

## APPLICAZIONI DELLA TOMOGRAFIA PULSE-ECHO ALL'INGEGNERIA CIVILE

**Mariagrazia Bellanova, Francesco Lo Monte, Roberto Felicetti**

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano

[mariagrazia.bellanova@polimi.it](mailto:mariagrazia.bellanova@polimi.it)

[francesco.lo@polimi.it](mailto:francesco.lo@polimi.it)

[roberto.felicetti@polimi.it](mailto:roberto.felicetti@polimi.it)

**Marco Cucchi**

Laboratorio Prove Materiali, Politecnico di Milano

[marco.cucchi@polimi.it](mailto:marco.cucchi@polimi.it)

### SOMMARIO

Uno degli strumenti più innovativi attualmente disponibili per le indagini ultrasoniche su elementi in calcestruzzo è il tomografo A1040 MIRA, prodotto dalla Acoustic Control Systems di Mosca. Questo strumento è stato ideato per implementare sistematicamente la tecnica pulse-echo tramite una matrice di trasduttori a onde di taglio accoppiata ad un solo lato della struttura. Caratteristiche particolarmente interessanti di questo dispositivo sono i sensori puntiformi con accoppiamento a secco, l'implementazione automatica di sezioni tomografiche (scansioni B) tramite una specifica tecnica di focalizzazione e la possibilità di disporre dei dati grezzi acquisiti per l'implementazione di elaborazioni avanzate. Approfittando di quest'ultima opzione, gli autori hanno iniziato ad estendere l'uso di questo dispositivo ad alcuni problemi specifici al di là della semplice localizzazione dei vuoti. Un primo esempio è l'estrazione di informazioni quantitative sulla grandezza e sulla fase degli impulsi derivanti dai riflettori rilevati. Un'altra applicazione è la valutazione del danno superficiale dovuto all'esposizione al fuoco.

L'ultimo esempio riguarda la ricerca dei difetti dominanti nei tiranti in ferro battuto con il metodo delle Onde Guidate. Qui i sensori adattabili a contatto puntiforme si sono rivelati molto efficaci nell'accoppiare lo strumento alla superficie irregolare degli elementi. Queste particolari applicazioni potrebbero rafforzare l'interesse per uno strumento diagnostico già affermato nel campo delle strutture civili.

## **ABSTRACT CIVIL ENGINEERING APPLICATIONS OF PULSE-ECHO TOMOGRAPHY**

*One of the most innovative tools available for ultrasonic imaging of concrete elements is the A1040 MIRA tomograph, by Acoustic Control Systems (Moscow, Russia). This instrument was devised to systematically implement the pulse-echo technique via an array of shear wave transducers coupled to one side of the structure. Particularly interesting features are the spring-loaded dry point-contact sensors, the automatic implementation of tomographic B-scans via the Synthetic Aperture Focusing Technique and the availability of raw acquired data for customized post-processing. Taking advantage of this last option, the authors started extending the use of this device to some specific problems beyond the bare localization of voids. One first example is the extraction of quantitative information about the magnitude and phase of pulses ensuing from the detected reflectors. Another application is the assessment of surface damage due to fire exposure. The last example deals with the implementation of the Guided Waves method to ancient wrought iron tie-rods including coarse welding defects. Here the adaptable point sensors proved to be very effective in coupling the instrument to the remarkably rough surface of the elements. These special applications may further promote the interest in this renowned diagnostic tool for civil structures.*

## **PAROLE CHIAVE | KEYWORDS**

Difetti, eco di impulsi ultrasonici, onde guidate, tomografia  
*Defects, guided waves, SAFT, tomography, ultrasonic pulse-echo*

## **RINGRAZIAMENTI**

I metodi di prova e i casi di studio discussi in questo lavoro rientrano nelle attività del Laboratorio Interdipartimentale per la Diagnostica e il monitoraggio Strutturale PoliNDT, attivo presso il Politecnico di Milano.

## INTRODUZIONE

I metodi acustici sono comunemente usati per l'ispezione di strutture in calcestruzzo, nelle gamme di frequenza sonora ( $f < 20$  kHz) e ultrasonica ( $f > 20$  kHz). Il loro uso più comune è la valutazione della velocità delle onde nel materiale al fine di stimarne la qualità media. Altre applicazioni più avanzate, in particolare nel campo ultrasonico, sono la valutazione dello spessore degli elementi, il rilevamento di fessure e vuoti, l'identificazione di armature di grande diametro e dei cavi di post-tensione, il controllo delle iniezioni cementizie [1].

Tuttavia, questi ultimi casi presentano una maggiore difficoltà, a causa dell'eterogeneità intrinseca del calcestruzzo. Le interfacce all'interno del materiale (cemento-aggregato e cemento-pori) o eventuali altre forti disomogeneità acustiche (per esempio il contorno dell'elemento strutturale) inducono riflessioni secondarie e rifrazioni, che disturbano la propagazione delle onde nel mezzo (fenomeno dello scattering). Questo è il motivo per cui il rumore "strutturale" e l'attenuazione condizionano i risultati, specialmente a frequenze superiori a 100 kHz [2]. Inoltre, tali discontinuità attivano diversi modi di propagazione (conversione di modo d'onda), ognuno caratterizzato da una diversa velocità di propagazione. Questo si traduce nella dispersione e distorsione delle onde durante la propagazione.

Per i motivi indicati, la semplice misura della velocità degli impulsi (Ultrasonic Pulse Velocity - UPV) continua ad essere la più diffusa tra le tecniche acustiche per il controllo strutturale. In questo metodo, la valutazione della risposta del materiale si basa sulla trasmissione di impulsi lungo il percorso diretto tra le sonde emittente (TX) e ricevente (RX). Poiché viene considerato solo il primo arrivo del fronte d'onda nel segnale ricevuto, il tempo di volo (Time Of Flight - TOF) è governato dalla propagazione in linea retta nella modalità più veloce (onda di compressione) e non è influenzato dai disturbi citati.

In alternativa, è possibile utilizzare i metodi impact-echo (IE) e pulse-echo (PE), che si basano sull'eccitazione di un breve impulso meccanico e sul rilevamento, nella stessa zona di emissione, dei segnali riflessi dalle discontinuità interne all'elemento indagato. Al fine di considerare le indicazioni provenienti da più riflettori posti a diverse profondità, il segnale deve essere analizzato in una finestra temporale sufficientemente ampia, e di fatto viene influenzato da scattering e dispersione.

Il metodo impact-echo viene impiegato su elementi di forma regolare, per lo più lastre e pareti di spessore relativamente uniforme contenenti eventuali vuoti significativi o fessure di delaminazione parallele alla superficie indagata. Nella maggior parte dei casi l'impulso è generato dall'impatto di una piccola massa (sfera d'acciaio o piccolo martello). L'esame del manufatto si basa sull'analisi in frequenza dei segnali, in virtù della periodicità delle riflessioni multiple tra l'eventuale interfaccia che viene rilevata e la superficie esterna su cui viene implementata la prova. I picchi di frequenza forniscono informazioni sulla profondità delle interfacce acustiche (frequenza più alta per difetti superficiali), con minore influenza delle componenti di segnale incoerenti causate dal rumore strutturale.

Al contrario, il metodo pulse-echo si basa sulla sola prima riflessione di un breve impulso diagnostico emesso da un trasduttore piezoelettrico. Possono essere ispezionati elementi strutturali di geometria più complessa, a condizione che il rilievo venga ripetuto su una griglia regolare di punti di misura [3]. Ciò consente di distinguere e localizzare i diversi riflettori, nonostante le rispettive indicazioni risultino sovrapposte nelle singole acquisizioni dei segnali del dominio del tempo (scansioni A). Gli strumenti dotati di matrici di sensori o i sistemi automatici di posizionamento delle sonde sono particolarmente adatti per questo tipo di applicazione [4].

Al fine di tradurre le misurazioni in immagini tomografiche, riducendo nel contempo il rumore strutturale intrinseco, sono state proposte diverse tecniche di elaborazione. Tra queste, la Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) fornisce risultati molto efficaci con un modesto onere computazionale. L'algoritmo focalizza un generico pixel nell'immagine tomografica sommando ciascun segnale al tempo corrispondente alla distanza geometrica percorsa da un impulso che venga riflesso da quel pixel [5] (si veda la figura 2). Si possono adottare griglie di acquisizione lineari o planari, che restituiscono rispettivamente rappresentazioni bidimensionali e tridimensionali.

Le immagini SAFT bidimensionali sono sezioni ortogonali alla superficie di prova (scansioni B), mentre nel caso 3D si possono produrre sezioni parallele alla superficie di prova (scansioni C). La SAFT consente anche la ricostruzione del contorno degli elementi (riflettore perfetto), che può essere preso come riferimento nella valutazione dell'intensità di altri riflettori interni all'elemento strutturale. Inoltre, gli effetti del rumore strutturale e delle conversioni di modo vengono attenuati dalla composizione di più segnali, portando a una significativa riduzione dei disturbi.

Un ulteriore affinamento delle elaborazioni mediante la SAFT consiste nell'analisi di fase delle immagini, che può aiutare a riconoscere diversi tipi di discontinuità [6]. Le interfacce aria-calcestruzzo comportano la riflessione completa con inversione di fase degli impulsi (per esempio un impulso di compressione viene riflesso come impulso di trazione). Viceversa, una riflessione parziale e con la stessa fase avviene all'interfaccia verso le barre d'acciaio e i cavi di post-tensione, che presentano un'impedenza acustica superiore rispetto al calcestruzzo (l'impedenza acustica è data dal prodotto della densità del materiale per la velocità di propagazione dell'impulso). Storicamente, la prima apparecchiatura per la produzione automatizzata di immagini ecografiche negli elementi in calcestruzzo è il tomografo MIRA A1040 ideato dalla Acoustic Control System (Mosca, Russia). Nella sezione seguente vengono richiamate alcune caratteristiche interessanti di questo strumento, insieme alla procedura seguita per l'acquisizione delle forme d'onda. Successivamente verranno discussi alcuni metodi alternativi per l'elaborazione dei dati, al fine di estendere il suo utilizzo a specifiche applicazioni nelle quali l'acquisizione di una serie di segnali mediante una matrice di sensori di emissione/ricezione si rivela particolarmente efficace.

## **CONCEZIONE E CARATTERISTICHE DELLO STRUMENTO**

Il tomografo A1040 MIRA è un dispositivo ultrasonico avanzato per le indagini su elementi in calcestruzzo basate sul metodo pulse-echo. È stato sviluppato circa vent'anni fa dalla Acoustic Control System di Mosca in collaborazione con l'Istituto Federale per la Ricerca e le Prove sui Materiali (BAM) di Berlino. Una caratteristica chiave di questo strumento è la matrice di 48 trasduttori piezoelettrici fortemente smorzati e con contatto puntiforme (figura 1). I sensori sono caricati da molle indipendenti, che consentono loro di adattarsi a superfici irregolari e non perfettamente piane (entro una tolleranza di 8 mm). Sono inoltre dotati di punta di contatto in materiale ceramico resistente all'usura e non richiedono alcun agente di accoppiamento (DPC - Dry Point Contact).

Nella versione attuale dello strumento, i sensori sono organizzati in 12 blocchi di 4 trasduttori ciascuno. Ogni blocco funziona come un singolo sensore che emette/riceve onde di taglio (piano di polarizzazione lungo l'asse x di figura 1).

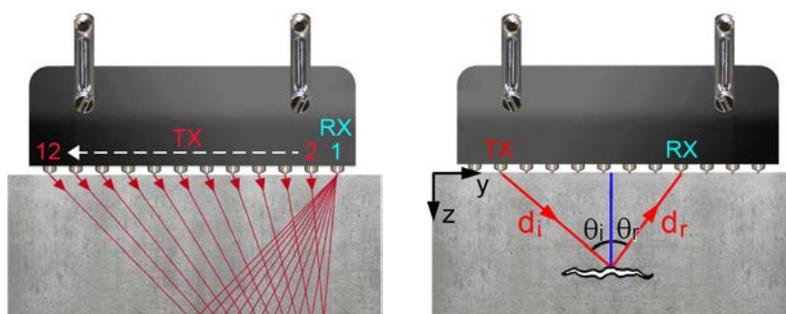


1. Lo strumento e la matrice di 12 blocchi da 4 sensori per onde di taglio.

Sebbene la frequenza centrale dei trasduttori sia di 50 kHz, l'elevato smorzamento determina una buona risposta in un intorno abbastanza ampio e gli impulsi emessi possono essere pilotati, mediante un'eccitazione a onda quadra, nell'intervallo tra 25 e 85 kHz e con una durata da 0.5 a 2 cicli. Poiché la dimensione complessiva di ciascun blocco nel piano di polarizzazione (90 mm) è maggiore della lunghezza d'onda che si sviluppa nelle normali applicazioni ( $\approx 50$  mm), ne discende un piccolo angolo di divergenza degli impulsi nel medesimo piano. Al contrario, la dimensione dei sensori è trascurabile lungo l'asse longitudinale dello strumento (asse y in figura 1), il che implica un ampio angolo di divergenza nel piano di scansione, e quindi la capacità di ispezionare un campo relativamente esteso (in genere  $\pm 175$  mm).

Il vantaggio principale che deriva dall'adozione delle onde di taglio è di non subire conversioni di modo quando vengono riflesse e di essere caratterizzate da lunghezze d'onda più corte (risoluzione più elevata) rispetto alle onde di compressione della stessa frequenza. Inoltre, riflettori anche di piccole dimensioni (10-15 mm) nel piano della scansione tomografica, ma con geometria allungata nella direzione di polarizzazione delle onde (come armature e cavi), possono essere rilevati abbastanza agevolmente.

Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati, ciascun blocco di trasduttori agisce a turno come ricevitore o emettitore. Seguendo la numerazione mostrata in figura 1, il primo blocco è configurato come ricevitore e quelli successivi funzionano a turno come emettitori (figura 2). Quindi il secondo blocco viene impostato come ricevitore e, di nuovo, quelli successivi emettono impulsi in sequenza. In sintesi, in circa 3 secondi vengono raccolte 66 scansioni di tipo A (ampiezza-tempo, 2048 campioni, 14 bit a 1 MHz) poi elaborate sotto forma di sezione tomografica (scansione B) nel piano y-z. I dati acquisiti sono resi disponibili anche in file binari per l'eventuale implementazione di algoritmi specifici di migrazione. Le principali caratteristiche tecniche del tomografo A1040 MIRA sono riassunte nella Tabella 1.



2. Sequenza di acquisizione dei segnali e percorso degli impulsi incidente e riflesso.

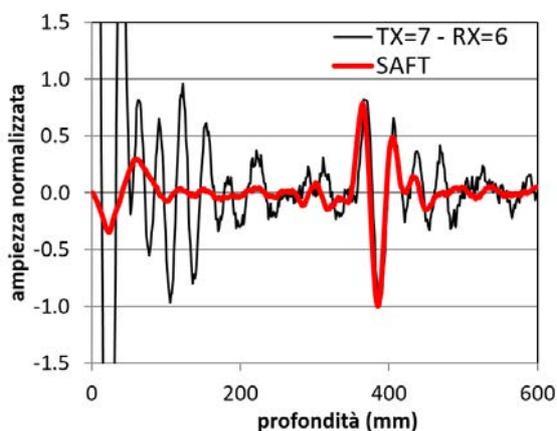
**Tabella 1.** Specifiche tecniche del tomografo A1040 MIRA.

Parametro	Valore	Unità
frequenza di campionamento	1	MHz
risoluzione del convertitore A/D	14	bits
guadagno dell'amplificatore	da 0 a 60	dB
frequenza degli impulsi (onda quadra)	25-85	kHz
pausa tra gli impulsi	da 0 a 50	ms
durata degli impulsi	da 0.5 a 2	periodi
numero di blocchi di sensori	12	
passo dei blocchi di sensori	30	mm

### COMBINAZIONE DEI SEGNALI E COSTRUZIONE DEL TOMOGRAMMA

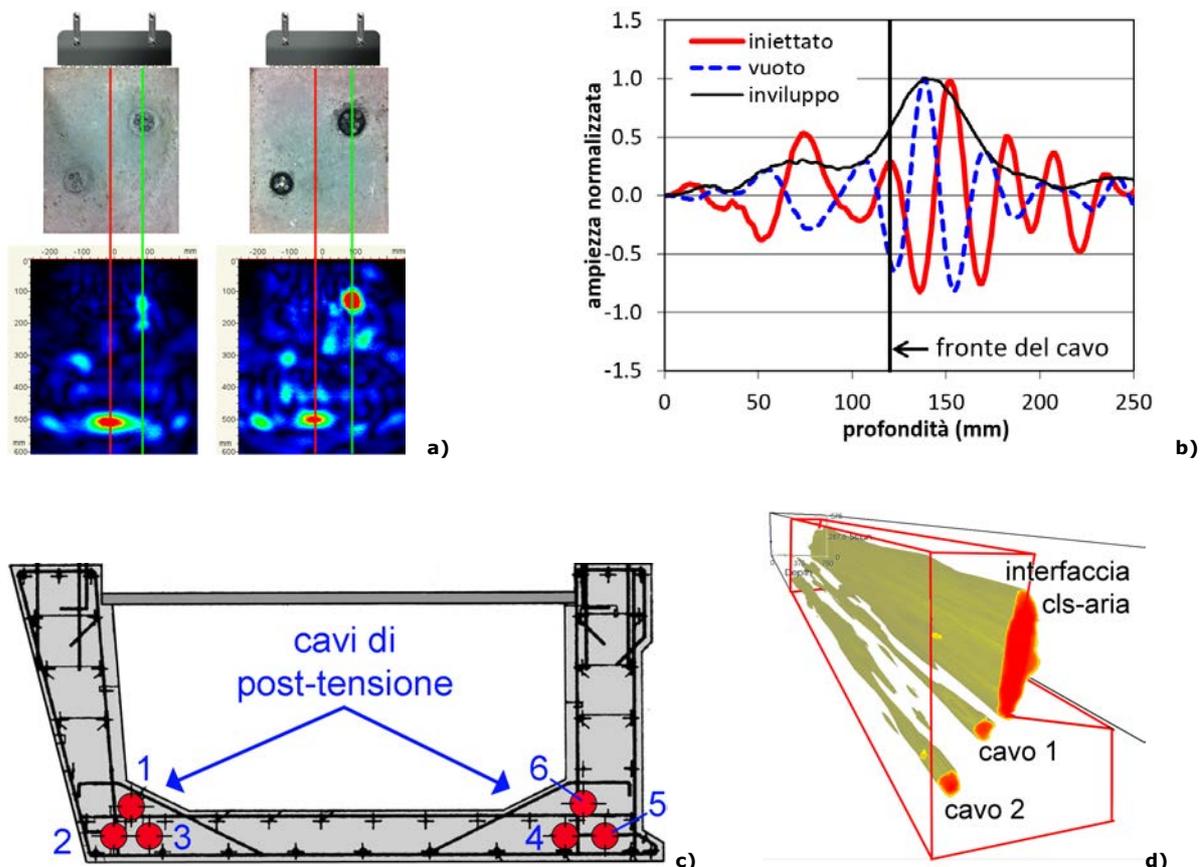
Come discusso, l'acquisizione dei dati tramite il tomografo ultrasonico implica la raccolta di un insieme di 66 forme d'onda nel dominio del tempo (scansioni A). Ciò significa che qualsiasi riflettore situato sotto la matrice di sensori viene osservato attraverso numerose diverse combinazioni emettitore-ricevitore [7]. Secondo il principio della SAFT, al fine di combinare coerentemente questi segnali con riferimento ad un punto generico del tomogramma, la loro ampiezza deve essere valutata nell'istante corrispondente al tempo impiegato dagli impulsi incidente e riflesso per coprire i rispettivi percorsi di lunghezza  $d_i$  e  $d_r$  (figura 2). Questo sfasamento temporale viene solitamente calcolato nell'ipotesi di velocità degli impulsi uniforme all'interno dell'elemento indagato, il cui valore viene determinato con altri metodi (per esempio Ultrasonic Pulse Velocity con onde di taglio) o mediante calibrazione in un punto di spessore noto nell'elemento indagato. Nella combinazione può essere assegnato un peso diverso a ciascun segnale in base alle inclinazioni dei raggi  $\theta_i$  e  $\theta_r$  (fattore di apodizzazione, che assume valori più alti per angoli piccoli e osservazione frontale del pixel considerato).

Il vantaggio di unire coerentemente un elevato numero di segnali è evidenziato in figura 3, dove la riflessione del fondo rilevata su un segmento prefabbricato per rivestimento di gallerie (spessore=0.4m) viene osservata tramite la singola scansione A prodotta da due blocchi consecutivi di sensori posti al centro della matrice o mediante una sezione verticale della scansione B ottenuta con la focalizzazione mediante SAFT. In quest'ultimo caso si osserva un rumore decisamente inferiore.



**3.** Confronto tra una singola scansione A e la sezione verticale dell'immagine costruita con la SAFT

La semplice combinazione dei segnali mantiene la forma originale e la fase dell'impulso diagnostico riflesso e consente di identificare riflettori di impedenza acustica superiore o inferiore rispetto al calcestruzzo (condotto di post-tensione iniettato o vuoto, figure 4a,b). In altre applicazioni, è preferibile una rappresentazione più nitida della risposta osservata in termini di ampiezza, che può essere ottenuta considerando l'involuppo del segnale focalizzato. Questo può essere ricavato ripetendo la procedura di focalizzazione sulla trasformata di Hilbert dei segnali rilevati, la cui fase è spostata di un quarto di periodo rispetto alle onde originali (quadratura di fase). Il modulo di queste due componenti ortogonali è rappresentativo dell'ampiezza locale del segnale e consente di annullare l'andamento ondulatorio degli impulsi riflessi, evidenziandone la sola ampiezza.



4. Inversione di fase e involuppo del segnale (b) nel caso (a) di un cavo di post-tensione non iniettato, (c) sezione di un ponte a cassone post-teso e (d) mappa 3D dell'intensità della riflessione nell'angolo inferiore.

#### MISURE DI SPESSORE E VERIFICA DELLE INIEZIONI CEMENTIZIE

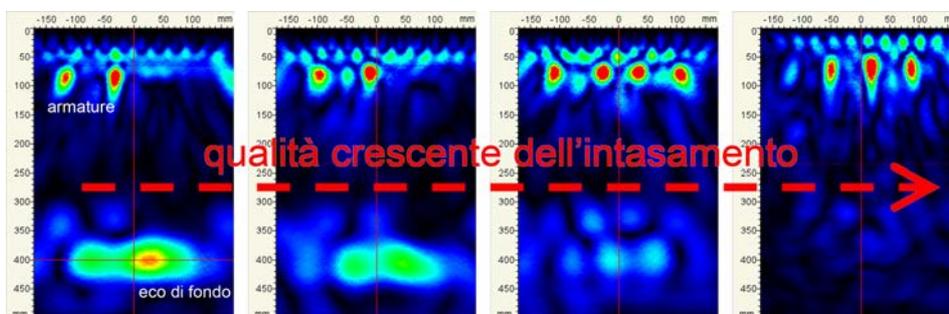
Il metodo pulse-echo è molto sensibile alla presenza di interfacce calcestruzzo-aria, grazie al notevole contrasto tra i due mezzi in termini di impedenza acustica. È dunque particolarmente adatto alla determinazione dello spessore di elementi ispezionabili da un solo lato o nella valutazione della qualità delle iniezioni cementizie (a) all'interno delle guaine per cavi di post-tensione, (b) tra il rivestimento di gallerie in conci prefabbricati e il suolo circostante e (c) nel ripristino delle impermeabilizzazioni di opere sotterranee.

Al di là delle considerazioni precedenti sulla fase dei segnali, le prove di laboratorio mostrano come la qualità delle iniezioni nelle guaine abbia effetti evidenti sull'intensità dell'impulso riflesso, che è appena identificabile con cavi ben iniettati e

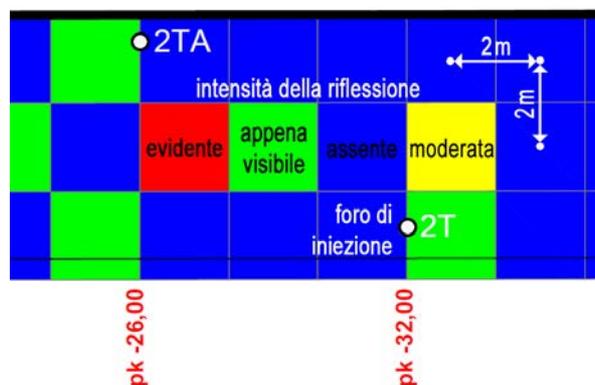
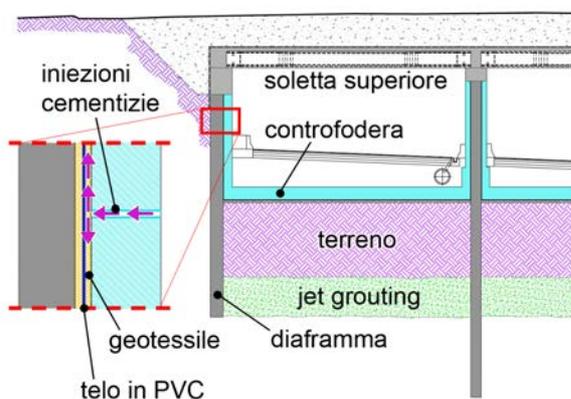
molto nitido in presenza di bolle d'aria (figura 4a). Le prove sul campo effettuate su travi da ponte a cassone (figura 4c), confermano questi risultati e con tempi di esecuzione ragionevoli, compatibilmente con la densità dei punti di misura. Ipotizzando una sezione d'indagine ogni 0.5 m, costituita da tre scansioni distanziate di 0.1 m (al fine di migliorare la focalizzazione), è possibile ispezionare 30 m di cavo in meno di due ore. In tal caso si rivela molto utile la costruzione di mappe 3D (figura 4d), che permettono di individuare meglio il cavo e di focalizzare possibili difetti dell'iniezione cementizia, riducendo l'effetto di disturbo generato dalle armature ordinarie.

Il tomografo si è rivelato particolarmente efficace anche nella valutazione dell'efficacia delle iniezioni di malte in pressione per l'intasamento estradossale del rivestimento in conci prefabbricati delle gallerie. L'attenuazione dell'ampiezza dell'onda riflessa può essere adottata come indicatore della riuscita dell'intervento, permettendo di classificare diversi livelli di qualità dell'iniezione (figura 5).

La stessa metodologia è stata applicata nel caso di una galleria a sezione rettangolare realizzata con metodo "Milano", ove si intendeva verificare la qualità della saturazione con boiaccia cementizia del geotessile di separazione tra la membrana impermeabile che riveste i diaframmi contro terra e le controfodere del rivestimento interno in c.a. (dettaglio a sinistra in figura 6). In questo caso sono state individuate quattro classi di qualità dell'esecuzione (da iniezione completa a iniezione assente), che sono state sintetizzate in mappe cromatiche (passo 2x2m, 2000m<sup>2</sup> indagati in 8 ore). Va sottolineato che, visti i tempi ridotti necessari per ciascuna scansione (dell'ordine di 10 secondi), le tempistiche del rilievo sono dettate in primo luogo dal tempo necessario per l'accesso mediante pedana mobile ai punti di indagine in quota.



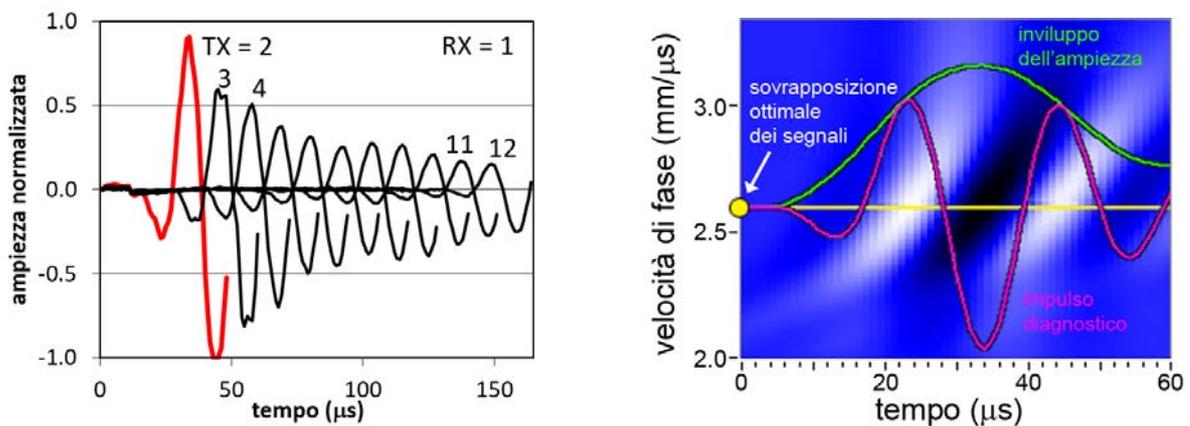
5. Attenuazione dell'eco di fondo dei conci prefabbricati di rivestimento di una galleria ferroviaria (spessore 400mm) al crescere della qualità dell'intasamento estradossale.



6. Ripristino dell'impermeabilità in una galleria stradale mediante iniezioni cementizie ed esempio di mappa dell'ampiezza dell'onda riflessa.

## VELOCITÀ DELLE ONDE IN SUPERFICIE

Un'informazione accessoria consentita dal tomografo A1040 è la valutazione della velocità delle onde di taglio nello strato più superficiale dell'elemento indagato, che costituisce il punto di partenza nella creazione di mappe tomografiche in elementi la cui qualità del materiale sia sconosciuta. Ciò è possibile sfruttando la trasmissione diretta delle onde in superficie tra i 12 blocchi di sensori. Per ogni coppia emettitore-ricevitore, l'impulso generato viene rilevato con un ritardo che dipende dalla distanza reciproca e dalla velocità di fase delle onde (figura 7a). Assegnando un valore di tentativo a quest'ultima, le parti iniziali di tutti i 66 segnali acquisiti possono essere traslate lungo l'asse dei tempi e quindi sommate. La migliore stima della velocità di fase è quella che produce la migliore sovrapposizione tra i segnali, ovvero quella che massimizza l'ampiezza dell'onda risultante (quantificata dal picco dell'involuppo, figura 7b). Poiché gli impulsi trasmessi tra sensori più lontani forniscono informazioni più significative, ma subiscono un'attenuazione maggiore, nella procedura di ottimizzazione a ciascun segnale può essere assegnato un peso proporzionale alla distanza tra le sonde.

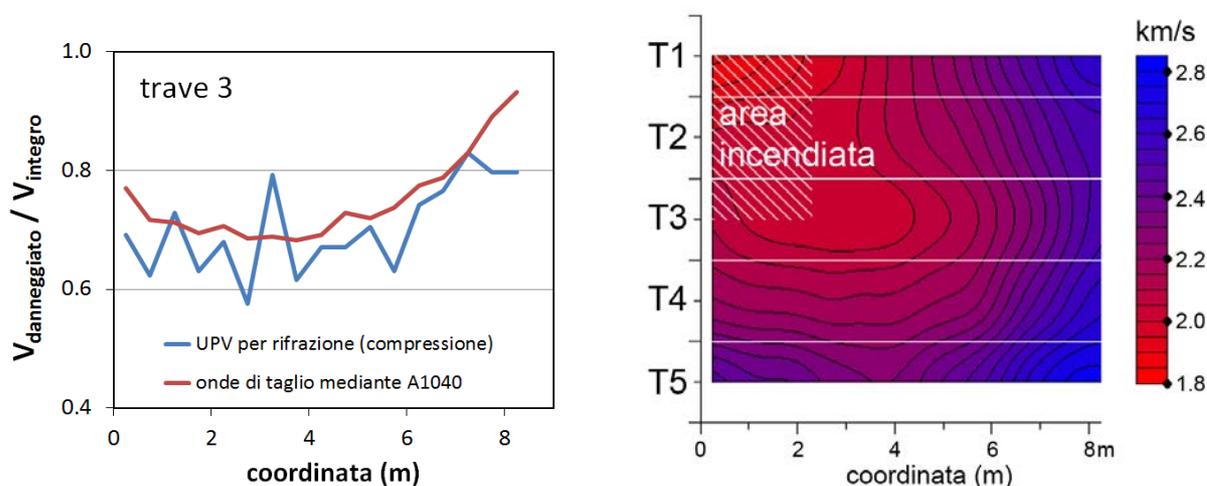


7. Ritardo del primo impulso ricevuto al crescere della distanza tra i sensori e sovrapposizione ottimale in corrispondenza della velocità delle onde nel materiale indagato.

Un'interessante applicazione di questa procedura riguarda le indagini su elementi in calcestruzzo esposti a incendio, per i quali la velocità delle onde elastiche sulla superficie è un indicatore molto significativo del danneggiamento subito. Tuttavia, la presenza di fessure e la scarsa efficienza delle normali sonde ultrasoniche nella trasmissione indiretta di impulsi di compressione rendono piuttosto impegnativa l'implementazione in-situ del tradizionale metodo UPV. Al contrario, le onde di taglio tendono ad essere guidate dallo strato danneggiato (onde di Love) e subiscono una minore attenuazione. Inoltre, unendo molti segnali acquisiti in regioni diverse all'interno della matrice di sensori (di lunghezza 330 mm) si riduce fortemente l'influenza delle possibili fessure rispetto alle singole misurazioni UPV indirette.

Un primo caso studio dove è stata utilizzata questa metodologia riguarda un cavalcavia in calcestruzzo il cui intradosso è stato interessato dall'incendio localizzato sviluppato da un autobus in fiamme [8]. I risultati ottenuti con il tomografo mostrano una maggiore regolarità rispetto alla tradizionale tecnica UPV indiretta con onde di compressione (figura 8). Da notare che l'accoppiamento a secco della matrice di sensori, consentito dai trasduttori DPC, è stato di notevole aiuto in questa applicazione. Nonostante gli stringenti vincoli operativi legati

all'interferenza con il traffico sottostante, è stata ottenuta una mappa dettagliata delle condizioni dell'intradosso del ponte in un tempo relativamente breve (85 punti su 80 m<sup>2</sup> in 3 ore).



8. Velocità delle onde di taglio all'intradosso dell'impalcato del sovrappasso nella zona sovrastante al focolaio di incendio.

### ONDE GUIDATE NELLE CATENE IN FERRO BATTUTO

Un'altra interessante applicazione del tomografo A1040 è l'ispezione delle catene storiche in ferro battuto per l'identificazione dei difetti dominanti. Tali difetti consistono solitamente in fessure nucleate lungo le saldature forgiate (le cosiddette "bolliture"), che in passato venivano utilizzate per assemblare più barre da 1.0-1.5 m in elementi più lunghi. L'idea di base è quella di disporre il tomografo con l'asse longitudinale y parallelo all'elemento indagato, in modo da eccitare delle onde guidate antisimmetriche. Ciò consente anche di trarre vantaggio dalla matrice di sensori, poiché il ferro battuto è un materiale eterogeneo e la combinazione di molti segnali tramite una procedura di messa a fuoco migliora la qualità dei risultati. Inoltre, i trasduttori caricati a molla e con contatto puntiforme a secco (DPC) possono adattarsi alla superficie rugosa dell'elemento senza richiedere l'impiego di un mezzo accoppiante, e quindi preservando il metallo originale.

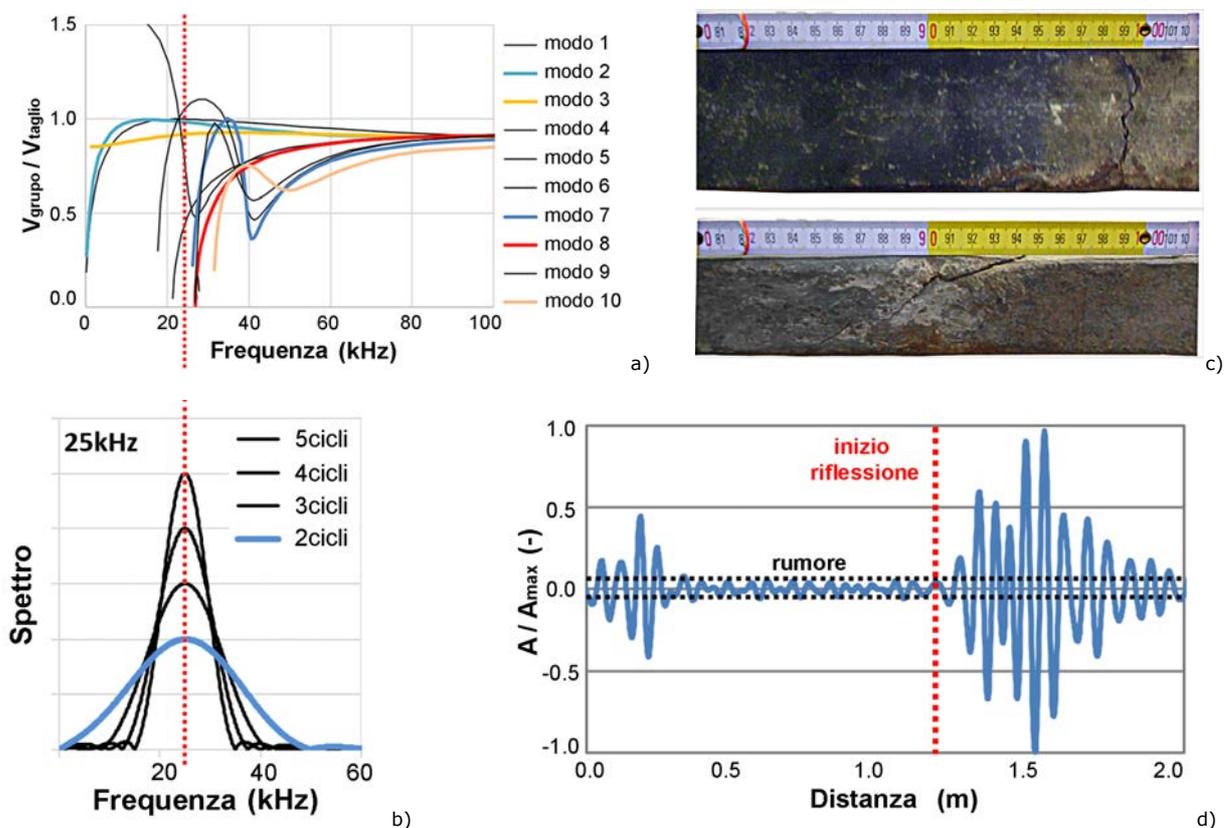
Va osservato che il metodo proposto è stato sviluppato per affrontare il caso studio specifico del Duomo di Milano, i cui tiranti relativamente spessi (tipica sezione trasversale 60x90mm) consentono un buon contatto con la maggior parte dei sensori nella matrice. In questa applicazione lo strumento è stato utilizzato solo per l'acquisizione di dati grezzi, mentre la successiva elaborazione è stata sviluppata in ambiente LabVIEW adattando il metodo descritto in [9]. Secondo questa procedura, tutti gli impulsi che viaggiano lungo il tirante vengono riportati ad un punto virtuale comune (ad esempio il centro dello strumento) spostandoli sull'asse dei tempi in base alla distanza di emettitori e ricevitori dal punto di riferimento. La velocità di fase richiesta per determinare queste traslazioni nel tempo viene valutata secondo il metodo discusso nella sezione precedente, che produce anche un'immagine dell'impulso diagnostico effettivo (si veda la figura 7b). Il segno assegnato alle traslazioni di tempo consente un'analisi separata degli impulsi che viaggiano nelle due direzioni opposte.

I segnali allineati vengono quindi sommati e l'onda sintetica risultante viene esaminata per rilevare eventuali riflessioni prodotte da difetti significativi. Migliori indicazioni in termini di rapporto segnale rumore sono ottenute per correlazione incrociata dell'onda sintetica con l'impulso diagnostico.

Per caratterizzare le modalità di propagazione delle onde di taglio nei tiranti a sezione rettangolare in oggetto, sono state calcolate le curve di dispersione (figura 9a) utilizzando il metodo semi-analitico descritto in [10]. A causa della sensibilità del tomografo alle sole vibrazioni trasversali, possono essere identificati solo alcuni modi antisimmetrici (linee colorate spesse nel grafico). L'intervallo di frequenze più conveniente per le dimensioni delle sezioni esaminate è compreso tra 10 e 20 kHz, poiché vi sono solo due modi dominanti con velocità relativamente costante. Tuttavia, a causa dei limiti operativi del tomografo, possono essere generati solo impulsi di frequenza minima pari a 25kHz e durata non superiore a 2 cicli. Ciò implica una banda di frequenze eccitate piuttosto ampia (figura 9b), con l'attivazione di diverse modalità di propagazione altamente dispersivi (figura 9a).

L'efficacia del metodo è stata verificata preliminarmente in laboratorio, su di una catena originale del Duomo di Milano che è stata sostituita alcuni anni fa per la presenza di una fessura profonda lungo una saldatura forgiata. La discontinuità coinvolge circa l'80% della sezione trasversale con un'apertura massima di 1.5 mm (figura 9c). Le prove sono state eseguite accoppiando il tomografo ultrasonico ad un lato verticale del tirante ad una distanza di circa 1,2 m dal difetto noto. Osservando i segnali elaborati (figura 9d), è visibile un'indicazione chiara nella posizione della fessura.

La stessa procedura è stata implementata in situ su una fessura più piccola che si estende per circa il 50% della sezione trasversale con un'apertura massima di 0,3 mm [11]. Sebbene la presenza del difetto possa ancora essere riconosciuta, l'influenza del rumore e della dispersione è risultata decisamente più alta.



9. (a) Curve di dispersione delle onde guidate in una barra a sezione rettangolare, (b) banda di frequenza eccitata da impulsi di diversa durata, (c) difetto esaminato sulla catena in ferro battuto e (d) risultati ottenuti.

## CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo lavoro sono state discusse le caratteristiche innovative del tomografo A1040 MIRA per consentire una comprensione più approfondita del suo principio di funzionamento e per individuare alcune applicazioni convenzionali o avanzate che possono trarre vantaggio dalla particolare struttura di questo strumento. In generale, l'opzione di acquisire in rapida sequenza i segnali impulsivi riflessi da eventuali discontinuità presenti nell'elemento strutturale (metodo pulse-echo), considerando le possibili combinazioni di emettitori/ricevitori all'interno della serie di 12 blocchi di trasduttori, consente di combinare molte osservazioni dell'oggetto indagato. Ciò si traduce in una significativa riduzione del rumore strutturale che condiziona l'implementazione delle indagini acustiche nei materiali eterogenei come il calcestruzzo armato e il ferro battuto. Inoltre, il controllo diretto della procedura di elaborazione delle immagini tomografiche permette di ricavare delle informazioni quantitative aggiuntive e in particolare:

- l'analisi più dettagliata della fase e dell'ampiezza dell'eco, che consente di classificare le discontinuità in base alla differenza di proprietà meccaniche;
- la valutazione diretta della velocità delle onde di taglio sulla superficie di elementi danneggiati (tipicamente dal fuoco, ma anche da altre cause di deterioramento superficiale);
- l'identificazione dei difetti dominanti in elementi snelli come le catene antiche in ferro battuto.

Questi primi risultati incoraggianti sollecitano ulteriori sviluppi in diverse direzioni. Tra queste, una valutazione più mirata della fase e dell'ampiezza delle riflessioni prodotte da componenti di geometria nota (come le guaine dei cavi di post-tensione), l'analisi della rifrazione degli impulsi in elementi danneggiati dal fuoco, la separazione dei modi e la compensazione della dispersione nelle indagini con le onde guidate.

## BIBLIOGRAFIA | REFERENCES

- [1] McCann D.M. and Forde M.C. 2001. Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures, *NDT&E International*, 34, 71–84.
- [2] Schickert M. 2002, Ultrasonic NDE of concrete, *Proceedings of 2002 IEEE Ultrasonics Symposium*, 739-748.
- [3] Shokouhi P., Wolf J. and Wiggerhauser H. 2014. Detection of Delamination in Concrete Bridge Decks by Joint Amplitude and Phase Analysis of Ultrasonic Array Measurements”, *ASCE J. of Bridge Engineering*, 19(3).
- [4] Krause M., Milmann B., Mielentz F., Streicher D., Redmer B., Mayer K., Langenberg K.J. and Schickert M. 2008. Ultrasonic Imaging Methods for Investigation of Post-tensioned Concrete Structures: A Study of Interfaces at Artificial Grouting Faults and Its Verification, *J. of Nondestructive Evaluation*, 27, 67-82.
- [5] Schickert M., Krause M. and Muller W. 2003. Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique, *ASCE J. of Materials in Civil Engineering*, 235-246.
- [6] Mayer K., Langenberg K.-J., Krause M., Milmann B. and Mielentz F. 2008. Characterization of Reflector Types by Phase-Sensitive Ultrasonic Data Processing and Imaging, *J of Nondestructive Evaluation*, 27, 35–45.
- [7] ORNL Oak Ridge National Laboratory 2013. Evaluation of Ultrasonic Techniques on Concrete Structures, *Technical Report ORNL/TM-2013/430*, 130 pp.
- [8] Belleri A., Bettini N. and Felicetti R. 2018. Evaluation of the impact and fire damage of a highway bridge, *Proceedings of Italian Concrete Days*, 8p.
- [9] Wooh S.C. and Shi Y. 2001. Synthetic phase tuning of guided waves, *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control*, 48 (1), 209–223.
- [10] J. G. Yu, J. E. Lefebvre, Ch. Zhang and F. E. Ratoljanahary, "Dispersion curves of 2D rods with complex cross-sections: double orthogonal polynomial approach", *Meccanica* 50, pp. 109–117, 2015.
- [11] Bellanova M and Felicetti R. 2018. A multidisciplinary strategy for the inspection of historical metallic tie-rods: the Milan cathedral case study, *International Journal of Architectural Heritage*, in corso di pubblicazione.