

Progetto SP1a

“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

Ispezione mediante ultrasuoni di materiali lapidei; risultati preliminari su campioni di marmo

Edoardo Bozzi, Massimo Chimenti, Ovidio Salvetti, Alessandra Zucchelli

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

Rapporto tecnico ottobre 2003

B4-27

Sommario

Introduzione.....	3
Metodi d'ispezione a ultrasuoni.....	5
Metodo NCU (Non-Contact Ultrasound)	8
Risultati sperimentali.....	12
Bibliografia	15

Introduzione

Le indagini non distruttive per mezzo di ultrasuoni sono impiegate in diverse attività di studio e sperimentazione. Per esempio, in medicina gli ultrasuoni costituiscono un efficiente strumento per il monitoraggio dello stato di salute dei pazienti, fornendo immagini visive relative all'interno di una zona del corpo analizzata; in campo industriale gli ultrasuoni permettono sia l'individuazione di difetti interni nei materiali, che la determinazione di alcune caratteristiche significative dei materiali, come lo spessore, la densità e le proprietà meccaniche.

Come per gli altri metodi utilizzati per la caratterizzazione dei materiali (raggi X, raggi γ , infrarossi, metodi ottici, etc.), anche le indagini non distruttive ad ultrasuoni sono basate sul principio di interazione fra onda e materiale indagato.

Gli ultrasuoni sono applicabili a tutti gli stati della materia, ad esclusione del plasma e del vuoto. Le onde ultrasonore si propagano attraverso il materiale ispezionato e subiscono una riflessione causata dalle disomogeneità interne al campione, aventi differenti impedenze acustiche. Questo permette di rilevare e localizzare eventuali difetti interni. La scelta del valore della frequenza del segnale di esplorazione è condizionata da svariati fattori, quali l'attenuazione del materiale e la risoluzione voluta, ed è compresa fra alcune decine di kHz e alcune decine di MHz.

Molte informazioni sono ottenibili analizzando, sia nel dominio del tempo che in quello delle frequenze, il segnale trasmesso attraverso il campione o il segnale riflesso da esso; altre informazioni possono essere ottenute analizzando mappe bidimensionali ottenute mediante la scansione meccanica di un sensore ad ultrasuoni.

La tabella seguente mostra un quadro riassuntivo relativo alle varie categorie di misura, ai parametri ricavati direttamente dalle misure ed alle relative applicazioni.

DOMINIO DELLE MISURE	PARAMETRI	APPLICAZIONI
Tempo	Tempi di volo e velocità di onde superficiali, longitudinali e trasversali	Densità , spessore, rivelazione difetti, proprietà elastiche e meccaniche, analisi dell'interfaccia, anisotropia, analisi di prossimità e dimensionale, robotics, remote sensing, etc.
Attenuazione	Fluttuazioni in segnali riflessi e trasmessi a date frequenze e dimensione del fascio	Caratterizzazione dei difetti, delle superfici e delle strutture interne, analisi di interfaccia, etc.
Frequenza	Dipendenza dalla frequenza dell'attenuazione ultrasonora o della spettroscopia ad ultrasuoni	Microstrutture, porosità, caratterizzazione delle superfici, analisi di fase, etc.
Immagini	Mappe C-scan di tempi di volo, velocità, spessore e attenuazione ricavate con sensori puntuali, lineari, 2D, o phased array.	Rappresentazione di difetti superficiali e interni, microstrutture, densità, velocità, proprietà meccaniche.

Tabella I – Categorie di misura ad ultrasuoni e applicazioni

Nel corso degli ultimi decenni le tecniche ad ultrasuoni hanno avuto un notevole sviluppo in campo industriale, dove sono state impiegate per la caratterizzazione delle proprietà elastiche e meccaniche dei materiali, l'individuazione di delaminazioni in materiali multistrato, misure di anisotropia ed eterogeneità, misure di superficie e di caratteristiche interne di materiali, misure del flusso di gas e liquidi e molte altre. Anche l'ISTI ha contribuito a numerose ricerche riguardanti lo sviluppo e la realizzazione di procedure di diagnostica industriale mediante ispezioni a ultrasuoni, e si è dotato nel tempo di una strumentazione adeguata per la caratterizzazione di materiali e per e per l'individuazioni, la localizzazione ed il riconoscimento di difetti all'interno di manufatti di vario tipo [1-7].

La tecniche ad ultrasuoni hanno trovato negli ultimi tempi un'applicazione anche nel controllo di materiali lapidei, sia nella fase di lavorazione dei materiali, sia nella diagnostica di manufatti di interesse culturale ai fini della loro conservazione.

In quest'ambito, anche presso l'ISTI è iniziata un'attività di studio e ricerca, con l'obiettivo di realizzare un'efficiente procedura d'ispezione ad ultrasuoni per il rilevamento di difetti all'interno di blocchi lapidei con grandi dimensioni [8].

Metodi d'ispezione a ultrasuoni

Un'onda ultrasonora si propaga in un mezzo omogeneo con una velocità V dipendente dalle caratteristiche del mezzo stesso. Durante il percorso l'onda subisce un'alterazione, anch'essa dipendente dalle caratteristiche del mezzo; in particolare, si definisce un'attenuazione per unità di lunghezza, misurata in dB.

Quando l'onda attraversa l'interfaccia fra regioni con differenti impedenze acustiche, una parte dell'energia incidente viene riflessa e la restante parte viene trasmessa. Si definisce quindi il coefficiente di trasmissione T mediante la seguente relazione:

$$T = \frac{4Z_i Z_{i+1}}{(Z_i + Z_{i+1})^2} \quad (1)$$

dove, Z_i è l'impedenza acustica della prima regione e Z_{i+1} è l'impedenza acustica della regione successiva.

Il coefficiente di trasmissione può essere definito anche in base al rapporto tra l'energia acustica trasmessa, V (misurata in volt) e l'energia d'ingresso, V_0 :

$$T \propto \frac{V^2}{V_0^2} \quad (2)$$

Esprimendo quest'ultima relazione in decibel si ottiene:

$$\text{Energia trasferita [dB]} = 20\log_{10}T \quad (3)$$

L'ispezione a ultrasuoni di un materiale può essere eseguita con misure di vario tipo, che si differenziano per il numero di trasduttori impiegati e per l'angolo tra l'asse del trasduttore e la superficie del campione. Si possono distinguere i seguenti modi:

- misure con singolo trasduttore in modalità Pulse Echo (figura 1).
- misure con trasduttori di trasmissione e riflessione, posizionati sullo stesso lato del campione, in modalità Pitch-Catch (figura 2).
- misure con trasduttori di trasmissione e riflessione in modalità trough-transmission (figura 3).

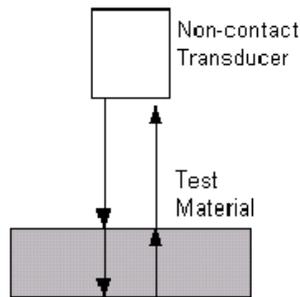


Figura 1 – Principio di funzionamento per misure in modalità Pulse Echo.

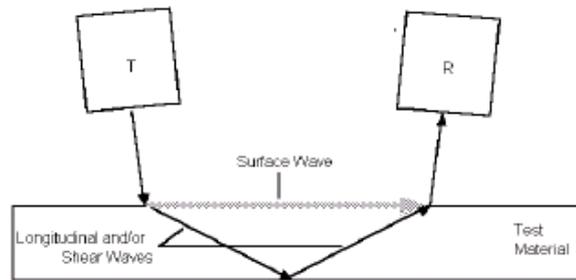


Figura 2 – Principio di funzionamento per misure in modalità Pitch-Catch: T = trasmettitore, R = ricevitore. Sono mostrati i vari tipi di onde che si propagano all'interno del materiale.

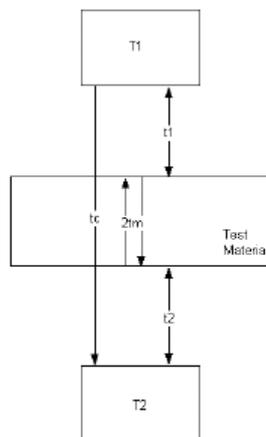


Figura 3 – Principio di funzionamento per misure in modalità trough-transmission. T1 = trasduttore in trasmissione; T2 = trasduttore in ricezione; t_c = tempo di volo (ToF) completo corrispondente alla propagazione di ultrasuoni nel mezzo di accoppiamento e nel materiale sotto test; $2t_m$ = round-trip ToF attraverso il materiale; t_1 = ToF da T1 alla superficie superiore del materiale; t_2 = ToF dalla superficie inferiore del materiale a T2.

Generalmente, il trasduttore che genera l'onda ultrasonora viene pilotato in modo impulsivo. All'uscita del trasmettitore si ha quindi un treno di onde sinusoidali rapidamente smorzate e con frequenza dipendente dalle caratteristiche del

trasduttore, assimilabile ad un impulso di breve durata; il ricevitore produce impulsi elettrici in corrispondenza degli impulsi ultrasonori che incidono su di esso in seguito alle varie riflessioni fra le interfacce con diversa impedenza acustica incontrate lungo il percorso: le dimensioni e le caratteristiche dei campioni esaminati possono essere ricavate dall'analisi dei tempi di arrivo degli impulsi e delle loro ampiezze.

Per esempio, con riferimento alla figura 3, la velocità di propagazione nel materiale esaminato può essere ricavata sulla base della misura dell'intervallo di tempo t fra la generazione del segnale e il segnale ricevuto per primo.

Inizialmente si ricava il valore t_m con le sonde poste a distanza s e senza campione. Si determina così la velocità di propagazione nel mezzo v_a , data da:

$$v_a = \frac{s}{t_m} \quad (4)$$

Successivamente si ricava il valore t_c interponendo il campione tra le sonde. In questo caso si ha:

$$t_c = \frac{s - s_c}{v_a} + \frac{s_c}{v_c} \quad (5)$$

dove s_c = dimensione del campione, v_c = velocità di propagazione nel campione. Dalle due equazioni si ricava:

$$v_c = \frac{s \cdot s_c}{s t_c - (s - s_c) t_m} \quad (6)$$

La misura del coefficiente di attenuazione del materiale è basata sul fatto che, in presenza del campione, al trasduttore ricevente arriva anzitutto il segnale che attraversa il campione una sola volta (segnale di primo transito), e, successivamente, ulteriori segnali dovuti alle successive riflessioni dell'energia ultrasonica sulle interfacce campione-mezzo (segnali di round trip). Il coefficiente di attenuazione del materiale può essere valutato comparando fra loro l'ampiezza del segnale di primo transito (V_1) con l'ampiezza del segnale di secondo transito (V_2), in accordo alla formula

$$Att_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{V_1/V_2}{2S_c} \right) \quad (7)$$

Il fenomeno della riflessione dell'onda ultrasonora è essenziale poiché consente di ricavare informazioni sulla struttura interna del campione mediante l'analisi del segnale che si è propagato attraverso il campione stesso; esso ha anche un aspetto

negativo in quanto si ha una perdita di energia causata dalle interfacce attraversate dall'onda al di fuori del campione.

In generale, l'onda che si propaga deve attraversare le seguenti interfacce:

- trasduttore-mezzo di accoppiamento
- mezzo di accoppiamento-campione
- campione-mezzo di accoppiamento
- mezzo di accoppiamento-trasduttore

Per massimizzare il segnale rivelato dal trasduttore in ricezione è necessario adattare l'impedenza acustica del trasduttore a quella del mezzo di accoppiamento. Fino a tutt'oggi, le ispezioni ad ultrasuoni sono state condotte impiegando trasduttori posti a contatto coi materiali da investigare tramite un mezzo di accoppiamento liquido (acqua o gel). Negli ultimi anni sono stati però sviluppati particolari trasduttori che non richiedono il mezzo di accoppiamento liquido, rendendo le tecniche ad ultrasuoni completamente non distruttive e non invasive. Il metodo d'ispezione è denominato NCU (Non-Contact Ultrasound) e i trasduttori utilizzati sono identificati dalla sigla NC (Non-Contact).

Metodo NCU (Non-Contact Ultrasound) [9]

Con il metodo NCU è possibile individuare, anche in ambito industriale, varie caratteristiche (spessore, densità, proprietà meccaniche, rivelazione di difetti, ecc) anche per quei materiali che a contatto con i liquidi di accoppiamento potrebbero subire variazioni di conformazione: con questo metodo gli ultrasuoni assicurano la qualità dei materiali e garantiscono un efficiente processo di controllo.

Lo sviluppo del metodo NCU potrebbe, inoltre, permettere molte altre applicazioni, come ad esempio la valutazione delle caratteristiche di materiali porosi, lo studio di materiali nel loro primo stato produttivo (ceramica verde e polveri metalliche) e il monitoraggio continuo dei materiali nel corso del loro processo produttivo.

Nel caso di ispezione con il metodo NCU il mezzo di accoppiamento è costituito dall'aria. Poiché generalmente gli elementi piezoelettrici impiegati nei trasduttori a ultrasuoni presentano un'impedenza di molti ordini superiori rispetto all'impedenza dell'aria, i dispositivi NC sono formati da un elemento piezoelettrico (figura 5) e da uno strato finale formato da una speciale fibra che permette di ottenere un perfetto adattamento dell'impedenza acustica trasduttore-aria.

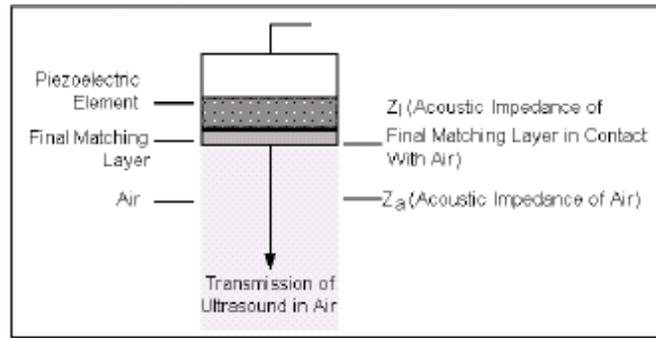


Figura 5 – Modello di un trasduttore NC

I trasduttori NC possono essere impiegati nelle diverse modalità di misura elencate in precedenza: le figure 6 e 7 mostrano esempi di misure in due modalità.

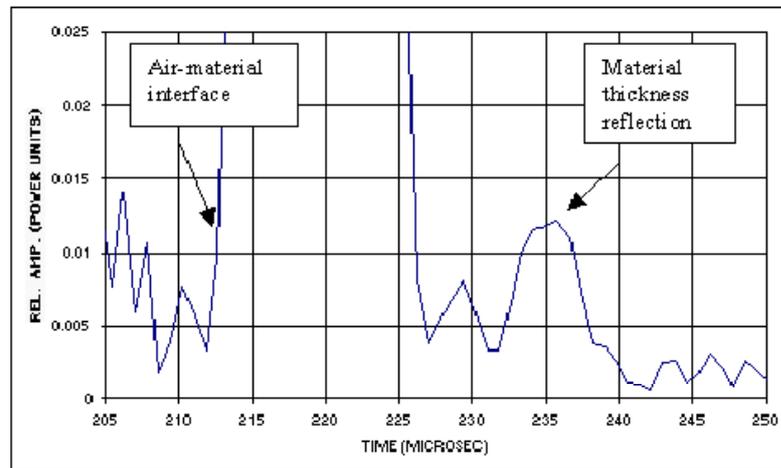


Figura 6 – Esempio di misura Pulse-Echo. Il trasduttore ha frequenza centrale intorno a 1MHz, e area attiva con diametro 12.5 mm; il campione di silicone rubber è spesso 9 mm. La distanza dal trasduttore al campione è di 40 mm.

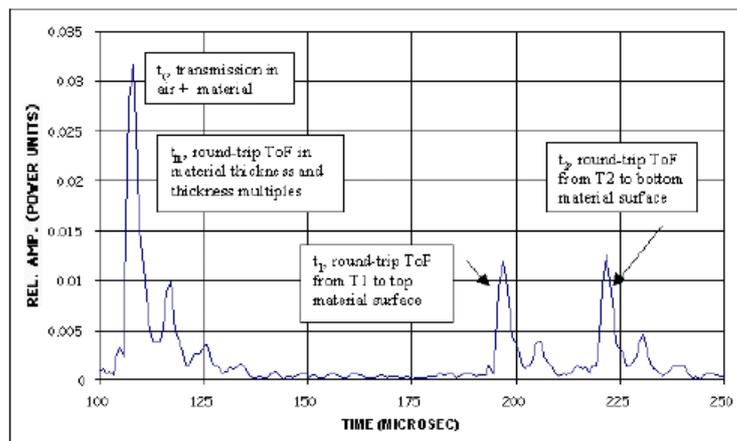


Figura 7 – Esempio di misura trough-transmission. Le indicazioni mostrate sono definite nella didascalia di figura 5.

I trasduttori NC sono operanti nella banda di frequenze che va da 100 kHz a 5 MHz e presentano una sensibilità minore rispetto ai trasduttori convenzionali, di circa 30dB. La sensibilità è definita come:

$$S = 20 \log_{10} \frac{V_x}{V_0} \quad (8)$$

con V_0 ampiezza in volt dell'impulso di eccitazione e V_x ampiezza in volt del segnale ricevuto (vedi figura 8).

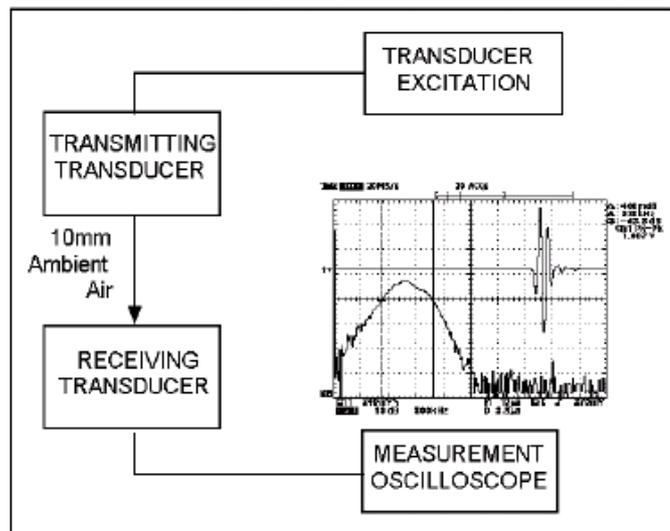


Figura 8 – Schema operativo relativo al rilevamento delle caratteristiche di trasduttori NC. La frequenza, la larghezza di banda, l'ampiezza dell'impulso e il rapporto segnale rumore sono direttamente osservabili dall'oscilloscopio.

Nella tabella II sono elencati a titolo esemplificativo, i coefficienti di trasmissione e le perdite di energia relativi ad alcuni materiali esaminati sia con i trasduttori NC (vedi figura 9), che con i trasduttori a contatto; le misure con questi ultimi tipi di trasduttori sono state ottenute coi campioni immersi in acqua.

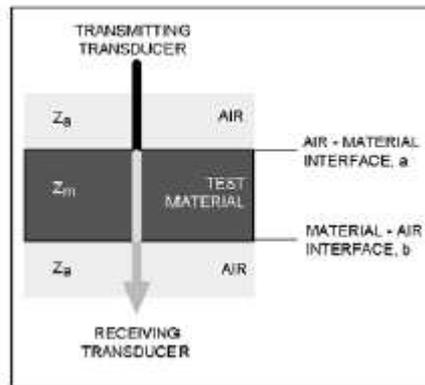


Figura 9 – Interfacce attraversate dagli ultrasuoni (mostrate dalla freccia) in modalità through-transmission. 'a' = interfaccia aria-materiale (dove si osserva il passaggio da un'impedenza acustica Z_a ad un'impedenza acustica Z_m). 'b' = interfaccia materiale-aria (dove si osserva il passaggio da un'impedenza acustica Z_m ad un'impedenza acustica Z_a)

MATERIAL Z_m [MRayl]	INTERFACE	TRANSMISSION COEFFICIENT (T)		ENERGY TRANSFER (dB)		TOTAL ENERGY LOSS AT INTERFACES a + b (dB)	
		In Air	In Water	In Air	In Water	In Air	In Water
Steel 51.0	Air – Steel, a Steel–Air, b	0.000034	0.11	-89	-19	178	38
Aluminum 17.0	Air – Al, a Al – Air, b	0.0001	0.3	-80	-10	160	20
Acrylic 3.5	Air – Acry, a Acry – Air, b	0.0005	0.84	-66	-1.5	132	3
Silic.Rubber 1.0	Air – Rub., a Rub. – Air, b	0.018	0.96	-35	-0.35	70	<1

Tabella II – Confronto tra coefficienti di trasmissione e energia trasferita nel materiale, con tecniche non a contatto e tecniche standard. Z_m = impedenza del materiale; $Z(\text{air}) = 15 \text{ Rayl}$; $Z(\text{water}) = 1.5 \text{ Mrayl}$ ($1 \text{ Rayl} = \text{kg/m}^2\text{s}$).

Dalla tabella è possibile ottenere due importanti conclusioni:

- le perdite di trasmissione diminuiscono se l'impedenza acustica del materiale esaminato si avvicina a quella del mezzo di accoppiamento, indipendentemente che esso sia aria o acqua.
- la perdita di energia alle varie interfacce nella trasmissione senza contatto (NCU method) è maggiore di sei ordini di grandezza, rispetto alla perdita che si verifica nella trasmissione tradizionale in cui l'acqua è il mezzo di accoppiamento.

Risultati sperimentali

Lo sviluppo di efficienti tecniche di indagine non distruttiva per una specifica classe di materiali presuppone, peraltro, la conoscenza dei valori dei parametri fondamentali che caratterizzano la propagazione, all'interno dei materiali medesimi, della radiazione usata per l'indagine: tipicamente, la velocità di propagazione e il coefficiente di attenuazione. Con riferimento ai materiali qui di interesse, è da notare che la letteratura tecnica fornisce purtroppo dei valori per le grandezze sopradette che si riferiscono a classi troppo ampie di materiali e che quindi mancano della necessaria specificità.

Si è pertanto ritenuto interessante avviare un'indagine sperimentale volta allo specifico obiettivo di misurare velocità di propagazione e coefficiente di attenuazione di onde ultrasonore in un insieme, ritenuto significativo, di marmi e pietre [10].

I risultati ottenuti mostrano come i valori delle grandezze caratteristiche della propagazione sopra specificate varino, per i diversi tipi di materiale, in un intervallo estremamente ampio; pertanto la loro conoscenza appare di notevole interesse e, in ogni caso, preliminare alla progettazione e sviluppo di idonei strumenti di indagine non distruttiva e controllo dello stato di conservazione dei materiali in questione.

I tipi di materiale presi in considerazione sono riportati in Tabella 1, insieme alle dimensioni geometriche dei provini, al loro peso e densità. Si è scelto di individuare ciascun tipo di pietra o marmo non con la sua denominazione mineralogica, ma con il nome commerciale correntemente usato.

N° Campione	Nome	L _A (mm)	L _B (mm)	L _C (mm)	Peso (g)	Densità (Kg/m ³)
1	Bianco Statuario	100.1	74.8	50.2	1014.0	2698
2	Bianco Carrara C	100.8	74.6	50.0	1013.5	2696
3	Rosa Portogallo	101.0	75.0	50.2	1024.0	2693
4	Botticino Classico	100.2	75.1	50.0	1007.5	2678
5	Pietra di Trani	101.0	74.6	50.1	1016.5	2693
6	Verde Cipollino	100.2	74.5	49.7	1015.5	2737
7	Pietra Serena	100.5	74.9	49.7	898.5	2402
8	Pietra del Cardoso	100.6	74.7	49.7	1000.0	2676
9	Verde Aver	101.0	74.6	50.3	1016.0	2679
10	Granito Grey Sardegna	100.5	75.8	49.5	957.0	2538
11	Nero Africa Zimbabwe	100.8	74.6	50.3	1145.0	3027

Tabella I – Caratteristiche dei materiali esaminati: L_A = lunghezza lungo l'asse A; L_B = lungo l'asse B; L_C = lunghezza lungo l'asse C

Per ciascun provino sono stati misurati la velocità di propagazione ed il coefficiente di attenuazione lungo i tre assi A, B e C, paralleli ai lati L_A, L_B e L_C al fine di fornire un'idea anche della diversità di comportamento del materiale nelle varie direzioni.

Le misure sono state eseguite con la tecnica trough-transmission: i due trasduttori, l'uno trasmittente e l'altro ricevente, sono immersi in acqua, così come il campione di materiale sotto prova. Il trasmettitore è stato pilotato mediante un generatore Panametrics 5052UA; un oscilloscopio digitale LeCroy 9310 visualizza sia

l'impulso a radiofrequenza, che alimenta il trasduttore di trasmissione, sia i vari impulsi che arrivano al trasduttore ricevente.

Nelle tabelle II e III sono riportati i valori delle velocità di propagazione, secondo i tre assi, alla frequenza di 100 kHz e 500 kHz, rispettivamente.

La misura del coefficiente di attenuazione del materiale è stata possibile solo alla frequenza di 500 kHz ed i relativi risultati sono riportati nella tabella IV.

N° Campione	V _A (m/s)	V _B (m/s)	V _C (m/s)
1	4070	3902	4343
2	5791	5473	5540
3	5608	4901	5307
4	6472	6444	6433
5	6164	6302	6229
6	5837	5493	4960
7	2909	1965	2683
8	4718	4559	2455
9	5464	5714	4667
10	4648	4709	4655
11	6232	6100	6152

Tabella II – Velocità di propagazione alla frequenza di 100 kHz

N° Campione	V _A (m/s)	V _B (m/s)	V _C (m/s)
1	4199	3951	4535
2	5861	5624	5650
3	5694	4932	5481
4	6477	6493	6515
5	6262	6410	6429
6	5865	5512	5025
7	2952	2107	2708
8	4758	4589	2439
9	5429	5803	4756
10	4653	4782	4854
11	6314	6246	6378

Tabella III - Velocità di Propagazione alla Frequenza di 500 kHz

N° Campione	Att _A (dB/m)	Att _B (dB/m)	Att _C (dB/m)
1	0.0044	0.0107	0.0142
2	0.0155	0.0132	0.0139
3	0.0162	0.0161	0.0167
4	0.0091	0.0063	0.0093
5	0.0111	0.0091	0.0149
6	0.0132	0.0149	0.0157
7	(*)	(*)	(*)
8	0.0163	0.0136	(*)
9	0.0126	0.0148	0.0165
10	0.0104	0.0126	0.0173
11	0.0114	0.0160	0.0115

Tabella IV - Coefficiente di Attenuazione alla frequenza di 500 kHz

I valori di velocità misurati risultano allocati in un range sorprendentemente ampio al variare del tipo di materiale e sono compresi fra circa 1800 m/s e circa 6500 m/s. Per ogni campione, poi, si possono avere variazioni della velocità di propagazione al variare della direzione, fino a circa 700-800 m/s. L'importanza di tali dati appare senz'altro evidente nella prospettiva di voler progettare una macchina che sia capace di localizzare la presenza di eventuali difetti all'interno del pezzo in esame.

Bibliografia

- [1] L. Azzarelli, E. Bozzi, B. Carbone, S. Cerri, M. Chimenti, O. Salvetti, S. Cesaro "Progetto del sistema ETIS per il controllo di qualità ad ultrasuoni" IEI, Nota interna, Febbraio 1986.
- [2] L. Azzarelli, E. Bozzi, M. Chimenti, O. Salvetti, L. D'Antonio, C. Sabatino "Distributed system for quality control of aerospace structures" Materials Evaluation, 49, n.2 (1991), 290-293.
- [3] E. Bozzi, M. Chimenti, L. Azzarelli "Ispezione a soglia singola mediante prototipo di stazione US" Collaborazione Tecnico-Scientifica Alenia-GAT/IEI-CNR, IEI, Nota Interna, Giugno 1992.
- [4] E. Bozzi, M. Chimenti, L. Azzarelli "Sviluppo di procedure per la scansione a ultrasuoni di superfici curve mediante robot a sei assi" Collaborazione Tecnico-Scientifica Alenia-GAT/IEI-CNR, IEI, Nota Interna, Settembre 1992.
- [5] E. Bozzi, M. Chimenti "Pacchetto software per l'ispezione a soglia singola e onda completa mediante stazione US" Collaborazione Tecnico-Scientifica Alenia-GAT/IEI-CNR, IEI, Nota Interna, Maggio 1993.
- [6] L. Azzarelli, E. Bozzi, S. Cerri, M. Chimenti "Stazione di lavoro per la scansione a ultrasuoni di campioni piani" IEI, Nota Interna, Luglio 1994.
- [7] L. Azzarelli, E. Bozzi, M. Bramanti, M. Chimenti "Studio di fattibilità per il rilevamento di particelle di carbone in campioni di teflon mediante ispezione a ultrasuoni" IEI, Nota Interna, Dicembre 1994.
- [8] E. Bozzi, M. Bramanti, "A procedure to Detect Flaws inside Large Sized Marble Blocks by Ultrasound" Susurface Sensing Technologies and Applications, Vol. 2, N. 1, 2001
- [9] Mahesh C. Bhardwaj "Non-Contact Ultrasound: the Final Frontier in Non-destructive Analysis" Publications #SW302
- [10] E. Bozzi, M. Bramanti "Propagazione e attenuazione di ultrasuoni in materiali lapidei: alcuni risultati sperimentali" AEI, volume 84, n. 9, Settembre 1997.