

“Nuove tecnologie per l’analisi non intrusiva dei manufatti”

Programma di ricerca

Ingegnerizzazione di prototipi e strumentazione per la diagnostica su manufatti monumentali in materiale lapideo

SIND

Esempi di ispezione automatica con ultrasuoni

Renzo Bozzi, Massimo Chimenti, Enrico Fantini

Istituto di Scienza e Tecnologie dell’Informazione “Alessandro Faedo”

Rapporto tecnico febbraio 2011

Sommario

Il SIND (Sistema per Ispezioni Non Distruttive), è in grado di pilotare scanner xy per lo spostamento di una coppia di sonde a ultrasuoni, in modo di ricavare mappe di misura. Utilizzando il software dedicato l’utente determina l’area ed il passo di scansione; al termine dell’ispezione l’utente può visualizzare le misure di tipo A-scan ottenute nei singoli punti di misura oppure le mappe C-scan, definite dall’insieme delle misure.

Il lavoro riporta alcuni esempi ottenuti impiegando uno scanner di piccole dimensioni, adatto all’impiego in laboratorio; gli esempi riguardano campioni in material plastico e lapideo.

Abstract

The SIND system (System for Non-destructive Inspections), can drive xy scanner that move a couple of ultrasonic probes, in order to obtain maps of the inspected specimen. By using a dedicated software, the user will define the scan area and the sampling step; at the end of the inspection, the user can display the A-scan graphs relative to each measurement site or the C-scan map defined by the set of measurements.

The report describes some examples obtained by means of a small scanner, used for lab applications; the examples refer to plastic and lapideous samples.

Indice

Introduzione.....	3
Materiali e metodi	6
Carrello xy	6
Campioni esaminati	7
Trasmissione del segnale US.....	10
Mappe C-scan	12
Risultati e discussione.....	13
Risposta sonde	14
Campione P1	22
Ispezione 1	22
Ispezione 2	24
Ispezione 3	26
Campione P2	28
Campione P3	30
Campione P4	32
Ispezione 1	32
Ispezione 2	34
Campione M1	36
Campione M2.....	38
Ispezione 1	38
Ispezione 2	38
Conclusioni.....	40
Riferimenti.....	41

Introduzione

Mediante il sistema per indagini non distruttive SIND [1]) si possono eseguire ispezioni a ultrasuoni sia di tipo puntuale, con spostamenti manuali delle sonde [2]), sia di tipo raster: in questo caso l'utente fa uso di un apposito software che consente di definire area e passo di scansione, sposta in modo automatico i trasduttori sul manufatto da esaminare e acquisisce i dati per ogni punto di misura [3), 4)].

La Figura 1 mostra l'architettura del SIND per l'ispezione automatica con ultrasuoni.

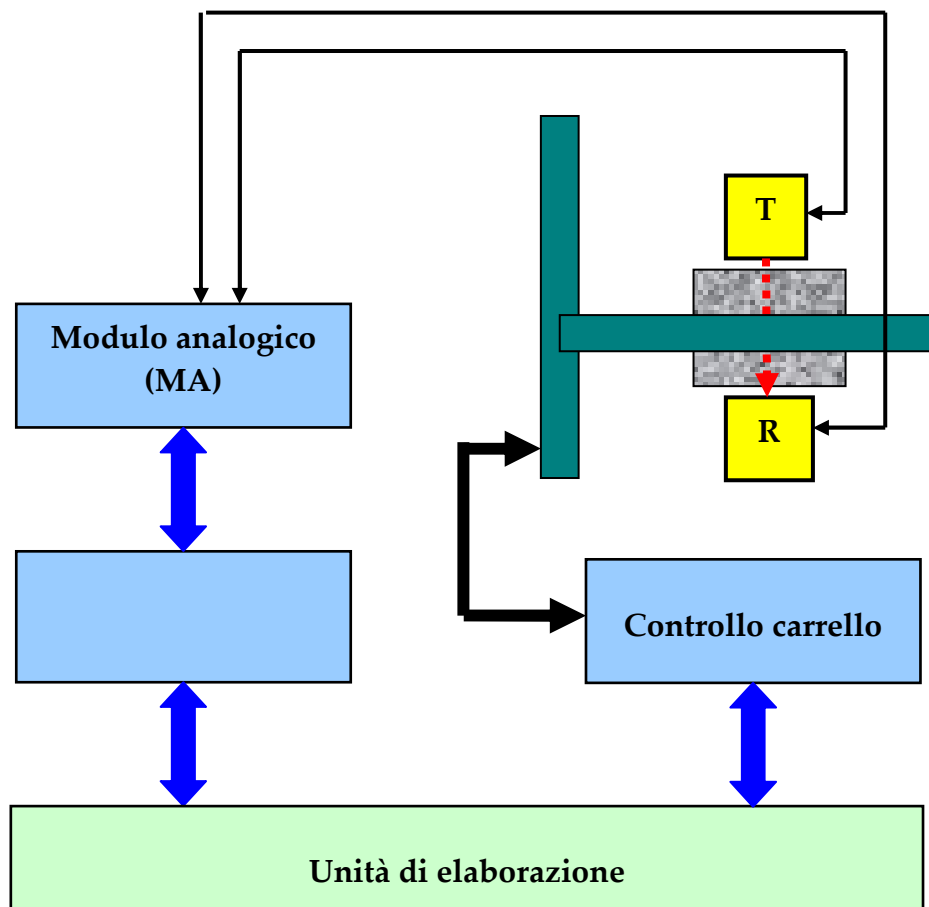


Figura 1. Diagramma a blocchi della struttura per l'ispezione automatica con ultrasuoni.

Una volta sistemato il campione da esaminare sul carrello xy del sistema, si accede alla fase di Set up, in cui l'utente può comandare lo spostamento delle sonde in differenti punti di prova, al fine di regolare le impostazioni del Modulo analogico, e può impostare i parametri di elaborazione, in modo da ottimizzare il segnale prodotto dalla sonda di ricezione ed estrarne quindi i parametri caratteristici.

L'utente definisce poi l'area ed il passo di scansione ed avvia la fase di Acquisizione ed Elaborazione dei segnali: il programma sposta le sonde nel punto di

misura, acquisisce il segnale ad ultrasuoni e lo analizza in base alle impostazioni stabilite in precedenza.

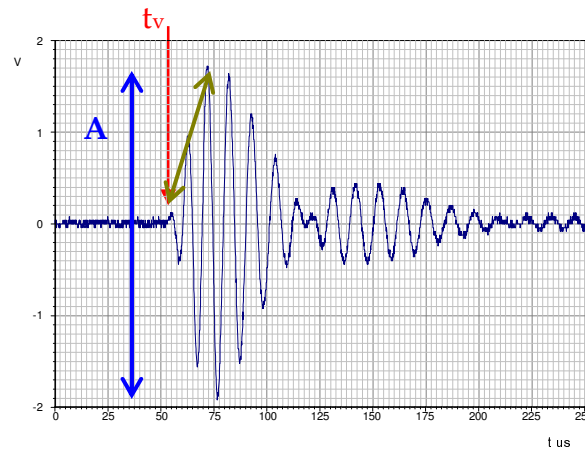


Figura 2. Risposta della sonda non a contatto Ultrason mod. NCT-101 (frequenza di risonanza $f_{ris} = 100$ kHz), nel caso di trasmissione in aria.

Il segnale di misura è costituito da un'oscillazione smorzata che ha un ritardo rispetto al segnale di eccitazione, un'ampiezza massima ed un inviluppo dipendenti dalla struttura e dallo spessore del mezzo attraversato; il programma ricava i seguenti parametri (vedi Figura 2):

- T_v = tempo di volo del segnale a ultrasuoni
- A = valore di picco-picco del segnale
- S = pendenza del tratto iniziale segnale

Il programma calcola inoltre il valore

- $V = \text{velocità di trasmissione} = \frac{d}{t_v}$

dove d è la distanza tra le sonde.

Al termine dell'ispezione automatica con salvataggio dei parametri di misura si ha un file (caratterizzato dall'estensione .bin), costituito da una testata e dagli insiemi dei parametri ottenuti analizzando il segnale acquisito in ciascun punto di misura.

La testata del file contiene quattro gruppi di informazioni, inserite nella fase di Set up. In particolare si hanno:

- parametri di sessione (nome del file, commento, numero di letture eseguite per ciascun punto di misura e distanza tra le sonde)

- parametri di misura (regolazioni del generatore US (tensione di eccitazione della sonda trasmittente, impostazioni di guadagno e filtro, ecc.); impostazioni dell'oscilloscopio digitale Pico)
- parametri di elaborazione (definizione della finestra di apprendimento, definizione della finestra di elaborazione, Coefficiente di Standard Deviation)
- specifiche di scansione (estremi dell'area di scansione e passo di scansione)

Ogni insieme di parametri di analisi può essere impiegato per ottenere una mappa di tipo C-scan: questa mappa è costituita da un numero di pixel eguale al numero dei punti di misura; la luminanza di ciascun pixel è funzione lineare del valore del parametro estratto dal segnale ottenuto nel corrispondente punto di misura.

Il software consente di ottenere separatamente tre mappe monocromatiche relative ai parametri di tempo di volo, valore di picco-picco e pendenza del tratto iniziale del segnale a ultrasuoni; è possibile anche ottenere una rappresentazione simultanea delle tre mappe, associando al parametro T_v il colore rosso, ad A il verde e a S il blu.

Il software consente anche di esportare le mappe come immagini nel formato bitmap: queste immagini possono essere trattate mediante programmi di elaborazione d'immagini.

Materiali e metodi

Carrello xy

Nelle prove descritte il carrello xy è costituito da due assi ortogonali, ciascuno dei quali è dotato di un motore passo-passo SloSyn M040, con risoluzione angolare di 1.8° (200 passi/giro); per ciascun asse il passo di spostamento lineare è di 0.1 mm (vedi Figura 3).

Ciascun asse ha una corsa di 200 mm. L'area di scansione è dunque di 200×200 mm, con la risoluzione massima di 0.1 mm: si possono quindi avere sino a 2000×2000 punti di misura.

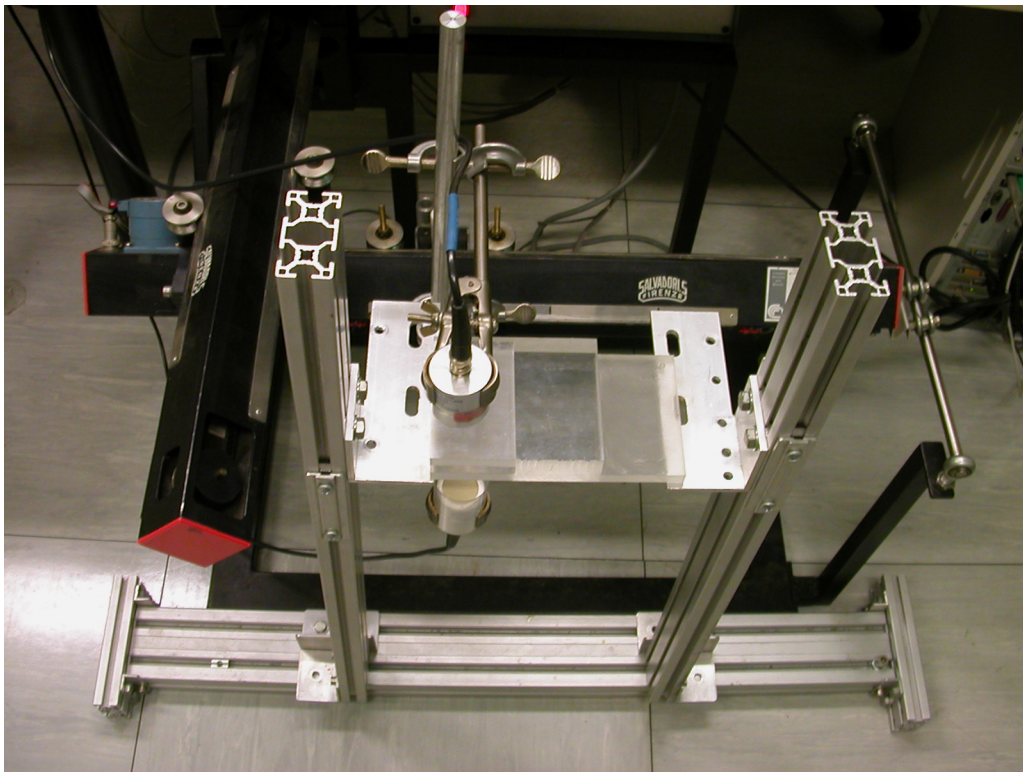


Figura 3. Vista del carrello xy con la coppia di sonde a ultrasuoni.

Campioni esaminati

Sono stati impiegati due tipi di campioni: elementi in perspex (plexiglas, polimetilmetacrilato) e materiali lapidei (vedi Tabella 1).

I campioni del primo tipo sono stati lavorati praticando dei fori passanti o delle cavità, o dando loro spessori diversi in modo controllato: in questo modo si è potuto valutare la risposta del sistema in presenza di artefatti noti.

I campioni del secondo tipo sono nominalmente omogenei e privi di difetti: in questo caso si è potuta valutare la risposta del sistema nel caso d'ispezione di manufatti

campione	descrizione
P1	Lastra di perspex di 240 mm × 160 mm × 4 mm con un foro Ø 3cm e fori Ø 5 mm
P2	Lastra di perspex di 240 mm × 160 mm × 4 mm con gruppi di fori Ø 5 mm e gruppi di fori Ø 4 mm
P3	Lastra di perspex di 200 mm × 160 mm × 4mm con un foro Ø 3 cm e fori Ø 5 mm allineati e distanti 3 mm
P4	Lastra di perspex di 180 mm × 100 mm con tre spessori: s1 = 1 cm (6 cm); s2 = 3 cm (6 cm); s3 = 1 cm +1cm (vuoto) + 1 cm (5,8 cm)
M1	Lastra di marmo di 300 mm × 150 mm × 46 mm
M2	Mattone di 240 mm × 115 mm × 55 mm

Tabella 1. Campioni esaminati durante le prove.

Alcuni campioni hanno dimensioni maggiori dell'area di scansione del carrello, e si è quindi eseguita un'ispezione parziale del campione.

Le figure 4 ÷ 9 riportano le immagini dei campioni esaminati.

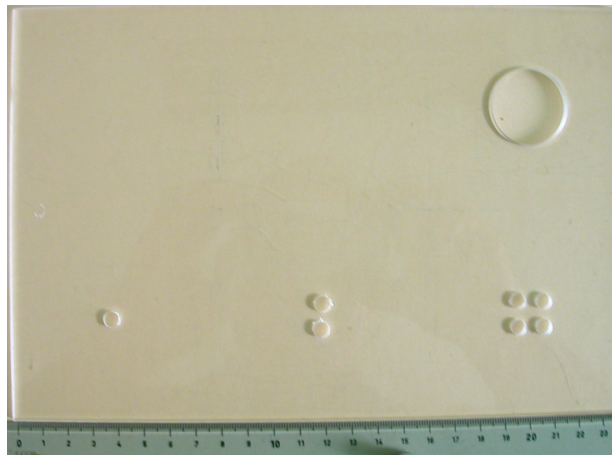


Figura 4. Campione P1 (perspex).

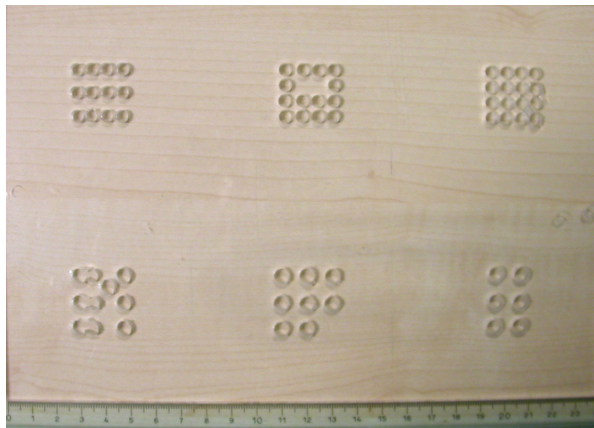


Figura 5. Campione P2 (perspex).

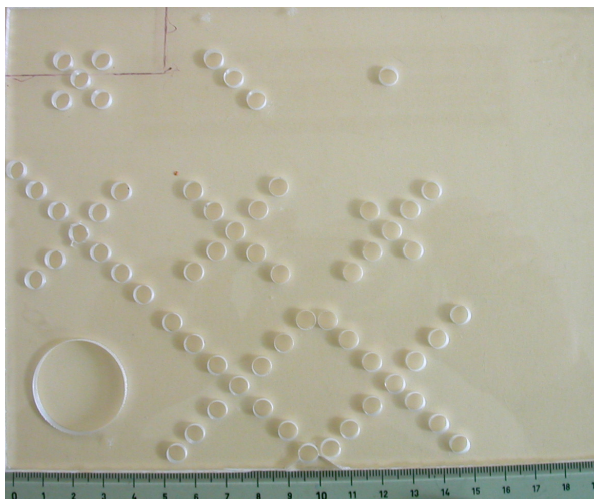


Figura 6. Campione P3 (perspex).

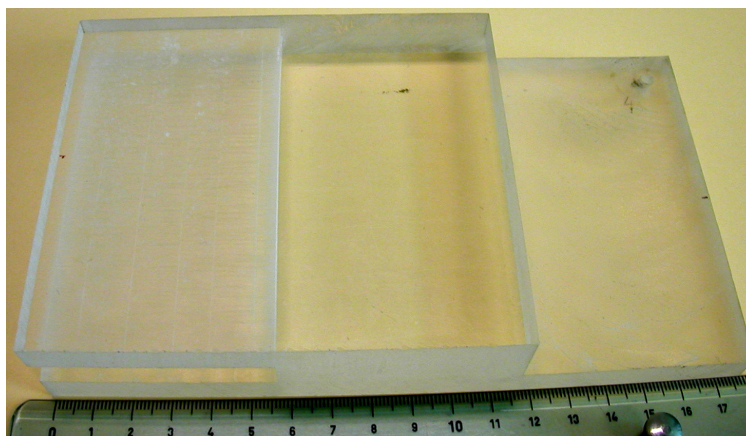


Figura 7. Campione P4 (perspex).



Figura 8. Campione M1 (marmo).



Figura 9. Campione M2 (mattone).

Trasmissione del segnale US

La Tabella 2 riporta la velocità di trasmissione standard delle onde ultrasonore di tipo longitudinale attraverso i materiali che costituiscono i campioni esaminati [NDE/NDT Resource Center, Iowa State University].

materiale	velocità cm/μs	T_{cm} μs/cm
aria	0.034	≈ 29.4
perspex	0.27	≈ 3.7
marmo	0.615	≈ 1.6
mattone	0.365	≈ 2.7

Tabella 2 Trasmissione di ultrasuoni in differenti materiali.

Il valore T_{cm} riportato in tabella indica il tempo necessario per attraversare uno strato di materiale con spessore s = 1 cm.

Il tempo di volo nominale in aria con le sonde poste a 10 cm di distanza è:

$$T_v = T_{cm} \times d \approx 29.4 \times 10 = 294 \mu s \quad (1)$$

La variazione nominale del tempo di volo quando uno spessore s di aria è sostituito da uno spessore s di materiale è dato da:

$$\Delta T_v = s \times (T_{cm}(\text{materiale}) - T_{cm}(\text{aria})) \quad (2)$$

La Tabella 3 riporta le variazioni relative ad uno spessore di 1 cm di materiale in sostituzione del percorso in aria.

materiale	ΔT_{cm} μs /cm	ΔT_v μs
aria	0	0
perspex	-25,7	-25,7
marmo	-27,8	-27,8
mattone	-26,7	-26,7

Tabella 3. Diminuzione del tempo di volo in presenza di uno strato di 1 cm di materiale sul percorso dell'onda US.

La Tabella 4 riporta le diminuzioni nominali del tempo di volo del segnale a ultrasuoni che attraversa i campioni esaminati; il valore assoluto del tempo di volo è ottenuto sommando il valore ottenuto in assenza di materiale (per esempio il valore dato dall'equazione 1 quando le sonde sono a 10 cm di distanza).

campione	spessore mm	ΔT_v μs
P1	perspex 4	-10,28
P2	perspex 4	-10,28
P3	perspex 4	-10,28
P4	perspex 10	-25,7
	perspex 30	-77,1
	perspex 20	-51,4
M1	marmo 46	-127,88
M2	mattone 55	-146,85

Tabella 4. Variazioni nominali del tempo di volo.

Mappe C-scan

Da ogni ispezione sono state ricavate le mappe C-scan dei parametri caratteristici dei segnali acquisiti, selezionando la modalità fotometrica assoluta: ciò significa che la luminanza L di un pixel è funzione lineare del valore del parametro selezionato, con estremi prefissati.

In particolare si ha:

- T_v (tempo di volo del segnale a ultrasuoni):
 $L = 0$ per $T_v = \text{Offset Temporale}$
 $L = 255$ per $T_v = \text{Offset Temporale} + 400 \mu s$
- A (valore di picco-picco del segnale):
 $L = 0$ per $A = 0$
 $L = 255$ per $A = 2 \times \text{Scala Ampiezza}$
- S (pendenza del tratto iniziale segnale):
 $L = 0$ per $S = 0$
 $L = 255$ per $S = 200 \frac{V}{\mu s}$

I valori di Offset Temporale e Scala Ampiezza, impostati nella fase di Set-up, sono riportati nella testata del file.

Si hanno le seguenti risoluzioni:

$$\Delta T_v = \frac{400}{255} \mu s = 1.57 \mu s$$

$$\Delta A = 2 \frac{\text{Scala Ampiezza}}{255} V$$

$$\Delta S = \frac{200}{255} V / \mu s = 0.78 \frac{V}{\mu s}$$

Le mappe ottenute sono state esportate come immagini nel formato bitmap e sono state quindi elaborate mediante il software Matrix Inspector. Sono stati così ricavati profili di linea (grafico dei valori di luminanza dei pixel appartenenti ad una linea definita sull'immagine), istogrammi su ROI dell'immagine e misure geometriche.

Risultati e discussione

Sono stati eseguiti due tipi d'ispezione:

- a) ispezione a vuoto: in questo caso si è mantenuta fissa la sonda trasmittente e si è spostata mediante il carrello la sonda ricevente, al fine di ricavare le risposta spaziale delle sonde a ultrasuoni.
- b) ispezione dei campioni: in questo caso le sonde erano montate sul carrello ed il campione esaminato era in posizione fissa.

Di seguito sono mostrati i risultati. Per quanto riguarda le ispezioni eseguite sui campioni elencati in Tabella 1 sono riportati:

- una tabella che riporta le informazioni contenute nella testata del file risultante dall'ispezione
- la mappa monocromatica C-scan relativa al parametro Ampiezza del segnale
- la mappa tricromatica C-scan relativa ai parametri A , T_v e S
- grafici, istogrammi e immagini ricavati con l'elaborazione delle immagini delle mappe

I profili di linea sono ricavati dalle immagini RGB; l'origine delle coordinate è nell'angolo superiore sinistro delle immagini.

Risposta sonda

La tensione prodotta da un trasduttore acustico dipende dalla sua sensibilità e dall'intensità dell'onda ultrasonora incidente su di esso; più in particolare, se si assume che flusso di potenza F sia costante nel tempo e che il trasduttore sia caratterizzato dalla sensibilità R e sia fisso, l'uscita V è data dall'integrale del prodotto di F per R , esteso sull'area A del trasduttore:

$$V = \iint_A F(x, y)R(x, y)dx dy \quad (3)$$

Per ricavare una mappa di F su una regione piana si trasla la sonda lungo le coordinate x e y , ed il segnale rivelato non è F , bensì il prodotto di convoluzione $F \otimes R$: poiché l'area sensibile non è infinitesima (nel nostro caso è un cerchio con 3.5 cm di diametro) si ha un filtraggio di tipo passa-basso applicato ad F .

Per esempio, considerando per semplicità il caso monodimensionale e utilizzando funzioni discrete si ha la situazione mostrata in Figura 10.

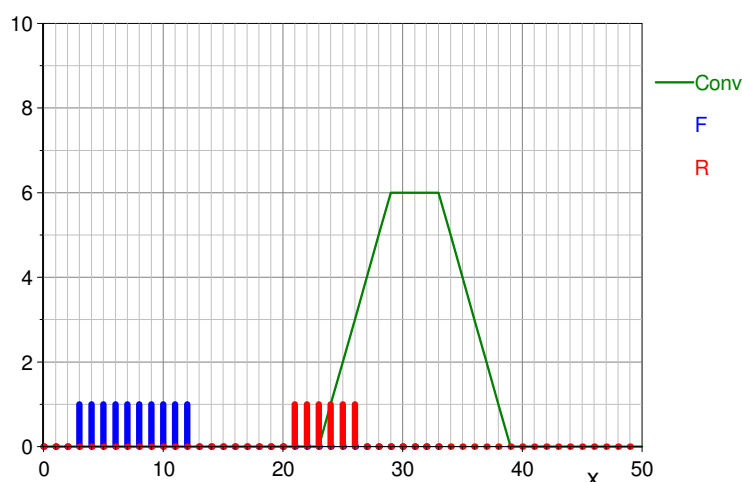


Figura 10. Risultato della convoluzione di due funzioni continue a tratti.

Si è assunto $F = 1$ per un intervallo di 10 punti e 0 altrimenti, e $R = 1$ per un intervallo di 6 punti e 0 altrimenti. La funzione di convoluzione ha una forma trapezoidale: il lato inclinato si estende per 6 punti, eguale alla lunghezza di R , il tratto piano superiore è lungo 4 punti, eguale alla differenza tra le lunghezze di F ed R , e la durata complessiva del segnale è di 16 punti, eguale alla somma delle lunghezze di F ed R .

Più in generale, se F ed R non sono definite da funzioni a gradini, i fronti del prodotto di convoluzione non sono rettilinei; se F ed R hanno la stessa lunghezza il tratto superiore della convoluzione si riduce ad un punto.

E' stata eseguita una verifica sperimentale misurando il flusso emesso da una sonda, mantenuta in posizione fissa, tramite l'altra sonda, traslata mediante il carrello xy. Gli assi delle sonde erano paralleli, l'area esplorata era 200 mm × 200 mm.

Commento 0		Commento 1		Proprietà dei Risultati Selezionati	
Risposta delle Sonde		Risposta delle Sonde			
Modalità	US	Offset Temporale us	192,23	Inizio Fin. di Apprendimento	1
Tipo Misura	Scanner-DG	Intervallo Campion. us	0,16	Lunghezza Fin. Apprendimento	500
Risoluzione	2500	Offset Ampiezza mV	0	Coeff. Standard Deviation	2
Numero Misure	10201	Scala Ampiezza mV	2000	Inizio Fin. di Elaborazione	501
Medie	1	Preamplificatore	Off	Lunghezza Fin. Elaborazione	650
Lun. Percorso cm	10	Tensione Eccitazione V	100	X Iniziale Finestra (mm.)	0
Numero Colonne	101	Filtro LP MHz	3	X Finale Finestra (mm.)	200
Numero Righe	101	Filtro HP MHz	0,1	Y Iniziale Finestra (mm.)	0
Data dei Risultati		Guadagno dB	40	Y Finale Finestra (mm.)	200
30/03/2010 11.22.20		Attenuazione dB	23	Passo Scansione (mm.)	2

Tabella 5 Informazioni contenute nel file rispostasonde.bin.

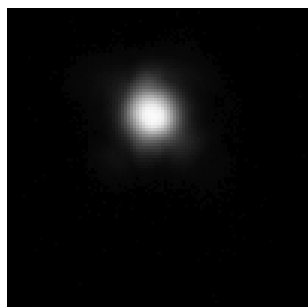


Figura 11. Risposta sonde. Mappa C-scan del parametro A.

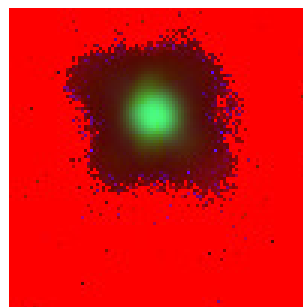


Figura 12. Risposta sonde. Mappa C-scan dei parametri Tv (rosso), A (verde) e S (blu).

Il grafico di Figura 13, ricavato approssimativamente sul centro della macchia visibile in Figura 11, mostra che il valore di A raggiunge il massimo quando le sonde sono completamente sovrapposte e diminuisce in maniera simmetrica al diminuire della sovrapposizione: i fronti del picco non sono rettilinei e si può quindi supporre che il flusso emesso dal trasmettitore non sia definito da una funzione a scalino.

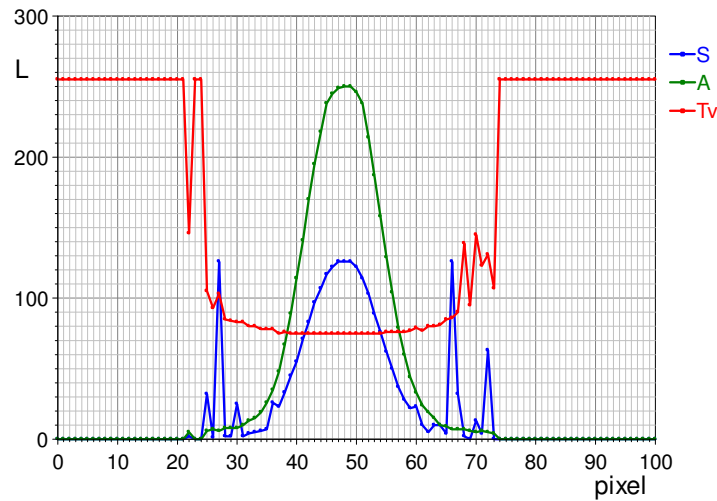


Figura 13. Profilo di linea(0,36)-(100,36), spessore 1.

L'ampiezza A è diversa da 0 dal pixel 24 al pixel 74, per una escursione complessiva di 50 pixel, corrispondenti a 100 mm: poiché l'area sensibile della sonda ha un diametro di 35 mm, si può supporre che a 10 cm di distanza il flusso si estenda per circa 65 mm.

Il tempo di volo è minimo quando le sonde sono sovrapposte: questo tempo è dato da:

$$T_v = t_{off} + L\Delta T_v$$

dove t_{off} è l'offset temporale, ricavabile dalla Tabella 5, L è il valore ricavabile dal grafico di Figura 13 e $\Delta T_v = 1.57 \mu s$ è la risoluzione di quantizzazione dell'immagine.

Si ha:

$$T_v = 192.23 + 75 \times 1.57 = 310 \mu s$$

Questo valore è in accordo con l'equazione 1, tenendo conto che la distanza tra le sonde non è esattamente di 10 cm. Assunto $v_{aria} = 0.034 \frac{cm}{\mu s}$ (vedi Tabella 2) si ottiene una distanza effettiva d , data da:

$$d = v_{aria} T_v = (310 \times 0.034) cm = 10.5 cm$$

Il tempo di volo aumenta all'aumentare della distanza x tra gli assi delle sonde: nel grafico di Figura 13 si nota una variazione di circa 35 livelli, corrispondenti a $\approx 35 \times 1.75 = 61,25 \mu s$.

Ciò è parzialmente spiegabile col fatto che la distanza effettiva s tra i centri delle sonde è data da $s = \sqrt{d^2 + x^2}$ e passa da 10.5 cm per $x = 0$ a 11.6 cm per $x = 5$ cm:

di conseguenza, per un incremento di percorso di 1 cm si ha un aumento del tempo di volo di ≈ 29.4 .

L'ulteriore aumento del tempo di volo misurato può essere spiegato considerando la modifica della forma d'onda del segnale ottenuto nei differenti punti di misura. Il grafico di Figura 13 mostra che la pendenza S diminuisce al crescere della distanza tra gli assi delle sonde: l'algoritmo impiegato per la determinazione del tempo di volo può in questo caso introdurre una sovrastima di misura.

Si considerino infatti due segnali che iniziano al tempo $t = 0$ ed hanno pendenze diverse: in Figura 14 sono rappresentate le pendenze, ricavate dai rispettivi segnali come mostrato in Figura 2.

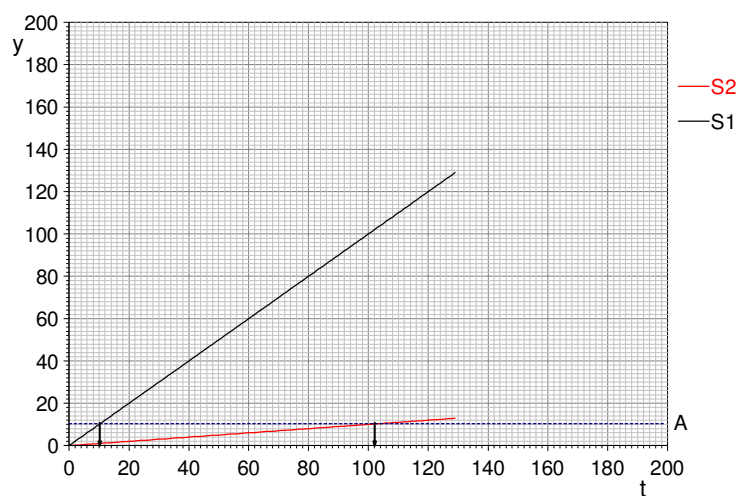


Figura 14. Rilevamento del superamento della soglia.

Poiché $S \equiv \frac{\Delta y}{\Delta t}$ indica la variazione in Volt per microsecondo, il tempo necessario per superare il valore di soglia A è dato da:

$$t = \frac{A}{S}$$

I tempi di volo ricavati dall'analisi dei segnali sono dunque:

$$t_1 = \frac{A}{S_1}$$

$$t_2 = \frac{A}{S_2}$$

Anziché ottenere lo stesso valore teorico $T_v = 0$ per i due segnali si ottengono due valori che differiscono di:

$$\Delta t = A \frac{S_1 + S_2}{S_1 \times S_2}$$

Nell'esempio riportato nel grafico si ha $S_1 = 130$ e $S_2 = 13$, che corrispondono alle variazioni di S in Figura 13; si ha quindi:

$$\Delta t \approx A \frac{1}{S_2}$$

Nel caso reale il valore di soglia A vale circa 35 mV, e quindi, riportando il livello di S_2 al valore in $\frac{V}{\mu s}$ si ha:

$$\Delta t \approx \frac{0,035}{10,14} \mu s$$

Da questo esempio si può dedurre che il criterio adottato per l'analisi del segnale a ultrasuoni sovrastima il tempo di volo di un segnale con bassa pendenza rispetto ad un segnale con pendenza più alta; si può inoltre ritenere che per confrontare i tempi di volo è necessario che le pendenze siano sostanzialmente eguali.

In Figura 13 si possono notare dei picchi sul grafico di S , causati probabilmente dalla flangia che circonda l'area sensibile delle sonde. Si nota inoltre che quando il segnale si annulla $T_v = 255$: questo fatto è causato dall'algoritmo di analisi del segnale, che pone T_v al massimo valore quando il segnale non viene rivelato all'interno della finestra di elaborazione. Di conseguenza le mappe tricromatiche presentano una colorazione rossa nelle zone in cui non viene rivelato un segnale superiore alla soglia.

Per le normali operazioni d'ispezione le sonde sono allineate e costituiscono un sistema rigido, che viene traslato dal carrello xy rispetto all'oggetto da esaminare (vedi Figura 15).

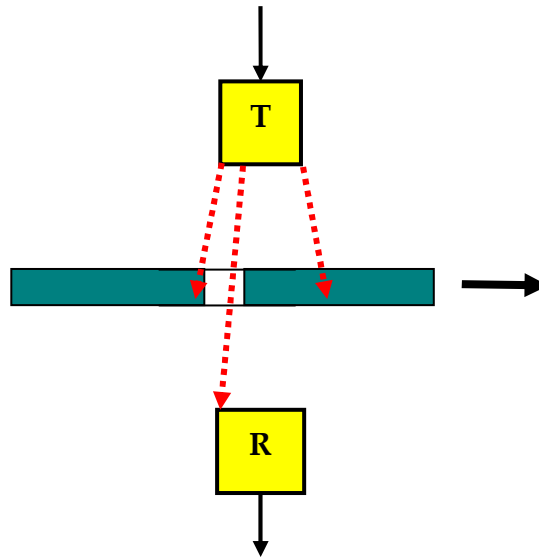


Figura 15. Flusso raccolto durante l'ispezione di un oggetto.

Si consideri un oggetto costituito da una lastra con fori passanti, come i campioni P1 ÷ P3: in questo caso, anche se il foro passante è più piccolo dell'area sensibile della sonda ricevente, quest'ultima riceve un flusso di potenza per un tratto di scansione di lunghezza eguale alla somma delle dimensioni del foro e dell'area sensibile della sonda: in altri termini si ha la convoluzione tra il segnale da misurare (la trasmissibilità della lastra) e la risposta del sistema, come mostrato in Figura 10.

Poiché il flusso incidente sulla lastra non è uniforme il profilo dell'ampiezza del segnale rivelato lungo una linea di scansione non ha fronti lineari.

La Figura 16 mostra il risultato dell'ispezione di un foro $\varnothing 5$ mm sul campione P3, con passo di scansione di 2mm: il grafico è costituito da un profilo di linea sull'immagine riportata in Figura 36 e ricavata dal file esemp2.bin.

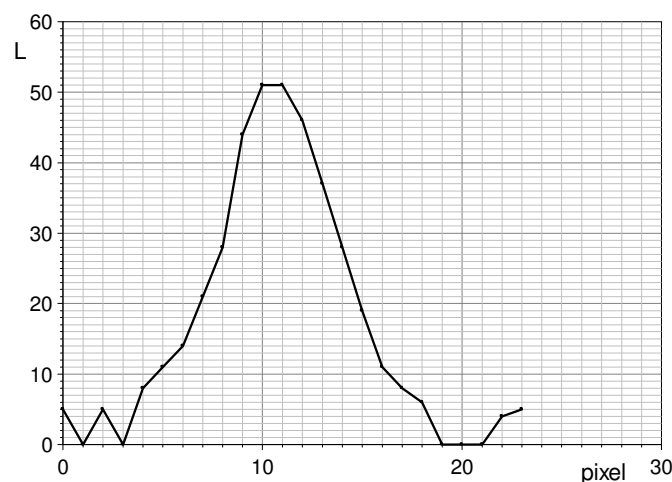


Figura 16. Profilo di scansione di un foro isolato.

Il profilo è diverso da 0 per una ventina di pixel, corrispondenti a circa 40 mm; il massimo del segnale è ottenuto quando il foro passante è sugli assi delle sonde.

La Figura 17 riporta il modulo della trasformata di Fourier del segnale di Figura 16: poiché questo segnale può essere considerato come la risposta impulsiva del sistema di rilevamento, a causa delle ridotte dimensioni del foro, la sua trasformata corrisponde alla risposta in frequenza del sistema.

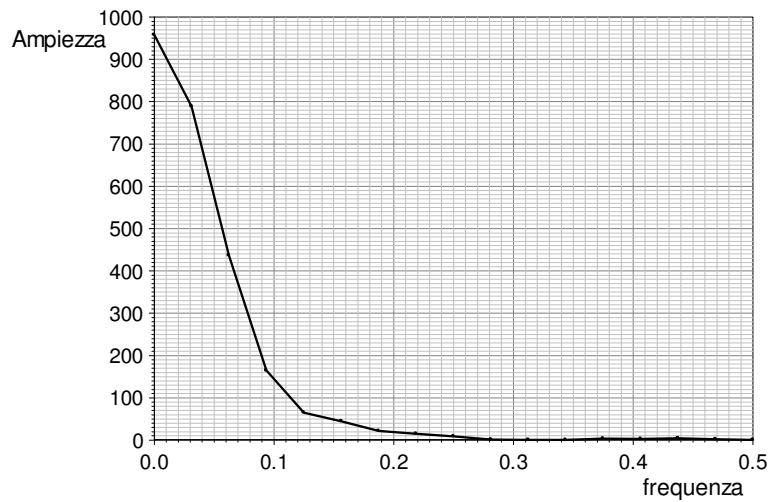


Figura 17. Trasformata di Fourier del grafico di Figura 16.

La Figura 18 mostra la risposta del sistema espressa in dB: la curva, determinata dall'ampiezza dell'area sensibile della sonda ricevente e dal campo emesso dalla sonda trasmittente, ha l'andamento di un filtro passa basso.

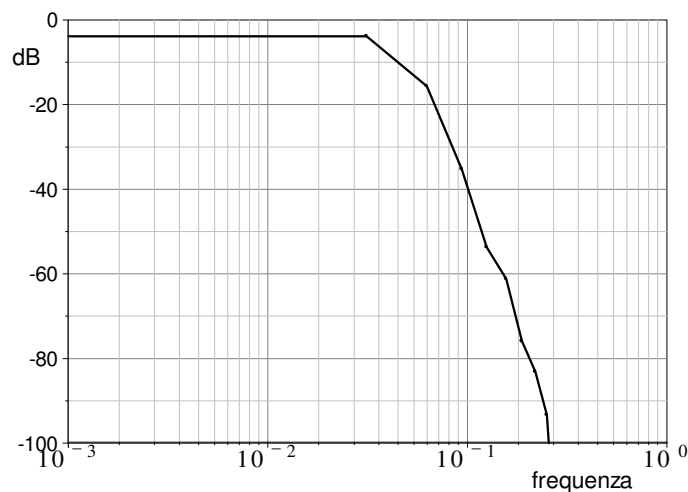


Figura 18. Risposta del sistema.

La scala di frequenza spaziale è normalizzata, con $f = \frac{1}{p}$, dove p è il passo di campionamento. Nel nostro caso si ha $p = 2mm$ e la banda a 3 dB è di circa $\frac{5 \times 10^{-2}}{2} = 0,025lp m$; la pendenza è molto elevata, di circa 100 dB per decade.

Il sistema è in grado di rivelare singoli fori, anche con dimensioni inferiori all'area sensibile della sonda; nel caso di strutture periodiche (per esempio, serie di fori equidistanti) si possono discriminare frequenze inferiori a 0.1 lpm, cioè periodi spaziali di almeno 10 mm.

Campione P1

Per questo campione si riportano i risultati di tre ispezioni, ottenute rispettivamente con passo di scansione di 4, 2 e 1 mm; le aree di scansione hanno la stessa origine e dimensioni differenti, come indicato nelle tabelle.

Ispezione 1

Commento 0		Commento 1		Proprietà dei Risultati Selezionati	
Pexposs 5mm. con fori		Prova10			
Modalità	US	Offset Temporale us	144,23	Inizio Fin. di Apprendimento	1
Tipo Misura	Scanner-DG	Intervallo Campion. us	0,16	Lunghezza Fin. Apprendimento	500
Risoluzione	2500	Offset Ampiezza mV	0	Coeff. Standard Deviation	2
Numero Misure	1148	Scala Ampiezza mV	5000	Inizio Fin. di Elaborazione	501
Medie	16	Preamplificatore	Off	Lunghezza Fin. Elaborazione	650
Lun. Percorso cm	8	Tensione Eccitazione V	50	X Iniziale Finestra (mm.)	0
Numero Colonne	41	Filtro LP MHz	3	X Finale Finestra (mm.)	160
Numero Righe	28	Filtro HP MHz	0,1	Y Iniziale Finestra (mm.)	0
Data dei Risultati		Guadagno dB	40	Y Finale Finestra (mm.)	108
09/03/2010 13.18.10		Attenuazione dB	0	Passo Scansione (mm.)	4

Tabella 6. P1. Informazioni contenute nel file prova10.bin.



Figura 19. P1. Oggetto esplorato.



Figura 20. P1. Mappa C-scan del parametro A.

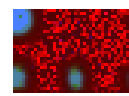


Figura 21. P1. Mappa C-scan dei parametri T_v (rosso), A (verde) e S (blu).

Nella mappa delle ampiezze di Figura 20 si individua la presenza dei fori, ma non è possibile discriminare tra il singolo foro grande ed i fori piccoli raggruppati.

Nella mappa tricromatica di Figura 21 le zone colorate in rosso indicano che nella finestra di elaborazione il segnale non ha superato la soglia determinata nella finestra di apprendimento ed il programma ha posto T_v eguale al tempo dell'estremo finale della finestra di elaborazione, in modo che nella rappresentazione pittorica si ottiene $R = 255$. In questa figura si può notare che un

certo segnale è presente anche al di fuori della dimensione fisica dei fori: come già detto, ciò è causato dalla dimensione dell'area sensibile della sonda ricevente.

Il risultato della convoluzione del flusso ultrasonoro con la risposta della sonda è visibile nel grafico di Figura 22: si vede infatti che l'ampiezza del segnale è massima a sinistra, in corrispondenza del gruppo di quattro fori sul campione, diminuisce in corrispondenza del gruppo di due fori e cala ulteriormente in corrispondenza del foro singolo.

La pendenza del segnale diminuisce in modo analogo all'altezza: si conseguenza si ha una sovrastima del tempo di volo, che aumenta nei punti di misura all'esterno dei fori.

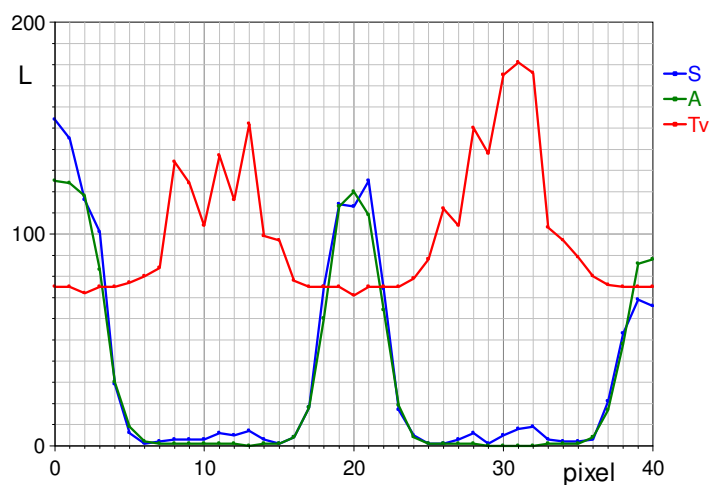


Figura 22. P1. Profilo di linea (0,23)-(40,23), spessore 3.

Ispezione 2

Commento 0		Commento 1		Proprietà dei Risultati Selezionati	
Pexposs 5 mm. con fori		Prova11			
Modalità	US	Offset Temporale us	144,23	Inizio Fin. di Apprendimento	1
Tipo Misura	Scanner-DG	Intervallo Campion. us	0,16	Lunghezza Fin. Apprendimento	500
Risoluzione	2500	Offset Ampiezza mV	0	Coeff. Standard Deviation	2
Numero Misure	5508	Scala Ampiezza mV	5000	Inizio Fin. di Elaborazione	501
Medie	16	Preamplificatore	Off	Lunghezza Fin. Elaborazione	650
Lun. Percorso cm	8	Tensione Eccitazione V	50	X Iniziale Finestra (mm.)	0
Numero Colonne	81	Filtro LP MHz	3	X Finale Finestra (mm.)	160
Numero Righe	68	Filtro HP MHz	0,1	Y Iniziale Finestra (mm.)	0
Data dei Risultati		Guadagno dB	40	Y Finale Finestra (mm.)	134
09/03/2010 14.14.34		Attenuazione dB	0	Passo Scansione (mm.)	2

Tabella 7. P1. Informazioni contenute nel file prova11.bin.



Figura 23. P1. Oggetto esplorato.

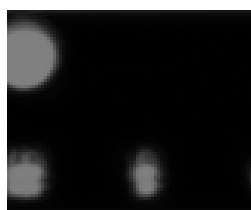


Figura 24. P1. Mappa C-scan del parametro A.

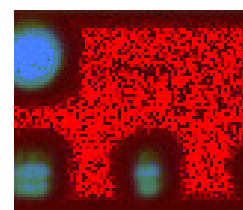


Figura 25. P1. Mappa C-scan dei parametri T_v (rosso), A (verde) e S (blu).

Il risultato di questa ispezione, eseguita con una frequenza di campionamento doppia, è simile al risultato dell'ispezione precedente.

Con questa scala si possono individuare meglio i contorni dei fori; in particolare si può notare che la struttura delle macchie nella zona inferiore delle mappe è diversa da quella nella zona superiore, causata dal singolo foro grande.

Questo effetto è più marcato nella mappa di Figura 25, grazie al contributo del parametro S (vedi Figura 26).

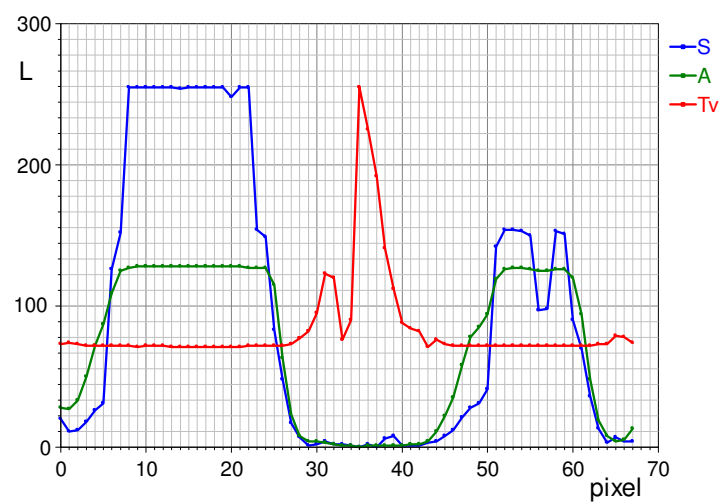


Figura 26. P1. Profilo di linea (5,0)-(5,67), spessore 1.

Ispezione 3

Commento 0		Commento 1		Proprietà dei Risultati Selezionati	
Plexigas		bbbbbbbbbb			
Modalità	US	Offset Temporale us	336,23	Inizio Fin. di Apprendimento	1
Tipo Misura	Scanner-DG	Intervallo Campion. us	0,16	Lunghezza Fin. Apprendimento	500
Risoluzione	2500	Offset Ampiezza mV	0	Coeff. Standard Deviation	2
Numero Misure	12321	Scala Ampiezza mV	2000	Inizio Fin. di Elaborazione	501
Medie	1	Preamplificatore	Off	Lunghezza Fin. Elaborazione	650
Lun. Percorso cm	10	Tensione Eccitazione V	100	X Iniziale Finestra (mm.)	20
Numero Colonne	111	Filtro LP MHz	3	X Finale Finestra (mm.)	130
Numero Righe	111	Filtro HP MHz	0,1	Y Iniziale Finestra (mm.)	30
Data dei Risultati		Guadagno dB	40	Y Finale Finestra (mm.)	140
16/12/2009 13.01.22		Attenuazione dB	8	Passo Scansione (mm.)	1

Tabella 8. P1. Informazioni contenute nel file prova4.bin.



Figura 27. P1. Oggetto esplorato.

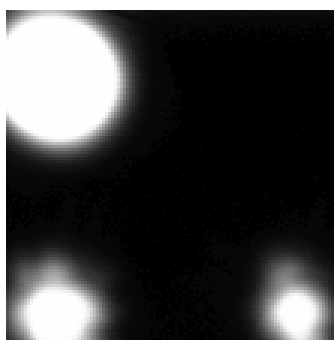


Figura 28. P1. Mappa C-scan del parametro A.

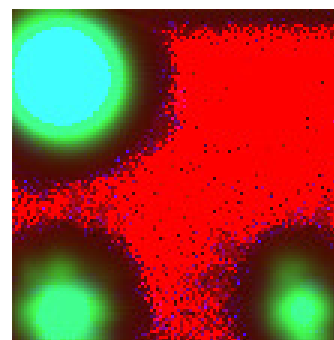


Figura 29. P1. Mappa C-scan dei parametri T_v (rosso), A (verde) e S (blu).

In questa ispezione, eseguita alla massima risoluzione spaziale (passo di scansione di 1 mm), è stata aumentata la tensione di eccitazione della sonda trasmittente (100 V anziché i 50 V dei casi precedenti). Nonostante il maggiore flusso incidente, nei punti di misura sufficientemente lontani dai fori il segnale prodotto dal ricevitore non supera la soglia, come indica la colorazione in rosso della Figura 29, mentre raggiunge la saturazione nei punti di misura in corrispondenza dei fori (vedi Figura 30).

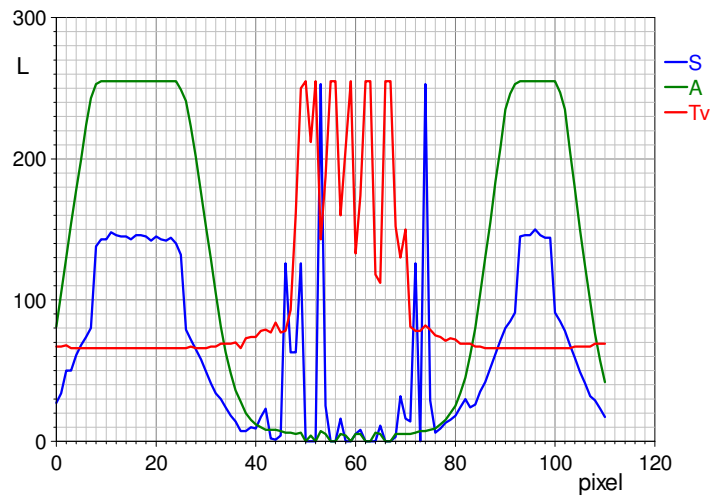


Figura 30. P1. Profilo di linea (0,102)-(110,102), spessore 1.

Nel grafico si vede che il picco a sinistra è in saturazione per circa 16 mm, corrispondente al segmento individuato dalla coppia di fori, mentre il picco a destra è in saturazione per circa 5 mm, corrispondente alla larghezza del singolo foro. La saturazione di A comporta anche un valore costante di S e rende quindi impossibile distinguere il singolo foro dalla coppia di fori adiacenti.

Campione P2

Commento 0		Commento 1		Proprietà dei Risultati Selezionati	
Pexposs 5mm. con fori		Prova			
Modalità	US	Offset Temporale us	144,23	Inizio Fin. di Apprendimento	1
Tipo Misura	Scanner-DG	Intervallo Campion. us	0,16	Lunghezza Fin. Apprendimento	500
Risoluzione	2500	Offset Ampiezza mV	0	Coeff. Standard Deviation	2
Numero Misure	6106	Scala Ampiezza mV	5000	Inizio Fin. di Elaborazione	501
Medie	16	Preamplificatore	Off	Lunghezza Fin. Elaborazione	650
Lun. Percorso cm	8	Tensione Eccitazione V	50	X Iniziale Finestra (mm.)	0
Numero Colonne	86	Filtro LP MHz	3	X Finale Finestra (mm.)	170
Numero Righe	71	Filtro HP MHz	0,1	Y Iniziale Finestra (mm.)	0
Data dei Risultati		Guadagno dB	40	Y Finale Finestra (mm.)	140
10/03/2010 8.21.56		Attenuazione dB	0	Passo Scansione (mm.)	2

Tabella 9. P2. Informazioni contenute nel file prova12.

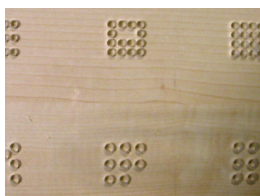


Figura 31. P2. Oggetto esplorato.



Figura 32. P2. Mappa C-scan del parametro A.

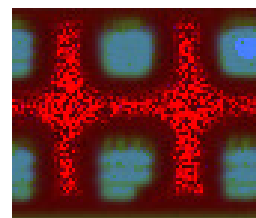


Figura 33. P2. Mappa C-scan dei parametri T_v (rosso), A (verde) e S (blu).

Nella mappa di Figura 32 non si notano differenze tra le macchie nella parte alta della figura, in corrispondenza dei gruppi dei fori di 4 mm, mentre si notano differenze tra le macchie nella parte bassa della figura, in corrispondenza dei gruppi dei fori di 5 mm; nella mappa di Figura 33 si ha una maggiore discriminazione grazie al contributo dei valori di S (vedi Figura 34); in corrispondenza dei fori il valore di A non è in saturazione.

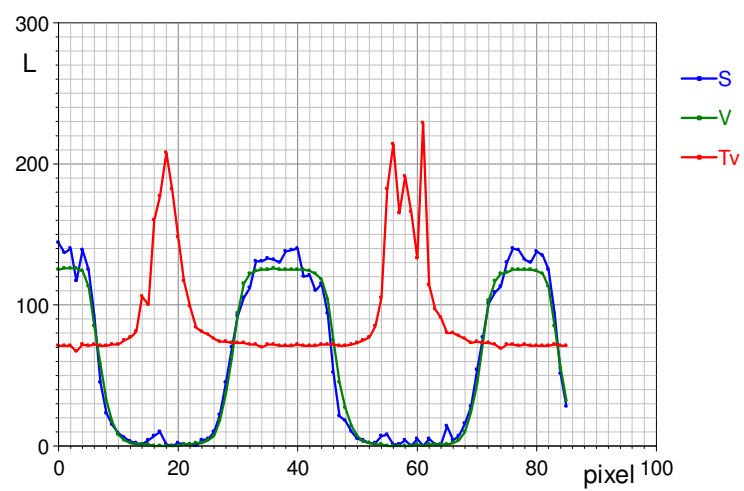


Figura 34. P2. Profilo di linea (0,55)-(85,55), spessore 3.

Campione P3

Commento 0		Commento 1		Proprietà dei Risultati Selezionati	
Pexpress multifori		Esempio 2			
Modalità	US	Offset Temporale us	224,23	Inizio Fin. di Apprendimento	1
Tipo Misura	Scanner-DG	Intervallo Campion. us	0,16	Lunghezza Fin. Apprendimento	500
Risoluzione	2500	Offset Ampiezza mV	0	Coeff. Standard Deviation	2
Numero Misure	4158	Scala Ampiezza mV	2000	Inizio Fin. di Elaborazione	501
Medie	1	Preamplificatore	Off	Lunghezza Fin. Elaborazione	650
Lun. Percorso cm	10	Tensione Eccitazione V	100	X Iniziale Finestra (mm.)	0
Numero Colonne	66	Filtro LP MHz	3	X Finale Finestra (mm.)	130
Numero Righe	63	Filtro HP MHz	0,1	Y Iniziale Finestra (mm.)	0
Data dei Risultati		Guadagno dB	40	Y Finale Finestra (mm.)	124
22/03/2010 11.42.24		Attenuazione dB	24	Passo Scansione (mm.)	2

Tabella 10. P3. Informazioni contenute nel file esemp2.bin.

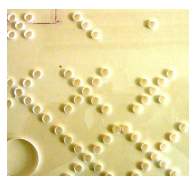


Figura 35. P3. Oggetto esplorato.

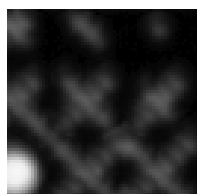


Figura 36. P3. Mappa C-scan del parametro A.

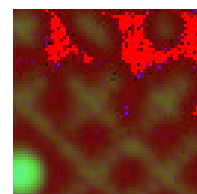


Figura 37. P3. Mappa C-scan dei parametri T_v (rosso), A (verde) e S (blu).

Il motivo osservabile in Figura 36. riporta abbastanza fedelmente la struttura del campione esaminato, in particolare è rivelabile anche la macchia luminosa in corrispondenza del singolo foro in alto a destra, già descritta: nella mappa di Figura 37 le zone in rosso evidenziano come la zona di rivelazione del segnale si estende oltre la dimensione del singolo foro o del gruppo di tre fori a sinistra di esso. Però, anche in base alle osservazioni fatte per i campioni precedenti, non è possibile stabilire se la macchia in basso a sinistra corrisponde ad un singolo foro di grandi dimensioni o ad un gruppo di fori piccoli e ravvicinati.

Il grafico di Figura 38. ricavato lungo una diagonale dell'immagine, mostra un picco di A in corrispondenza dei centri delle croci di fori, dove la sonda ricevente è raggiunta dalle onde ultrasonore che passano attraverso 5 fori.

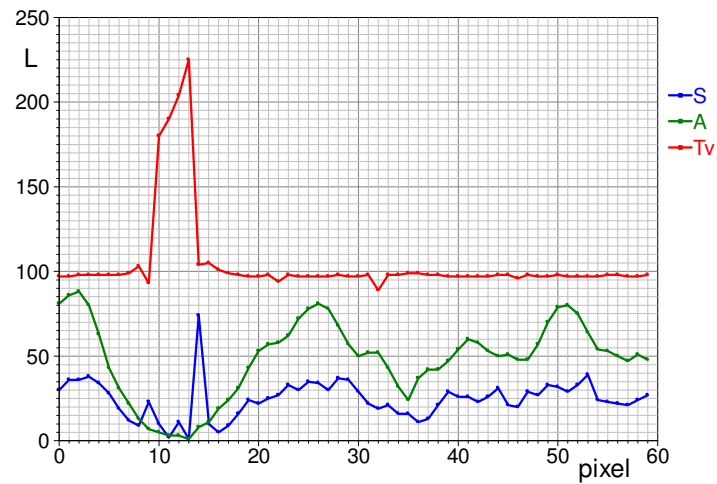


Figura 38. P3. Profilo di linea (1,4)-(60,62), spessore 3.

Campione P4

Per questo campione si riportano i risultati di due ispezioni, ottenute con differenti passi di scansione, aree di scansione e impostazioni di acquisizione (vedi Tabella 11, Tabella 12, Tabella 13 Tabella 14).

Ispezione 1

Commento 0		Commento 1		Proprietà dei Risultati Selezionati	
Pexpress tre gradini		Esperimento 2			
Modalità	US	Offset Temporale us	192,23	Inizio Fin. di Apprendimento	1
Tipo Misura	Scanner-DG	Intervallo Campion. us	0,16	Lunghezza Fin. Apprendimento	500
Risoluzione	2500	Offset Ampiezza mV	0	Coeff. Standard Deviation	2
Numero Misure	2376	Scala Ampiezza mV	100	Inizio Fin. di Elaborazione	501
Medie	16	Preamplificatore	Off	Lunghezza Fin. Elaborazione	650
Lun. Percorso cm	10	Tensione Eccitazione V	450	X Iniziale Finestra (mm.)	0
Numero Colonne	66	Filtro LP MHz	3	X Finale Finestra (mm.)	130
Numero Righe	36	Filtro HP MHz	0,1	Y Iniziale Finestra (mm.)	50
Data dei Risultati		Guadagno dB	40	Y Finale Finestra (mm.)	120
16/03/2010 11.01.35		Attenuazione dB	0	Passo Scansione (mm.)	2

Tabella 11. P4. Informazioni contenute nel file esp2.bin.

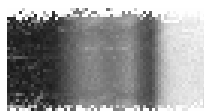


Figura 39. P4. Mappa C-scan del parametro A.

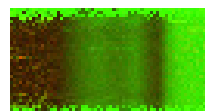


Figura 40. P4. Mappa C-scan dei parametri Tv (rosso), A (verde) e S (blu).

Le mappe di Figura 39 e Figura 40 sono spiegabili in base alla struttura nota del campione (vedi Tabella 1); vista la simmetria del campione, il grafico assiale di Figura 41. P4. Profilo di linea (0,17)-(65,17), spessore 3. fornisce informazioni adeguate.

Nel tratto finale del grafico, a partire dal pixel 50, si ha il massimo valore di A: ciò è giustificato dal fatto che questa zona del campione è costituita da uno spessore di 1 cm di perspex.

Nel tratto compreso tra i pixel 20 e 50 (equivalente ad una distanza di 6 cm) A ha un'ampiezza minore, in accordo col fatto che in questa zona lo spessore del campione è maggiore (3 cm di perspex); il tempo di volo è mediamente diminuito di 10 livelli, in accordo con l'aumento di spessore.

Nel tratto iniziale del grafico A è ulteriormente diminuito: in questa zona lo spessore complessivo del perspex è di 2 cm, ma la cavità esistente tra i due strati introduce riflessioni del segnale ad ultrasuoni e conseguentemente una riduzione del segnale incidente sulla sonda di ricezione. Il tempo di volo aumenta rispetto a quello ottenuto nell'attraversamento dello spessore di 3 cm.

Nel grafico si osserva una transizione lenta dei valori di V nel passaggio tra la zona con cavità e quella priva di cavità ed una transizione con rimbalzo nel passaggio tra la zona con spessore di 3 cm e quella con spessore di 1 cm: nelle immagini si notano una banda scura sulla linea di separazione ed una meno scura a sinistra. Ciò è imputabile al fatto che una faccia del campione presenta un brusco scalino di 2 cm, che influenza il modo di propagazione del segnale a ultrasuoni all'interno del campione.

Ai bordi orizzontali delle mappe si notano delle frange, dovute a effetti di bordo: l'ispezione copre infatti 7 cm del campione su una larghezza di 8 cm.

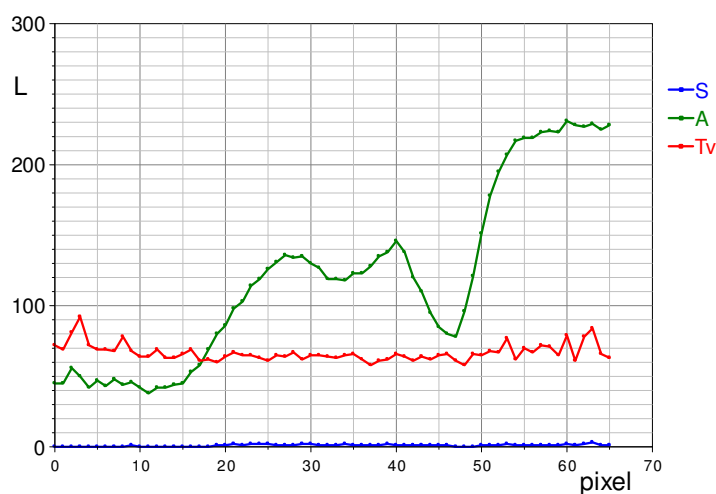


Figura 41. P4. Profilo di linea (0,17)-(65,17), spessore 3.

Ispezione 2

Commento 0		Commento 1		Proprietà dei Risultati Selezionati	
Prova2		bbbbbbbbbbbbbbbbbbbb			
Modalità	US	Offset Temporale us	272,23	Inizio Fin. di Apprendimento	1
Tipo Misura	Scanner-DG	Intervallo Campion. us	0,16	Lunghezza Fin. Apprendimento	500
Risoluzione	2500	Offset Ampiezza mV	0	Coeff. Standard Deviation	2
Numero Misure	4961	Scala Ampiezza mV	200	Inizio Fin. di Elaborazione	501
Medie	4	Preamplificatore	Off	Lunghezza Fin. Elaborazione	650
Lun. Percorso cm	10	Tensione Eccitazione V	100	X Iniziale Finestra (mm.)	20
Numero Colonne	121	Filtro LP MHz	3	X Finale Finestra (mm.)	140
Numero Righe	41	Filtro HP MHz	0,1	Y Iniziale Finestra (mm.)	20
Data dei Risultati		Guadagno dB	40	Y Finale Finestra (mm.)	60
16/12/2009 9.15.14		Attenuazione dB	0	Passo Scansione (mm.)	1

Tabella 12. P4. Informazioni contenute nel file prova2.bin.



Figura 42. P4. Mappa C-scan del parametro A.



Figura 43. P4. Mappa C-scan dei parametri T_v (rosso), A (verde) e S (blu).

Le immagini di Figura 42 e Figura 43 sono simili a quelle riportate nell'ispezione precedente; l'effetto di bordo non compare poiché in questo caso l'area esplorata è all'interno del campione.

Il grafico di Figura 44 è simile a quello di Figura 41: la maggiore risoluzione spaziale non consente di ottenere ulteriori informazioni sulla struttura del campione esaminato.

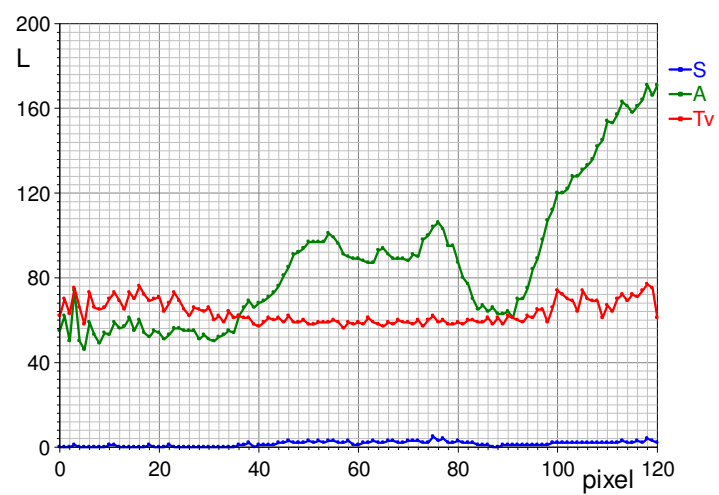


Figura 44. P4. Profilo di linea (0,20)-(120,20), spessore 3.

Campione M1

Commento 0		Commento 1		Proprietà dei Risultati Selezionati	
Marmo grigio		Marmo grigio			
Modalità	US	Offset Temporale us	192,23	Inizio Fin. di Apprendimento	1
Tipo Misura	Scanner-DG	Intervallo Campion. us	0,16	Lunghezza Fin. Apprendimento	500
Risoluzione	2500	Offset Ampiezza mV	0	Coeff. Standard Deviation	3
Numero Misure	1976	Scala Ampiezza mV	500	Inizio Fin. di Elaborazione	501
Medie	16	Preamplificatore	Off	Lunghezza Fin. Elaborazione	650
Lun. Percorso cm	10	Tensione Eccitazione V	900	X Iniziale Finestra (mm.)	0
Numero Colonne	76	Filtro LP MHz	3	X Finale Finestra (mm.)	150
Numero Righe	26	Filtro HP MHz	0,1	Y Iniziale Finestra (mm.)	0
Data dei Risultati		Guadagno dB	60	Y Finale Finestra (mm.)	50
23/03/2010 10.41.54		Attenuazione dB	0	Passo Scansione (mm.)	2

Tabella 13. M1. Informazioni contenute nel file marmo.bin.



Figura 45. M1. Mappa C-scan del parametro A.



Figura 46. M1. Mappa C-scan dei parametri T_v (rosso), A (verde) e S (blu).

Per l'ispezione dei campioni lapidei M1 e M2 si è aumentata la tensione di eccitazione della sonda a ultrasuoni e si è incrementato il guadagno dell'amplificatore. Il sistema è quindi diventato più sensibile ai disturbi esterni, che sono responsabili delle tracce orizzontali presenti sulle immagini di Figura 45 e Figura 46: infatti, in altre ispezioni (non riportate) queste tracce non compaiono.

La Figura 47 riporta gli istogrammi dei valori dei tre parametri, calcolati sull'intera area d'ispezione. Si hanno bassi valori di S, che indicano come la pendenza del segnale che esce dal materiale lapideo sia più bassa di quella del segnale in uscita dal materiale plastico: ciò è causato dalle differenti strutture dei materiali che modificano in maniera diversa l'involuppo del segnale a ultrasuoni.

L'istogramma di A ha un andamento di tipo normale e indica che il materiale esaminato non è perfettamente uniforme: sulle immagini non si notano zone differenti e si può quindi attribuire questa caratteristica alla normale struttura del campione.

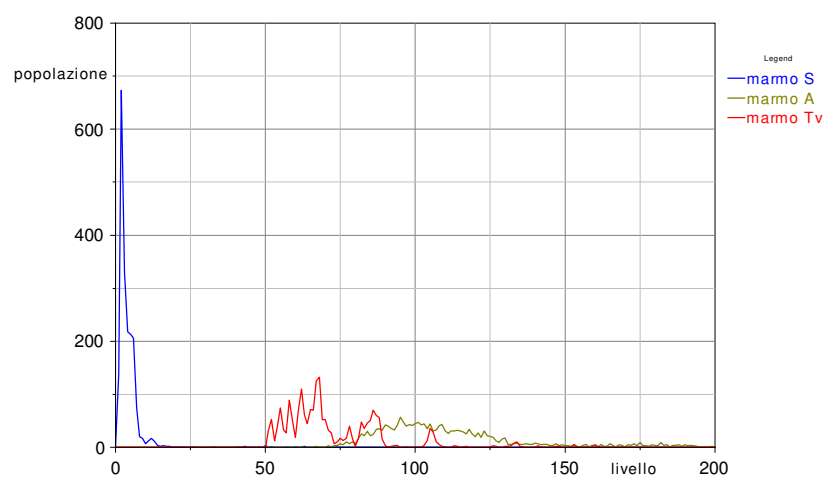


Figura 47. M1. Istogrammi dell'immagine di Figura 46.

Campione M2

Per questo campione si riportano i risultati di 2 ispezioni, ottenute con lo stesso passo di scansione (2 mm) sulla stessa area, con le medesime impostazioni di acquisizione ed elaborazione.

Commento 0		Commento 1		<u>Proprietà dei Risultati Selezionati</u>	
Mattone A		Mattone A			
Modalità	US	Offset Temporale us	80,233	Inizio Fin. di Apprendimento	1
Tipo Misura	Scanner-DG	Intervallo Campion. us	0,16	Lunghezza Fin. Apprendimento	500
Risoluzione	2500	Offset Ampiezza mV	0	Coeff. Standard Deviation	3
Numero Misure	2196	Scala Ampiezza mV	500	Inizio Fin. di Elaborazione	501
Medie	16	Preamplificatore	Off	Lunghezza Fin. Elaborazione	650
Lun. Percorso cm	10	Tensione Eccitazione V	900	X Iniziale Finestra (mm.)	0
Numero Colonne	61	Filtro LP MHz	3	X Finale Finestra (mm.)	120
Numero Righe	36	Filtro HP MHz	0,1	Y Iniziale Finestra (mm.)	0
Data dei Risultati		Guadagno dB	60	Y Finale Finestra (mm.)	70
23/03/2010 11.44.37		Attenuazione dB	0	Passo Scansione (mm.)	2

Tabella 14. M2. Informazioni contenute nei file mattone.bin e mattone1.bin.

Ispezione 1

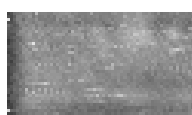


Figura 48. M2. Mappa C-scan del parametro A.

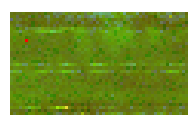


Figura 49. M2. Mappa C-scan dei parametri T_v (rosso), A (verde) e S (blu).

Ispezione 2

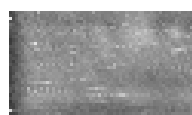


Figura 50. M2. Mappa C-scan del parametro A.

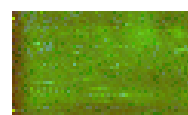


Figura 51. M2. Mappa C-scan dei parametri T_v (rosso), A (verde) e S (blu).

Nelle immagini riportate si possono individuare dei brevi tratti orizzontali, lungo le righe di scansione, attribuibili a rumore elettronico; viceversa, le macchie più chiare con forma circolare sono presumibilmente causate da effettive diversità della struttura del campione.

La Figura 52. riporta gli istogrammi calcolati sulle intere aree di scansione delle due ispezioni.

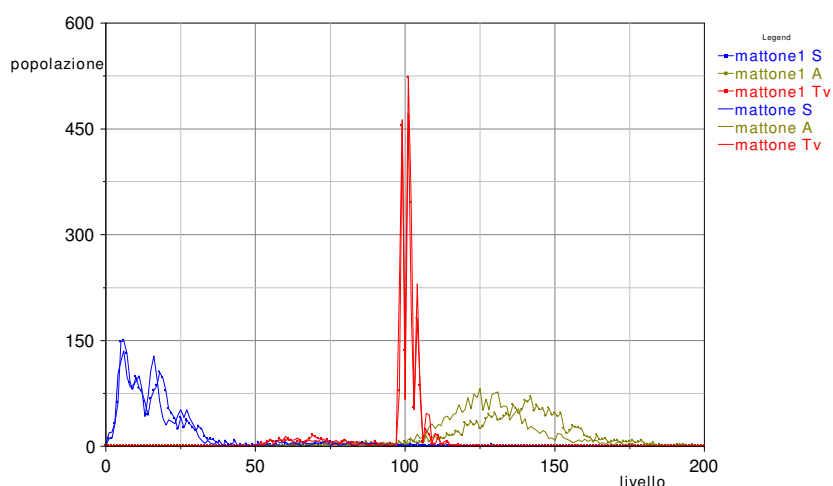


Figura 52. M2. Istogrammi delle immagini di Figura 49 e Figura 51.

I valori di S sono abbastanza bassi, ma con valor medio e dispersione maggiori di quelli riscontrati nell'ispezione del campione di marmo.

I valori di Tv hanno una dispersione minore rispetto a quelli ottenuti con l'ispezione del marmo ed indicano presumibilmente una maggiore uniformità del mattone esaminato rispetto al campione di marmo; anche in questo caso si hanno però delle piccole variazioni casuali della struttura, come indica la distribuzione di valori di A.

Gli istogrammi dei dati ottenuti con le due ispezioni sono abbastanza simili e le differenze sono imputabili al rumore.

Conclusioni

Le tecniche d'ispezione a ultrasuoni mediante sonde a contatto tramite mezzo di accoppiamento sono state ampiamente collaudate e perfezionate e consentono oggi di ottenere segnali di tipo A-scan o mappe di tipo B e C-scan che costituiscono un valido mezzo d'indagine in numerosi settori di applicazione.

Le sonde non a contatto hanno una possibilità d'impiego più limitata: di solito si esegue una misura in trasmissione e di conseguenza non si possono ottenere immagini B-scan che consentono una localizzazione di eventuali anomalie; questa tecnica d'ispezione richiede che le sonde siano allineate e che i campioni da esaminare abbiano facce parallele.

Inoltre, a causa della bassa propagazione degli ultrasuoni in aria si devono impiegare tensioni di eccitazione maggiori di quelle necessarie per le sonde a contatto e si deve eventualmente eseguire una media di più misure nello stesso punto per ottenere un segnale discriminabile: questo fatto comporta un aumento del tempo necessario per l'ispezione di un campione.

Le sonde più efficienti hanno frequenza di risonanza inferiore a 1 MHz ed hanno quindi una superficie di emissione di qualche cm²: per questo fatto non si possono ottenere risoluzioni spaziali elevate, confrontabili a quelle possibili con sonda a contatto risonanti ad a diversi MHz.

Il sistema sviluppato, che fa uso di sonde senza mezzo di accoppiamento, è comunque in grado di fornire mappe C-scan di materiali con notevole assorbimento, come i materiali lapidei, fino a spessori di diversi centimetri: le mappe ottenute sono utilizzabili per il controllo di qualità e la ricerca di eventuali anomalie.

Le prove riportate sono state eseguite con uno scanner in grado di esplorare campioni con dimensioni contenute; il sistema SINDI è comunque in grado di accettare il software per il pilotaggio di scanner per l'ispezione di oggetti di grandi dimensioni.

Riferimenti

- 1) R. Bozzi, M. Chimenti, E. Fantini: "SIND - Descrizione del sistema" ISTI-CNR, Nota Interna, marzo 2009.
- 2) R. Bozzi, M. Chimenti, E. Fantini: "SIND - Modulo di acquisizione di segnali US" ISTI-CNR, Nota Interna, febbraio 2009.
- 3) R. Bozzi, M. Chimenti, E. Fantini: "SIND - Manuali d'uso di applicativi per trattamento di dati ricavati con ispezione automatica mediante ultrasuoni" ISTI-CNR, Nota Interna, febbraio 2010.
- 4) R. Bozzi, M. Chimenti, E. Fantini: "SIND - Sviluppo del sistema" ISTI-CNR, Nota Interna, febbraio 2010.