

L'ECOGRAFIA ULTRASONORA CON TECNICA SAFT PER LA VISUALIZZAZIONE DELLE SEZIONI NELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO

Giuseppe Nardoni Autore¹, Mario Certo Autore², Mattia Bentoglio Autore³, Uwe Ewert Autore⁴, Vladimir Klyuev⁵

1 Campus Albert Einstein I&T Nardoni Institute

2 Campus Albert Einstein I&T Nardoni Institute

3 Campus Albert Einstein I&T Nardoni Institute

4 Bam (Bundesanstalt für Materialforschung)

5 Spectrum Moscow

SOMMARIO

La relazione presenta la nuova tecnica SAFT ad ultrasuoni. La tecnica SAFT permette la visualizzazione della sezione esaminata; ferri d'armatura, inclusioni d'aria, e od altri materiali estranei presenti nella sezione possono essere evidenziati attraverso una rappresentazione digitalizzata in tempo reale.

La relazione presenta il principio teorico di funzionamento della tecnica SAFT ed alcuni esempi delle mappe SAFT (definite B-Scan nella terminologia ultrasonora classica) delle sezioni esaminate.

Questa tecnica, definita anche ecografia computerizzata, apre un nuovo capitolo nel controllo del calcestruzzo sia nella fase realizzativa che nell'esistente.

ULTRASONIC ECHOGRAPHY WITH SAFT TECHNIQUE TO DISPLAY SECTIONS IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

SUMMARY

The report presents the new SAFT ultrasonic technique. The SAFT technique allows the visualization of the section examined; reinforced bars, air inclusion and or other foreign materials in the section can be highlighted through a digitized representation in real time.

The report presents the theoretical principle of operation of the SAFT's technique and some examples of the SAFT's maps (called B-Scan in the classical ultrasonic terminology) of the sections examine.

This techniques, also called computerized echography opens a new chapter on the control of concrete on both implementation phase and existing phase.

1. INTRODUZIONE

Il metodo ultrasonoro [6] attualmente utilizzato nel controllo delle strutture in calcestruzzo armato è basato sulla trasmissione che permette la determinazione della velocità e dell'attenuazione dell'onda ultrasonora rappresentate nell'oscillogramma di figura 1.

La misura della velocità permette di correlare la stessa alla resistenza del calcestruzzo come esemplificato nel diagramma di figura 2.

L'attenuazione fornisce indirettamente la presenza nella matrice del calcestruzzo di cavità e od altre tipologie d'inclusioni che, a loro volta, in relazione alla densità del

materiale incluso, hanno influenza sia sulla velocità che sull'attenuazione.

La tecnica per trasmissione non è in grado di fornire una rappresentazione della sezione esaminata dagli ultrasuoni, ciò diventa possibile mediante la tecnica SAFT.

Il principio che ha permesso di realizzare la tecnica SAFT [7], è stata la sostituzione del singolo cristallo con un array di cristalli (16-48) attivati in fasi diverse in trasmissione e ricezione.

L'immagine che si ottiene è rappresentata in figura 3.

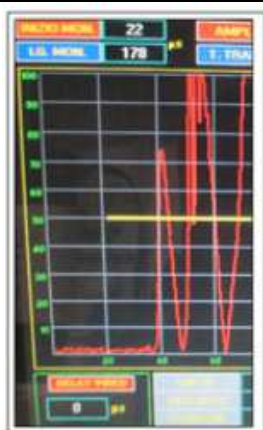


Figura 1 – Oscillogramma relativo alla determinazione della velocità in una sezione di calcestruzzo (A-Scan)

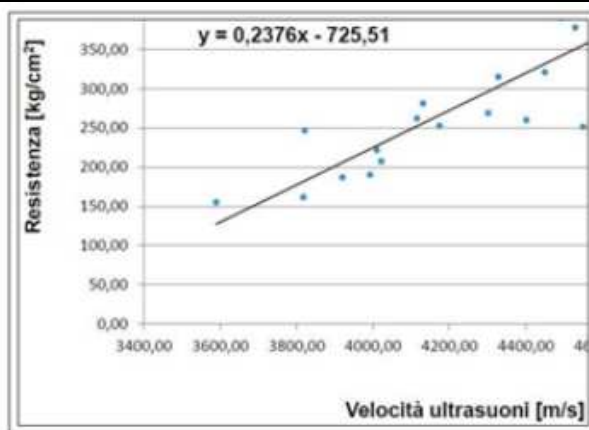


Figura 2 – Diagramma di correlazione velocità ultrasuoni [m/s] – resistenza [Kg/cm²] eseguito su campioni di carote prelevate da pilastri di una struttura colpita da un evento sismico (Mirandola)

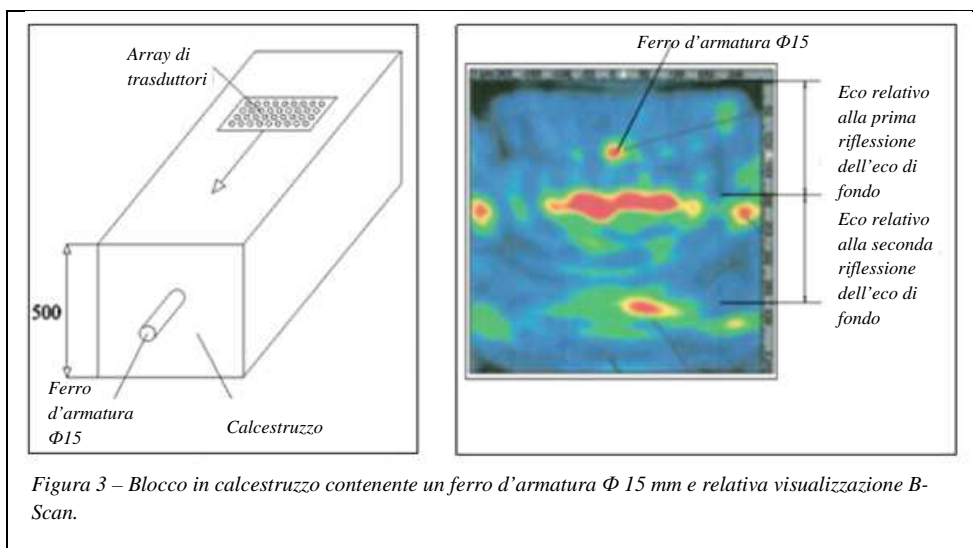


Figura 3 – Blocco in calcestruzzo contenente un ferro d'armatura Φ 15 mm e relativa visualizzazione B-Scan.

2. CARATTERISTICHE DELLA TECNICA SAFT NEL CONTROLLO ULTRASONORO DI COMPONENTI IN CALCESTRUZZO

La tecnica SAFT è basata su un algoritmo costruttivo che sulla base di n riflessioni ricevute dal materiale riesce a ricostruire il/i punti di provenienza delle varie riflessioni.

Analogo principio si riscontra nella TAC medicale (tomografia computerizzata) che irradiando l'oggetto secondo molteplici direzioni ricostruisce, mediante algoritmo, l'immagine dell'oggetto.

2.1 Configurazione dei sensori per applicazioni su calcestruzzo

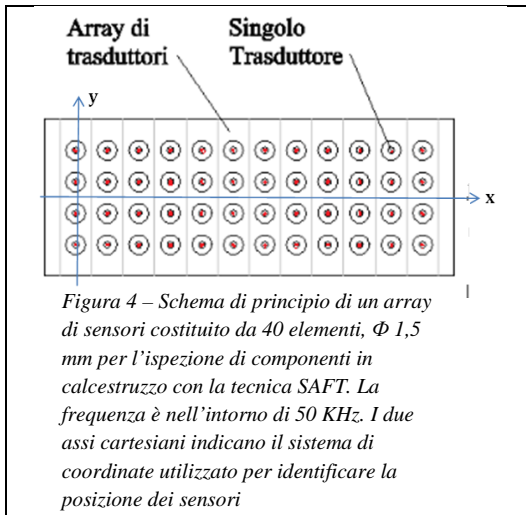
Per l'utilizzo della tecnica SAFT, si utilizza di preferenza una matrice di sensori ciascuno dei quali viene pressato sulla

superficie del componente realizzando un contatto di tipo "puntiforme". Questa particolare configurazione di ogni singolo sensore consente, da un lato, di generare efficacemente onde trasversali, e dall'altro, di rappresentare il sensore stesso come sensore puntiforme, condizione maggiormente favorevole all'impiego della tecnica SAFT.

La figura 4 illustra una configurazione tipica della matrice di trasduttori composta da 4 file di 10 sensori ciascuna operanti ad una frequenza tipica di circa 50 kHz.

Ai fini di una corretta ricostruzione SAFT della struttura interna del componente, è necessario che la spaziatura tra i singoli sensori sia minore o uguale a mezza lunghezza d'onda. Per una frequenza di circa 50 kHz, una spaziatura attorno ai 20-25 mm è più che sufficiente.

I sensori vengono utilizzati in una configurazione pitch-catch, ovvero, uno emette un breve impulso ultrasonoro ed un altro sensore, appartenente alla stessa riga, riceve il segnale d'eco.



La durata dell'impulso ultrasonoro determina inevitabilmente il potere risolvente del sistema e, quindi, si opera per ridurre il più possibile tale durata utilizzando trasduttori ad elevato smorzamento.

2.2 Prima fase: acquisizione dei segnali d'eco

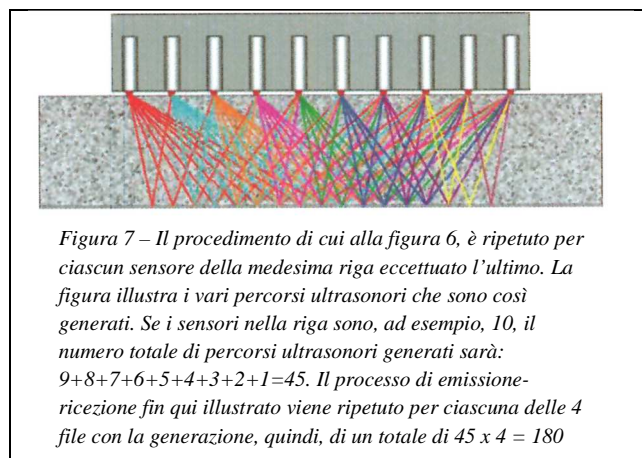
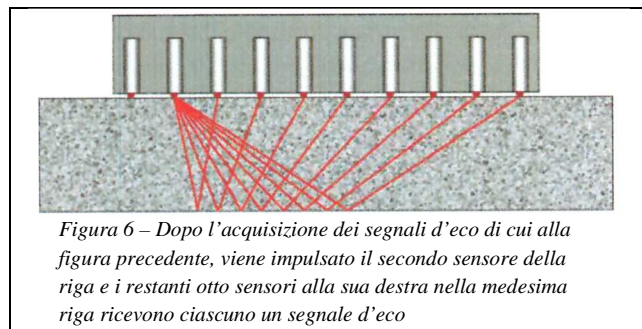
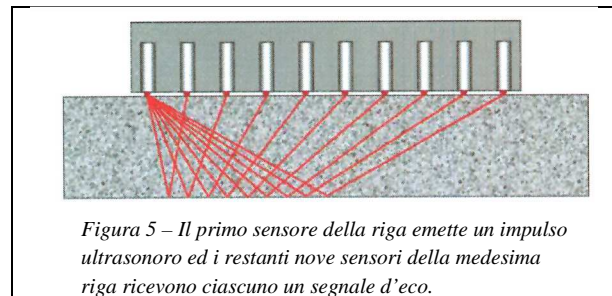
Come già detto, l'insieme delle sonde viene utilizzato in una configurazione pitch-catch. La sequenza di emissioni e ricezioni è la seguente. In figura 5 viene illustrata la prima sequenza ottenuta eccitando la prima sonda della prima fila e ricevendo, acquisendo e memorizzando i segnali d'eco ricevuti dalle rimanenti 9 sonde alla sua destra. Esaurita questa fase, si procede ad eccitare la seconda sonda della fila e ricevendo, acquisendo e memorizzando i segnali d'eco ricevuti dalle restanti 8 sonde alla sua destra, come illustrato nella figura 6.

Il processo illustrato, viene quindi ripetuto, eccitando il terzo elemento della fila e acquisendo e memorizzando il segnale dei rimanenti 7 elementi alla sua destra; e così via fino al nono elemento e acquisendo il segnale d'eco con l'ultimo elemento della fila. Il numero totale di segnali d'eco acquisiti lungo una medesima linea sarà, dunque, $9+8+7+6+5+4+3+2+1=45$. Come si è potuto osservare dalla descrizione di questo processo, un singolo elemento non viene mai utilizzato in pulse-echo. Infatti se una stessa sonda dovesse emettere e ricevere allo stesso tempo, sarebbe negativamente influenzata, cioè accecata, dal disturbo iniziale prodotto dall'impulso di eccitazione con conseguente notevole peggioramento della distanza minima rilevabile.

La sequenza descritta viene ora ripetuta per ciascuna delle 4 file ottenendo quindi un totale di $4 \times 45 = 180$ segnali d'eco acquisiti e memorizzati all'interno del computer di processo che controlla l'hardware dello strumento e provvede successivamente alla elaborazione dei segnali memorizzati.

Facendo riferimento al sistema di coordinate illustrato in figura 5, ciascuno dei 180 segnali d'eco potrà essere espresso nella forma: $S_{k,j,i}(t)$ dove k è l'indice che identifica la fila di

sensori, j indica la posizione nella fila del sensore emettitore, i indica la posizione nella medesima fila del sensore ricevitore, e t indica la coordinata temporale.



2.3 Seconda fase: ricostruzione SAFT della struttura interna al componente

La fase di acquisizione del complesso di segnali d'eco è molto veloce, al termine della quale viene attivato il processo di ricostruzione dell'immagine della struttura interna al componente giacente su un piano ortogonale rispetto alla superficie di ispezione e posto in corrispondenza dell'asse x (vedi figura 4). Questo piano immagine viene suddiviso in tanti "pixel" ciascuno centrato nella posizione (x_p, z_p) , dove x_p indica la posizione del pixel lungo l'asse x e z_p la sua profondità nel componente. Supponiamo ora che nel pixel (x_p, z_p) ci sia una discontinuità, allora il percorso compiuto dall'impulso ultrasonoro per andare dal sensore di coordinate (y_k, x_j) alla posizione (x_p, z_p) del pixel e poi da questa posizione al sensore di coordinate (y_k, x_i) è:

$$P_{k,j,i}(x_p, z_p) = \sqrt{y_k^2 + (x_j - x_p)^2 + z_p^2 + \sqrt{y_k^2 + (x_j - x_p)^2 + z_p^2}} \quad (1)$$

Se c è la velocità di propagazione, allora il tempo t impiegato sarà:

$$t_{k,j,i}(x_p, z_p) = \frac{P_{k,j,i}(x_p, z_p)}{c} \quad (2)$$

L'intensità complessiva dell'immagine nel punto (x_p, z_p) sarà data, allora, dalla sommatoria di tutte le componenti tempo $t_{k,j,i}(x_p, z_p)$ dei vari segnali $S_{k,j,i}$, cioè:

$$I_{x_p, z_p} = \sum_k \left(\sum_{j,i} S_{k,j,i} \left(t_{k,j,i}(x_p, z_p) \right) \right) \quad (3)$$

Per ogni pixel (x_p, z_p) del piano immagine viene, quindi, calcolata, mediante la (3), l'intensità dell'immagine. Se nessuna discontinuità era presente nel punto (x_p, z_p) , i vari contributi dei segnali d'eco al tempo $t_{k,j,i}(x_p, z_p)$ saranno nulli dando luogo ad un risultato nullo della sommatoria; oppure potrebbe essere presente qualche contributo dovuto a discontinuità in posizioni diverse, ma, in questo caso, tali contributi si presenterebbero sfasati dando luogo ancora ad un valore nullo della sommatoria della (3). Soltanto se, in corrispondenza del pixel in questione, era effettivamente presente una discontinuità, allora tutti i contributi che compaiono nella (3) saranno in fase dando luogo ad un valore della sommatoria non nullo.

Un'ultima precisazione riguarda l'uso delle 4 file. Idealmente, per calcolare un'immagine bidimensionale in un singolo piano, basterebbe una sola fila di sensori. Tuttavia, data la natura puntiforme dei sensori, una singola fila risulterebbe sensibile anche a discontinuità localizzate ad una certa distanza dal piano immagine (cioè lungo l'asse y). Utilizzando, invece 4 file, si introduce una certa direttività nel sistema per cui la sensibilità è massima per $y = 0$ e tende poi a decrescere rapidamente all'aumentare dello scostamento lungo l'asse y .

2.4 Vantaggi inerenti l'uso della tecnica SAFT

Il procedimento matematico descritto è anche chiamato "total focusing" [5], proprio perché è capace di ottenere un'immagine con la migliore focalizzazione possibile in ciascun punto del piano immagine. Ma altri vantaggi vanno considerati, rispetto all'utilizzo di tecniche convenzionali più semplici ed intuitive come la tecnica A-scan o B-scan. Anzitutto la maggiore divergenza del fascio ultrasonoro generato con sonde a cristallo unico accumula nel segnale A-scan e nell'immagine B-scan un eccesso d'informazioni di cui non si riesce a distinguere la provenienza. Inoltre le limitate dimensioni della sonda rispetto alle lunghezze d'onda in gioco consentono la produzione di diverse tipologie di onde (ad esempio onde superficiali, oppure longitudinali, nel caso qui considerato) con effetto di ulteriore confusione nella lettura dei segnali A-scan e nelle immagini B-scan. La tecnica SAFT, invece, produce per questi modi spuri un effetto di defocalizzazione che tende a cancellare dall'immagine finale la presenza di questi contributi spuri. Infine va considerato anche un miglioramento significativo del rumore sia di origine termica (stocastico) che deterministica (diffusione da bordo grano).

2.5 Ispezione di volume

Il procedimento SAFT [1], [4] descritto in precedenza è essenzialmente un metodo di ricostruzione bidimensionale, vale a dire, per ogni posizione dell'array di sensori, viene prodotta una sola immagine tipo B-scan in corrispondenza dell'asse x principale dell'array. Per il controllo di tutto il volume di un componente è allora necessario effettuare tante acquisizioni (e ricostruzioni) in posizioni progressive diverse lungo un appropriato asse di scansione come, ad esempio, illustrato nella figura 8.

I dati acquisiti e processati in ogni singola posizione, vengono memorizzati dallo strumento assieme alla specificazione dei parametri di scansione (origine, passo, etc.). Il layout d'ispezione prevede un certo numero di linee di scansione, opportunamente distanziate tra loro in funzione della dimensione dell'array dei sensori e della larghezza dell'immagine SAFT ricostruita; il numero delle linee di scansione è quello necessario a coprire l'intera larghezza del componente da ispezionare. Su ogni linea di scansione, l'acquisizione dei dati e la relativa ricostruzione dell'immagine SAFT viene fatta con un intervallo (passo di acquisizione) che dipende dalla dimensione del minimo difetto che s'intende rilevare.

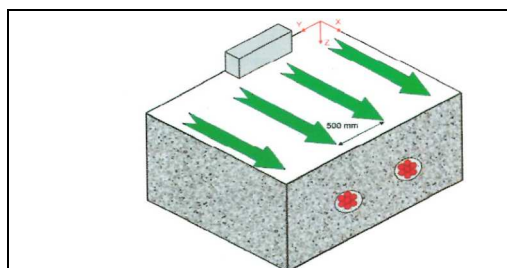


Figura 8 – Esempio di un layout d'ispezione di un componente di grandi dimensioni. Il piano di ispezione prevede un certo numero di linee di scansione separate tra loro da una distanza che dipende dalla dimensione dell'array di sensori e dalla dimensione effettiva dell'immagine SAFT ricostruita. Lungo ogni linea di scansione, il passo con cui si acquisiscono le immagini dipende dalle dimensioni minime del difetto da rilevare.

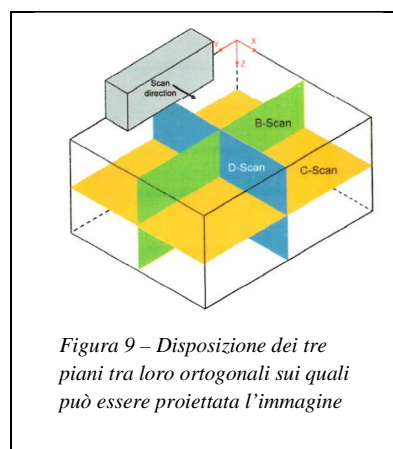


Figura 9 – Disposizione dei tre piani tra loro ortogonali sui quali può essere proiettata l'immagine

Terminata la scansione, i dati relativi alle immagini SAFT ricostruite in corrispondenza di ogni posizione dell'array di sensori vengono consolidati al fine di ottenere un'immagine tridimensionale della struttura interna del componente.

L'utente può osservare l'immagine 3D di ogni discontinuità rilevata nella sua posizione, oppure può guardare la proiezione di queste discontinuità su tre piani tra loro ortogonali ciascuno con un nome proprio come mostrato in figura 9. Un'immagine C-scan mostra le discontinuità rilevate proiettandole su un piano parallelo alla superficie d'ispezione. In un'immagine B-scan [2], [3], le discontinuità sono proiettate su un piano perpendicolare alla superficie d'ispezione e perpendicolare alla direzione delle linee di scansione. Un esempio di siffatto tipo d'immagine è riportato in figura 10.

Infine l'immagine D-scan è simile all'immagine B-scan salvo il fatto che il piano di proiezione è parallelo alla direzione delle linee di scansione.

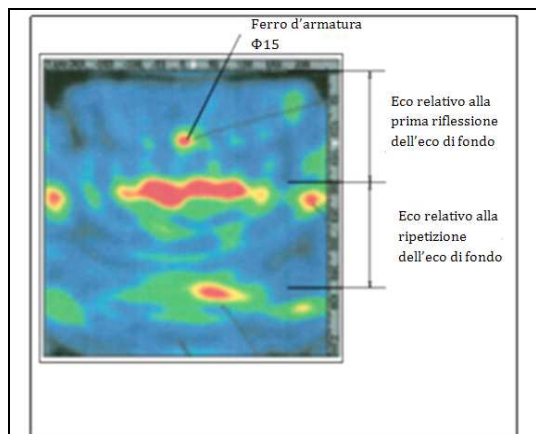


Figura 10 – Esempio d'immagine B-scan in cui sono osservabili la prima e la seconda riflessione della superficie opposta del componente e l'immagine di un ferro d'armatura da 15 mm.

2.6 Calibrazioni

Le necessità riguardanti le calibrazioni di questo tipo di apparecchiature riguardano essenzialmente la determinazione della velocità delle onde trasversali. Essa, non solo non è costante, ma varia da componente a componente. Da un lato, dunque, è necessario conoscere l'esatto valore della velocità per poter effettuare una ricostruzione SAFT corretta (vedi equazione 2), dall'altro, la velocità di propagazione è correlabile alla resistenza del calcestruzzo come indicato in figura 11. La calibrazione della velocità va fatta prima del controllo e, normalmente, la misura di velocità va fatta in un certo numero di posizioni al fine di ottenere una buona stima della velocità media degli ultrasuoni utilizzati nel controllo.

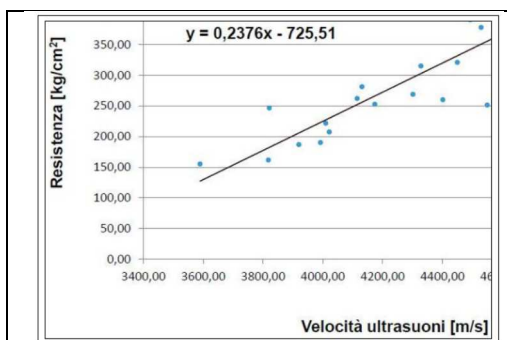


Figura 11 – Diagramma di correlazione velocità ultrasuoni-resistenza calcestruzzo basata su campioni di carote prelevate da una struttura.

3. ESEMPI APPLICATIVI

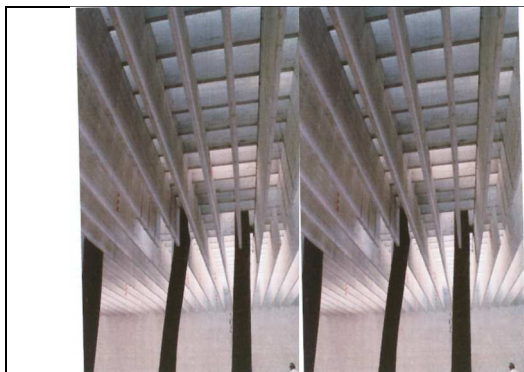


Figura 12 - Interno del Padiglione dei Paesi Nordici, Biennale di Venezia

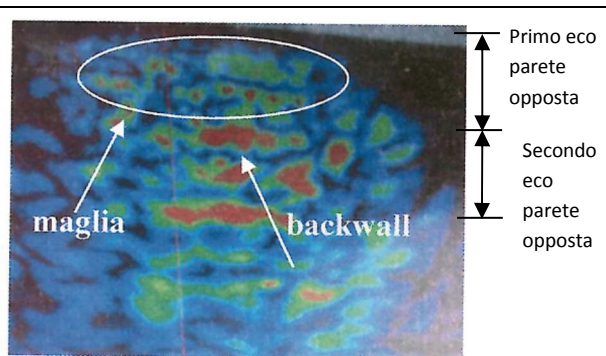
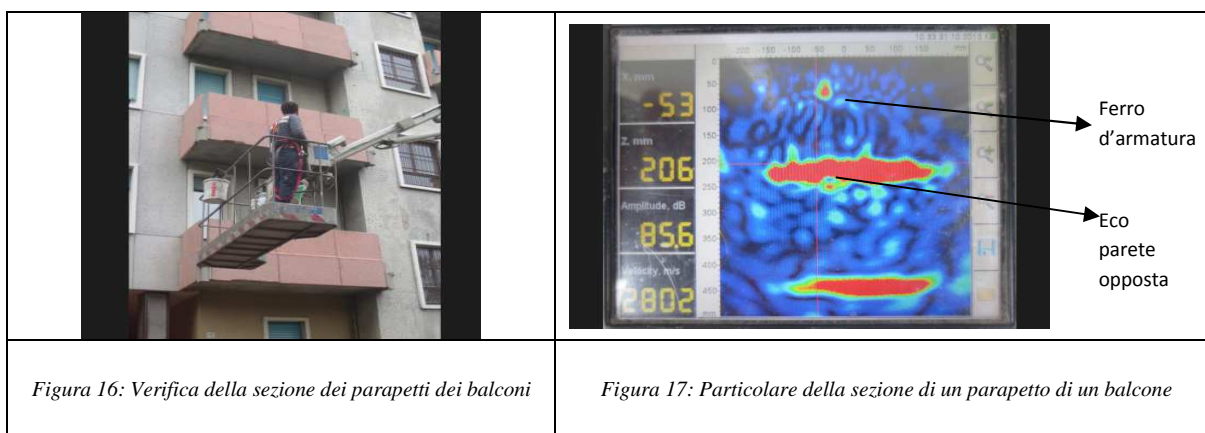
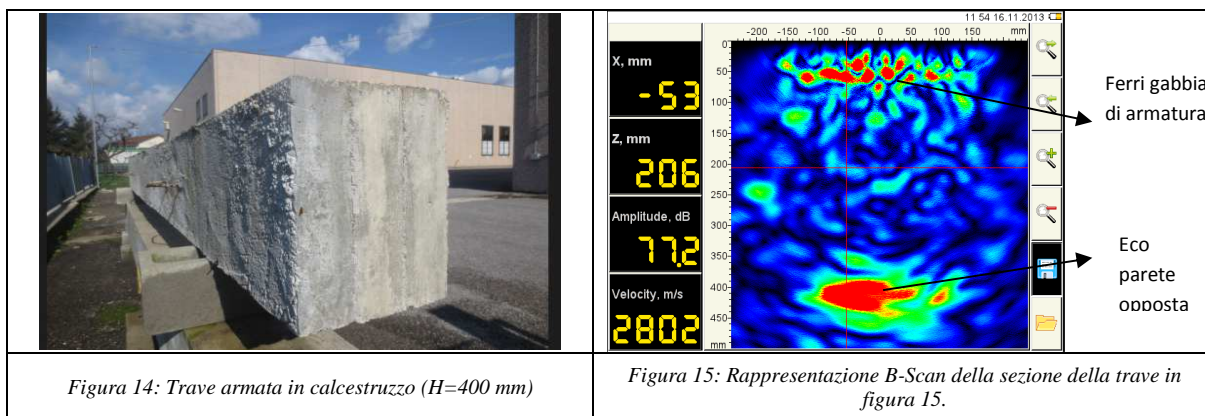


Figura 13: Rappresentazione B-Scan di una sezione di una trave di spina del padiglione



4. CONCLUSIONI

L'applicazione della tecnica SAFT al controllo delle strutture in calcestruzzo permette una visualizzazione totale della sezione, quindi un'indagine diagnostica completa dei componenti. L'applicazione pratica della tecnica risponde perciò alla domanda dell'ingegnere, dell'architetto e del

costruttore sulla reale configurazione della struttura e sulla reale disposizione delle armature e di eventuali altri elementi all'interno della stessa.

L'ingegnerizzazione della tecnica è già in essere e sono già in sviluppo le applicazioni pratiche alle strutture.

BIBLIOGRAFIA

- | | |
|--|---|
| <p>[1] C. SALEH – Ultrasonic SAFT Imaging Using A Concentric Pulsed Laser (Annular EMAT System)</p> <p>[2] G. NARDONI, M. CERTO – (2011), Detection Of Small Cracks in Welds, <i>Material Evaluation Vol. VII</i></p> <p>[3] G. NARDONI, M. CERTO – (2012), Planar and Volumetric Defects Characterization, <i>Insight Vol. 54</i></p> <p>[4] M. SCHICKERT – (1997), Towards SAFT Imaging in Ultrasonic Inspection of Concrete, <i>NDT.net Vol. 2 N°04</i></p> <p>[5] SHARP R,S – (1980), Research Techniques in Non</p> | <p>Destructive Testing Vol. IV</p> <p>[6] MALCOM J CROCKER – (2007), Encyclopedia Of Acoustics Vol. One, John Wiley & Sons (eds)</p> <p>[7] PAUL D. WILCOX, CAROLINE HOLMES AND BRUCE W. DRINKWATER – (2007) Advanced Reflector Characterization With Ultrasonic Phased Array In NDE Application, <i>Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control Ieee Transaction on Vol. 54</i></p> |
|--|---|