

# Prove soniche superficiali per l'indagine dello stato fessurativo di murature in laterizio

C. Colla<sup>1</sup>, G. Pascale<sup>2</sup>

*Dipartimento DISTART, Facolta' di Ingegneria, Universita' di Bologna*

## SOMMARIO

Per quanto riguarda la valutazione di strutture esistenti, la recente normativa italiana delle costruzioni sottolinea il ruolo delle prove diagnostiche in sito. Molto importante risulta anche l'impiego delle Prove non Distruttive, incluse le prove soniche, che se da un lato deve assumere maggior peso nella diagnostica della struttura e dei suoi materiali, dall'altro abbisogna ancora di ricerca per sviluppo ulteriore delle tecniche.

Le prove soniche vengono spesso applicate in sito, specie su elementi di grande spessore, in modalita' di trasmissione del segnale attraverso lo spessore dell'elemento. Meno impiegata e' la modalita' per trasmissione superficiale.

Questo articolo presenta un'esperienza in laboratorio di applicazione di prove soniche superficiali per la diagnostica di murature di laterizio e in particolare per l'indagine dello stato fessurativo.

Per mezzo di una opportuna procedura di acquisizione e visualizzazione dati – percorsi diversamente orientati grazie a stazioni di lettura distribuite su circonferenze o archi di circonferenze concentriche, e visualizzazione dei dati in tempo reale come immagini bidimensionali - viene proposto per la prima volta per le prove soniche superficiali il contributo della diagnostica per immagini, attraverso la quale e' possibile condurre a livello visivo l'interpretazione dei dati e giungere a una valutazione quantitativa dell'estensione del danno.

---

<sup>1</sup>viale Risorgimento 2, 40136 Bologna. <sup>1</sup> E-mail: [camilla.colla@mail.ing.unibo.it](mailto:camilla.colla@mail.ing.unibo.it) Tel: 051-2093375; Fax: 051-2093495; <sup>2</sup> E-mail: [giovanni.pascale@mail.ing.unibo.it](mailto:giovanni.pascale@mail.ing.unibo.it) Tel: 051-2093515; Fax: 051-2093495.  
Laboratorio LaRM, via Terracini 34, 40131 Bologna. Tel: 051-2090500; Fax: 051-2090503.

## **Introduzione**

Con riferimento alle costruzioni esistenti, l'importanza di indagini diagnostiche e' ampiamente riconosciuta quale parte della valutazione strutturale sebbene la sua affermazione nella pratica non sia scevra di difficolta'. La necessita' di ottenere un alto livello di informazione riguardo la costruzione, il suo stato di conservazione e i suoi materiali deve tenere in considerazione l'impatto significativo in termini di costi e di danno strutturale e conservativo che possono avere le indagini dirette sulla costruzione e i suoi materiali se vengono impiegate procedure distruttive o invasive, come ancora per la maggior parte avviene anche ai nostri giorni.

Sia che la diagnosi strutturale debba servire quale strumento decisionale per stabilire la prioritá degli interventi o sia finalizzata ad una corretta stesura del progetto di miglioramento o di adeguamento strutturale o, ancora, alla verifica dell'intervento, e' importante attribuire maggiore rilevanza al ruolo delle metodologie non distruttive in sito nel contribuire ad una formulazione quali- e quantitativa della conoscenza dell'edificio, come sottolineato dalla recente normativa tecnica italiana delle costruzioni e in particolare dalle Linee Guida dedicate alla valutazione del patrimonio culturale [1-3].

Per quanto riguarda le strutture in muratura e le prove in sito, il processo di conoscenza include sia i rilievi geometrici, materici, dei dettagli costruttivi e delle manifestazioni di danno, sia le indagini per la caratterizzazione meccanica dei materiali, la localizzazione di possibili difetti locali, aree di degrado e riparazioni effettuate. Ribadendo l'importanza della conoscenza della tipologia muraria e dell'efficacia dei collegamenti tra elementi strutturali, le Linee Guida sottolineano l'importanza dell'impiego delle metodologie non distruttive, come le prove soniche. Queste indagini, se di impatto limitato, debbono essere impiegate anche se l'informazione estraibile contribuisce in maniera qualitativa alla valutazione strutturale.

Tuttavia queste prove, per avvicinarsi all'operativita' del cantiere, dovrebbero proporre metodologie affidabili, standardizzate, e procedure di facile impiego sia per quanto riguarda l'acquisizione dei dati che la loro interpretazione. Necessitano pertanto di impulsi innovativi, mutuati magari dall'esperienza in altri settori ben piu' delicati quali ad esempio quello medico. In questo senso, la diffusione della diagnostica per immagini potrebbe essere quella spinta necessaria per svecchiare e incentivare la diagnostica strutturale e dei materiali in sito, in un settore, quello dell'ingegneria civile, tradizionalmente restio alle innovazioni. Sono gia' conosciute e diffuse alcune tecniche diagnostiche non distruttive che visualizzano in tempo reale i dati acquisiti in forma di immagini (si citano qui ad esempio la termografia e il georadar), mentre per altre, come l'impact-echo, recente attivita' di ricerca e' stata rivolta a sviluppare una tecnica puntuale molto laboriosa in termini di tempo di acquisizione ed elaborazione dati, in una tecnica piu' snella e flessibile e i cui risultati siano piu' facilmente apprezzabili [4-7]. Le prove soniche, se si escludono le acquisizioni ed elaborazioni tomografiche che producono immagini bidimensionali ma ad un costo molto alto in termini di tempi di acquisizioni e precisione delle elaborazioni [8-12], non hanno vissuto sviluppi significativi negli ultimi 20 anni e la rilevanza della loro applicazione in sito e' ancora talvolta messa in discussione.

## **Scopi del lavoro**

Comunemente le prove soniche vengono applicate secondo la procedura di trasmissione diretta del segnale perche' questa e' la modalita' meno problematica in fase di

elaborazione dei dati. Tuttavia, per ragioni di posizionamento della strumentazione di acquisizione dati, cio' richiede accesso ad entrambe le superfici del pannello murario o dell'elemento strutturale. Inoltre, per il forte potere attenuante che una finitura ad intonaco avrebbe sulla qualita' dei dati, solitamente la procedura applicativa delle prove soniche richiede che la superficie muraria non sia intonacata. Cio' puo' costituire una grossa limitazione nel caso di strutture murarie storiche o tutelate dove lo strato di finitura assume non solo importanza decorativa e non puo' quindi essere sacrificato. Allora, nei casi in cui vi sia accessibilita' o fruibilita' di una sola superficie dell'elemento, si puo' decidere di effettuare prove soniche in trasmissione superficiale.

Il presente lavoro ne presenta un'esperienza di laboratorio su un pannello murario danneggiato in laterizio, al fine di indagarne lo stato fessurativo, e propone un'interpretazione dei dati in forma di lettura visuale delle caratteristiche estraibili da immagini bidimensionali dell'elemento sottoposto a prova. Si mira a provare l'affidabilita' della diagnostica per immagini nelle applicazioni strutturali ed in particolare per quanto riguarda l'incremento di confidenza nell'impiego delle prove soniche superficiali quale tecnica diagnostica per la stima della conoscenza della struttura.

### **Principio della tecnica sonica**

Le prove soniche sfruttano la propagazione nel materiale di onde elastiche di compressione generate da un breve impatto elasto-meccanico sulla superficie, per indagare la condizione del materiale nel suo interno, ovvero per localizzare eventuali disomogeneita', vuoti e difettosita' presenti nella sezione indagata. Un martello strumentato (ossia dotato di una cella di carico nella testa d'impatto, e collegato ad un sistema di acquisizione che consente di registrare la funzione tempo-ampiezza della forza esercitata all'impatto) e' la fonte dell'onda acustica (generalmente di frequenza inferiore ai 10 kHz) che si genera dall'impatto della massa battente sulla superficie di prova. L'energia meccanica si trasforma in energia acustico-vibrazionale e l'onda si propaga nel semispazio omogeneo isotropo, se tale e' il materiale indagato, come fronti d'onda approssimativamente semisferici di compressione e di taglio, mentre sulla superficie si propagano in maniera concentrica dal punto di battuta le onde superficiali. Le onde di compressione, per la loro maggiore velocita' rispetto a quelle di taglio e per la loro maggiore energia nella direzione d'impatto sono quelle generalmente sfruttate nelle prove soniche. Un sensore ricevente s'incarica di registrare e trasmettere al sistema di acquisizione la risposta del materiale alla propagazione del segnale nella sezione, risposta che verra' registrata come forma d'onda che rappresenta le variazioni di ampiezza delle vibrazioni avvenute alla superficie in un breve lasso di tempo. La propagazione dell'onda nel materiale sara' infatti influenzata dalla geometria della sezione oltreche' dalle caratteristiche fisico-meccaniche del materiale o dei materiali attraversati. Ogni singola battuta di prova consta quindi di una lettura puntuale, localizzata all'intorno della regione di materiale dove stazione trasmittente e stazione ricevente sono posizionate. Per ovviare a questo, su materiali fortemente disomogenei quali gli apparecchi murari, si predispongono piu' stazioni di misura entro aree omogenee di muratura, generalmente disponendo i punti di battuta ai nodi di griglie con maglia di dimensioni opportune.

Dalla disposizione relativa tra trasmittente e ricevente si diversificano varie tecniche di conduzione delle prove soniche. Tra queste le principali sono: per trasmissione diretta del segnale, ossia per trasparenza (quando la stazione trasmittente e ricevente si trovano sulle

due superfici opposte della parete); per trasmissione indiretta del segnale, ossia per trasmissione superficiale, quando stazione trasmittente e ricevente sono collocate sulla stessa superficie di prova ma distanziate tra loro; per riflessione del segnale, quando trasmittente e ricevente sono adiacenti sulla stessa superficie.

In ogni caso, i parametri estratti da ciascuna coppia di forme d'onda registrate – quella prodotta dall'emittente e quella acquisita dal ricevitore – sono generalmente l'attenuazione subita dal segnale lungo il percorso di propagazione e il cosiddetto “tempo di volo” ossia il tempo intercorso tra l'inizio del segnale trasmesso e l'inizio del segnale ricevuto. I risultati ottenuti ed espressi in forma tabellare, possono poi essere presentati in varie maniere grafiche, anche come mappe di velocità soniche [8].

In fase di progettazione della campagna di prove, è importante calibrare le caratteristiche della strumentazione agli scopi delle prove, oltre che alle condizioni di cantiere (dimensioni e geometria dell'elemento strutturale da indagare e caratteristiche dei suoi materiali componenti).

### **Descrizione del provino, procedura applicativa e strumentazione sonica utilizzata**

Per l'applicazione sperimentale di laboratorio di seguito descritta è stato utilizzato un provino in muratura di laterizio disponibile in laboratorio, già rinforzato con GFRP e successivamente sottoposto a prove meccaniche di tipo statico, in una combinazione di carichi verticali di compressione e di taglio nel piano della muratura [13]. Il provino, in forma di pannello murario a una testa, ha dimensioni di circa 1,27 m di base x 1,25 m d'altezza e spessore 0,128 m (Fig. 1a) ed è composto da 17 corsi di mattoni pieni bolognesi di dimensioni 275 mm x 128 mm x 60 mm di altezza. Il provino presenta su una superficie un rinforzo con tessuto bidirezionale di fibre di vetro ed inoltre un esteso quadro fessurativo passante dovuto alle prove meccaniche sopra citate e condotte fino all'osservazione di uno stato fessurato completo. Il quadro fessurativo, che, a causa del rinforzo in FRP, è visivamente osservabile su una sola superficie del pannello, consiste in una fessura principale in direzione diagonale che segue i giunti di malta ed è contenuto in una fascia piuttosto stretta dell'area superficiale del pannello (Fig. 1b).

Le acquisizioni soniche superficiali sono state compiute sia lungo percorsi di misura non interessati dal quadro fessurativo visibile, sia lungo percorsi attraversati dalle fessure. La

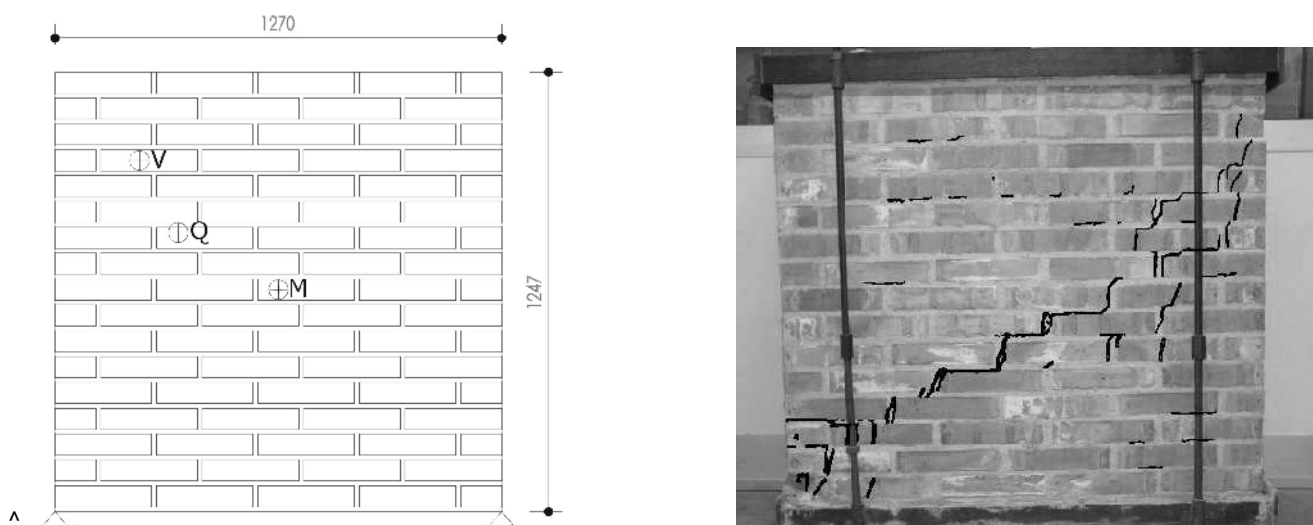


Figura 1 – Provino in muratura: a) dimensioni di ingombro; b) quadro fessurativo.

procedura operativa ha previsto dapprima un'attenta ispezione visuale della superficie del pannello, ossia della tessitura dei laterizi, dei difetti e delle anomalie rilevate in quanto a lesioni e asperità materiche, e si è quindi stabilita la distribuzione delle stazioni di misura in termini di distanze relative e numero, tenendo in considerazione sia la geometria del provino, sia le caratteristiche della strumentazione disponibile per le acquisizioni soniche. Di seguito si è marcata con precisione la posizione delle stazioni di lettura sulla superficie muraria.

I punti di stazione sono stati localizzati non ai nodi di griglie a maglia quadrata regolare come normalmente d'uso bensì su circonferenze o archi di circonferenze concentriche. Questa procedura, già sperimentata in sito su murature lapidee di strutture d'elevato archeologico allo scopo di valutare la qualità di diverse tessiture murarie e la loro omogeneità di comportamento e conservazione [14] presenta il vantaggio, oltre a quello di mantenere statica la stazione trasmittente (oppure quella ricevente) e quindi di effettuare letture che interessano porzioni via via più ampie di muratura, di considerare direzioni di percorsi di prova aggiuntive rispetto alle tradizionali verticale e orizzontale, con la possibilità di intercettare anomalie diversamente orientate e quindi di avere un'informazione più ricca dell'area muraria sottoposta a prove diagnostiche. Questo è particolarmente rilevante nel caso di prove su strutture storiche con apparati murari altamente disomogenei o disgregati.

Sul provino in oggetto sono state effettuate acquisizioni soniche superficiali in più riprese, ogni volta distribuendo le stazioni su griglie diversamente disposte e diversamente localizzate sull'area del pannello, secondo gli specifici interessi di prova. In questo contributo vengono presentati i dati e le osservazioni ricavate da due tali set di acquisizioni.

La prima ha previsto l'uso di un insieme di 42 stazioni riceventi posizionate lungo 5 circonferenze concentriche di raggio 10, 20, 30, 40 e 50 cm, secondo angoli di 45 gradi più 2 ulteriori stazioni su raggi orizzontali di 60 cm, e da una stazione sonica trasmittente localizzata al centro delle circonferenze (Fig. 2). La posizione sul muretto di tale stazione trasmittente è contrassegnata dalla lettera "M".

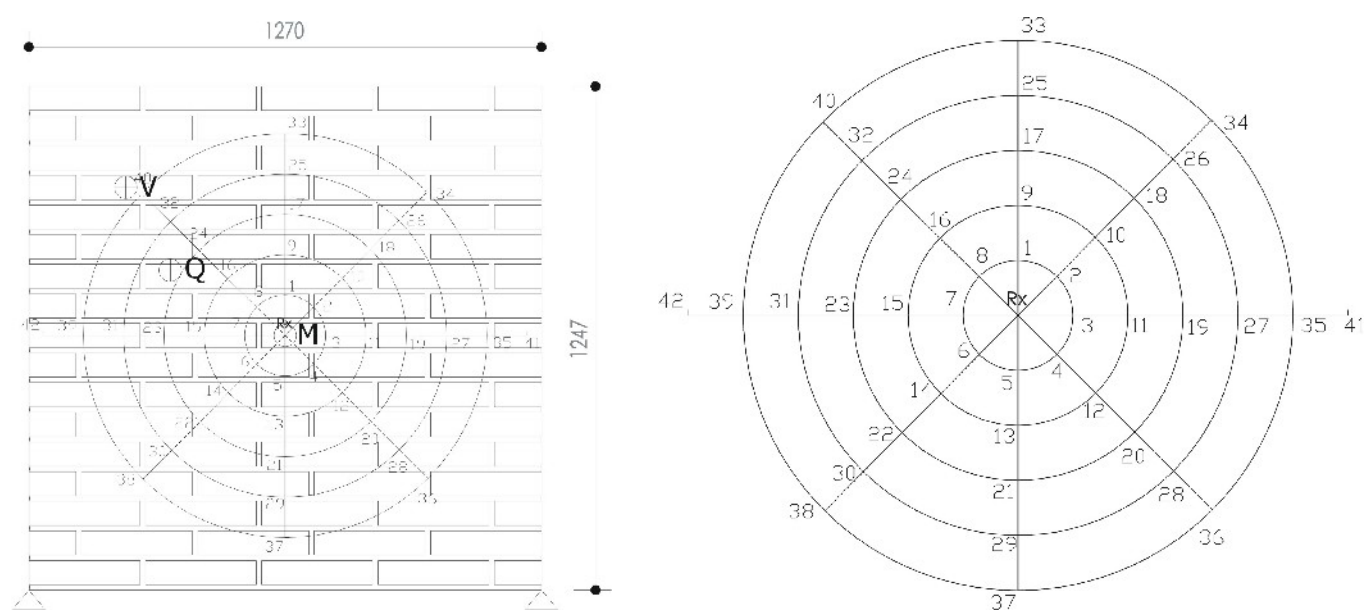


Figura 2 – Posizione sul muretto della 1° griglia di stazioni (sx) e loro numerazione (dx).

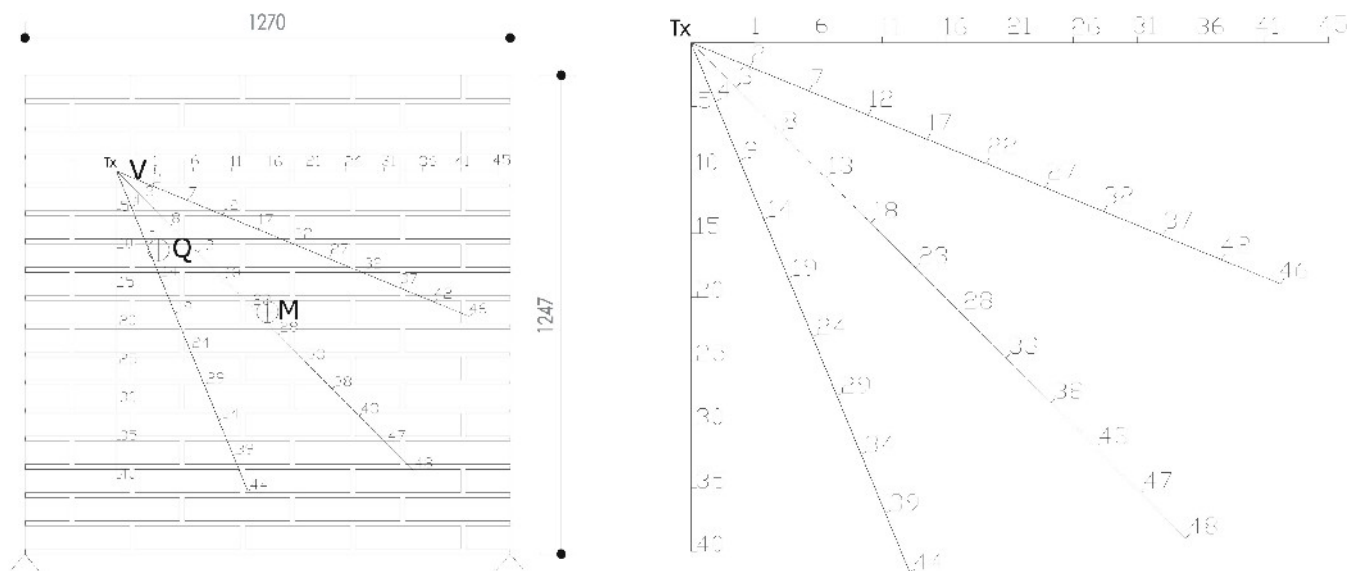


Figura 3 - Posizione sul muretto della 2° griglia di stazioni (sx) e loro numerazione (dx).

La seconda ha utilizzato 48 stazioni riceventi posizionate lungo quarti di circonferenze concentriche con raggi di lunghezza da 10 cm fino a 110 cm. Le 5 direzioni dei percorsi variavano in questo caso dall'orizzontale alla verticale secondo angoli di 22,5 gradi. La stazione sonica trasmittente anche in questo caso rimaneva fissa al centro delle circonferenze degli archi considerati (Fig. 3). La posizione sul muretto della stazione trasmittente e' contrassegnata dalla lettera "V".

Numerate le stazioni riceventi procedendo in senso orario e iniziando dall'alto e dalla circonferenza di diametro minore, la raccolta dati e' consistita nella registrazione delle singole letture eseguite percuotendo leggermente la superficie muraria col martello e ricevendo ogni volta ad una nuova stazione ricevente il segnale propagatosi nel materiale. Grazie al software di acquisizione appositamente predisposto e che opera in ambiente Labview, le singole letture sono state visualizzate in tempo reale sia come singole forme d'onda, sia come immagini bidimensionali in toni di colore o di grigio.

I martelletti strumentati utilizzati sono stati in un caso un martello con massa battente di circa 150 gr. e punta emisferica in alluminio, nell'altro un martello con massa battente di circa 100 gr. e punta in lega di berillio. Per la ricezione del segnale e' stato impiegato un microaccelerometro ICP con frequenza operativa adeguata ai contenuti in frequenza dei segnali generati. Le coppie di forme d'onda dei segnali generati e ricevuti, attraverso una centralina di condizionamento e amplificazione giungono alla scheda di acquisizione PXI con frequenza di campionamento fino a 1 GHz. Il sistema di acquisizione quindi registra e visualizza in tempo reale e in diverse modalita', sullo schermo del computer, tutto il set di dati acquisiti fino a quel momento. La flessibilita' di visualizzazione dati consente sia di controllare in ogni momento la qualita' dei dati, sia di effettuare in tempo reale le interpretazioni preliminari delle prove eseguite.

### Visualizzazione e interpretazione dei dati

La figura 4 visualizza come immagine bidimensionale in toni di grigio l'insieme delle 42 singole forme d'onda originali registrate al canale ricevente dal primo set di dati. In ascissa e' espresso il tempo (in questo caso e' visualizzato un intervallo temporale da 0 a 4 millisecondi) mentre in ordinata il numero progressivo delle stazioni riceventi. I toni di

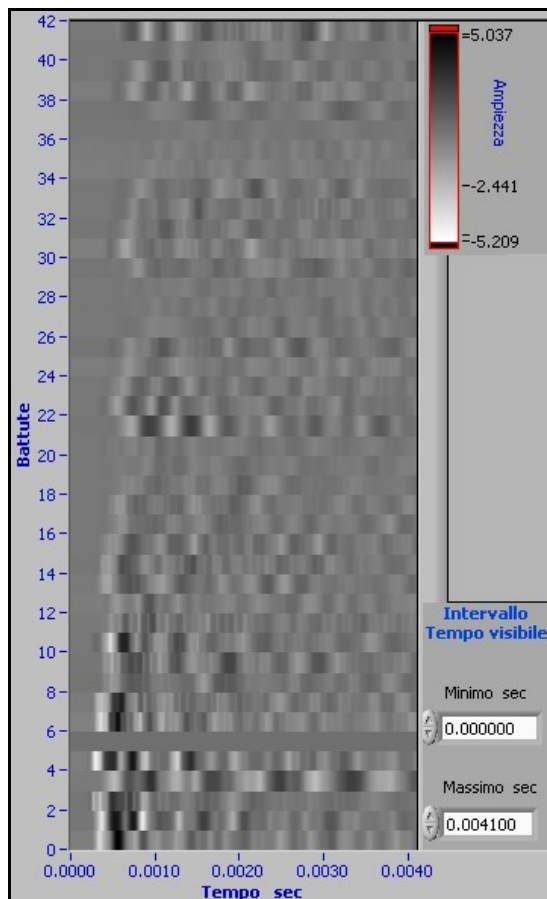


Figura 4 - Sonogramma.

23, 31, 39 e 42: questi registrano le maggiori ampiezze del segnale e i tempi di volo più brevi delle rispettive circonferenze e corrispondono a stazioni tutte posizionate in direzione orizzontale alla sinistra della stazione trasmittente, ossia su un corso di muratura apparentemente integro e con due soli giunti di malta. I minimi relativi di ampiezza del segnale e i massimi relativi dei tempi di arrivo si registrano invece alle stazioni 4, 12, 20, 28 e 36 ossia lungo la direttrice diagonale perpendicolare alla fessura principale.

Un discorso a parte meritano le prime 8 letture, corrispondenti alle stazioni della circonferenza minore: esse esibiscono un andamento diverso da quello delle circonferenze maggiori ed esprimono valori di tempi e ampiezze espressioni di misure “locali”, risentono cioè maggiormente dei singoli materiali componenti attraversati – malta e mattoni – che non della propagazione del segnale acustico nel composito muratura. Questa discriminazione tra i dati, che si è potuto effettuare a livello visivo, è importante perché la soglia tra misure locali e “globali” è influenzata dalla dimensione delle unità componenti la muratura e, influenzando sulle velocità calcolate di propagazione del segnale acustico, ne altera i valori medi con conseguenze sulla valutazione della qualità muraria. Queste osservazioni sono viepiù rilevanti nel caso di prove in sito su murature caratterizzate da conci di dimensioni altamente disomogenee.

Le osservazioni fin qui riportate sono state rese possibili dalla visualizzazione dei dati in forma di immagini bidimensionali e sono conducibili in sito, all'occorrenza, con vantaggi in termini di costi di elaborazione dati sia per quanto riguarda i tempi di analisi sia la facilitazione nell'interpretazione, con ripercussioni positive sulla diagnosi e valutazione dell'elemento strutturale. Da osservazioni qualitative relative alla velocità di propagazione dei singoli segnali sonici e alla loro attenuazione, è stato possibile mettere

grigio dell'immagine rappresentano le ampiezze delle oscillazioni registrate nella forma d'onda, secondo la legenda mostrata in alto a destra nell'immagine.

Ad una prima osservazione si nota sull'asse dei tempi come i “tempi di arrivo” dei singoli segnali siano mediamente più brevi per le prime stazioni – quelle che corrispondono a percorsi di misura più corti – per andare progressivamente ad aumentare coll'allungarsi dei percorsi di misura. Questo è in linea con le attese in situazione di materiale omogeneo isotropo e integro, caso che non è quello oggetto di studio. Infatti si può notare che, oltre le prime 12-14 letture, si osserva un andamento ritmico ripetitivo per quanto riguarda sia i tempi di arrivo del segnale sia la sua ampiezza. Le variazioni di questi due parametri possono essere messe in relazione alla direzione del percorso di prova, alla sua lunghezza e al numero di interfaccia malta-mattone attraversati e si rileverà come esista una correlazione stretta e anche una marcata influenza della presenza del quadro fessurativo.

Si osservino in particolare i dati delle stazioni 7, 15,

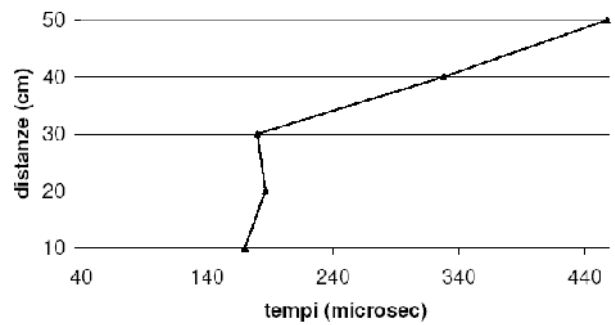
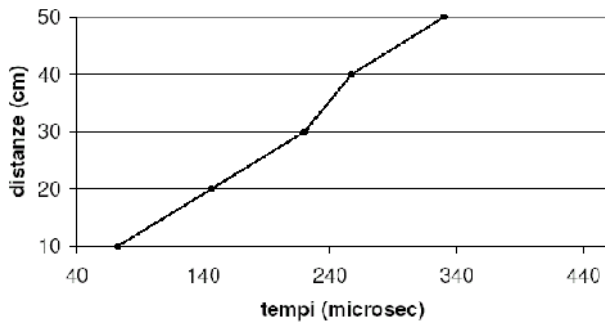


Figura 5 – Confronto tra i tempi di volo lungo due direzioni di percorso.

in relazione le anomalie rilevate con la posizione delle stazioni sulla superficie dell'elemento e localizzare in maniera quantitativa l'estensione dell'area lesionata.

E' pure possibile procedere in modo piu' consueto alle valutazioni puntuali di velocita' e attenuazione dei singoli dati registrati. As es. i valori dei "tempi di volo" ricavati

dall'analisi di dati sonici superficiali acquisiti lungo un medesimo percorso di prova possono essere plottati anche come grafici del tempo misurato sulla distanza apparente percorsa dal segnale (Fig. 5). In questo modo, la pendenza della retta che unisce due valori successivi nel grafico, rappresenta la velocita' di propagazione del segnale acustico nel materiale ed ogni variazione significativa di pendenza indica la presenza di una anomalia o difetto lungo il percorso. Il confronto tra i dati del percorso lungo il raggio verticale superiore (Fig. 5sx) e quelli del percorso diagonale che taglia perpendicolarmente la fascia di muratura fessurata (Fig. 5dx), mostra ad esempio come nel primo caso la velocita' rimanga praticamente costante all'aumentare della lunghezza del percorso lungo la direzione di prova (i percorsi sono infatti posizionati in un'area di muratura apparentemente non lesionata); mentre nel secondo caso la prima soprattutto, ma anche la seconda stazione, denunciano un tempo di volo molto alto perche' fortemente influenzato dalla vicinanza della fessura passante; alle stazioni successive lungo il

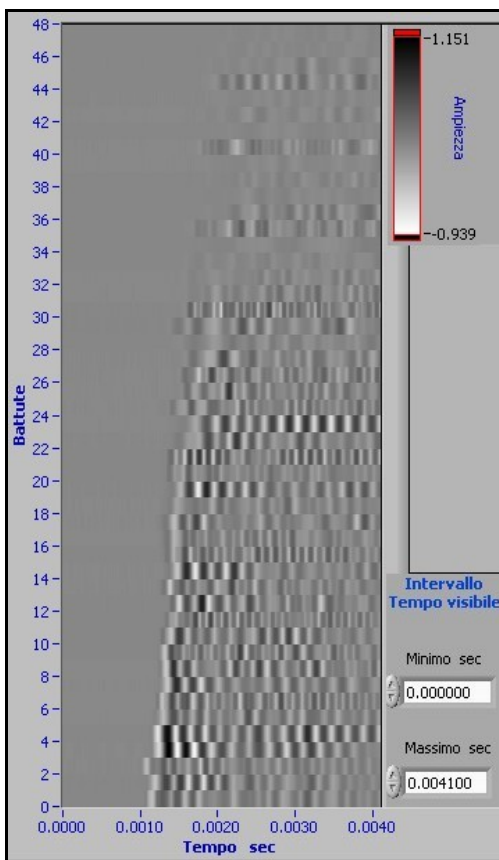


Figura 6 – Secondo sonigramma.

percorso (area apparentemente non fessurata della muratura) la pendenza rientra nella media (velocita' misurata sul muretto circa 1600 m/s).

Passando ora al secondo set di dati, la Fig. 6 visualizza come immagine bidimensionale l'insieme delle 48 singole forme d'onda originali registrate al canale ricevente. Il confronto tra il quadro fessurativo apparente (Fig. 1b) e la disposizione di queste stazioni di misura (Fig. 3), fa ritenere che fino alla stazione 28, le posizioni delle singole stazioni non siano parte della fascia diagonale di muratura lesionata.

Si noti in Fig. 6 come per la prima meta' dei dati (la parte inferiore dell'immagine), i tempi di arrivo del segnale siano allineati lungo una retta la cui inclinazione e' dovuta all'allungamento dei percorsi di prova. Si osserva poi un aumento nella pendenza della



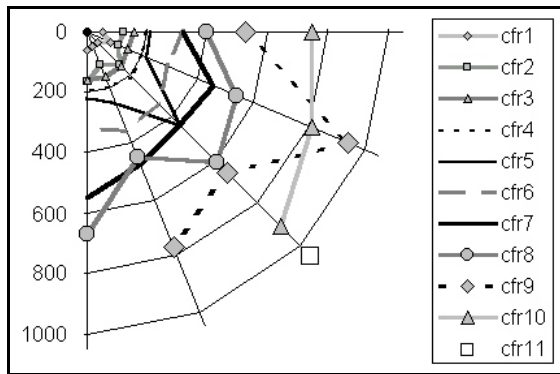


Figura 7 – Tempi di volo (microsec).

36, 41. L'abbassamento nel contenuto di alte frequenze del segnale sarebbe compatibile con micro fratture diffuse, che influirebbero particolarmente sulle alte frequenze perché caratterizzate da minori lunghezze d'onda, disperdendole. Si può quindi ipotizzare che in porzioni sub-superficiali del muretto siano già presenti soluzioni di continuità anche alle stazioni 23 e 24, pure se non visibili. La figura 7 mostra i grafici dei tempi di volo registrati alle varie stazioni. Un'osservazione delle ampiezze dei singoli segnali evidenzia che alle stazioni 29, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 46, 47 e 48 si sono registrati valori bassi, ed il confronto con la situazione visibile conferma che i percorsi di queste stazioni attraversano la lesione principale.

## Conclusioni

E' stato condotto in laboratorio un lavoro di ricerca su muratura in laterizio di mattoni pieni per l'indagine dello stato fessurativo nel materiale a mezzo di prove soniche superficiali. La procedura di prova presentata ha previsto alcune innovazioni: 1) la localizzazione dei punti di stazione non ai nodi di griglie a maglia quadrata come d'uso nella pratica bensì distribuiti su circonferenze o archi di circonferenze concentriche, con il vantaggio di effettuare acquisizioni i cui valori rappresentano letture sempre meno locali della muratura, e soprattutto che considerano direzioni di prova aggiuntive rispetto alle tradizionali verticale e orizzontale. Ciò consente di intercettare anomalie e difetti diversamente orientati. 2) La visualizzazione dei dati in tempo reale durante le acquisizioni, in forma di immagini bidimensionali (sonigrammi), consente di effettuare a livello visivo un'interpretazione immediata dei tempi di arrivo e delle attenuazioni dei segnali. Si è mostrato che attraverso confronti di tipo qualitativo di questi due parametri registrati alle singole stazioni di misura è possibile interpretare il tipo di danno e localizzare in maniera quantitativa l'estensione dell'area lesionata.

## Ringraziamenti

Si ringrazia la studentessa E. Locatelli per il supporto durante le acquisizioni dati e per la preparazione delle Figure 1a, 2 e 3. Il lavoro sperimentale è stato condotto presso il LaRM, Laboratorio Resistenza Materiali del DISTART dell'Università di Bologna.

## Bibliografia

1. OPCM 3274, 2003- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 20 Marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica", pubblicata sulla G.U. del 5 maggio 2003.

2. OPCM 3274, Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 20 Marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica", revisione del 12 gennaio 2005 a cura del Gruppo di Lavoro istituito dal Dipartimento della Protezione Civile, 2005.
3. Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni, Dipartimento della Protezione Civile di concerto con Dipartimento per i Beni Culturali e Paesaggistici, 21 luglio 2006.
4. Colla C., G. Schneider, H. Wiggenhauser, Automated Impact-Echo: method improvements via 2- and 3-D imaging of concrete elements, in: VIII Int. Conf. Structural Faults and Repair -'99, CD-Rom Engineering Technics Press, London, UK, 13-15 July 1999.
5. C. Colla- "Non-destructive evaluation of brick masonry via scanning impact-echo testing", Atti del 9<sup>th</sup> North American Masonry Conference, Clemson, South Carolina, USA, giugno 2003, The Masonry Society, paper 6A.1, pp. 954-965.
6. C. Colla- "Indagini Impact-echo bidimensionali per la valutazione non distruttiva di infrastruttura stradale e ferroviaria in cemento armato", Atti del 10° Congresso Nazionale sulle Prove non Distruttive, Monitoraggio e Diagnostica, Ravenna, Aprile 2003, pp. 321-329.
7. Colla, C., Carli, R., Pascale, G., Analisi quantitativa non distruttiva di difetti in strutture in cemento armato tramite impact-echo, Proc. 11° Congresso Nazionale sulle Prove non Distruttive, Monitoraggio e Diagnostica, Milano, 13-15 ottobre 2005, AIPnD, Brescia, CD-Rom e Book of Abstracts, ISBN 88-89758-02-3, idn 92.
8. Colla, C., Donati, M.C., Rossi, R., Vigano', R., "Cascina Rosa: le indagini per la diagnostica e il progetto di conservazione", Tesi di Laurea, Facolta' di Architettura, Politecnico di Milano, 1993.
9. Colla, C., "Non-Destructive Testing of masonry arch bridges", Ph.D. thesis, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Science and Engineering, The University of Edinburgh, Edinburgh, UK, 1997.
10. Colla, C., Forde M.C., McCann, D., Das, P.C., "Investigation of masonry arch bridges using non-contacting NDT", Proc. VI Int. Conf. Structural Faults and Repair-'95, Westminster Central Hall, London, 3-5 July 1995, Engineering Technics Press, vol. 1, p. 235-239.
11. Colla, C., McCann, D.M., Forde, M.C., Das, P.C., Batchelor, A.J., "Radar tomography of masonry arch bridges", Proc. VII Int. Conf. Structural Faults and Repair -'97, Assembly Room, Edinburgh, 8-10 July 1997, Engineering Technics Press, vol. 1, 143-153.
12. Colla C., L. Binda, Bestimmung der Feuchteverteilung mit Radar Tomografie, in: "Feuchtetag `99 Umwelt Meßverfahren Anwendungen", Poster 8, DGZfP-Berichtsband BB 69-CD, BAM, Berlin, 7./8. Oktober 1999.
13. T.Stratford; G. Pascale; O. Manfroni; and B. Bonfiglioli, Shear Strengthening Masonry Panels with Sheet Glass-Fiber Reinforced Polymer, J. Composites for Construction, ASCE / September/Octobe 2004, 434-443.
14. Colla, C., de Miranda, S., Ubertini, F., On site diagnostic investigations for the assessment of the Casa del Tramezzo di Legno in Herculaneum, Atti della Conf. RILEM Int. On site Assessment of concrete, masonry and timber structures, Varenna (LC) 1-2 settembre 2008. (in corso di pubblicazione)