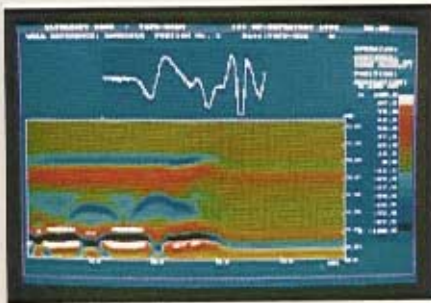


Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica



Biennale PnD-MD

8° Congresso Nazionale dell'AIPnD

Centenario della scoperta dei Raggi X

Torino, 17-19 Ottobre 1995



EC
NDT
EUROPEAN COUNCIL
NON DESTRUCTIVE TESTING



AIPnD
Associazione
Italiana
Prove non
Distruttive
Monitoraggio
Diagnostica

2

Conferenza Nazionale sulle
Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica
8° CONGRESSO NAZIONALE dell'AIPnD
Torino, Lingotto 17-18-19 Ottobre 1995

VERIFICHE SUL COMPORTAMENTO STRUTTURALE DI PANNELLI
IN MURATURA MEDIANTE L'UTILIZZO DEL METODO SONICO ED
INTERPRETAZIONE DEI DATI DI MISURA DELLA VELOCITA'
SONICA. (ANALISI DELLA VELOCITA' DI PROPAGAZIONE DELLE
ONDE ACUSTICHE LONGITUDINALI CON METODI STATISTICI)

Ferrari Giacomo

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Sommario

La relazione tra la velocità di propagazione delle onde elastiche attraverso i materiali solidi e le caratteristiche elastiche di questi ultimi è stata determinata da Rayleigh nel 1877 a seguito della integrazione delle equazioni del moto partendo dallo studio dell'equilibrio dinamico del cubetto elementare del solido elastico. L'integrazione delle equazioni di moto ha condotto alle ben note espressioni della velocità di propagazione delle onde longitudinali V_L e di quelle trasversali V_T (Si veda al riguardo sull'argomento l'ottimo testo di "Teoria dell'elasticità" di Landau L. - Lifshits E.; Editori Riuniti 1979) [1].
Le misurazioni delle velocità di propagazione longitudinale e trasversale delle vibrazioni ultrasoniche, prodotte da trasduttori elettro-acustici messi a contatto con le superfici esteriori di paramenti murari potrebbero essere usate come primo approccio per la determinazione dei moduli di elasticità E e G della muratura sfruttando il sistema ottenuto dalle relazioni che determinano V_L e V_T ; i moduli, che in questo caso vengono qualificati con il termine dinamico per indicarne il metodo di determinazione, specificherebbero elasticamente la muratura, ma poiché la misura della velocità trasversale, più lenta, è di difficile percezione sui relativi oscillogrammi, nella pratica le misure soniche e i dati ottenibili con la strumentazione oggi presente sul mercato permettono solo di avere indicazioni relative alla velocità di propagazione longitudinale e quindi solo quest'ultima grandezza è disponibile in una analisi sonica.
Sino ad ora si è parlato di moduli per indicare parametri non dipendenti dalle particolari composizioni e dai contenuti delle diverse formulazioni possibili per i letti e i corsi delle murature testate, ma è risaputo che i moduli al pari della densità, variano con le condizioni

fisiche dei materiali costituenti e con le condizioni ambientali in cui le murature sono inserite, onde i legami funzionali dipendenti dalla velocità di propagazione dei moti di vibrazione risentono di un elevatissimo numero di cause poco conosciute o sconosciute del tutto, motivazioni queste che hanno indotto la necessità di trattare i risultati delle misure di velocità sonica eseguite su alcuni pannelli murari con metodi di analisi statistica.

In quest'ambito, il metodo ultrasonico congiunto alla analisi statistica, quale metodo combinato non distruttivo d'indagine, può essere usato come uno strumento previsionale per indicare lo stato tensionale dello sforzo di compressione presente nel manufatto in opera, quando siano ottenute sperimentalmente una o più curve di regressione tra la velocità di propagazione e lo sforzo di compressione di un significativo campione di pannelli di muratura. A tal proposito il presente lavoro ha come riferimento i risultati sperimentali tratti da una ricerca CNR -GNDT di A. Di Tommaso [2]. L'interpolazione dei dati sforzi-velocità, queste ultime ordinate con identici valori di probabilità ricavati dalle rispettive funzioni di ripartizione, ha permesso di stabilire un legame funzionale con curve del secondo ordine tra i risultati delle prove di compressione e le velocità degli impulsi ultrasonici misurate successivamente alla applicazione del carico sui modelli di muratura predisposti per tale tipo di sperimentazione.

1. GENERALITA'

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

Il metodo di determinazione della velocità di propagazione degli ultrasuoni, sviluppato essenzialmente dal 1935 in poi, deve la sua popolarità soprattutto per l'evidente raffronto esistente fra i fenomeni che governano la propagazione delle onde e le proprietà fisico meccaniche del mezzo attraversato da tali onde. E' noto infatti che la propagazione delle onde elastiche all'interno di un mezzo omogeneo isotropo ideale a tre dimensioni, viene dedotta impostando lo studio dell'equilibrio dinamico di un cubetto elementare all'interno del corpo per giungere alla formulazione delle equazioni di moto [1].

L'integrazione delle equazioni di moto ha condotto alle ben note espressioni della velocità di propagazione delle onde longitudinali V_p e di quelle trasversali V_s , queste velocità, corrispondenti a due distinti tipi di onde di diverse caratteristiche comportamentali, sono caratterizzate dalle rispettive grandezze:

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{d(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1.1) \quad V_s = \sqrt{\frac{E}{d \cdot 2(1+\nu)}} = \sqrt{\frac{G}{d}} \quad (1.2)$$

essendo:

E = modulo di elasticità longitudinale, G quello trasversale
 ν = il modulo di Poisson
d = densità del solido

Le formule sopraelencate, sono state ottenute nella ipotesi di materiale omogeneo ed isotropo, esse hanno quindi una validità generale e non derivano dal presupposto che il mezzo solido sia un materiale particolare; incidentalmente è inoltre interessante osservare che poiché ν varia solo tra 0 ed 1/2 la velocità di propagazione delle onde longitudinali è sempre maggiore di quella delle onde trasversali. Ciò premesso in quest'ambito, l'indagine sonica viene proposta come una possibilità previsionale per poter estendere con un legame funzionale alle misure dello stato tensionale di compressione semplice, ottenute con prove di rottura, i corrispondenti valori delle velocità di propagazione longitudinale misurata. Scopo del presente lavoro è di presentare una procedura interpretativa per valutare lo stato tensionale a compressione usufruendo della variabile velocità sonica acquisita su una serie di campioni di muratura espressamente predisposti per questo particolare tipo di sperimentazione.

2. CARATTERIZZAZIONE DEI PARAMENTI MURARI E RILIEVI DELLE PROPRIETA' MECCANICHE DEI MATERIALI COSTITUENTI

Per la sperimentazione sonica sono stati espressamente confezionati due pannelli di muratura formati ciascuno da 18 corsi di mattoni pieni tipo UNI (blocco dim. cm 5.5 x 12 x 25 di una produzione nazionale attuale) disposti con giacitura a due teste secondo lo schema gotico previa interposizione fra un corso e l'altro di un letto di malta cementizia tipo M2 confezionata secondo le prescrizioni dell'attuale normativa sulle murature emanata con D.M. del 20/11/1987 [2] .

I due pannelli murari, le cui dimensioni geometriche sono indicate in fig. 1, sono stati preventivamente predisposti superiormente ed inferiormente con uno strato di ripartizione e livellamento ottenuto con la stessa malta cementizia impiegata nella realizzazione dei letti di unione dei blocchi della muratura dei due pannelli che, nel programma sperimentale a conclusione della caratterizzazione sonica, sono stati sottoposti singolarmente a prova di compressione semplice con carico centrato generato da una pressa con portata di 6000 KN per determinarne il carico di rottura a compressione.

Congiuntamente alla realizzazione di ciascun pannello sono stati predisposti i provini per completare le verifiche sui singoli materiali secondo le modalita' del paragrafo 2.1.1 dell' Allegato 2 al D.M. soprarichiamato, e precisamente si sono preparati:

- per la malta , n. 3 x 2 provini prismatici 40 x 40 x 160 mm prelevati da ogni impasto (due) utilizzato per la confezione del relativo pannello, i provini sono stati sottoposti a flessione e quindi a compressione sulle 12 meta' risultanti, secondo il D.M. 3 giugno 1968,
- per gli elementi resistenti, n. 30 blocchi di mattoni pieni sono stati sottoposti a prova di compressione con direzione del carico normale al letto di posa e di giacitura del mattone.

Nella tabella n. 1 sono riportati i dati relativi alla composizione della malta impiegata e i risultati sperimentali delle determinazioni effettuate sui provini per valutare le resistenze a trazione per flessione ed a compressione.

- Cemento pozzolanico tipo 325	Kg/m ³	249
- Calce eminentemente idraulica	Kg/m ³	134
- Sabbia di frantoio anidra 0 + 3 mm	Kg/m ³	1381
- Acqua totale d' impasto	l/m ³	300
- Densità allo stato fresco dell' impasto	Kg/m ³	2064
- Massa volumica apparente (valore medio su 12 provini)	Kg/m ³	1840
- Resistenza a trazione per flessione a 28 giorni secondo UNI 6133 (valore medio su 6 provini)	daN/cm ²	25.6
- Resistenza a compressione a 28 giorni secondo UNI 6134 (valore medio su 12 provini)	daN/cm ²	75.5

Tab. 1 Composizione e Caratteristiche Meccaniche della Malta

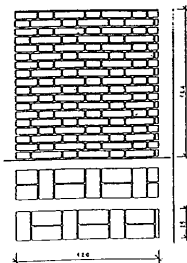


Fig. 1 Dimensioni geometriche dei pannelli di muratura testati

Per le prove relative ai laterizi, da ogni mattone, preventivamente spianato sulle facce xy dei piani di giacitura (fig. 1), sono stati ricavati quattro provini così differenziati:

- 1 provino di dimensioni nominali 12 x 12 x 5,5 cm (DZ) da sottoporre a compressione nella direzione z;
- 2 provini cubici con spigolo di cm 5,5 nominali da sottoporre a compressione nella direzione x (DX) e nella direzione y (DY);
- 1 provino prismatico di dimensioni nominali 12 x 5,5 x 5,5 (B) da sottoporre a prova brasiliana con carico applicato in direzione Z.

Su tutti i provini, prima del ciclo delle prove di carico, è stata determinata la massa volumica, i risultati sperimentali sono riportati nella sottostante tabella 2:

Prove sui laterizi	n. prove	Valore medio	Scarto tipo	Coeff. di variaz.	Valore caratterist.
- massa volumica (g/cm ³)	120	1.76	0.05	0.03	
- resistenza a compressione direzione x (daN/cm ²)	30	654.2	10.55	0.16	48.11
- resistenza a compressione direzione y (daN/cm ²)	30	586.5	7.81	0.13	45.84
- resistenza a compressione direzione z (daN/cm ²)	30	872.5	12.86	0.15	66.17
- resistenza a trazione direzione x (daN/cm ²)	24	68.2	1.99	0.29	30.70
- resistenza a trazione direzione y (daN/cm ²)	6	67.4	2.57	0.36	

Tab. 2 Caratteristiche meccaniche dei laterizi

Prima di procedere con le prove di rottura sui due campioni di muratura, lo sviluppo del programma sperimentale è seguito con la caratterizzazione sonica di uno dei due pannelli di muratura disponibili. Allo scopo si è operato sottoponendo il pannello a tre differenti livelli di carico: carico nullo, 500 e 1000 KN; ad ogni livello di carico si sono condotte misurazioni della velocità di propagazione degli ultrasuoni con la tecnica di trasmissione indiretta (sonde sulla medesima faccia del muro) applicata con traiettorie verticali ed orizzontali. Per ogni condizione di carico, i risultati, in termini di velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici, sono riportati rispettivamente nelle tab. 4, 5 e 6. Nella fase finale del ciclo sperimentale si è proceduto alla determinazione del carico di rottura a compressione di ogni singolo pannello murario, il valore medio delle due determinazioni è stato di 3343.5 KN corrispondente ad una resistenza media a compressione della muratura $f_{m,muro}$ pari a 111,45 daN/cm².

3. ANALISI STATISTICA DEI RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE

I problemi trattati nella presente analisi statistica dei risultati della sperimentazione sono di natura induttiva.

Essi consistono, in sostanza, nel risalire dalla conoscenza forzatamente limitata e parziale dei valori assunti dalla grandezza velocità di propagazione rilevata, alla migliore definizione possibile della distribuzione della totalità dei valori che essa può assumere sotto predeterminate condizioni imposte dallo stato tensionale di sollecitazione esistente nella muratura nell'istante della rilevazione.

Le indagini che a questo scopo vengono effettuate sono di solito precedute da tutta una serie di elaborazioni elementari rivolte essenzialmente all'ordinamento e alla classificazione dei dati disponibili nonché alla valutazione di alcuni parametri tipici che, in un certo modo, ne riassumono le caratteristiche principali. All'esposizione di queste prime operazioni di ordinamento e di analisi sono dedicate le restanti righe della presente nota.

Nelle tabelle allegate alle fig. 2, 3 e 4 sono riportate, sia in ordine cronologico di acquisizione che in ordine crescente, le velocità di propagazione delle onde elastiche longitudinali misurate con la tecnica detta per trasmissione indiretta su un pannello di muratura di mattoni pieni. Questo campione, utilizzando una pressa da 6000 KN contemporaneamente alla fase di rilevazione della velocità principale di propagazione degli impulsi ultrasonici, è stato sottoposto a due incrementi successivi di carico verticale esterno che, specificatamente durante la contemporanea sperimentazione sonica,

agiva rispettivamente da una intensità inizialmente nulla, ad una intensità di carico di 500 KN nella fase intermedia e raggiungeva una intensità finale di 1000 KN nell'ultimo passo di incremento del carico. Operando come indicato, è stato possibile evidenziare i conseguenti stati tensionali di compressione indotti nel pannello dai carichi esterni; questi, ragionando in termini di sforzi assunti dalle sollecitazioni di compressione, sono stati espressi come quantità percentuali della resistenza della muratura dei pannelli di riferimento che, per la presente sperimentazione, è indicata tramite il valore medio della resistenza a compressione ottenuta dalle prove condotte fino al collasso sui due pannelli disponibili per la determinazione del carico di rottura.

Le relazioni ottenute, a supporto della caratterizzazione sonica, sono sottoindicate:

- (3.1) pannello scarico, $\sigma_{(1)} = 0$
- (3.2) pannello sottoposto ad un carico di 500 KN, $\sigma_{(2)} = 0,1456 f_{m,muro}$
- (3.3) Pannello sottoposto ad un carico di 1000 KN $\sigma_{(3)} = 0,2990 f_{m,muro}$

dove $f_{m,muro} = 111,45 \text{ daN/cm}^2$ rappresenta il valore della resistenza media a compressione del campione dei pannelli collassati valore che è compatibile solo con un valore nullo della velocità di propagazione.

Per completezza espositiva, ogni serie di dati delle velocità di propagazione, contenuta nelle rispettive tabelle n. 3, 4, 5 condizionata del corrispondente stato tensionale $\sigma_{(1)}$, $\sigma_{(2)}$, $\sigma_{(3)}$, è stata completata con l'indicazione del valore medio v_m , dello scarto quadratico medio calcolato secondo la formula:

$$s(v) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (v_i - v_m)^2}$$

e con i valori della frequenza cumulata, espressa con la formula di Gumbel riferita ad ogni osservazione del campione statistico della corrispondente distribuzione.

Ogni campione statistico della velocità di propagazione sonica, considerato indipendente dalla variabile σ determinante lo stato tensionale di compressione a cui è stato sottoposto il pannello murario al momento della rilevazione della velocità, è stato caratterizzato statisticamente con il diagramma di frequenza cumulata relativa che, come noto, è una rappresentazione distorta della funzione di probabilità $F(v)$ o altrimenti detta funzione di ripartizione.

Per ogni stato tensionale di sollecitazione indipendente σ_1 , σ_2 , σ_3 imposto alla muratura si dispone dunque di un campione statistico delle velocità dal quale può quindi 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 rappresentative 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. (Fig. 5)

Come è noto dalla statistica, la carta probabilistica è una carta speciale 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

$$u = \frac{v - M(v)}{S(v)} \quad (3.4)$$

che prende il nome di variabile ridotta della funzione di ripartizione normale standardizzata e che in

Tab. 3

Dati da Contratto CNR N. 1036. Carico applicato 0 N

N	Vi	vi	Σvi	vi-Vm	(vi-Vm)**2	$\Sigma (vi -Vm)**2$	i/N+1
1	3250	2880	2880	-372	138384	138384	0,043
2	3060	2980	5860	-272	73984	212368	0,087
3	3250	3060	8920	-192	36864	249232	0,130
4	3250	3080	12000	-172	29584	278816	0,174
5	3550	3080	15080	-172	29584	308400	0,217
6	3680	3110	18190	-142	20164	328564	0,261
7	3550	3160	21350	-92	8464	337028	0,304
8	3160	3160	24510	-92	8464	345492	0,348
9	3550	3160	27670	-92	8464	353956	0,391
10	3160	3160	30830	-92	8464	362420	0,435
11	3160	3240	34070	-12	144	362564	0,478
12	3240	3250	37320	-2	4	362568	0,522
13	3080	3250	40570	-2	4	362572	0,565
14	2980	3250	43820	-2	4	362576	0,609
16	3080	3310	50390	58	3364	366004	0,696
17	3310	3310	53700	58	3364	369368	0,739
18	3520	3520	57220	268	71824	441192	0,783
19	3310	3550	60770	298	88804	529996	0,826
20	2880	3550	64320	298	88804	618800	0,870
21	3160	3550	67870	298	88804	707604	0,913
22	3260	3680	71550	428	183184	890788	0,957

$v_m = 3252$

$s(v) = 201$

Dati da Contratto CNR n. 1036 Carico app.0 N

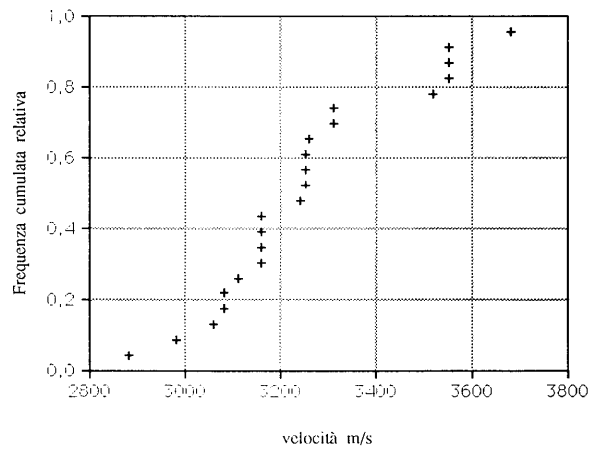


Fig. 2 Diagramma di distribuzione cumulativo della velocità Vp condizionato dal valore $\sigma = 0$

Tab. 4 Dati da Contratto CNR N. 1036. Carico applicato 500 KN

N	Vi	vi	Σvi	vi-Vm	i/N+1	(vi-Vm)**2	$\Sigma (vi-Vm)**2$
1	2960	2960	2960	-404	0,050	163216	163216
2	3060	3060	6020	-304	0,100	92416	255632
3	3100	3100	9120	-264	0,150	69696	325328
4	3350	3200	12320	-164	0,200	26896	352224
5	3560	3230	15550	-134	0,250	17956	370180
6	3880	3260	18810	-104	0,300	10816	380996
7	3470	3260	22070	-104	0,350	10816	391812
8	3230	3300	25370	-64	0,400	4096	395908
9	3200	3340	28710	-24	0,450	576	396484
10	3340	3340	32050	-24	0,500	576	397060
11	3380	3350	35400	-14	0,550	196	397256
12	3450	3380	38780	16	0,600	256	397512
13	3260	3440	42220	76	0,650	5776	403288
14	3260	3450	45670	86	0,700	7396	410684
15	3300	3470	49140	106	0,750	11236	421920
16	3340	3560	52700	196	0,800	38416	460336
17	3670	3670	56370	306	0,850	93636	553972
18	3670	3670	60040	306	0,900	93636	647608
19	3440	3880	63920	516	0,950	266256	913864

$v_m = 3364$

$s(v) = 219$

Dati da "Dati C.CNR n.1036 CARICO 500 KN"

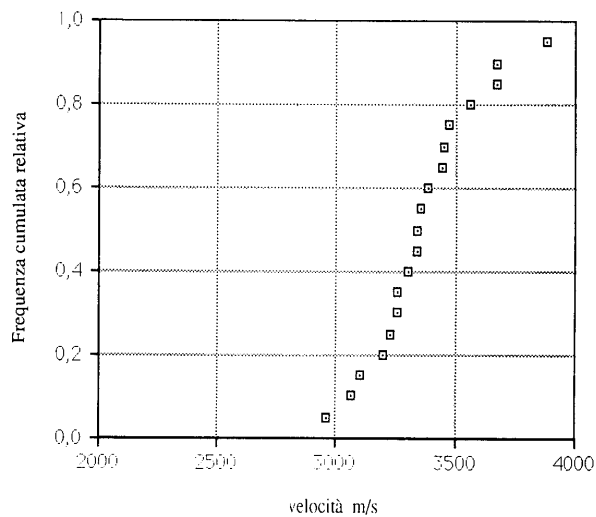


Fig. 3 Diagramma di distribuzione cumulativo della velocità Vp condizionato dal valore $\sigma = 500$ KN

Tab. 5 Dati da Contratto CNR N. 1036 Carico applicato 1000 KN

N	Vi	vi	$\sum vi$	$i/N+1$	$vi-Vm$	$(vi-Vm)**2$	$\sum (vi -Vm)**2$
1	3100	3040	3040	0,050	-355	126025	126025
2	3130	3100	6140	0,100	-295	87025	213050
3	3300	3110	9250	0,150	-285	81225	294275
4	3600	3130	12380	0,200	-265	70225	364500
5	3260	3170	15550	0,250	-225	50625	415125
6	3660	3170	18720	0,300	-225	50625	465750
7	3710	3230	21950	0,350	-165	27225	492975
8	3230	3230	25180	0,400	-165	27225	520200
9	3230	3260	28440	0,450	-135	18225	538425
10	3270	3270	31710	0,500	-125	15625	554050
11	3170	3300	35010	0,550	-95	9025	563075
12	3170	3380	38390	0,600	-15	225	563300
13	3380	3600	41990	0,650	205	42025	605325
14	3110	3620	45610	0,700	225	50625	655950
15	3040	3660	49270	0,750	265	70225	726175
16	3810	3710	52980	0,800	315	99225	825400
17	3820	3810	56790	0,850	415	172225	997625
18	3890	3820	60610	0,900	425	180625	1178250
19	3620	3890	64500	0,950	495	245025	1423275

$vm = 3395$

$s(v) = 274$

(Dati da Contratto CNR n. 88.1036) CARICO applicato = 1000 KN

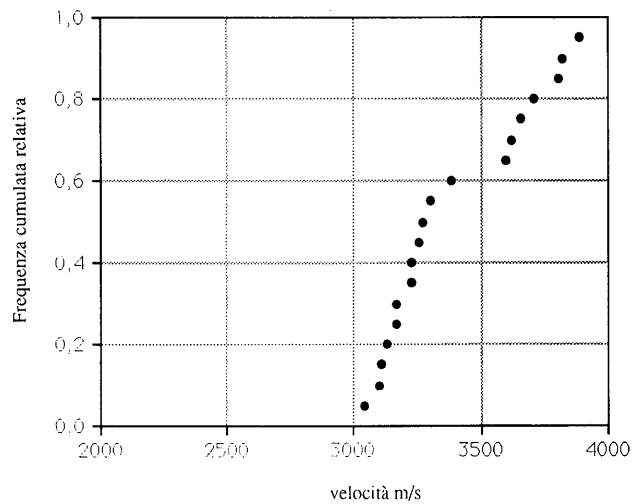


Fig. 4 Diagramma di distribuzione cumulativo della velocita Vp condizionato dal valore $\sigma = 1000$ KN

statistica gode della nota proprietà di avere

$$Q(u) = F(v)$$

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 (***) è rappresentata da 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 ed 1 della $Q(u)$ non possono essere compresi su tale asse verticale [3].

Per ogni campione statistico, la serie delle misurazioni della 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 a una distribuzione normale non possono che disporsi lungo una retta e precisamente quella retta che sul corrispondente diagramma (v, u) ha equazione (3.4)

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 distribuzioni hanno equazione:

$$u_{(1)} = \frac{v - 3252}{201} \quad (\text{retta 1})$$

$$u_{(2)} = \frac{v - 3364}{219} \quad (\text{retta 2})$$

$$u_{(3)} = \frac{v - 3395}{274} \quad (\text{retta 3})$$

e sono condizionate dai rispettivi tre stati tensionali $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (fig. 5).

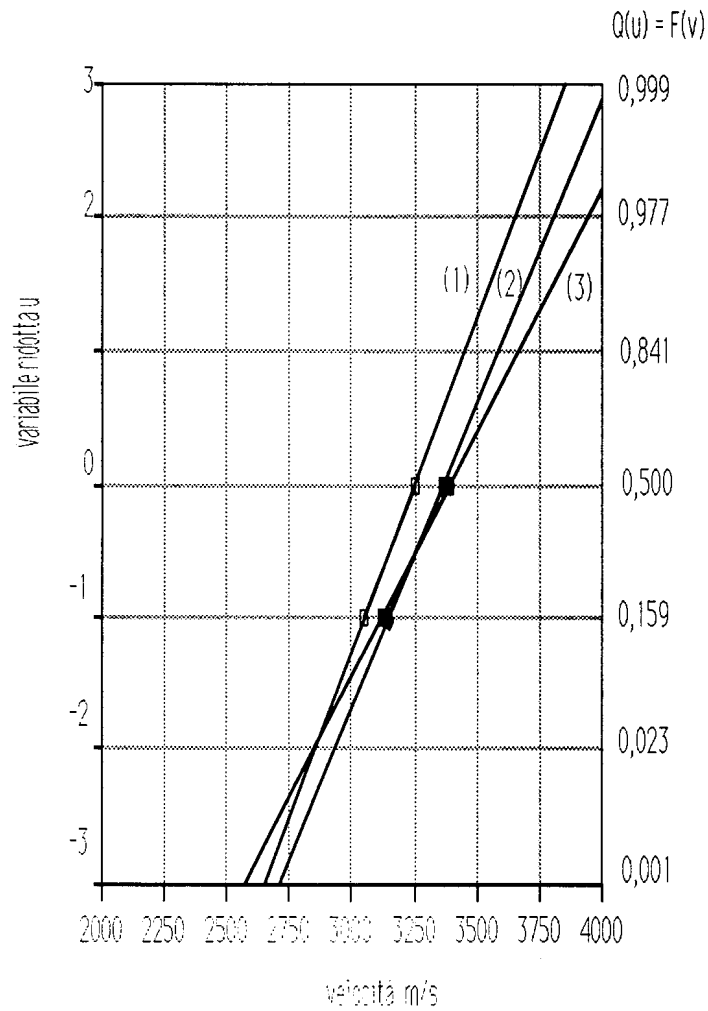
Ricordando le proprietà delle funzioni di probabilità $F(v)$ per le tre distribuzioni, si possono trarre le seguenti prime considerazioni:

- per ogni distribuzione la probabilità che la velocità sia contenuta nell' intervallo $M(v) - 2 S(v)$ è uguale a 0,954 e dunque si possono considerare i frattili di 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 del pannello murario.

$F(v)$	σ v	$\sigma = 0$ v (m/s)	$\sigma = 0,1456 f_{m,max}$ v (m/s)	$\sigma = 0,2990 f_{m,max}$ v (m/s)	$\sigma = f_{m,max}$ v (m/s)
$F(v)=0,977$ $u=2$		3654	3802	3943	0
$F(v)=0,500$ $u=0$		3252	3364	3395	0
$F(v)=0,023$ $u=-2$		2850	2926	2847	0

Tab. 6 Valori parametrici delle funzioni di ripartizione e corrispondenti velocità di propagazione

Carta probabilistica normale



Leggenda

- (1) $F(v)$ per $\sigma = 0$
- (2) $F(v)$ per $\sigma = 0,1456$ fr/men
- (3) $F(v)$ per $\sigma = 0,2990$ fr/men

Fig. 5 Rappresentazione delle tre funzioni di ripartizione sulla carta probabilistica normale

Altra notevole considerazione a cui si è pervenuti, analizzando l'inclinazione delle rette rappresentative delle distribuzioni normali sulla carta probabilistica normale, è l'aumento di dispersione (analisi della varianza) delle velocità intorno al rispettivo valore medio v_m al crescere dello stato di sollecitazione σ , dispersione che cresce più considerevolmente nel secondo incremento prodotto sulla muratura nel passaggio dalla sollecitazione di compressione σ_2 al valore σ_3 . Il risultato appare ulteriormente evidente se si confrontano i coefficienti di dispersione o di variazione, coefficienti u intesi come rapporto tra lo scarto quadratico medio corretto (contro la distorsione) $S(v) = s(v) \sqrt{N/N-1}$, ed il valore medio v_m della rispettiva distribuzione. Tale tendenza, ottenuta con sollecitazioni relativamente basse e dell'ordine del 30% della resistenza media a rottura dei pannelli murari, se ulteriormente confermata, può essere utilizzata come parametro di misura dello stato di sollecitazione presente nella muratura.

N. oss.	Carico (KN)	Vm (m/s) v. medio	s(v) scarto quadratico	S(v)=s(v) $\sqrt{N/N-1}$ deviazione standard	u=s(v)/vm coeff. di dispersione
22	0	3252	201	206	0,0633
19	500	3364	219	225	0,0668
19	1000	3395	274	281	0,0827

Tab. 7 I parametri e le condizioni delle tre distribuzioni

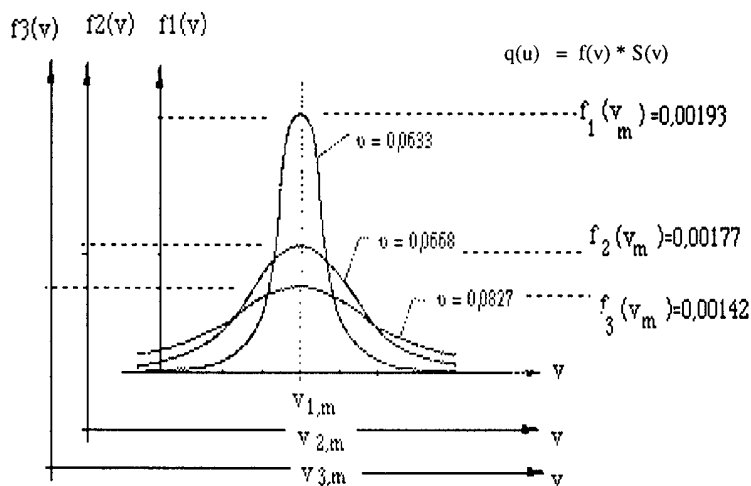


Fig. 6 Valori centrali delle tre funzioni di densità di probabilità

La tabella 7 riassume i parametri più significativi a sostegno delle considerazioni fatte precedentemente, mentre la fig. 6, ottenuta traslando i tre assi cartesiani nella direzione v per far coincidere i tre valori v_m delle rispettive funzioni di densità di probabilità $f_1(v)$, $f_2(v)$ ed $f_3(v)$ mostra qualitativamente l'andamento delle dispersioni delle corrispondenti distribuzioni normali. Sussistendo il vincolo di precedenza causale tra le sollecitazioni di compressione σ_1 , σ_2 ed σ_3 imposte ai pannelli di muratura e le susseguenti velocità soniche misurate, ai fini predittivi per l'utilizzo dei dati del presente lavoro, un metodo che efficacemente si presta a stabilire un legame statistico tra le due variabili σ e v è l'analisi della regressione; nel contempo si potranno assegnare predeterminati valori (0,023, 0,500, 0,977) di probabilità marginale, ricavati dalle tre distribuzioni, $F_1(v)$, $F_2(v)$ ed $F_3(v)$, alle curve interpolanti i punti σ_k , v_k ottenuti dalla carta probabilistica normale in corrispondenza delle rispettive condizioni imposte di sollecitazione a compressione σ_k e dei valori scelti per la $F(v)$.

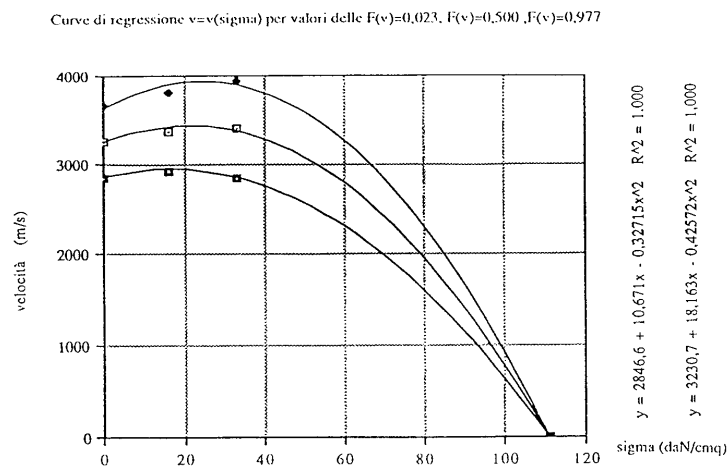


Fig. 7 Curve di possibilità tensionale per sforzo di compressione semplice

Riferendosi ad una osservazione precedente a completamento della scelta dei punti interpolanti, asserito che la velocità di propagazione è nulla quando lo stato tensionale di compressione raggiunge la resistenza media di rottura a compressione dei pannelli murari, l' interpolazione dei punti sforzo-velocità, queste ultime ordinate con identici valori di probabilità ricavati dalle rispettive funzioni di ripartizione (tab. 6), ha permesso di stabilire un legame funzionale, (curve di possibilità tensionale per sforzi di compressione) ottenuto con curve del secondo ordine, tra i risultati delle prove di compressione e le velocità degli impulsi ultrasonici misurate successivamente alla applicazione dei carichi (Fig. 7), queste curve, per le modalità con cui sono state ottenute, sono caratterizzate dall' avere valori di probabilità marginale $F(v)$ rispettivamente di 0,023 0,500 , 0,977 e se si ammette l' indipendenza delle due variabili σ, v questi valori coincidono con quelli assunti dalla funzione di probabilità $P_v(v, \sigma)$ condizionata da σ , il cui significato, che come noto indica per ogni coppia di valori v, σ la misura della probabilità che sia $v \leq v_c$ quando sia verificata la condizione $\sigma = \sigma_c$, è estendibile alle curve sopradeterminate.

4. CONCLUSIONI

Da quanto detto si evidenzia che l' indagine ultrasonica congiunta alla analisi statistica dei dati di velocità sonica si propongono come metodo di controllo non distruttivo applicabile ai paramenti di muratura piena quando si siano tracciate le curve di possibilità tensionale a compressione specifiche per delle murature di riferimento. L' interesse del metodo non risiede soltanto nella possibilità di previsione dello stato tensionale a compressione in cantiere, ma anche e soprattutto nella possibilità d' individuare le eterogeneità e le alterazioni che le murature possono subire nel tempo, valori misurabili con il coefficiente di varianza v delle distribuzioni della velocità di propagazione rilevate topologicamente sul manufatto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Landau L. - Lifshits E. : Teoria della elasticità; Editori Riuniti, 1979, pp. 126-151
- [2] Di Tommaso A. : Analisi ed accertamenti diagnostici delle murature degli edifici esistenti; Contratto di ricerca C.N.R - G.N.D.T n 88.01036, Bologna 1992, pp. 1 - 70
- [3] K. Brownlee: Statistical Theory and Methodology in Science and Engineering; J. Wiley P., 1965