

L'IMPIEGO DEGLI ULTRASUONI NELLA VERIFICA DEL COMPORTAMENTO TENSIONALE GENERATO DAI CARICHI ASSIALI AGENTI SULLE MURATURE

Giacomo Ferrari
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Istituto per le Tecnologie della Costruzione

SOMMARIO

Fra le prove non distruttive adatte ad una indagine esaustiva delle caratteristiche meccaniche di una muratura di mattoni pieni, il metodo ultrasonico ha ottenuto un apprezzabile diffusione per il basso costo e la facilità d'impiego; il metodo consiste essenzialmente nella rilevazione della velocità di propagazione di impulsi ultrasonici che si propagano in un solido da caratterizzare acusticamente, solido che nella presente indagine teorico sperimentale è stato materializzato da un rappresentativo campione di elementi murari composti da blocchi pieni di laterizio collegati fra loro con malta cementizia.

I problemi emersi dalla analisi dei risultati della sperimentazione sono di natura induttiva; essi consistono in sostanza nel risalire, dalla conoscenza forzosamente limitata e parziale dei valori assunti dalla grandezza velocità di propagazione rilevata sulla muratura, alla più adatta definizione statistica della distribuzione possibile per la totalità dei valori che la velocità può assumere sotto predeterminate condizioni di sforzo imposte dallo stato tensionale indotto nella muratura durante la rilevazione della onda ultrasonora; stato tensionale, quest'ultimo, generato tramite l'impiego di una pressa utilizzata per simulare le condizioni imposte dal carico assiale agente sugli elementi esaminati.

Scopo del lavoro è di presentare una procedura interpretativa dei dati per valutare lo stato tensionale a compressione presente nelle murature usufruendo della variabile velocità ultrasonica, acquisita sui campioni espressamente predisposti per questo particolare tipo di sperimentazione, destinata a caratterizzare una determinata tipologia di muratura piena .

Ferrari Giacomo ,CNR - ITC, Via Lombardia 49, 20098 San Giuliano Milanese(Mi)

GENERALITA'

L'indagine ultrasonica viene presentata e proposta quale strumento previsionale in grado di estendere, tramite la definizione di un legame funzionale, alle misure dello stato tensionale di compressione semplice presente nei pannelli e valutato durante le prove di rottura, i corrispondenti valori delle velocità di propagazione longitudinale simultaneamente misurate. Il lavoro si prefigge di proporre una procedura interpretativa in grado di valutare lo stato tensionale a compressione in determinati elementi di muratura usufruendo della variabile velocità di propagazione acquisita su una serie di campioni di muratura espressamente predisposti per tale particolare tipo di sperimentazione.

CARATTERISTICHE DEI CAMPIONI DI MURATURA E PROPRIETA' MECCANICHE DEI MATERIALI COSTITUENTI

Per la sperimentazione sono stati espressamente confezionati 6 pannelli di muratura realizzati ciascuno secondo lo schema di fig. 1 che prevedeva la orditura di sette corsi di mattoni pieni tipo UNI posti con giacitura in spessore e disposti a una testa previa la interposizione tra un corso e l'altro di un letto di malta bastarda di tipo M3 equivalente confezionata secondo le prescrizioni previste dalla normativa italiana sulle murature (D.M. del 20/11/1987) per tale tipologia di malta. [1]

I pannelli murari di dimensioni geometriche BxLxH di cm 12,0 x 52,0 x 48,0, livellati superiormente ed inferiormente con l'interposizione di uno strato di malta di ripartizione ed orizzontamento, sono stati sottoposti singolarmente a prova di compressione semplice con carico centrato generato da una pressa da 2000 KN al fine di determinarne il carico di rottura a compressione.

Contemporaneamente alla formazione dei pannelli, si sono predisposti e confezionati i provini necessari per la determinazione delle caratteristiche meccaniche più significative dei singoli materiali costituenti il paramento murario operando secondo le indicazioni del paragrafo 2.1.1 dell'Allegato al D.M. soprarichiamato.

Più specificamente si sono preparati:

per la malta,

complessivamente n. 6 provini prismatici di dimensioni 40 x 40 x 160 mm, confezionati in numero di 3 per ognuno dei due impasti utilizzati per la realizzazione dei pannelli; i provini, dopo la determinazione della massa, sono stati sottoposti a flessione e quindi a compressione sulle 12 mezze parti risultanti; operando secondo le indicazioni della norma UNI EN 196-1 si sono ottenuti i sotto riportati valori:

Massa volumica apparente (valore mediato su 6 provini)	kg/m ³	1865
Resistenza media a compressione a 28 giorni secondo UNI EN 196-1 (valore mediato su 12 provini)	daN/cm ²	58,8

per i laterizi,

da 8 mattoni pieni, tagliati ognuno in due mezzi mattoni e spianati sulle facce xy dei piani di giacitura, si sono ottenuti, per sovrapposizione con interposizione di malta ad alta

resistenza ($f_{bk} = 52,5 \text{ N/mm}^2$) dei mezzi blocchi, 8 provini di dimensioni nominali $12 \times 12 \times 9,5 \text{ cm}$ da sottoporre a prova di compressione nella direzione z conformemente alle Norme per l'accettazione dei materiali laterizi (R.D. 16/11/1939, n. 2233) attualmente tuttora in vigore in Italia; su tutti i provini prima del ciclo delle prove di carico, è stata determinata la massa volumica, i risultati sperimentali sono riportati sotto:

Massa volumica	1,768 gr/cm^3
Resistenza media a compressione direzione z	203,41 daN/cm^2

Prima di procedere alla rottura dei campioni di muratura, è stata eseguita la caratterizzazione ultrasonica dei pannelli di muratura disponibili. Per tale scopo si sono sottoposti i pannelli a tre differenti livelli di carico, carico nullo, 200 e 400 KN ; ad ogni livello di carico si sono condotte misurazioni della velocità di propagazione degli ultrasuoni con la tecnica indiretta (sonde sulla medesima faccia del muro) applicata con traiettorie orizzontali su una base di $\text{cm } 34,7 + D$ essendo D (5 cm) il diametro delle sonde.



Fig. 1 Esempio di muretto campione.



Fig. 2 Il muretto alla pressa per la prova.

Per ogni condizione di carico, i risultati, espressi in termini di velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici, sono riportati nella sottostante tabella n. 1 ed in particolare per la variabile statistica “velocità di propagazione” è possibile leggere il numero delle misurazioni condotte, il valore della media delle velocità, l'ampiezza del campione in termini di valore minimo e massimo, la scarto quadratico medio ed infine il coefficiente di variazione inteso come rapporto tra lo scarto quadratico e la media.

Carico	N. misurazioni	V. min (m/s)	V. max (m/s)	V. medio (m/s)	Scarto quadrat.	Coeff. Variaz.
	18	2719	3470	3205	253	0,079
200 KN	19	2960	3880	3364	219	0,065
400 KN	19	3100	3890	3395	274	0,080

Tab. 1 - Dati statistici delle misurazioni ultrasoniche eseguite sotto differenti carichi.

ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI

I valori numerici delle velocità di propagazione, ottenuti con il metodo indiretto, sono stati elaborati attraverso una analisi di tipo statistico.

Prima di indicare le diverse fasi di elaborazione dei dati delle velocità ultrasoniche, è utile richiamare l'attenzione sulle modalità seguite nella acquisizione delle velocità di propagazione. Ogni campione, tramite l'impiego di una pressa da 2000 KN che agiva contemporaneamente alla fase di rilevazione della velocità principale di propagazione degli impulsi ultrasonici, è stato sottoposto a due incrementi successivi di carico verticale esterno; nel dettaglio su ogni pannello in prova, durante la contemporanea sperimentazione ultrasonica e tensionale, si è applicato un carico inizialmente nullo che si incrementava con una intensità di carico di 200 KN nella fase intermedia e raggiungeva una intensità di 400 KN nell'ultimo passo di incremento del carico verticale prima di procedere alla rottura del pannello. Nella fase finale del ciclo sperimentale è stato determinato il carico di rottura a compressione di ognuno dei sei pannelli, il valore medio ottenuto è stato 58696 daN corrispondente a una resistenza media a compressione della muratura $f_{m,muro} = 94 \text{ daN/cm}^2$. Operando come indicato, è stato possibile evidenziare i conseguenti stati tensionali di compressione indotti nei pannelli dai carichi esterni; questi, ragionando in termini di sforzi assunti dalle sollecitazioni di compressione, sono stati espressi come quantità percentuali della resistenza media a compressione della muratura dei pannelli di riferimento, tale valore è espresso dal valore medio delle resistenze a compressione ottenute dalle prove condotte fino al collasso su ognuno dei sei pannelli disponibili per la determinazione del carico medio di rottura.

Le relazioni ottenute caratterizzate da differenti acquisizioni dei dati ultrasonici, sono riportate sotto:

campioni di muratura scarichi $\sigma(1) = 0$

campioni di muratura sottoposti ad un carico da 200 KN,

$$\sigma(2) = 0,34 f_{m,muro} = 32 \text{ daN/cm}^2$$

campioni di muratura sottoposti ad un carico da 400 KN,

$$\sigma(3) = 0,68 f_{m,muro} = 64 \text{ daN/cm}^2$$

Ad ogni stato tensionale di sollecitazione indipendente $\sigma(1)$, $\sigma(2)$, $\sigma(3)$, imposto ai pannelli murari corrisponde un campione statistico delle velocità di propagazione dal quale può dedursi la legge di distribuzione di probabilità della rispettiva popolazione.

Supponendo che le popolazioni delle velocità di propagazione corrispondenti ai tre campioni assegnati siano tutte distribuite secondo una legge di distribuzione normale, stimati con il criterio della massima verosimiglianza i parametri M ed S che distinguono una distribuzione normale da un'altra anch'essa normale, è possibile tracciare sulla carta probabilistica normale le tre rette rappresentanti tali distribuzioni tramite l'ausilio della variabile ridotta u della funzione di ripartizione normale standardizzata che gradua linearmente uno dei due assi verticali di riferimento della carta probabilistica normale.[2]

Come è noto dalla statistica, la carta probabilistica è una speciale carta in cui le curve di probabilità di un certo tipo (nel nostro caso la normale) sono tutte rappresentate da rette. Per comprendere meglio il significato della carta probabilistica normale e del modo con cui si giunge alla sua costruzione, diremo che sull'asse delle ascisse si sceglie una scala lineare per i valori della velocità v in modo tale da comprendere gli estremi del campione di cui si vuole una rappresentazione della $F(v)$.

I valori della funzione di probabilità $F(v)$ sono letti su un asse verticale adottando una particolare graduazione ottenuta tramite una trasformazione introducendo la variabile adimensionale

$$(a) \quad u = \frac{v - M(v)}{S(v)}$$

che prende il nome di variabile ridotta della funzione di ripartizione normale standardizzata e che in statistica gode della proprietà di avere

$$(b) \quad Q(u) = F(v)$$

e dove una stima dei parametri $M(v)$ e $S(v)$ è data rispettivamente dal valore medio v_m e dallo scarto quadratico medio $s(v)$ del campione. Nel piano cartesiano (v, u) la espressione (a) rappresenta una retta; se su un asse delle ordinate parallelo all'asse delle u (graduato linearmente da -3 , $+3$) per ogni valore di u si riporta il corrispondente valore della $Q(u)$, ricavato da apposite tabelle di tabulazione della funzione di ripartizione normale standardizzata si ottiene un asse la cui graduazione non lineare è simmetrica rispetto al valore $0,5$ e dato il carattere asintotico della distribuzione normale i valori 0 e 1 della $Q(u)$ non possono essere compresi su tale asse verticale.

Per ogni campione statistico, la serie delle misurazioni delle velocità viene riportata sulla carta probabilistica normale, ne risulta che nel diagramma dove sull'asse delle ordinate vengono riportate le probabilità $Q(u)$ nella graduazione precedentemente detta, i punti $(v_i, F(v_i))$ relativi ad una distribuzione normale non possono che disporsi lungo una retta e precisamente quella retta che sul corrispondente diagramma (v, u) ha equazione (a).

Pertanto, per i campioni in esame, stimati i parametri della distribuzione $M(v) = v_m$ ed $S(v) = s(v)$ con il criterio della massima verosimiglianza, le tre rette che sulla carta probabilistica normale rappresentano tali distribuzione hanno equazione:

$$u(1) = \frac{v - 3205}{253}$$

$$u(2) = \frac{v - 3364}{219}$$

$$u(3) = \frac{v - 3395}{274}$$

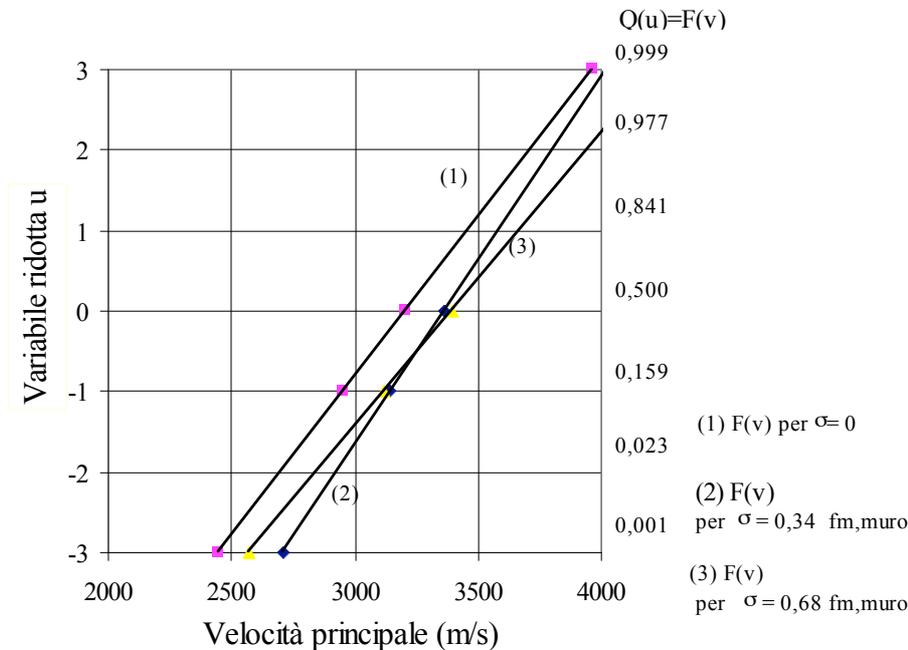


Fig. 2 Carta probabilistica normale. Rappresentazione delle tre funzioni di distribuzione della velocità principale rilevata sui campioni di muratura utilizzati nella sperimentazione

e sono condizionate dai rispettivi tre stati tensionali $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$.

Ricordando le proprietà delle funzioni di probabilità $F(v)$ per le tre distribuzioni si possono trarre le seguenti prime considerazioni:

- per ogni distribuzione la probabilità che la velocità sia contenuta nell' intervallo $M(v) - 2S(v)$ è uguale a 0,954 e dunque si possono considerare i frattili do ordine 0,023 e 0,977, corrispondenti ai valori di probabilità delle rispettive distribuzioni normali $F = F(v)$ come valori rappresentativi inferiori e superiori per le velocità in corrispondenza degli estremi delle distribuzioni. Tali valori della velocità, ottenuti ponendo nelle rispettive equazioni delle rette 1,2,3, i valori $+2, -2$ assegnati alla variabile ridotta u , sono riepilogati nella sottostante tabella dove è stata inserita una ulteriore ultima colonna per indicare la condizione velocità di propagazione nulla quando la sollecitazione di compressione raggiunge la resistenza media a rottura dei pannelli murari.

	$\sigma = 0$	$\sigma = 0,34 f_{m,muro}$ (32 daN/cm ²)	$\sigma = 0,68 f_{m,muro}$ (64 daN/cm ²)	$\sigma = f_{m,muro}$ (94 daN/cm ²)
	v (m/s)	v (m/s)	v (m/s)	v (m/s)
F(v) = 0,977	3711	3802	3943	0
u = 2				
F(v) = 0,500	3205	3364	3395	0
u = 0				
F(v) = 0,023	2699	2926	2847	0
u = - 2				

Tabella 2 – Valori parametrici delle funzioni di ripartizione e corrispondenti velocità di propagazione.

Per analizzare più a fondo la dipendenza statistica fra le “cause” (stati tensionali agenti) e gli “effetti” (velocità di propagazione delle onde ultrasoniche), sussistendo il vincolo di antecedente casuale tra le due variabili, è stata utilizzata l’analisi della regressione. Per ognuno dei tre campioni statistici di riferimento F1(v), F2(v), F3(v), condizionati dai rispettivi stati tensionali $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, è possibile assegnare predeterminati valori di probabilità marginale (0.023, 0.500, 0.977) alle rispettive funzioni di ripartizione e determinare, pertanto, i corrispondenti valori delle velocità di propagazione con prefissato ordine p, tali valori v_k associati ai valori σ_k hanno dato origine ai punti σ_k, v_k appartenenti alla ricercata relazione di dipendenza funzionale fra le grandezze fisiche osservate. [3]

Asserito che la velocità di propagazione è nulla quando lo stato tensionale di compressione raggiunge la resistenza media a rottura dei pannelli in muratura, l’interpolazione dei punti sforzi – velocità (queste ultime ordinate con identici valori di probabilità ricavati dalle rispettive funzioni di ripartizione, (come indicato nella Tabella 2) ha permesso di stabilire un legame funzionale (curve di possibilità tensionale), ottenuto con curve di dipendenza del secondo ordine, tra gli stati tensionali e le velocità degli impulsi ultrasonici.

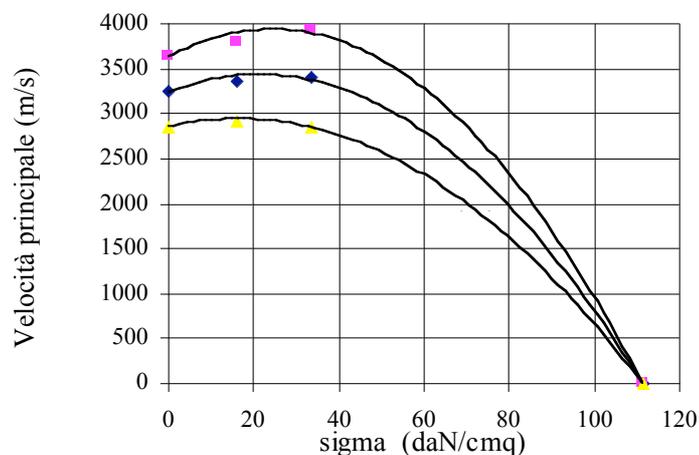


Fig. 3 Curve di possibilità pensionale per sforzo di compressione semplice.

Tali curve (Fig. 3), per le modalità con cui sono state ottenute, sono caratterizzate dall'aver valori di probabilità marginale $F(v)$ rispettivamente di 0,023, 0,500, 0,977 ed ammettono punti di massimo, ottenuti eguagliando a zero le corrispondenti funzioni derivate, le cui ordinate dividono il rispettivo diagramma in due zone, una a velocità crescente e l'altra a velocità decrescente, elemento che mette in evidenza due diversi comportamenti della muratura: infatti, nella prima zona, le velocità crescenti si giustificano concettualmente con l'ammettere la compattazione e l'assestamento delle particelle costituenti i blocchi della muratura, mentre nella seconda zona (con velocità decrescenti) il comportamento della muratura può avere una spiegazione nella formazione e propagazione delle microfessure, che si diffondono fino a rottura. La propagazione di tali microfessure è legata alla nascita nella muratura di stati tensionali di trazione, unitamente alla scarsa resistenza a tale sforzo del materiale laterizio; in forma più esaustiva, pur sussistendo quale stato di sollecitazione dominante nei corsi murari quello di compressione, la nascita delle microfessure e, quindi, la conseguente diminuzione della velocità di propagazione degli ultrasuoni, deve relazionarsi necessariamente alla presenza di tensioni di trazione, e non già direttamente agli stati tensionali di compressione presi in considerazione.

CONCLUSIONI

L'indagine ultrasonica del lavoro sperimentale condotto coniugata alla analisi statistica dei dati di velocità possono essere proposti come metodo combinato di controllo non distruttivo applicabile ai paramenti di muratura quando si siano tracciate le curve di possibilità tensionale a compressione specifiche per delle murature di riferimento.

Il metodo, basato sull'impiego della rilevazione ultrasonica associata in modo equilibrato ad una indagine sperimentale di tipo distruttiva su pannelli murari da sottoporre a prove di rottura per compressione semplice, consiste nello stabilire una procedura, attraverso l'analisi statistica delle grandezze sperimentali acquisite, che combini e sintetizzi il significato delle "cause" e degli "effetti" agenti tramite la definizione delle curve di dipendenza, indicate come "curve di possibilità tensionale" rappresentative del campo di variabilità delle tensioni normali σ e delle velocità di propagazione v rilevate sui pannelli di riferimento.

BIBLIOGRAFIA

1. D.M. 20 novembre 1987 – Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento – G. U. n. 285, Roma, 5 dicembre 1987
2. K. Brownlee – Statistical Theory and Methodology in Science Engineering – J. Wiley P., 1965
3. G. Ferrari, A. Martire – An application of the sonic methodology in the tower masonry structural control on the "Sforza Castle" in Galliate – Proceeding of 4th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Rhodes. 6 – 11 May 1997, Volume 2, pp 293 - 307