

Applicazioni di un metodo ad onde ultrasonore per la rilevazione di difetti in strutture murarie

Costantino Carbone, Antonino Musolino, Marco Raugi, Florin Turcu
Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione, Università di Pisa

Sommario

In questa memoria viene descritto lo studio di fattibilità di un metodo di diagnostica non distruttiva per pareti di calcestruzzo e murature basato sulla propagazione di onde ultrasonore. Come è noto le tecniche basate su onde ultrasonore sono state introdotte con successo nelle ispezioni non distruttive in differenti settori dell'ingegneria. In particolare, sui sistemi di condutture degli impianti industriali vengono utilizzate onde ultrasonore guidate dalle pareti stesse delle condutture. La presenza di un difetto nella conduttura produce un'onda riflessa che viene rilevata da sensori opportunamente posizionati; l'analisi delle forme d'onda rilevate dai sensori permette la localizzazione e la classificazione dell'eventuale difetto.

Presso il Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa è disponibile il sistema diagnostico MsS 2020[®] basato su un trasduttore magnetostrittivo. Esso è stato utilizzato con successo per l'analisi di condutture metalliche. Attualmente si stanno investigando le sue potenzialità per l'analisi di strutture piane. In particolare si stanno effettuando una serie di simulazioni numeriche relative alla propagazione delle onde elastiche ultrasonore in strutture murarie e in manufatti di calcestruzzo, su questi ultimi sono state eseguite prove sperimentali con lo strumento in precedenza menzionato.

Introduzione

Per verificare lo stato di salute di alcuni tipi di strutture non sempre si può ricorrere ai metodi classici dell'ingegneria civile come può essere l'estrazione di carote dal manufatto da sottoporre a prove di laboratorio. Infatti, ciò non è possibile per quelle che risultano difficilmente accessibili o per quelle che rivestono un'importanza di carattere storico o artistico per le quali non è possibile intervenire in modo invasivo. Vengono, pertanto, utilizzati dei metodi di indagine non distruttiva del manufatto; tra essi i metodi acustici rivestono notevole importanza [1]. I metodi acustici si basano sulla propagazione di onde elastiche all'interno del mezzo, generate con opportuni strumenti. Sono in genere usati metodi sonici, ultrasonici ed "impact echo" attraverso i quali è possibile ispezionare una porzione di struttura vicina alla posizione dello strumento utilizzato.

Generalmente gli strumenti di indagine acustica sono costituiti da una parte emettitore e una rilevatore del suono, in base alla loro posizione relativa, le prove possono distinguersi in:

-) prove per trasmissione diretta: trasduttore e rilevatore sono posti sulle facce opposte del muro;
-) prove per trasmissione semi diretta: in questo caso il rilevatore e trasduttore sono su due facce contigue;
-) prove per trasmissione indiretta: il trasduttore e il rilevatore sono sulla stessa faccia.

Nell'ambito di una ricerca condotta presso il Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione è stata investigata la possibilità di effettuare indagini non distruttive utilizzando un metodo basato sulla trasmissione indiretta che utilizza la propagazione di onde elastiche trasversali [2] in strutture piane con frequenze in campo ultrasonoro. Il campo di frequenze utilizzate è legato alle dimensioni dei difetti che si vogliono rilevare. Come è noto sono rilevabili difetti le cui dimensioni sono dello stesso ordine di grandezza della lunghezza d'onda della perturbazione utilizzata. L'utilizzo di frequenze troppo basse permette di rilevare difetti di una certa dimensione; aumentando la frequenza si possono individuare difetti più piccoli. Di contro, l'uso di frequenze troppo elevate soffre degli echi provenienti dalle fisiologiche disomogeneità della struttura in prova. Ad esempio, prendiamo in considerazione l'uso di frequenze superiori ai 100kHz in un manufatto in calcestruzzo. La lunghezza d'onda corrispondente è di circa 2 centimetri (per perturbazioni trasversali), che è simile alle dimensioni tipiche degli inerti. Risulta pertanto molto difficile distinguere le riflessioni dovute agli inerti da quelle dovute ad eventuali difetti.

La tecnica descritta in questa memoria è stata applicata a materiali da costruzioni quali lastre di calcestruzzo e murature di mattoni pieni a una e a due teste.

Indagini su manufatti in calcestruzzo

Lo studio della propagazione di onde elastiche ultrasonore in un mezzo costituito da lastre di calcestruzzo è iniziato con la simulazione del fenomeno attraverso l'uso di codici di calcolo FEM quale è ADINA 8.3. Si è analizzato il comportamento di una serie di lastre dello spessore di 15 cm. Lo studio è stato compiuto su modelli che differiscono tra loro per la presenza o meno di un difetto, per la posizione del difetto stesso e per la frequenza della perturbazione elastica utilizzata. In figura 1 è descritta la geometria di un modello in cui è presente un difetto costituito da un vuoto delle dimensioni 3x10 cm e che si sviluppa in tutto lo spessore della lastra. Solo metà della lastra è stata analizzata imponendo le opportune condizioni di simmetria sul piano $y=0$. In uno dei modelli il difetto è posizionato in prossimità del bordo superiore e ha le coordinate di $x=0$ cm e $y=177$ cm.

Assumendo come riferimento la geometria di figura 1a, la posizione degli altri difetti, dello stesso tipo appena descritto, è rispettivamente: in uno alle coordinate $x=0$ cm e $y=100$ cm e nell'altro alle coordinate $x=-40$ cm e $y=100$ cm. In totale quindi sono stati adoperati un modello privo di difetto e tre con difetto. Per le caratteristiche fisico-meccaniche del calcestruzzo sono stati scelti i valori riportati nella tabella 1 riportata in figura 1b. Il sistema è stato sollecitato imponendo uno spostamento diretto lungo l'asse x sulla porzione della superficie superiore della lastra indicata in figura. L'andamento temporale dello spostamento imposto è descritto in figura 1c; la frequenza centrale di tale forma d'onda è 25 kHz con un contenuto frequenziale apprezzabile su un intervallo di circa 12 kHz.

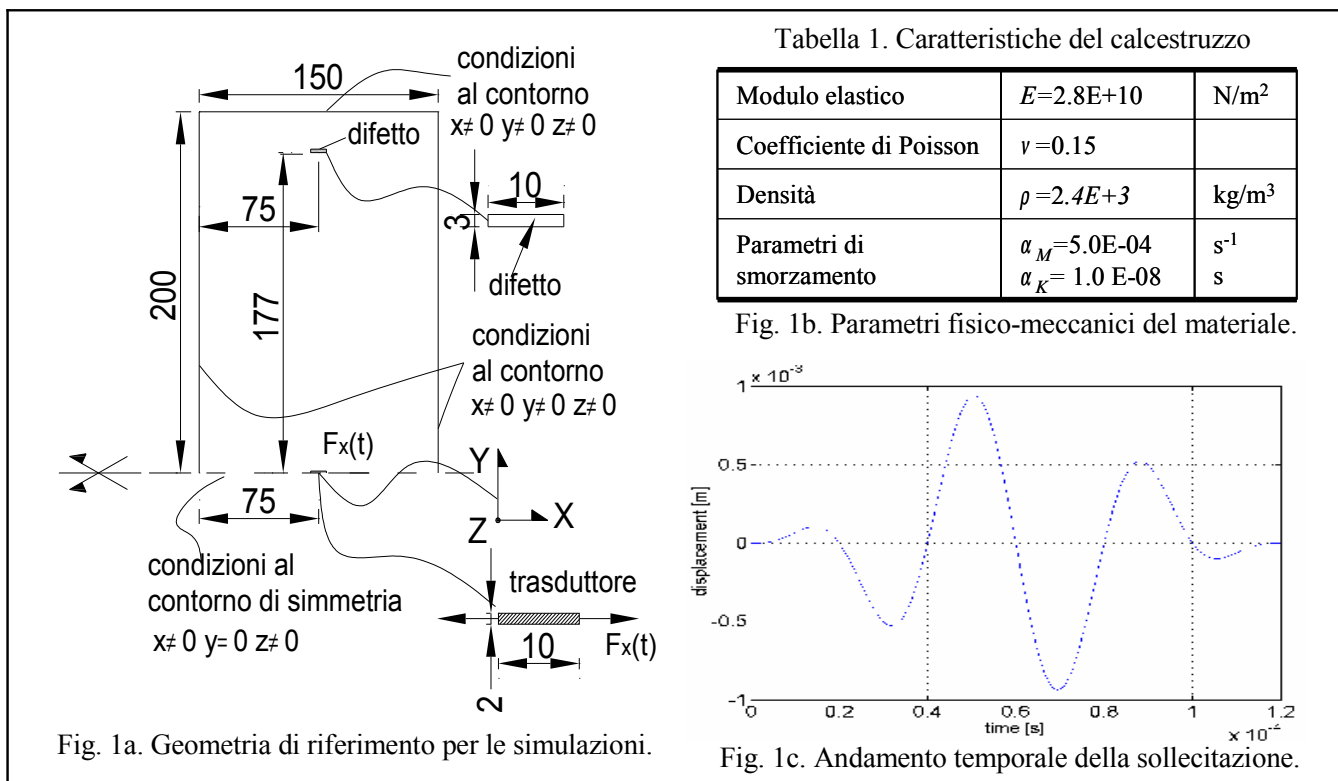


Figura 1. Modello adottato per le simulazioni numeriche.

Inizialmente sono state effettuate le simulazioni sulla lastra priva di difetto al fine di determinare le caratteristiche principali della propagazione dell'onda elastica con particolare interesse nella valutazione dell'attenuazione del fronte d'onda e della porzione della struttura interessata dalla perturbazione. Inoltre la conoscenza del comportamento della struttura sana è di interesse anche come termine di paragone per i modelli con difetto. Nella figura 2 sono riportati alcuni risultati che consistono nelle mappa con scala di colori della componente x degli spostamenti ad istanti particolarmente significativi per il modello senza difetto e per quelli con i difetti poc'anzi descritti.

Dall'esame delle figure 2b, 2c e 2d risultano bene evidenziati gli effetti della presenza del difetto per i tre modelli. In particolare è ben individuabile l'onda riflessa dovuta al difetto. Un'altra importante indicazione è l'estensione della regione "coperta" dal trasduttore, ovvero quella caratterizzata da valori dello spostamento non trascurabili.

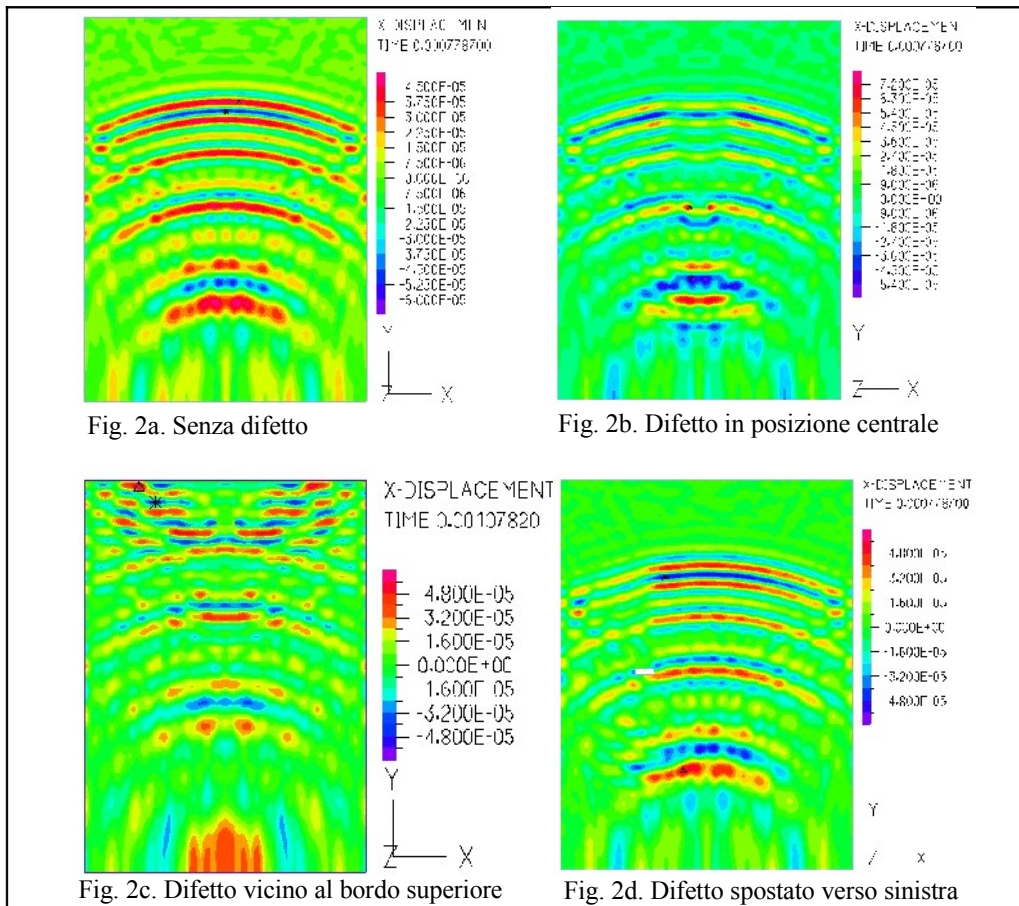


Figura 2. Componente x degli spostamenti.

Quest'ultimo dato potrà essere sfruttato in fase sperimentale per realizzare un buon posizionamento dei sensori rispetto alla posizione del traduttore al fine di ottenere un efficace utilizzo di tali sensori con la possibilità di diminuirne notevolmente il numero.

Alla fase di analisi numerica è seguita una fase sperimentale. I test sono stati condotti su provini che riproducono la stessa geometria dei modelli utilizzati nelle simulazioni. La figura 3 mostra una fase del test condotto sul provino di calcestruzzo in assenza di “difetti” utilizzando lo strumento MsS2020®.

Successivamente sono state effettuate le misure su lastre nelle quali sono stati introdotti i difetti precedentemente descritti e simulati. Nei test, i sensori sono stati posizionati, per i 3 provini secondo lo schema riportato in figura 4. Per ogni punto rappresentato è inserita una coppia di sensori distanti tra loro 4 cm.



Figura 3. Misura su lastra di calcestruzzo integra.

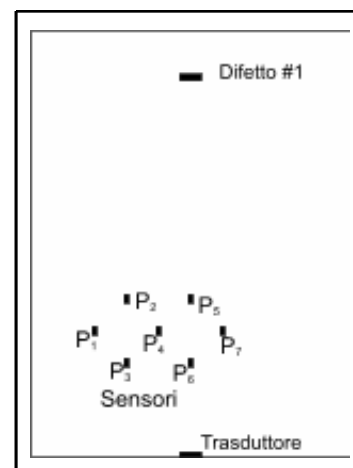


Figura 4. Esempio di posizionamento dei sensori.

Il sistema di misura utilizzato, essendo basato su un sensore magnetostrittivo è in grado di rilevare tensioni elettriche proporzionali agli spostamenti medi della superficie su cui è applicato il sensore. Il coefficiente di proporzionalità non è noto a priori e andrebbe determinato in fase di calibrazione dello strumento. Non di meno, per l'uso che viene fatto dei dati rilevati spesso non ha interesse conoscere tale coefficiente per cui nel seguito della memoria si farà riferimento alle tensioni direttamente misurate dallo strumento. A titolo di esempio, si riporta nella figura 5 la tensione proporzionale alla componente x dello spostamento rilevato nella coppia di sensori A e B (il sensore A è quello più vicino al trasduttore) posti nel punto P₅ per il provino col difetto n° 1. Sono state mantenute le stesse posizioni dei sensori anche nelle prove che hanno coinvolto le altre lastre con i difetti inseriti in altre posizioni.

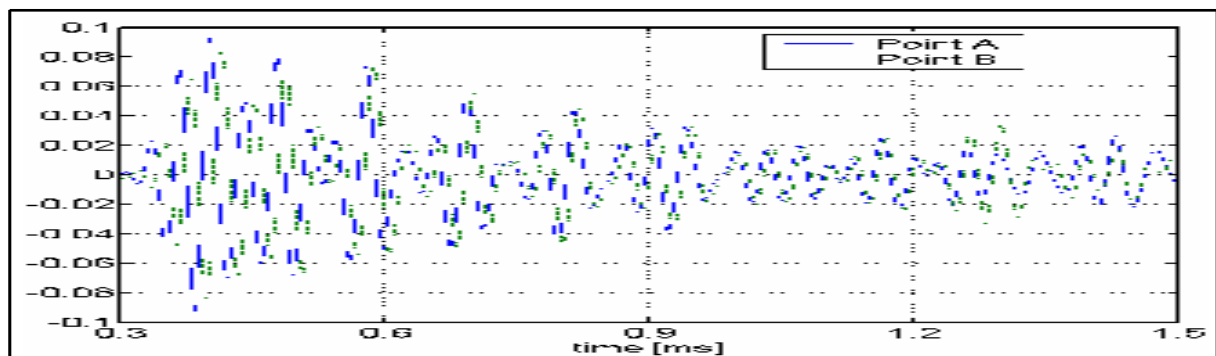


Figura 5. Forme d'onda della coppia di sensori in P₅.

Si distingue, come è ovvio che sia, un ritardo tra le due forme d'onda rilevate. Tale ritardo non è costante e diminuisce al crescere del tempo. La valutazione di questi ritardi può essere effettuata utilizzando un semplice modello illustrato in figura 7 che tiene conto dei cammini multipli all'interno della lastra dovuti alla propagazione dei modi di ordine superiore [3].

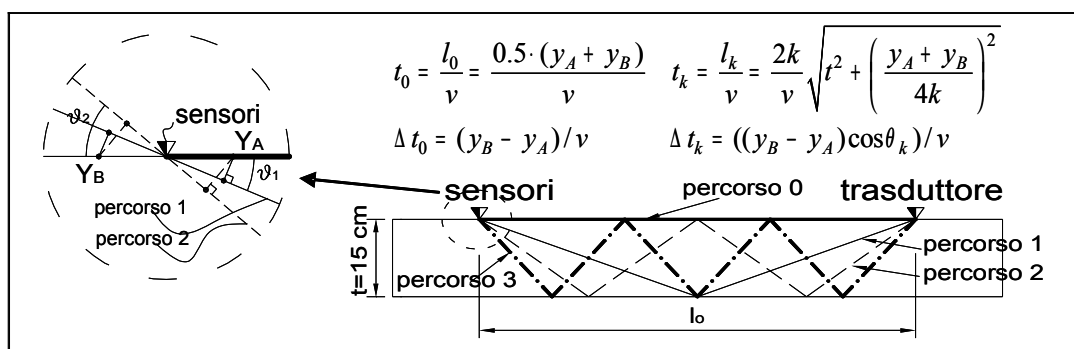


Figura 6. Valutazione dei ritardi di propagazione.

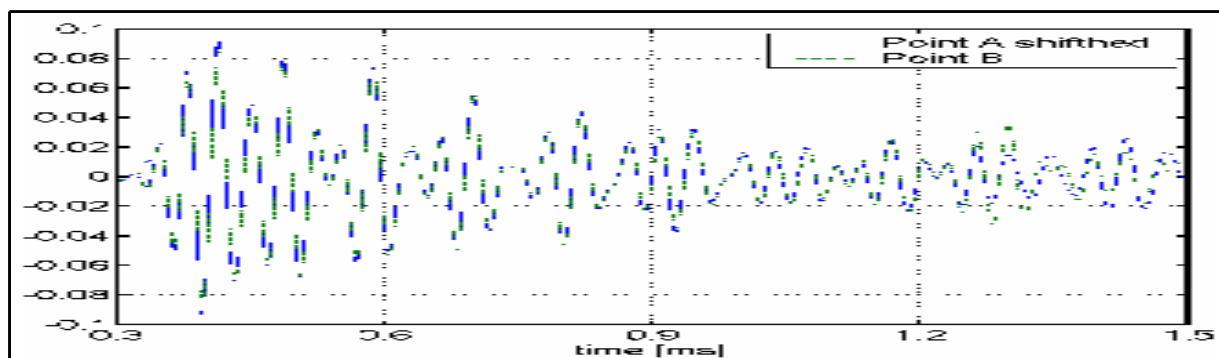


Figura 7. Forme d'onda traslate dei sensori in P₅.

I valori di ritardo ottenuti in corrispondenza degli istanti di arrivo dei vari cammini vengono interpolati permettendo di traslare la curva A su quella B come mostrato in figura 7.

Dall'esame delle forme d'onda così ottenute, si individua un intervallo di tempo (compreso fra 1.25 e 1.35 ms) in cui tali curve non sono più sovrapponibili sia per le diverse ampiezze che per un diverso rapporto di fase. In particolare la curva relativa al punto B risulta in tale intervallo in anticipo rispetto a quella del punto A. Questo comportamento è senz'altro imputabile alla presenza di un fronte d'onda riflesso che si propaga verso il trasduttore e quindi si può determinare l'istante in cui tale fronte d'onda giunge sui sensori. Si può così individuare, nota la velocità di propagazione, la distanza totale percorsa data come somma della distanza trasduttore-sorgente riflettente e della distanza sorgente riflettente-sensori. In un contesto privo di errori di misura basterebbe una triangolazione basata sui dati ottenuti da tre coppie di sensori. La presenza di tali errori richiede un numero maggiore di sensori per la stima della posizione del difetto.

Sia D_k la distanza totale relativa alla k-esima coppia di sensori posizionata in (x_k, y_k) ; siano inoltre (x_d, y_d) le coordinate (incognite) del difetto e (x_t, y_t) quelle del trasduttore.

Per la k-esima coppia di sensori possiamo scrivere:

$$F_k(x_d, y_d) = \sqrt{(x_d - x_t)^2 + (y_d - y_t)^2} + \sqrt{(x_d - x_k)^2 + (y_d - y_k)^2} - D_k = 0, \quad k = 1, \dots, N_S$$

A causa degli errori su D_k queste equazioni non possono essere contemporaneamente soddisfatte. Si usa una variante del metodo dei minimi quadrati.

Inizialmente si considerano tutte le possibili coppie di equazioni (21 quando $N_S = 7$)

$$\begin{aligned} F_k(x_d, y_d) &= 0 \\ F_h(x_d, y_d) &= 0 \end{aligned} \quad k = 1, \dots, N_S; \quad h = 1, \dots, N_S; \quad h \neq k$$

e si valutano le corrispondenti soluzioni.

Successivamente si considerano 3 equazioni per volta (35 quando $N_S = 7$):

$$\begin{aligned} F_k(x_d, y_d) &= 0 \\ F_h(x_d, y_d) &= 0 \\ F_j(x_d, y_d) &= 0 \end{aligned} \quad k = 1, \dots, N_S; \quad h = 1, \dots, N_S; \quad j = 1, \dots, N_S, \quad j \neq h \neq k$$

e si utilizza il metodo dei minimi quadrati per ottenere altre soluzioni.

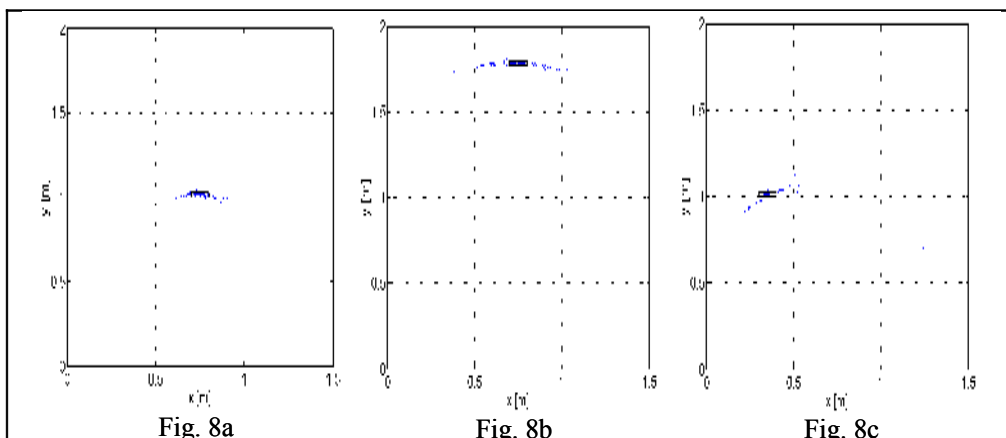


Figura 8. Ricostruzione della posizione del difetto.

Si continua considerando 4 equazioni per volta e così via. Quasi algoritmo produce un numero totale di $2^{N_s} - N_s$ soluzioni. La figura 8 mostra i risultati della procedura descritta applicata ai dati sperimentali relative ai muri con difetto precedentemente descritti.

Indagini su murature di mattoni pieni

Successivamente allo studio e alle prove sperimentali con lastre di calcestruzzo è stato effettuato l'esame del comportamento delle murature a mattoni pieni soggette a impulsi ultrasonori. Inizialmente, è stata simulata la propagazione di un'onda ultrasonora avente le stesse caratteristiche di quella usata nei modelli di calcestruzzo in muretti ad una testa con mattoni pieni delle dimensioni di 55x120x250 (mm) e con uno spessore della malta pari a 10 mm. Per le caratteristiche fisico-meccaniche dei due materiali sono stati utilizzati dei valori medi di quelli presenti in letteratura riportati nella tabella di figura 9.

In figura sono riportate la geometria del modello ad elementi finiti in cui sono evidenziate la posizione del difetto e la posizione del trasduttore (le grandezze sono espresse in mm). Il difetto nel modello è costituito da un vuoto in una parte di strato orizzontale della malta e ha interessato tutto lo spessore del muro. La forza applicata a ciascun nodo del modello a elementi finiti ha un valore massimo di 10 N e forma d'onda identica a quella di fig. 1c.

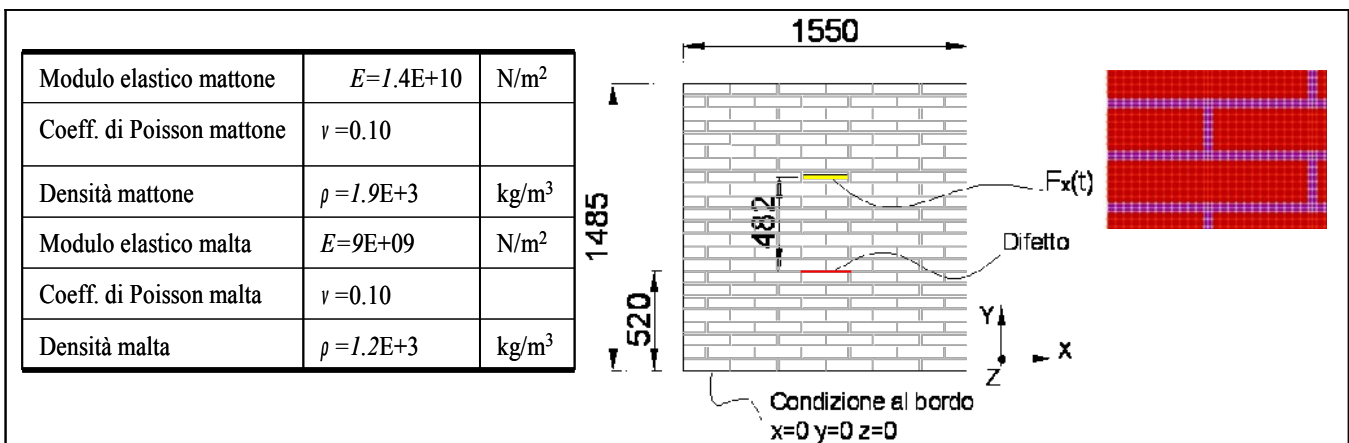


Figura 9. Dati e geometria muretto a una testa.

La figura 10 riporta il confronto fra i calcoli eseguiti sul muro precedentemente descritto e su una sua replica priva di difetto. In particolare sono confrontate all'istante $t=0.6$ ms le mappe in scala di colori delle componenti x degli spostamenti (espressi in mm) al passaggio dell'onda. È evidente come il fenomeno interessi una fascia di poco più grande della lunghezza del trasduttore. Questo vale sia per il modello privo di difetto sia per quello con difetto, in quest'ultimo è inoltre possibile notare come l'onda non lo aggira ma viene completamente riflessa dal difetto stesso.

La conoscenza dell'estensione della zona interessata alle deformazioni elastiche permette inoltre di ridurre il dominio da modellare limitandolo alla porzione di muratura effettivamente interessata dalla perturbazione con un conseguente notevole risparmio di risorse di calcolo. Inoltre le simulazioni effettuate saranno di grande aiuto nella scelta dei punti in cui verranno posizionati i sensori nella successiva fase sperimentale.

La successiva fase di indagine sulle murature ha avuto come oggetto lo studio della propagazione nei muri a due teste.

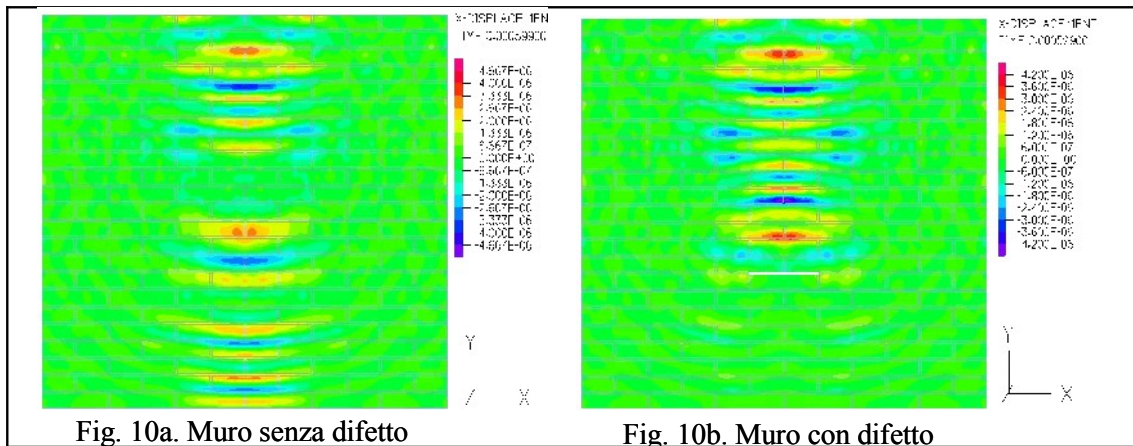


Figura 10. Confronto fra gli spostamenti.

La geometria ed il modello utilizzati sono rappresentati in figura 11. Nella costruzione di questo modello sono state sfruttate le condizioni di simmetria rappresentando pertanto solo un quarto dell'intera struttura e introducendo gli opportuni vincoli lungo il bordo sinistro e quello inferiore, mentre il bordo superiore è incastrato e infine quello destro è libero. Si è inoltre limitata la geometria modellata ad una fascia larga circa 5 volte la lunghezza del trasduttore, in accordo all'esperienza maturata dagli autori nella simulazione del muro a una testa. Nonostante gli accorgimenti adottati per limitare la dimensioni del modello, questo è risultato composto da più di un milione di elementi "brick" a otto nodi. I materiali e la forza applicata sono quelli del muro a una testa.

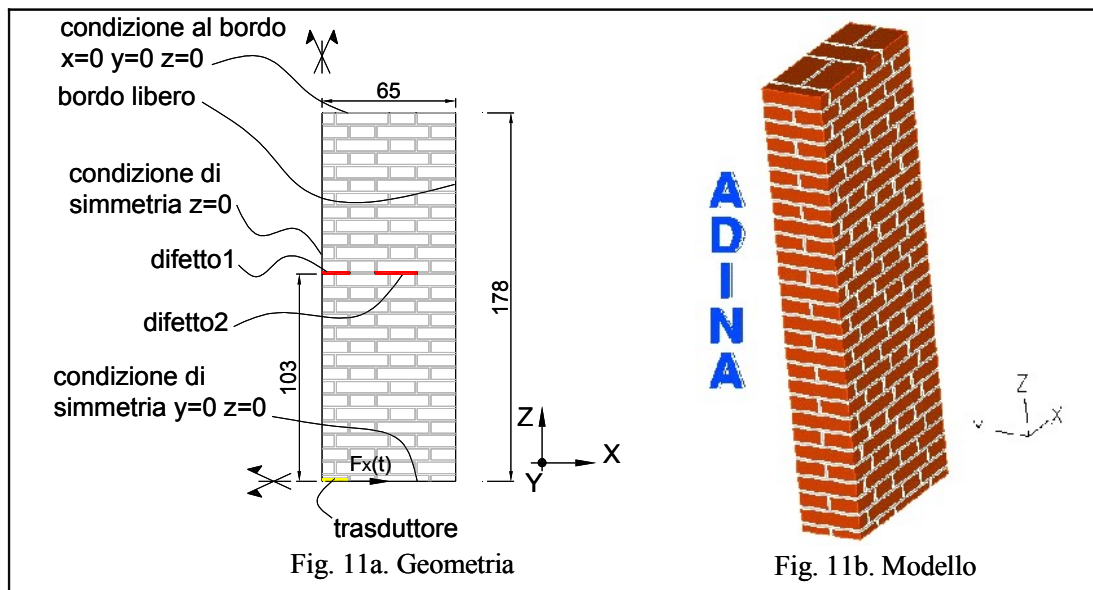


Figura 11. Modello e geometria di un muro a due teste.

Complessivamente i modelli studiati sono stati tre: essi si riferiscono al muro privo di difetto, al muro con difetto allineato al trasduttore (difetto n°1 in figura 12) e muro con difetto spostato di 32,5 cm verso il bordo destro.

Nella successiva figura 12 si riportano sotto forma di mappa in scala di colori le componenti trasversali degli spostamenti (espressi in mm) ottenuti dalle simulazioni. La figura 12a (muro privo di difetto) conferma il fatto che la perturbazione si propaga lungo una fascia che è circa 3 volte più larga della lunghezza del trasduttore, confermando la possibilità di modellare soltanto una porzione del muro. La figura 12b (muro con difetto allineato) conferma la possibilità di rilevare un tale difetto in quanto il fronte d'onda viene

quasi completamente “bloccato” dalla sua presenza e riflesso verso il trasduttore. Di contro il difetto spostato non è rilevabile poichè non si trova nella regione illuminata dal trasduttore come mostrato dalla figura 12c.

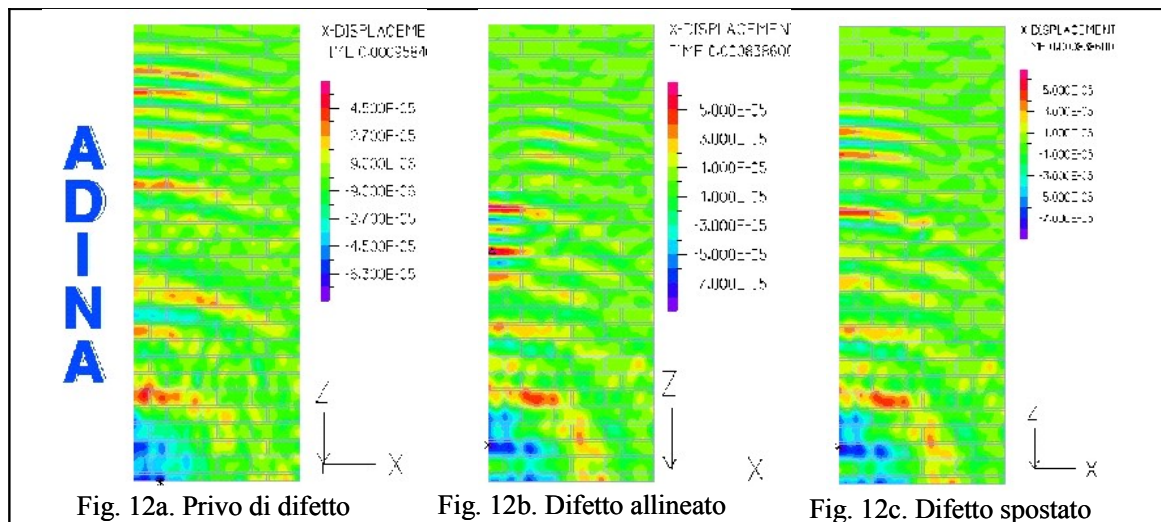


Figura 12. Risultati delle simulazioni su muri a 2 teste.

Conclusioni

In questa memoria è stata investigata la fattibilità di un metodo per l’indagine non distruttiva basato sulla propagazione di onde elastiche ultrasoniche. Sono state effettuate analisi numeriche e sperimentali su lastre di calcestruzzo ed è stato proposto un semplice ma efficace algoritmo per il trattamento dei segnali misurati al fine di individuare la posizione di eventuali difetti.

Le analisi numeriche condotte su varie tipologie di murature di mattoni pieni hanno messo in evidenza alcune importanti proprietà che potranno essere utilmente sfruttate nella pratica delle misure. Le analisi numeriche proseguiranno variando nei modelli sin qui descritti le proprietà fisico-meccaniche dei materiali ed assumendo per queste dei valori distribuiti su tutta la forbice di riferimento in modo da verificare se i comportamenti fin qui osservati non siano dovuti ai particolari valori dei parametri fisici scelti. Altre analisi saranno condotte variando la tipologia dei difetti e utilizzando anche modelli di muri a 3 teste. E’ prevista, inoltre una attività sperimentale su muri a due e tre teste per la validazione dei risultati ottenuti.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato in parte finanziato dal Ministero Italiano dell’Università e della Ricerca (MIUR) nell’ambito di un Programma di Ricerca di Interesse Nazionale (contratto PRIN n° 2005094532) e dalla Fondazione Cassa di Risparmi di Livorno.

Bibliografia

1. Kumar, A., Jayakumar, T., Subramanian C. V. and Thavasimuthu, M., “Testing of concrete structures for determination of strength and detection of flaws using low frequency ultrasonic and impact-echo techniques,” *Journal of Non-destruct Eval*, Vol. 19, No. 2, 43–46, 1999.
2. Kaltenbacher, M. “*Numerical Simulation of Mechatronic Sensors and Actuators*” Springer, Berlin 2004.
3. Graff K., F. “*Wave Motion in Elastic Solids*”, Oxford University Press 1975.