



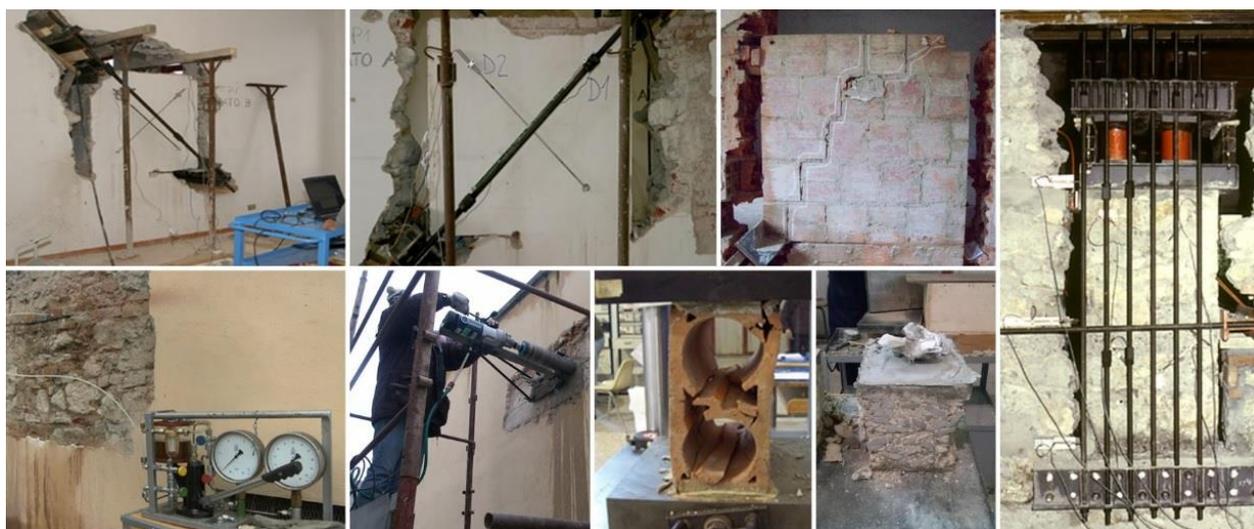
UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE  
**DICEA**  
DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA CIVILE  
E AMBIENTALE



Regione Toscana

# ABACO DELLE MURATURE DELLA REGIONE TOSCANA

## PROTOCOLLI DI PROVA



### Coordinatori della Ricerca

Prof. Ing. Andrea Vignoli  
Ing. Sonia Boschi  
Arch. Nicola Signorini

### Gruppo di ricerca

Ing. Chiara Bernardini  
Ing. Andrea Borghini  
Ing. Leonardo Bucci  
Ing. Alberto Ciavattone  
Ing. Emanuele Del Monte  
Ing. Giovanni Menichini

Firenze, OTTOBRE 2019

## SOMMARIO

Indice delle Figure .....	2
Indice delle Tabelle .....	3
<b>1 PROVE SPERIMENTALI .....</b>	<b>4</b>
1.1 BIBLIOGRAFIA .....	5
<b>2 PROVE SPERIMENTALI SUI PANNELLI MURARI .....</b>	<b>6</b>
2.1 PROVA DI COMPRESSIONE DIAGONALE (CD) .....	6
2.1.1 DEFINIZIONE DELLA TECNICA DI INDAGINE .....	6
2.1.2 SIMBOLOGIA ADOTTATA .....	6
2.1.3 STRUMENTAZIONE DI PROVA.....	7
2.1.4 PREPARAZIONE DELL'ELEMENTO DA TESTARE.....	8
2.1.5 PROCEDURA DI PROVA.....	9
2.1.6 MISURAZIONI DA EFFETTUARE .....	10
2.1.7 METODO DI CALCOLO.....	11
2.1.8 RESOCONTO DI PROVA.....	14
2.1.9 NOTE SULL'INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI .....	14
2.1.10 BIBLIOGRAFIA .....	14
2.2 PROVA DI COMPRESSIONE SEMPLICE (C).....	16
2.2.1 DEFINIZIONE DELLA TECNICA DI INDAGINE .....	16
2.2.2 SIMBOLOGIA ADOTTATA .....	17
2.2.3 STRUMENTAZIONE DI PROVA.....	18
2.2.4 PREPARAZIONE DELL'ELEMENTO DA TESTARE.....	19
2.2.5 PROCEDURA DI PROVA.....	19
2.2.6 MISURAZIONI DA EFFETTUARE .....	20
2.2.7 METODO DI CALCOLO.....	20
2.2.8 RESOCONTO DI PROVA.....	21
2.2.9 NOTE SULL'INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI .....	22
2.2.10 BIBLIOGRAFIA .....	23
2.3 PROVA CON MARTINETTO PIATTO SINGOLO (MP) .....	24
2.3.1 DEFINIZIONE DELLA TECNICA DI INDAGINE .....	24
2.3.2 SIMBOLOGIA ADOTTATA .....	24
2.3.3 STRUMENTAZIONE DI PROVA.....	24
2.3.4 PREPARAZIONE DELL'ELEMENTO DA TESTARE.....	27
2.3.5 PROCEDURA DI PROVA E MISURAZIONI DA EFFETTUARE.....	28
2.3.6 METODO DI CALCOLO.....	30
2.3.7 RESOCONTO DI PROVA.....	30
2.3.8 NOTE SULL'INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI .....	31
2.3.9 BIBLIOGRAFIA .....	33
2.4 PROVA CON MARTINETTO PIATTO DOPPIO (MP-d).....	35

2.4.1	DEFINIZIONE DELLA TECNICA DI INDAGINE .....	35
2.4.2	SIMBOLOGIA ADOTTATA .....	35
2.4.3	STRUMENTAZIONE DI PROVA.....	36
2.4.4	PREPARAZIONE DELL'ELEMENTO DA TESTARE.....	39
2.4.5	PROCEDURA DI PROVA E MISURAZIONI DA EFFETTUARE.....	40
2.4.6	METODO DI CALCOLO.....	42
2.4.7	RISULTATI DELLA PROVA.....	44
2.4.8	RESOCONTO DI PROVA.....	45
2.4.9	NOTE SULL'INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI .....	46
2.4.10	BIBLIOGRAFIA.....	48
2.5	CAROTAGGIO (CAR).....	51
2.5.1	BIBLIOGRAFIA.....	51
<b>3</b>	<b>PROVE SPERIMENTALI SUI COMPONENTI DEI PANNELLI MURARI .....</b>	<b>52</b>
3.1	COMPRESSIONE SU BLOCCHI ( $C_B$ ).....	52
3.1.1	DEFINIZIONE DELLA TECNICA DI INDAGINE .....	52
3.1.2	SIMBOLOGIA ADOTTATA .....	52
3.1.3	STRUMENTAZIONE DI PROVA.....	52
3.1.4	PREPARAZIONE DEI PROVINI .....	53
3.1.5	PROCEDURA DI PROVA.....	54
3.1.6	MISURAZIONI DA EFFETTUARE .....	55
3.1.7	CALCOLO E VALUTAZIONE DEI RISULTATI .....	55
3.1.8	RESOCONTO DI PROVA.....	56
3.1.9	BIBLIOGRAFIA.....	57
3.2	PROVA PENETROMETRICA CON DRMS (DRMS).....	58
3.2.1	DEFINIZIONE DELLA TECNICA DI INDAGINE .....	58
3.2.2	SIMBOLOGIA ADOTTATA .....	58
3.2.3	STRUMENTAZIONE DI PROVA.....	59
3.2.4	PREPARAZIONE DELL'ELEMENTO DA TESTARE.....	60
3.2.5	PROCEDURA DI PROVA.....	60
3.2.6	MISURAZIONI DA EFFETTUARE .....	60
3.2.7	METODO DI CALCOLO.....	60
3.2.8	RESOCONTO DI PROVA.....	61
3.2.9	NOTE SULL'INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI .....	61
3.2.10	BIBLIOGRAFIA.....	62
3.3	ANALISI MACROSCOPICA E MICROSCOPICA DELLA MALTA ( $A_M$ ).....	63
3.3.1	PREMESSA.....	63
3.3.2	INTRODUZIONE.....	63
3.3.3	NOZIONI PRELIMINARI .....	63
3.3.4	DEFINIZIONE E DESCRIZIONE DELLE TECNICHE DI INDAGINE.....	66
3.3.5	STRUMENTAZIONE DI PROVA.....	67
3.3.6	BIBLIOGRAFIA.....	67

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Apparato di prova di compressione diagonale. ....	8
Figura 2: Sequenza dei tagli. ....	9
Figura 3: Storia di carico. ....	10
Figura 4: Schema della prova di compressione diagonale e notazioni adottate. ....	11
Figura 5: Stato tensionale in corrispondenza del centro del pannello. ....	11
Figura 6: Determinazione del modulo di taglio per prove a) cicliche e b) monotone. ....	13
Figura 7: Schema di prova di compressione semplice. ....	18
Figura 8: (a) Prova di tipo 1) o prova di tipo elastico, (b) prova di tipo 2) o prova di tipo a collasso. ....	21
Figura 9: Forme di martinetto più diffuse. ....	25
Figura 10: Configurazione di prova per la misura in situ dello stato di tensione locale. ....	26
Figura 11: Configurazione del sistema di taratura del martinetto. ....	27
Figura 12: Esempio di curve di taratura di martinetti piatti di forma rettangolare. ....	27
Figura 13. Esempio di localizzazione del taglio in murature in pietra con tessitura irregolare. ....	28
Figura 14. Strumentazione per il taglio della muratura. ....	28
Figura 15. Sequenza di prova. ....	28
Figura 16. Geometria di prova. ....	29
Figura 17. Deformazione dei lati del taglio [50]. ....	31
Figura 18. Andamento del legame tensione-spostamento all'esecuzione del taglio (scarico) e della prova con ricostruzione dello stato di tensione esistente. ....	32
Figura 19. Andamento del legame tensione-spostamento all'esecuzione del taglio (scarico della muratura) e della prova, nel caso di formazione di cerniere o spostamenti rigidi. ....	32
Figura 20. Forme di martinetto più diffuse. ....	36
Figura 21. Configurazione delle basi si misura per estensimetri removibili. ....	37
Figura 22. Configurazione della strumentazione di acquisizione automatica. ....	38
Figura 23. Configurazione del sistema di taratura del martinetto. ....	39
Figura 24: Esempio di curva di taratura di martinetto piatto. ....	39
Figura 25. Esempio di localizzazione del taglio e dei sistemi di acquisizione delle deformazioni in a) murature in mattoni o in pietra con tessitura regolare, ed in b) muratura in pietra irregolare. ....	40
Figura 26. Strumentazione per il taglio della muratura. ....	40
Figura 27. Tipica configurazione di prova. ....	41
Figura 28. (a) Curve deformazione-tensione: tutte le basi di misura forniscono valori attendibili; (b) curve deformazione-tensione: la base di misura n.1 fornisce risultati non attendibili (scartata). ....	43
Figura 29. Grafici deformazione-tensione in cui sono identificate linee rette che corrispondono a: a) modulo di elasticità tangente, b) modulo di elasticità secante o chord modulus [67]. ....	44
Figura 30. Grafico deformazione-tensione in cui è identificato il modulo di Young [67]. ....	44
Figura 31. Grafico involuppo deformazione-tensione in cui è identificato il modulo elastico (secante ad 1/3). ....	45
Figura 32: Rottura della muratura ai limiti del taglio, al di fuori della zona sottoposta a prova. ....	46
Figura 33. Configurazione di prova per una muratura irregolare e legame tensione-deformazione per ciascuna base di misura della prova. ....	47
Figura 34. Grafico deformazione-tensione in cui è identificato il modulo elastico "lineare". ....	48

Figura 35. Grafico deformazione-tensione in cui è identificato il modulo elastico <i>lineare</i> (la curva $\epsilon$ - $\sigma$ assume un comportamento lineare). .....	48
Figura 36: Strumentazione di prova. ....	59
Figura 37: Caratteristiche delle punte. ....	59
Figura 38: Abaco illustrativo delle due caratteristiche di arrotondamento e sfericità (Raymond L.A., 1995).....	65

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Valori di riferimento per la tensione massima a cui arrivare durante la prova con martinetto piatto doppio. ....	41
Tabella 2: Velocità di carico. ....	55
Tabella 3: Coefficiente k dipendente dal numero di provini n.....	56

# 1 PROVE SPERIMENTALI

In questa sezione vengono descritte le principali e più usate prove sperimentali in situ per la determinazione delle caratteristiche meccaniche di resistenza e deformabilità delle pareti murarie e/o dei singoli componenti della muratura (elementi e malta).

Le prove sui pannelli murari considerate sono:

- Prova di compressione diagonale (CD);
- Prova di compressione semplice (C);
- Prova con martinetti piatti singoli e doppi (MP-s, MP-d);
- Prova di carotaggio (CAR)<sup>1</sup>.

Le prove sui componenti della muratura sono:

- Prova di compressione sui blocchi ( $C_B$ );
- Prova penetrometrica con trapano strumentato (tipo DRMS Drilling Resistance Measurement System) sulla malta (DRMS);
- Analisi macroscopica e microscopica della malta ( $A_M$ ).

Nei paragrafi successivi ogni prova è spiegata nel dettaglio; vengono fornite indicazioni circa la preparazione dei pannelli o degli elementi da testare (comprese le condizioni richieste prima della prova), l'attrezzatura di prova, la procedura di prova, il metodo di prova e la misurazione delle grandezze, il metodo di calcolo, l'elaborazione dei risultati ed i contenuti del resoconto di prova.

*Quanto riportato raccoglie, apportando modifiche ed integrazioni in alcune parti, i contenuti del prodotto finale Reluis 2005-2008 Sub Task 3b.3 "Indagini diagnostiche su tipologie murarie" [1] e ReLUIS 2016 "WP1.1. Prove con martinetti piatti doppi: procedura di prova e modalità di interpretazione [2].*

Ai fini della comprensione delle descrizioni e specifiche delle prove sperimentali, si riportano le seguenti definizioni:

- *muratura*: un assemblaggio di elementi naturali o artificiali disposti secondo una specifica tessitura muraria e uniti insieme con malta;
- *prove in situ*: prove effettuate in situ su pannelli di muratura ricavati da pareti (generalmente) portanti di edifici esistenti.
- *base deformometrica o trasduttore di spostamento*: dispositivi in grado di misurare uno spostamento lineare;
- *variazione di lunghezza*: l'aumento (estensione) o diminuzione (accorciamento) della misura della singola base deformometrica espressa in  $\mu\text{m}$ ; la variazione di lunghezza è assunta positiva se corrispondente ad una estensione e negativa se corrispondente ad un accorciamento;
- *deformazione*: rapporto tra l'estensione (o accorciamento) della base deformometrica e la misura iniziale della base stessa, espressa in  $\mu\text{m}/\text{m}$ ;
- *pressione*: misura della pressione dell'olio all'interno del martinetto piatto espressa in bar;
- *tensione*: sforzo medio di compressione nella muratura espresso in  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;
- *resistenza a compressione della muratura  $f_c$* : la resistenza della muratura a compressione senza gli effetti di confinamento del carico, snellezza, eccentricità del carico ed effetti di lunga durata, espressa in  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;

---

<sup>1</sup> La prova di carotaggio consiste nell'estrazione di campioni di forma cilindrica dalla struttura muraria di indagine, al fine di esaminarne la stratigrafia e le condizioni interne (quali la compattezza della muratura, la presenza o assenza di vuoti, la stratigrafia, etc.), e pertanto non fornisce indicazioni quantitative dei parametri di resistenza e rigidità del pannello murario.

- *modulo elastico della muratura E*: il modulo elastico della muratura senza effetti di snellezza, eccentricità del carico ed effetti di lunga durata, espresso in N/mm<sup>2</sup>;
- *resistenza a trazione per fessurazione diagonale,  $f_t$* : valore massimo della tensione principale massima (di trazione) che si verifica nel centro di un pannello assunta a riferimento della condizione di rottura per fessurazione diagonale e desunta da prova di compressione diagonale, espressa in N/mm<sup>2</sup>;
- *resistenza a taglio  $\tau_0$* : la resistenza della muratura a taglio misurata con prova diagonale in assenza degli effetti della compressione verticale, eccentricità di carico ed effetti di lunga durata, espressa in N/mm<sup>2</sup>;
- *modulo di taglio o modulo elastico tangenziale della muratura G*: il modulo di taglio della muratura determinato con una prova diagonale senza effetti di eccentricità del carico e di lunga durata, espresso in N/mm<sup>2</sup>.

## 1.1 BIBLIOGRAFIA

- [1] ReLUIS 2009. Linea di Ricerca 1 - Valutazione e riduzione della vulnerabilità di edifici in muratura - Sub Task 3b.3. Indagini diagnostiche su tipologie murarie. Responsabile Prof. C. Modena; coordinatore Prof. A. Vignoli.
- [2] ReLUIS 2016. WP1 - Qualità muraria, proprietà meccaniche delle murature, indagini diagnostiche. "WP1.1. Prove con martinetti piatti doppi: procedura di prova e modalità di interpretazione" (Vignoli A, Barlacchi E., Borghini A., Boschi S., Ciavattone A., Del Monte E.).

## 2 PROVE SPERIMENTALI SUI PANNELLI MURARI

### 2.1 PROVA DI COMPRESSIONE DIAGONALE (CD)

#### 2.1.1 Definizione della tecnica di indagine

Le seguenti prescrizioni forniscono specifiche per la determinazione della resistenza a trazione per fessurazione diagonale  $f_t$  e del modulo di taglio  $G$  della muratura attraverso la prova di compressione diagonale in situ. Tale prova consiste nell'applicazione di un carico di compressione lungo la diagonale di un pannello murario approssimativamente quadrato, provocando la rottura a taglio per fessurazione diagonale. Vengono date indicazioni circa la preparazione dei pannelli, il condizionamento richiesto prima della prova, l'attrezzatura di prova, il metodo di prova, il metodo di calcolo ed i contenuti del resoconto di prova.

La determinazione della resistenza a trazione per fessurazione diagonale e del modulo di taglio della muratura si ottengono mediante o prove monotone o prove cicliche quasi statiche, condotte fino a collasso (distruttive). La prova consiste nell'isolare un pannello di forma approssimativamente quadrata da una parete muraria mediante quattro tagli realizzati con filo diamantato o sega circolare. La prova *in situ* si differenzia da quella di laboratorio per la parte inferiore di pannello che resta ammorsata alla muratura della parete; analisi teoriche e numeriche hanno tuttavia indicato che tale ammorsatura, almeno in fase elastica, ha influenza trascurabile sui risultati. L'azione di compressione è applicata mediante martinetti idraulici disposti su uno spigolo del pannello ed è contrastata in corrispondenza dello spigolo opposto; devono essere previsti opportuni dispositivi in corrispondenza degli angoli sollecitati per permettere la distribuzione del carico sul pannello. Durante la prova vengono acquisiti gli spostamenti relativi di basi deformometriche posizionate lungo le diagonali del pannello; la strumentazione di misura più idonea è composta da trasduttori di spostamento posizionati su ciascun lato del pannello.

#### 2.1.2 Simbologia adottata

La simbologia adottata è la seguente:

- $A$  è la sezione del pannello;
- $F$  è il carico (o forza) diagonale applicato al pannello;
- $F_u$  è il carico diagonale massimo applicato al pannello durante la prova;
- $F_{\max-i}$  è il carico diagonale massimo applicato al pannello durante il ciclo  $i$ -esimo della prova;
- $D_{k,0}$  è la lunghezza iniziale della  $k$ -esima base deformometrica diagonale (prima dell'applicazione del carico);
- $D_k$  è la lunghezza della  $k$ -esima base deformometrica diagonale in corrispondenza del livello di carico  $F$ ;
- $D_{k,\max-i}$  è la lunghezza della  $k$ -esima base deformometrica diagonale in corrispondenza del livello di carico  $F_{\max-i}$ ;
- $\Delta D_k$  è la variazione di lunghezza (rispetto a quella iniziale) della  $k$ -esima base deformometrica diagonale in corrispondenza del generico livello di carico  $F$ , assunta positiva se corrispondente ad un allungamento e negativa se corrispondente ad un accorciamento;
- $\Delta D_{k,\max-i}$  è la variazione di lunghezza (rispetto a quella iniziale) della  $k$ -esima base deformometrica diagonale in corrispondenza del livello di carico  $F_{\max-i}$ ;
- $\varepsilon_k$  è la deformazione della  $k$ -esima base deformometrica diagonale in corrispondenza del livello di carico  $F$ ;
- $\varepsilon_{k,\max-i}$  è la deformazione della  $k$ -esima base deformometrica diagonale in corrispondenza del carico  $F_{\max-i}$ ;
- $\varepsilon_c$  è la deformazione media della diagonale compressa del pannello in corrispondenza del generico livello di carico  $F$ ;

- $\varepsilon_t$  è la deformazione media della diagonale tesa del pannello in corrispondenza del generico livello di carico  $F$ ;
- $\gamma$  è la deformazione angolare media del pannello in corrispondenza del generico livello di carico  $F$ ;
- $\gamma_u$  è la deformazione angolare media del pannello in corrispondenza del livello di carico  $F_u$ ;
- $\gamma_{\max-i}$  è la deformazione angolare media del pannello in corrispondenza del livello di carico  $F_{\max-i}$ ;
- $\gamma_{0-i}$  è la deformazione angolare media del pannello all'inizio dell' $i$ -esimo ciclo di carico;
- $\gamma_{y-i}$  è la deformazione angolare media del pannello che individua il raggiungimento della tensione tangenziale massima dell' $i$ -esimo ciclo ( $\tau_{\max-i}$ ) sulla curva bilineare equivalente in termini di energia dissipata al  $i$ -esimo ciclo;
- $\gamma_y$  è la deformazione angolare media del pannello che individua il raggiungimento della tensione tangenziale massima della prova ( $\tau_u$ ) sulla curva bilineare equivalente in termini di energia dissipata alla curva involucro nel caso di prove cicliche (sulla curva rappresentativa della prova nel caso di prove monotone);
- $\sigma_1$  è il valore della tensione principale massima (di trazione) nel centro del pannello per un generico livello di carico  $F$ ;
- $f_t$  è il valore della tensione principale massima (di trazione) nel centro del pannello per il livello di carico  $F_u$ , coincidente con la resistenza a trazione per fessurazione diagonale del pannello;
- $\sigma_{1,\max-i}$  è il valore della tensione principale massima (di trazione) nel centro del pannello per il livello di carico  $F_{\max-i}$ ;
- $\tau_0$  è il valore della resistenza a taglio della muratura determinato a partire dalla resistenza a trazione per fessurazione diagonale;
- $\tau$  è il valore della tensione tangenziale nel centro del pannello per un generico livello di carico  $F$ ;
- $\tau_{\max-i}$  il valore della tensione tangenziale nel centro del in corrispondenza del livello di carico  $F_{\max-i}$ ;
- $\tau_u$  è la tensione tangenziale nel centro del pannello in corrispondenza del livello di carico  $F_u$ ;
- $\tau_{0-i}$  è la tensione tangenziale nel centro del pannello che si ha all'inizio dell' $i$ -esimo ciclo di carico;
- $G_i$  è il valore del modulo di taglio secante relativo ad un generico livello di carico  $F$  (calcolato per prove monotone sulla curva deformazione-tensione rappresentativa della curva, mentre per prove cicliche sulla curva deformazione-tensione involucro dei vari cicli);
- $G$  è il valore del modulo di taglio rappresentativo dello stato fessurato del pannello calcolato attraverso una curva bilineare equivalente alla curva della prova in termini di energia dissipata (area sottesa); per prove monotone, il modulo è calcolato sulla curva deformazione-tensione rappresentativa della curva, mentre per prove cicliche sulla curva deformazione-tensione involucro dei cicli;
- $G_{0i}$  è il valore del modulo di taglio rappresentativo dello stato fessurato del pannello relativo all' $i$ -esimo ciclo calcolato attraverso una curva bilineare equivalente alla curva relativa all' $i$ -esimo ciclo di carico in termini di energia dissipata (area sottesa);
- $G_u$  è il valore del modulo di taglio secante relativo alla condizione ultima del pannello (in corrispondenza del carico massimo).

### 2.1.3 Strumentazione di prova

L'attrezzatura di prova consisterà di una serie di elementi metallici disposti su due spigoli di una delle diagonali del pannello, necessari per la distribuzione del carico diagonale. In uno dei due spigoli sarà posizionato un martinetto idraulico che agisce tra due elementi metallici di cui, quello interno sarà appoggiato allo spigolo del pannello e quello esterno, con funzione di contrasto, è collegato tramite barre o cavi in acciaio all'elemento metallico disposto dalla parte opposta del pannello. Per la determinazione del modulo di taglio, il pannello sarà strumentato con almeno due basi deformometriche

(lunghezza pari a circa 3/4 del lato del pannello) su ciascuna faccia, disposte lungo le diagonali del pannello. Di norma si dovranno utilizzare trasduttori di spostamento di precisione adeguata alle grandezze da rilevare. Dovranno in ogni caso essere registrate le forze degli attuatori tramite celle di carico o trasduttori di pressione di precisione adeguata alla procedura di prova.

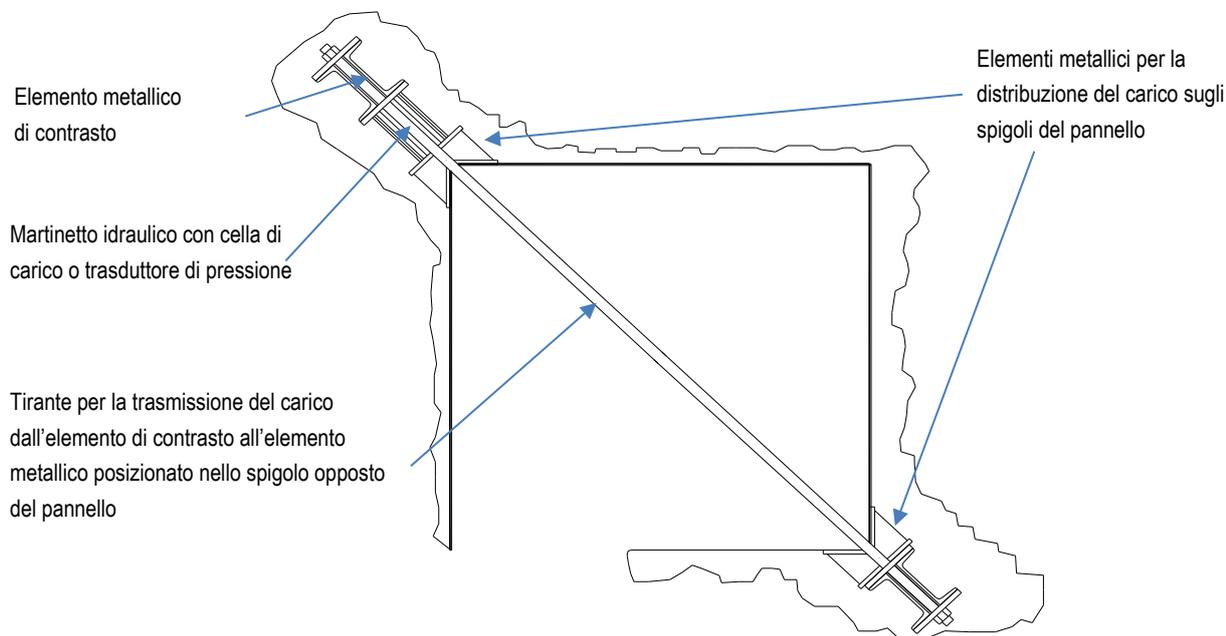


Figura 1: Apparato di prova di compressione diagonale.

#### 2.1.4 Preparazione dell'elemento da testare

Il pannello di prova deve essere ricavato all'interno di un pannello murario, tenendo conto dei seguenti aspetti:

- integrità della muratura. Il pannello scelto dovrà essere privo di lesioni, fessurazioni e altri difetti preesistenti quali fuori piombo, presenza di nicchie o cavità dovute a canne fumarie o tubazioni per gli impianti. La presenza di tali difetti può essere rilevata mediante diverse metodologie quali termografie, pacometrie, indagini soniche, ecc;
- rappresentatività del pannello nei riguardi della tipologia muraria dell'edificio (evitare accrescimenti dell'edificio e altre particolarità);
- accessibilità degli ambienti in base agli ingombri dei macchinari per la preparazione e l'esecuzione della prova.

La caratterizzazione dei materiali (blocchi, malta e intonaco), della tessitura e della sezione muraria vengono determinati con indagini visive o ispettive. Sarà in generale necessario eseguire un saggio sulla parete scelta nella zona adiacente al pannello da sottoporre a prova per rilevare la tipologia muraria e, se presenti, la quota dei ricorsi al fine di progettare la posizione dei tagli sulla parete in modo che i ricorsi risultino centrati rispetto all'altezza del pannello e che siano presenti almeno due ricorsi ove possibile. Le dimensioni del pannello di prova dovranno essere pari a (120 x 120) cm, come per la prova di laboratorio secondo quanto specificato nella ASTM E519 / E519M - 15 [1].

Il pannello viene isolato dalla parete mediante quattro tagli con sega circolare o filo diamantato raffreddato ad acqua; questa seconda tecnica è preferibile in quanto arreca meno disturbo al pannello stesso. La sequenza delle operazioni (Figura 2) prevede prima l'esecuzione del taglio orizzontale superiore, quindi dei due tagli verticali ed infine del taglio orizzontale inferiore (che non interessa tutta la larghezza del pannello, ma presenta una lunghezza pari a 50 cm). In questo modo è possibile rilevare dopo l'esecuzione del primo taglio eventuali criticità locali nella porzione di muratura al di sopra del pannello, indicative di possibili incipienti instabilità. In questo caso sarà necessario prevedere opportune precauzioni

mediante l'esecuzione di opere provvisorie volte alla stabilizzazione del sistema. In alcuni casi, qualora i carichi che gravano sulla parete in esame siano elevati, può risultare necessario realizzare un architrave che consenta uno scarico efficace dei carichi soprastanti il pannello.

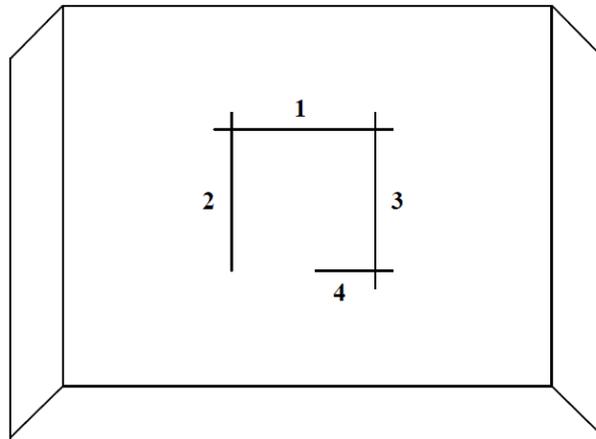


Figura 2: Sequenza dei tagli.

Le superfici ottenute dai tagli del paramento, sulle porzioni di sezione appartenenti alla parete circostante il pannello, saranno soggette ad ulteriore demolizione tale da ottenere una luce libera attorno al pannello che gli consenta di deformarsi liberamente e per collocare l'attrezzatura di prova. Tale operazione deve essere eseguita in modo da evitare danneggiamenti alla porzione di muratura da sottoporre a prova. Occorre assicurarsi che gli spigoli del pannello in cui vanno posizionati gli elementi metallici per l'applicazione del carico siano caratterizzati da superfici piane e ortogonali fra loro. Qualora questa condizione non fosse verificata, sarà necessario rettificare le superfici in corrispondenza dello spigolo mediante la realizzazione di una cappa di malta cementizia di pronta, in modo da permettere una perfetta aderenza fra i dispositivi per l'applicazione del carico e il pannello. La prova viene eseguita sul pannello completo di intonaco sui due lati, ove presente.

### 2.1.5 Procedura di prova

Dopo aver accuratamente preparato il pannello da sottoporre a prova così come descritto nel precedente paragrafo, sarà possibile procedere con il montaggio dell'apparato di prova seguendo le fasi elencate:

- posizionamento degli elementi metallici in corrispondenza degli spigoli del pannello, in posizione centrata rispetto allo spessore della muratura;
- posizionamento della cella di carico e dell'elemento di contrasto;
- posizionamento e tesatura dei tiranti metallici per la trasmissione del carico in entrambi i lati del pannello. Sarà in particolare necessario verificare l'allineamento con la diagonale del pannello e assicurarsi che la distanza dei due tiranti dalla superficie della parete sia costante ed uguale in entrambi i lati del pannello in modo da evitare eccentricità nella distribuzione del carico;
- disposizione della strumentazione di prova sui due lati del pannello. Sarà necessario fissare le basi deformometriche mediante tasselli, o altro sistema di infissione, avendo cura di raggiungere una adeguata profondità di infissione in modo da assicurare una lettura della deformazione rappresentativa non solo dello strato superficiale del pannello.

Possono essere effettuate delle prove monotone o cicliche quasi statiche fino al raggiungimento della rottura del pannello. Vista la grande invasività della metodologia di prova in situ, infatti, si ritiene necessario portare a compimento prove che consentano una valutazione il più possibile completa e accurata delle proprietà meccaniche ricercate.

La storia di carico dovrà essere definita in base alla tipologia muraria. In ogni caso sarà necessario effettuare un ciclo di carico preliminare fino al raggiungimento di un valore di carico massimo,  $F_{max-0}$ , pari a 5 kN, in modo da verificare il corretto posizionamento della carpenteria metallica, il funzionamento dell'apparato di prova e del sistema di acquisizione.

Se viene eseguita una prova ciclica, l'entità del carico massimo relativo ai cicli successivi,  $F_{max-i}$ , sarà determinata in funzione del valore atteso del carico massimo del pannello ( $F_u$ ), dipendente dalla resistenza a trazione per fessurazione diagonale attesa, in modo da prevedere un numero di cicli pari ad almeno 4. La stima della resistenza a trazione per fessurazione diagonale potrà essere effettuata a partire dai valori di riferimento della resistenza a taglio ( $f_t = 1.5 \tau_0$ ) per la tipologia muraria di riferimento per la prova, forniti dalla Tabella C8.5.I della Circolare Ministeriale n.7/2019, n. 7 [4].

$$F_{max-i} \leq \left(\frac{i}{4}\right)F_u$$

La velocità di applicazione del carico dovrà essere molto ridotta, con valori di riferimento attorno a 0.1 kN/sec.

In corrispondenza del raggiungimento del carico massimo di ogni ciclo, sarà necessario mantenere carico per qualche minuto prima di iniziare la fase di scarico fino al raggiungimento di un carico minimo di circa 5 kN, tale da evitare il completo scarico del pannello e il possibile distacco degli elementi di carico dagli spigoli. Anche al termine dello scarico sarà opportuno mantenere il carico minimo per qualche minuto, prima di procedere con la successiva fase di carico (Figura 3).

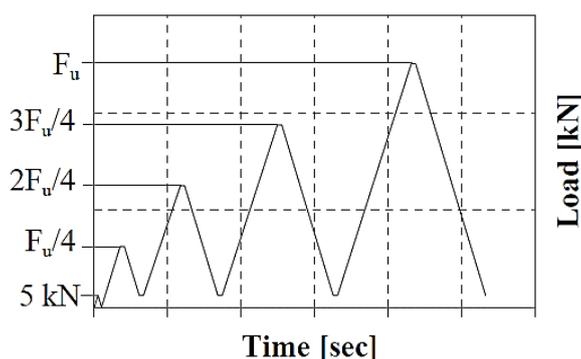


Figura 3: Storia di carico.

### 2.1.6 Misurazioni da effettuare

Prima dell'esecuzione della prova sarà necessario provvedere alla identificazione geometrica del pannello, misurando le seguenti grandezze:

- base media del pannello su ciascuna lato ( $d_A$  e  $d_B$ );
- altezza media del pannello su ciascun lato ( $h_A$  e  $h_B$ );
- porzione di pannello che rimane ammorsato alla muratura ( $v_A$  e  $v_B$ );
- spessore del pannello ( $s$ );
- spessore dell'intonaco sui due lati del pannello ( $s_A$  e  $s_B$ );
- lunghezza iniziale delle basi deformometriche sulle diagonali del pannello ( $D_{1,0}$ ,  $D_{2,0}$ ,  $D_{3,0}$ ,  $D_{4,0}$ ).

Tale identificazione fa riferimento alla notazione riportata in Figura 4, secondo la quale  $D_1$  e  $D_3$  sono le diagonali compresse,  $D_2$  e  $D_4$  sono le diagonali tese.

I dati acquisiti durante la prova dagli strumenti sono il valore del carico applicato martinetto idraulico ( $F$ ) e i valori delle relative lunghezze delle basi deformometriche diagonali  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$ ,  $D_4$ . Tali grandezze dovranno essere acquisite con opportuna frequenza di campionamento (valore di riferimento pari ad 1 Hz).

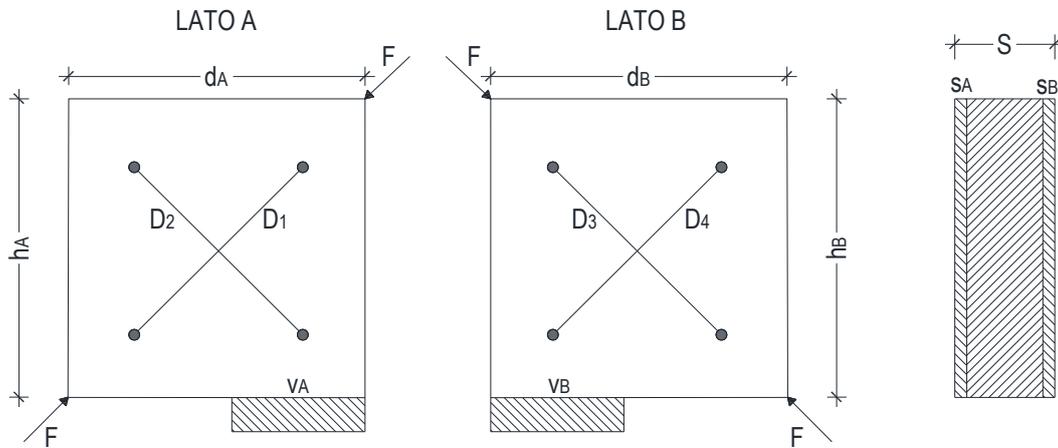


Figura 4: Schema della prova di compressione diagonale e notazioni adottate.

### 2.1.7 Metodo di calcolo

A partire dal carico  $F$  registrato dal trasduttore di pressione, è possibile ricavare lo stato tensionale che si verifica nel punto centrale del pannello (Figura 5) nell'ipotesi di poter studiare il sistema come un problema elastico di una lastra caricata nel suo piano con due forze  $F$  agenti su due spigoli opposti di una diagonale:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 0.56 F/A$$

$$\tau = \sigma_{xy} = \sigma_{yx} = 1.05 F/A$$

È possibile rappresentare lo stato tensionale attraverso il cerchio di Mohr osservando che le direzioni principali risultano inclinate di  $45^\circ$  rispetto agli assi di riferimento, in accordo con l'evidenza sperimentale che mostra fessure proprio caratterizzate da questa inclinazione. I valori di tensione principale massima e minima risultano:

$$\sigma_I = 0.5 F/A \quad (\text{tensione principale massima})$$

$$\sigma_{II} = 1.62 F/A \quad (\text{tensione principale minima})$$

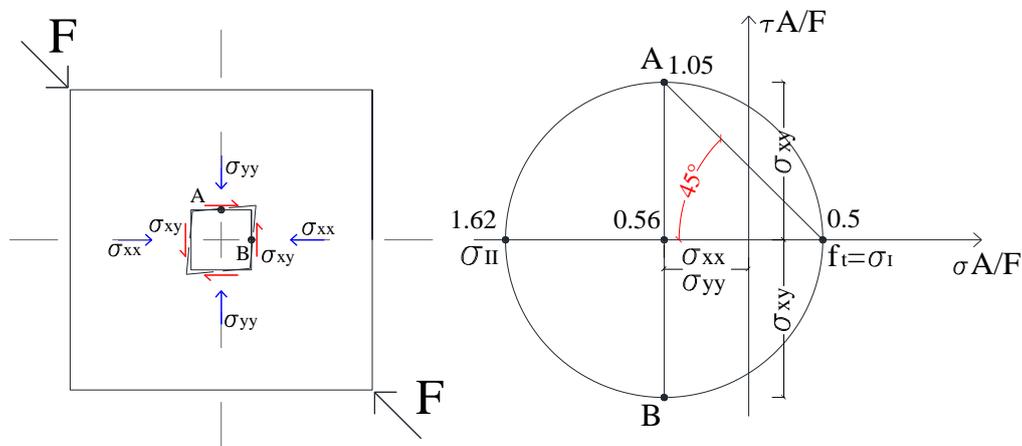


Figura 5: Stato tensionale in corrispondenza del centro del pannello.

Il valore della resistenza a trazione per fessurazione diagonale coincide con il valore della tensione principale massima (di trazione) nel centro del pannello in corrispondenza del raggiungimento del carico massimo  $F_u$ , pari a:

$$f_t = 0.5 F_u / A$$

Il corrispondente valore di resistenza a taglio  $\tau_0$  in accordo con il criterio di resistenza formulato da Turnsek – Cacovic [11], riportato anche nella Circ. Min. 7/2019 ([4]), C8.7.1.3.1.1, può essere valutato come:

$$\tau_0 = f_t / 1.5$$

Per la determinazione del modulo di taglio della muratura, è necessario elaborare le letture effettuate dalle basi deformometriche diagonali secondo la seguente metodologia di calcolo.

Le variazioni di lunghezza di ciascuna base deformometrica si valutano come:

$$\Delta D_1 = D_1 - D_{1,0}$$

$$\Delta D_2 = D_2 - D_{2,0}$$

$$\Delta D_3 = D_3 - D_{3,0}$$

$$\Delta D_4 = D_4 - D_{4,0}$$

Secondo la convenzione adottata, tali variazioni assumono segno positivo se corrispondenti ad un allungamento e negativo se corrispondenti ad un accorciamento.

I valori delle deformazioni diagonali sono:

$$\varepsilon_1 = \Delta D_1 / D_{1,0} \quad \text{deformazione della diagonale compressa del lato B del pannello}$$

$$\varepsilon_2 = \Delta D_2 / D_{2,0} \quad \text{deformazione della diagonale tesa del lato B del pannello}$$

$$\varepsilon_3 = \Delta D_3 / D_{3,0} \quad \text{deformazione della diagonale compressa del lato A del pannello}$$

$$\varepsilon_4 = \Delta D_4 / D_{4,0} \quad \text{deformazione della diagonale tesa del lato A del pannello}$$

Il comportamento complessivo del pannello può essere ottenuto mediando i valori relativi alle diagonali tese e compresse dei due lati:

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) / 2 \quad \text{deformazione media a compressione del pannello}$$

$$\varepsilon_t = (\varepsilon_2 + \varepsilon_4) / 2 \quad \text{deformazione media a trazione del pannello}$$

Da cui la deformazione angolare  $\gamma$ :

$$\gamma = |\varepsilon_c| + |\varepsilon_t|$$

Il modulo di taglio  $G$  si calcola a partire dalla curva tensione tangenziale ( $\tau$ ) versus deformazione angolare ( $\gamma$ ) della prova. Per prove monotone la curva tensione-deformazione è ricavabile direttamente dai dati della prova mentre per il caso di prova ciclica la determinazione dei moduli di elasticità trasversale è ottenuta prendendo in considerazione la *curva inviluppo* dei vari cicli di carico (Figura 6a).

A partire dalla curva tensione tangenziale ( $\tau$ ) versus deformazione angolare ( $\gamma$ ), il valore del modulo di taglio *secante* a ciascun punto della curva (1/3, 2/3, ..., etc.), è ricavabile come:

$$G_i = \frac{\tau_i}{\gamma_i} = \frac{1.05 F}{A \gamma_i}$$

In particolare, il modulo di taglio nella condizione ultima del pannello, ovvero in corrispondenza del carico ultimo, si calcola:

$$G = \frac{1.05 F_u}{A \gamma_u}$$

Un valore del modulo di taglio rappresentativo della condizione fessurata della muratura potrà essere individuato a partire dalla curva di involuppo della curva ciclica (o nella curva deformazione-tensione rappresentativa della prova per la prova monotona), costruendo una bilineare equivalente alla curva stessa in termini di energia dissipata (area sottesa).

La curva bilineare è calcolata come di seguito. Il tratto orizzontale della bilineare è determinato a partire dalla tensione ultima ( $\tau_u$ ) della prova di carico e termina in corrispondenza della deformazione angolare ultima ( $\gamma_u$ ). Sulla base della uguaglianza energetica (ovvero del diagramma registrato dalla curva e della bilineare equivalente), si determina il valore della deformazione angolare media del pannello in corrispondenza della fine del tratto inclinato della bilineare ( $\gamma_y$ ). La pendenza del tratto inclinato della bilineare rappresenta il valore del modulo di taglio.

$$G = \frac{\tau_u}{\gamma_y}$$

Nel caso di prova ciclica, con questa procedura è possibile calcolare anche il modulo di taglio rappresentativo dello stato fessurato del pannello relativo all'i-esimo ciclo di carico:

$$G_{0i} = \frac{\tau_{max-i} - \tau_{0-i}}{\gamma_{y-i} - \gamma_{0-i}} \quad \text{modulo di taglio rappresentativo dello stato fessurato del pannello relativo all'i-esimo ciclo di carico.}$$

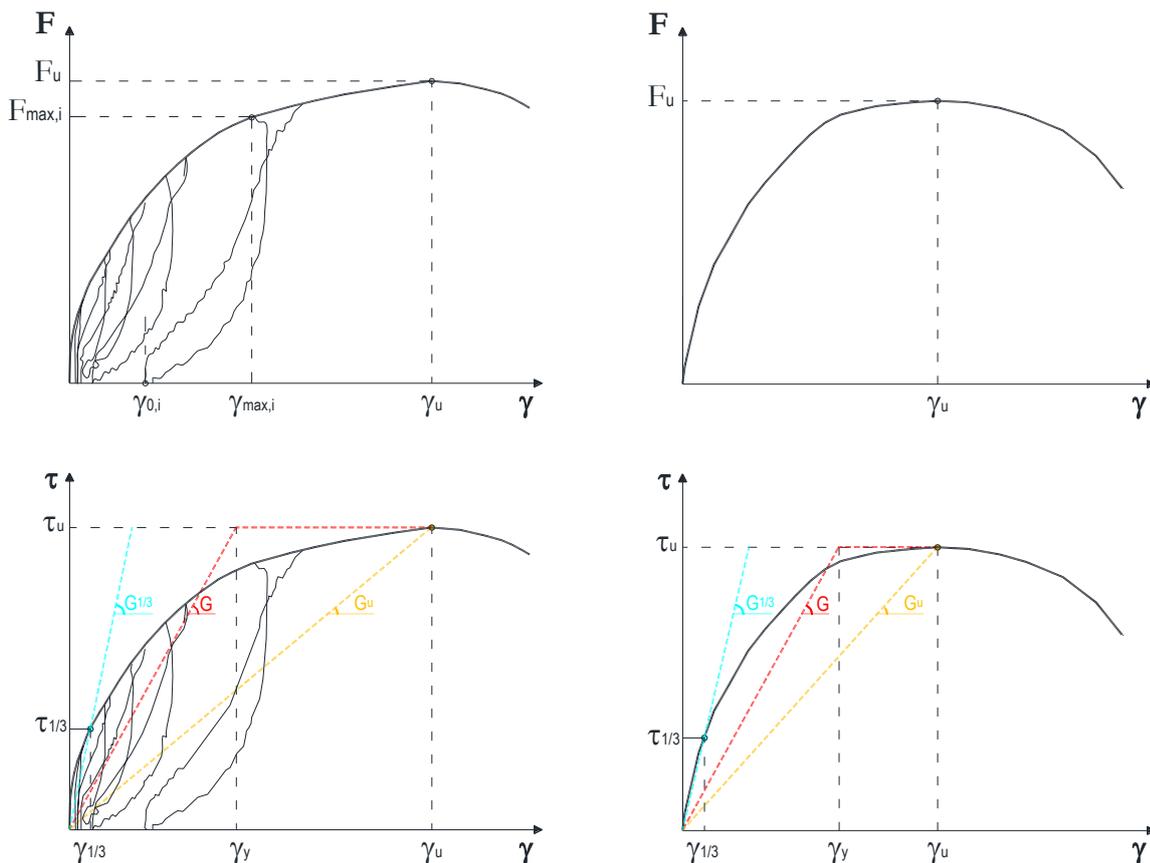


Figura 6: Determinazione del modulo di taglio per prove a) cicliche e b) monotone.

### 2.1.8 Resoconto di prova

Il resoconto di prova deve contenere le seguenti informazioni:

- a) Informazioni generali: data di preparazione del pannello e data di esecuzione della prova, numero dei pannelli indagati, intestazione del laboratorio che effettua la prova, committenza, ecc;
- b) Informazioni sull'edificio indagato: localizzazione, destinazione d'uso, funzione, ecc;
- c) Caratterizzazione qualitativa della muratura costituente il pannello: attribuzione della tipologia muraria, presenza di ricorsi o listature, qualità della malta, ecc;
- d) Indicazione dell'eventuale stato di degrado: presenza di stati fessurativi antecedenti alla prova, qualità dell'intonaco, ecc;
- e) Caratterizzazione geometrica del pannello: dimensioni medie di ciascun lato, spessore, spessore dell'intonaco sui due lati del pannello;
- f) Caratterizzazione della strumentazione utilizzata per l'esecuzione della prova: descrizione della strumentazione, marca, modello, numero e data del certificato di taratura di ciascuno strumento;
- g) Frequenza di campionamento per l'acquisizione dei dati.

Per quanto riguarda i risultati, sarà necessario riportare chiaramente i valori di resistenza e rigidità del pannello indagato.

In particolare, si specificherà per ciascun ciclo di carico e per la curva involucro:

- valore massimo del carico applicato:  $F_{max,i}$ ;
- i valori massimi di deformazione delle quattro diagonali:  $\epsilon_{1,i}$ ,  $\epsilon_{2,i}$ ,  $\epsilon_{3,i}$ ,  $\epsilon_{4,i}$ ;
- il valore della deformazione angolare massima:  $\gamma_i$ ;
- il valore massimo della tensione principale massima (di trazione) nel centro del pannello:  $\sigma_{1,i}$ ;
- modulo di rigidità a taglio valutato attraverso la definizione di una curva bilineare equivalente in termini di energia dissipata (area sottesa).

In aggiunta ai risultati numerici, sarà opportuno inserire nella relazione di prova:

- i diagrammi relativi alla storia di carico;
- i diagrammi relativi alle deformazioni diagonali nel tempo;
- il diagramma curva tensione tangenziale ( $\tau$ ) versus deformazione angolare ( $\gamma$ ).

Il certificato dovrà essere integrato con rilievi fotografici che mostrino le fasi di esecuzione della prova, lo stato fessurativo dei due lati del pannello durante e al termine della prova stessa, ed ulteriori particolari considerati significativi.

### 2.1.9 Note sull'interpretazione dei risultati

Per la valutazione della resistenza a taglio della muratura a partire dai risultati della prova di compressione diagonale esistono, in letteratura, diverse metodologie. Si osserva in particolare che quella proposta, differisce da quanto suggerito nelle specifiche ASTM E 519M-15 e RILEM TC 76-LUM, 1991 e si basa sui risultati di ricerche scientifiche riportati in bibliografia.

### 2.1.10 Bibliografia

#### Normative

- [1] ASTM E519 / E519M - 15 2015. Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [2] RILEM TC 76-LUM, Diagonal Tensile strength tests of small wall specimens, 1991.

- [3] NTC 2018. D.M. del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17/01/2018. Aggiornamento delle «Norme Tecniche per le Costruzioni». G.U. n. 42 del 20/02/2018.
- [4] Circolare Ministeriale n.° 7 del 21/01/2019. Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018. G.U. n. 35 del 11/02/2019.

### **Riferimenti scientifici**

- [5] Brignola A., Podestà S., Lagomarsino S., 2006. Experimental Results of Shear Strength and Stiffness of Existing Masonry Walls. Proceedings of V International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi, India, 6-8 November 2006, pp. 767-774.
- [6] Brignola A., Frumento S., Lagomarsino S., Podestà S., 2006. Valutazione sperimentale dei parametri di deformabilità e di resistenza a taglio della muratura, Atti del Convegno Nazionale di Sperimentazione su materiali e strutture, Venezia, 6-7 Dicembre 2006, pp.173- 182.
- [7] Brignola A., Ferrini M., Lagomarsino S., Mangone F., Podestà S., 2006. Valutazione sperimentale dei parametri di deformabilità e di resistenza a taglio della muratura, Ingegneria Sismica, Settembre-Dicembre 2006, pp. 19-31, Patron Editore, Bologna.
- [8] Brignola A., Frumento S., Lagomarsino S., Podestà S., 2009 Identification of shear parameters of masonry panels through the in-situ diagonal compression test, International Journal of Architectural Heritage. Vol 3, Issue 1 January 2009, pp. 52-73.
- [9] Frumento S., 2007. Identificazione dei parametri di risposta a taglio di pannelli murari attraverso la prova di compressione diagonale. Tesi di Dottorato, Università di Genova.
- [10] Avorio A., Borri A., Corradi M. (a cura di), 2002. Ricerche per la ricostruzione. Iniziative a carattere tecnico e scientifico a supporto della ricostruzione, Dei Tipografia del Genio Civile, Roma.
- [11] Turnsek V., Cacovic F. 1971. Some experimental results on the strength of brick masonry walls, Proceeding of the 2nd International Brick Masonry Conference, Stoke on Trent, 1971; pp. 149-156.
- [12] Borri A., Corradi M., Vignoli A., 2000. Il comportamento strutturale della muratura nelle zone terremotate dell'Umbria: alcune sperimentazioni, Ingegneria Sismica, Anno XVII, n°3, pp. 23-33, Patron Editore, Bologna.
- [13] Boschi S., Galano L. & Vignoli A. Bull Earthquake Eng, 2019. Mechanical characterisation of Tuscany masonry typologies by in situ tests. 17: 413. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0451-4>.

## 2.2 PROVA DI COMPRESSIONE SEMPLICE (C)

### 2.2.1 Definizione della tecnica di indagine

Le seguenti prescrizioni specificano le modalità di prova per determinare la resistenza a compressione ed il modulo elastico di una muratura.

La prova di compressione semplice può essere condotta in situ su una porzione di parete muraria, oppure in laboratorio su pannelli appositamente realizzati.

La resistenza a compressione della muratura, misurata in direzione verticale, deriva da prove condotte fino a collasso (distruttive) su pannelli di muratura. Il modulo elastico viene determinato con la stessa prova o con prova limitata al campo di risposta elastica, misurando la deformazione verticale del pannello a determinati livelli di carico. Per pannelli realizzati in laboratorio, i materiali, la costruzione e la tessitura muraria dovrebbero corrispondere a quelli riscontrati nella pratica. I pannelli sono caricati uniformemente a compressione. Nelle prove a collasso si registra il carico massimo ottenuto e si ricavano le resistenze a compressione media e caratteristica della muratura dalle resistenze delle singole prove (per prove in situ, in genere, ogni prova su pannello costituisce un risultato di resistenza). Analogamente vengono registrati i valori delle deformazioni e del carico al livello prestabilito per la determinazione del modulo elastico.

La prova può anche essere realizzata per determinare la curva sforzo-deformazione della muratura.

Nella versione in situ la prova consiste nell'isolare un pannello da una parete muraria di dimensioni rettangolari dipendenti dalla tessitura muraria, mediante tre tagli con sega circolare o filo diamantato raffreddato ad acqua e nella successiva applicazione di un'azione di compressione centrata. La forza verticale può essere applicata in modo monotono fino al collasso, o, in alternativa, il programma di prova può consistere nell'applicazione ciclica del carico di compressione. Di solito la procedura di tipo ciclico è utilizzata nel campo elastico della risposta.

L'azione di compressione viene applicata mediante attuatori oleodinamici disposti sulla testa del pannello e, di norma, è contrastata dall'architettura della sommità del vano di prova. Nel caso in cui la sollecitazione massima da applicare al pannello in prova non sia accettabile per la stabilità della muratura soprastante, occorre procedere a riportare tale azione al piede del pannello, con un sistema di barre verticali di rinvio. In questo caso l'attrezzatura di prova è composta da due traverse metalliche posizionate sopra il pannello, di cui quella superiore è rigidamente collegata alla base mediante barre in acciaio e dai suddetti attuatori, disposti tra le due traverse.

Durante la prova vengono acquisiti gli spostamenti relativi di basi deformometriche posizionate nella parte centrale del pannello, in direzione verticale (opzionalmente anche in direzione orizzontale); la strumentazione di misura più idonea è composta da trasduttori posizionati su ciascun lato del pannello.

La prova, nella versione di laboratorio, è del tutto analoga, anche se differisce nel sistema di contrasto dell'azione da applicare.

Il carico verticale verrà applicato con modalità diverse a seconda della tipologia di prova. Si distinguono due tipi di prove:

- prova di tipo 1): prova di tipo *elastico*, effettuata per la determinazione del modulo elastico della muratura; questa prova consiste nell'applicazione del carico sul pannello limitandolo alla stimata fase elastica della muratura. La prova può avvenire attraverso un singolo ciclo di carico oppure con più cicli di carico e scarico non incrementali (ovvero mantenendo costante e pari allo stimato valore del limite elastico la forza massima applicata durante la prova);
- prova di tipo 2): prova di tipo *a collasso*, effettuata per la determinazione della resistenza a compressione della muratura e del modulo elastico normale della muratura. Durante la prova, che può anche essere successiva alla prova precedente, la forza applicata sulla muratura è spinta fino al collasso del pannello. La prova può essere effettuata in modo monotono (applicando un unico ciclo di carico) oppure attraverso cicli di carico.

## 2.2.2 Simbologia adottata

La simbologia adottata è la seguente:

- $A$  è la sezione del pannello;
- $F$  è il carico verticale applicato al pannello;
- $F_{inf}$  è il limite inferiore considerato per il carico applicato al pannello;
- $F_i$  è il carico verticale applicato al pannello durante la prova di tipo *elastico* al passo  $i$ -esimo;
- $F_{max}$  è il carico verticale massimo applicato al pannello durante la prova di tipo *elastico*, pari ad  $1/3$  del carico di rottura stimato  $F_{us}$ ;
- $F_u$  è il carico verticale ultimo applicato al pannello durante la prova di tipo *a collasso*;
- $F_{us}$  carico di rottura stimato (per la prova di tipo *elastico*, vedere sezione “Procedura di prova”);
- $F_{lin}$  è il carico verticale applicato al pannello per cui la curva tensione/deformazione assume un comportamento lineare e può coincidere o meno con il valore  $F_{max}$ ;
- $L_{V_{k,0}}$  è la lunghezza della  $k$ -esima base deformometrica verticale ( $B_{V_k}$ ) prima dell’applicazione del carico;
- $L_{O_{k,0}}$  è la lunghezza della  $k$ -esima base deformometrica orizzontale ( $B_{O_k}$ ) prima dell’applicazione del carico;
- $L_{V_{k,inf}}$  è la lunghezza della  $k$ -esima base deformometrica verticale in corrispondenza del valore del carico  $F_{inf}$ ;
- $L_{V_{k,i}}$  è la lunghezza della  $k$ -esima base deformometrica verticale in corrispondenza del valore del carico  $F_i$ ;
- $L_{V_{k,max}}$  è la lunghezza della  $k$ -esima base deformometrica verticale in corrispondenza del valore del carico  $F_{max}$ ;
- $L_{V_{k,u}}$  è la lunghezza della  $k$ -esima base deformometrica verticale in corrispondenza del valore del carico  $F_u$ ;
- $\sigma_i$  è la tensione verticale agente sul pannello ad un generico istante di carico  $F_i$ ;
- $\sigma_{inf}$  è la tensione verticale agente sul pannello in corrispondenza del carico  $F_{inf}$ ;
- $\sigma_{max}$  è la tensione verticale agente sul pannello in corrispondenza del carico  $F_{max}$ ;
- $\sigma_{us}$  è la tensione verticale agente sul pannello in corrispondenza del carico ultimo stimato  $F_{us}$  per la prova di tipo *elastico*;
- $\sigma_{1/3}$  è la tensione verticale agente sul pannello in corrispondenza di  $1/3$  del carico  $F_u$  applicato durante la prova di tipo *a collasso*;
- $\sigma_{lin}$  è la tensione verticale agente sul pannello in corrispondenza del carico  $F_{lin}$ ;
- $f_c$  è la tensione verticale agente sul pannello in corrispondenza del carico  $F_u$  che coincide con la resistenza a compressione della muratura;
- $\varepsilon_{V_k}$  è la deformazione verticale rilevata nella  $k$ -esima base deformometrica;
- $\varepsilon_{V_{k,inf}}$  è la deformazione verticale rilevata nella  $k$ -esima base deformometrica in corrispondenza del carico  $F_{inf}$ ;
- $\varepsilon_{V_{k,max}}$  è la deformazione verticale rilevata nella  $k$ -esima base deformometrica in corrispondenza del carico  $F_{max}$ ;
- $\varepsilon_{V_{us}}$  è la deformazione verticale media rilevata in corrispondenza del carico  $F_{us}/3$  per la prova di tipo *elastico*;
- $\varepsilon_{V_{lin}}$  è la deformazione verticale media rilevata in corrispondenza del carico  $F_{lin}$ ;
- $\varepsilon_{V_{1/3}}$  è la deformazione verticale media rilevata in corrispondenza di  $1/3$  del carico  $F_u$  applicato durante la prova di tipo *a collasso*;
- $\varepsilon_{V_u}$  è la deformazione verticale media rilevata in corrispondenza del carico  $F_u$  applicato durante la prova di tipo *a collasso*;
- $E$  è il modulo elastico nel caso di prova di tipo *elastico* ed è il modulo elastico calcolato in corrispondenza di  $1/3$  del carico  $F_u$  applicato durante la prova di tipo *a collasso*;
- $E_{lin}$  è il modulo elastico calcolato in corrispondenza di  $F_{lin}$  applicato durante la prova di tipo *elastico*.

### 2.2.3 Strumentazione di prova

Per la determinazione del modulo elastico il pannello sarà strumentato con almeno due basi deformometriche su ciascuna faccia disposte in direzione verticale di lunghezza pari a  $1/3$  dell'altezza del pannello, posizionate nel terzo medio, simmetricamente rispetto all'asse del pannello a distanza pari a  $1/4$  dal bordo. Analogamente si procederà disponendo tre basi deformometriche per lato, con la terza base disposta sull'asse verticale del pannello. Si dovranno utilizzare trasduttori di spostamento di precisione adeguata alle grandezze da rilevare. Dovranno in ogni caso essere registrate le forze degli attuatori tramite celle di carico di precisione adeguata alla procedura di prova.

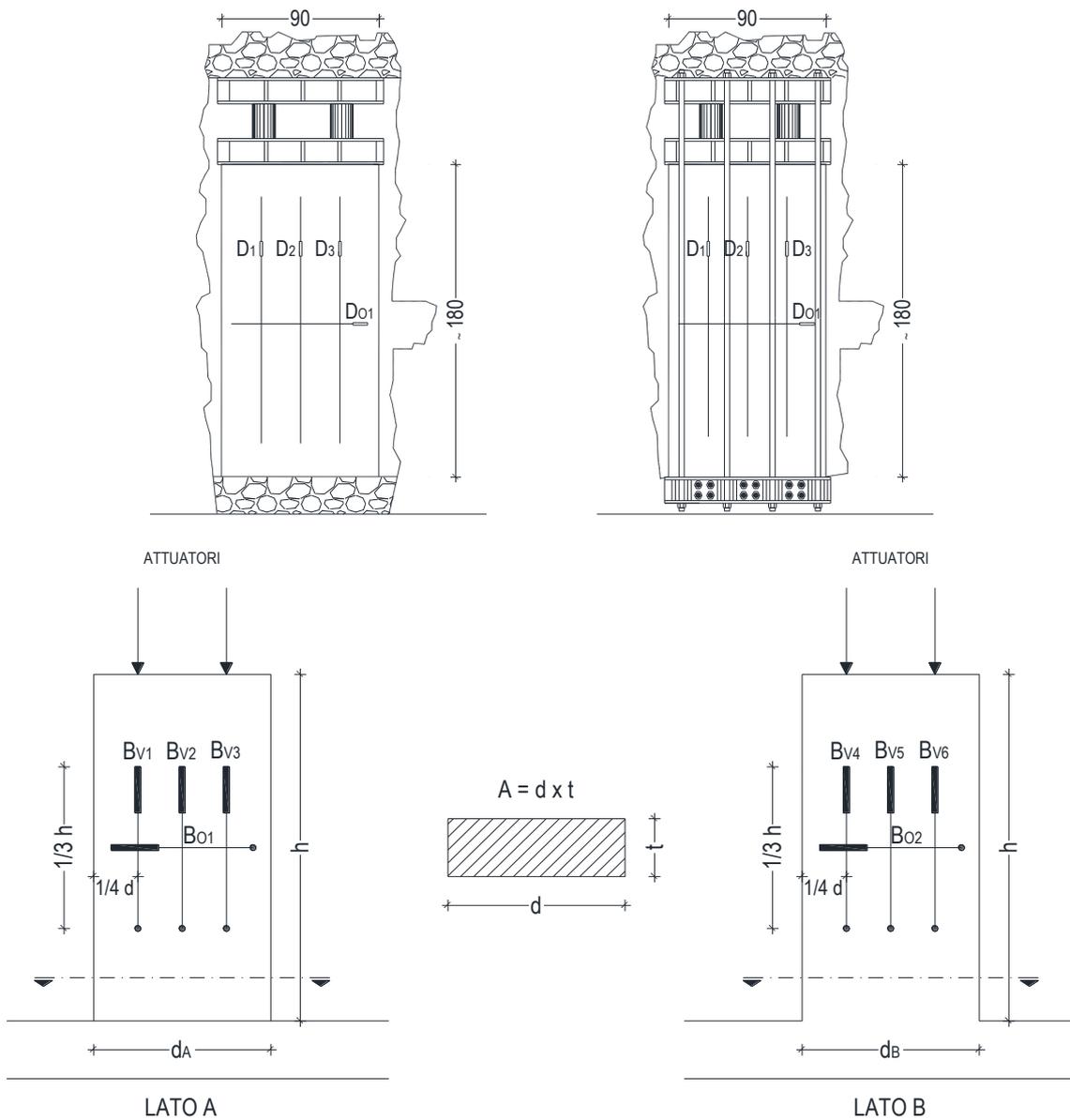


Figura 7: Schema di prova di compressione semplice.

MURATURA A TESSITURA REGOLARE

$$h/d \leq 2$$

$$7 \text{ ricorsi} \leq h \leq 15 \text{ ricorsi}$$

$$h \geq 5 t$$

$$d \geq 3 \text{ blocchi}$$

MURATURA A TESSITURA IRREGOLARE

Le dimensioni del pannello devono essere correlate alle dimensioni medie dei blocchi.

## 2.2.4 Preparazione dell'elemento da testare

Il pannello di prova deve essere ricavato all'interno di un maschio murario di spessore costante esente da fessurazioni, lesioni o altri generici difetti (esempio: fuori piombo). La caratterizzazione dei materiali (blocchi e malta), della tessitura e della sezione muraria vengono determinati con indagini visive o ispettive.

La porzione di parete oggetto di prova viene inizialmente privata dell'intonaco su entrambe le facce con tecnica manuale, tale da arrecare il minimo disturbo al pannello di muratura; le superfici dei paramenti devono essere accuratamente pulite da residui di intonaco.

Le dimensioni del pannello in prova dipenderanno dalla tessitura muraria. Per murature a ricorsi orizzontali regolari o pseudo-regolari, l'altezza del pannello dovrà comprendere un minimo di 7 ricorsi ed un massimo di 15 con dimensione almeno 5 volte lo spessore del paramento; la larghezza dovrà comprendere almeno 3 blocchi. Per murature a tessitura irregolare le dimensioni del pannello devono essere correlate alle dimensioni medie dei blocchi per ottenere un campione di muratura significativo. In entrambi i casi, la forma dei pannelli in oggetto sarà variabile da quadrata a rettangolare, con rapporto massimo tra altezza e larghezza pari a due.

Il pannello viene isolato dalla parete mediante tre tagli con sega circolare o filo diamantato raffreddato ad acqua; questa seconda tecnica è preferibile in quanto arreca meno disturbo al pannello stesso. La sequenza delle operazioni prevede prima l'esecuzione dei due tagli verticali ed infine il taglio orizzontale superiore. Le superfici ottenute dai tagli del paramento, sulle porzioni di sezione appartenenti alla parete circostante il pannello, saranno soggette ad ulteriore demolizione tale da ottenere una luce libera di almeno 2 cm sui tagli verticali e tale da consentire la messa in opera dell'attrezzatura di prova sul taglio superiore.

Sulla parte superiore del pannello dovrà essere disposto un elemento metallico di adeguata rigidità tale da garantire una distribuzione uniforme dell'azione verticale sulla sommità del pannello. Successivamente si posizionano gli attuatori oleodinamici in posizione simmetrica rispetto alla base di carico sia in direzione trasversale che longitudinale. Sugli attuatori verrà posizionato un secondo elemento metallico a contrasto con la porzione di muratura superiore (eventualmente regolarizzando la superficie di contatto).

Nel caso in cui la tensione verticale di confinamento risulti bassa (ad esempio in edifici con un numero limitato di piani) non è consentito l'utilizzo del contrasto della zona soprastante il pannello. In tal caso si rende necessario il trasferimento alla base del pannello dell'azione verticale esercitata dagli attuatori sopra la testa del pannello stesso, realizzando così un sistema chiuso. In questo caso l'attrezzatura di prova è composta dalle stesse due traverse metalliche posizionate sopra il pannello, di cui quella superiore è tuttavia rigidamente collegata sotto la base mediante barre in acciaio di rinvio. È allora necessario procedere al consolidamento della zona di muratura sottostante il pannello ed a predisporre un sistema di ancoraggio delle barre verticali.

Occorre assicurarsi che la faccia superiore del pannello sulla quale verrà applicato il carico sia piana e perpendicolare all'asse principale del pannello. Questo potrà essere realizzato, ad esempio, con un sottile strato compensatore di materiale adatto, come una cappa di gesso o una malta appropriata per rettificare la superficie, di resistenza superiore a quella prevista per la muratura.

## 2.2.5 Procedura di prova

Il carico verticale verrà applicato con modalità diverse a seconda della tipologia di prova. Si descrivono nel seguito le due tipologie di prove di tipo *elastico* ed a *collasso* già definite al paragrafo §2.2.1.

Prova di tipo 1) o prova di tipo *elastico*: Applicare uniformemente il carico sulla sommità del pannello. Aumentare il carico costantemente in modo da raggiungere il carico massimo da 10 min a 15 min dall'inizio dell'applicazione del carico

stesso. La velocità di carico dipende dalla resistenza della muratura considerata. A titolo indicativo si consiglia di adottare gradienti di carico compresi fra 0.20 N/mm<sup>2</sup>/min e 1.50 N/mm<sup>2</sup>/min in funzione della classe di resistenza presunta. Procedere come segue: applicare la forza di compressione in almeno 3 passi uguali fino a raggiungere la metà della stimata forza massima di collasso (una stima preliminare della forza massima di collasso può essere determinata, a seconda della tipologia muraria di appartenenza del pannello, a partire dai valori minimi di resistenza a compressione forniti dalla Tabella C8.5.I di Circ. Min. n.7/2019 [14]). Dopo ogni passo di carico, la forza di compressione deve essere mantenuta costante per 1 – 2 min per determinare le deformazioni verticali. In alternativa è consigliabile che le misure siano registrate in modo continuo con un sistema di acquisizione dati.

Prova di tipo 2) o prova di tipo a collasso: Questa prova viene fatta sul pannello nello stato iniziale. Occorre incrementare la forza di compressione, con la stessa velocità, fino al raggiungimento del collasso del pannello. La prova può essere eseguita anche in modo ciclico, effettuando almeno 4 cicli di carico ad intensità di forza applicata crescente, sino a raggiungere il carico che porta al collasso il pannello.

L'entità del carico massimo relativo ai cicli sarà determinata in funzione del valore atteso del carico massimo del pannello dipendente dalla resistenza a compressione attesa, in modo da prevedere un numero di cicli pari ad almeno 4. Una stima preliminare della forza massima di collasso può essere determinata, a seconda della tipologia muraria di appartenenza del pannello, a partire dai valori minimi di resistenza a compressione forniti dalla Tabella C8.5.I di Circolare n. 7/2019 [14].

## 2.2.6 Misurazioni da effettuare

Registrare quanto segue:

- le dimensioni della sezione trasversale caricata del pannello con una precisione di  $\pm 5$  mm;
- il carico massimo nei vari casi in kN;
- il carico a livello del quale appaiono le prime lesioni visibili;
- il tempo intercorso dall'applicazione iniziale del carico fino al raggiungimento del carico massimo;
- la lunghezza delle basi deformometriche, con una precisione nelle deformazioni di  $\pm 25$   $\mu$ m/m.

## 2.2.7 Metodo di calcolo

Calcolare la tensione verticale del pannello di muratura in prova arrotondata a 0.1 N/mm<sup>2</sup>, usando la seguente formula, nei vari casi:

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A} \quad [\text{N/mm}^2]$$

La deformazione verticale per ciascuna base è calcolata come:

$$\varepsilon_{vk} = \frac{L_{vk,i} - L_{vk,0}}{L_{vk,0}} \quad [\mu\text{m/m}]$$

Il calcolo del modulo di elasticità viene fatto a partire dalla curva deformazione media  $\varepsilon_v$  tensione di compressione verticale  $\sigma$  per entrambi i tipi di prova (prova di tipo *elastico* e prova di tipo *a collasso*), dove la deformazione verticale media corrisponde alla media delle deformazioni di tutte le basi di misura verticali.

Nelle fasi iniziali della prova, si può verificare una diffusione delle tensioni verticali tale da generare deformazioni pressoché nulle, corrispondenti ad un tratto verticale nel diagramma tensioni-deformazioni. In questo caso il modulo di elasticità deve essere calcolato con punto iniziale corrispondente a  $\varepsilon_{inf} - \sigma_{inf}$ . Nel caso in cui questo non sia accaduto durante la prova il punto iniziale per il calcolo del modulo di elasticità è l'origine della prova.

Per la prova di tipo 1) o prova di tipo elastico il modulo deve essere determinato come valore secante al carico rispetto alla forza verticale massima applicata al pannello, ovvero:

$$E = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{inf}}{\varepsilon_{v,max} - \varepsilon_{v,inf}} \quad [N/mm^2]$$

O, in alternativa, è possibile determinare il modulo  $E_{lin}$  come valore secante al carico rispetto alla forza  $F_{lin}$  (pari al carico verticale applicato al pannello per cui la curva tensione/deformazione assume un comportamento lineare (Figura 8a)):

$$E_{lin} = \frac{\sigma_{lin} - \sigma_{inf}}{\varepsilon_{v,lin} - \varepsilon_{v,inf}} \quad [N/mm^2]$$

Per la prova di tipo 2) o prova di tipo a collasso il modulo deve essere determinato come valore secante nell'origine ed al carico di 1/3 del carico di rottura del pannello (Figura 8b), ovvero:

$$E = E_{1/3} = \frac{\sigma_{1/3} - \sigma_{inf}}{\varepsilon_{v,1/3} - \varepsilon_{v,inf}} \quad [N/mm^2]$$

Se la prova di tipo *a collasso* questa può avvenire in modo monotono sino a collasso o attraverso dei cicli di carico. Nel caso in cui la prova avvenga ciclicamente, il modulo di elasticità è calcolato sulla curva deformazione-tensione involucro dei cicli.

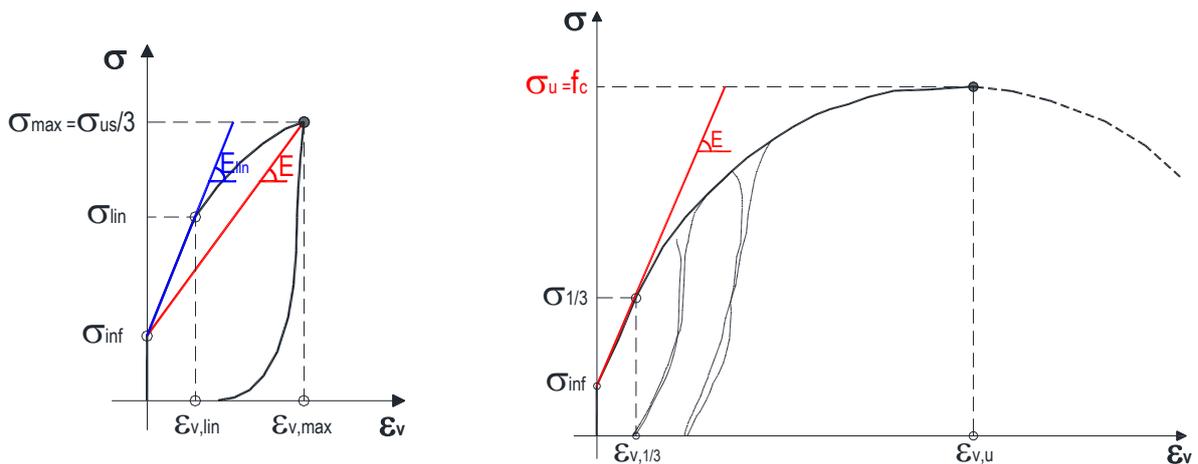


Figura 8: (a) Prova di tipo 1) o prova di tipo elastico, (b) prova di tipo 2) o prova di tipo a collasso.

Il valore del modulo elastico viene calcolato arrotondando il risultato a 1 N/mm<sup>2</sup>.

## 2.2.8 Resoconto di prova

Il resoconto di prova deve contenere le seguenti informazioni:

- a) intestazione del laboratorio che effettua la prova;
- b) data di preparazione del pannello;
- c) data della prova;
- d) scheda con la classificazione del pannello;
- e) dimensioni e area della sezione;
- f) grandezze utili per il calcolo della resistenza a compressione e del modulo elastico;
- g) valori calcolati della resistenza e del modulo elastico;
- h) grafico della curva tensione-deformazione ottenuto dalla prova;
- i) nella prova a collasso, carico al quale si manifestano le prime fessure visibili;
- l) foto del pannello con la disposizione degli strumenti e dopo la rottura;
- m) eventuali osservazioni.

### 2.2.9 Note sull'interpretazione dei risultati

Per edifici con un numero limitato di piani, per i quali quindi è prevedibile che la tensione verticale di confinamento sia bassa, è altamente sconsigliato l'utilizzo come contrasto della zona soprastante il pannello, poiché si rischia il danneggiamento della stessa. Occorre trasferire alla base del pannello l'azione verticale esercitata dagli attuatori sulla testa del medesimo, mediante barre di acciaio di rinvio. Si realizza cioè un sistema chiuso, procedendo al consolidamento della zona di muratura sottostante il pannello e predisponendo un sistema di ancoraggio delle barre verticali.

In presenza di tessitura muraria molto irregolare, nelle fasi iniziali della prova, si può verificare una diffusione delle tensioni verticali tale da generare deformazioni pressoché nulle, corrispondenti ad un tratto verticale nel diagramma tensioni-deformazioni. Nel caso della prova di tipo 1), se il tratto verticale si estende per un valore del carico indicativamente pari o superiore ad  $1/3$  del carico massimo applicato, il valore del modulo elastico trovato può non essere attendibile. La stessa circostanza non ha in genere influenza sul valore del modulo elastico trovato nella prova di tipo 2).

Quando la prova di compressione viene condotta in "controllo di forza" non è possibile cogliere il tratto discendente del diagramma tensioni-deformazioni, cosa che è invece possibile quando si procede in "controllo di volume" oppure se la prova a collasso non è monotona ma ciclica.

Di solito si considera che il pannello di prova abbia raggiunto il collasso se si manifestano degli evidenti segni di danneggiamento oppure se a piccoli incrementi del carico corrispondono grandi incrementi di deformazione. È comunque inevitabile affidarsi all'esperienza dello sperimentatore, non essendo possibile dare indicazioni quantitative valide in assoluto.

Se la sezione muraria è costituita da più paramenti il valore del modulo elastico calcolato sarà un valore medio sulla sezione muraria, sebbene più rappresentativo del modulo elastico associato ai due paramenti esterni.

In virtù delle letture di deformazione fatte da un'eventuale base deformometrica orizzontale, la prova di compressione può consentire anche una stima del coefficiente di Poisson. Accade spesso però, soprattutto per tessiture murarie molto irregolari, che i dati a disposizione siano tali da fornire valori del coefficiente di Poisson non attendibili, ovvero vicini a 0 oppure superiori a 0.5. In altre parole, per la stima del coefficiente di Poisson è richiesta una preliminare lettura critica dei risultati della prova.

Trattandosi di una prova in situ distruttiva, nell'eventualità di dover ripristinare la porzione di muratura soggetta alla prova, si suggerisce di demolire il pannello e provvedere alla sua completa ricostruzione, scegliendo materiali e tessitura muraria in modo da riprodurre una rigidità della parete paragonabile a quella preesistente.

## 2.2.10 Bibliografia

### Normative

Premesso che non esiste una Normativa specifica per la prova di compressione in situ, dei possibili riferimenti sono:

- [14] Circolare Ministeriale n.° 7 del 21/01/2019. Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018. G.U. n. 35 del 11/02/2019.
- [15] D.M. LL. PP. 20/11/1987, Norme tecniche per la progettazione esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento.
- [16] NTC 2018. D.M. del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17/01/2018. Aggiornamento delle «Norme Tecniche per le Costruzioni». G.U. n. 42 del 20/02/2018.
- [17] RILEM TC 76-LUM, General recommendations for methods of testing load-bearing masonry, 1988.

### Riferimenti scientifici

- [18] AA. VV., Ricerche per la ricostruzione. Iniziative di carattere tecnico e scientifico a supporto della ricostruzione, DEI Tipografia del Genio Civile, Roma, 2002.
- [19] AA. VV., Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione post-sismica degli edifici, DEI Tipografia del Genio Civile, Roma, 1999.
- [20] Borri, M. Corradi, A. Vignoli, Experimental study on the determination of strength of masonry walls, Construction and Building Materials, N. 17, 2003, pp. 325-337.
- [21] Borri, M. Corradi, A. Vignoli, Il comportamento strutturale della muratura nelle zone terremotate dell'Umbria: alcune sperimentazioni, Ingegneria Sismica, anno XVII, N. 3, 2000, pp. 23-33.
- [22] Chiostrini S., Galano L., Vignoli A. On the determination of strength of ancient masonry walls via experimental tests, Proceedings of the 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, 2000, Paper N. 2564.
- [23] Chiostrini S., Galano L., Vignoli A.. Shear and compression testing of stone masonry walls, Atti del Seminario CIAS Evoluzione nella Sperimentazione per le Costruzioni, Merano, 1994, pp. 223-250.
- [24] Chiostrini S., Vignoli A., In situ determination of the strength properties of masonry walls by destructive shear and compression tests, Masonry International, The British Masonry Society, Vol. 7, N. 3, 1994, pp. 84-96.
- [25] Chiostrini S., A. Vignoli, An experimental research program on the behaviour of stone masonry structures, Journal of Testing and Evaluation, ASTM, Vol. 20, N. 3, 1992, pp. 190-206.

## 2.3 PROVA CON MARTINETTO PIATTO SINGOLO (MP)

### 2.3.1 Definizione della tecnica di indagine

Le seguenti prescrizioni specificano un metodo per determinare in sito la tensione di compressione su una muratura esistente mediante la misura dello stato locale di deformazione. Il metodo non è applicabile ad una muratura sottoposta a trazione. Vengono date indicazioni circa la strumentazione della prova, la preparazione dell'elemento da testare, comprese le condizioni richieste prima della prova, la procedura di prova, il metodo di calcolo ed i contenuti del resoconto di prova. La tecnica di prova è basata sul rilascio delle tensioni in un'area relativamente piccola di muratura provocata da un taglio perpendicolare alla sua superficie esterna. Il rilascio della tensione causa la chiusura del taglio e il valore di questo spostamento (livello di deformazione) può essere determinato mediante la misura della distanza tra due punti simmetrici posizionati sui due lati del taglio. Nel taglio si inserisce un martinetto piatto nel quale viene gradualmente aumentata la pressione finché la chiusura misurata a deformazione avvenuta si riduce a zero. Quindi la configurazione geometrica della muratura ritorna nelle condizioni in cui era prima del taglio. In queste condizioni la pressione nel martinetto è uguale alla tensione che esisteva nella muratura prima del taglio, a meno di fattori di correzione che tengano in conto: 1) delle caratteristiche del martinetto, 2) dell'influenza della particolare geometria del taglio e 3) del rapporto tra l'area del martinetto e quella del taglio.

Se il campo delle tensioni prima del taglio era completamente uniforme, cioè il materiale è omogeneo e non ci sono eccentricità dei carichi, allora questa tensione è rappresentativa dello stato di compressione nella sezione della muratura. Di solito la tensione è verticale e il taglio orizzontale; si misura, quindi, una compressione verticale. Se esiste una qualche disomogeneità o eccentricità, la tensione potrà solo rappresentare il valore medio del livello di tensione nell'area del taglio.

### 2.3.2 Simbologia adottata

La simbologia adottata è la seguente:

- $\sigma$  è il valore della tensione ripristinata, espressa in MPa o in N/mm<sup>2</sup>;
- $k_m$  è una costante adimensionale che rappresenta le proprietà geometriche e di rigidità del martinetto determinate come descritto nella sezione 7 (di solito viene riportata nel certificato di taratura del martinetto, fornito dall'azienda produttrice);
- $k_a$  è il rapporto tra l'area misurata del martinetto in contatto con la muratura e l'area media del taglio (costante adimensionale);
- $p$  è la pressione nel martinetto richiesta per riportare la distanza tra le basi di misura alla distanza iniziale a meno della tolleranza richiesta, espressa in bar.

### 2.3.3 Strumentazione di prova

È richiesta la seguente strumentazione di prova:

1. *Attrezzatura per eseguire il taglio*: può essere un trapano a basso numero di giri, in modo da tagliare materiali soffici come la malta, nei giunti regolari, o una sega circolare con disco eccentrico nel caso in cui il taglio venga eseguito in murature di pietra a giunti irregolari.
2. *Aspirapolvere*, spazzole ed altri utensili per pulire il taglio e rimuovere eventuali detriti.
3. *Martinetto piatto*

3.1 Il martinetto piatto di metallo (finora il più usato) è costituito da un foglio di lamiera piegato a tasca e saldato su tre lati, che può essere pressurizzato con olio, o altri fluidi idraulici previsti dal produttore della strumentazione, con un sistema di tubi per l'ingresso e l'uscita del fluido. Il martinetto piatto deve avere uno spessore tale da poter essere inserito nel taglio o in un giunto di malta ripulito. Il martinetto può avere varie forme compatibili con la muratura che deve essere provata. In Figura 9 sono presentate le forme tipiche dei martinetti.

3.2. Per la determinazione dello stato di compressione, la dimensione A dovrebbe essere uguale o maggiore della dimensione di un mattone di fascia, ma non meno di 200 mm. La dimensione B dovrebbe essere uguale o maggiore della dimensione di una testa del mattone e comunque non inferiore a 75 mm. Se i martinetti hanno una parte circolare, il raggio R di questa parte deve essere uguale a quello della sega circolare utilizzata per il taglio.

3.3. Il martinetto deve essere in grado di sopportare una pressione interna maggiore della massima pressione di operazione, che può anche raggiungere i (6.0 - 6.9) N/mm<sup>2</sup> (rispettivamente secondo le raccomandazioni RILEM [27] o ASTM [26]). Nel caso di uso dei martinetti di metallo, questi devono essere fatti con lamiere aventi spessore costante compreso tra 0.6 mm e 1.2 mm con saldatura sul contorno e tubi di ingresso dell'olio ed uscita di aria in eccesso.

3.4. I martinetti piatti devono essere tutti tarati come descritto nella sezione 7 per determinare le loro caratteristiche di corrispondenza: pressione - carico applicato.

3.5. Per compensare eventuali irregolarità delle superfici di taglio al martinetto piatto possono essere aggiunti spessori in acciaio da inserire sopra o sotto il martinetto. La descrizione delle tipologie di spessori da utilizzare e il loro uso sono descritti nell'Appendice A di ASTM [26]. L'inserimento degli spessori protegge anche le superfici del martinetto da danni dovuti a vuoti o a superfici ruvide ed impedisce un eccessivo rigonfiamento del martinetto.

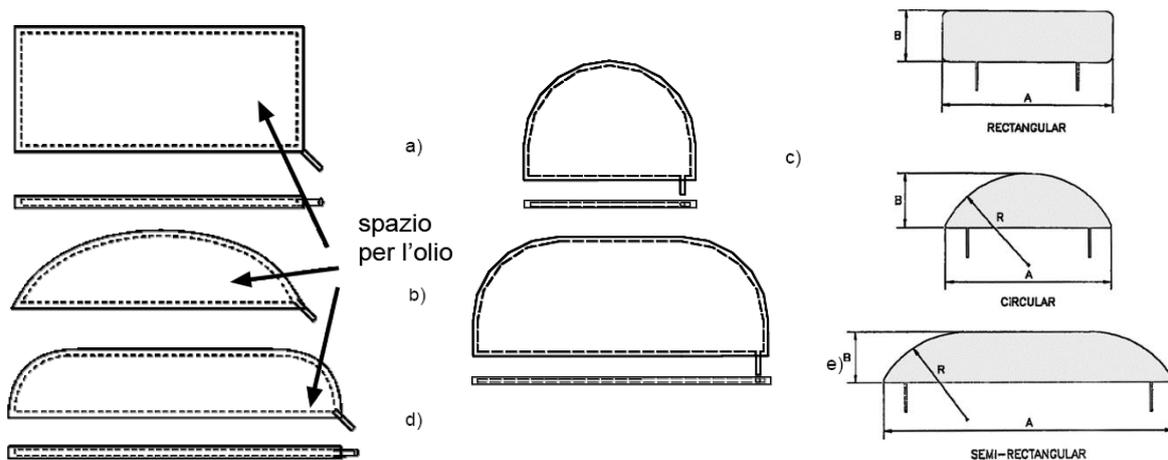


Figura 9: Forme di martinetto più diffuse.

4. *Sistema idraulico.* È richiesta una pompa idraulica elettrica o manuale con tubi di connessione flessibili e ad alta pressione che possano essere collegati con il sistema di ingresso del martinetto. La pressione deve essere misurata con un manometro o trasduttore di pressione, posto in uscita, opportunamente tarato, in modo che abbia un'accuratezza dell'1% del fondo scala. Il sistema idraulico deve essere in grado di mantenere una pressione costante entro l'1% dell'intera scala per almeno 5 min.

5. *Misura degli spostamenti.* La misura degli spostamenti viene eseguita mediante un estensimetro removibile che misura la distanza tra punti fissati mediante basette applicate come mostra la Figura 10. Lo strumento utilizzato deve essere in grado di misurare spostamenti fino ad almeno 5 mm. Le misure di spostamento devono avere un'accuratezza di almeno  $\pm 0.005\%$  della lunghezza della base di misura (per una base di misura di 200 mm l'accuratezza è di 0.01 mm ovvero 10  $\mu\text{m}$ ).

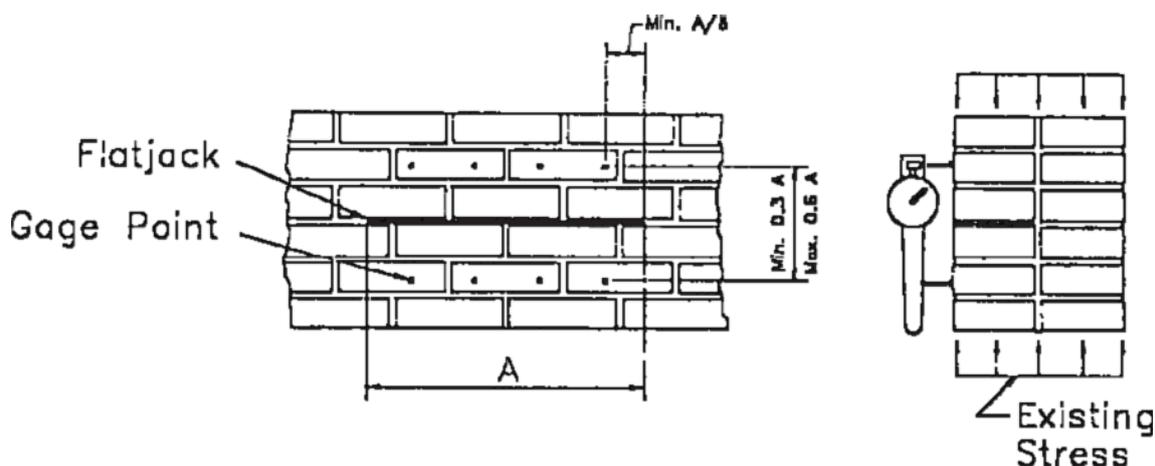


Figura 10: Configurazione di prova per la misura in situ dello stato di tensione locale.

6. *Basi di misura.* Per realizzare le basi di misura si devono usare piastrine di metallo. Si attaccano rigidamente (usando un adesivo rigido) le piastrine alla muratura, in numero di quattro sopra e sotto il taglio, in modo da prevenire movimenti. Le piastrine devono avere una depressione conica al centro compatibile con le punte di fissaggio dello strumento di misura. Gli angoli della depressione conica e delle punte dello strumento devono essere gli stessi.

7. *Taratura del martinetto.* Un martinetto piatto ha una propria rigidità che si oppone all'espansione quando il martinetto viene messo in pressione; essa è dovuta alla resistenza del metallo alla flessione, in modo particolare sui bordi, ed all'azione di diaframma nell'acciaio quando si espande. Perciò la pressione del fluido nel martinetto è maggiore della tensione che il martinetto esercita sulla muratura. Pertanto, il martinetto deve essere tarato per ottenere un fattore di conversione  $k_m$  che correli la pressione interna del fluido con la tensione applicata alla muratura.

Il martinetto deve essere tarato in una macchina di prova di compressione della capacità di almeno 450 kN (da [26] 7.2). Se la piastra della macchina non è sufficientemente grande, si dispone una piastra di acciaio spessa 50 mm sulla testa inferiore della macchina; la dimensione della piastra deve essere tale da coprire il martinetto che sarà tarato. Si posiziona il martinetto sulla piastra inferiore in modo tale che il bordo del martinetto in cui vi sono l'ingresso e l'uscita del fluido sia coincidente con il bordo della piastra di supporto. Si posizionano gli spessori di metallo intorno agli altri bordi del martinetto. Si inserisce una piastra dello spessore di 50 mm sul martinetto e sugli spessori. Si posiziona l'insieme piastra/martinetto/spessori sulla piastra inferiore della macchina in modo che il baricentro del martinetto sia posto entro 6 mm sull'asse di prova della macchina. Il set up di prova della taratura è indicato in Figura 11.

Muovere la testa della macchina fino a toccare la parte non mobile. Applicare un pre-carico equivalente a  $0.07 \text{ N/mm}^2$  sufficiente a produrre il contatto completo tra la piastra portante e gli spessori. La distanza tra le piastre deve essere mantenuta costante durante la procedura di taratura. A questo punto fissare gli spostamenti della macchina se si esegue la taratura in controllo di spostamento. Se questo non avviene, attaccare strumenti di misura meccanici o elettrici in modo da essere certi che la distanza tra i piatti della macchina rimanga costante, se si usa il controllo di carico.

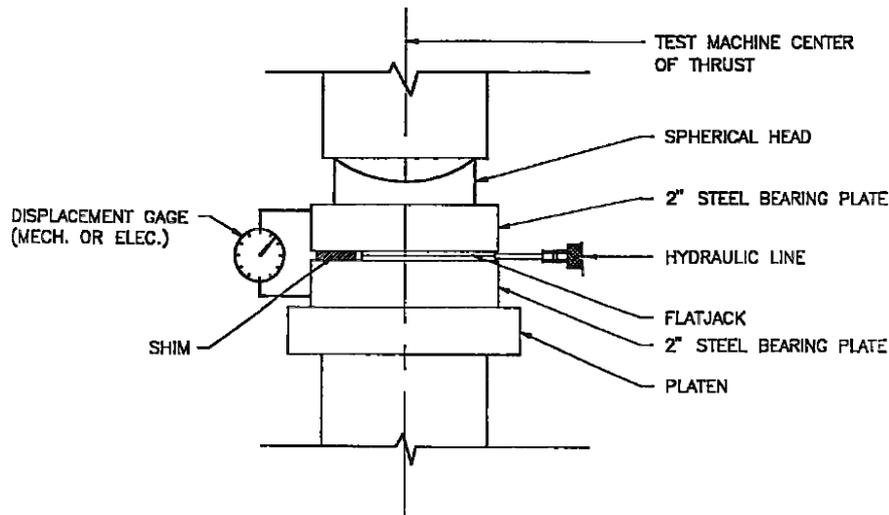


Figura 11: Configurazione del sistema di taratura del martinetto.

Mettere in pressione e scaricare il martinetto per tre cicli con una pressione massima nel martinetto non oltre i  $7 \text{ N/mm}^2$  controllando che la compressione esercitata dalla macchina sul martinetto non superi  $7 \text{ N/mm}^2$  sull'area totale del martinetto.

Aumentare la pressione nel martinetto con un incremento di  $0.5 \text{ N/mm}^2$  fino a  $7 \text{ N/mm}^2$  mantenendo costante la distanza tra le piastre. Ad ogni incremento memorizzare sia la pressione del martinetto, sia la forza misurata dalla macchina.

Calcolare la forza esercitata dal martinetto come prodotto tra la sua pressione interna e la sua sezione lorda. Riportare in un diagramma (Figura 12) i valori della forza esercitata dal martinetto (kN) in ascissa e la forza misurata dalla macchina in kN in ordinata. Il coefficiente angolare della retta ottenuta rappresenta la costante del martinetto, cioè il fattore di conversione o costante di rigidità:  $k_m$ .

Controllare la taratura del martinetto dopo averlo usato cinque volte o quando appare visibilmente deformato dopo l'uso.

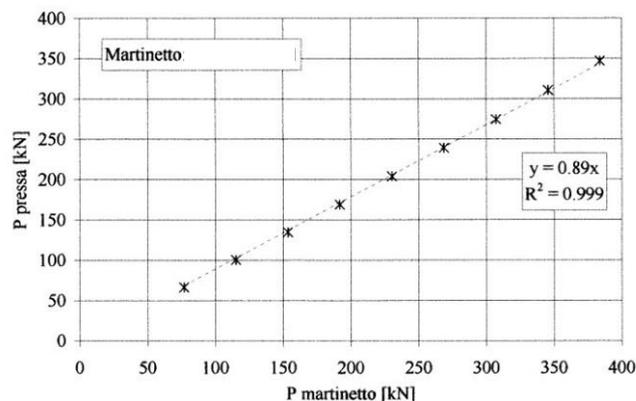


Figura 12: Esempio di curve di taratura di martinetti piatti di forma rettangolare

### 2.3.4 Preparazione dell'elemento da testare

Per la muratura di mattoni o per murature con giunti regolari, il taglio può essere eseguito in corrispondenza di un giunto di malta, con un trapano a basso numero di giri, ripulendo il giunto tagliato con la rimozione di tutta la malta e la polvere in modo che il martinetto sia direttamente a contatto con le superfici del taglio.

La geometria del taglio deve essere simile a quella del martinetto in uso. La lunghezza del taglio preparato non deve superare quella del martinetto piatto di oltre  $12 \text{ mm}$  ([26], §6.2).

Nel caso di muratura in pietra irregolare il taglio si deve eseguire anche nella pietra in modo che sia perfettamente orizzontale (Figura 13). In tal caso l'attrezzatura usata per il taglio sarà una sega circolare con disco diamantato (Figura 14); successivamente dovrà essere ripulito il taglio. In questo secondo caso il martinetto sarà del tipo b), c), d) oppure e) di Figura 9. Si può utilizzare la stessa attrezzatura anche nel caso di muratura di mattoni, in quanto il taglio sarà meglio eseguito.

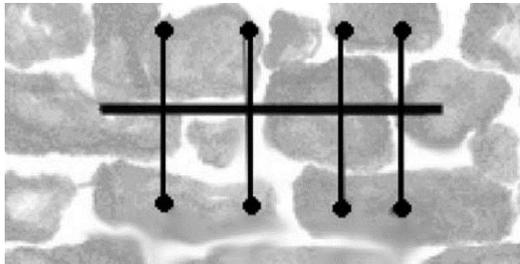


Figura 13. Esempio di localizzazione del taglio in murature in pietra con tessitura irregolare.

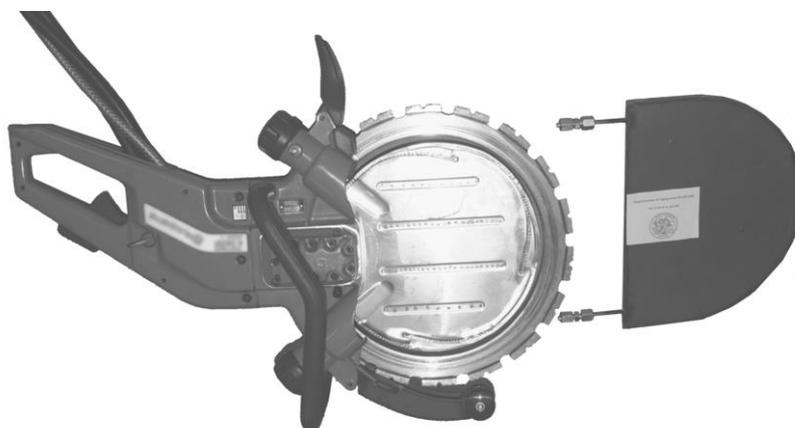


Figura 14. Strumentazione per il taglio della muratura

### 2.3.5 Procedura di prova e misurazioni da effettuare

La sequenza della prova avviene secondo i passi descritti in Figura 15:

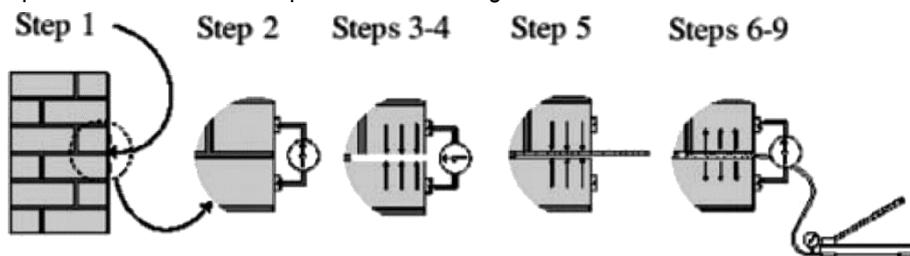


Figura 15. Sequenza di prova.

1. Scegliere una zona di muratura che sia sufficientemente rappresentativa e collocare la zona nella quale si vuole misurare la tensione (di solito si sceglie la zona che si suppone maggiormente sollecitata anche dopo aver eseguito analisi e calcoli). La locazione del taglio dovrebbe essere distante almeno 1 volta e mezzo la lunghezza del martinetto dalla fine del muro o da un'apertura. Collocare i punti di misura e incollare le basette in metallo, dopo aver localizzato la posizione del taglio, sopra e sotto il taglio stesso e, il più possibile, equidistanti da esso. Si raccomandano 4 punti di misura (Figura 16). La minima lunghezza verticale  $L$  tra i punti di misura dovrebbe essere 0.3 volte la lunghezza  $A$  del martinetto, la

massima uguale a 0.6 volte A. Il primo e l'ultimo punto di misura dovrebbero essere collocati ad una distanza dagli estremi del taglio pari a non meno di A/8 volte verso l'interno.

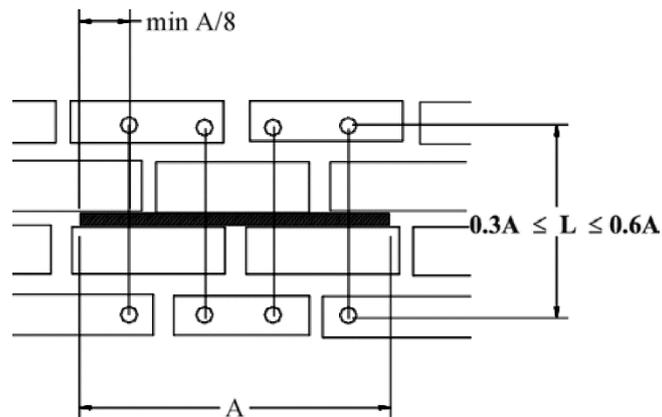


Figura 16. Geometria di prova.

2. Quando la colla delle basette ha fatto presa si inizia a prendere la misura iniziale di riferimento delle distanze con l'estensimetro removibile.
3. Si esegue il taglio cercando di non disturbare la muratura circostante.
4. Dopo il taglio e la pulitura si prende la seconda misura nei quattro punti di riferimento e si calcola così per differenza il valore della chiusura del taglio.
5. Contemporaneamente si calcola l'area A del taglio, misurando la larghezza e la profondità in vari punti, ogni (10-20) mm.
6. Si inserisce il martinetto ed eventualmente si inseriscono anche gli spessori in modo da regolarizzare i vuoti e le irregolarità interne.
7. Per assestare il sistema del martinetto e degli spessori si applica una prima pressione pari a il (20 ÷ 25) % della pressione stimata per raggiungere il presunto valore di tensione e poi si scarica.
8. La pressione si applica da zero ad incrementi di circa 1/8 della pressione attesa, oppure ad incrementi regolari pari a (0.5 ÷ 1.0) bar e si memorizza lo spostamento misurato.
9. Continuare a pressurizzare fino a che le letture misurate ritornano ad essere pari ai valori inizialmente letti prima del taglio sulla muratura.

A questo punto è registrato il valore della pressione (p) necessaria a ristabilire le condizioni geometriche esistenti prima del taglio. È raccomandato che la prova sia condotta quanto prima dopo la formazione del taglio, dopo che le misure degli spostamenti sono stabili. Il tempo impiegato per raggiungere il valore di ripristino dovrebbe essere circa uguale al tempo di esecuzione del taglio e della preparazione della prova dopo che le misure degli spostamenti erano stabili. Questo significherebbe che le deformazioni viscosi eventuali sono simmetriche e si sono equilibrate.

10. *Osservazioni sulle misure degli spostamenti.*

Poiché ci possono essere effetti locali che influenzano la misura di ciascuna delle basi, è lecito scartare una base la cui misura sia molto diversa dalle altre. In questo caso dovrà essere valutato, per ciascuna base, il rapporto  $\alpha$  tra la deviazione "a ripristino" della base (ovvero la differenza tra la misura della base alla pressione di ripristino e la misura della base iniziale prima del taglio) e la deviazione iniziale di ciascuna base (ovvero la differenza tra la misura della base dopo aver effettuato il taglio e quella iniziale prima del taglio). Se per una base di misura il sopracitato rapporto è maggiore del 20% nel caso di murature a tessitura regolare (come ad esempio mattoni pieni, murature di tufo, etc...) o del 25% nel caso di murature con tessitura irregolare, i risultati di quella base deformometrica potranno essere scartati dall'interpretazione

della prova. Se il rapporto  $\alpha$  è superiore al 20% (o 25% per murature a tessitura irregolare) per tre basi di misura è consigliabile ritenere la prova come non valida<sup>2</sup>.

Inoltre, è consigliabile che la deviazione a ripristino media delle basi sia minore del massimo tra:  $\pm 0.015$  mm o  $\pm 1/20$  esimo della deviazione massima iniziale (ovvero della base che si è spostata di più dopo il taglio). Se questo limite non è rispettato è consigliabile considerare la prova come non valida.

11. Si possono ripetere i passi 8 e 9, dopo aver ridotto la pressione a zero in modo da controllare la pressione finale nel martinetto.

12. Scaricare e rimuovere delicatamente il martinetto e chiudere il taglio con una malta appropriata che non si ritiri.

### 2.3.6 Metodo di calcolo

Il valore della tensione di compressione che presumibilmente esisteva nella muratura prima del taglio è ottenuto dalla relazione:

$$\sigma = p \cdot k_m \cdot k_a$$

dove:

- $\sigma$  è il valore della tensione ripristinata, espressa in MPa o in N/mm<sup>2</sup>, definita anche come  $\sigma_{\text{situ}}$ ;
- $k_m$  è una costante adimensionale che riflette le proprietà geometriche e di rigidità del martinetto come determinato nella sezione 7;
- $k_a$  è il rapporto tra l'area misurata del martinetto (in contatto con la muratura) e l'area media del taglio (costante adimensionale). Indicazioni per trovare l'area misurata del martinetto in contatto con la muratura sono riportate nei seguenti riferimenti scientifici: [44] e [45];
- $p$  è la pressione richiesta per riportare la distanza tra le basi di misura alla distanza iniziale a meno della tolleranza richiesta, espressa in bar.

Le due costanti sono di solito minori di 1.

### 2.3.7 Resoconto di prova

Il resoconto di prova deve contenere le seguenti informazioni:

- a) riferimento allo standard;
- b) una descrizione del sito, dell'edificio e della muratura insieme ad altre importanti informazioni, come le condizioni ambientali, le caratteristiche dei mattoni o delle pietre e della malta, la presenza di umidità per risalita capillare;
- c) disegni e foto della tessitura muraria, della posizione delle basi di misura e la data di costruzione della muratura se è nota;
- d) la data della prova e il nome del tecnico che ha condotto la prova;
- e) descrizione della strumentazione utilizzata e delle proprie caratteristiche (martinetto utilizzato, sistema idraulico, uso di spessori e zeppe, e altre informazioni pertinenti). Descrizione della modalità di prova;
- f) tabelle contenenti i valori delle misure ai vari livelli di pressione ed il valore della pressione che ha portato all'annullamento dello spostamento dopo il taglio a meno delle tolleranze consentite;

---

<sup>2</sup> Affermazione valida se le basi di misura totali sono 4, come raccomandato in questo protocollo. Se le basi di misura sono tre, se il rapporto  $\alpha$  è superiore al 20% (o 25% per murature a tessitura irregolare) per due basi di misura è consigliabile ritenere la prova come non valida.

- g) il valore della costante di taratura del martinetto  $k_m$  e della costante  $k_a$  tra l'area misurata del martinetto in contatto con la muratura e l'area media del taglio;
- h) i valori dello stato di tensione calcolato.

### 2.3.8 Note sull'interpretazione dei risultati

Nel seguito verranno riportati alcuni commenti, osservazioni e suggerimenti sulla metodologia di prova, con particolare riferimento al caso delle murature deboli o con morfologie irregolari.

#### 1. Muratura irregolare

L'attendibilità nella determinazione di un valore della pressione di equilibrio è il requisito di prova fondamentale, indipendentemente dalle particolarità di ogni singola applicazione. Informazioni contrastanti, riguardanti l'interpretazione degli effetti di concentrazioni di tensioni e/o deformazioni anelastiche oppure la presenza di un livello di sollecitazione molto basso (per esempio in edifici di uno o due piani), richiedono una componente significativa di giudizio soggettivo, che può compromettere l'attendibilità dell'intera procedura [30], [32], [33].

A causa della disomogeneità della muratura e dell'operazione stessa, durante e dopo l'esecuzione del taglio si possono verificare distribuzioni non costanti dello stato di tensione. Al termine della fase di taglio, i valori di spostamento, misurati nei punti di riferimento, non sono costanti, ma tendono ad essere maggiori al centro del taglio a causa della redistribuzione dello stato di tensione. In Figura 17, sono schematizzate tre potenziali geometrie delle deformazioni assunte dai lembi del taglio. Ci sarà quindi una concentrazione di tensioni di trazione al centro del taglio con possibilità di fessurazioni o spostamenti rigidi nel caso di materiali deboli o già compromessi, mentre valori più elevati di compressione saranno alle estremità.

In Figura 18 è rappresentato il legame tra tensioni e spostamenti in corrispondenza della mezzeria, durante lo scarico ed il successivo ricarico. Nel caso di fessurazione per inflessione del lembo di taglio superiore (Figura 17c) e/o di conseguenti movimenti rigidi, si ha una variazione nell'andamento del legame tensioni-spostamenti indicato in Figura 19.

Alle estremità del taglio, invece, si incrementa lo stato di compressione dopo l'esecuzione del taglio.

In generale, le misure fornite dalle quattro basi poste a cavallo del taglio non danno mai tutte lo stesso valore e non sempre il ripristino della distanza originaria avviene contemporaneamente sulle 4 basi, cioè per lo stesso valore di sollecitazione applicato dal martinetto [32].

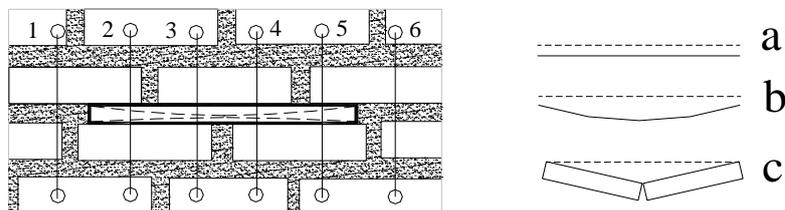


Figura 17. Deformazione dei lati del taglio [50].

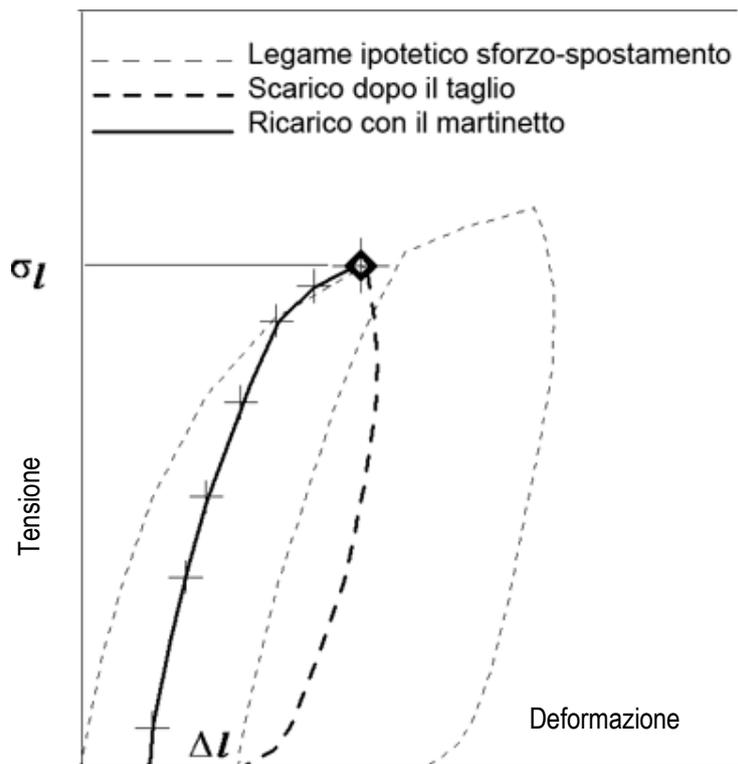


Figura 18. Andamento del legame tensione-spostamento all'esecuzione del taglio (scarico) e della prova con ricostruzione dello stato di tensione esistente.

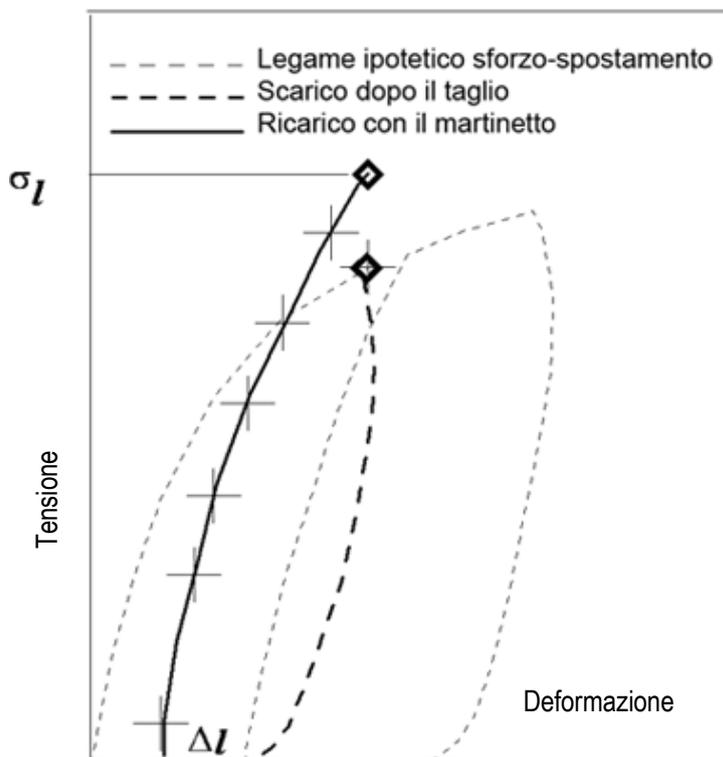


Figura 19. Andamento del legame tensione-spostamento all'esecuzione del taglio (scarico della muratura) e della prova, nel caso di formazione di cerniere o spostamenti rigidi.

## 2. Bassi valori di tensione

Nel caso di edifici ad uno o due piani, lo stato di tensione in generale è molto basso (da meno di 0.1 a 0.15 N/mm<sup>2</sup>).

In tal caso, le imprecisioni di misura, la sensibilità della strumentazione e le problematiche insite nella modalità di prova, possono facilmente raggiungere l'entità dello stato di tensione reale. Ciò implica che la prova può essere significativa solo se lo stato di tensione misurato è rilevantemente minore della probabile capacità portante dell'elemento e maggiore del probabile intervallo di precisione della prova.

### 3. Murature a più paramenti

La tensione è applicata come pressione sulla superficie di contatto del martinetto piatto sulla muratura. Si deve sottolineare che i risultati della prova con martinetto piatto in caso di murature a più paramenti sono solo relativi al paramento esterno, dove viene localizzata la prova. Pertanto, non si hanno informazioni sulla distribuzione negli strati più interni, a meno di eseguire la prova in profondità con lo smontaggio degli strati esterni.

### 4. Murature soggette a carichi eccentrici

Possono essere eseguite prove con i martinetti piatti singoli su due facce opposte e corrispondenti della muratura. Se i valori misurati sono significativamente diversi, può essere calcolata la distribuzione della tensione dovuta a carichi eccentrici.

Dopo il taglio, se la distanza tra i punti di riferimento dovesse aumentare, può essere ragionevolmente supposto uno stato di tensione locale di trazione; in tal caso è opportuno ripristinare al più presto la continuità muraria. La presenza di fessure o movimenti delle pietre, dovrebbe comunque sconsigliare preventivamente l'esecuzione delle prove in tali localizzazioni. Una tecnica di misura dell'eccentricità, agendo solo da un lato della muratura, è riportata in [4].

## 2.3.9 Bibliografia

### Normative e raccomandazioni

- [26] ASTM C1196-14, 'Standard test method for in-situ compressive stress within solid unit masonry - Estimated using flat-jack measurements'.
- [27] RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, LUM.D.2 'In-situ stress tests based on the flat jack' (E & F Spon, London, 1994) 503-508.

### Riferimenti scientifici

- [28] Rossi, P.P., 'Analysis of mechanical characteristics of brick masonry tested by means of non-destructive in-situ tests', Paper presented at the 6th International Brick Masonry Conference, Rome, 1982.
- [29] Sacchi Landriani, G. and Taliercio, A., 'Numerical analysis of the flat jack test on masonry walls', *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 5(3) (1986).
- [30] Noland, J.L., Atkinson, R.H. and Schuller, M.P., 'A review of the flat-jack method for nondestructive evaluation', *Proceedings of Non-destructive Evaluation of Civil Structures and Materials*, Colorado, October 1990.
- [31] ASTM C1196-91, 'Standard test method for in-situ compressive stress within solid unit masonry - Estimated using flatjack measurements'.
- [32] RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, LUM.D.2 'In-situ stress tests based on the flat jack' (E & F Spon, London, 1994) 503-508.
- [33] Hughes, T.G., and Pritchard, R., 'An investigation of the significance of flatjack flexibility in the determination of insitu stresses', *Proc. 10th Intl. Brick-Block Mas. Conf.*, Vol. 2., 1994, 569-578.
- [34] Building Research Establishment, Digest 409 - 'Masonry and concrete structures: Measuring in-situ strength and elasticità using flat jacks' (1995).

- [35] de Vekey, R.C., 'Thin stainless steel flat-jacks: calibration and trials for measurement of in-situ stress and elasticity of masonry', Proc 7th Canadian Masonry Symposium, Hamilton, Vol. 2 (1995) 1174-1183.
- [36] de Vekey, R.C., 'Measurement of horizontal compressive stress in masonry using flat jacks', Acta Polytechnica 36 (2) (1996) 117-126.
- [37] de Vekey, R.C., 'Measurement of stress in Sandstone blockwork using flat jacks', J. of Brit. Mas. Soc. 11 (2) (1997) 56-59. Presented at BMS meeting, Stoke on Trent, UK, 11/1996, BRE PD 248/96.
- [38] Binda, L., Tiraboschi, C., 'Flat-Jack Test as a Slightly Destructive Technique for the Diagnosis of Brick and Stone Masonry Structures', Int. Journal for Restoration of Buildings and Monuments, Int. Zeitschrift fur Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, Zurich, pp. 449-472, 1999.
- [39] Binda, L., Tiraboschi, C., Flat-Jack method applied to historic masonries Proc. Int. RILEM Workshop On Site Control and Non-Destructive Evaluation of Masonry Structures, 13-14/11/2001, Mantova, Italy, Binda L., de Vekey R.C. (Eds.), pp. 179-190, 2003.
- [40] Binda, L., Cantini, L., Cardani, G., Saisi, A., Tiraboschi, C., Use of Flat-Jack and Sonic Tests for the Qualification of Historic Masonry, 10th Tenth North American Masonry Conference (10NAMC), St. Louis, Missouri, 3-6/06/07, Session 6C, CD-ROM, pp. 791-803, 2007.
- [41] Ronca, P., 'The Significance of the Gauging System in the Flatjack In-Situ Stress Test for Masonry: Experimental Investigation' The Masonry Society Journal, Vol 14, No. 1, August 1996.
- [42] Schuller, M., 'Flatjack Methods for Diagnosis of Modern Masonry' Proceedings, On-Site Control and Evaluation of Masonry Structures, Binda, L., deVekey, R., editors, RILEM, 2001.
- [43] Coombs J., Tanner J.E., 'Development of Laboratories for Masonry Testing and Non-Destructive Evaluation' The Masonry Society Journal, Vol 26, No. 2, 2008, pp. 9-20.
- [44] Parivallal S., Kesavan K., Ravisankar K., Arun Sundram B. and Farvaze Ahmed A. K., 'Evaluation of in-situ stress in masonry structures by flat jack technique', Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation, NDE 2011, December 8-10, 2011.
- [45] Gregorczy P., Lourenço P. B., 'A Review on Flat-Jack Testing', Engineering Civil, UM, No.9, 2000, pp. 39-50.

#### **Riferimenti scientifici per l'interpretazione dei risultati**

- [46] ASTM C 1196-14, 'Standard test method for in-situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat-jack measurements', American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 1997.
- [47] Ronca, P., 'New developments on the mechanical interpretation of the in-situ flat jack test', National Congress 'La Meccanica delle Murature tra Teoria e Progetto', University of Messina, Italy, 18/20 Sept. 1996, 135-143.
- [48] Rossi, P.P., 'Analysis of mechanical characteristic of brick masonry tested by means of in-situ tests', 6th IBMaC, Rome, Italy, 1982.
- [49] de Vekey, R.C., 'Measurement of load eccentricity using flat jacks', Proc. Brit. Mas. Soc. (9) (Proc. 6th IMC) Vol. 1 (2002) 79-85.
- [50] Binda, L., Tiraboschi, C., 'Flat-Jack Test as a Slightly Destructive Technique for the Diagnosis of Brick and Stone Masonry Structures', Int. Journal for Restoration of Buildings and Monuments, Int. Zeitschrift fur Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, Zurich, pp. 449-472, 1999.
- [51] Binda, L., Tiraboschi, C., Flat-Jack method applied to historic masonries Proc. Int. RILEM Workshop On Site Control and Non-Destructive Evaluation of Masonry Structures, 13-14/11/2001, Mantova, Italy, Binda L., de Vekey R.C. (Eds.), pp. 179-190, 2003.

## 2.4 PROVA CON MARTINETTO PIATTO DOPPIO (MP-d)

### 2.4.1 Definizione della tecnica di indagine

Questo metodo di prova descrive un procedimento in situ per determinare le proprietà di deformabilità di porzioni locali di murature non rinforzate esistenti e, se la prova è svolta fino al collasso, ossia fino ad ottenere una fase di post-picco, una stima della resistenza a compressione della muratura ( $f_c$ ).

Le seguenti prescrizioni specificano un metodo per determinare in situ il legame locale tensione-deformazione (in campo elastico) in funzione della tensione. La prova viene eseguita utilizzando martinetti piatti, contrastati nell'applicazione dello sforzo ad un limitato volume murario dall'intera massa muraria sovrastante.

Nel seguito, verranno fornite specifiche indicazioni sui principi della prova, sulla preparazione della muratura sottoposta alla prova, sulla strumentazione di prova, sul metodo di prova, sul metodo di calcolo e i contenuti del rapporto finale.

La tecnica di prova è basata sull'uso contemporaneo di due martinetti piatti, collegati ad una pompa idraulica, per comprimere il volume di muratura compreso tra essi.

La muratura sovrastante e sottostante funge da contrasto alla reazione esercitata dai martinetti stessi.

I martinetti piatti vanno tarati secondo le specifiche descritte nella sezione 7 del presente report.

Dato che il volume di muratura testato non è isolato sui lati e rimane fisicamente legato al resto della muratura, permane una certa incertezza nell'interpretazione dei dati della prova dovuta all'effetto di confinamento laterale della muratura.

Nelle murature a più paramenti, le misure sono da ascriversi esclusivamente alle porzioni di muratura provate, cioè alle murature del paramento esterno, non alle altre che possono essere anche composte diversamente.

I valori del modulo elastico e del coefficiente di dilatazione trasversale calcolati con questa tecnica, insieme ai valori di deformazione misurati e calcolati, sono probabilmente sufficientemente attendibili per effettuare una stima delle tensioni dovute a dilatazioni, movimenti o movimenti differenziali di strutture murarie.

### 2.4.2 Simbologia adottata

La simbologia adottata è la seguente:

- $\sigma$  è il valore della tensione sulla muratura, espressa in MPa o in N/mm<sup>2</sup>;
- $k_m$  è una costante adimensionale che rappresenta le proprietà geometriche e di rigidità del martinetto determinate come descritto nella sezione 7 (di solito viene riportata nel certificato di taratura del martinetto, fornito dall'azienda produttrice);
- $k_a$  è il rapporto tra l'area misurata del martinetto (in contatto con la muratura) e l'area media del taglio;
- $p$  è la pressione sul martinetto espressa in bar;
- $E_{ti}$  è il modulo elastico tangente;
- $\delta\sigma_i$  è l'incremento di tensione, espresso in MPa o in N/mm<sup>2</sup>;
- $\delta\varepsilon_{v,i}$  è il corrispondente incremento di deformazione verticale media;
- $E_s$  è il chord modulus o modulo elastico secante (MPa o in N/mm<sup>2</sup>), calcolato tra due punti della curva deformazione-tensione;
- $\Delta\sigma$  è l'incremento di tensione, espresso in MPa o in N/mm<sup>2</sup>, tra due punti della curva deformazione-tensione;
- $\Delta\varepsilon_v$  è il corrispondente incremento di deformazione verticale media;
- $\sigma_i$  è il valore di tensione al generico punto  $i$  della curva;
- $\varepsilon_{v,i}$  è il corrispondente valore di deformazione verticale media;

- $\sigma_{inf}$  è limite inferiore della tensione verticale agente sul pannello per la quale si visualizzano le prime deformazioni verticali;
- $\varepsilon_{v,inf}$  è il corrispondente valore di deformazione verticale media;
- $\sigma_{sup}$  è la tensione verticale agente sul pannello pari ad 1/3 della tensione massima raggiunta durante la prova;
- $\varepsilon_{v,sup}$  è il corrispondente valore di deformazione verticale media;
- $v_i$  è il coefficiente di dilatazione trasversale;
- $\delta\varepsilon_{hi}$  è l'incremento di deformazione trasversale.

### 2.4.3 Strumentazione di prova

È richiesta la seguente strumentazione di prova:

1. *Attrezzatura per eseguire il taglio*: può essere un trapano a basso numero di giri, in modo da tagliare materiali soffici come la malta, nei giunti regolari, o una sega circolare con disco eccentrico nel caso in cui il taglio venga eseguito in murature di pietra a giunti irregolari.

2. *Aspirapolvere*, spazzole ed altri utensili per pulire il taglio e rimuovere eventuali detriti.

3. *Martinetto piatto*

3.1 Il martinetto piatto di metallo (finora il più usato) è costituito da un foglio di lamiera piegato a tasca e saldato su tre lati, che può essere gonfiato con olio a pressione (o altri fluidi previsti dal produttore della strumentazione) con un sistema di tubi per l'ingresso e l'uscita del fluido. Il martinetto piatto deve avere uno spessore tale da poter essere inserito nel taglio o in un giunto di malta ripulito. Il martinetto può avere varie forme compatibili con la muratura che deve essere provata. In Figura 20 sono presentate le forme tipiche dei martinetti.

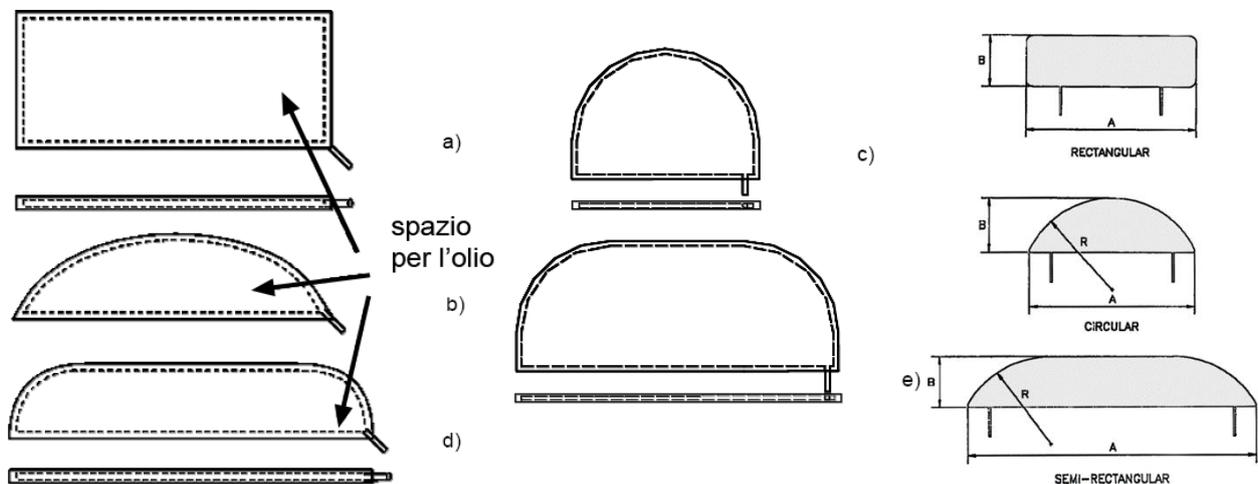


Figura 20. Forme di martinetto più diffuse.

3.2. Per la determinazione dello stato di compressione e della deformabilità della muratura, la dimensione A del martinetto dovrebbe essere uguale o maggiore della dimensione di un mattone di fascia, ma non meno di 200 mm. La dimensione B deve essere uguale o maggiore della dimensione di una testa del mattone e comunque non inferiore a 75 mm. Se i martinetti hanno una parte circolare, il raggio R di questa parte deve essere uguale a quello della sega circolare utilizzata per il taglio.

3.3. Il martinetto deve essere in grado di sopportare una pressione interna maggiore della massima pressione di operazione, che può anche raggiungere i (6.0 - 6.9) N/mm<sup>2</sup> (rispettivamente secondo le raccomandazioni RILEM [53] o

ASTM [52]). Nel caso di uso dei martinetti di metallo, questi devono essere fatti con lamiere aventi spessore costante compreso tra 0.6 mm e 1.2 mm con saldatura sul contorno e tubi di ingresso dell'olio ed uscita di aria in eccesso.

3.4. I martinetti piatti devono essere tutti tarati come descritto nella sezione 7 per determinare le loro caratteristiche di corrispondenza: pressione - carico applicato.

3.5. Per compensare eventuali irregolarità delle superfici di taglio al martinetto piatto possono essere aggiunti spessori in acciaio da inserire nel taglio sopra o sotto il martinetto stesso. La descrizione delle tipologie di spessori da utilizzare e il loro uso sono descritti nell'Appendice A di ASTM [52]. L'inserimento degli spessori protegge le superfici del martinetto da danni dovuti a vuoti o a superfici ruvide ed impedisce un eccessivo rigonfiamento del martinetto.

4. *Sistema idraulico.* È richiesta una pompa idraulica elettrica o manuale con tubi di connessione flessibili e ad alta pressione che possano essere collegati con il sistema di ingresso del martinetto. La pressione deve essere misurata con un manometro o trasduttore di pressione, posto in uscita, opportunamente tarato, in modo che abbia un'accuratezza dell'1% del fondo scala. Il sistema idraulico deve essere in grado di mantenere una pressione costante entro l'1% dell'intera scala per almeno 5 min.

5. *Misura degli spostamenti.* La misura degli spostamenti viene eseguita mediante estensimetro meccanico removibile che misura la distanza tra punti fissati mediante basette applicate come mostra la Figura 21 oppure con trasduttori di spostamento installati sulla superficie esterna della muratura compresa tra i due martinetti (Figura 22), (4 punti di misura in verticale, 1 punto in orizzontale). Lo strumento utilizzato deve essere in grado di misurare spostamenti fino ad almeno 5 mm. Le misure di spostamento devono avere un'accuratezza di almeno  $\pm 0.005\%$  della lunghezza della base di misura (per una base di misura di 200 mm l'accuratezza è di 0.01 mm ovvero 10  $\mu\text{m}$ ).

6. *Fissaggio della strumentazione di misura.* La strumentazione di misura deve essere fissata rigidamente per impedire movimenti e garantire l'accuratezza di misura richiesta. Per fissare piastrine nel caso di misure manuali, usare un adesivo rigido, e sistemi di fissaggio meccanico o paste cementizie per sistemi automatici.

Le piastrine per misure manuali devono avere una depressione conica al centro compatibile con le punte di fissaggio dello strumento di misura. Gli angoli della depressione conica e delle punte dello strumento devono essere gli stessi.

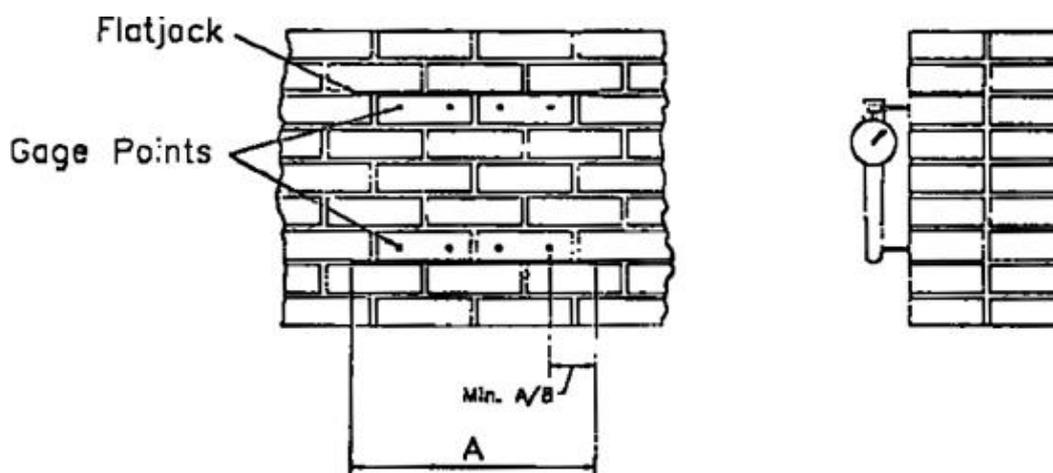


Figura 21. Configurazione delle basi di misura per estensimetri removibili.

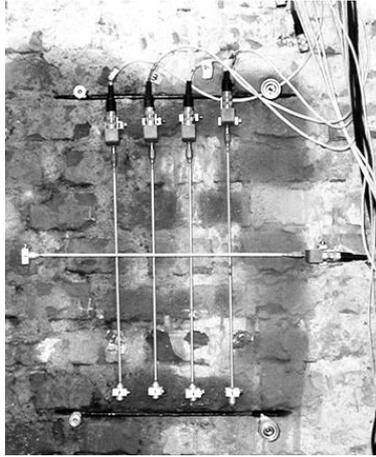


Figura 22. Configurazione della strumentazione di acquisizione automatica.

7. *Taratura del martinetto.* Un martinetto piatto ha una propria rigidità che si oppone all'espansione quando il martinetto viene messo in pressione; essa è dovuta alla resistenza del metallo alla flessione, in modo particolare sui bordi ed all'azione di diaframma nell'acciaio quando si espande. Perciò la pressione del fluido nel martinetto è maggiore della tensione che il martinetto esercita sulla muratura. Pertanto, il martinetto deve essere tarato per ottenere un fattore di conversione  $k_m$  che correli la pressione interna del fluido con la tensione applicata alla muratura.

Il martinetto deve essere tarato in una macchina di prova di compressione della capacità di almeno 450 kN.

Se la piastra della macchina non è sufficientemente grande, si dispone una piastra di acciaio spessa 50 mm sulla testa inferiore della macchina; la dimensione della piastra deve essere tale da coprire il martinetto che sarà tarato. Si posiziona il martinetto sulla piastra inferiore in modo tale che il bordo del martinetto in cui vi sono l'ingresso e l'uscita del fluido sia coincidente con il bordo della piastra di supporto. Si posizionano spessori di metallo intorno agli altri bordi del martinetto. Mettere una piastra dello spessore di 50 mm sul martinetto e sugli spessori. Posizionare l'insieme piastra/martinetto/spessori sulla piastra inferiore della macchina in modo che il baricentro del martinetto sia posto entro 6 mm sull'asse di prova della macchina. Il set up di prova della taratura è indicato in Figura 23.

Muovere la testa della macchina fino a toccare la parte non mobile. Applicare un pre-carico equivalente a  $0.07 \text{ N/mm}^2$  sufficiente a produrre il contatto completo tra la piastra portante e gli spessori. La distanza tra le piastre deve essere mantenuta costante durante la procedura di taratura. A questo punto fissare gli spostamenti della macchina se si esegue la taratura in controllo di spostamento. Se questo non avviene, attaccare strumenti di misura meccanici o elettrici in modo da essere certi che la distanza tra i piatti della macchina rimanga costante, se si usa il controllo di carico.

Mettere in pressione e scaricare il martinetto per tre cicli con una pressione massima nel martinetto non oltre  $7 \text{ N/mm}^2$  controllando che la compressione esercitata dalla macchina sul martinetto non superi  $7 \text{ N/mm}^2$  sull'area totale del martinetto.

Aumentare la pressione nel martinetto con un incremento di  $0.5 \text{ N/mm}^2$  (5 bar) fino a  $7 \text{ N/mm}^2$  mantenendo costante la distanza tra le piastre. Ad ogni incremento memorizzare sia la pressione del martinetto, sia la forza misurata dalla macchina.

Calcolare la forza esercitata dal martinetto come prodotto tra la sua pressione interna e la sua sezione lorda. Riportare in un diagramma (Figura 24) i valori della forza esercitata dal martinetto (kN) in ascissa e la forza misurata dalla macchina in kN in ordinata. Il coefficiente angolare della retta ottenuta rappresenta la costante del martinetto, cioè il fattore di conversione o costante di rigidità:  $k_m$ .

Controllare la taratura del martinetto dopo averlo usato cinque volte o quando appare visibilmente deformato dopo l'uso.

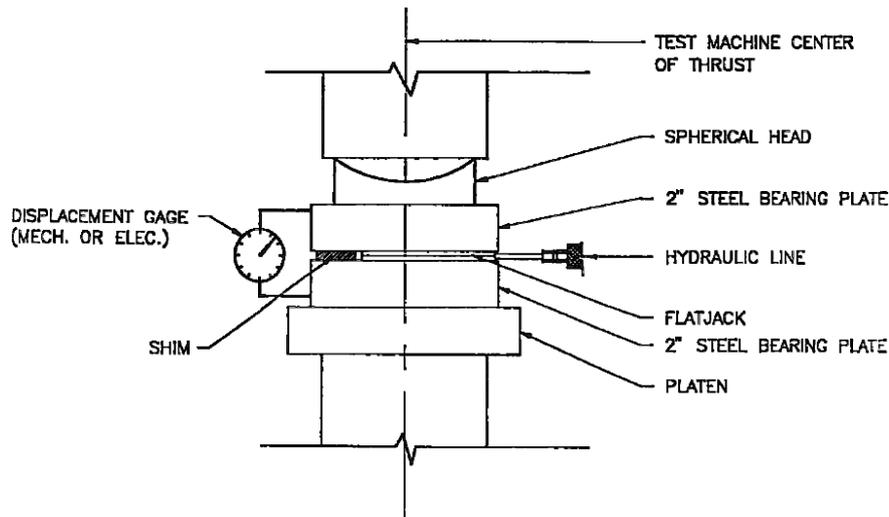


Figura 23. Configurazione del sistema di taratura del martinetto.

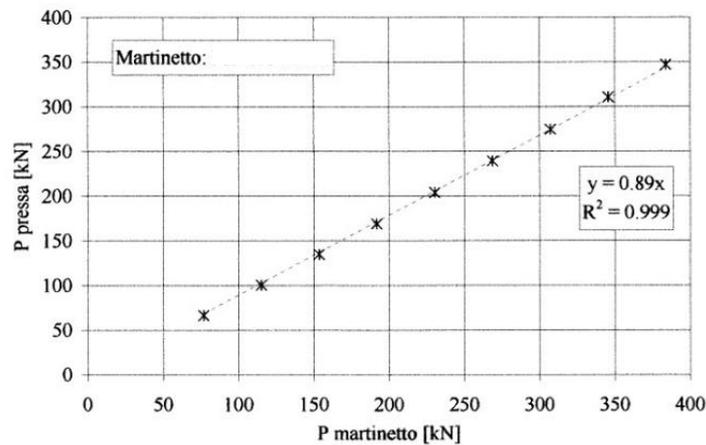


Figura 24: Esempio di curva di taratura di martinetto piatto.

#### 2.4.4 Preparazione dell'elemento da testare

Il taglio può essere eseguito per la muratura di mattoni o per murature con giunti regolari in corrispondenza di un giunto di malta, con un trapano a basso numero di giri, ripulendo il giunto tagliato con la rimozione di tutta la malta e la polvere in modo che il martinetto sia direttamente a contatto con le superfici del taglio.

La geometria del taglio deve essere simile a quella del martinetto in uso. La lunghezza del taglio preparato non deve superare quella del martinetto piatto di oltre 12 mm.

Nel caso di muratura in pietra irregolare il taglio si deve eseguire anche nella pietra in modo che sia perfettamente orizzontale (Figura 25). In tal caso l'attrezzatura usata per il taglio sarà una sega circolare con disco diamantato (Figura 26); successivamente dovrà essere ripulito il taglio. In questo secondo caso il martinetto sarà del tipo b), c), d) oppure e) di Figura 20. Si può utilizzare la stessa attrezzatura anche nel caso di muratura di mattoni, in quanto il taglio sarà meglio eseguito.

I tagli devono essere paralleli ed allineati in verticale e distanti non più di 1.5 volte la lunghezza A dei martinetti.

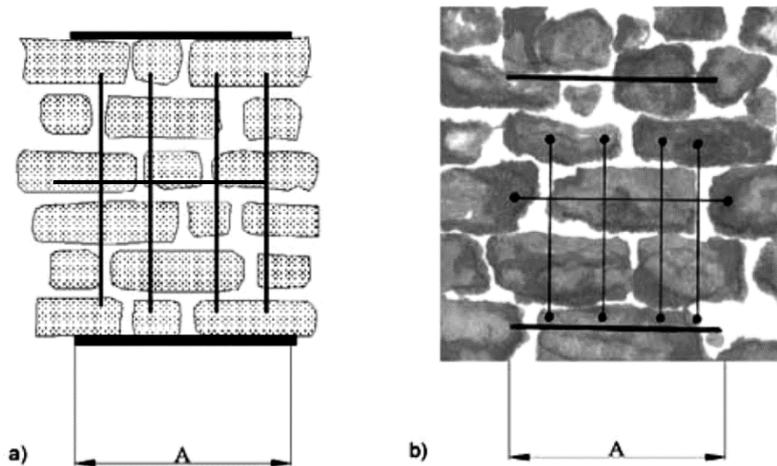


Figura 25. Esempio di localizzazione del taglio e dei sistemi di acquisizione delle deformazioni in a) murature in mattoni o in pietra con tessitura regolare, ed in b) muratura in pietra irregolare.

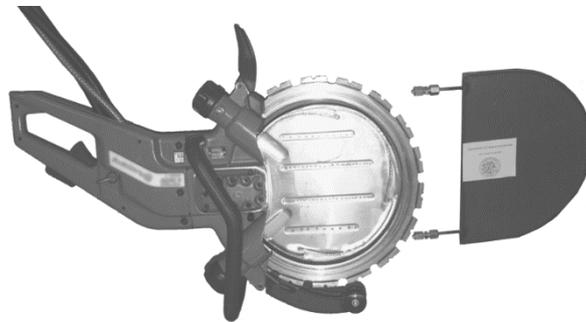


Figura 26. Strumentazione per il taglio della muratura.

#### 2.4.5 Procedura di prova e misurazioni da effettuare

La sequenza della prova prevede i passi descritti nel seguito.

1. Scegliere una zona di muratura che sia sufficientemente rappresentativa. Collocare i punti di misura, incollare le basette in metallo e posizionare gli strumenti di misura. La localizzazione e il tipo di strumentazione devono essere scelti per misurare le deformazioni su una lunghezza pari al (75-90) % della distanza compresa tra i martinetti. Le misure devono essere prese in più punti e successivamente mediate. Si raccomandano 4 punti di misura verticali ed uno orizzontale (Figura 25). Il primo e l'ultimo punto di misura verticale devono essere localizzati ad una distanza pari ad almeno  $A/8$  dagli estremi del taglio verso l'interno, dove  $A$  è la lunghezza del martinetto (Figura 20).
2. Si esegue quindi il taglio cercando di non disturbare la muratura circostante. I tagli devono essere paralleli, allineati in verticale e separati almeno da 5 corsi nel caso le altezze degli elementi componenti la muratura siano minori di 100 mm (murature in laterizi) o 3 corsi per altezze maggiori (murature in pietra). In ogni caso, la distanza tra i tagli deve essere compresa tra la lunghezza  $A$  del martinetto (Figura 20) e  $1.5A$ , ma non essere minore di 20 volte la dimensione media in direzione  $B$  del martinetto.
3. Contemporaneamente si calcola l'area del taglio, misurando la larghezza e la profondità in vari punti (ogni 10-20 mm).
4. Si inseriscono i martinetti ed eventualmente si inseriscono anche gli spessori in modo da regolarizzare i vuoti e le irregolarità interne. Tipica configurazione di prova in Figura 27.
5. Per assestare il sistema del martinetto e degli spessori si applica una prima pressione pari alla minore tra la pressione di ripristino con la prova con martinetto piatto singolo e la pressione corrispondente al 10% della pressione massima che si intende applicare durante la prova, la quale può essere determinata a partire dai valori minimi o medi *di resistenza a*

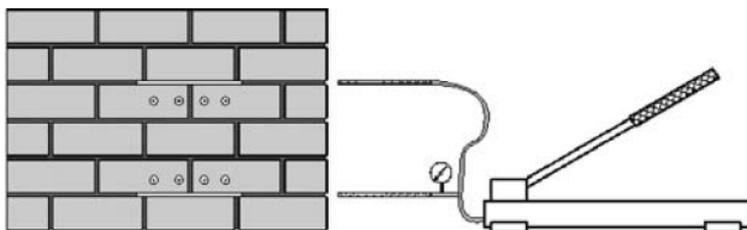
compressione di riferimento per una specifica tipologia muraria forniti dalla Tabella C8.5.I di Circ. Min. n.7/2019, come riportato nella tabella seguente:

**Tabella 1: Valori di riferimento per la tensione massima a cui arrivare durante la prova con martinetto piatto doppio.**

Tipologia di muratura	f (N/mm <sup>2</sup> )	f <sub>max,applicata</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	
		valore medio	valore minimo
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1.00	valore medio	1.50
	2.00		
Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo	2.00	valore medio	2.50
	3.00*		
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2.60	valore minimo	2.60
	3.80		
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1.40	valore medio	1.80
	2.20		
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	2.0	valore medio	2.60
	3.2		
Muratura a blocchi lapidei squadriati	5.8	valore minimo	5.8**
	8.2		
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	2.6	valore medio	3.45
	4.3		
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura <=40%)	5.0	valore minimo	5.0**
	8.0		

\* valore da Tabella C8A.2.1 di Circ. Min. n.617/2009 [54].

\*\* applicare se ritenuto valore congruo con il valore limite per il martinetto.



**Figura 27. Tipica configurazione di prova.**

6. È opportuno eseguire una prova ciclica. Se la tensione misurata in situ attraverso il martinetto piatto singolo è minore del 20% della tensione massima da applicare alla prova (determinata come definito al punto precedente), il primo ciclo di carico può corrispondere al ciclo di precarico effettuato per il settaggio del sistema martinetto/muratura/spessori. Devono essere effettuati almeno 4 cicli di carico (escluso quello di precarico). L'entità della pressione massima per ogni ciclo di carico è dipendente dalla tipologia di muratura e dalla sua resistenza a compressione attesa, stimata come riportato al punto precedente. Una indicazione della tensione massima raggiunta ad ogni ciclo può essere quella riferita al 25%, 50%, 75%, 100% della resistenza a compressione attesa della muratura.

*Durante la prova la pressione massima applicata deve essere conforme al peso esistente nella zona che sovrasta la porzione di muratura oggetto di indagine ed al fattore di redistribuzione dei carichi per non incorrere in fessurazioni o danneggiamenti delle porzioni di muratura esterne a quella testata.*

7. Dopo aver preso le misure di partenza, la pressione è incrementata a passi pari a circa il 10% della pressione massima e gli spostamenti sono misurati dopo una breve pausa di assestamento ad ogni passo. Se le misure sono prese manualmente, nel caso non si riesca ad eseguire la prova in continuo, arrestare e mantenere la pressione per almeno un minuto o fino a quando la pressione è costante ad ogni step incrementale e misurare gli spostamenti.

Ad ogni incremento, si devono registrare sia la pressione dei martinetti che le deformazioni. Il rapporto tra l'incremento di pressione ( $dp$ ) e l'incremento della deformazione ( $d\varepsilon$ ), deve essere accuratamente controllato in modo da interrompere la prova quando improvvisamente diminuisce, per non danneggiare la muratura. Un ulteriore controllo riguarda la deformazione orizzontale, il cui repentino incremento potrebbe indicare la propagazione di una fessurazione. Inoltre è importante sottolineare che la pressione imposta non deve eccedere il valore limite del martinetto, dichiarato dal produttore o misurato sperimentalmente.

In murature storiche, di scarsa resistenza o caratterizzate da malta con basso o nullo contenuto di cemento, i martinetti piatti sono in grado di caricare la muratura tra di loro sino a rottura, individuandone così una stima della resistenza a compressione che corrisponde al valore della tensione massima registrato. Tuttavia, questo può succedere raramente e causare danni anche alla muratura nelle zone adiacenti al posizionamento del martinetto piatto, pertanto ne va tenuto di conto. Per poter considerare i risultati come attendibili è necessario che il quadro fessurativo mostrato dalla prova risulti coerente con la rottura a compressione della zona indagata dalla prova entro i due martinetti.

8. Incrementare la pressione lentamente. Misurare gli spostamenti per piccoli incrementi di pressione. Le velocità di prova in fase di carico e di scarico devono essere comparabili.

9. Scaricare e rimuovere delicatamente il martinetto e chiudere il taglio con una malta appropriata a ritiro compensato.

#### 2.4.6 Metodo di calcolo

1. Il valore della tensione di compressione tra i martinetti è data dalla relazione:

$$\sigma = p \cdot k_m \cdot k_a$$

dove:

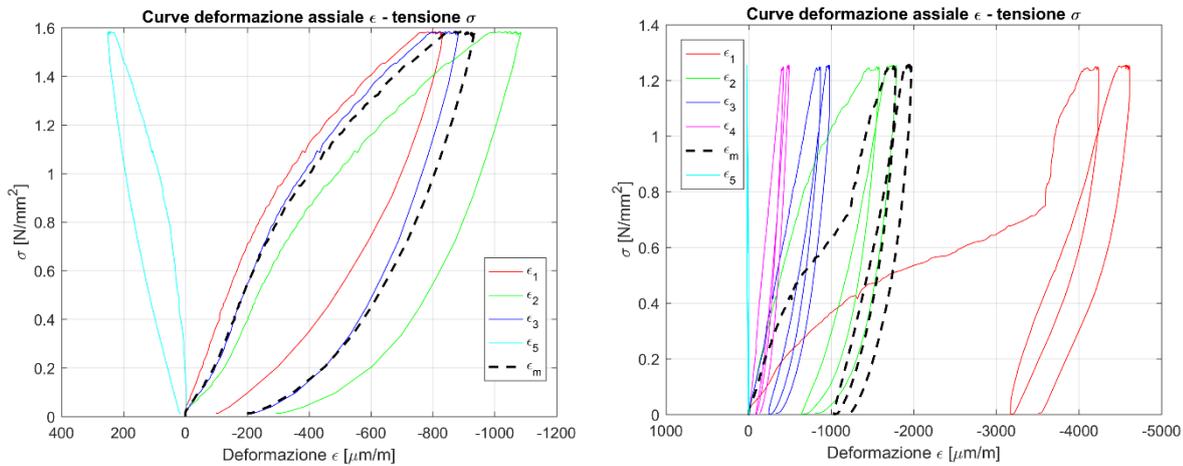
- $\sigma$  è il valore della tensione di compressione espressa in MPa o in N/mm<sup>2</sup>;
- $k_m$  è una costante adimensionale che riflette le proprietà geometriche e di rigidità del martinetto come determinato nella sezione 7;
- $k_a$  è una costante pari al rapporto tra l'area misurata del martinetto (in contatto con la muratura) e l'area media del taglio (costante adimensionale). Indicazioni per trovare l'area misurata del martinetto in contatto con la muratura sono riportati nei seguenti riferimenti scientifici: [44] e [45];
- $p$  è la pressione del martinetto espressa in bar.

Le due costanti sono di solito minori di 1.

2. È possibile calcolare i valori di deformazione dividendo gli spostamenti acquisiti ad ogni incremento di carico per la lunghezza iniziale della base di misura. È possibile, inoltre, calcolare la deformazione media come media aritmetica delle deformazioni delle diverse localizzazioni. Poiché ci possono essere effetti locali che influenzano la misura, è lecito scartare la misura di una base che sia molto diversa dalle altre. In particolare, la deviazione media consentita dal valore della deformazione media di ciascuna base non deve eccedere il 100-150% per tensioni superiori al 25% della tensione massima registrata durante la prova (in altre parole: per tensioni che vanno dall'inizio della prova sino al 25% della tensione massima raggiunta durante la prova possono accettarsi valori anche molto diversi delle deformazioni delle basi, poiché le misurazioni possono essere affette da errori dovuti a criticità iniziali della prova; per tensioni superiori al 25% del massimo valore raggiunto dalla prova, se la deviazione della misura di una delle basi rispetto alla media eccede in modo costante del 100-150%, tale misura è da considerarsi come non attendibile). Nel grafico deformazione-tensione della prova, questa limitazione si traduce nel fatto che la curva deformazione-tensione di ciascuna delle basi di misura intersechi, in modo pressoché continuo, la curva deformazione-tensione della media delle basi per valori di tensione maggiori del 25% della tensione massima registrata durante la prova. Le basi le cui misure non rispettano questi limiti possono ritenersi non

attendibili ai fini del calcolo del modulo elastico della prova. Un esempio di curve deformazione-tensione in cui le basi di misura forniscono risultati attendibili è riportato in Figura 28a; al contrario, un esempio di curva in cui la base di misura n.1 non fornisce un risultato attendibile è riportato in Figura 28b.

Nel caso in cui risultino anomale le misure di tre basi, la prova è da considerarsi non attendibile<sup>3</sup>.



**Figura 28. (a) Curve deformazione-tensione: tutte le basi di misura forniscono valori attendibili; (b) curve deformazione-tensione: la base di misura n.1 fornisce risultati non attendibili (scartata).**

3. Il modulo elastico può essere calcolato in diversi modi ed in corrispondenza di diversi livelli di tensione, come specificato in [67]. In particolare, si distinguono:

a. *modulo elastico tangente*, che rappresenta la pendenza della curva deformazione-tensione ad uno specifico stato di tensione o di deformazione (Figura 29a).

$$E_{ti} = \frac{\delta\sigma_i}{\delta\varepsilon_{v,i}} \text{ dove:}$$

- $E_{ti}$  è il modulo elastico tangente (MPa o in  $\text{N}/\text{mm}^2$ );
- $\delta\sigma_i$  è l'incremento di tensione, espresso in MPa o in  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;
- $\delta\varepsilon_{v,i}$  è il corrispondente incremento di deformazione verticale media.

b. *chord modulus o modulo elastico secante*, che rappresenta la pendenza della corda disegnata tra due specifici punti nella curva deformazione-tensione. In Figura 29b, ad esempio, il modulo elastico secante è calcolato tra i due punti  $r$  e  $p$  della curva deformazione-tensione associata alla prova.

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_v} \text{ dove:}$$

- $E_s$  è il chord modulus o modulo elastico secante (MPa o in  $\text{N}/\text{mm}^2$ ), calcolato tra due punti della curva deformazione-tensione;
- $\Delta\sigma$  è l'incremento di tensione, espresso in MPa o in  $\text{N}/\text{mm}^2$ , tra due punti della curva deformazione-tensione;
- $\Delta\varepsilon_v$  è il corrispondente incremento di deformazione verticale.

Se il primo punto della corda corrisponde all'origine della prova, il modulo elastico secante corrisponde al rapporto tra la tensione e la relativa deformazione del secondo punto della curva:

<sup>3</sup> Affermazione valida se le basi di misura verticali totali sono 4, come raccomandato in questo protocollo. Se le basi di misura totali sono tre sono sufficienti due basi che forniscono misurazioni anomale per ritenere la prova non attendibile.

$$E_s = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_{vi}}$$

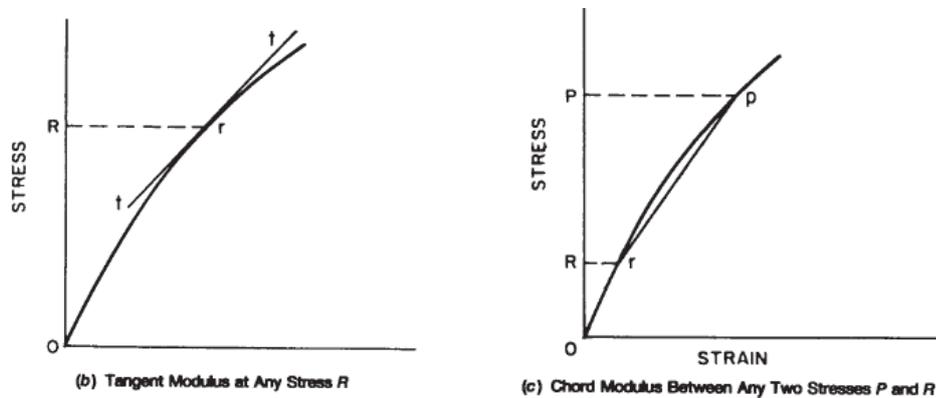


Figura 29. Grafici deformazione-tensione in cui sono identificate linee rette che corrispondono a: a) modulo di elasticità tangente, b) modulo di elasticità secante o chord modulus [67].

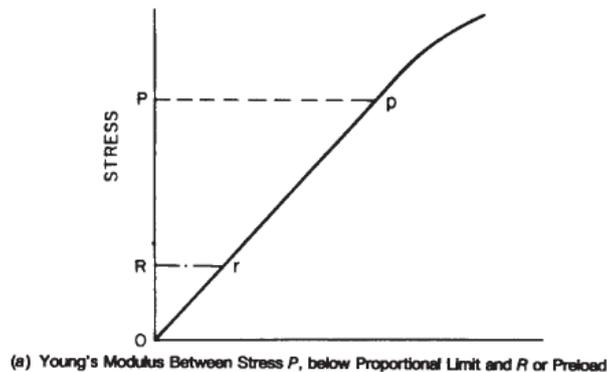


Figura 30. Grafico deformazione-tensione in cui è identificato il modulo di Young [67].

c. *modulo di Young* [67], calcolato come modulo secante tra la tensione di compressione (o di trazione) e la deformazione corrispondente sotto al limite proporzionale, ovvero prima che la muratura esprima il suo carattere non lineare. L'estremo inferiore per il calcolo del modulo di Young può essere l'origine; in tal caso si definisce il modulo di Young come modulo elastico secante all'origine.

## 2.4.7 Risultati della prova

1. Il calcolo del modulo di Young (E) della muratura viene eseguito sulla curva iniluppo deformazione-tensione dei cicli di carico eseguiti durante la prova. Il modulo è calcolato come secante tra due punti della curva (Figura 31). Il primo punto di calcolo ha coordinate  $(\varepsilon_{v,inf}, \sigma_{inf})$ , mentre il secondo punto di calcolo ha coordinate  $(\varepsilon_{v,sup}, \sigma_{sup})$ . Il modulo E è calcolato attraverso la seguente formula:

$$E = \frac{\sigma_{sup} - \sigma_{inf}}{\varepsilon_{v,sup} - \varepsilon_{v,inf}} \text{ dove:}$$

- $\sigma_{inf}$ : limite inferiore della tensione verticale agente sul pannello per la quale si visualizzano le prime deformazioni verticali. È possibile infatti che nelle fasi iniziali della prova, si possa verificare una diffusione delle tensioni verticali

tale da generare deformazioni pressoché nulle, corrispondenti ad un tratto verticale iniziale nel diagramma deformazioni-tensioni. In questo caso,  $\sigma_{inf}$  deve essere il primo livello di tensione per il quale si ottengono deformazioni visibili, scartando la fase iniziale della curva dalla trattazione dei risultati. In caso contrario,  $\sigma_{inf}$  corrisponde con l'origine della prova;

- $\varepsilon_{v,inf}$ : è il corrispondente valore di deformazione verticale media;
- $\sigma_{sup} = \sigma_{1/3}$ : tensione verticale agente sul pannello pari ad 1/3 della tensione massima raggiunta durante la prova  $\sigma_{max}$ , la quale è stata determinata a partire dai valori minimi o medi di resistenza a compressione di riferimento per una specifica tipologia muraria forniti dalla Tabella C8.5.I di Circ. Min. n.7/2019 (e riportati in Tabella 1);
- $\varepsilon_{v,sup}$ : è il corrispondente valore di deformazione verticale media.

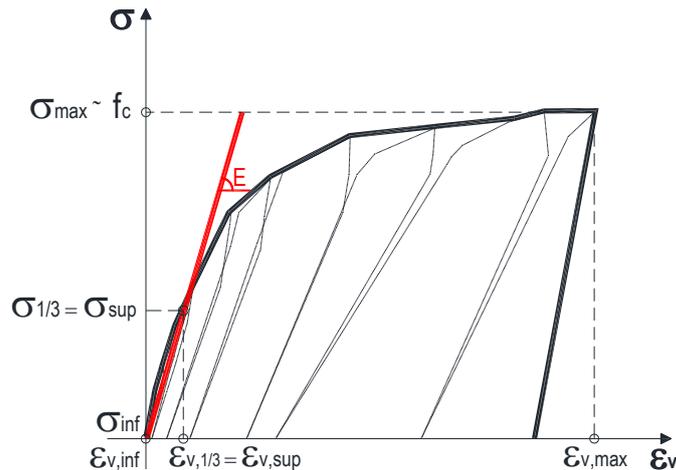


Figura 31. Grafico involuppo deformazione-tensione in cui è identificato il modulo elastico (secante ad 1/3).

2. Se la prova è svolta fino al collasso, ossia fino ad ottenere una fase di post-picco ed un quadro fessurativo coerente con la rottura a compressione della zona indagata dalla prova entro i due martinetti, la tensione ultima calcolata durante la prova può considerarsi come la stima della resistenza a compressione della muratura ( $f_c$ ).

3. Il coefficiente di dilatazione trasversale, per lo stesso intervallo di calcolo del modulo elastico è calcolato come segue:

$$v_i = \frac{\delta \varepsilon_{hi}}{\delta \varepsilon_{vi}} \text{ dove:}$$

$v_i$  è il coefficiente di dilatazione trasversale [-];

$\delta \varepsilon_{vi}$  è l'incremento di deformazione verticale;

$\delta \varepsilon_{hi}$  è il corrispondente incremento della deformazione trasversale.

## 2.4.8 Resoconto di prova

Il resoconto di prova deve contenere le seguenti informazioni:

- a) riferimento allo standard;
- b) una descrizione del sito, dell'edificio e della muratura insieme ad altre importanti informazioni, come le condizioni ambientali, le caratteristiche dei mattoni o delle pietre e della malta, la presenza di umidità per risalita capillare;
- c) disegni ed immagini esplicative della tessitura muraria, della posizione delle basi di misura e la data di costruzione della muratura se è nota;
- d) la data della prova;

- e) metodo di taglio, schema e localizzazione dei tagli, localizzazione della strumentazioni di misura ed altre informazioni pertinenti;
- f) caratteristiche della strumentazione adottata, sistema idraulico, uso di spessori o altro;
- g) i valori delle costanti di taratura del martinetto;
- h) i valori dello stato di sforzo calcolato;
- i) grafici dei valori di pressione, deformazioni e tensione misurati o calcolati;
- j) calcolo del modulo elastico e del coefficiente di dilatazione;
- k) osservazioni.

### 2.4.9 Note sull'interpretazione dei risultati

Nel seguito verranno riportati alcuni commenti, osservazioni e suggerimenti sulla metodologia di prova e sulla interpretazione dei risultati che questa fornisce.

#### 1. Difficoltà nell'interpretazione delle misure

Difficoltà o impedimenti all'applicazione della prova per la determinazione delle caratteristiche tenso-deformative si possono presentare nel caso di edifici bassi (a uno o due piani) a causa della mancanza di contrasto all'azione dei martinetti e quindi, per insufficienza dello stato di tensione agente nella muratura al di sopra del punto di prova. La Figura 32 mostra uno di questi casi: l'insorgere di fessure nella muratura sopra ed a lato del martinetto superiore ha reso impossibile la prosecuzione della prova.

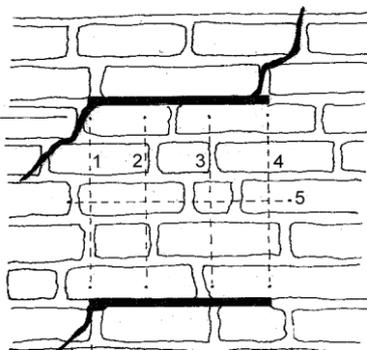


Figura 32: Rottura della muratura ai limiti del taglio, al di fuori della zona sottoposta a prova.

#### 2. Problemi dovuti alle caratteristiche della muratura

##### 2.1 Giunti spessi.

In caso di giunti di malta di elevato spessore, la scelta della posizione del taglio sia nella prova con il martinetto singolo che doppio, è molto importante. Se il giunto è di spessore superiore a 2 cm la scelta migliore sarà effettuare il taglio nel corso di mattoni, ma solo se non si tratta di edifici monumentali.

##### 2.2. Muratura regolare con giunti sottili.

Quando il giunto è particolarmente sottile (<4 mm), e/o la muratura è di rilevante importanza storica bisogna porre attenzione alle operazioni di taglio. In queste circostanze si deve ricorrere comunque ad una sega circolare.

##### 2.3 Muratura in pietra con tessitura irregolare.

Nelle murature in pietra irregolari il taglio non può essere effettuato nei giunti di malta, discontinui e poco resistenti; deve essere invece realizzato attraverso le pietre [60]. Inoltre, la scelta del punto di prova è molto importante perché l'irregolarità della muratura può influenzare molto i risultati, come mostrato in Figura 33. In presenza di una disposizione delle pietre non simmetrica e non omogenea si è verificata una distribuzione non uniforme dello stato di tensione durante la prova, con maggiori concentrazioni in corrispondenza della base di misura 4. Il risultato è stato un'apparente maggior rigidità del campione vicino alle basi 1 e 2. È da sottolineare come si possono misurare frequentemente valori non simmetrici delle deformazioni per le basi di misura.

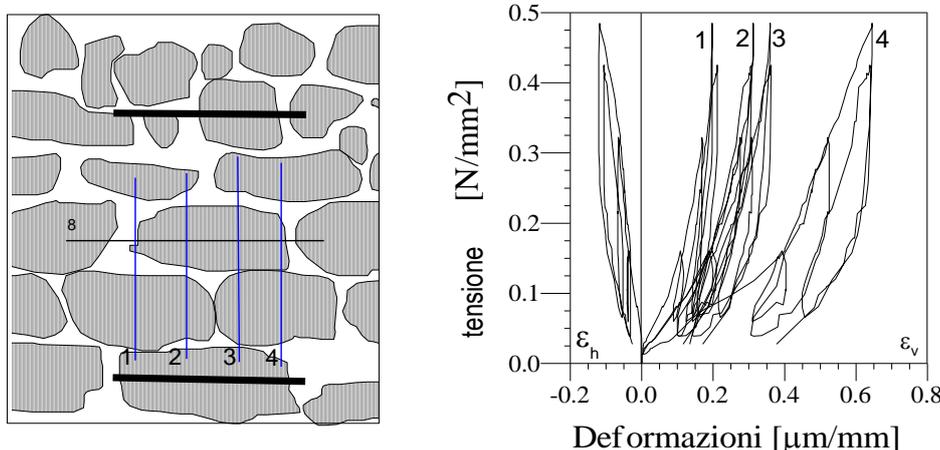


Figura 33. Configurazione di prova per una muratura irregolare e legame tensione-deformazione per ciascuna base di misura della prova.

### 3. Problemi dovuti alla modalità di prova svolta in modo diverso da quella consigliata come dal presente report

Le elaborazioni dei risultati di prova secondo la trattazione descritta ai paragrafi precedenti valgono quando la prova è stata svolta secondo la procedura di prova espressa nel presente documento. Nel caso in cui la prova non sia stata eseguita secondo questa modalità, la trattazione ed interpretazione dei risultati della prova potranno/dovranno subire opportune modifiche.

In particolare, è stato osservato che in prove svolte in passato, non cicliche, frequentemente la tensione massima applicata durante la prova assumesse valori relativamente bassi e non raggiungesse i valori raccomandati in Tabella 1, i quali, si ricorda, rappresentano una stima della resistenza a compressione  $f_c$  della muratura esaminata. La tensione massima applicata veniva stimata incrementando secondo opportuni coefficienti la misura della tensione in situ calcolata attraverso prova con martinetto piatto singolo. In tali casi, il modulo di elasticità, potrebbe non essere stimato come secante tra due punti di cui il superiore con una tensione pari ad un terzo della tensione massima assunta durante la prova, poiché:

- se i valori massimi di tensione raggiunti durante la prova sono relativamente bassi, i valori pari ad 1/3 della tensione massima raggiunta sono a loro volta molto bassi e, nella curva deformazione-tensione, potrebbero corrispondere a zone in cui non emerge il comportamento elastico del materiale a causa di possibili disturbi iniziali della prova;
- i valori di tensione massima raggiunti sono, anche a parità di tipologia muraria, molto diversi tra di loro, poiché definiti in funzione della tensione in situ trovata per ciascuna prova attraverso la prova con martinetto piatto singolo.

In questi casi molto diversificati, la procedura risulta di difficile standardizzazione; si raccomanda il calcolo del modulo di Young della prova come modulo elastico "lineare", ovvero calcolato come la pendenza della corda tra un punto iniziale della curva (o l'origine o  $\sigma_{inf}$ ) e  $\sigma_{lin}$ , ossia la tensione verticale agente sul pannello in corrispondenza della quale la curva  $\varepsilon$ - $\sigma$  assume un comportamento lineare (Figura 34). Nel caso in cui la curva  $\varepsilon$ - $\sigma$  non offra tratti puramente lineari, si accetta un certo grado di approssimazione tra la corda associata al modulo elastico secante  $E_{lin}$  e lo sviluppo della curva

sperimentale.

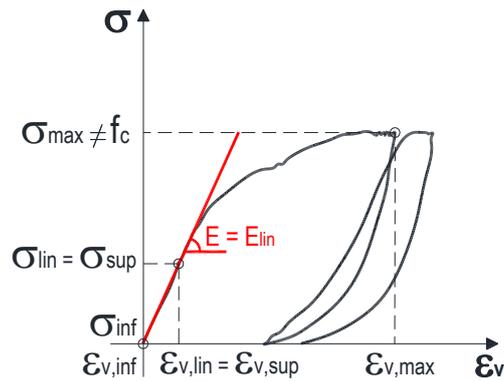


Figura 34. Grafico deformazione-tensione in cui è identificato il modulo elastico “lineare”.

A titolo di esempio, si riporta la curva deformazione-tensione ottenuta da una prova svolta su un pannello in muratura di mattoni pieni. Dalla Tabella 1 si ha che la tensione massima applicata, secondo la procedura di prova descritta in questo protocollo, dovrebbe essere circa pari a 3.4 N/mm<sup>2</sup>. Come è possibile osservare, la  $\sigma_{max}$  raggiunta nella prova (svolta in due cicli di carico, non incrementali) è pari a 0.9 N/mm<sup>2</sup>. Considerare il modulo elastico come secante tra l'origine ed un terzo della tensione massima raggiunta dalla prova, pari ad 0.3 N/mm<sup>2</sup>, porterebbe ad una stima errata del modulo di elasticità del materiale (sovrastimandolo, come è visibile dalla forma della curva).

$E_{lin}$  è stato individuato come la pendenza del tratto lineare (visibile nella curva per tensioni superiori a 0.5 N/mm<sup>2</sup>), associato alla curva deformazione-tensione come secante all'origine e al valore di  $\sigma_{sup}$  pari a circa 0.8 N/mm<sup>2</sup>. Ove possibile anche in prove di questo tipo, infatti, si consiglia di assumere come limite superiore  $\sigma_{sup}$  il valore di tensione pari ad 1/3 della tensione massima che si sarebbe dovuto applicare alla muratura anche se questa di fatto non è stata applicata.

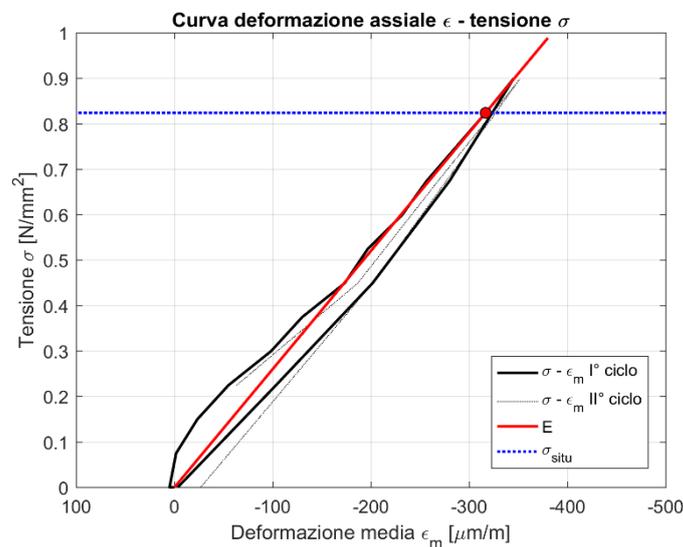


Figura 35. Grafico deformazione-tensione in cui è identificato il modulo elastico *lineare* (la curva  $\epsilon$ - $\sigma$  assume un comportamento lineare).

## 2.4.10 Bibliografia

### Normative e raccomandazioni

- [52] ASTM C 1197-14, 'Standard test method for in-situ measurement of masonry deformability properties using the flatjack method'.

- [53] RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, LUM.D.3 'In-situ strength/elasticity tests based on the flat jack' (E & FN Spon, London, 1994) 503-508.
- [54] Circolare Ministeriale n.° 617 del 02/02/2009 e relative appendici. Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al D.M. 14/01/2008.

### Riferimenti scientifici

- [55] Rossi, P.P., 'Analysis of mechanical characteristics of brick masonry tested by means of non-destructive in-situ tests', Paper presented at the 6th International Brick Masonry Conference, Rome, 1982.
- [56] Sacchi Landriani, G. and Taliercio, A., 'Numerical analysis of the flat jack test on masonry walls', *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 5(3) (1986).
- [57] Noland, J.L., Atkinson, R.H. and Schuller, M.P., 'A review of the flat-jack method for nondestructive evaluation', *Proceedings of Non-destructive Evaluation of Civil Structures and Materials*, Colorado, October 1990.
- [58] ASTM C 1197-91, 'Standard test method for in-situ measurement of masonry deformability properties using the flatjack method'.
- [59] RILEM Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials, LUM.D.3 'In-situ strength/elasticity tests based on the flat jack' (E & FN Spon, London, 1994) 503-508.
- [60] Hughes, T.G., and Pritchard, R., 'An investigation of the significance of flatjack flexibility in the determination of insitu stresses', *Proc. 10th Intl. Brick-Block Mas. Conf.*, Vol. 2., 1994, 569-578.
- [61] Building Research Establishment, Digest 409 –'Masonry and concrete structures: Measuring in-situ strength and elasticità using flat jacks' (1995).
- [62] de Vekey, R.C., 'Thin stainless steel flat-jacks: calibration and trials for measurement of in-situ stress and elasticity of masonry', *Proc 7th Canadian Masonry Symposium*, Hamilton, Vol. 2 (1995) 1174-1183.
- [63] EN 1052–1, 'Methods of test for masonry. Part 1 - Determination of compressive strength' (1998).
- [64] Binda, L., Tiraboschi, C., 'Flat-Jack Test as a Slightly Destructive Technique for the Diagnosis of Brick and Stone Masonry Structures', *Int. Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, *Int. Zeitschrift fur Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege*, Zurich, pp. 449-472, 1999.
- [65] Binda, L., Tiraboschi, C., Flat-Jack method applied to historic masonries *Proc. Int. RILEM Workshop On Site Control and Non-Destructive Evaluation of Masonry Structures*, 13-14/11/2001, Mantova, Italy, Binda L., de Vekey R.C. (Eds.), pp. 179-190, 2003.
- [66] Binda, L., Cantini, L., Cardani, G., Saisi, A., Tiraboschi, C., Use of Flat-Jack and Sonic Tests for the Qualification of Historic Masonry, 10th Tenth North American Masonry Conference (10NAMC), St. Louis, Missouri, 3-6/06/07, Session 6C, CD-ROM, pp. 791-803, 2007.
- [67] ASTM E 111 – 04, 'Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus'.
- [68] Ronca, P., 'The Significance of the Gauging System in the Flatjack In-Situ Stress Test for Masonry: Experimental Investigation' *The Masonry Society Journal*, Vol 14, No. 1, August 1996.
- [69] Schuller, M., 'Flatjack Methods for Diagnosis of Modern Masonry' *Proceedings, On-Site Control and Evaluation of Masonry Structures*, Binda, L., deVekey, R., editors, RILEM, 2001.
- [70] Coombs J., Tanner J.E., 'Development of Laboratories for Masonry Testing and Non-Destructive Evaluation' *The Masonry Society Journal*, Vol 26, No. 2, 2008, pp. 9-20.
- [71] Parivallal S., Kesavan K., Ravisankar K., Arun Sundram B. and Farvaze Ahmed A. K., 'Evaluation of in-situ stress in masonry structures by flat jack technique', *Proceedings of the National Seminar & Exhibition on Non-Destructive Evaluation*, NDE 2011, December 8-10, 2011.
- [72] Gregorczy P., Lourenço P. B., 'A Review on Flat-Jack Testing', *Engineering Civil*, UM, No.9, 2000, pp. 39-50.

### Riferimenti scientifici per l'interpretazione dei risultati

- [73] ASTM C 1197-14, 'Standard test method for in-situ measurement of masonry deformability properties using the flat jack method', 1991.

- [74] Bettio, C., Gelmi, A., Modena, C. and Rossi, P.P., 'Mechanical characterisation and strengthening of masonries from antique historic centres in the Trento province: preliminary report on the results of on site investigation, Conf. on "Murature, sicurezza, recupero", Trento, Italy, 1993, 185-222.
- [75] Binda, L., 'Characterisation of stone and brick masonries finalised to the choice of appropriate strengthening techniques', Milan Research Unit, Final Report for Contract CNR/GNDT, 1999.
- [76] Binda, L. and Anzani, A., 'The time-dependent behaviour of masonry prisms: an interpretation', *The Masonry Society Journal* 11 (2), 1993, 17-34.
- [77] Binda, L., Gatti, G., Mangano, G., Poggi, C. and Sacchi Landriani, G., 'The collapse of the Civic Tower of Pavia: a survey of the materials and structure', *Masonry International* 6 (1), 1991, 11-20.
- [78] Binda, L., Modena, C. and Baronio, G., 'Strengthening of masonries by injection technique', *Proceedings of 6th NaMC*, Vol. I, Philadelphia, 1993, 1-14.
- [79] Binda, L., Tiraboschi, C. and Tongini Folli, R., 'On site and laboratory investigation on materials and structure of the Bell Tower in Monza', *2nd Int. Conf. RILEM on Rehabilitation of structures*, Highett, Australia, 1998, 542-556.
- [80] Eurocode 6, 'Design of Masonry Structure'.
- [81] Hilsdorf, H.K., 'Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression', *Proc. Int. Conf. on Masonry Structural System*, Texas, 1969.
- [82] Binda, L. and Tiraboschi, C., 'Flat-jack test as a slightly destructive technique for the diagnosis of brick and stone masonry structures', *Int. Journal for Restoration of Buildings and Monuments (Int. Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, Zurich)*, 1999, 449-472.
- [83] Binda, L., Tiraboschi, C., Flat-Jack method applied to historic masonries *Proc. Int. RILEM Workshop on Site Control and Non-Destructive Evaluation of Masonry Structures*, 13-14/11/2001, Mantova, Italy, Binda L., de Vekey R.C. (Eds.), 2003, 179-190.
- [84] Binda, L., Cantini, L., Cardani, G., Saisi, A., Tiraboschi, C., Use of Flat-Jack and Sonic Tests for the Qualification of Historic Masonry, *10th Tenth North American Masonry Conference (10NAMC)*, St. Louis, Missouri, 3-6/06/07, Session 6C, CD-ROM, 2007, 791-803.

## 2.5 CAROTAGGIO (CAR)

Il carotaggio consiste nell'estrazione di campioni di forma cilindrica dalla struttura muraria di indagine, al fine di esaminarne la stratigrafia e le condizioni interne. Sui provini ricavati dal carotaggio si possono eseguire in laboratorio le prove per la determinazione di alcune caratteristiche del materiale (massa volumica, etc...) 0.

Durante le operazioni di prelevamento, il danneggiamento sul campione provocato dall'estrazione deve essere ridotto al minimo.

Per l'esecuzione del carotaggio si può fare riferimento alle prescrizioni della norma UNI EN 12504/1-2009 [85], anche se questa è specifica per strutture in calcestruzzo.

L'estrazione delle carote viene eseguita tramite una carotatrice costituita da un tubo di acciaio (carotiere) in cui, all'estremità, è posta una corona tagliente (corona diamantata). Il carotiere viene connesso ad un albero collegato a sua volta ad un motore. Ogni corona si identifica con un diametro esterno che corrisponde al foro di perforazione, ed un diametro interno che corrisponde alla carota che si preleva. La dimensione del carotaggio è stabilita in base allo spessore degli elementi da indagare nella muratura ed allo scopo dell'indagine; sono comuni carote di 80-100 mm di diametro.

Nel movimento di avanzamento la sonda deve essere esente da vibrazioni, per assicurare che il diametro della carota sia costante ed il suo asse rettilineo. La sonda pertanto deve essere rigida e correttamente ancorata. La corona deve avere diametro leggermente superiore a quello del tubo in modo che quest'ultimo possa entrare nel foro senza incontrare ostacoli. La lunghezza di taglio standard è entro i 400-700 mm; con l'applicazione di apposite prolunghe si possono raggiungere profondità maggiori in funzione sia del materiale da perforare sia del diametro del foro.

L'avanzamento è inversamente proporzionale alla velocità angolare del carotiere, in quanto maggiore è la resistenza che viene ad incontrare il carotiere, minore sarà la velocità di rotazione.

Durante l'esecuzione del carotaggio viene a svilupparsi del calore e per evitare danneggiamenti alla corona normalmente si prevede un raffreddamento con getto d'acqua. Il getto ha anche lo scopo di lubrificare le superfici di contatto fra il tubo di carotaggio e muratura in modo da evitare attrito fra i due materiali e il possibile trasferimento di momento torcente alla carota.

Prima dell'estrazione della carota è necessario provocare la rottura della parte finale della carota che è ancora solidale alla muratura, attraverso ripetuti movimenti del carotiere in direzione trasversale nel piccolo spazio che si è creato fra di esso e la muratura.

La prova consente di esaminare la stratigrafia e le condizioni della muratura interna dall'esame della carota, quali:

- compattezza della muratura;
- presenza o assenza di vuoti;
- stato di aggregazione interno (presenza di nucleo interno o sacco);
- stratigrafia nella sezione.

### 2.5.1 Bibliografia

#### Normative

[85] UNI EN 12504-1:2009. Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Carote - Prelievo, esame e prova di compressione.

#### Riferimenti scientifici

AA.VV. Tecniche diagnostiche e loro analisi critica. Report. DISEG. Università degli studi di Genova.

## 3 PROVE SPERIMENTALI SUI COMPONENTI DEI PANNELLI MURARI

### 3.1 COMPRESSIONE SU BLOCCHI ( $C_B$ )

#### 3.1.1 Definizione della tecnica di indagine

La prova di compressione dei blocchi permette di determinarne la resistenza a compressione  $f_b$  del blocco. Viene condotta con riferimento alla UNI EN 772-1:2015 [88] e consiste nel comprimere le superfici parallele del blocco con un carico verticale uniformemente distribuito, incrementato fino al collasso.

I provini possono essere cubici ricavati da mattoni pieni o estratti di carote di muratura di pietrame.

Di seguito sono riportati gli aspetti principali; per qualsiasi approfondimento si rimanda alla UNI EN 772-1 2002 ed alla normativa tecnica per le costruzioni [86] [88].

#### 3.1.2 Simbologia adottata

La simbologia adottata è la seguente:

- $N$  è il carico massimo;
- $A$  è l'area di carico (vedere paragrafo 3.1.4.5);
- $f_{bi}$  è la resistenza a compressione dell'elemento ( $N/mm^2$ );
- $f_{bm}$  è la media aritmetica della resistenza dei singoli elementi  $f_{bi}$  ( $N/mm^2$ );
- $s$  è la stima dello scarto quadratico medio;
- $\delta$  è il coefficiente di variazione;
- $n$  è il numero dei provini;
- $k$  è il coefficiente dipendente dal numero di provini  $n$ ;
- $f_{bk}$  è la resistenza caratteristica a compressione del campione di elementi ( $N/mm^2$ ).

#### 3.1.3 Strumentazione di prova

La macchina di prova deve poter sviluppare la forza sufficiente per potere rompere tutti i provini. La scala adottata è scelta in modo che il valore corrispondente al carico di rottura applicato al provino sia maggiore di un quinto della scala di lettura. La macchina deve essere dotata di un dispositivo di regolazione del carico o dispositivo equivalente che permette di rispettare la velocità degli incrementi di carico indicati in Tabella 2.

La macchina deve essere equipaggiata con due piastre di acciaio. La rigidità delle piastre e la modalità di trasmissione del carico devono essere tali da garantire che la deformazione della loro superficie sotto carico di rottura sia minore di 0.1 mm su una lunghezza di 250 mm. Una delle due piastre di applicazione del carico deve essere in grado di potersi adattare liberamente alla superficie del provino non appena essa tocca il provino e munita di un dispositivo a frizione o altro accorgimento che ne impedisca il basculamento. L'altra piastra deve essere costituita da un blocco piano non basculante. Le facce di contatto di ambedue le piastre devono avere dimensioni maggiori delle dimensioni dei provini più grandi che dovranno essere sottoposti alla prova di compressione. Le eventuali piastre aggiuntive devono avere la stessa durezza, rigidità e planarità delle piastre principali. Le facce portanti delle piastre non devono scostarsi dalla planarità di oltre 0.05 mm. La macchina di prova deve essere provvista di una bilancia in grado di pesare con accuratezza di 0.1% la massa dei provini.

### **3.1.4 Preparazione dei provini**

#### **3.1.4.1 Campionamento**

Il numero minimo di campioni deve essere sei. Nel caso di elementi di muratura di grandi dimensioni, è consentito ritagliare dagli elementi provini rappresentativi, per esempio cubi, in diversi punti dell'elemento.

(Questo punto, nel caso di elementi prelevati da pannelli murari esistenti, può non essere soddisfatto).

#### **3.1.4.2 Preparazione della superficie**

L'orientamento dei provini sottoposti a prova deve essere quello prescritto e precisato nel resoconto di prova. Per certe forme di costruzione è necessario ripetere le prove variando l'orientamento dei provini.

Le facce dei provini di elementi di muratura interi o provini ritagliati da elementi di grandi dimensioni sulle quali verrà applicato il carico devono essere ripulite da eventuale materiale superfluo ed essere perfettamente piane con tolleranza di 0.1 mm su 100 mm, in modo che la faccia superiore si trovi tra due piani paralleli alla faccia inferiore con tolleranza non maggiore di 1 mm ogni 100 mm.

Le scanalature e/o le eventuali linguette sulle facce devono essere eliminate prima della prova.

Elementi di muratura con incavi aventi una sezione netta di carico maggiore del 35% della superficie apparente della faccia di posa possono essere sottoposti alla prova senza averne eliminato o riempito preventivamente gli incavi. Quando la sezione netta dell'unità di muratura con incavi sottoposta al carico è uguale o minore del 35% della faccia di posa, gli incavi devono essere riempiti con la stessa malta di livellamento.

La superficie dei provini deve essere molata fino a quando saranno soddisfatte le esigenze di planarità e di parallelismo.

#### **3.1.4.3 Livellamento**

##### Livellamento di elementi di muratura senza vuoti o con vuoti non riempiti

Il livellamento dei provini la cui resistenza alla compressione è almeno uguale al presunto valore minimo stabilito dalla norma per elementi di muratura o almeno uguale a 30 N/mm<sup>2</sup>, considerando il minore dei due valori, è fatto con una malta a base di cemento e sabbia. Se necessario, per esempio nel caso di elementi caratterizzati da forte assorbimento di acqua, le facce da livellare devono essere umidificate in precedenza. I provini vanno sistemati su una lastra rigida e liscia di vetro smerigliato o di acciaio inossidabile la cui planarità non si scosti più di 0.1 mm per ogni 100 mm.

##### Livellamento di elementi di muratura a semplice rottura di giunto

Quando vengono utilizzati elementi di muratura a semplice rottura di giunto e i provini non devono essere levigati; posare ciascun provino su malta seguendo le modalità seguenti: fissare la piastra sul supporto e ricoprirla. Posare due strisce parallele di malta aventi spessore di circa 5 mm, lunghezza che supera di circa 25 mm la lunghezza dell'elemento di muratura e larghezza che supera di circa 10 mm la larghezza della faccia di posa. Premere una faccia di posa dell'elemento di muratura nella malta in modo che lo spessore della malta che si trova sotto il letto di posa non sia minore di 3 mm. Verificare la perpendicolarità dell'asse verticale del provino rispetto alla piastra avvicinando una squadra o livella a bolla verticale a ciascuna faccia verticale del provino.

Eliminare la malta eccedente. Conservare il provino, esaminare e livellare la seconda faccia.

##### Conservazione dei provini livellati

Mantenere i provini sotto sacchi umidi per tutta la durata del periodo di maturazione o conservarli in una camera di

condizionamento con umidità relativa maggiore del 90%. Lasciare indurire i campioni per il tempo di presa necessario per raggiungere la resistenza minima prescritta.

#### **3.1.4.4 Condizionamento dei provini prima delle prove**

I provini devono essere condizionati esponendoli a condizioni di umidità prestabilite oppure fino a raggiungere tenori di umidità prestabiliti. I metodi di condizionamento da seguire sono:

- condizionamento per essiccazione all'aria;
- condizionamento per essiccazione in stufa;
- condizionamento a un tenore di acqua del 6%;
- condizionamento per immersione.

#### **3.1.4.5 Area sottoposta a carico**

##### Area lorda

L'area lorda della superficie sottoposta a carico, espressa in mm<sup>2</sup>, deve essere ottenuta moltiplicando la lunghezza di ciascun provino per la larghezza. Lo stesso metodo di calcolo dell'area lorda deve essere applicato anche nei casi in cui la prova deve essere eseguita con una forza di compressione che non è normale alla faccia di posa, inserendo però nel calcolo la larghezza e l'altezza oppure la lunghezza e l'altezza del provino secondo i casi.

##### Area netta di carico di elementi di muratura con incavi che in opera sono riempiti di malta

Nei casi in cui l'area netta di carico di elementi di muratura con incavi che vengono riempiti di malta durante la messa in opera è minore del 35% dell'area lorda, si deve calcolare la resistenza alla compressione tenendo conto dell'area netta della superficie caricata della faccia di posa con incavi. Se l'area netta di carico degli elementi per muratura con incavi per malta è minore del 35% dell'area lorda, la resistenza alla compressione deve essere calcolata tenendo conto dell'area lorda dell'elemento di muratura. Nel caso di elementi di muratura con incavi per malta su ambedue le facce di posa l'area netta di carico da utilizzare deve essere la minore delle due.

Quando l'incavo ha una forma regolare, determinare la superficie su ciascun provino tenendo conto dei principi della geometria. Per incavi rettangolari determinare l'area degli incavi di ciascun provino misurandone la lunghezza e la larghezza al perimetro esterno con un regolo rigido di acciaio. Le misurazioni devono essere effettuate al più prossimo millimetro. Calcolare l'area netta di carico di ciascun provino come differenza tra l'area lorda della faccia di posa e l'area dell'incavo.

#### **3.1.5 Procedura di prova**

##### **3.1.5.1 Sistemazione dei provini nella macchina di prova**

Pulire le superfici portanti della macchina di prova e togliere tutte le particelle dalle facce di posa del provino. Allineare accuratamente il provino nel centro della piastra che poggia su un supporto a rotula in modo da ottenere un assetto uniforme. Elementi con un unico incavo devono essere disposti con l'incavo rivolto verso l'alto. Elementi con un incavo su ambedue le facce di posa devono essere disposti con l'incavo più largo rivolto verso l'alto.

Non utilizzare nessun materiale di riempimento, fatta eccezione per gli elementi di muratura a semplice rottura di giunto o rottura di giunto multipla che sono stati rettificati in precedenza. In tal caso occorre disporre quattro nastri rigidi di acciaio

aventi la stessa larghezza delle facce di posa (pareti longitudinali) più lunghi di 50 mm, due sopra il provino e due sotto il provino in modo che la lunghezza sporgente sia uguale da ambo i lati.

### 3.1.5.2 Applicazione del carico

All'inizio utilizzare una velocità di carico conveniente per passare quindi, raggiunta circa la metà del carico massimo presunto, ad una velocità che consenta di raggiungere il carico massimo entro circa 1 min. Annotare il carico massimo che è stato raggiunto.

Tabella 2: Velocità di carico.

Presunta resistenza alla compressione (N/mm <sup>2</sup> )	Velocità di carico (N/mm <sup>2</sup> )/s
<10	0,05
da 11 a 20	0,15
da 21 a 40	0,3
da 41 a 80	0,6
>80	1,0

### 3.1.6 Misurazioni da effettuare

Prima dell'esecuzione della prova sarà necessario provvedere all'identificazione geometrica dei blocchi, misurando le seguenti grandezze:

- dimensione dei blocchi su ciascuna lato;
- altezza media dei blocchi (h);
- area di carico (A);
- n è il numero dei provini.

Durante la prova, sarà necessario registrare:

- carico massimo (N).

### 3.1.7 Calcolo e valutazione dei risultati

#### 3.1.7.1 Resistenza caratteristica a compressione nella direzione dei carichi verticali

Come riportato in C11.10.1.1.1.1 [86], la resistenza di ciascun provino è calcolata dividendo il carico massimo raggiunto per l'area di carico.

$$f_{bi} = \frac{N}{A} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Il valore della resistenza caratteristica  $f_{bk}$  si ricava dalla formula seguente, applicata ad un numero minimo di 30 elementi:

$$f_{bk} = f_{bm}(1 - 1.64 \delta) \quad [\text{N/mm}^2]$$

dove:

$f_{bm}$ : media aritmetica della resistenza dei singoli elementi  $f_{bi}$ ;

s: stima dello scarto quadratico medio;

$\delta = \frac{s}{f_{bm}}$ : coefficiente di variazione.

$f_{bk}$  non è accettabile per  $\delta > 0.2$ .

Nel caso in cui i campioni siano *minori di 30*, si può utilizzare la formula legata alla determinazione della resistenza a compressione delle murature, come suggerito al capitolo 11 della NTC 2008 ([87], 11.10.3.1.1 Determinazione sperimentale della resistenza a compressione)

$$f_k = f_m - ks \quad [\text{N/mm}^2]$$

dove il valore di k è riportato nella tabella seguente.

**Tabella 3: Coefficiente k dipendente dal numero di provini n.**

n	6	8	10	12	20
k	2.33	2.19	2.1	2.05	1.93

Se il numero delle prove eseguite non è sufficiente, se lo si ritiene adeguato al caso in esame, è possibile considerare quanto scritto al paragrafo 11.10.3.1.2 delle NTC 2018 [88], di seguito riportato.

*11.10.3.1.2 Stima della resistenza a compressione.*

*In sede di progetto, per le murature formate da elementi artificiali pieni o semipieni il valore della resistenza caratteristica a compressione della muratura  $f_k$  può essere dedotto dalla resistenza caratteristica a compressione degli elementi e dalla classe di appartenenza della malta tramite la Tab. 11.10.VI. Ai fini dell'uso di tale tabella, nel caso la resistenza a compressione degli elementi sia dichiarata mediante il suo valore medio  $f_{bm}$ , in assenza di una determinazione sperimentale diretta, la resistenza caratteristica dell'elemento  $f_{bk}$  può essere stimata mediante la relazione  $f_{bk} = 0.8 f_{bm}$ .*

### 3.1.8 Resoconto di prova

Il resoconto di prova deve contenere le informazioni seguenti:

- a) il numero, il titolo e la data di pubblicazione della presente norma europea;
- b) il nome dell'organismo che ha effettuato il campionamento e il metodo di campionamento utilizzato;
- c) la data della prova;
- d) il tipo, l'origine e la designazione dell'elemento di muratura;
- e) il numero di provini del campione;
- f) la data di consegna dei campioni al laboratorio di prova;
- g) uno schizzo del provino, se necessario, che mostri l'estensione della superficie di carico, l'altezza e l'orientamento del carico;
- h) il metodo di condizionamento;
- i) per gli elementi condizionati al 6%, il contenuto d'acqua al momento della prova;
- j) il metodo utilizzato per la preparazione delle superfici;
- k) il carico di rottura, in N, e le dimensioni misurate di ciascun provino in mm;
- l) la resistenza alla compressione dei provini al più prossimo 0.1 N/mm<sup>2</sup> e il coefficiente di variazione del campione al più prossimo 0.1%;
- m) la resistenza alla compressione del campione, in N/mm<sup>2</sup>, al più prossimo 0.1 N/mm<sup>2</sup>;
- n) se richiesto, il valore della resistenza alla compressione normalizzata in N/mm<sup>2</sup> al più prossimo 0.1 N/mm<sup>2</sup>;
- o) eventuali osservazioni.

### 3.1.9 Bibliografia

- [86] Circolare Ministeriale n.° 7 del 21/01/2019. Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018. G.U. n. 35 del 11/02/2019.
- [87] NTC 2008. D.M. del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 14/01/2008. Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni. G.U. n. 29 del 04.02.2008, S.O. n. 30. 2.
- [88] NTC 2018. D.M. del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17/01/2018. Aggiornamento delle «Norme Tecniche per le Costruzioni». G.U. n. 42 del 20/02/2018.
- [89] UNI EN 772-1 del 2015, Metodi di prova per elementi per muratura - Parte 1: Determinazione della resistenza a compressione.

## 3.2 PROVA PENETROMETRICA CON DRMS (DRMS)

### 3.2.1 Definizione della tecnica di indagine

Il dispositivo DRMS (Drilling Resistance Measurement System) è un trapano strumentato che permette di misurare la forza necessaria alla foratura di materiali lapidei e malte.

Durante la prova sono mantenute costanti sia la velocità di avanzamento ( $v$ ) che la velocità di rotazione ( $\omega$ ) della punta e il sistema misura con continuità la forza di foratura. Il risultato finale della prova è una curva che evidenzia il profilo della forza in funzione della profondità. Dall'analisi statistica dei dati è possibile stimare le caratteristiche del campione eseguendo fori di 5 mm di diametro. Questo dispositivo può essere usato sia in situ sia in laboratorio.

Il principio alla base di questo metodo di indagine è quello di correlare la resistenza alla perforazione della malta con le sue caratteristiche meccaniche. La taratura dello strumento viene eseguita riproducendo malte in laboratorio, e correlando i risultati delle prove a compressione (UNI EN 1015-11/2007, [92]) con i risultati delle prove con DRMS su provini di dimensioni standard 40x40x160 mm.

La scelta dei parametri di foratura, ovvero la velocità di avanzamento ( $v$ ) e la velocità di rotazione della punta ( $\omega$ ), è determinata in relazione ad una buona lettura dei risultati ed un minimo margine di scarto rispetto al massimo valore registrabile dalla cella di carico (100 N). La forza di foratura è direttamente proporzionale alla velocità di avanzamento ( $v$ ) e inversamente proporzionale alla velocità di rotazione ( $\omega$ ). Pertanto, a parità di parametri di prova, l'incremento della forza di foratura è direttamente proporzionale alle caratteristiche meccaniche della malta.

Utilizzando parametri di prova standard, validi per la maggior parte delle malte di murature esistenti, a seguito di un'attenta analisi statistica dei risultati, è possibile stimare direttamente le caratteristiche meccaniche della malta.

### 3.2.2 Simbologia adottata

La simbologia adottata è la seguente:

- $\omega$ , misurata in rpm (rotazioni al minuto), è la velocità di rotazione della punta;
- $v$ , misurata mm/minuto, è la velocità di avanzamento della punta;
- $d$ , misurata in mm, è la profondità di perforazione della prova;
- $DR_i$ , misurata in N, è la resistenza alla foratura misurata all' $i$ -esimo valore di profondità;
- DB è la denominazione della punta;
- $nDB$  è il numero progressivo di foro eseguito con la punta DB;
- M, è la tipologia di muratura dove vengono eseguite le prove;
- $nM$  è il numero di foro eseguito in una data muratura;
- $DR_{n,all,d}$  è la resistenza media della prova  $n$ -esima considerando tutti i valori su tutta la profondità di perforazione;
- $x_{1,n} - x_{2,n}$  è l'intervallo di valori di profondità di perforazione caratteristico della malta per la prova  $n$ -esima;
- $DR_{n,all}$  è la resistenza media della prova  $n$ -esima rispetto all'intervallo  $x_{1,n} - x_{2,n}$ ;
- $DR_{all}$  è la resistenza media di tutte le prove considerando tutti i valori rispetto ai singoli intervalli  $x_{1,n} - x_{2,n}$ ;
- $DR_{mo,all}$  è la moda dei dati di tutte le prove considerando tutti i valori rispetto ai singoli intervalli  $x_{1,n} - x_{2,n}$ ;
- $DR_{out,inf} - DR_{out,sup}$ , è l'intervallo dei valori di  $DR_i$  per eliminare gli outliers relativo a tutte le prove;
- $DR_n$  è la resistenza media della prova  $n$ -esima eliminando gli outliers rispetto all'intervallo  $x_{1,n} - x_{2,n}$ ;
- $DR$  è la resistenza media di tutte le prove eliminando gli outliers rispetto ai singoli intervalli  $x_{1,n} - x_{2,n}$ , ovvero il valore caratteristico della resistenza alla perforazione della tipologia di malta oggetto di indagine;
- CV è il coefficiente di variazione eseguita la elaborazione statistica del campione, rispetto ai singoli intervalli  $x_{1,n} - x_{2,n}$ .

### 3.2.3 Strumentazione di prova

Il sistema è costituito da due componenti principali: una parte meccanica e un'unità elettronica.



Figura 36: Strumentazione di prova.

L'apparecchiatura è costituita da:

- Trapano strumentato che misura la resistenza alla perforazione del materiale oggetto di indagine, attraverso una cella di carico con fondo scala a 100 N, collegata alla punta del trapano.
- PC con apposito software per il controllo della prova e l'elaborazione dei risultati.

Durante la prova viene misurata con continuità la forza resistente alla foratura, mantenendo costanti sia la velocità di rotazione della punta che la velocità di avanzamento. Il risultato è una curva che evidenzia l'andamento della forza di foratura in funzione della profondità di penetrazione. Analizzando statisticamente il risultato della prova è possibile stabilire la qualità della malta. Nel corso delle prove vengono eseguiti dei fori di comparazione su provini di malta campione, con resistenza nota, al fine di valutare il grado di usura delle punte.

La prova può essere eseguita con vari parametri di foratura, la velocità di rotazione ( $\omega$ ) può variare da 100 a 1200 rpm, mentre la velocità di avanzamento ( $v$ ) può essere impostata da 1 a 40 mm/min, entrambi i parametri rimangono costanti durante tutto lo svolgimento della prova.

Un'attenzione particolare deve essere rivolta alla scelta delle punte. In funzione della superficie da provare, ovvero giunti di malta di limitato spessore, è stato deciso di utilizzare punte di diametro pari a 5 mm.

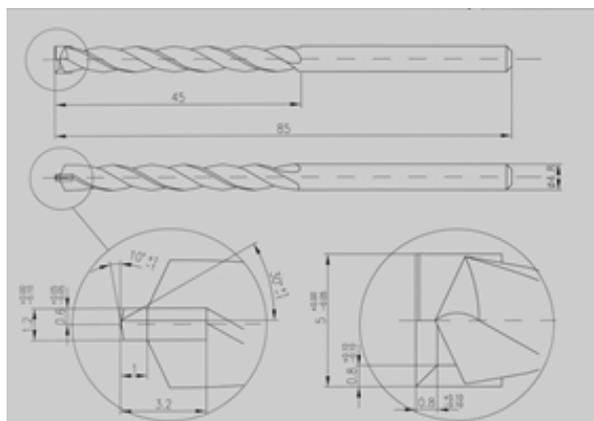


Figura 37: Caratteristiche delle punte.

### 3.2.4 Preparazione dell'elemento da testare

Per prove in situ è necessario individuare una zona di muratura piuttosto ampia, di dimensioni circa un metro per un metro. Se nella muratura è presente uno strato d'intonaco, se ne deve prevedere la rimozione, avendo cura di ripulire adeguatamente i giunti di malta.

### 3.2.5 Procedura di prova

Prima di eseguire la prova con DRMS è necessario stabilire una serie di parametri.

È consigliabile impostare una profondità di perforazione al valore massimo (40 mm), al fine di ottenere più informazioni possibili tra la superficie e la parte interna della muratura.

I parametri di prova standard su cui è stata tarata la stima delle caratteristiche meccaniche sono i seguenti:

- velocità di rotazione,  $\omega = 300$  rpm
- velocità di avanzamento,  $v = 40$  mm/min

È necessario utilizzare punte del diametro pari a 5 mm preventivamente testate e tarate su campioni di malta di riferimento; inoltre si consiglia di impiegare nuove punte quando evidenziano segni di usura. L'usura è controllabile tramite fori regolari eseguiti con gli stessi parametri su pietra campione (malta di riferimento) che presenti caratteristiche paragonabili alla malta oggetto di prova. La durata della punta è funzione delle caratteristiche della malta, ovvero della matrice di legante e della sabbia. In generale, eseguendo prove di 40 mm di profondità su malte comuni, si raggiungono mediamente 100 fori per punta.

La prova necessita della presenza di due operatori; un operatore ha il compito di posizionare lo strumento in prossimità della muratura, con la punta quasi a contatto con il giunto di malta. L'altro operatore provvede all'azionamento e al controllo dello strumento tramite PC portatile.

### 3.2.6 Misurazioni da effettuare

Per avere un campione di dati statisticamente rappresentativo si consiglia di eseguire 20-30 fori per ciascuna muratura di cui si vuole stimare le caratteristiche meccaniche della malta. Il campionamento dei dati è di 2 valori registrati ogni 0.1 millimetri; quindi, con fori di 40 mm di profondità si ottengono  $40 \times 20 = 800$  valori ogni prova. Se si eseguono 20 fori, il campione di dati su cui compiere le analisi statistiche è pari a  $800 \times 20 = 16\,000$  valori.

### 3.2.7 Metodo di calcolo

Una volta ordinati i dati in base al numero progressivo di prova, si calcolano le statistiche elementari come la media ( $DR_{n,all,d}$ ), si stabiliscono i singoli intervalli  $x_{1,n} - x_{2,n}$  e si ricalcolano le statistiche per tale insieme di dati ( $DR_{n,all}$ ). Questo passaggio è necessario per fare una prima selezione dei valori, eventualmente scartando i dati iniziali perché caratteristici di altro materiale (ad esempio residui d'intonaco) e i dati finali per un possibile accumulo di materiale sul fondo del foro. L'individuazione dell'intervallo  $x_{1,n} - x_{2,n}$  viene fatta analizzando i risultati grafici di prova.

Considerando il campione complessivo dei dati rispetto ai singoli intervalli  $x_{1,n} - x_{2,n}$ , si calcola la moda  $DR_{mo,all}$  e si individuano gli *outliers* ( $DR_{out,inf} - DR_{out,sup}$ ) tramite calcolo statistico e rappresentazione grafica dei box-plot.

Si esegue questo procedimento per evidenziare quale sia il reale valore della malta, eliminando i valori anomali (*outliers*) derivanti dalla presenza di vuoti o in generale di altri materiali che provocano sia valori molto bassi sia valori troppo elevati di DR durante lo svolgimento della prova.

Si eliminano gli *outliers* e si calcolano le statistiche finali per la singola prova ( $DR_n$ ), per la totalità delle prove ( $DR$ ) [quest'ultimo è il valore di resistenza alla foratura caratteristico della malta], ed il coefficiente di variazione  $CV$ .

Sulla base dei valori ottenuti delle grandezze sopra esposte è possibile utilizzare una delle correlazioni seguenti per la stima della resistenza a compressione della malta. Le correlazioni sono definite in base a quanto riportato nel paragrafo 3.2.9 e nel documento [96] in corso di pubblicazione. È possibile utilizzare la formula  $R_C = 1.230 \cdot DR^{0.647} \cdot CV^{-0.487}$  nel caso in cui il  $CV$  post elaborazione appartenga all'intervallo 25-65%.

Si consiglia di applicare un 20% di abbattimento al valore trovato di resistenza in virtù del fatto che le formule sotto espresse sono state calibrate attraverso una estesa campagna sperimentale di laboratorio.

$$R_C = 1.176 DR + 0.464$$

$$R_C = 1.279 DR$$

$$R_C = 1.230 \cdot DR^{0.647} \cdot CV^{-0.487}$$

$$R_C = 1.225 DR_{mo,all} + 0.814$$

$$R_C = 1.416 DR_{mo,all}$$

Una volta stimata la qualità della malta e classificata la tipologia di muratura è possibile stabilire le caratteristiche meccaniche della muratura secondo le indicazioni riportate nella Circ. Min. n. 7/2019 [90].

### 3.2.8 Resoconto di prova

Il resoconto di prova deve contenere le seguenti informazioni:

- a) operatori della prova;
- b) la data e il luogo di esecuzione della prova;
- c) la tipologia di muratura;
- d) un disegno con la localizzazione dei punti di misura sul manufatto;
- e) le immagini fotografiche dei giunti sottoposti a prova con la descrizione dell'aspetto della malta e del giunto;
- f) la denominazione della punta;
- g) il numero progressivo di foro eseguito con la punta;
- h) il numero progressivo di foro eseguito per una data muratura;
- i) i parametri di prova ( $\omega$ ,  $v$ ,  $d$ );
- j) la resistenza media della prova  $n$ -esima considerando tutti i valori su tutta la profondità di perforazione ( $DR_{n,all,d}$ );
- k) le eventuali osservazioni.

### 3.2.9 Note sull'interpretazione dei risultati

La taratura dello strumento è stata eseguita attraverso sperimentazione in laboratorio correlando i risultati delle prove con DRMS con prove a compressione secondo le UNI EN 1015-11/2007 su provini di dimensioni standard 40x40x160 mm. Sono state confezionate diverse tipologie di malte con caratteristiche meccaniche variabili da 1.3 a 12.8 N/mm<sup>2</sup>, ottenute con diverse classi di leganti e sabbia di fiume. Per ciascuna classe di malta sono stati realizzati (un minimo di) 15 provini, 6 dei quali sono stati sottoposti a prova di flessione-compressione ed altri 6 con il sistema DRMS.

Le prove con DRMS sono state eseguite con i seguenti parametri:

- velocità di rotazione,  $\omega = 300$  rpm
- velocità di avanzamento,  $v = 40$  mm/min

Pertanto se la prova *non* viene eseguita secondo tali standard è necessaria una nuova taratura, e i risultati possono essere interpretati solamente in termini relativi e non assoluti.

Il risultato ottenuto dalla prova DRMS è valido per caratterizzare esclusivamente la resistenza meccanica della malta ma non fornisce indicazioni sulla continuità ed omogeneità della disposizione dei filari di malta o sulla loro geometria nel paramento murario, aspetti che influenzano in modo significativo i parametri meccanici finali di una muratura.

### 3.2.10 Bibliografia

#### Normative

- [90] Circolare Ministeriale n.° 7 del 21/01/2019. Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018. G.U. n. 35 del 11/02/2019.
- [91] NTC 2018. D.M. del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17/01/2018. Aggiornamento delle «Norme Tecniche per le Costruzioni». G.U. n. 42 del 20/02/2018.
- [92] UNI EN 1015-11, 'Methods of test for mortar for masonry. Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar', UNI, (2007).

#### Riferimenti scientifici

- [93] Del Monte E., Vignoli A.. (2008). In situ mechanical characterization of the mortar in masonry buildings with drams. 1st International RILEM Symposium on site assessment of concrete, masonry and timber structures. Varenna ,Italy. 1-2 september 2008. (pp. 421-430). : RILEM Publications S.A.R-L.
- [94] Del Monte E., Ortolani B., Galano L., Vignoli A.. (2008). Structural identification of existing masonry buildings. 1st International RILEM Symposium on site assessment of concrete, masonry and timber structures. Varenna ,Italy. 1-2 september 2008. (pp. 903-912). : RILEM Publications S.A.R-L.
- [95] Del Monte E., Galano L., Ortolani B., Vignoli A.. (2008). Structural identification and seismic analysis of an existing masonry building. Seismic Engineering Conference Commemorating the 1908 Messina and Reggio Calabria Earthquake. Reggio Calabria,Italia. 8-11 july 2008. (pp. 1719-1726). American Institute of Physics.
- [96] Del Monte E., Boschi S., Galano L., Prediction of compression strength of ancient mortars through in-situ drilling resistance technique. Submitted to Constuction and building Materials. 2019.
- [97] Tiano P., Delgado Rodrigues J., De Witte E., Verge-Belmin V., Massey S.R., Snethelage, Costa D., Cadot-Leroux L., Garrod E. and Singer B. 'The conservation of monuments: a new method to evaluate consolidating treatments', International Journal for Restauration of Buildings and Monuments, 6 (2), (2000), 133-150.
- [98] Tiano P. and Viggiano A., 'A new diagnostic tool for the evaluation of the hardness of natural and artificial stones', International Journal for Restoration of Buildings and Monuments 6 (5), (2000), 555–566.

### **3.3 ANALISI MACROSCOPICA E MICROSCOPICA DELLA MALTA (A<sub>M</sub>)**

#### **3.3.1 Premessa**

Il contenuto della presente parte è stato redatto sulla base delle indicazioni contenute all'interno di "Atlante delle malte antiche in sezione sottile al microscopio ottico" di Pecchioni E., Fratini F., Cantisani E. – Kermes Quaderni – Nardini Editore.

Si ringrazia il Dott. Geol. Fabio Fratini per la gentile collaborazione nella redazione del presente documento e si rimanda all'Istituto per la Conservazione e la Valorizzazione dei Beni Culturali del Consiglio Nazionale delle Ricerche per ulteriori approfondimenti.

#### **3.3.2 Introduzione**

Preliminarmente alla definizione delle possibili tecniche di indagini su campioni di malta, risulta necessario proporre alcune nozioni di base relativamente alla composizione della malta stessa, definita dal Documento UNI 10924 (2001) come "una miscela di leganti inorganici od organici, aggregati prevalentemente fini, acqua ed eventuali aggiunte di additivi organici e/o inorganici (o miscela di solo legante ed acqua) in proporzioni tali da conferire all'impasto, allo stato fresco un'opportuna lavorabilità e, allo stato indurito, adeguate caratteristiche fisiche (porosità, permeabilità all'acqua etc..) meccaniche (resistenza, deformabilità, aderenza, etc..), di aspetto, di durabilità etc..."

Si ha quindi che una malta risulta composta da:

- legante;
- aggregato;
- acqua;
- eventuale aggiunta di composti idraulicizzanti;
- eventuali additivi o aggiunte.

Le indagini che possono essere svolte sulla malta spaziano da quelle di tipo chimico, mineralogico, petrografico e fisico-meccanico. Si riporta l'elenco delle principali indagini per la caratterizzazione qualitativa della malta:

- osservazione macroscopica del campione di malta prelevato direttamente dall'apparecchiatura muraria;
- osservazione in sezione sottile al microscopio ottico in luce trasmessa polarizzata, allo scopo di indagare la tipologia di impasto della malta (rapporto legante/aggregato, classe di legante, composizione e granulometria dell'aggregato, macroporosità etc...);
- analisi diffrattometrica a raggi X (XRD), per determinarne la composizione mineralogica.

Prima della descrizione di ciascuna tipologia di analisi, si riportano alcune nozioni preliminari, utili a comprendere le indagini di caratterizzazione della malta.

#### **3.3.3 Nozioni preliminari**

##### **3.3.3.1 Caratterizzazione del legante**

Il legante è il componente dell'impasto che permette di far indurire l'impasto. L'indurimento avviene attraverso la reazione di presa, differente in base al tipo di legante:

- legante da calce aerea calcica (grassello, calce idrata in polvere), ottenuto per cottura a temperature di 800-950°C di calcari puri; fa presa ed indurisce per carbonatazione all'aria dell'idrossido di calcio;
- legante da calce aerea magnesiaca (grassello), ottenuto per cottura a temperature di 800-950°C di calcari dolomitici; fa presa ed indurisce per carbonatazione all'aria dell'idrossido di calcio e per parziale carbonatazione dell'idrossido di magnesio. Tale legante è caratterizzato da disomogeneità composizionale (segregazione di fasi magnesiache);
- legante da calce aerea (grassello) con aggiunta di materiale idraulicizzante; fa presa ed indurisce in parte per carbonatazione all'aria dell'idrossido di calcio ed in parte per reazioni di questo con i componenti idraulicizzanti e formazione di silicati di calcio idrati e alluminati di calcio idrati;
- legante da calce idraulica naturale, ottenuto per cottura a temperature di 800-950°C di calcari marnosi o silicei; fa presa all'aria ed in condizioni di elevata umidità in parte per carbonatazione dell'idrossido di calcio e per formazione di silicati ed alluminati di calcio idrati;
- legante idraulico moderno (cemento moderno); fanno presa all'aria o anche in condizioni di elevata umidità per formazione di silicati ed alluminati di calcio idrati. Tra questi, il "cemento romano" (brevetto Parker 1796, ottenuto da cottura a temperature di 900-1100°C di calcari marnosi con argilla >25%) ed il "cemento Portland" (metà del XIX sec., derivante da cottura a circa 1400°C di calcari marnosi con argilla >25%);
- legante gessoso, ottenuto da cottura a bassa temperatura (160-200°C) di roccia gessosa.

La caratterizzazione della tipologia di legante può essere svolta tramite osservazione al microscopio in sezione sottile, in quanto, con tale strumento risulta possibile individuare la presenza di componenti idraulicizzanti (granuli di pozzolana, scorie di forgiatura, cocchiopesto etc...).

### 3.3.3.2 Grumi

La presenza all'interno del legante di frammenti che macroscopicamente mostrano colore biancastro e aspetto incoerente (definiti genericamente "grumi") risulta molto importante in quanto fornisce informazioni sulla tecnologia di realizzazione della calce: se presenti significa che essa è stata prodotta con tecnologia tradizionale (spegnimento di zolle di calce viva in una vasca per creazione di grassello). Tramite osservazione al microscopio in sezione sottile, è possibile riconoscere tali grumi e caratterizzarli (grumi di legante non amalgamato, incotti, stracotti di pietra da calce, stracotti idratati e carbonatati). La presenza eccessiva di grumi indica una scadente tecnologia produttiva: in base al tipo di grumo, sono possibili deduzioni sulla fase del processo di realizzazione della malta che è stato scarsamente curato.

### 3.3.3.3 Caratterizzazione dell'aggregato

L'aggregato di una malta può essere di origine naturale o di frantumazione. Tale elemento limita i fenomeni di ritiro, in quanto assolve una funzione di scheletro della malta.

Lo studio della composizione dell'aggregato può fornire informazioni sulle zone di approvvigionamento dello stesso.

È inoltre possibile eseguire analisi sulla granulometria tramite software dedicati, previa disgregazione del campione di malta e vagliatura della polvere in differenti setacci.

Lo studio morfometrico permette di avere indicazioni sull'origine naturale o artificiale dell'aggregato; si definiscono:

- arrotondamento, che riguarda la maggiore o minore angolosità; esso indica la distanza ed il tempo necessari per il trasporto del sedimento dall'area sorgente a quella di deposito. La velocità di arrotondamento ovviamente dipende anche dalla durezza del materiale;

- sfericità, che invece rappresenta quanto un granulo si avvicina alla forma sferica, e dipende dalla struttura della roccia da cui provengono i frammenti.

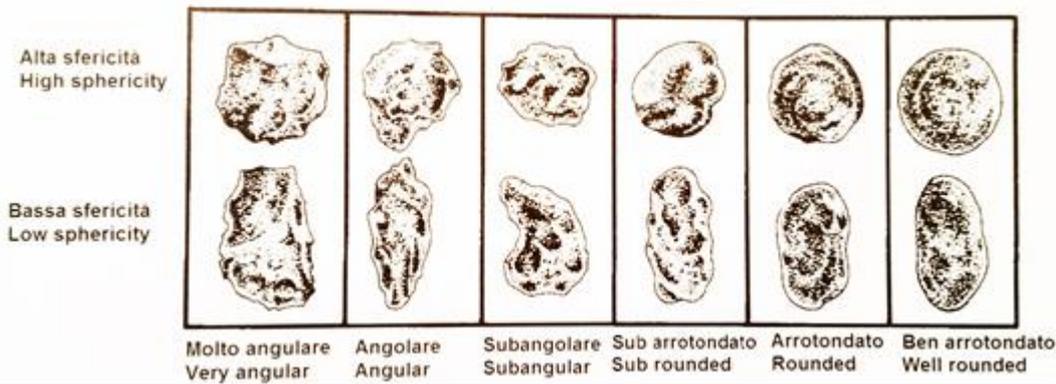


Figura 38: Abaco illustrativo delle due caratteristiche di arrotondamento e sfericità (Raymond L.A., 1995).

### 3.3.3.4 Additivi ed aggiunte

Gli additivi che possono venire aggiunti nella realizzazione di una malta sono prevalentemente di natura organica e sono normalmente utilizzati per malte per stucchi, sigillature etc... Si possono trovare ad esempio tracce di uovo, resine, colle animali. Tali additivi possono avere funzione adesiva, fluidificante, accelerante o ritardante della presa etc...

L'aggiunta di tali additivi non viene direttamente evidenziata durante lo studio al microscopio ottico in luce trasmessa, ma bensì risulta necessario illuminare la sezione con luce ultravioletta: in caso di presenza di tali sostanze, si manifesta fluorescenza.

### 3.3.3.5 Rapporto legante/aggregato

È possibile distinguere impasti con elevato rapporto legante/aggregato (impasti grassi o malte grasse) e impasti con basso rapporto (impasti magri o malte magre).

NOTA: tale denominazione non è da confondersi con quella relativa alla calce (grassa o magra), che invece si riferisce alla resa in grassello, cioè rapporto tra volume di calce spenta e peso di calce viva necessario.

L'informazione sul rapporto legante/aggregato può essere acquisita mediante analisi di immagine al microscopio o tramite tavole comparative in via qualitativa. Il rapporto considerato come ottimale è  $L/A=1/3$ . Impasti più grassi ( $L/A>1/3$ ) sono soggetti a fessurazione da ritiro, mentre quelli più magri ( $L/A<1/3$ ) a disgregazione, in quanto il legante non è in quantità sufficiente a garantire consistenza e compattezza all'impasto.

### 3.3.3.6 Porosità

La presenza di pori in un impasto di malta è riferibile a fattori quali eccesso di acqua di impasto, scarsità di matrice legante, presenza di bolle d'aria intrappolate nell'impasto, segregazione della miscela, fessurazioni da ritiro e fenomeni successivi alla presa come dissoluzioni o fratturazione per gelività.

Per malte di tipo storico è possibile riscontrare porosità da presenza di aggiunte come paglia che, decomponendosi, lascia vuoti nella struttura. Dall'osservazione in sezione sottile, non è possibile osservare pori con dimensioni minori di 10  $\mu\text{m}$  (dipendenti da eccesso di acqua di impasto e da tipo di legante). Si possono quindi solamente desumere informazioni circa la macroporosità dell'impasto mediante microscopio ottico.

### **3.3.3.7 Processi secondari e prodotti di alterazione**

Le soluzioni acquose circolanti nelle murature possono innescare processi di dissoluzione e ricristallizzazione per il legante delle malte. Ad esempio, in caso di attacco solfatico, è possibile osservare cristallizzazioni di gesso nelle porosità.

### **3.3.3.8 Composizione mineralogica**

Per lo studio mineralogico delle malte, è possibile ricavare informazioni sulla composizione totale (legante ed aggregato congiuntamente) tramite la tecnica della diffrattometria a raggi X, che serve a studiare le componenti cristalline in matrici complesse. Tale studio fornisce informazioni sia di tipo qualitativo che quantitativo.

## **3.3.4 Definizione e descrizione delle tecniche di indagine**

Si riporta nel seguito una breve descrizione delle principali tipologie di indagine ad oggi disponibili per l'acquisizione di informazioni riguardanti la malta costituente le murature. Tutte le indagini descritte mirano alla caratterizzazione qualitativa della stessa, senza quindi fornire indicazioni di tipo meccanico quantitativo, per il quale è necessario eseguire altre tipologie di test (ad esempio, prova penetrometrica con trapano strumentato DRMS, §3.2).

### **3.3.4.1 Osservazione macroscopica**

L'osservazione macroscopica viene svolta direttamente sul campione di malta estratto in situ, prima di procedere alle successive analisi di dettaglio, e permette unicamente una prima caratterizzazione "a vista", nei confronti sia della colorazione della malta e degli aggregati se ben visibili ad occhio nudo) sia del livello di coesione/consistenza della malta.

### **3.3.4.2 Osservazione in sezione sottile al microscopio ottico**

Questa tipologia di indagine fornisce il maggior quantitativo di informazioni sulla natura del materiale componente la malta, anche se non permette una descrizione completa di tutte le caratteristiche della stessa. Tale studio permette di riconoscere il tipo di legante e la natura dell'aggregato (tipo di pietra da calce utilizzata, rapporto calce-aggregato, origine dell'aggregato e composizione della malta).

La descrizione deve seguire uno schema appropriato, in relazione alla norma UNI EN 11176 (2006) "Descrizione petrografica di una malta", la quale prevede le seguenti descrizioni:

- descrizione microscopica del legante;
- descrizione dell'aggregato;
- descrizione delle eventuali aggiunte;
- rapporto legante/aggregato;
- descrizione della macroporosità;
- descrizione in sezione sottile dei prodotti di alterazione.

Da sottolineare che, per la preparazione delle sezioni sottili di campioni di malte, è necessario considerare che il materiale deve essere messo in sezione senza orientazione nel caso di malte di allettamento.

### **3.3.4.3 Analisi diffrattometrica**

La tecnica della diffrattometria a raggi X è una tra le più utilizzate per lo studio delle componenti cristalline in una matrice complessa. Fornisce informazioni qualitative e quantitative. Per le malte, fornisce una composizione totale, senza distinguere legante da aggregato. Il metodo sfrutta gli effetti dell'interferenza di una radiazione X con il reticolo cristallino.

Il reticolo, colpito da una radiazione di lunghezza d'onda  $\lambda$  dello stesso ordine delle distanze dei piani reticolari, diffrange la radiazione secondo un determinato angolo  $\theta$ . Tale principio è noto come legge di Bragg.

La diffrazione dei raggi X da parte dei vari piani reticolari fornisce una serie di picchi variabili per posizione ed intensità, che costituiscono lo spettro di diffrazione caratteristico della sostanza cristallina analizzata. Con tale spettro, risulta possibile caratterizzare la composizione mineralogica della malta indagata.

### **3.3.5 Strumentazione di prova**

Per le analisi di caratterizzazione microscopica della malta è necessario eseguire osservazione in sezione sottile al microscopio ottico in luce trasmessa polarizzata (ad esempio microscopio Zeiss AXIO Scope A1).

Per quanto riguarda invece le analisi di caratterizzazione mineralogica, è necessario eseguire analisi diffrattometrica a raggi X (XRD) mediante Diffrattometro (ad esempio X'Pert PRO PANalytical ad anticatodo di rame, dotato di multirivelatore X' Celerator e sistema per microdiffrazione).

### **3.3.6 Bibliografia**

#### **Normative**

[99] UNI 10924: 2001 – Malte per elementi costruttivi e decorativi: classificazione e terminologia.

[100] UNI 11176: 2006 - Descrizione petrografica di una malta.

[101] UNI 11305: 2009 Beni culturali - Malte storiche - Linee guida per la caratterizzazione mineralogico-petrografica, fisica e chimica delle malte.

#### **Riferimenti scientifici**

[102] Pecchioni E., Fratini F., Cantisani E. Atlante delle malte antiche in sezione sottile al microscopio ottico", Kermes Quaderni – Nardini Editore.