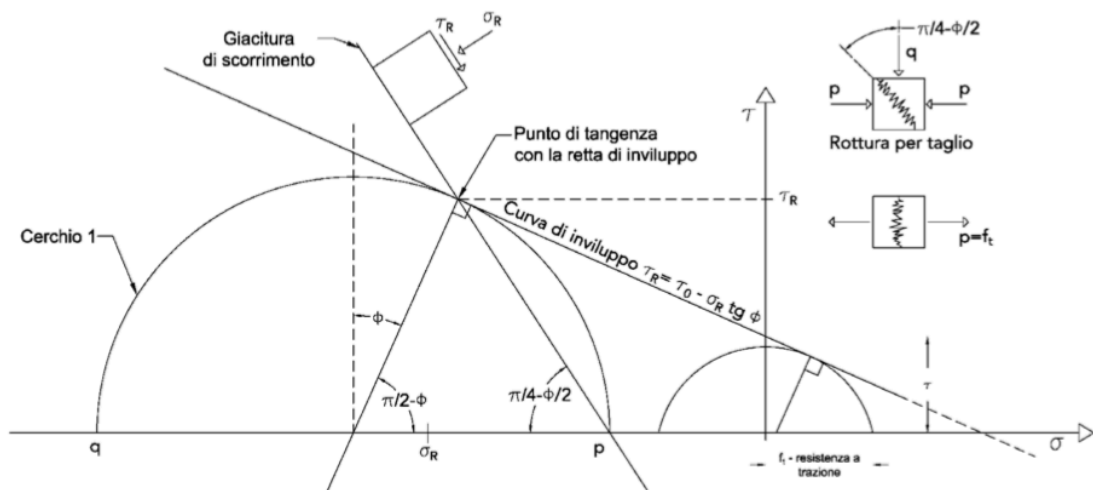


Figura 1.10 Criterio di Mhor - Coulomb

---

## 2. Prove sperimentali

Sulla muratura si possono eseguire sia prove di laboratorio sia prove in situ ed entrambe servono per la determinazione delle caratteristiche meccaniche o per lo studio della conservazione della muratura. Le prove possono essere distruttive (D), mediamente distruttive (MD) o non distruttive (ND).

### 2.1 – Prove in sito

#### Prova ultrasonica

La prova ultrasonica si utilizza per l'individuazione delle parti degradate della muratura, per la valutazione della loro omogeneità, del quadro fessurativo e per la misura dello spessore. Può essere eseguita in due modi:

- Se l'esame è basato sulla propagazione di onde ultrasonore (ovvero a frequenza maggiori di quelle percepibili dall'orecchio umano) e sul monitoraggio del segnale trasmessa si sta applicando la tecnica per trasmissione;
- Se invece si monitora il segnale riflesso o diffratto da qualsiasi superficie o discontinuità si sta adottando la tecnica per riflessione.

È possibile utilizzare in entrambi i casi una sonda unica che funge sia da trasmettitore sia da ricevente oppure una sonda accoppiata o due sonde separate di trasmissione e ricezione. Per le murature le frequenze utilizzate sono comprese tra 16 KHz e 20MHz.

La procedura di prova è la seguente: la sonda emittente, sollecitata da un treno di impulsi ad alta tensione, genera onde di pressione che costituiscono il fascio ultrasonoro il quale raggiunge la sonda ricevente che, a sua volta, trasforma la pressione acustica in un segnale elettrico; tale segnale ferma un contatore di tempo innescato dalla sonda emittente al momento della generazione del fascio. Il tempo misurato dal timer coincide con il tempo di propagazione del fascio ultrasonoro tra i punti di misura. Nei mezzi elastici ed isotropi l'impulso emesso può essere diviso in onde di dilatazione e di compressione, la cui velocità di propagazione viene indicata con VL, e di taglio con velocità VT.

Nelle murature i fenomeni delle riflessioni o delle rifrazioni multiple rende complessa l'indagine in quanto è difficoltoso correlare la velocità delle onde con la caratterizzazione meccanica della muratura, quindi si utilizzano potenze più forti e frequenze inferiori. È una prova non distruttiva.

#### Prove soniche

Oltre agli scopi elencati per le prove ultrasoniche, queste si utilizzano anche per stimare la resistenza della muratura, per individuare discontinuità e per verificare il risultato di opere di manutenzione. È basata sull'emissione di onde soniche prodotte da una sorgente neutra. Questo tipo di prova può essere

---

applicata a quei materiali nei quali è consentita la propagazione di onde soniche con frequenze comprese tra 5 e 30kHz che vengono prodotte da una sorgente neutra.

Questa tecnica di indagine è basata sulla misura del tempo di propagazione di vibrazioni a frequenze inferiori alla soglia dell'udibile tra due punti di un corpo elastico: in corrispondenza di uno dei due punti viene posizionato un trasduttore che ha la capacità di trasformare la velocità di vibrazione in un segnale elettrico ad essa proporzionale. In corrispondenza dell'altro punto viene applicato un impulso meccanico utilizzando un martello munito di trasduttore di forza. Oltre ai due trasduttori si ha a disposizione anche un oscilloscopio digitale su cui vengono registrati i segnali di eccitazione e di risposta: il tempo intercorso tra la ricezione dei due segnali fornisce il tempo che la vibrazione impiega per percorrere la distanza tra i due trasduttori. Anche questa tipologia di prova è classificata come non distruttiva.

#### Prove georadar

Si utilizzano per individuare discontinuità all'interno della muratura, per studiarne lo stato di conservazione e per individuare la presenza di elementi quali canne fumarie, tubazioni. Si basa sull'interferenza delle onde elettromagnetiche che viene generata in corrispondenza delle discontinuità delle murature: la trasmissione degli impulsi e la ricezione dell'energia riflessa avvengono mediante antenne radar. Il sistema misura il tempo che intercorre tra l'istante in cui il segnale viene trasmesso e quello in cui viene ricevuto. Questa scansione viene ripetuta più volte spostando l'antenna in modo tale da ottenere un profilo continuo delle superfici elettriche presenti all'interno del mezzo. È anche questo un metodo non distruttivo che fornisce principalmente informazioni qualitative.

#### Endoscopia

Questa tipologia di prova serve per studiare lo stato conservativo della muratura e dei suoi elementi costituenti: rileva la tipologia strutturale, la presenza di cavità, cavedi, vani chiusi, canne fumarie, il grado di ammorsamento delle pareti, la natura e le dimensioni degli elementi non strutturali. La prova consiste nell'eseguire un foro di 20mm circa in cui inserire un'asta di fibra ottica a cui è applicata una luce e una piccola telecamera o macchina fotografica.

Esistono diversi tipi di endoscopi: boroscopi rigidi con aste di lunghezza fissa o modulare, fibriscopi flessibili e videoendoscopi muniti di puntale distale. È una prova non distruttiva.

#### Martinetti piatti

Questa tipologia di prova è normata dall'American Society for Testing and Materials (ASTM) nelle norme C 1196 e C 1197. È una prova che si esegue in sito per la determinazione dei carichi verticali effettivamente agenti sull'elemento murario oggetto di indagine. È necessario eseguire uno o due intagli orizzontali, in corrispondenza di altrettanti corsi di malta, e perciò è possibile utilizzare questa

---

tecnica di indagine solo su murature in mattoni o in pietrame regolarmente squadrato. In base a ciò che si vuole ricavare, si possono eseguire tre prove diverse:

1. con martinetto singolo per l'individuazione della tensione di lavoro;
2. con due martinetti per determinare la resistenza a compressione della parte di muratura contenuta tra di essi e per la ricerca del modulo elastico;
3. con due martinetti piatti e un martinetto a pistone se si vuole anche stimare la resistenza a taglio.

#### Prova con martinetto singolo

Questa prova consiste nell'eseguire un taglio in un elemento strutturale per poi applicare sulle superfici di questo una pressione nota che porti al ripristino delle condizioni iniziali del corpo. Introducendo un martinetto piano all'interno della fessura creata è possibile riportare i lembi della fenditura nelle condizioni iniziali. Dalla forza esercitata dal martinetto per ripristinare la situazione iniziale è possibile individuare lo stato tensionale originariamente presente nella muratura. La metodologia prevede anzitutto l'installazione delle basi di misura, formate da coppie di capisaldi, e successivamente si procede all'esecuzione del taglio. Inserito il martinetto piatto all'interno del taglio, esso viene portato gradualmente in pressione fino ad annullare la convergenza in precedenza misurata. In queste condizioni la pressione all'interno del martinetto sarà pari alla sollecitazione preesistente nella muratura, a meno di costanti che tengono conto del rapporto tra l'area del martinetto e quella del taglio praticato e di un coefficiente di rigidezza del martinetto.

La tensione in sito vale:

$$\sigma = p \cdot K_m \cdot K_a \quad [2.1]$$

- p pressione letta al manometro della pompa idraulica
- $K_a$  coefficiente che tiene conto del rapporto tra superficie del martinetto e superficie del taglio
- $K_m$  coefficiente che tiene conto della rigidezza del martinetto.

#### Prova con martinetto doppio

È analoga a quella del paragrafo precedente tranne per il fatto che è necessario effettuare due intagli, in corrispondenza di altrettanti corsi di malta, ad una distanza di 50 – 80 cm l'uno dall'altro.

Mandando contemporaneamente in pressione i due martinetti si provoca uno stato di tensione monoassiale sulla porzione di muratura compresa fra di essi, 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.

---

Il rapporto tra la tensione limite, così determinata, e il valore della tensione d'esercizio, individuata con la prova del martinetto piatto singolo, fornisce un coefficiente di sicurezza relativo al maschio murario in esame.

La pressione impressa dai due martinetti alla muratura è pari a :

$$\sigma = p \cdot K_m \cdot \frac{A_m}{A_t} \quad [2.2]$$

- p pressione letta al manometro della pompa idraulica
- Km valore medio dei due coefficiente di taratura dei martinetti
- Am area del martinetto
- At valore medio delle due aree di taglio.

Il modulo elastico verticale si ottiene dal rapporto:  $E = \sigma / \varepsilon_v$

in cui  $\varepsilon_v$  è la deformazione misurata in corrispondenza dell'asse di sollecitazione mediano tra i due martinetti.

#### Prova composta compressione – taglio

È possibile ottenere ulteriori informazioni sottoponendo contemporaneamente la muratura ad una tensione tangenziale e ad una compressione verticale. La prova prevede l'utilizzo di un martinetto idraulico di ridotte dimensioni in grado di esercitare spinte orizzontali su una parte del prisma soggetto a compressione.

Estratto un mattone (in una zona laterale rispetto al prisma soggetto a compressione) si posiziona nel vano risultante un martinetto a pistone di ridotte dimensioni. Quest'ultimo agisce contro il mattone adiacente (già soggetto a compressione) inducendo una sollecitazione tangenziale nella malta di allettamento. Mantenendo costante, a diversi livelli, la tensione verticale di compressione, viene incrementata la forza laterale in modo da ottenere una tensione tangenziale nella malta e quindi uno scorrimento del mattone.

La tensione tangenziale viene valutata come:

$$\tau = \frac{V}{2A} \quad [2.3]$$

in cui V rappresenta la forza applicata e A l'area del mattone.

#### Penetrometro windsor

Questa tipologia di indagine è normata dall'American Society for Testing and Materials (ASTM) nella norma C 803-80.

Si utilizza per rilevare la resistenza dei singoli materiali componenti la muratura. La prova si sviluppa nel seguente modo: una carica balistica produce energia per muovere un pistone d'acciaio all'interno di un cilindro fino a rompere un setto di plastica posto nella sua estremità superiore. Un secondo

---

pistoncino, colpito dalla massa d'aria, batte su una sonda in lega che si inoltra nel materiale da provare. Il colpo prodotto causa un'incisione la cui entità geometrica varia in base alla consistenza e alla resistenza del materiale. La profondità di penetrazione è inversamente proporzionale alla resistenza del materiale indagato.

### Vibrometro

Questo strumento serve a rilevare i livelli di vibrazione prodotta generalmente da automezzi, ma anche da macchinari di industria o di officina che potrebbero creare disturbo agli occupanti dell'edificio e danneggiarne le strutture per effetti di fatica.

La prova è condotta con il contributo di velocimetri o accelerometri posti in punti significativi che percepiscono le vibrazioni, prodotte generalmente dal transito di veicoli a diverse velocità e/o dall'azione di strumenti o macchinari che provocano scuotimenti intermittenti (martelli demolitori, ecc.).

La prova non prevede alcuna alterazione delle infrastrutture.

### Termografia ad infrarossi

Il comportamento dei materiali è dipendente dalla loro conducibilità termica e dal loro calore specifico. Ogni materiale può essere sottoposto all'analisi delle radiazioni infrarosse che emana. Tale peculiarità estesa alle analisi delle strutture murarie consente, attraverso questa prova, l'individuazione della tessitura muraria, la presenza di aperture tamponate e la valutazione dell'omogeneità dei materiali, inoltre permette il rilevamento di cavità (canne fumarie, tubazioni, ecc.), nonché la presenza di umidità e l'identificazione dell'orditura dei solai.

La radiazione termica emessa dai materiali alla temperatura T è espressa dalla relazione di Stefan-Boltzmann:

$$W = K_{SB} T^4 BE \quad [2.4]$$

- W = intensità radiante (watt/m<sup>2</sup>);
- K<sub>SB</sub> = costante di Stefan-Boltzmann;
- T = temperatura in gradi Kelvin; -
- E = remissività del corpo.

La termografia ad infrarossi non può essere utilizzata per particolari presenze di umidità nelle murature e risente dell'ora del giorno e di fattori ambientali.

La presenza di una cortina (rivestimento) di qualsiasi materiale, aderente alle murature sulle quali si effettua la prova, non consente di riconoscere la tessitura muraria delle strutture sottoposte ad indagine. L'apparecchiatura necessaria per la termografia ad infrarossi è costituita da un rilevatore



---

formato da un perno conduttore a bassa temperatura e da telecamere i cui apparati sono sensibili alle radiazioni di lunghezza d'onda compresa tra 2 e 6 mm.

Un termogramma memorizza le differenze termiche misurate con apparecchi sensibili a differenze inferiori a 0.2°C. La prova è di tipo non distruttivo.

### Magnetometria

Questa prova è diretta all'individuazione di elementi ferromagnetici occultati alla vista. L'attrezzatura di prova è costituita da un magnetometro composta da una sonda mossa sulla superficie da indagare che è formata da una bobina che produce un campo magnetico alternato.

Tutti gli oggetti metallici presenti nella struttura da indagare provocano una modifica di potenziale all'estremità della sonda (bobina) che viene registrata graficamente o, per strumentazioni meno aggiornate, segnalata su una scala.

All'estremità di un conduttore elettrico di lunghezza  $L$  si produce una differenza di potenziale:

$$\Delta = BLv \quad [2.5]$$

L'induzione magnetica si muove con una velocità  $v$  attraverso un campo magnetico di intensità  $B$ .

La differenza di potenziale  $\Delta_l$  alle estremità del conduttore dà luogo alla relazione:

$$\Delta_l = \Delta - iR \quad [2.6]$$

- $iR$  è la caduta di potenziale
- $R$  è la resistenza elettrica del conduttore.

È una prova non distruttiva.

### Shove-test

Per shove-test si intende la prova di scorrimento locale di un singolo mattone. La prova, evidentemente utilizzabile solo nel caso di muratura con elementi artificiali, viene impiegata come indice di resistenza della muratura nei confronti del complesso meccanico di rottura a taglio nel piano della parete.

Il modo più semplice di esecuzione prevede la sola rimozione di un mattone, al posto del quale viene inserito un martinetto, e di un giunto verticale di malta e quindi la misura del carico di scorrimento che può effettuarsi rilevando la curva carico-scorrimento relativo tra mattone e malta.

Il meccanismo resistente, mobilitato nel corso dello shove-test, è controllato, oltre che dall'aderenza, anche dalla tensione di compressione perpendicolare al giunto di malta.

Le esperienze maturate nell'uso di questo metodo hanno evidenziato che il valore medio della tensione tangenziale lungo il giunto di malta al raggiungimento dello scorrimento del mattone è risultato da tre a cinque volte superiore alla resistenza a taglio valutata per mezzo della prova a compressione diagonale.

---

## 2.2 – Prove in laboratorio

### Prova a compressione diagonale

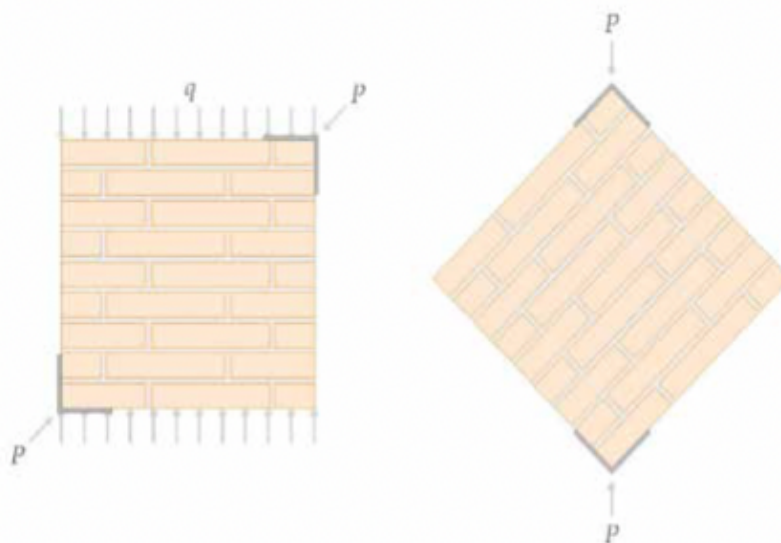
Per la ricerca del comportamento a taglio della muratura sotto azioni di taglio, uno dei metodi utilizzati dai ricercatori è la prova a compressione diagonale. La prova a compressione diagonale è un metodo di indagine distruttiva che permette di misurare in modo indiretto la resistenza a taglio ( $\tau_0$ ) e il modulo di taglio ( $G$ ) della muratura, applicando una sollecitazione di compressione lungo la diagonale di un pannello in muratura sino alla rottura del pannello; venne introdotta nella normativa italiana con il *D.M.LL.PP. 20/11/1987*

La prova può essere effettuata sia in sito che in laboratorio, con modalità differenti. Le modalità di esecuzione fanno riferimento alla normativa *ASTM E 519*:

*“This test method covers determination of the diagonal tensile or shear strength of 1.2 by 1.2-m (4 by 4-ft) masonry assemblages by loading them in compression along one diagonal (fig 2.2.1), thus causing a diagonal tension failure with the specimen splitting apart parallel to the direction of load.”*

e alle raccomandazioni *RILEM*. Le due norme differiscono per l'interpretazione dei risultati: *ASTM* considera che nel pannello si produca uno stato di taglio puro, mentre *RILEM* individua uno stato di tensione principale di trazione al centro del pannello che lo porta a rottura con una lesione diagonale. La prova di compressione diagonale può essere eseguita secondo due modalità:

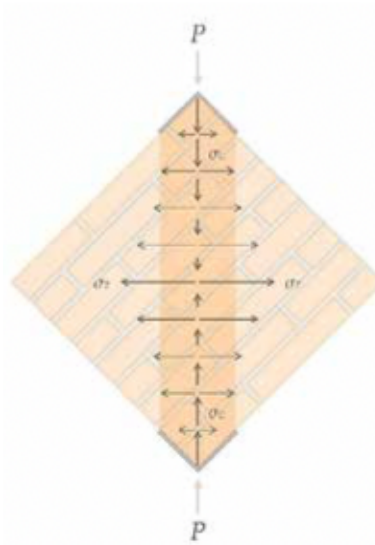
- Compressione diagonale con carico costante di precompressione  $q$  uniformemente distribuito;
- Compressione diagonale in assenza di carico di precompressione  $q$ .



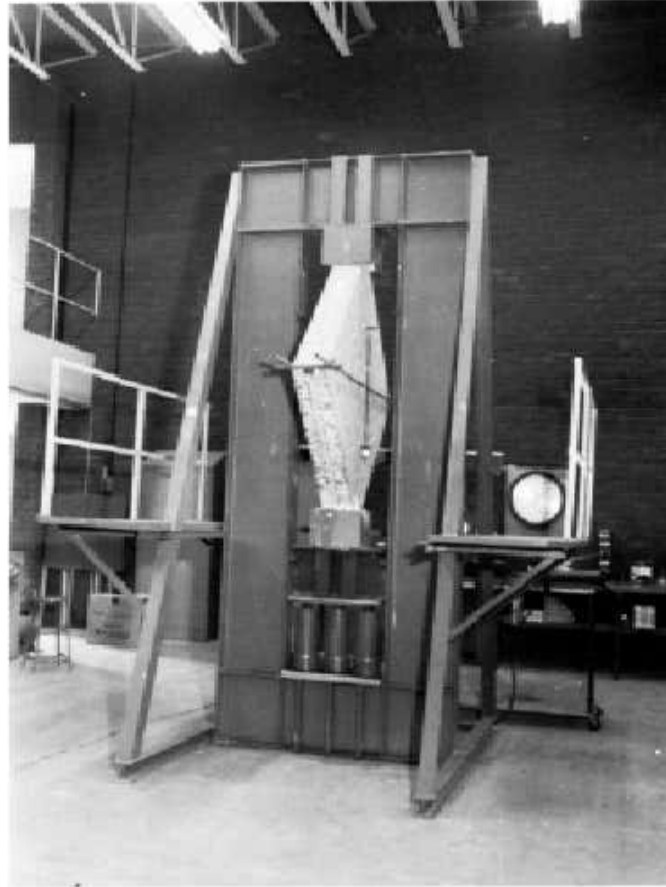
*Figura 2.1 Modalità di esecuzione della prova di compressione diagonale*

---

La direzione di applicazione del carico lungo una delle diagonali, diagonale compressa, genera in quella perpendicolare alla stessa, diagonale tesa, uno stato di tensione di trazione (Figura 2.2) che induce la rottura del campione lungo la diagonale compressa; l'andamento delle lesioni risulta in genere parallelo alla direzione di applicazione del carico. La compressione diagonale, difatti, è anche denominata prova a taglio per trazione indiretta. La presenza delle scarpe metalliche con cui è trasmesso il carico al pannello produce uno stato di distribuzione tensionale quasi uniforme nella porzione di provino compresa tra le impronte di carico. Lo stato tensionale legato alle tensioni tangenziali è riportato in Figura 2.3.



*Figura 2.2 Tensioni normali di trazione e compressione prodotte dall'applicazione del carico e distribuzione quasi uniforme tra le impronte di carico*



*Figura 2.3 Prova a compressione diagonale per la determinazione della resistenza a taglio – ASTM E 519*

Il principio di funzionamento è il seguente: si determina la resistenza caratteristica a taglio in assenza di carichi verticali  $f_{vk0}$  tramite prove di compressione diagonale su almeno 6 muretti quadrati aventi lato  $120\text{ cm}$ . La resistenza caratteristica sarà dedotta dalla resistenza media ottenuta  $f_{vm}$  mediante la relazione:

$$f_{vk0} = 0.7 \cdot f_{vm} \quad [2.7]$$

Lo scorrimento tangenziale  $\gamma$  può essere valutato con la relazione:

$$\gamma = (\Delta V + \Delta H) / l \quad [2.8]$$

dove:

- $\Delta V$  è l'accorciamento verticale
- $\Delta H$  è l'allungamento orizzontale
- $l$  è la lunghezza della base di misura

Il modulo di elasticità tangenziale secante  $G = P/\gamma$  può essere valutato al livello di carico  $P_u/3$ .

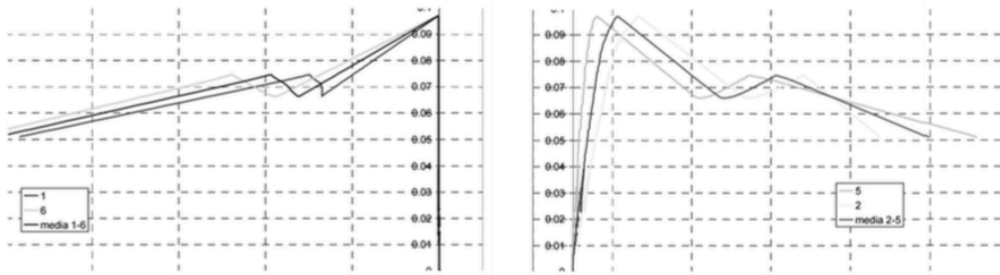


Figura 2.4 Diagrammi tensioni - deformazioni

### Prova su triplette

Queste prove sono effettuate per caratterizzare le proprietà dell'interfaccia tra giunto di malta e blocco, ovverosia lo scorrimento del giunto orizzontale e la resistenza a trazione del giunto.

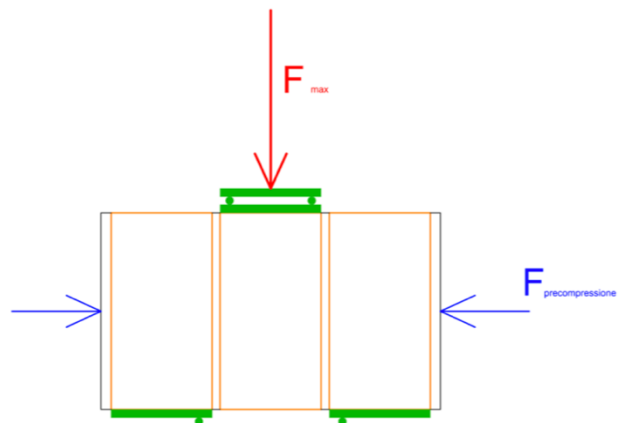


Figura 2.5 Setup di prova dato dalla normativa (sinistra) e schema delle forze in gioco (destra)

La precompressione laterale va applicata attraverso un martinetto idraulico non a diretto contatto con le facce laterali del provino ma mediata con un elemento ligneo, in modo da non danneggiare preventivamente i blocchi alle estremità. La vicinanza in asse tra i cuscinetti sferici superiori e quelli inferiori fa sì che la forza applicata in sommità del blocco centrale si tramuti principalmente in sforzo di taglio, riducendo al minimo il momento (più precisamente il braccio) che si viene a creare durante la prova.

La prova di scorrimento lungo i giunti prevede un minimo di tre provini, per ogni sforzo di precompressione, identificati dalla normativa in base al valore di compressione ottenuto nei test sui singoli elementi resistenti. Successivamente all'applicazione del precarico, valore che viene mantenuto costante durante tutta la prova ed in corrispondenza del quale vengono azzerati gli

---

strumenti si procede quindi a caricare il provino monotonicamente sino a rottura del giunto di malta. Lo scorrimento viene imposto nella medesima direzione in cui avviene nei muri, ossia simulando la presenza di un carico parallelo alla direzione dei letti di malta, distribuito lungo lo spessore.

Prova di compressione semplice

Prova che permette di determinare la resistenza a compressione della muratura e il modulo elastico. La prova è codificata dall'Ente Nazionale Italiano di Unificazione attraverso la norma UNI EN 1052-1 "Metodi di prova per muratura. Determinazione della resistenza a compressione."

---

### 3. Interventi strutturali

Per quanto riguarda il recupero delle strutture in muratura, l'attenzione viene posta su alcuni interventi volti a ridurre le carenze dei collegamenti mediante incatenamenti costituiti da tiranti e/o catene, o mediante collegamento dei solai alle pareti murarie oppure interventi volti ad incrementare la resistenza dei maschi murari mediante scuci e cuci, risarcitura di lesioni ovvero ristilatura dei giunti. Inoltre quando si opera un intervento di recupero è fondamentale consolidare nel rispetto della conservazione, quindi seguendo quei criteri che sono stati presi ad esempio nella pratica del restauro e che possono essere sintetizzati nel modo seguente.

- *Tendenza al minimo intervento*
- *Ricerca della compatibilità*
- *Reversibilità*
- *Rispetto dell'autenticità*
- *Conservazione della materia*
- *Controllo dell'impatto visivo e riconoscibilità dell'intervento*

Le attuali norme tecniche *NTC 2008* e relativa *Circolare n.617 del 2009* individuano le seguenti categorie di intervento.

Gli interventi di adeguamento sono atti a conseguire i livelli di sicurezza previsti dalle norme. È fatto obbligo di procedere alla valutazione della sicurezza e, qualora necessario, all'adeguamento della costruzione, a chiunque intenda:

- sopraelevare la costruzione;
- ampliare la costruzione mediante opere strutturalmente connesse alla costruzione;
- apportare variazioni di classe e/o di destinazione d'uso che comportino incrementi dei carichi globali in fondazione superiori al 10%; resta comunque fermo l'obbligo di procedere alla verifica locale delle singole parti e/o elementi della struttura, anche se interessano porzioni limitate della costruzione;
- effettuare interventi strutturali volti a trasformare la costruzione mediante un insieme sistematico di opere che portino ad un organismo edilizio diverso dal precedente.

In ogni caso, il progetto dovrà essere riferito all'intera costruzione e dovrà riportare le verifiche dell'intera struttura post-intervento. La valutazione della sicurezza è finalizzata a stabilire se la struttura, a seguito dell'intervento, è in grado di resistere alle combinazioni delle azioni di progetto contenute nelle *NTC 2008*, con il grado di sicurezza richiesto dalle stesse.

---

Gli interventi di miglioramento sono atti ad aumentare la sicurezza strutturale esistente, pur senza necessariamente raggiungere i livelli richiesti dalle norme. Rientrano negli interventi di miglioramento tutti gli interventi che siano comunque finalizzati ad accrescere la capacità di resistenza delle strutture esistenti alle azioni considerate. Il progetto e la valutazione della sicurezza dovranno essere estesi a tutte le parti della struttura potenzialmente interessate da modifiche di comportamento, nonché alla struttura nel suo insieme. Nel caso di intervento di miglioramento sismico, la valutazione della sicurezza riguarderà, necessariamente, la struttura nel suo insieme, oltre che i possibili meccanismi locali.

Le riparazioni o interventi locali sono atti ad interessare elementi isolati, e che comunque comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti. In generale, gli interventi di questo tipo riguarderanno singole parti e/o elementi della struttura e interesseranno porzioni limitate della costruzione. Il progetto e la valutazione della sicurezza potranno essere riferiti alle sole parti e/o elementi interessati e documentare che, rispetto alla configurazione precedente al danno, al degrado o alla variante, non siano prodotte sostanziali modifiche al comportamento delle altre parti e della struttura nel suo insieme e che gli interventi comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti. Rientrano ad esempio in questa categoria la sostituzione di coperture e solai di piano, solo a condizione che ciò non comporti una variazione significativa di rigidità e di distribuzione di massa nel proprio piano, importante ai fini della redistribuzione di forze orizzontali, né un aumento dei carichi verticali statici.

Gli interventi di rinforzo sono mirati al risanamento e riparazione di murature deteriorate e danneggiate ed al miglioramento delle proprietà meccaniche della muratura. Se eseguiti da soli non sono sufficienti, in generale, a ripristinare o a migliorare l'integrità strutturale complessiva della costruzione. Il tipo di intervento da applicare andrà valutato anche in base alla tipologia e alla qualità della muratura. Gli interventi dovranno utilizzare materiali con caratteristiche fisico-chimiche e meccaniche analoghe e, comunque, il più possibile compatibili con quelle dei materiali in opera. L'intervento deve mirare a far recuperare alla parete una resistenza sostanzialmente uniforme e una continuità nella rigidità, anche realizzando gli opportuni ammorsamenti, qualora mancanti. L'inserimento di materiali diversi dalla muratura, ed in particolare di elementi in conglomerato cementizio, va operato con cautela e solo ove il rapporto tra efficacia ottenuta e impatto provocato sia minore di altri interventi, come nel caso di architravi danneggiati e particolarmente sollecitati.



---

A seconda dei casi si procederà:

- a riparazioni localizzate di parti lesionate o degradate;
- a ricostituire la compagine muraria in corrispondenza di manomissioni quali cavità, vani di varia natura (scarichi e canne fumarie, ecc.);
- a migliorare le caratteristiche di murature particolarmente scadenti per tipo di apparecchiatura e/o di composto legante.

### **3.1 - Incatenamenti**

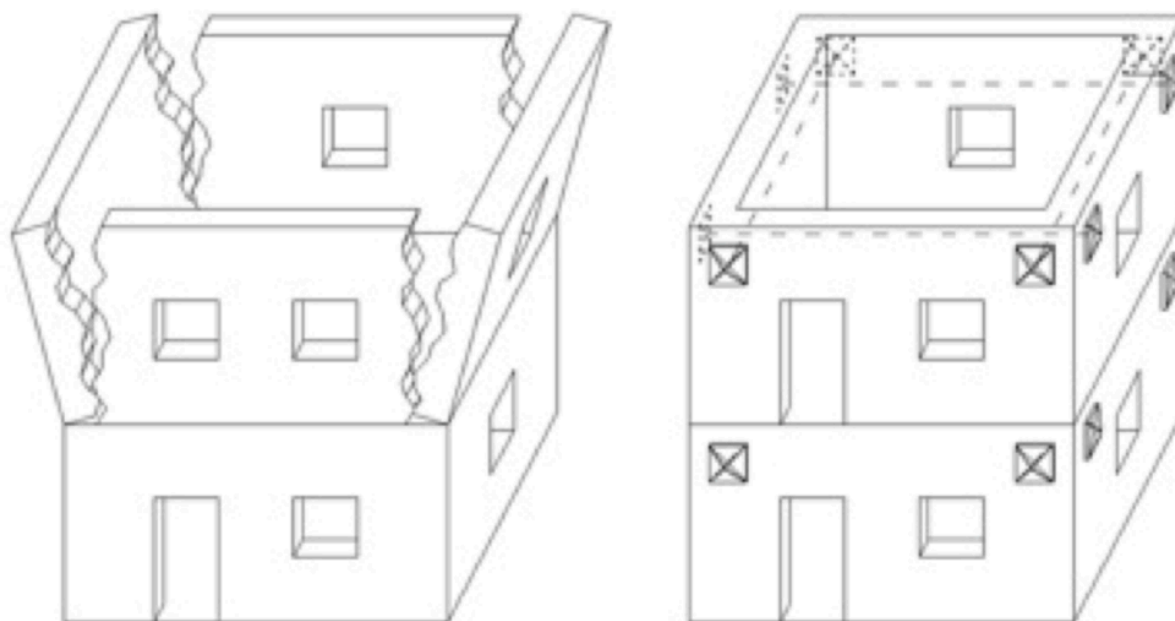
Per incatenamenti si intende l'insieme dei sistemi di presidio e consolidamento dell'edificio in muratura, costituiti da catene, tiranti, collegamento di solai in legno alle pareti in muratura, in grado di ricostituire e restituire un comportamento scatolare e monolitico della fabbrica muraria. Gli incatenamenti rendono possibile alle pareti murarie sia poste in contiguità (nel caso di mutua ammorsatura assente e/o poco efficace), sia alle pareti murarie contrapposte, nonché alle pareti murarie sottoposte all'azione di elementi spingenti (ad esempio: elementi voltati non mutuamente contrastati o sufficientemente equilibrate da masse murarie), di interagire mutuamente e fornire una risposta il più possibile "globale" nei confronti delle azioni orizzontali (ad esempio: sisma), contenendo l'entità degli spostamenti e delle rotazioni delle pareti stesse e consentendo la mitigazione della vulnerabilità per innesco di possibili meccanismi cinematici di ribaltamento per rotazione. Gli incatenamenti costituiscono un sistema di rinforzo ampiamente sperimentato ed applicato con riconosciuto successo anche in organismi murari molto antichi; essi possono essere, peraltro, validamente utilizzati anche come presidio provvisorio di consolidamento per contrastare dissesti e cinematismi che investono repentinamente la fabbrica muraria. Se opportunamente realizzati, gli incatenamenti utilizzati come presidi provvisori possono essere trasformati in definitivi, per inglobamento in interventi di rafforzamento o miglioramento.

Gli incatenamenti sono, altresì, raccomandati anche nei seguenti casi:

- per contenere le spinte non contrastate degli elementi voltati (archi e volte);
- per contenere le spinte non contrastate di strutture in copertura costituite da elementi spingenti (travi inclinate, capriate prive di tiranti e/o catene in grado di annullare la spinta sulle pareti di appoggio);
- in assenza di cordoli perimetrali;
- in caso di cedimenti differenziali delle fondazioni, per migliorare il comportamento scatolare e limitare gli spostamenti relativi di differenti parti strutturali.



*Figura 3.1 Incatenamenti si archi a volte*



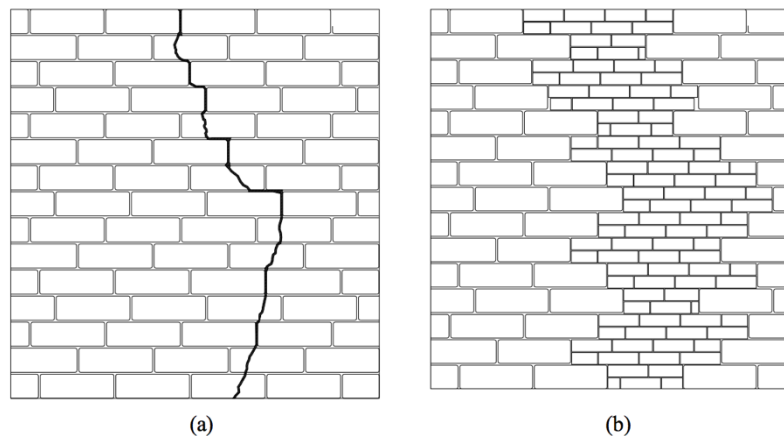
*Figura 3.2 Comportamento edificio senza tiranti (sinistra) e con i tiranti (destra)*

### **3.2 - “Scuci e cucì”**

L'intervento di consolidamento sostitutivo locale, denominato “scuci e cucì”, consiste in una demolizione locale di parti di tessitura muraria e successiva ricostruzione. È un'operazione delicata da eseguire con la massima cautela evitando colpi e vibrazioni durante la fase di demolizione e provvedendo alle eventuali opere di presidio.

---

L'intervento consiste nell'operare la rimozione (scucitura) della parte di muratura (pietrame e/o laterizi) localmente degradata e/o lesionata, ivi compresa la malta di allettamento originaria e tutto quanto possa compromettere le successive lavorazioni, utilizzando mezzi esclusivamente manuali senza l'utilizzo di utensili meccanici. Procedere al lavaggio del paramento murario con utilizzo di acqua spruzzata a bassa pressione. Ricostruzione (cucitura) dei conci murari precedentemente rimossi e sostituzione (sostruzione) degli stessi utilizzando mattoni pieni allettati con malta di caratteristiche fisicomeccaniche simili alla preesistente.



*Figura 3.3 Paramento murario oggetto di cucì e scucì: a) prima dell'intervento; b) dopo l'intervento*

L'operazione viene eseguita partendo dal basso e procedendo verso l'alto. Per contenere gli effetti delle deformazioni di riassetto, sia per il ritiro della malta che per l'entrata progressiva in carico, è opportuno seguire particolari accorgimenti nella ricostruzione a "scuci e cucì":

- usare malta di piccolo spessore tra i mattoni, al fine di ridurre la diminuzione di volume per effetto del rassetto e del successivo ritiro della malta;
- mettere in forza progressivamente le parti già ricostruite del muro, con cunei o spezzoni di mattoni duri, i cosiddetti "biscotti", in modo da poter compensare in parte il rassetto dovuto al ritiro della malta ed alla compressione che gradualmente si induce;
- ove si ravvisi l'opportunità di impiegare opere provvisorie, si raccomanda un loro utilizzo in forma parzialmente attiva, mettendo, cioè, in forza le puntellature con dispositivi vari utilizzando i semplici cunei di legno martellati, elementi metallici filettati e martinetti meccanici o oleodinamici. In tal modo si garantisce il trasferimento alla puntellatura di parte

---

del carico sopportato inizialmente dal cuneo; il carico verrà restituito al muro dopo la rimozione della puntellatura.

### 3.3 – Tecnica di intervento tramite FRP

Comunemente denominati FRP, acronimo di Fiber Reinforced Polymers, si tratta di matrici polimeriche e fibre lunghe continue di carbonio, vetro o arammide, che presentano un comportamento prevalentemente elastico lineare fino a rottura. Tra i vantaggi che possono offrire vi sono la celerità dell'intervento, nonché l'immediata adattabilità del rinforzo alle strutture. Questi sistemi possono essere utilmente impiegati per il consolidamento di strutture varie, quali telai in cemento armato, in acciaio, strutture murarie, strutture in legno. I materiali compositi possono essere più resistenti e, almeno nel caso dei compositi a fibra di carbonio, più rigidi dei materiali da costruzione tradizionali; di conseguenza, avendo una minore densità, una struttura in composito può arrivare ad avere un peso dimezzato rispetto ad un'altra realizzata mediante materiali tradizionali e una resistenza superiore di circa 4 volte. Pertanto, tramite questi aspetti, ovvero: maggiore resistenza, maggiore rigidezza e peso minore, si può dire che questi materiali risultano, a tutt'oggi, un'alternativa molto valida alle tecniche tradizionali di miglioramento e adeguamento sismico, al rinforzo e consolidamento statico di elementi strutturali di varia natura.

Tali materiali sono costituiti da una fase continua, denominata matrice composta (spesso di resine epossidiche bicomponenti), che avvolge un materiale a fasi discontinue, caratterizzato da elevate proprietà meccaniche a trazione, denominata fibra.

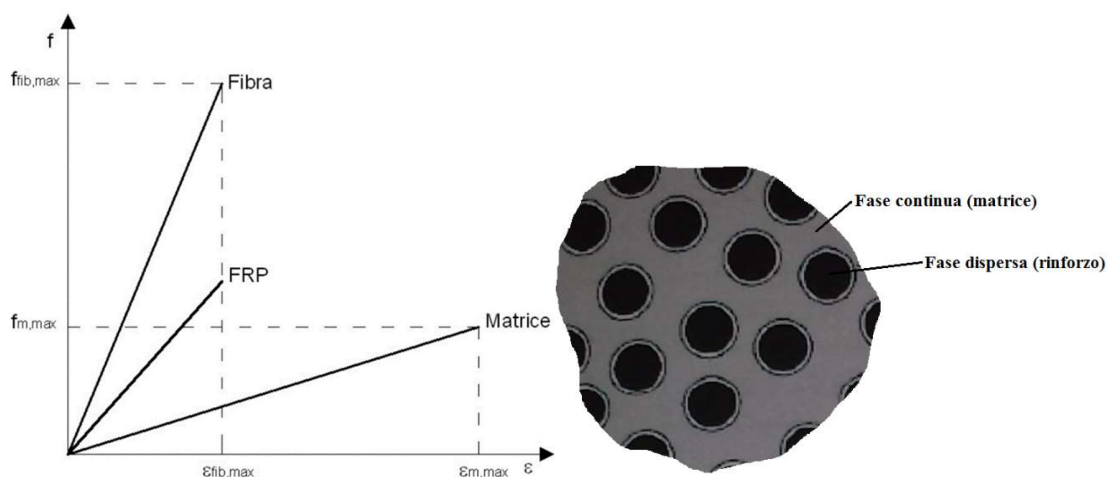


Figura 3.4 Fasi del composito e legami costitutivi

Quest'ultima può essere di tipo naturale o sintetica, e rappresenta la funzione principale di sopportare e resistere alle sollecitazioni di trazione. Tra le fibre artificiali hanno maggiore diffusione quelle di vetro, carbonio e aramidiche. Il prodotto finale di lavorazione è costituito da un rotolo di fibra, con le filature che possono avere varie orientazioni: si distinguono infatti in fibre uni-direzionali, orientate

---

in una direzione, fibre biassiali, disposte in due direzioni ortogonali, e in tre direzioni, triassiali. In queste condizioni, i materiali che si ottengono sono altamente anisotropi, essendo caratterizzati da una notevole resistenza e rigidità a trazione nel solo asse longitudinale delle fibre, con scarse caratteristiche meccaniche a compressione e taglio. Di conseguenza è evidente che la disposizione dei tessuti deve essere accompagnata da un'attenta analisi delle sollecitazioni. Le fibre vengono bloccate al tessuto murario (o alle strutture in c.a.), attraverso la disposizione su di esse di una matrice costituita da un polimero termoplastico o termoindurente, da materiale ceramico o metallico. La funzione fondamentale della matrice è quella di trasferire alla fibra i carichi applicati, oltre a quella di proteggere la fibra da attacchi di tipo chimico o da variazioni di temperatura, essendo quest'ultima altamente sensibile.



*Figura 3.5 Consolidamento strutturale con FRP*



*Figura 3.6 Modulo rinforzato con FRP*

### **3.4 – Tecnica di intervento tramite FRCM**

I compositi fibrorinforzati a matrice cementizia (FRCM) sono costituiti da una matrice cementizia (di natura inorganica) all'interno della quale vengono annegate le fibre di rinforzo. Nel materiale composito così ottenuto, vengono a distinguersi due ruoli ben diversi tra loro:

- le fibre forniscono la resistenza a trazione e la rigidità del sistema di rinforzo strutturale;
- la matrice ha il compito di proteggere le fibre annegate al suo interno e di trasmettere gli sforzi.

La matrice, come detto in precedenza, gioca un importante ruolo all'interno del sistema di rinforzo strutturale essendo deputata alla protezione delle fibre ed al trasferimento degli sforzi all'interno del rinforzo e dal rinforzo al supporto. Per i materiali compositi fibrorinforzati FRCM la matrice ha natura inorganica ed è costituita da una malta di cemento.

Le matrici inorganiche a base cementizia sono di solito realizzate con malte cementizie di tipo pozzolanico o a base di calce ed additivi polimerici in percentuale inferiore al 5% (ad esempio i nanopolimeri modificati, la nano silice, le silici colloidali, le nano fibre sintetiche ed i nanotubi di carbonio). Gli eventuali additivi utilizzati migliorano la lavorabilità, il tempo di presa, l'adesione della malta alle fibre e le proprietà meccaniche della matrice stessa.



---

Nonostante si possano utilizzare additivi che ne migliorano la lavorabilità e la capacità di impregnazione della fibra, la matrice cementizia può essere utilizzata solo assieme a reti di fibre e non a tessuti di fibre.

La matrice cementizia presenta un'ottima resistenza al fuoco, alle alte temperature ed ai raggi UV. Oltre a questo è da segnalare l'elevata compatibilità col materiale di supporto sia per quanto riguarda la permeabilità che per quanto concerne il coefficiente di dilatazione termica.

forzi. Come detto in precedenza il ruolo che le fibre svolgono nel sistema di rinforzo strutturale è quello di garantire resistenza e rigidità globali.

Le fibre più diffuse ed utilizzate nell'ambito dell'ingegneria civile sono:

- fibre di carbonio;
- fibre di vetro;
- fibre aramidiche, conosciute anche come Kevlar;
- fibre di basalto;
- fibre in PBO (Poliparafenilenbenzobisaxolo);
- fibre in acciaio.

Tutte le fibre summenzionate hanno ottime resistenza e rigidità ma tutte sono caratterizzate da un tipo di rottura elasto-fragile e quindi da un valore di deformazione a rottura basso (ciò non è sempre vero per le fibre in acciaio).



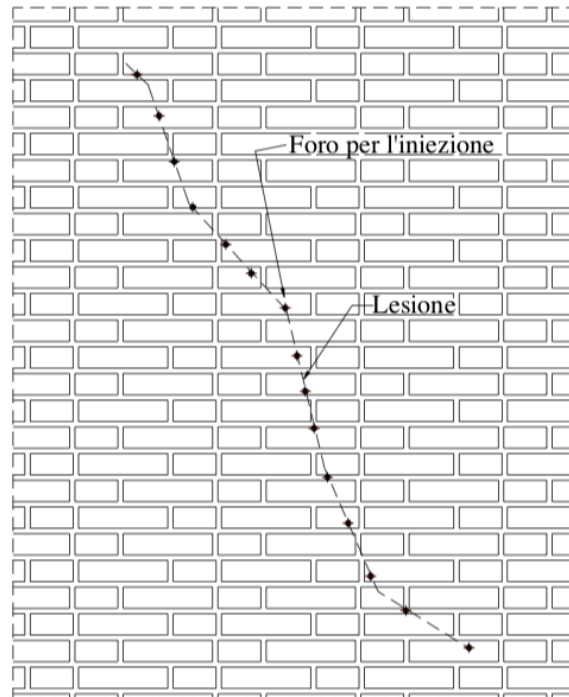
*Figura 3.7 Rinforzo strutturale con FRCM*

---

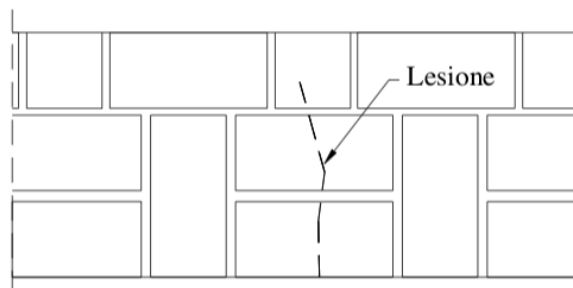
### 3.5 – Altri tipi di intervento

Intervento di sarcitura delle lesioni che si articola nelle seguenti due fasi:

1) iniezione della lesione



(a)

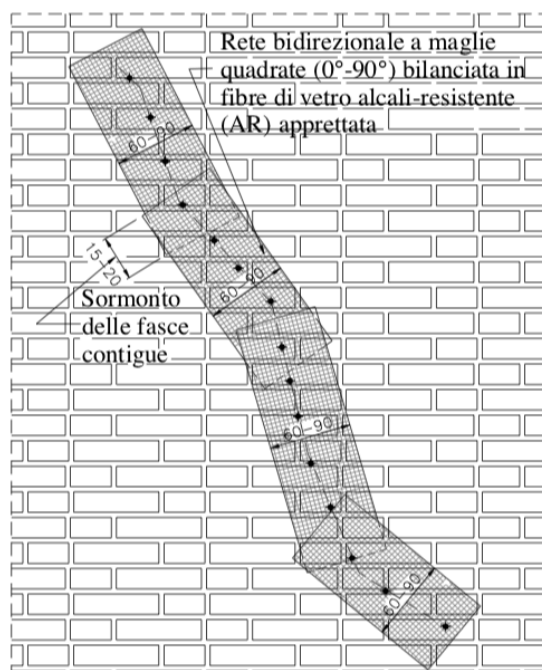


(b)

*Figura 3.8 Iniezione della lesione vista prospettica e vista in sezione trasversale*



## 2) applicazione di rete di rinforzo.



*Figura 3.9 Applicazione rete di rinforzo in vista prospettica*

L'adozione di iniezioni di miscele leganti mira al miglioramento delle caratteristiche meccaniche della muratura da consolidare. A tale tecnica, pertanto, non può essere affidato il compito di realizzare efficace ammorsature tra i muri e quindi di migliorare, se applicata da sola, il comportamento d'insieme della costruzione.

Tale intervento risulta inefficace se impiegato su tipologie murarie che per loro natura siano scarsamente iniettabili (scarsa presenza di vuoti e/o vuoti non collegati tra loro). Particolare attenzione va posta nella scelta della pressione di immissione della miscela, per evitare l'insorgere di dilatazioni trasversali prodotte dalla miscela in pressione. Nel caso si reputi opportuno intervenire con iniezioni su murature incoerenti e caotiche, è necessario prendere provvedimenti atti a ridurre il rischio di sconnessione della compagine muraria e di dispersione della miscela.

Particolare cura dovrà essere rivolta alla scelta della miscela da iniettare, curandone la compatibilità chimico-fisico-meccanica con la tipologia muraria oggetto dell'intervento.

Le procedure di applicazione per le iniezioni di miscele leganti sono le seguenti:

1. conoscenza della sezione trasversale della muratura, per valutarne l'iniettabilità;
2. scelta corretta della miscela di iniezione (caratteristiche meccaniche, compatibilità chimica e fisica);

- 
3. scelta del numero dei fori di iniezione, la disposizione di questi, la pressione ed il tempo di iniezione;
  4. valutazione dell'esito delle iniezioni mediante adeguate tecniche di controllo.

---

## 4. Sperimentazione

Uno degli obiettivi della sperimentazione svolta in laboratorio è quello di studiare la resistenza a trazione diagonale o resistenza a taglio di pannelli in muratura tramite prove di compressione diagonale (§ 2.2). Il fine ultimo poi è quello di confrontare i risultati ottenuti da tali prove con quelli ricavati da prove fatte su pannelli di uguali dimensioni e materiali, ma rinforzati con diversi tipi di intonaco.

La norma di riferimento per l'esecuzione di tale prova è la ASTM E 519 "Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages". Tale norma si basa sull'ipotesi che durante la prova di compressione diagonale, si produca uno stato tensionale di taglio puro nel baricentro del pannello murario. Il cerchio di Mohr è centrato nell'origine del sistema di riferimento ( $\sigma$ ,  $\tau$ ) con tensione tangenziale  $\tau$  pari al raggio e intensità uguale alle tensioni principali di trazione  $\sigma_t$  e di compressione  $\sigma_c$ . Vale, pertanto, la relazione:

$$|\tau| = \sigma_t = |\sigma_c| = P/(A_n\sqrt{2}) = 0.707 P/A_n \quad [4.1]$$

Dove  $P$  è il carico di compressione applicato parallelamente a una diagonale del pannello ed  $A_n$  è l'area netta della sezione trasversale. Questa, nel caso generale di pannello avente lati disuguali  $w$  e  $h$ , spessore  $s$  e percentuale di area solida  $n$ , vale:

$$A_n = \frac{b + h}{2} s n \quad [4.2]$$

Mentre nel caso di pannelli quadrati di lato  $l$  costituiti da elementi lapidei pieni ( $n=1$ ) e si semplifica in:

$$A_n = l \cdot s \quad [4.3]$$

La condizione di crisi si fa corrispondere al raggiungimento di una tensione di trazione pari alla resistenza della muratura  $f_t$  (ovvero  $\sigma_t = f_t$ ) per cui si assume:

$$\tau_0 = f_t = 0.707 P_{max}/A_n \quad [4.4]$$

La validità di tale formulazione è limitata dal fatto che la reale distribuzione di tensioni tangenziali lungo la diagonale è tutt'altro che uniforme, per cui lungo la diagonale opposta a quella di applicazione del carico non si genera uno sforzo di trazione uguale a quello di compressione. La resistenza così ottenuta, tuttavia, viene correntemente impiegata nel modello di resistenza puntuale

---

proposto da Turnšek e Čačovič (1970), al fine di valutare la resistenza a taglio da trazione (fessurazione diagonale) di pannelli murari sollecitati anche da sforzo normale non nullo.

## **4.1 – Materiali**

L'acciaio, l'alluminio, le materie plastiche sono materiali propriamente detti aventi caratteristiche omogenee come anche i conglomerati cementizi, il legno e il cemento armato. Per quanto riguarda la muratura, invece, non è possibile considerarla un materiale, ma una struttura poiché è un sistema costituito da più elementi e da più materiali le cui caratteristiche variano non solo da muro a muro, ma anche tra due punti molto vicini dello stesso elemento in quanto questa struttura è influenzata dal fattore "umano" trattandosi di un prodotto artigianale. Il comportamento della muratura cambia non solo in funzione delle caratteristiche geometriche, elastiche e meccaniche degli elementi che la compongono, ma anche in base al tessuto murario ovvero al modo con cui gli elementi lapidei sono disposti.

### **4.1.1 – La malta**

La malta si ottiene dalla miscela di uno o più leganti inorganici, aggregati, acqua ed eventualmente aggiunte e/o additivi per il riempimento, il collegamento e l'allettamento della muratura. I leganti sono materiali utilizzati per legare insieme particelle solide in una massa coesa, per esempio cemento o calce da costruzione; gli aggregati sono materiali granulari che non contribuiscono alla reazione di indurimento della malta; le aggiunte sono costituite da materiale inorganico fine (che non è un aggregato o un legante) che può essere aggiunto alla malta per migliorare o ottenere proprietà speciali.

In base al tipo di legante utilizzato le malte si dividono in quattro gruppi:

1. malta aerea: il legante utilizzato è la calce idrata o aerea (indurisce lentamente all'aria reagendo con l'anidride carbonica atmosferica);
2. malta idraulica: il legante utilizzato è la calce idraulica (legante idraulico che può far presa ed indurire anche se immerso in acqua);
3. malta cementizia: il legante utilizzato è il cemento (legante idraulico);
4. malta bastarda o composta: se oltre al cemento si utilizza anche un altro legante.

Classe	Tipo di malta	Composizione				
		Cemento	Calce aerea	Calce idraulica	Sabbia	Pozzolana
M 2,5	Idraulica	--	--	1	3	--
M 2,5	Pozzolonica	--	1	--	--	3
M 2,5	Bastarda	1	--	2	9	--
M 5	Bastarda	1	--	1	5	--
M 8	Cementizia	2	--	1	8	--
M 12	Cementizia	1	--	--	3	--

*Tabella 4.1 Classificazione malte e loro composizione*

Benché la malta all'interno di una struttura muraria rappresenti una piccola percentuale, essa ha una notevole influenza sul comportamento della muratura ed è quindi necessario che soddisfi determinati requisiti: la malta indurita deve essere in grado di sviluppare una buona aderenza con i mattoni e non deve sviluppare ritiri eccessivi, che premetterebbero all'acqua piovana di infiltrarsi e di provocare perdite di resistenza o addirittura lesioni nei mattoni.

Per questa sperimentazione è stata utilizzata una malta 1:1:5, corrispondente alla M5 malta bastarda.



*Figura 4.1 Calce idrata e cemento Portland composito 32.5 R*

Tipi di prove su malta:

Su un medesimo prisma di malta si eseguono due tipi di prove: una prova a flessione e una a compressione normate dall'Ente Italiano di Unificazione nella norma UNI EN 1015 – 11 “Metodi di prova per malte per opere murarie. Parte 11: determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita”.

La prova consiste nel sottoporre a flessione il prisma precedentemente confezionato e portarlo a rottura applicando il carico in tre punti e, successivamente, si proveranno a compressione le due parti rimanenti dalla prova a flessione. I campioni vengono gettati all'interno di stampi metallici costituito

---

da un telaio aperto formato da parti rimovibili a formare tre comparti. I campioni devono essere prismi aventi dimensioni (160x40x40 mm) e ne devono essere confezionati tre e lasciati stagionare per almeno 28 giorni. La prova di flessione si esegue posizionando il campione all'interno di una macchina costituita da due rulli inferiori, a sostegno del campione, e uno superiore per applicare il carico nella mezzera del provino. I rulli devono avere una lunghezza pari a 45 – 50 mm e un diametro di circa 10 mm, inoltre i due rulli inferiori devono essere distanziati l'uno dall'altro di circa 100 mm. Per eseguire la prova di flessione è necessario ripulire il provino da eventuali aggregati non inglobati nel campione e posizionarlo nell'apparecchiatura di prova con una delle facce che erano a contatto con l'acciaio rivolta verso i due rulli di appoggio. Applicare quindi il carico ad una velocità costante compresa tra 50 e 100 N/s in modo da raggiungere la rottura in un tempo compreso tra i 30 e i 90s. La resistenza a flessione del singolo provino si calcola con la seguente formula:

$$f=1,5 Fl /bd^2 \quad [4.5]$$

Per eseguire la prova di compressione su prismi di malta si necessita di un macchinario avente la piastra superiore in grado di allinearsi liberamente quando viene a contatto con il provino, inoltre le piastre (aventi lunghezza e larghezza pari a 40 mm e spessore pari a 10mm), non devono potersi inclinare l'una rispetto all'altra durante la fase di carico. La prova di compressione viene eseguita sulle due parti ottenute dalla rottura dei prismi sottoposti a prova di flessione. Bisogna posizionare i campioni in modo tale che il carico venga applicato all'intera larghezza delle superfici a contatto con i piani. Il carico deve essere applicato senza urti e incrementato ad una velocità compresa tra 50 N/s e 500 N/s affinché si raggiunga la rottura in un tempo compreso tra i 30 e i 90 secondi. Per determinare la resistenza alla compressione è necessario registrare il carico di rottura e dividerlo per l'area trasversale.

## 4.1.2 Elementi lapidei

Gli elementi lapidei possono essere:

- naturali: sono quelli ricavati da materiale lapideo non friabile o sfaldabile e resistente al gelo; contenenti sostanze solubili o residui organici in piccole percentuali; possono essere squadrate o non squadrate;
- artificiali: sono quelli in laterizio e calcestruzzo normale o alleggerito. Essi vengono classificati in base alla percentuale di foratura come riportato nelle tabelle seguenti

Elementi	Percentuale di foratura $\varphi$	Area f della sezione normale del foro
Pieni	$\varphi \leq 15\%$	$f \leq 9 \text{ cm}^2$
Semipieni	$15\% < \varphi \leq 45\%$	$f \leq 12 \text{ cm}^2$
Forati	$45\% < \varphi \leq 55\%$	$f \leq 15 \text{ cm}^2$

*Tabella 4.2 Classificazioni elementi in laterizio*

Elementi	Percentuale di foratura $\varphi$	Area f della sezione normale del foro	
		$A \leq 900 \text{ cm}^2$	$A > 900 \text{ cm}^2$
Pieni	$\varphi \leq 15\%$	$f \leq 0,10 A$	$f \leq 0,15 A$
Semipieni	$15\% < \varphi \leq 45\%$	$f \leq 0,10 A$	$f \leq 0,15 A$
Forati	$45\% < \varphi \leq 55\%$	$f \leq 0,10 A$	$f \leq 0,15 A$

*Tabella 4.3 Classificazione elementi calcestruzzo*

Per l'impiego dei mattoni nelle murature portanti sono da tenere in considerazione alcune caratteristiche fisiche e meccaniche quali il colore (dipendente dai minerali contenuti e dalla temperatura di cottura), la trama superficiale, il peso, l'assorbimento e la struttura dei pori, la conducibilità termica (dipendente anche da altri fattori oltre che dalle caratteristiche degli elementi), la resistenza al fuoco (gli elementi sono intrinsecamente resistenti al fuoco quindi il fattore critico è la progettazione di dettaglio della struttura), alla compressione e alla trazione.

Secondo la normativa UNI 8942, si definiscono forati quei blocchi in laterizio con una percentuale di vuoti superiore al 45% della massa totale ma inferiore al 70%, valore sopra al quale verrebbe compromessa l'integrità del blocco.

I blocchi forati in laterizio sono dunque caratterizzati da dei fori al centro, generalmente in un numero compreso tra 3 e 21. Vengono praticati per ridurre il peso del forato, renderlo più facilmente lavorabile e trasportabile ma anche, come vedremo, per sfruttare le intercapedini per inserire altri elementi all'interno del muro.

La realizzazione dei forati in laterizio avviene quasi interamente come quella dei mattoni pieni, con l'eccezione della fase di stampaggio, che avviene all'interno di stampi reticolati della forma e della dimensione desiderata dal produttore.

Peso, dimensioni, numero di fori e persino la direzione di questi ultimi, sono variabili. Esiste infatti un'enorme varietà di forati, che vengono scelti in base alla loro destinazione d'uso.

I forati in laterizio possono essere utilizzati sia per muri portanti che per muri non portanti, così come per pareti sia perimetrali che interne. Ovviamente, a seconda della destinazione d'uso, verrà scelto un forato differente. In particolare: quando la foratura è di una percentuale minore del 45% i forati possono essere usati per costruire pareti portanti; con una percentuale di foratura tra il 45% e il 55%, i blocchi forati possono essere usati per la costruzione di murature portanti. Infine con una percentuale

---

di vuoti compresa tra il 55% e il 70%, i blocchi forati possono essere usati solo per murature di tamponamento e per costruire tramezzi.

Per questa sperimentazione sono stati utilizzati due tipi di laterizio:

– **Blocco POROTON**

Le murature in mattoni possono essere impiegate per realizzare diversi tipi di struttura a seconda dell'utilizzo previsto, in particolare: murature portanti o strutturali; murature non portanti o di tamponatura; murature per divisori interni.

La vasta gamma di blocchi POROTON permette di realizzare tutti i tipi di muratura elencati utilizzando sia soluzioni di muratura monostrato che pluristrato.

La muratura ordinaria POROTON è un sistema costruttivo conosciuto e molto diffuso che nel tempo si è sviluppato in particolare grazie all'evoluzione dei blocchi stessi, e che incontra notevole gradimento tra le maestranze vista la semplicità ed adattabilità nella fase di posa in opera.

La muratura ordinaria è costituita da due elementi: blocchi e malta. I blocchi vengono infatti assemblati, a formare la muratura, tramite giunti di malta di spessore compreso tra 5 e 15 mm. Mentre il giunto di malta orizzontale viene sempre realizzato con malta, quello in verticale viene realizzato in funzione del tipo di blocco impiegato. In particolare se il blocco è "liscio" il giunto verticale deve essere riempito di malta, se invece il blocco è "ad incastro" il giunto verticale deve essere lasciato a secco, semplicemente accostando i due blocchi secondo le maschiature degli stessi.

I giunti di malta possono essere continui oppure interrotti, con interruzione di circa 2 cm al centro dello spessore della muratura, compatibilmente con le esigenze strutturali dell'opera.

La malta può essere una comune malta a prestazione garantita oppure a composizione prescritta come previsto al §11.10.2 delle NTC 2008.

I mattoni POROTON vanno sempre messi in opera con foratura disposta in senso verticale e adeguatamente sfalsati tra corsi successivi (come in Fig. 1 e Fig. 2), così da ottenere un buon collegamento degli elementi che compongono la muratura.

Il sistema di muratura ordinaria POROTON può essere realizzato impiegando blocchi P800 (semipieni), P700 (forati), P600 (leggeri) e tramezze, oltre che blocchi POROTON con isolante integrato (mattoni in laterizio con isolante integrato), con spessori che variano tra 8 e 45 cm.

Tale sistema consente dunque di realizzare pareti portanti e non portanti, oltre ai divisori interni.



Utilizzando la muratura ordinaria POROTON come sistema strutturale per edifici di medio/piccola dimensione si ottengono numerosi vantaggi rispetto ad esempio ad una struttura in telaio c.a.: innanzitutto non è richiesta una mano d'opera specializzata, economicamente è vantaggioso, si eliminano i ponti termici dovuti ai pilastri e la risposta strutturale reale in caso di sisma è più aderente alla risposta strutturale prevista in fase di progetto.

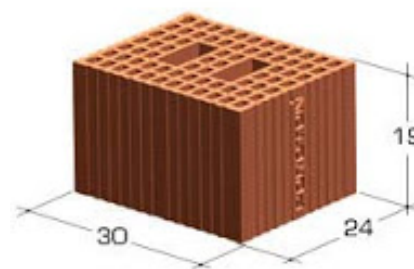
L'impiego della muratura ordinaria POROTON come tamponatura di strutture portanti a telaio trova ampio impiego per la sua facilità e adattabilità nella fase di posa in opera, oltre che per le ottime prestazioni termo-igrometriche ed acustiche che in particolare i nuovi blocchi riescono a garantire.

La muratura ordinaria per divisori interni è costituita dalle tramezze POROTON, anch'esse caratterizzate da una elevata facilità e adattabilità nella fase di posa in opera, agevolata anche dalle dimensioni delle tramezze stesse. Queste trovano impiego anche come pareti tagliafuoco dato che sono caratterizzate da elevate prestazioni di resistenza al fuoco, a partire dagli 8 cm di spessore.

Per approfondire i campi e le modalità di impiego della muratura ordinaria realizzata con le varie tipologie di blocchi POROTON, si rimanda alle prossime newsletter, nelle quali si tratterà nello specifico l'argomento.

#### Caratteristiche blocco POROTON

Dimensioni	30x24x19 cm
Peso	±12,8 kg
Percentuale di foratura	≤55%
Resistenza caratteristica $f_{ck}$	> 5,0 N/mm <sup>2</sup>



*Tabella 4.4*

#### Risultati prova a compressione blocco POROTON

Provino	Area grossa [mm <sup>2</sup> ]	Area netta [mm <sup>2</sup> ]	Forza di compressione $P_u$ [KN]	$\tau = P_u/A_{grossa}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau = P_u/A_{netta}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	72000	39600	875	12,15	22,09
2	72000	39600	900	12,51	24,39
3	72000	39600	840	11,66	21,21

*Tabella 4.5*



Figura 4.2 Prove di compressione su POROTON

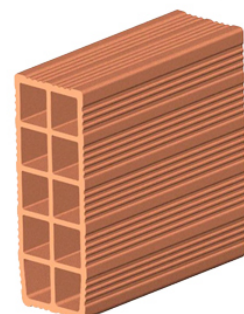
– **Blocco FORATO da 8 cm**

Il blocco FORATO è un prodotto molto diffuso perché consente un alto rendimento nella posa in opera. La sua elevata percentuale di foratura e la conseguente riduzione della resistenza meccanica ne limitano l'impiego alla costruzione delle pareti interne non portanti, cioè dei tramezzi interni.

Caratteristiche blocco FORATO da 8cm

Dimensioni	25x25x8 cm
Peso	± 3kg
Percentuale di foratura	≤65%
Resistenza caratteristica $f_{ck}$	> 5,0 N/mm <sup>2</sup>

Tabella 4.6



### Risultati prova a compressione blocco FORATO da 8cm

Provino	Area grossa [mmq]	Area netta [mmq]	Forza di compressione $P_u$ [KN]	$\tau = P_u/A_{grossa}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\tau = P_u/A_{netta}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	20000	11000	170	8,50	15,45
2	20000	11000	192	9,60	17,45
3	20000	11000	150	7,50	13,63

Tabella 4.7



Figura 4.3 Prove di compressione su FORATO da 8 cm

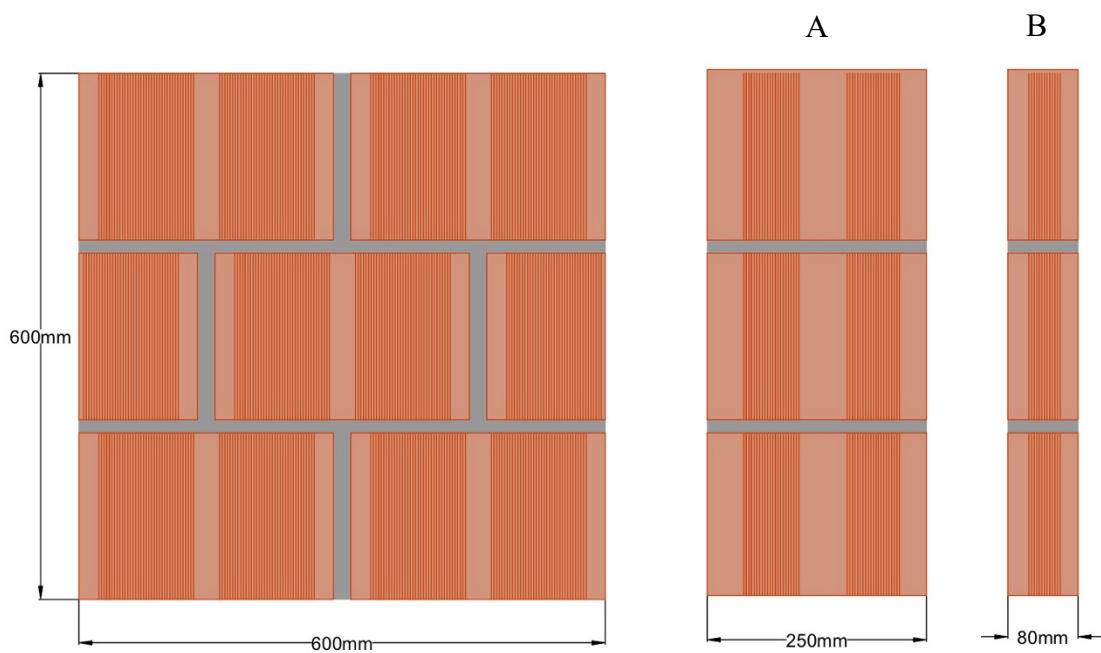
## 4.2 – Confezionamento dei provini e strumentazione utilizzata

La prima fase di questa sperimentazione è stata quella del confezionamento dei provini: innanzitutto si è deciso a priori quanti provini e di quali tipologie sarebbero serviti, dopodiché sono stati realizzati

---

manualmente (motivo per cui le dimensioni degli elementi in laterizio risultano variabili e, di conseguenza, gli spessori dei giunti di malta sono non omogenei) e in seguito trasportati presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture dell'Università Politecnica delle Marche.

I pannelli impiegati hanno geometria e dimensioni prestabilite e l'apparecchiatura adottata nei pannelli riproduce il modello più consueto tra i vari presenti nelle strutture murarie ordinarie. La geometria di base dei campioni è un parallelepipedo a base quadrata di dimensioni 600x600 mm, con spessore variabile a seconda del laterizio utilizzato.



*Figura 4.4 Geometria di base modelli sperimentali: A) Blocco PORTON; B) Blocco FORATO 8cm*





*Figura 4.5 Macchina prova materiali*

Le prove sono eseguite con l'impiego di una macchina prova materiali. Sulla macchina è posizionato un trasduttore di pressione tarato che trasmette il segnale della forza applicata al provino alla centralina di acquisizione dati. La macchina prova materiali è della ditta Metrocom ed ha le seguenti specifiche tecniche:

- classe: 1
- errore massimo: 1%
- scala applicazione carico: 600kN – 1500 kN – 3000 kN

Le prove sono state eseguite nella scala da 600 kN. Il valore della forza è determinato attraverso l'opposizione che il pannello fornisce alle piastre di trasmissione carico ed è espressa in kilo-Newton [kN].

Gli spostamenti sono controllati attraverso sensori di spostamento induttivi a trasformatore differenziale Linear Variable Differential Transformer di tipo elettromagnetico (LVDT). I trasduttori impiegati sono della marca HBM modello W50.



Figura 4.6 LVDT's

Lo spostamento meccanico che si verifica nel LVDT è convertito in segnale elettrico, sotto forma di tensione. Le caratteristiche dei dispositivi adottati sono:

- classe: 0.4
- sensibilità:  $80 \pm 1\%$  mV/V
- errore di linearità:  $< \pm 0.4\%$
- spostamento nominale: 50 mm
- alimentazione:  $2,5 \pm 5\%$  V

I trasduttori sono posizionati su entrambi i lati del pannello, in corrispondenza delle diagonali, così da registrare gli spostamenti verticali -  $u_v$  - e orizzontali -  $u_h$ . Lo spostamento medio subito dal pannello è determinato mediante le espressioni:

$$u_{h,m} = \frac{u_{h2} + u_{h4}}{2}; \quad [4.6]$$

$$u_{v,m} = \frac{u_{v1} + u_{v3}}{2} \quad [4.7]$$

dove

$u_{h2}$  è lo spostamento orizzontale registrato dal trasduttore 2 [mm]

$u_{h4}$  è lo spostamento orizzontale registrato dal trasduttore 4 [mm]

$u_{v1}$  è lo spostamento verticale registrato dal trasduttore 1 [mm]

$u_{v3}$  è lo spostamento verticale registrato dal trasduttore 3 [mm]

L'impiego degli LVDT's consente di determinare anche le deformazioni del pannello. Le deformazioni si ottengono dal rapporto della semisomma degli spostamenti registrati durante la prova con la lunghezza media iniziale misurata al posizionamento dei trasduttori, ossia

$$\varepsilon_h = \frac{[(L_{h2} - L_{0h2}) + (L_{h4} - L_{0h4})]/2}{L_{0h,m}} = \frac{(u_{h2} + u_{h4})/2}{L_{0h,m}} = \frac{u_{h,m}}{L_{0h,m}}; \quad [4.8]$$

$$\varepsilon_v = \frac{[(L_{v1} - L_{0v1}) + (L_{v3} - L_{0v3})]/2}{L_{0v,m}} = \frac{(u_{v1} + u_{v3})/2}{L_{0v,m}} = \frac{u_{v,m}}{L_{0v,m}} \quad [4.9]$$

dove

$\varepsilon_h$  è la deformazione orizzontale media calcolata

$\varepsilon_v$  è la deformazione verticale media calcolata

$L_{0h,m}$  è la lunghezza media relativa ai trasduttori orizzontali

$L_{0h2}$  è la lunghezza iniziale relativa al trasduttore orizzontale 2 misurata prima delle prove

$L_{0h4}$  è lunghezza iniziale relativa al trasduttore orizzontale 4 misurata prima della prova

$L_{0v,m}$  è la lunghezza media relativa ai trasduttori verticali

$L_{0v1}$  è la lunghezza iniziale relativa al trasduttore verticale 1 misurata prima delle prove

$L_{0v3}$  è lunghezza iniziale relativa al trasduttore verticale 3 misurata prima della prova

$u_{h2}$  è lo spostamento orizzontale registrato dal trasduttore 2

$u_{h4}$  è lo spostamento orizzontale registrato dal trasduttore 4

$u_{v1}$  è lo spostamento verticale registrato dal trasduttore 1

$u_{v3}$  è lo spostamento verticale registrato dal trasduttore 3

$u_h$  è lo spostamento medio orizzontale complessivo registrato

$u_v$  è lo spostamento medio verticale complessivo registrato

Gli LVDT's sono identificati mediante codice alfa-numericò che ne individua le basi di misura.

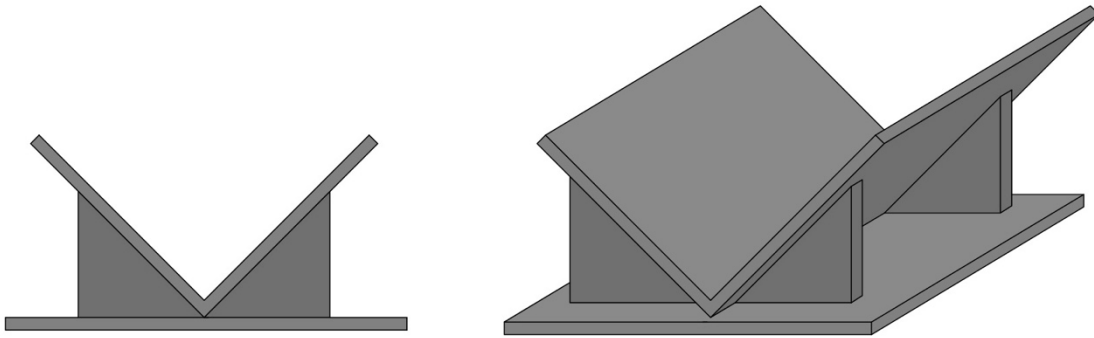
Ogni trasduttore è stato ulteriormente codificato per una migliore lettura delle immagini e delle misure iniziali  $L_0$ .

Infine i parametri rilevati dalla strumentazione sono trasmessi sotto forma di impulsi elettrici o tensione. L'acquisizione dati è effettuata con un hardware - Data Acquisition Systems (DAQ) – che converte i segnali elettrici dei sensori in segnali analogici. Tali segnali sono interpretati dal software presente nel computer che riceve i dati. Il software rielabora i dati trasmessi dal DAQ in valori di forza, spostamenti e deformazioni e li riporta in un foglio di calcolo formato Excel. I valori sono in seguito utilizzati per definire i parametri necessari a determinare le caratteristiche meccaniche dei

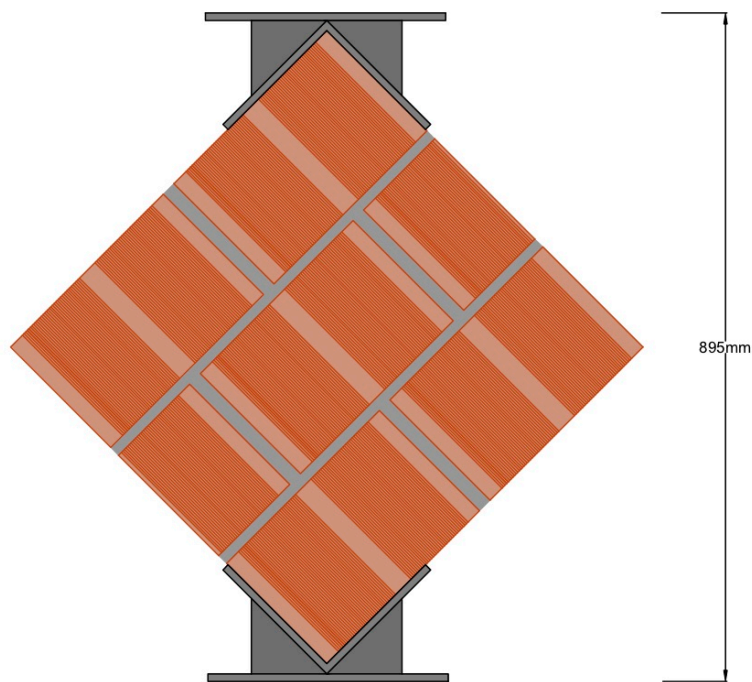
---

provini testati. L'interfaccia DAQ impiegata è il modello Spider8 della HBM con otto canali di acquisizione, di cui uno dedicato esclusivamente alla registrazione della forza applicata.

Esigenze di laboratorio hanno reso necessaria la realizzazione di "scarpe a V", in modo tale da poterle collocare in corrispondenza degli spigoli di una delle diagonali, per poter inserire il pannello all'interno della macchina.



*Figura 4.7 Rappresentazione prospettica e assonometrica del supporto a "V"*

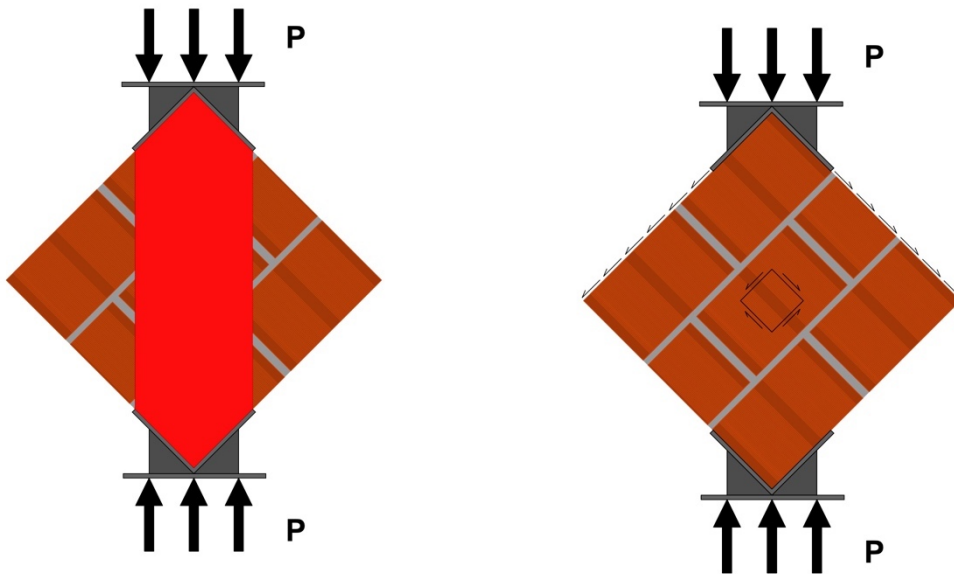


*Figura 4.8 Geometria modello sperimentale per compressione diagonale*

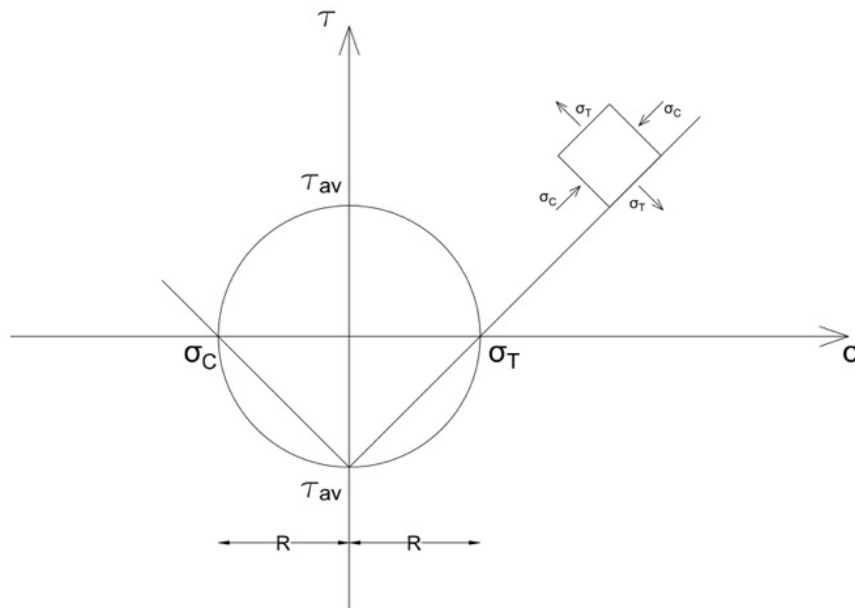


---

La porzione solida del pannello, compresa nella fascia delle impronte di carico, presenta uno stato tensionale quasi uniforme. Ciò permette di valutare la resistenza a taglio media ( $\tau_{av}$ ) correlata alla resistenza a trazione ( $\sigma_T$ ) del materiale muratura in assenza del carico  $q$  di precompressione. Nel piano di Mohr si delinea uno stato tensionale al pari di una prova di taglio puro e lo stato tensionale quasi uniforme ha come conseguenza valori di tensioni di trazione  $\sigma_T$  e compressione  $\sigma_C$  pressochè identici. Il cerchio di Mohr, quindi, risulta centrato nell'origine del piano e la tensione tangenziale media  $\tau_{av}$  ha valore pari a quello delle tensioni normali principali.



*Figura 4.9 Striscia con impronta di carico quasi uniforme (sinistra) e tensioni tangenziali medie prodotte nei pannelli sperimentali (destra)*



Si è ritenuto, dunque, di poter considerare la tensione tangenziale media approssimabile alla tensione di trazione mediante la seguente espressione

$$\tau_{av} = s_T = P/A \quad [4.10]$$

dove

$\tau_{av}$  è la tensione tangenziale media [ $N/mm^2$ ]

$s_T$  è la tensione normale di trazione [ $N/mm^2$ ]

$P$  è la forza applicata al pannello [ $N$ ]

$A$  è l'area parallela alla direzione di applicazione del carico [ $mm^2$ ] Lo scorrimento angolare  $\gamma$  è calcolato mediante l'equazione

$$\gamma = \varepsilon_v + \varepsilon_h \quad [4.11]$$

in cui

$\varepsilon_v$  è il valore assoluto della deformazione verticale media lungo la diagonale compressa

$\varepsilon_h$  è la deformazione orizzontale media lungo la diagonale tesa

---

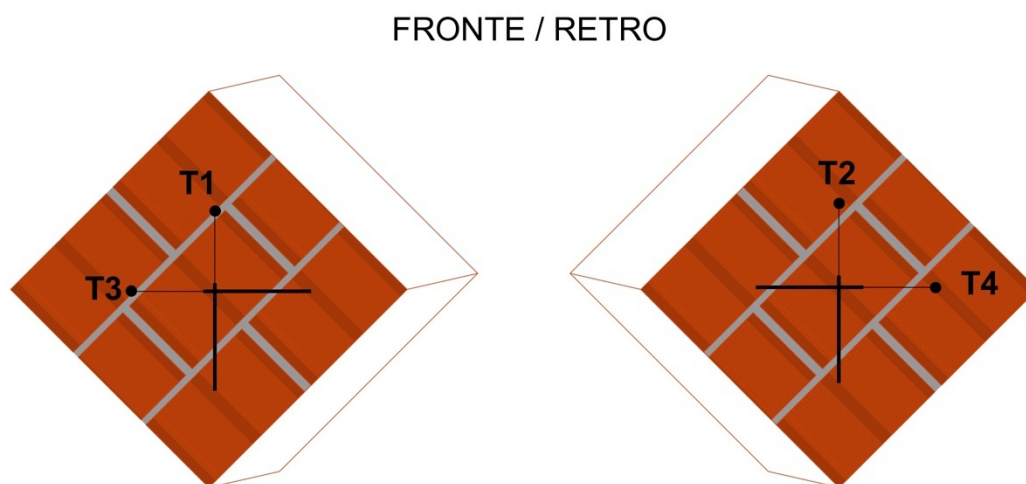
Il modulo di elasticità tangenziale  $G$  è determinato impiegando la formula dello standard ASTM E 519 - 02

$$G = \tau_{av} / \gamma \quad [4.12]$$

dove

$G$  è il modulo di elasticità tangenziale  $[N/mm^2]$   $\tau_{av}$   $[N/mm^2]$  è la tensione tangenziale media  $\gamma$  è lo scorrimento angolare.

Una volta posizionato il provino all'interno della pressa, ponendo particolare attenzione alla complanarità e al parallelismo della superfici alle quali è trasmesso il carico della macchina, che devono risultare centrate rispetto alle piastre di trasmissione della forza, vengono poi applicati i trasduttori. Due trasduttori applicati in verticale (T1 – T2) e due in orizzontale (T3 – T4). Sono necessari per misurare gli spostamenti di allungamento e accorciamento durante la prova.



*Figura 4.10 Disposizione della strumentazione*

Ciò ha consentito di valutare il diagramma costitutivo della muratura che compone il pannello mettendo in relazione la tensione tangenziale  $t$  e la deformazione a taglio  $e$ . Portando il pannello a rottura è possibile determinare la resistenza tangenziale media della muratura  $\tau_0$ .

La procedura per la determinazione della resistenza tangenziale della muratura  $\tau_0$ , deriva dalla conoscenza del carico verticale di compressione applicato  $P_V$ , e dall'area della sezione trasversale del pannello A.

$$\tau_0 = P_V / A \quad [4.13]$$

Entrambe le quantità sono note, in quanto il carico verticale e gli spostamenti sono acquisiti mediante il collegamento al sistema operativo dove vengono registrati tutti gli spostamenti, al variare del carico a cui è sottoposto il provino. Prima dell'inizio della prova vera e propria è stato imposto un carico di assestamento di 3kN per il primo provino e di 5kN per il secondo in modo tale da uniformare le superfici di contatto tra macchinario e muratura.

### 4.3 – Elaborazione e analisi dei dati sperimentali dei provini

Codice	Laterizio	n. Provini
B0	Forato 8cm	1
A0	Blocco Poroton	1

Tabella 4.8

#### 4.3.1 – Sperimentazione su Forato da 8 cm – Provino B0

DIMENSIONE PROVINO	
H [mm]	891
S [mm]	80
DIMENSIONI TRASDUTTORI	
T1 [mm]	286
T2 [mm]	300
T3 [mm]	298
T4 [mm]	304

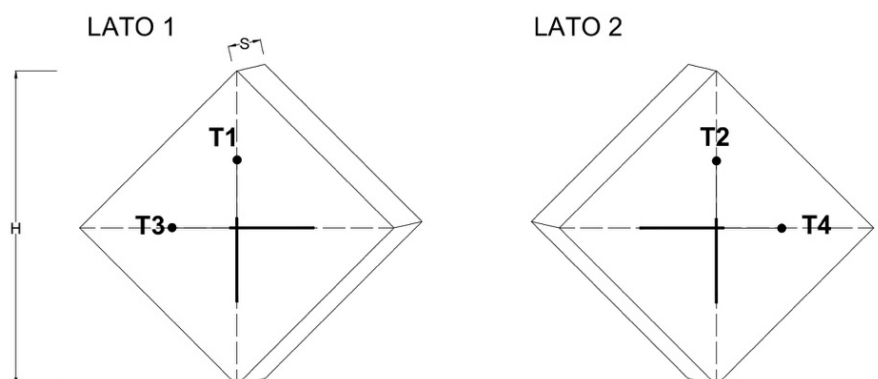


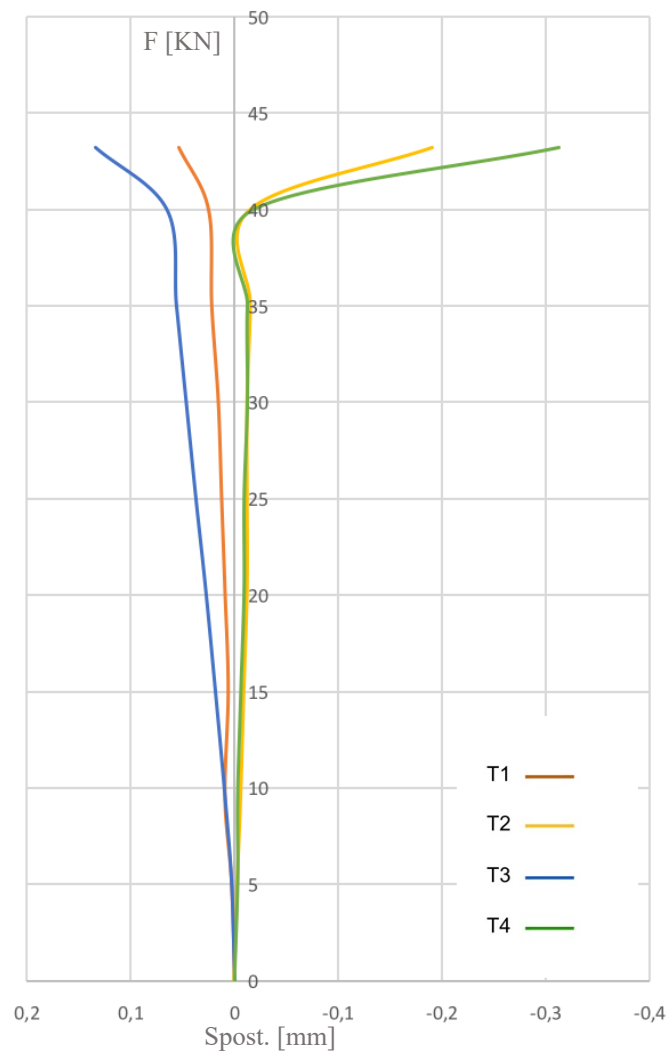
Tabella 4.9

La prima sperimentazione ha ottenuto i seguenti risultati:

Forza KN	spost 1 mm	spost 2 mm	spost 3 mm	spost 4 mm
0	0	0	0	0
5	0,003125	-0,00313	0,003125	-0,00313
10	0,009375	-0,00625	0,009375	-0,00313
15	0,00625	-0,00938	0,01875	-0,00625
20	0,009375	-0,0125	0,028125	-0,00938
25	0,0125	-0,0125	0,0375	-0,00938
30	0,015625	-0,0125	0,046875	-0,0125
35	0,021875	-0,01563	0,05625	-0,0125
40	0,025	-0,01563	0,065625	-0,01875
43	0,053125	-0,19063	0,134375	-0,3125

Tabella 4.10

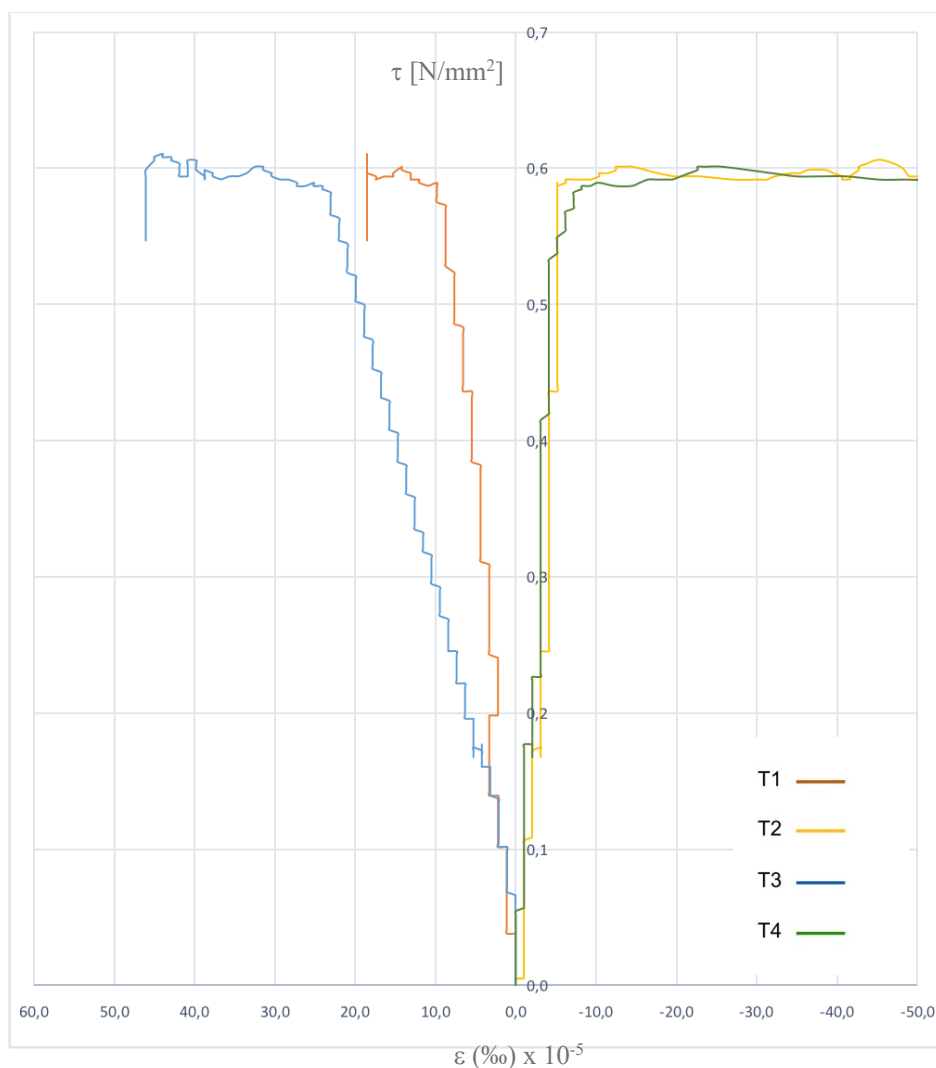
Diagramma Forza – Spostamento

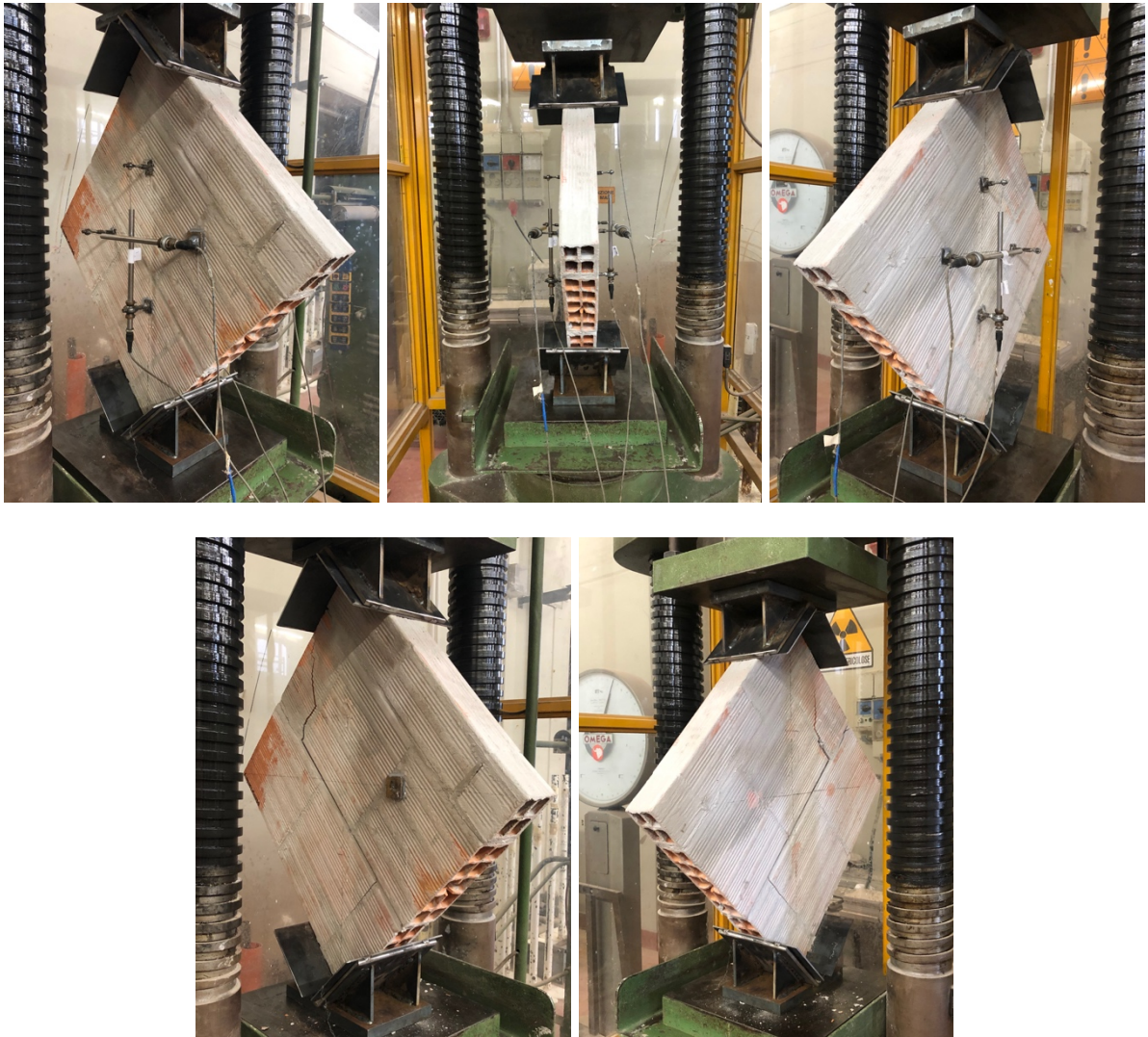


$\tau_{med}$ N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon_1$ ‰*10 <sup>-5</sup>	$\epsilon_2$ ‰*10 <sup>-5</sup>	$\epsilon_3$ ‰*10 <sup>-5</sup>	$\epsilon_4$ ‰*10 <sup>-5</sup>
0	0	0	0	0
0,07	1,092657	-1,04167	1,048658	-1,02796
0,14	3,277972	-2,08333	3,145973	-1,02796
0,21	2,185315	-3,125	6,291946	-2,05592
0,28	3,277972	-4,16667	9,437919	-3,08388
0,35	4,370629	-4,16667	12,58389	-3,08388
0,42	5,463287	-4,16667	15,72987	-4,11184
0,49	7,648601	-5,20833	18,87584	-4,11184
0,56	8,741259	-5,20833	22,02181	-6,16776
0,61	18,57517	-63,5417	45,09228	-102,796

Tabella 4.11

Taglio in funzione della deformazione





*Figura 4.11 Lato 1 e Lato 2 prima(sopra) e dopo (sotto) la prova*

Dai risultati ottenuti possiamo notare che la muratura ha iniziato a presentare le prime fessure all'incirca intorno ad un carico di 20 KN, arrivando a rottura con un carico di 43 KN, corrispondente ad una resistenza a taglio di  $0,61 \text{ N/mm}^2$ . Come si può notare sia dai risultati che dalle immagini, la muratura ha riportato delle fessurazioni che sembrano passanti. La fessura nella parte alta attraversa diagonalmente uno degli elementi per poi proseguire lungo il giunto di malta centrale.

### 4.3.2 – Sperimentazione su Poroton – Provino A0

DIMENSIONE PROVINO	
H [mm]	855
S [mm]	250
DIMENSIONI TRASDUTTORI	
T1 [mm]	295
T2 [mm]	303
T3 [mm]	210
T4 [mm]	397

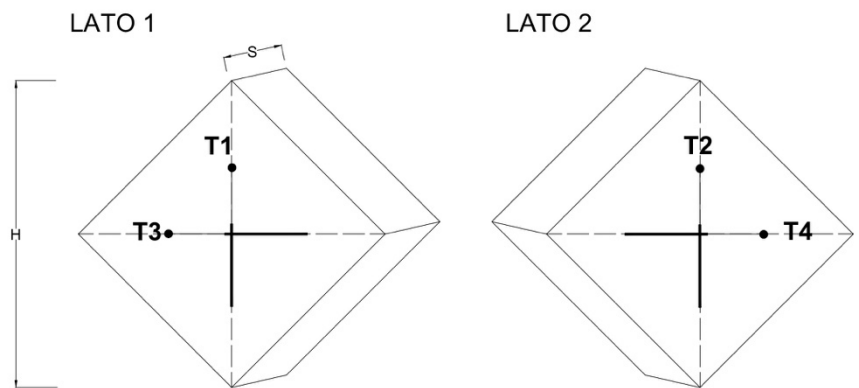


Tabella 4.12

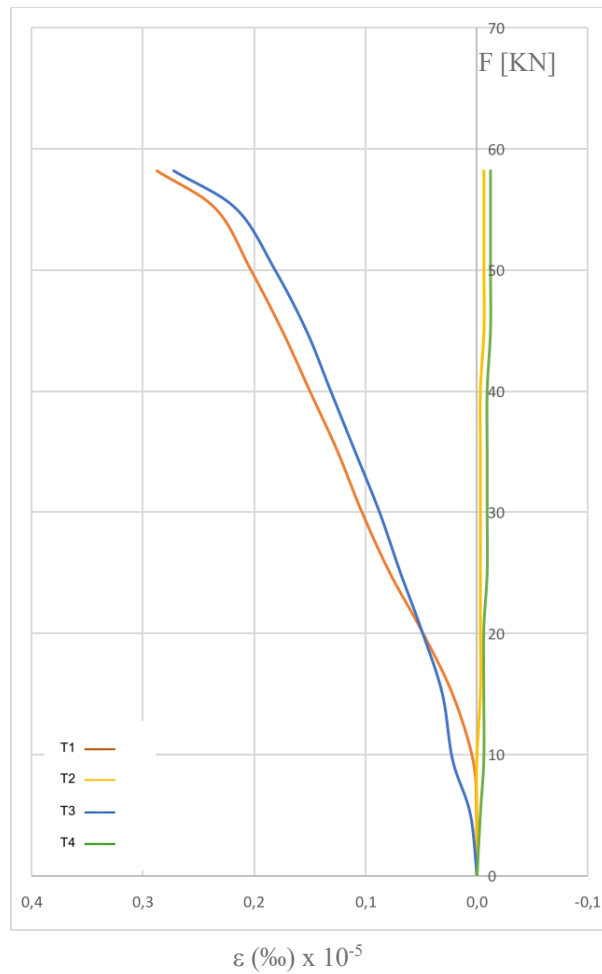
La seconda sperimentazione ha ottenuto i seguenti risultati:

Forza KN	spost 1 mm	spost 2 mm	spost 3 mm	spost 4 mm
0	0	0	0	0
5	0	0	0,00625	-0,00312
10	0,003125	0	0,021875	-0,00625
15	0,021875	-0,00313	0,03125	-0,00625
20	0,05	-0,00313	0,05	-0,00625
25	0,078125	-0,00313	0,06875	-0,00937
30	0,103125	-0,00313	0,0875	-0,00937
35	0,125	-0,00313	0,109375	-0,00937
40	0,15	-0,00313	0,13125	-0,00937
45	0,175	-0,00625	0,153125	-0,0125
50	0,203125	-0,00625	0,18125	-0,0125
55	0,234375	-0,00625	0,215625	-0,0125
58	0,2875	-0,00625	0,271875	-0,0125

Tabella 4.13



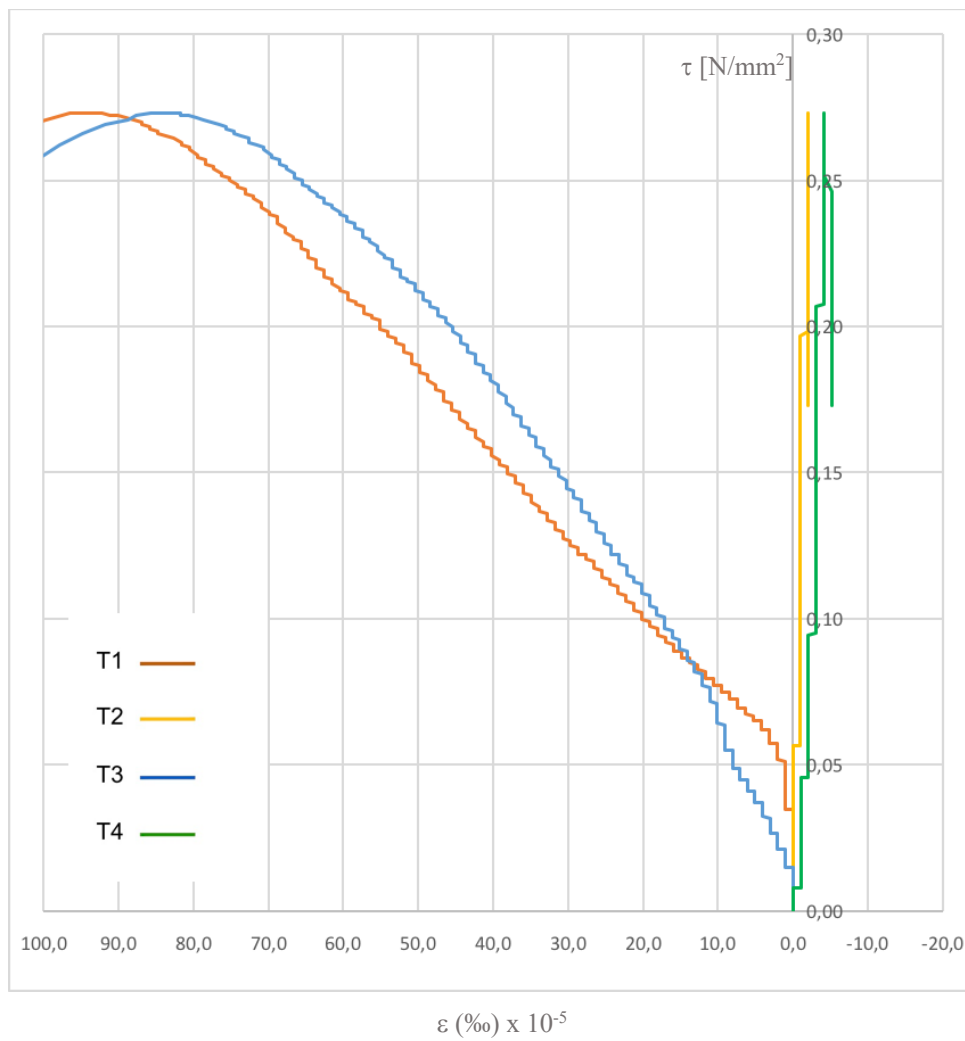
## Diagramma Forza – Spostamento



$\tau_{med}$ N/mm <sup>2</sup>	$\epsilon 1$ ‰*10 <sup>-5</sup>	$\epsilon 2$ ‰*10 <sup>-5</sup>	$\epsilon 3$ ‰*10 <sup>-5</sup>	$\epsilon 4$ ‰*10 <sup>-5</sup>
0,00	0	0	0	0
0,02	0	0	2,016129	-1,05219
0,05	1,059322	0	7,056452	-2,10438
0,07	7,415254	-1,03135	10,08065	-2,10438
0,09	16,94915	-1,03135	16,12903	-2,10438
0,12	26,48305	-1,03135	22,17742	-3,15657
0,14	34,95763	-1,03135	28,22581	-3,15657
0,16	42,37288	-1,03135	35,28226	-3,15657
0,19	50,84746	-1,03135	42,33871	-3,15657
0,21	59,32203	-2,06271	49,39516	-4,20875
0,24	68,85593	-2,06271	58,46774	-4,20875
0,26	79,44915	-2,06271	69,55645	-4,20875
0,27	97,45763	-2,06271	87,70161	-4,20875

Tabella 4.13

## Taglio in funzione della deformazione





*Figura 4.12 Lato 1 e Lato 2 prima (sopra) e dopo (sotto) la prova*

Dai risultati ottenuti possiamo notare che la muratura ha iniziato a fessurarsi all'incirca intorno ad un carico di 15 KN, arrivando a rottura con un carico di 58 KN, corrispondente ad una resistenza a taglio di  $0,27 \text{ N/mm}^2$ . Come si può notare dalle immagini la rottura è avvenuta per scorrimento lungo il giunto di malta (vedi foto dettagli).



*Figura 4.12 Particolare scorrimento lungo il giunto Lato 1 e lato 2*

#### **4.4 – Sperimentazione con pannelli rinforzati**

Al fine di studiare il comportamento delle murature soggette a forze orizzontali sono stati realizzati 18 provini in muratura con i due laterizi utilizzati nella sperimentazione di cui sopra, e questi pannelli sono stati rinforzati con tecniche di intonaco innovative in grado di garantire un miglioramento sismico. Questi pannelli sono poi stati sottoposti alla stessa prova di compressione diagonale. Lo scopo delle prove è quello di analizzare l'efficacia dell'intervento di rinforzo.

La tecnica di rinforzo applicata ai provini è composta da un intonaco, con uno spessore di circa 2.5 cm. Le malte che sono state posate nei provini sono di 4 tipologie:

- Intonaco ESICEM 500
- Intonaco ARMAMURO
- Intonaco BETONCINO BS15 + RETE 40 x 40
- Intonaco BETONCINO CALCEPURA + RETE 40 x 40

Alcuni di questi intonaci ha utilizzato il sistema FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix), tecnica che è stata introdotta e trattata nel §3.4.

È possibile che nello strato di malta siano presenti più reti di rinforzo, sovrapposte e opportunamente distanziate, nel qual caso occorre definirne la distanza. Nel sistema FRCM possono essere presenti anche componenti organiche, quali:

- eventuali promotori di adesione rete-matrice;
- eventuali additivi per migliorare le proprietà reologiche (di presa, ecc.) della matrice.

Questi componenti fanno parte del “sistema di rinforzo” ai fini della sua qualificazione non devono superare il limite del 10% in peso del legante inorganico. Può essere altresì presente un eventuale rivestimento della rete di rinforzo allo stato secco, che non rientra nel limite del 10% suddetto.

---

In questa sperimentazione è stato utilizzato il sistema FRCM nell'intonaco Armamuro, Betoncino Bs15 e Calcepure. Nell'intonaco Armamuro è presente una fibra in carbonio, mentre negli altri due intonaci sono presenti delle reti a maglia quadrata in pvc.

L' **Esicem intonaco 500** è un prodotto a base cemento, calce, inerte calcareo selezionato ed additivi specifici, per la formazione di intonaci interni ed esterni. Conforme UNI EN 998-1. Questa tipologia di intonaco viene utilizzata per la realizzazione di intonaci interni o esterni su superfici tradizionali, mediante macchina intonacatrice o a mano. Il prodotto garantisce un'uniformità di prestazioni, buona lavorabilità e ottima adesione al supporto.

**ARMAMURO** è un betoncino strutturale fibrato (fibre in cromo) cementizio ad elevate caratteristiche meccaniche per il rinforzo antisismico. E' particolarmente adatto per intonaci di murature di ogni tipo, sollecitate a taglio da eventi sismici. Il prodotto garantisce un'uniformità di prestazioni, buona lavorabilità e ottima adesione al supporto. Questa tipologia di intonaco viene utilizzata per la realizzazione di intonaci interni o esterni su superfici tradizionali, mediante macchina intonacatrice o a mano.

**Esicem betoncino fibrato** spruzzabile strutturale **BS15** è un prodotto a base di cemento, inerte calcareo selezionato ed additivi specifici per rendere il prodotto altamente resistente e per migliorare la lavorabilità e l'adesione, per la formazione di intonaci interni ed esterni. Conforme UNI EN 998-2, questa tipologia di intonaco viene utilizzata per superfici tradizionali ed applicati mediante una macchina idonea per rendere strutturale la parete. La costanza del prodotto garantisce un'uniformità di prestazioni, buona lavorabilità con ottima adesione al supporto. Le elevate caratteristiche di resistenza permettono di intervenire con il prodotto su pareti strutturali.

**Calcepure restaura** è una malta strutturale fibrata di classe M15 a base di calce idraulica naturale NHL 5.0, inerti calcarei selezionati in granulometria controllata, fibre e additivi specifici che ne migliorano la lavorabilità. Conforme UNI EN 998-2, il prodotto risulta ideale per la realizzazione di murature storiche o nel settore bioedilizia. CALCEPURA RESTAURA presenta un'alta permeabilità al vapore acqueo ed una limitata reattività ai sali contenuti nelle murature contribuendo ad un migliore benessere abitativo. Risulta quindi un idoneo prodotto di intonacatura per il restauro di strutture murarie antiche.

---

Elenco dei provini:

Codice	Laterizio	n. Provini	Tipo intonaco
A1	Blocco Poroton	3	EISCIEM 500
A2	Blocco poroton	3	ARMAMURO
B1	Forato 8cm	3	EISCIEM 500
B2	Forato 8cm	3	ARMAMURO
D1	Blocco poroton	3	Betoncino BS15 + rete 40x40
E1	Blocco poroton	3	Betoncino CALCEPURA + rete 40x40

*Tabella 4.14*

---

## 5. Conclusione

Analizzando ora i risultati ottenuti dalle prove eseguite senza intonaco rinforzante e con intonaci rinforzanti e mettendo a confronto i provini aventi la stessa tipologia di laterizio possiamo osservare i seguenti valori

Codice	Laterizio	Tipo intonaco	$P_{rottura}$ [KN]	$\tau_{med}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
A0	Blocco Poroton	-	58	0,27
A1	Blocco Poroton	EISCIEM 500	124	0,58
A2	Blocco poroton	ARMAMURO	168	0,81
D1	Blocco poroton	Betoncino BS15 + rete 40x40	168	0,81
E1	Blocco poroton	Betoncino CALCEPURA + rete 40x40	167	0,91

I valori del carico di rottura ottenuti dalle 4 tipologie di provino rinforzato sono notevolmente superiori rispetto al valore ottenuto nel provino A0. Si può quindi affermare che tutti e 4 gli intonaci sono dei buoni rinforzi antisismici, ma dai dati risulta evidente che la scelta migliore per una parete composta da blocchi Poroton sarebbe l'intonaco calcepura (E1). Questo perché ha una  $\tau_{med}$  pari a 0.91 N/mm<sup>2</sup>, che è il risultato maggiore, poiché nella sua composizione è presente un rafforzamento ulteriore dovuto ad una rete a maglia quadrata 40 x 40 cm in plastica, che funge da armatura. A quest'ultima è demandata l'azione contenitiva in caso di cedimenti o di distacco dell'intonaco e del relativo supporto. È inoltre un'efficace soluzione ai distacchi e alla formazione di crepe. Questa tecnologia, introdotta sin dagli anni '80, trova soluzioni sempre più competitive e a basso impatto, soprattutto rispetto ai materiali impiegati. Per queste ragioni, esse rientra a pieno titolo tra gli interventi volti al consolidamento di strutture sottoposte a sollecitazioni di varia natura.

Per quanto riguarda invece il laterizio forato da 8 cm abbiamo analizzato i seguenti provini:

Codice	Laterizio	Tipo intonaco	$P_{rottura}$ [KN]	$\tau_{med}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
B0	Forato 8cm	-	43	0,61
B1	Forato 8cm	EISCIEM 500	50	0,57
B2	Forato 8cm	ARMAMURO	90	1,00

Anche in questo caso abbiamo il valore minore del carico di rottura relativo al provino B0 ovvero quello non rinforzato, ma particolare attenzione va posta sui valori della  $\tau_{med}$ . Possiamo notare che,

---

nonostante il provino B0 non sia rinforzato, il valore della resistenza a taglio, anche se di poco, risulta essere comunque superiore rispetto al valore ottenuto nel provino B1. Questo perché, come già specificato nelle conclusioni della sperimentazione di cui si parla al § 4.4, l'applicazione dell'intonaco Eisciem 500 risulta essere fortemente sconsigliata per muri realizzati con forati da 8cm, in quanto in seguito alla prova di compressione diagonale, il provino B1 ha riportato lesioni simili alla croce di Sant'Andrea che è preludio di collasso strutturale. Dal confronto dei valori, si evince la notevole differenza inerente la resistenza a taglio, del provino B2 con intonaco Armamuro, che presenta un valore molto più elevato rispetto agli altri due. Pertanto nel caso di applicazione in una parete con forati da 8 cm, sarebbe buona cosa scegliere l'intonaco Armamuro (B2), per i seguenti motivi: buona resistenza e in caso di sisma si noteranno poche fessurazioni ma decise.





## BIBLIOGRAFIA:

R. CAPOZUCCA, *Teoria e tecnica delle strutture in muratura*, Pitagora Editrice, Bologna, 2014.

A. GIUFFRÈ, *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*, Edizioni Kappa, Roma, 2017 [I ed.1991].

S. LENCI, *Lezioni di meccanica strutturale*, Pitagora Editrice, Bologna, 2009. T. P. TASSIOS, *Meccanica delle murature*, Liguori Editore, Napoli, 1995 [I ed.1988].

C.AMELIO, G.CANNAVESIO, *Materiali per l'edilizia*, SEI Società editrice internazionale - Torino

A.BIONDI, *Analisi del pushover*, Dario Flaccovio Editore ARTICOLI SCIENTIFICI:

R. CAPOZUCCA, *Shear Behaviour of Historic Masonry Made of Clay Bricks*, *The Open Construction and Building Technology journal* 5 (2011) (Suppl 1-M6): 89-96.

R. CAPOZUCCA, *Experimental response of historic brick masonry under biaxial loading*, *Construction and Building Materials* 154 (2017): 539-556.

R. CAPOZUCCA, B.P. SINHA, *Experimental shear tests on historic masonry*, *Nota Tecnica I.S.T.C.* N. 11.

## NORMATIVA:

*ASTM E 519-02: Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*, ASTM-AMERICAN NATIONAL STANDARD, 2002.

*ASTM C 496 – 71 (79), Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM-AMERICAN NATIONAL STANDARD, 1979 [I ed.1971].