

Teoria degli ultrasuoni

In questo capitolo sono descritte le caratteristiche fisiche degli ultrasuoni, con particolare riferimento al loro utilizzo nel controllo non distruttivo di materiali compositi.

3.1 Generalità

Gli ultrasuoni sono vibrazioni acustiche caratterizzate da frequenze comprese tra 0.5 Mhz e 15 Mhz, superiori alla banda di frequenze udibili all'orecchio umano (16 Hz ÷ 20 KHz).

Le onde ultrasonore sono originate da moti oscillatori delle molecole del mezzo in cui si propagano (solido, liquido, gas), generando fronti d'onda di particelle in fase.

I parametri fisici che caratterizzano tali moti sono la frequenza, la lunghezza d'onda, la velocità di propagazione, l'impedenza acustica, l'intensità e la pressione acustica.

Analogamente alle onde luminose, quelle ultrasonore sono soggette a riflessione e rifrazione sulla superficie di separazione di due mezzi con differente impedenza acustica, mentre all'interno del materiale subiscono fenomeni di diffrazione e diffusione.

3.2 Grandezze caratteristiche degli ultrasuoni

- Velocità di propagazione: V

La velocità di propagazione, misurata in (m/s), è definita come lo spazio percorso dal fronte d'onda nell'unità di tempo. Essa dipende fortemente dalle caratteristiche

del mezzo in cui l'onda si propaga (modulo di Young E , densità ρ e coefficiente di Poisson ν).

- Periodo: T

Il periodo T è definito come il tempo che impiega l'onda acustica per passare da un massimo di pressione al successivo. L'unità di misura è il secondo (s).

- Frequenza: f

La frequenza, misurata in (Hz), è l'inverso del periodo T :

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}] \quad [3.2.a]$$

- Lunghezza d'onda: λ

La lunghezza d'onda, misurata in (m), rappresenta la distanza percorsa dal fascio US in un periodo T e alla velocità V :

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad [\text{m}] \quad [3.2.b]$$

- Pulsazione: ω

La pulsazione ω esprime il numero di radianti nell'unità di tempo. Dal momento che la frequenza rappresenta il numero di oscillazioni nell'unità di tempo ed ogni oscillazione completa avviene in 2π radianti, vale la seguente relazione:

$$\omega = 2\pi f \quad [\text{rad/s}] \quad [3.2.c]$$

- Impedenza acustica: Z

Questo parametro caratterizza la resistenza al passaggio del fascio US nel mezzo ed è espresso dalla relazione:

$$Z = \rho V \quad [\text{Ns/m}^2] \quad [3.2.d]$$

in cui ρ rappresenta la densità del mezzo [Kg/m^3] e V la velocità di propagazione. Per ogni materiale si possono definire una o più impedenze in funzione della tipologia di propagazione degli US (onde longitudinali, trasversali o superficiali). Nella seguente tabella è riportata l'impedenza acustica di alcuni materiali in funzione della velocità di propagazione longitudinale.

MATERIALE	VELOCITA' LONGITUDINALE V_L [10^5 cm/s]	DENSITA' ρ [g/cm^3]	IMPEDENZA ACUSTICA Z [10^5 g/cm ² /s]
MATERIALI METALLICI			
Acciaio	5,85	7,80	45,63
Alluminio	6,25	2,70	16,88
Argento	3,60	10,50	37,80
Cadmio	2,78	8,64	24,02
Ghisa	3,50 - 5,60	7,30	25,0 - 40,0
Oro	3,24	19,32	62,60
Nichel	5,50	8,90	48,95
Ottone	4,45	8,55	38,05
Piombo	2,40	11,37	27,29
Rame	4,60	8,93	41,08
Mercurio (20°C)	1,45	13,550	19,65
Stagno	3,32	7,29	24,20
Zinco	4,17	7,10	29,61
Bronzo	8,86	3,53	31,28
Bismuto	9,80	2,18	21,36
Magnesio	1,70	5,77	9,81
Molibdeno	10,09	6,29	63,47
Platino	21,40	3,96	84,74
Titanio	4,54	6,10	27,69
FLUIDI DI ACCOPPIAMENTO ACUSTICO			
Acqua (15°C)	1,48	≈ 1	1,48
Acqua (20°C)	1,32	≈ 1	1,32
Aria	0,33	0,0012	0,0004
Glicerina (20°C)	1,92	1,26	2,42
Petrolio (15°C)	1,33	0,70	0,93
MATERIALI NON METALLICI			
Gomma	1,20	2,30	2,76
Plexiglas	1,80	2,73	4,91
Polistirolo	1,60	2,35	3,76
Porcellana	2,40	5,60	13,44
Quarzo	2,60	5,57	14,48
Resina Epox	1,10	2,40	2,64
Teflon	2,20	1,35	2,97
Vetro	3,60	4,26	15,34

Tab. 3.1 - Impedenze acustiche dei principali mezzi di propagazione -

- Intensità acustica: I

Rappresenta la quantità d'energia che attraversa l'unità di superficie nell'unità di tempo ed è data analiticamente dalla relazione:

$$I = \frac{p^2}{2Z} \quad [\text{J/s/m}^2] \quad [3.2.e]$$

in cui p rappresenta la pressione acustica espressa in $[\text{N/m}^2]$.

3.3 Propagazione delle onde ultrasonore

La propagazione delle onde ultrasonore dipende sia dal mezzo in cui essa avviene sia dal modo in cui l'onda è generata. All'interno dei solidi, dotati di reticolo cristallino, la propagazione può avvenire tramite onde longitudinali, trasversali, superficiali e di Lamb. Nei liquidi e nei gas, privi del reticolo cristallino, avviene solo attraverso onde longitudinali.

La caratterizzazione delle onde dipende dalla direzione di vibrazione e dalla direzione di propagazione.

I parametri fisici del mezzo attraversato da onde US, che compaiono nelle varie espressioni delle velocità, sono i seguenti:

- ⇒ E = Modulo di elasticità o di Young $[\text{N/m}^2]$
- ⇒ ν = coefficiente di Poisson $[\text{adim}]$
- ⇒ ρ = densità del mezzo $[\text{Kg/m}^3]$

Per i materiali omogenei ed isotropi il modulo E ed il coefficiente ν sono univocamente definiti per ogni direzione, mentre per i materiali ortotropi, come i compositi (CFRP), sono funzione della direzione variano puntualmente, rendendo necessaria la definizione di un valore medio.

Attraverso un approccio puramente meccanico, si possono definire le seguenti espressioni per i parametri ν ed E in direzione normale ai laminati:

$$E = \frac{E_M \cdot E_F}{E_F \cdot V_F + E_M \cdot V_M} \quad \nu = V_M \cdot \nu_M + V_F \cdot \nu_F \quad [3.3.a]$$

dove i pedici M ed F si riferiscono rispettivamente alla matrice ed alle fibre, e dove V ne indica la percentuale in volume.

3.3.1 Onde longitudinali

Le onde longitudinali, dette anche onde di compressione, sono caratterizzate da fasi alterne di compressione ed espansione delle particelle del mezzo, come indicato nella figura 3.1

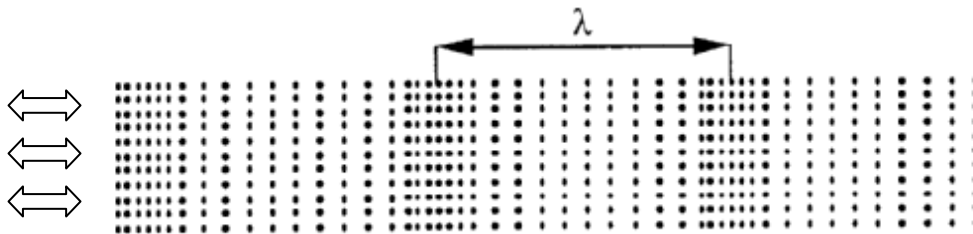


Fig. 3.1 – Compressione ed espansione delle particelle -

Come si può notare, lo spostamento delle particelle, rispetto alla loro posizione di riposo, avviene nello stesso verso della propagazione del fascio ultrasonoro. La distanza tra due massimi di spostamento consecutivi rappresenta la lunghezza d'onda λ .

In tali onde la direzione di vibrazione coincide con quella di propagazione ed è perpendicolare al piano emittente della sonda, come mostrato nella figura 3.2:

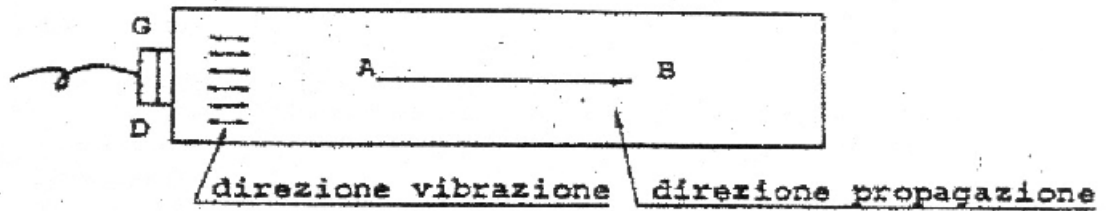


Fig. 3.2 - Onde Longitudinali -

La velocità di propagazione delle onde longitudinali è:

$$V_L = \sqrt{\frac{E \cdot (1 - \nu)}{\rho \cdot (1 + \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}} \quad [\text{m/s}] \quad [3.3.1.a]$$

Nella tab. 3.1 sono riportate le velocità di propagazione delle onde longitudinali di alcuni materiali.

3.3.2 Onde trasversali

Nel caso di onde trasversali, dette anche onde di taglio, lo spostamento delle particelle nella materia è normale al senso di propagazione del fascio ultrasonoro, come mostrato in fig. 3.3

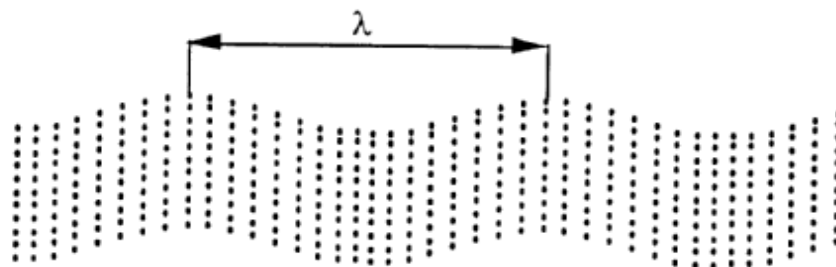


Fig. 3.3 - Spostamento delle particelle nella materia -

La distanza tra due massimi di spostamento consecutivi rappresenta la lunghezza d'onda λ del fascio US. La direzione dell'oscillazione delle particelle, sottoposte a sollecitazione di taglio, è perpendicolare alla direzione di propagazione (fig. 3.4).

Tali onde si propagano solo nei solidi, poiché nei liquidi e nei gas sono molto attenuate, dato che in tali mezzi le sollecitazioni tangenziali si sviluppano solo grazie alla viscosità.

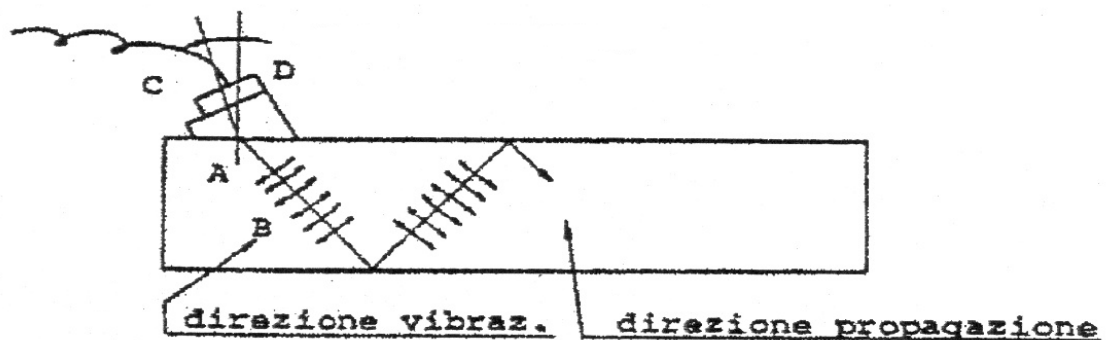


Fig. 3.4 – Onde Trasversali -

La velocità delle onde trasversali è:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)}} \quad [\text{m/s}] \quad [3.3.2.a]$$

3.3.3 Onde superficiali

Sono dette anche onde di Rayleigh ed hanno la caratteristica di propagarsi solo nello strato superficiale dei solidi, seguendo il profilo del pezzo, sempre che non vi siano brusche variazioni di forma. Nelle onde superficiali la direzione di vibrazione delle molecole è perpendicolare alla superficie del pezzo (fig. 3.5).

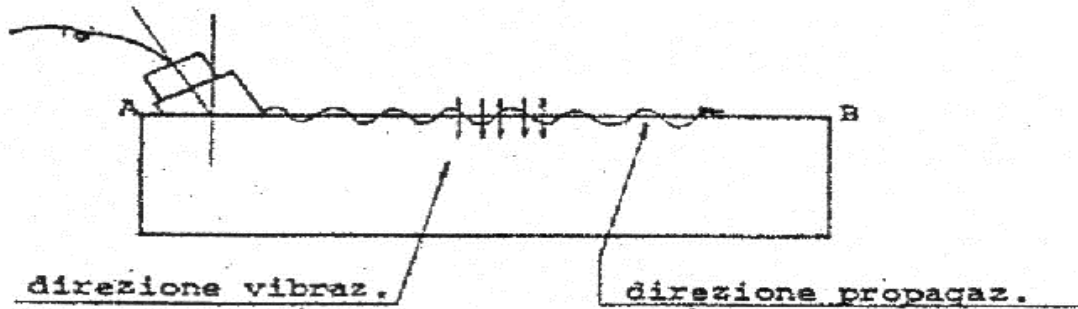


Fig. 3.5 – Onde Superficiali -

Per le onde superficiali la velocità di propagazione è data dalla seguente formula:

$$V_s = \left(\frac{0.87 + 1.12 \cdot \nu}{1 - \nu} \right) \sqrt{\frac{E}{2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)}} \quad [\text{m/s}] \quad [3.3.3.a]$$

N.B. Le velocità delle onde superficiali e delle onde trasversali sono legate dalla seguente relazione:

$$\frac{V_s}{V_T} = \left(\frac{0.87 + 1.12 \cdot \nu}{1 - \nu} \right) \quad [\text{adim}] \quad [3.3.3.b]$$

Nella tab. 3.2 sono riportati i valori del rapporto di cui sopra per alcuni materiali:

MATERIALE	VELOCITA' SUPERFICIALE V _s [m/s]	VELOCITA' TRASVERSALE V _T [m/s]	V _s /V _T
Acciaio	2790	3200	0,872
Alluminio	2790	3100	0,900
Ghisa	1980 - 2880	2200 - 3200	0,900
Nichel	2700	2990	0,903
Ottone	1950	2120	0,920
Rame	1930	2200	0,877
Zinco	2230	2480	0,899

Tab. 3.2 – Valori del rapporto V_s/V_T -

3.3.4 Onde di Lamb

Nei materiali di piccolo spessore si possono generare onde, denominate onde di Lamb, che interessano tutta la sezione del pezzo.

Anche se per un dato spessore si hanno infiniti modi di vibrare, esistono solo due forme fondamentali di onde di Lamb:

- *Onda di compressione simmetrica*
- *Onda di flessione asimmetrica*

L'ottenimento delle suddette forme, per un dato spessore del pezzo e per una data frequenza degli ultrasuoni, si ha variando l'angolo di rifrazione del fascio generato (Fig. 3.6)

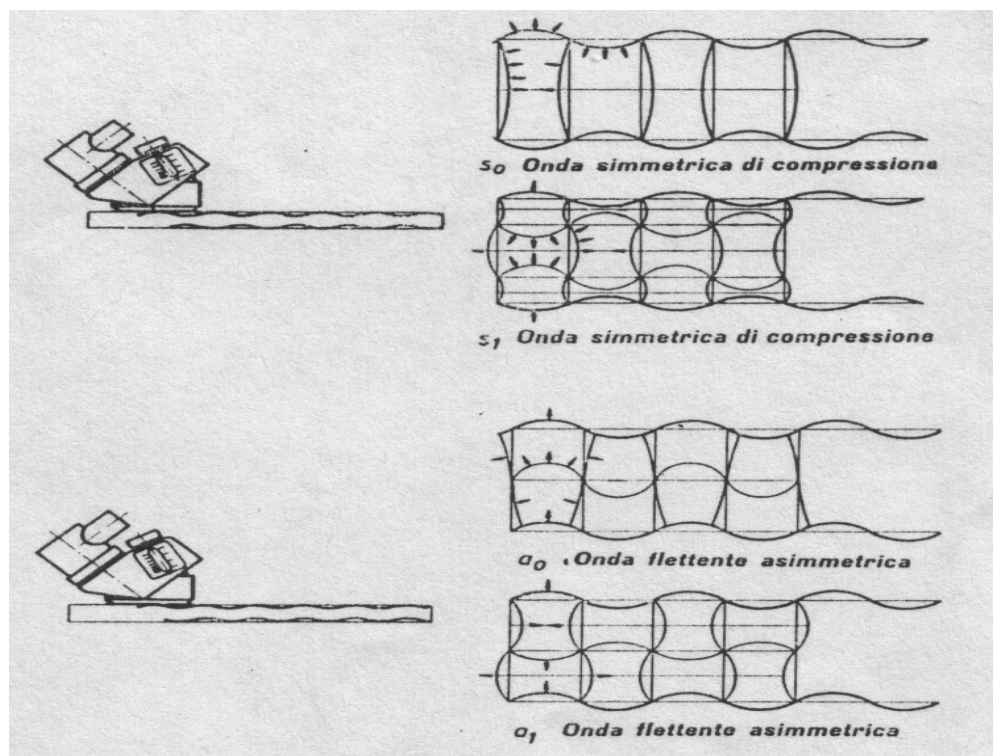


Fig. 3.6 – Onde di Lamb -

La vibrazione si propaga con una velocità di fase che dipende dal prodotto tra lo spessore del pezzo e la frequenza del fascio US, come riportato nella Fig. 3.7. La velocità associata ad ogni modo di vibrare (a_0 , a_1 , s_0 , s_1) è riportata in ordinate, mentre in ascisse si ha il prodotto frequenza – spessore.

In ordinate sono inoltre riportati gli angoli di rifrazione del fascio.

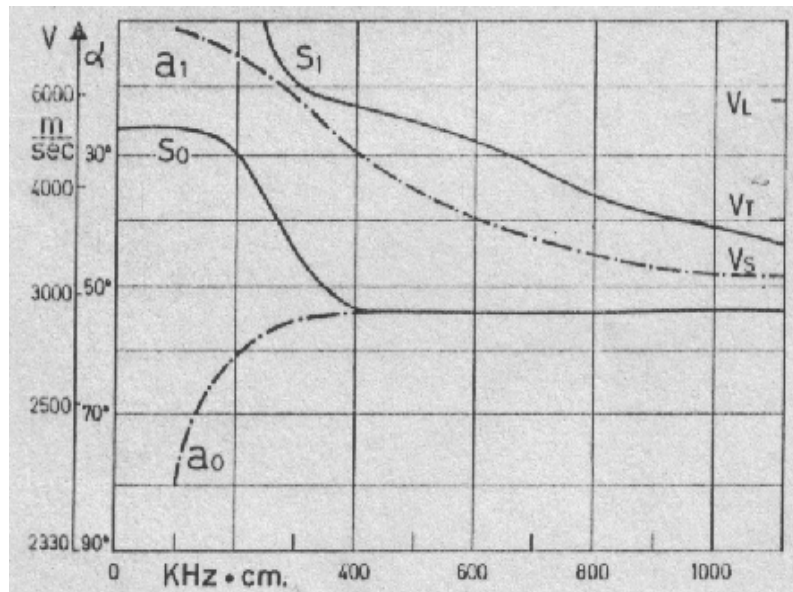


Fig. 3.7 – Diagramma delle velocità di fase-

3.3.5 Riflessione e trasmissione

Quando il fascio ultrasonoro incontra la superficie di separazione tra due mezzi ad impedenza acustica Z diversa, si ha il fenomeno della riflessione. Solo parte del fascio US viene trasmessa dal primo al secondo mezzo, mentre la parte restante viene riflessa. La parte riflessa di energia incidente (I) risulta uguale al prodotto ($r \cdot I$), dove r rappresenta il coefficiente di riflessione:

$$r = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 \quad [3.3.5.a]$$

in cui Z_1 e Z_2 sono le impedenze acustiche dei due mezzi.

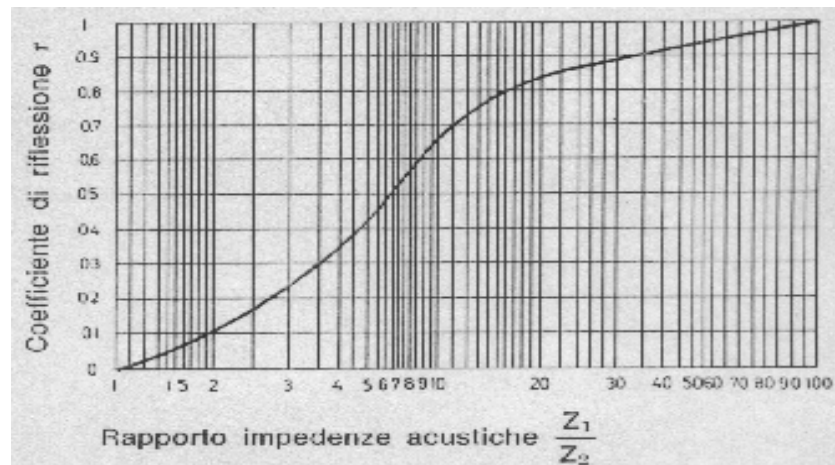


Fig. 3.8 – Coefficiente di riflessione in funzione del rapporto Z_1/Z_2 -

La restante parte di energia ($t \cdot I$) viene trasmessa nel secondo mezzo. Il coefficiente di trasmissione risulta:

$$t = \left(\frac{4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \right) \quad [3.3.5.b]$$

E' quindi evidente che r tende a zero se il rapporto (Z_1/Z_2) tende ad uno, mentre r tende ad uno se tale rapporto tende ad infinito. Inoltre, da un bilancio energetico, deve risultare:

$$r + t = 1 \quad [3.3.5.c]$$

3.3.6 Rifrazione

Quando un fascio US incide su di una superficie di separazione tra due mezzi con un angolo diverso da zero si ha la rifrazione della parte del fascio che si trasmette nel secondo mezzo (tranne nei casi di riflessione totale).

In tali condizioni, nel punto d'incidenza del fascio, si esercita una pressione F che può essere scomposta in una componente normale F_N , responsabile della generazione di

onde longitudinali, ed in una componente tangenziale F_H che determina la propagazione delle onde trasversali.

La legge di Snell, valida anche in ottica, permette di determinare la direzione del fascio nel secondo mezzo (Fig. 3.9):

$$\frac{\sin \vartheta_1}{V_1} = \frac{\sin \vartheta_2}{V_2} \quad [3.3.6.a]$$

- θ_1 = Angolo tra la normale alla superficie di separazione tra i due mezzi e la direzione del fascio US nel mezzo 1
- θ_2 = Angolo tra la normale alla superficie di separazione tra i due mezzi e la direzione del fascio US nel mezzo 2
- V_1 = Velocità di propagazione delle onde nel mezzo 1
- V_2 = Velocità di propagazione delle onde nel mezzo 2

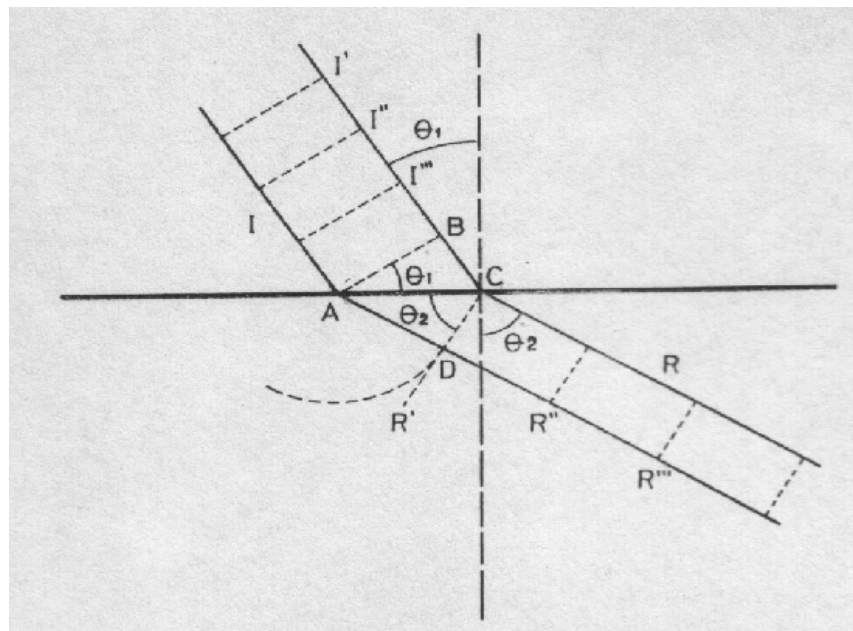


Fig. 3.9 – Rifrazione del fascio US – Legge di Snell -

Qualora i mezzi consentano la propagazione di onde sia longitudinali che trasversali, la legge di Snell assume la seguente forma:

$$\frac{\sin \vartheta_1'}{V_{1L}} = \frac{\sin \vartheta_1''}{V_{1T}} = \frac{\sin \vartheta_2'}{V_{2L}} = \frac{\sin \vartheta_2''}{V_{2T}} \quad [3.3.6.b]$$

Il primo pedice di V si riferisce al mezzo ed il secondo al tipo di onda. Il pedice di θ indica il mezzo. L'apice singolo indica l'angolo tra la normale alla superficie di separazione e la direzione del fascio longitudinale, mentre l'apice doppio indica l'angolo con la direzione trasversale del fascio. In tal caso si hanno onde longitudinali e trasversali riflesse nel primo mezzo (R_L e R_T) e trasmesse nel secondo (T_L e T_T), come mostrato nella fig. 3.10.

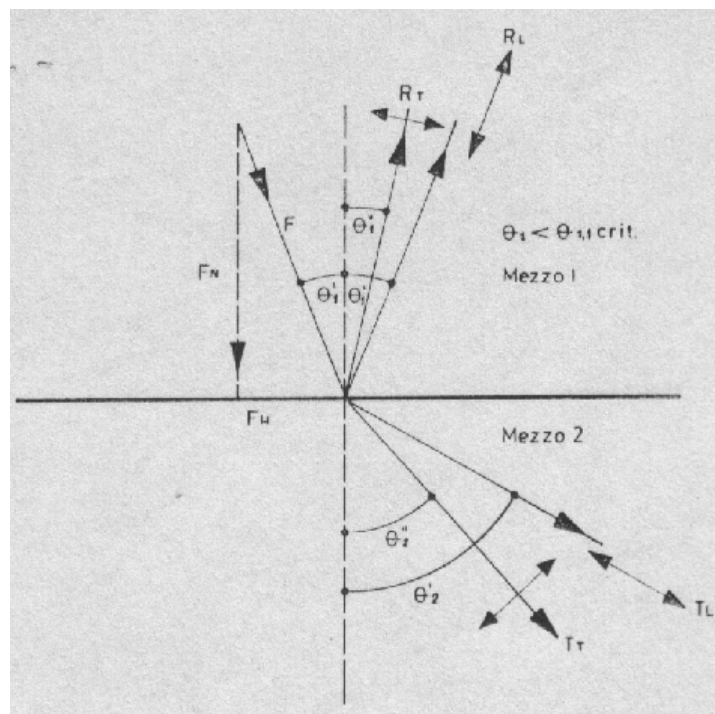


Fig. 3.10 – Rifrazione fascio US per incidenza minore del primo angolo critico -

Quando l'angolo d'incidenza θ_1 è uguale al 2° angolo critico, si ha la propagazione nel secondo mezzo delle sole onde superficiali, mentre per angoli d'incidenza superiori si ha la totale riflessione del fascio (Fig. 3.12).

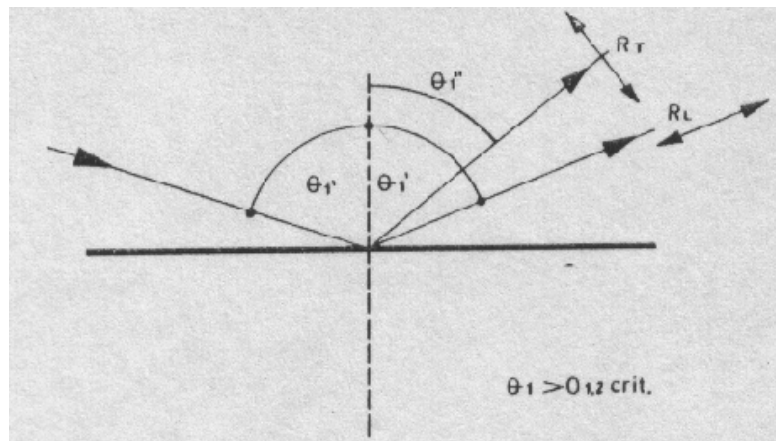


Fig. 3.12 – Rifrazione del fascio US per incidenze maggiori del 2° angolo critico -

3.4 Attenuazione delle onde ultrasonore nei materiali compositi

Il fenomeno dell'attenuazione delle onde US è legato all'eterogeneità dei materiali ed è di notevole importanza per lo studio e l'analisi di segnali US nei materiali compositi.

L'eterogeneità, dovuta principalmente alla natura del materiale, è legata anche alla presenza dei seguenti difetti:

- *Vuoti e porosità diffuse*
- *Sacche di gas*
- *Microcricche*
- *Delaminazioni*
- *Inclusione di corpi estranei*

Tali difettologie danno origine ad attenuazione del fascio US, la quale è sfruttata nei controlli non distruttivi ad ultrasuoni con tecnica in trasmissione proprio per rilevare la presenza dei difetti sopra citati.

L'attenuazione del fascio US può essere ricondotta a due fenomeni principali:

- *Assorbimento*
- *Diffusione*

In generale l'assorbimento è dovuto allo smorzamento del movimento molecolare ed alla successiva trasformazione dello stesso in calore. La diffusione è legata alle caratteristiche fisiche del materiale, in particolare alla più o meno marcata eterogeneità, ed agisce disperdendo il fascio US in più direzioni generando attenuazioni del fascio lungo l'asse di propagazione.

Quando un mezzo è formato da più componenti che presentano dimensioni confrontabili con la lunghezza d'onda del fascio US, l'energia delle onde di propagazione, incontrando una disomogeneità, viene dispersa in tutte le direzioni, riducendosi sempre di più lungo il cammino, prima di essere captata dalla sonda ricevente. Nei materiali compositi le fibre, in relazione al loro diametro, sono fonte di notevole attenuazione del fascio US, ma non ne sono l'unica causa.

Per misurare l'attenuazione si utilizza una scala in decibel (dB), definita dalla seguente relazione:

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad [3.4.a]$$

in cui I_1 e I_2 rappresentano le intensità del segnale rispettivamente prima e dopo l'attenuazione.

Nel caso di utilizzo degli ultrasuoni per le indagini sui materiali compositi, occorre evidenziare una relazione molto importante, che lega l'attenuazione alla frequenza del fascio US. Questa relazione verrà scritta sia per l'assorbimento che per la diffusione.

Nell'assorbimento la dipendenza tra i due parametri è legata alla velocità di oscillazione, crescente con la frequenza. Nella diffusione, al crescere della frequenza, aumenta l'interazione del fascio US sia con i fasci di fibre sia con le lamine del laminato, generando una dispersione del fascio stesso.

3.4.1 Assorbimento

L'assorbimento è legato principalmente alle caratteristiche termoelastiche e di isteresi del mezzo in cui avviene la propagazione. La viscosità e la conduzione del calore possono produrre effetti negativi sulla trasmissione dell'energia, poiché legate al movimento delle particelle nel materiale.

Quando un'onda US si propaga in un mezzo, le particelle tendono a scorrere relativamente tra loro per permettere il passaggio dell'onda, ma il movimento viene ostacolato dalla viscosità, che porta alla trasformazione di parte dell'energia associata alle particelle in calore.

I modelli per il calcolo dell'assorbimento per materiali omogenei ed isotropi sono diversi dai modelli per i materiali non omogenei ed anisotropi. Alla prima categoria appartengono i metalli, le materie plastiche omogenee ed i fluidi di accoppiamento. Alla seconda categoria appartengono i materiali compositi. Anche se, per particolari frequenze del fascio (2÷10 Mhz), tali materiali possono apparire omogenei, essi comunque conservano un modello di assorbimento diverso, dettato dalla seguente formula e rappresentato in Fig. 3.13:

$$I_x = I_0 \cdot e^{-\alpha(f)x} \quad [3.4.1.a]$$

I_x e I_0 rappresentano rispettivamente l'intensità del fascio US in funzione dello spessore x e l'intensità del fascio US all'ingresso del pezzo, mentre $\alpha(f)$ rappresenta un coefficiente d'attenuazione, funzione del materiale, dato dalla seguente formula:

$$\alpha(f) = \frac{(2\pi f)^2}{2\rho_0 c_0^2} \cdot \left(\chi + 2\eta + \frac{\lambda^a - \lambda^i}{\lambda^a + 2\eta} \cdot \frac{k}{C_p} \right) \quad [3.4.1.b]$$

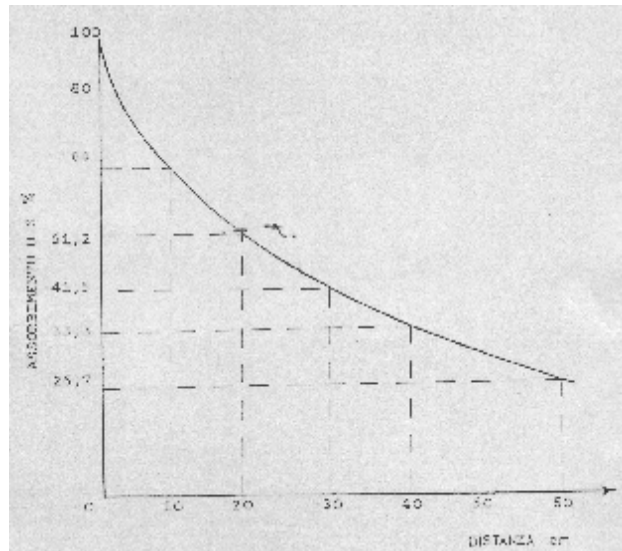


Fig. 3.13 – Curva di assorbimento percentuale in funzione della distanza x –

Dove f è la frequenza del trasduttore, ρ_0 è la densità del provino, c_0 la velocità di propagazione nel provino, quando f tende a zero, χ e η le viscosità per compressione e taglio, λ_a e λ_i le costanti adiabatica ed isoterma di Lamé, C_p il calore specifico a pressione costante e k il coefficiente di conduttività termica. Dal momento che tali parametri dipendono dalla temperatura, si conclude che anche il coefficiente d'attenuazione dipende da quest'ultima.

3.4.2 Diffusione

Il fenomeno della diffusione, detto anche “*scattering*”, è legato alle dimensioni dei difetti ed alla velocità del fascio US, la quale dipende a sua volta dalla frequenza dello stesso. La diffusione si verifica per la differenza di impedenza acustica tra i due mezzi, in prossimità dell'interfaccia tra difetto e materiale (Fig. 3.14).

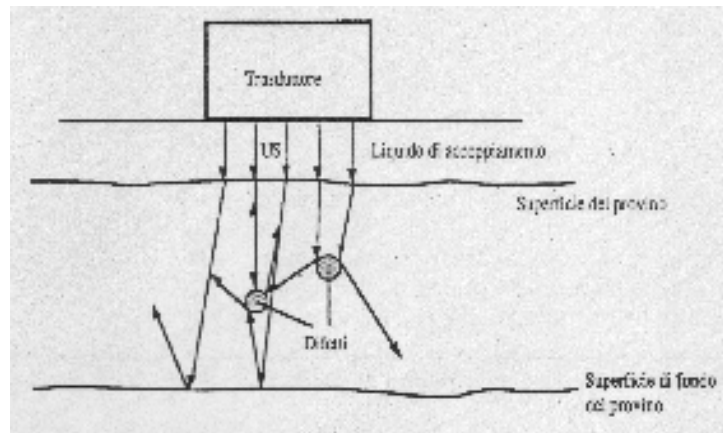


Fig. 3.14 – Fenomeno di diffusione –

Se le dimensioni dei difetti sono rilevanti, la diffusione è legata al fenomeno di rifrazione, poiché gran parte del fascio, che incide sulla superficie della disomogeneità, viene riflessa.

Per dimensioni comparabili alla lunghezza d'onda US, occorre considerare anche il fenomeno della diffrazione.

La presenza di discontinuità può essere sia occasionale, come per le porosità (in tal caso si ha una superficie di separazione tra materiale e sacca di gas), sia insita nel materiale, come avviene nei materiali compositi in cui esistono numerose superfici di separazione tra matrice e fibra.

I materiali compositi con diametro delle fibre attorno ai $10\ \mu\text{m}$, nonostante la presenza delle due fasi matrice e fibra, tendono a comportarsi come materiali omogenei per gli ultrasuoni quando la frequenza di questi è inferiore ai 15 Mhz, con velocità di propagazione nel composito intorno ai 3000 m/s.

Si possono distinguere due tipologie di scattering:

- *Scattering singolo*
- *Scattering multiplo*

Lo scattering singolo è valido per piccoli volumi di porosità e comporta che il fascio US sia diffuso una sola volta nel percorso interno al provino, considerando le inclusioni elastiche ed isotrope con distribuzione casuale nel materiale.

In tal caso la velocità di propagazione V e l'attenuazione α possono essere espresse dal numero complesso ($\beta = \omega/V + i\alpha$), che compare nella seguente relazione:

$$\left(\frac{\beta}{K_1}\right)^2 = 1 + \frac{4\pi n_0}{K_1^2} f(0) \quad [3.4.2.a]$$

in cui ($K_1 = \omega/V_L$) rappresenta il numero d'onda longitudinale, ($\omega = 2\pi f$) è la frequenza circolare della sorgente ultrasonora, V_L è la velocità di propagazione longitudinale, n_0 il numero di inclusioni per unità di volume nel materiale e $f(0)$ l'ampiezza di scattering.

Nello scattering singolo la misura dell'energia riflessa permette di determinare la dimensione, l'estensione ed il posizionamento nello spessore del difetto.

Nello scattering multiplo il volume delle porosità è più elevato.

Il fascio US può essere diffuso più volte durante l'attraversamento del provino, con inclusioni elastiche ed isotrope a distribuzione casuale nel materiale.

In tal caso, la relazione [3.4.2.a], assume una forma più complicata, ma non è descritta in quanto risulta remoto il verificarsi di uno scattering multiplo.

Nello scattering multiplo non è più possibile determinare dimensione, estensione e posizione delle discontinuità, mentre si riesce solo ad evidenziare la presenza o meno di discontinuità, fornendo quindi una misura solo qualitativa.

3.5 Generazione delle onde ultrasonore

3.5.1 Principi fisici

Le sonde ultrasonore sono trasduttori in grado di trasformare segnali elettrici in oscillazioni meccaniche e viceversa.

I principi fisici alla base della costruzione delle sonde US sono la piezoelettricità, la ferroelettricità e la fotoacustica.

- *Piezoelettricità.*

E' un fenomeno caratteristico di alcuni cristalli, detti cristalli piezoelettrici PZT (tab. 3.3), che, sottoposti a forze di trazione o compressione in un'opportuna direzione rispetto agli assi cristallografici, producono delle cariche sulle facce caricate (Fig. 3.15). L'energia meccanica trasferita al cristallo attraverso l'azione di deformazione viene così trasformata in parte in energia elettrica.

Tale fenomeno è del tutto reversibile, in quanto applicando alle facce del cristallo una tensione elettrica, si produce una deformazione, dando origine alla trasformazione energetica inversa.

La frequenza d'oscillazione è una caratteristica del cristallo; tuttavia è possibile ottenere una variazione della frequenza agendo sullo spessore del cristallo.

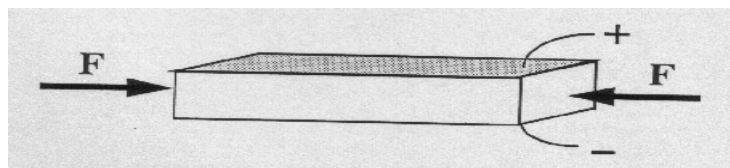


Fig. 3.15 – Trasduttore eccitato meccanicamente -

- *Ferroelettricità.*

E' un fenomeno del tutto simile alla piezoelettricità. I materiali sono ferroelettrici o piezoceramici.

Per ottenere un materiale piezoceramico, si parte da piastrine di materiali ceramici polarizzate mediante tensione elettrica continua. Questi materiali, se sottoposti ad un campo elettrico, vibrano meccanicamente con la frequenza propria dovuta alle caratteristiche fisiche ed allo spessore della piastrina iniziale.

Anche per questo tipo di materiali il fenomeno è assolutamente reversibile.

La trasformazione da energia elettrica in energia meccanica è sfruttata nelle sonde per l'emissione del fascio US, mentre il fenomeno inverso viene utilizzato per la ricezione del segnale US.

Il segnale inviato e successivamente ricevuto dalla sonda deve essere elaborato in modo opportuno, affinché possa essere utilmente trasformato in vibrazione nella fase di emissione e compiutamente interpretato nella fase di ricezione.

A tale scopo si rende necessaria una particolare attrezzatura elettronica per la gestione ed il funzionamento della sonda.

- *Fotoacustica.*

La fotoacustica si basa sulla generazione di onde acustiche tramite eccitazione del trasduttore con sorgenti laser.

Si rende pertanto necessario un cablaggio a fibre ottiche. Queste ultime assolvono alla duplice funzione di guida del fascio laser e di vincolo per l'onda meccanica.

I trasduttori fotoacustici sono utilizzati per la diagnostica ad US. Presentano ottime caratteristiche (elevata frequenza ed elevata larghezza di banda), che in termini ultrasonici si traducono in elevata risoluzione spaziale.

E' dimostrato inoltre che parametri come la frequenza e la larghezza di banda dipendono dalla durata dell'impulso laser.

Una caratteristica peculiare dei sensori fotoacustici è l'elevata efficienza rispetto ai trasduttori ultrasonici di tipo piezoelettrico. L'intensità ultrasonica emessa dal sensore fotoacustico è indipendente dalla frequenza, mentre nei trasduttori piezoelettrici diminuisce fortemente all'aumentare della frequenza.

Da ciò si può capire come il sensore fotoacustico sia molto competitivo per frequenze superiori a qualche Mhz.

Questo tipo di sensore è miniaturizzabile, e permette la misura su volumi estremamente ridotti. Inoltre consente il collegamento con strumentazioni più stabili e precise dotate di minori disturbi.

Dal momento che necessita di apposito cablaggio in fibra ottica, questo tipo di sonda non è adattabile alla strumentazione prevista per le sonde piezoelettriche e piezoceramiche.

In conclusione i cristalli piezoelettrici al quarzo sono usati per generare frequenze superiori ai 10 Mhz. Per frequenze inferiori si usano materiali piezoceramici, come il Titanato di Bario.

Essi sfruttano la proprietà di comportarsi analogamente al quarzo, quando questo è sottoposto ad una tensione costante di prepolarizzazione e ad una temperatura maggiore a quella di Curie, per poi essere raffreddato al di sotto della stessa, mantenendo il campo elettrico.

Materiale	Tipologia	Temp. Curie °C	Densità ρ [Kg/dm ³]*10 ³	Impedenza acustica Z [g/m ² /s]*10 ²	Velocità [m/s]	Frequenza (1 mm di spessore) [MHz]
Quarzo	Piezoelettrico	575	2,65	15,3	5760	2,88
Solfato di Litio	Piezoelettrico	75	2,06	11,2	4720	2,36
Titanato di Bario	Piezoceramico	120	5,7	35	4400	2,2
Niobato di Piombo	Piezoceramico	550	5,8	16	2800	1,4
Zirconato di Piombo	Piezoceramico	350	7,6	28	3000	1,8

Tab. 3.3 – Caratteristiche dei materiali Piezoelettrici e Piezoceramici -

3.5.2 Tipologia costruttiva

Le sonde per indagine ultrasonora possono essere di vario tipo e vengono classificate in base a vari criteri.

La prima distinzione riguarda il tipo di impiego. Si hanno così sonde a contatto e sonde per immersione. Una seconda distinzione è in funzione dell'angolo di emissione, ovvero dell'inclinazione del cristallo emettitore rispetto alla superficie del provino da ispezionare. Si distinguono le sonde diritte, in cui il cristallo è parallelo a tale superficie, e le sonde angolate, a loro volta suddivise in sonde ad angolo fisso o variabile. Le sonde diritte, date le loro caratteristiche, sono utilizzate per generare e rilevare onde ultrasonore con propagazione longitudinale.

Un'ulteriore classificazione tiene conto della costruzione dell'emettitore, ovvero della forma del fascio US emesso dalla sonda. Si hanno le sonde piane, in cui il fascio US è pressoché cilindrico per un certo tratto, e le sonde focalizzate, in cui il cristallo è opportunamente conformato in modo da far convergere il fascio in punto ben preciso detto fuoco. Nelle sonde focalizzate l'emettitore deve essere caratterizzato da una certa curvatura, in modo da ottenere un fascio US concentrato su di un volume limitato (macchia focale) ad una distanza fissata.

Tali sonde possono essere costruite in due modi: a lente sferica con focalizzazione su di un punto e a lente cilindrica con focalizzazione su di una linea.

Nelle sonde piane, invece, l'emettitore ha una superficie piana. In tal caso la propagazione del fascio è scomponibile in due campi: *campo prossimo*, con propagazione cilindrica fino alla distanza focale, e *campo lontano*, con propagazione troncoconica divergente oltre tale distanza.

Esistono inoltre una serie di parametri che definiscono le caratteristiche meccaniche delle sonde e del loro campo d'impiego. Tali parametri sono:

- *Resistenza all'usura M e massima usura tollerata M_z*
- *Pressione puntiforme massima P*
- *Temperatura ammessa T_a e temperatura ammessa per tempi brevi T_{3sec}*

La resistenza all'usura [mm/km] è il rapporto tra lo spessore della protezione asportato e la distanza percorsa dalla sonda. Nelle sonde diritte con protezione ceramica questo rapporto è molto piccolo, mentre nelle sonde angolate, con protezione in plexiglas, il parametro M è maggiore. Il parametro M_z [mm] è molto piccolo per le protezioni ceramiche, mentre in quelle di plexiglas è tollerata una maggiore usura. In queste ultime è inoltre possibile ripristinare lo spessore originale, incollando sullo zoccolo della sonda una soletta di pari materiale.

La pressione P rappresenta il carico massimo che la sonda può sopportare su di un punto, senza danneggiarsi.

In breve, la resistenza all'usura M e la pressione massima P sono parametri che devono caratterizzare sonde per le quali è previsto un impiego per contatto.

Per le sonde operanti a distanza, con interposizione di un fluido d'accoppiamento, i parametri sopra descritti sono di scarsa rilevanza. Assume invece importanza fondamentale l'interazione termica del materiale e degli isolamenti con il fluido.

I parametri che caratterizzano la resistenza alla temperatura sono motivati da due fattori principali:

- *Resistenza del cristallo alla temperatura.*

Infatti il cristallo non manifesta apprezzabili variazioni delle proprietà piezoelettriche fino a temperature attorno ai $70 \div 80$ °C.

- *Resistenza del materiale della sonda alla temperatura e tecniche costruttive.*

Il plexiglas ha una temperatura di prima deformazione attorno ai $75 \div 85$ °C, pertanto gli incollaggi e i materiali isolanti possono rappresentare un limite per le alte temperature.

Il valore di T_a rappresenta un valore dipendente da materiali e tecniche che accomunano tutte le sonde, mentre il valore di T_{3sec} è caratteristico di ogni tipologia di sonda. Infatti, sonde diritte, con protezioni di limitato spessore e conduttrici di calore, presentano un valore di T_{3sec} minore rispetto a sonde con protezioni di spessore più elevato realizzate con materiali non conduttori di calore.

3.5.3 Caratteristiche del fascio US

La geometria del campo d'irraggiamento varia in funzione della geometria della sorgente acustica (dimensioni del trasduttore e tipo di sonda). Nel caso di sorgente puntiforme, la geometria di propagazione è sferica. Nel caso di dimensioni infinite, la propagazione è piana.

Di seguito sono riportate le caratteristiche del fascio US per sonde piane e focalizzate.

3.5.3.1 Sonde piane

Poiché il trasduttore ha dimensioni finite, si possono individuare due distinte regioni di propagazione, separate da un piano detto fuoco naturale e posto ad una distanza N dalla superficie del trasduttore:

$$N = \frac{d^2}{4\lambda} \quad [3.5.3.a]$$

in cui d è il diametro del trasduttore e λ la lunghezza d'onda del fascio.

Tali regioni (Fig. 3.16) prendono il nome di:

- *Zona di campo prossimo o zona di Fresnel.*

In essa il fascio US ha forma cilindrica e si estende dalla superficie del trasduttore fino alla distanza N sopra descritta.

Il cristallo piezoelettrico può essere considerato, nella formazione del fascio US, come un insieme di numerosi cristalli elementari, ciascuno dei quali fornisce il proprio contributo.

Il valore della pressione, associata al fascio US, è regolata dal principio di Huygens, secondo il quale si può considerare il fascio completamente formato dopo la

distanza N. Da ciò si comprende come tale zona sia inadatta ad essere usata nel controllo ad ultrasuoni.

- *Zona di campo lontano o zona di Fraunhofer*

In essa il fascio US assume una forma troncoconica divergente, con angolo di semiapertura β , dato dalla relazione:

$$\sin\beta = 1,22 \cdot \left(\frac{\lambda}{d}\right) \quad [3.5.3.b]$$

All'aumentare dell'apertura del cono e quindi della distanza dalla superficie della sonda, le pressioni sono sempre più contenute, ma in ciascuna sezione hanno un andamento regolare, con un massimo in corrispondenza dell'asse meccanico del trasduttore.

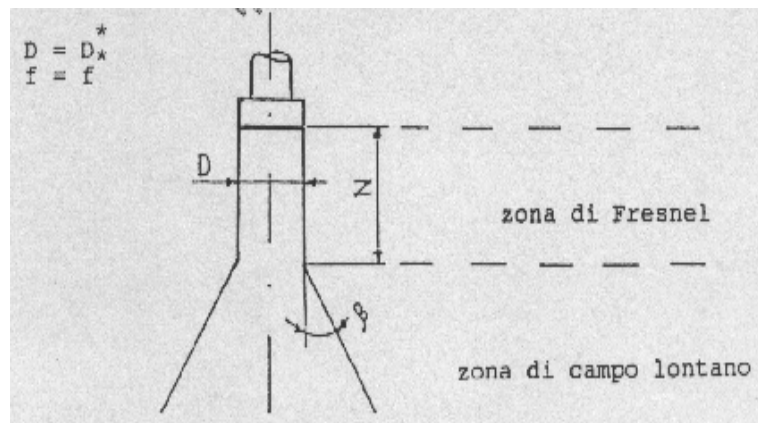


Fig. 3.16 – Geometria di propagazione degli ultrasuoni -

L'apertura della zona conica del fascio US riveste particolare importanza nei controlli non distruttivi ultrasonori.

Dalle precedenti formule si nota come, a parità di tutte le altre grandezze, l'aumento della frequenza o del diametro del trasduttore riduce tale apertura (Fig. 3.17).

In conclusione la geometria di propagazione ultrasonora nei materiali dipende essenzialmente dalle dimensioni del trasduttore e dalla lunghezza d'onda.

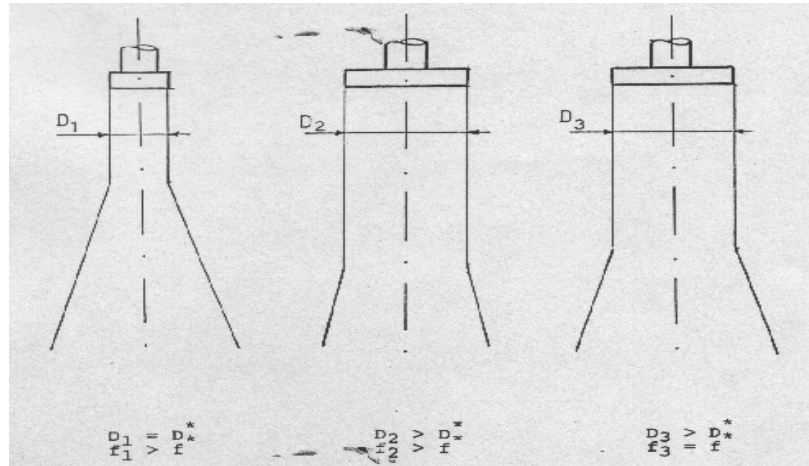


Fig. 3.17 – Influenza del diametro e della frequenza della sonda sulla geometria di propagazione degli ultrasuoni –

In ultima analisi si mostra un diagramma (Fig. 3.18) nel quale l'apertura del fascio US è funzione contemporaneamente della frequenza e del diametro del trasduttore.

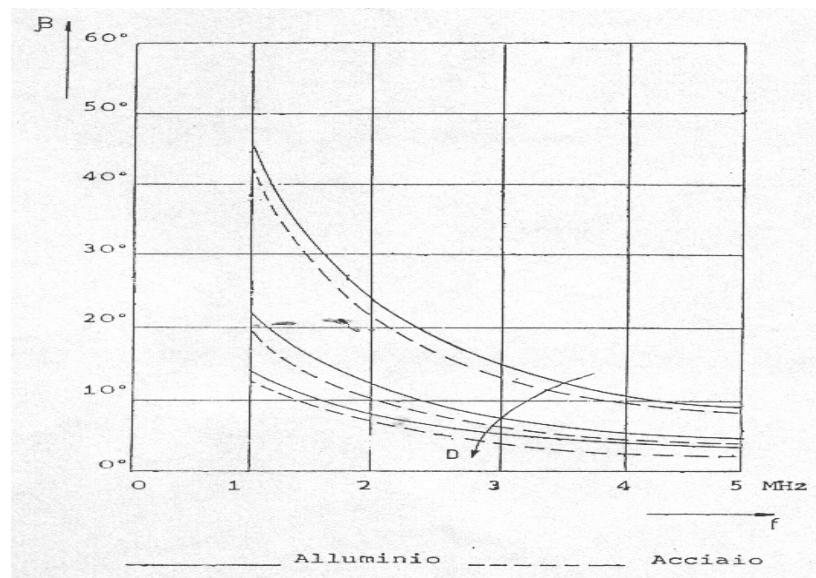


Fig. 3.18 – Apertura del fascio US in funzione della frequenza e del diametro del trasduttore –

3.5.3.2 Sonde focalizzate

Per sonda focalizzata s'intende una sonda con cristallo singolo, concepita in modo da concentrare l'energia emessa in una zona limitata.

La concentrazione d'energia è tale che, nella zona focale, sussiste una spiccata risoluzione laterale, dovuta al fatto che la larghezza del fascio è notevolmente ridotta.

Ne consegue una particolare sensibilità ai piccoli difetti.

Tale focalizzazione rende possibile l'esame a strati del materiale (Slicing) avendo cura di modificare la focale, compatibilmente alla profondità da esplorare.

A seconda delle esigenze del controllo, può essere richiesta una focalizzazione su di una linea (lente cilindrica) o su di un punto (lente sferica).

I parametri caratterizzanti le sonde focalizzate sono:

- *Distanza focale F*

E' la distanza tra la superficie dell'emettitore ed il punto focale, espressa in mm di acqua.

Nel caso di lente sferica la distanza focale F è legata al raggio R della lente dalla relazione:

$$F = R \cdot \frac{n}{n - 1}$$

In cui n è l'indice di rifrazione, rispetto all'acqua, del materiale costituente la lente, ovvero il rapporto tra la velocità ultrasonora del materiale costituente la lente e la velocità ultrasonora nell'acqua:

$$n = \frac{V_{lente}}{V_{acqua}}$$

Quella appena ricavata è la distanza focale in acqua, mentre interessa la distanza focale effettiva, considerando che parte della propagazione ultrasonora avviene in acqua e parte nel materiale del provino. Il valore corretto di F, ovvero F_{eff} , si ricava

dalla seguente formula, nota la distanza d tra la superficie dell'emettitore e la superficie in acqua del provino:

$$F_{eff} = \left[(F_{acqua} - d) \cdot \frac{V_{acqua}}{V_{provino}} \right] + d$$

- *Coefficiente di focalizzazione f*

E' il rapporto tra la distanza focale F e l'entità del campo prossimo N .

Il regime di focalizzazione è tanto più accentuato quanto più piccolo è il valore di f .

Al tendere di f a uno, il regime di focalizzazione scompare.

La focalizzazione è dunque possibile solo se il valore di N è superiore a quello di distanza focale da instaurare.

- *Profondità della macchia focale l*

Rappresenta l'entità della zona focale, valutata lungo l'asse acustico. Il suo valore in acqua, a -6 dB, è dato dalla seguente relazione:

$$l = 4\lambda \frac{F^2}{D^2}$$

Qualora la focalizzazione avvenga in un mezzo diverso dall'acqua, la lunghezza effettiva è data dalla seguente relazione:

$$l_{eff} = l \frac{V_{acqua}}{V_{mezzo}}$$

- *Apertura della macchia focale m_f*

E' la lunghezza della macchia in direzione perpendicolare all'asse acustico, valutata in acqua a -6 dB, ed è data dalla seguente relazione:

$$m_f = \lambda \frac{F}{D}$$

Nelle figure 3.19.a e 3.19.b sono rappresentati i parametri della macchia focale in acqua e in un mezzo diverso dall'acqua:

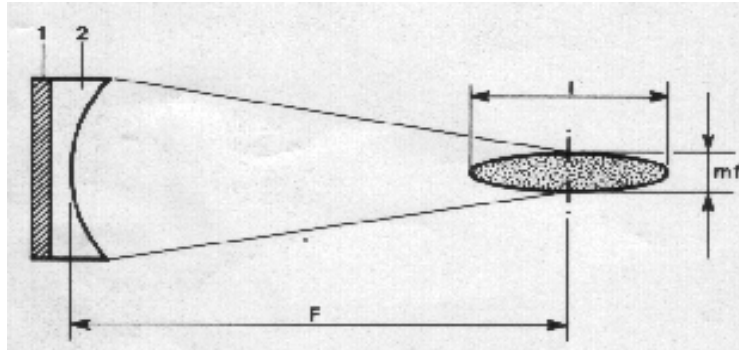


Fig. 3.19.a – Parametri della macchia focale in acqua –

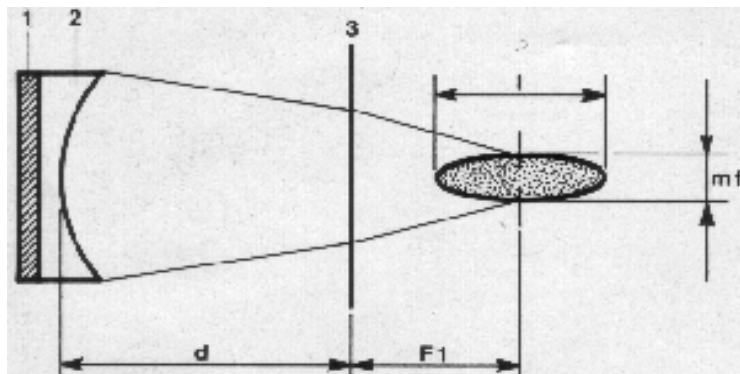


Fig. 3.19.b – Parametri della macchia focale nel materiale -

Dove con 1 si è indicato il cristallo e con 2 la lente concava della sonda focalizzata, mentre con 3 si è indicata l'interfaccia acqua-materiale.

Nel materiale sia la distanza focale che la dimensione l subiscono una contrazione imposta dal rapporto fra la velocità US nel materiale e la velocità US in acqua. La dimensione mf rimane invece inalterata.

Con d si è indicata la distanza tra sonda e interfaccia acqua-materiale e con F_1 la distanza focale nel materiale, data dalla relazione:

$$F_1 = (F - d) \frac{V_{acqua}}{V_{provino}}$$

3.5.4 Parametri qualitativi delle sonde US

Si definiscono due parametri fondamentali che caratterizzano la qualità della costruzione delle sonde, oltreché della costruzione dei supporti e delle attrezzature predisposte ad accogliere e movimentare le sonde stesse:

- *Angolo di Squint σ*

E' l'eventuale angolo compreso tra l'asse geometrico e l'asse di propagazione ultrasonoro. Nel caso di trasduttori piani, tale angolo deve essere nullo o al più trascurabile, mentre nei trasduttori angolati non deve superare il mezzo grado, pena l'impossibilità di localizzare con la sufficiente precisione il difetto.

La presenza di un angolo σ provoca uno spostamento della macchia, proporzionale alla distanza tra la stessa e l'emettitore.

- *Disassamento z*

E' lo spostamento laterale dell'emettitore rispetto al suo involucro. I limiti sono fissati in funzione del diametro dell'emettitore.

Il valore massimo di z cresce al crescere del diametro d . Il disassamento è un difetto meno grave rispetto all'angolo di Squint, in quanto provoca uno spostamento laterale costante della macchia al variare della distanza tra la stessa e l'emettitore.

3.6 Tecniche di controllo US

3.6.1 Tecnica pulse-echo

La tecnica per riflessione, detta "*pulse-echo*", basa il proprio funzionamento sulla proprietà di riflessione del fascio US, prodotta dalle superfici di discontinuità.

Con questa metodologia si utilizza un'unica sonda funzionante sia da trasmettente sia da ricevente (Fig. 3.20):

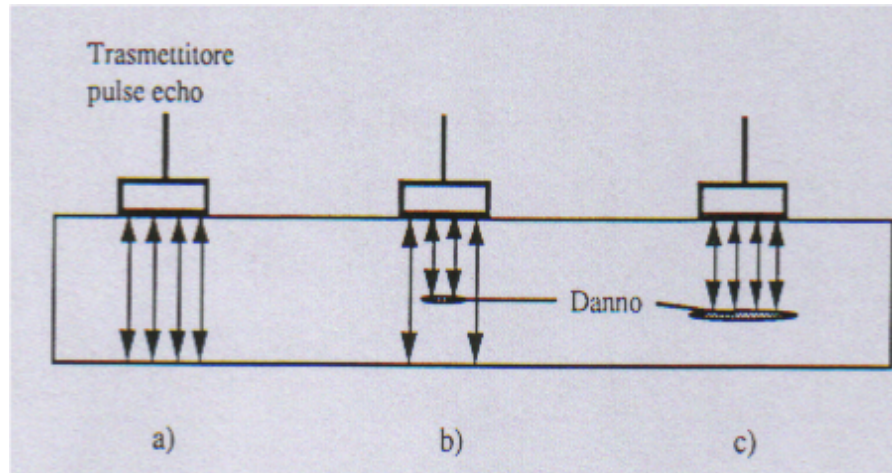


Fig. 3.20 – Tecnica pulse-echo –

Disponendo di un'unica sonda, il trasduttore non è in grado di ricevere il segnale riflesso dal provino fino a quando la trasmissione dell'impulso iniziale non è terminata. Questo, di fatto, genera un intervallo di tempo ΔT tra trasmissione e ricezione.

Il trasduttore è posto perpendicolarmente rispetto alla superficie del provino. L'onda US penetra nel provino ed è riflessa in parte o totalmente, tornando così al punto di emissione dopo il ΔT , il quale dipenderà dalla velocità di propagazione del fascio US e dalla distanza tra la sonda ed il provino stesso.

Gli echi significativi sono quelli dovuti all'incontro dell'onda US con la superficie frontale del provino (front echo) e con quella del fondo del provino (back echo).

Se il materiale presenta dei difetti tra questi due echi (Fig. 3.20.b e 3.20.c), si hanno ulteriori echi intermedi, che ne indicano appunto l'esistenza e, in base al ritardo temporale rispetto all'echo frontale, anche la posizione nello spessore.

La distanza temporale tra echo frontale ed echo di fondo, nota la velocità di propagazione del fascio US nel provino, permette di calcolare lo spessore del pezzo.

La tecnica che utilizza un'unica sonda necessita di un fascio US ad impulsi, per evitare che vi sia sovrapposizione tra fase emittente e fase ricevente.

La non coincidenza tra queste due fasi è responsabile di una zona, lungo l'asse del fascio US, in cui non è possibile effettuare nessun controllo. Tale zona prende il nome di "zona morta".

Nelle misure di spessore con sonda singola si sfrutta il fenomeno degli echi multipli, descritto più avanti, per ridurre il margine di errore dovuto alla misura del tempo tra i due echi. Secondo il tipo di controllo che si deve effettuare, è inoltre possibile operare con più sonde.

Si possono avere due sonde diritte e affiancate, in cui la prima funziona da emettitore e la seconda da ricevitore. Questa tecnica permette di evidenziare i difetti sotto pelle e non presenta alcuna zona morta.

E' possibile poi sfruttare due sonde angolate, poste sullo stesso lato del pezzo, con caratteristiche emittenti e riceventi identiche al precedente caso. Questa è una tecnica molto utile per evidenziare difetti sovrapposti, oppure con superficie di discontinuità normale alla superficie del provino.

Nelle tecniche pulse-echo descritte è sempre necessario un buon allineamento delle sonde. In particolare occorre che l'asse di emissione, nel caso di onda singola, sia parallelo alla superficie di separazione fluido – provino.

Si analizzano due particolari parametri:

- *Ritmo delle ripetizioni*

Rappresenta il numero di impulsi US nell'unità di tempo. La scelta del ritmo delle ripetizioni va effettuata in base ai seguenti fattori:

- Tempo che intercorre tra l'inizio dell'emissione e la fine della ricezione di un singolo impulso. Esso comprende due volte il tempo impiegato per attraversare il fluido di accoppiamento più due volte il tempo impiegato ad attraversare lo spessore del provino, nonché la durata dell'impulso stesso.
- Tempo necessario ad evitare il disturbo di echi multipli dell'impulso precedente. Pertanto, ogni impianto ed ogni analisi necessita di prove per ottimizzare il tempo da interporre tra un impulso ed il successivo.

- *Zona morta*

E' la porzione del fascio US adiacente alla superficie di emissione del trasduttore, in cui la presenza di eventuali imperfezioni non può essere rilevata, poiché la sonda non può ricevere fino al termine della trasmissione.

L'estensione della zona morta dipende dalla velocità di propagazione nel mezzo e dalla durata dell'impulso.

Siccome il fascio US effettua lo stesso percorso due volte, l'entità della zona morta (espressa in termini di spessore) è data dalla seguente relazione, in cui V è la velocità di propagazione nel mezzo del fascio US e T la durata dell'impulso:

$$s = \frac{(V \cdot T)}{2} \quad [\text{mm}] \quad [3.6.1.a]$$

3.6.2 Tecnica per trasmissione o trasparenza

Questa tecnica sfrutta l'attenuazione per riflessione, assorbimento o diffusione del fascio US dovuta ai difetti. Vengono a tal proposito utilizzate due sonde contrapposte, aventi lo stesso asse ultrasonoro, ed un provino collocato tra le due sonde, le cui superfici sono parallele tra loro e perpendicolari al fascio (Fig. 3.21).

E' importante mantenere le due sonde sull'asse ultrasonoro. Tale tecnica è molto sfruttata nei controlli ad immersione in quanto consente di ottenere un accoppiamento stabile.

Dal momento che si utilizzano due sonde, una emittente e l'altra ricevente, può essere usata un'emissione del fascio ad impulsi oppure continua. Anche in questo caso la scelta va effettuata in base al disturbo introdotto dagli echi multipli.

I vantaggi della presente tecnica, rispetto a quella per riflessione, sono essenzialmente legati ad una maggior penetrazione nel materiale, in quanto il fascio US deve attraversare il provino una sola volta, prestandosi in modo efficace in provini ad alta attenuazione (come i materiali refrattari, le materie plastiche ed il legno) e di grande spessore.

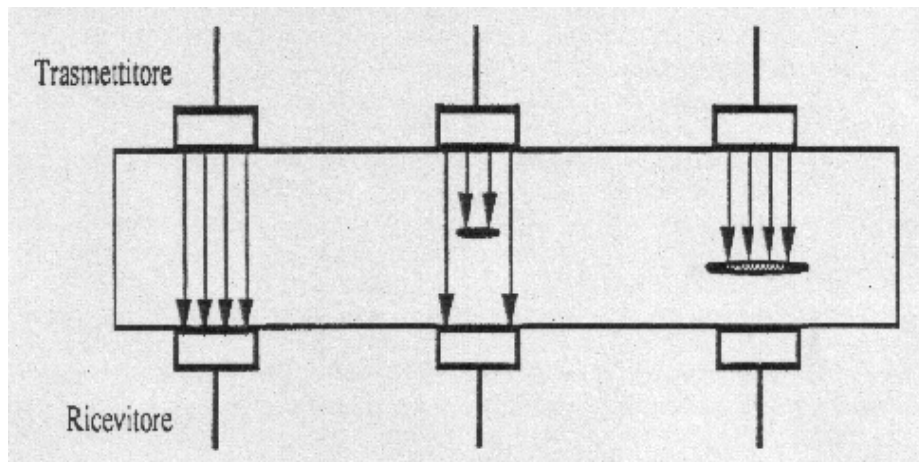


Fig. 3.21 – Tecnica per trasmissione o trasparenza –

Per contro sussistono alcuni svantaggi rispetto alla tecnica pulse-echo:

- *Non fornisce informazioni sulla profondità dei difetti e quindi non è possibile stabilire se un determinato segnale è imputabile ad una sola discontinuità oppure a più discontinuità sovrapposte.*
- *Il rapporto tra il segnale generato dal difetto ed il segnale dovuto ad echi spuri è più basso.*

Nella Fig. 3.22 sono rappresentati due tipologie di controlli US effettuati dapprima su di un provino esente da difetti (a) e poi su di un provino difettoso (b).

Una particolare configurazione della tecnica per trasparenza prevede l'uso di una singola sonda, accoppiata ad un riflettore piano.

In tal caso il fascio US emesso raggiunge il pezzo ed una sua parte viene riflessa. La parte trasmessa attraversa il fluido di accoppiamento posteriore e raggiunge il riflettore piano, il quale funziona come ritrasmettitore del fascio US. A questo punto il fascio compie il percorso inverso e ritorna alla sonda.

Per un corretto funzionamento del sistema è necessario che vi sia un preciso allineamento tra sonda e riflettore. Inoltre la sonda deve poter ricevere il solo segnale ritrasmesso dal riflettore e non quello riflesso dal pezzo.

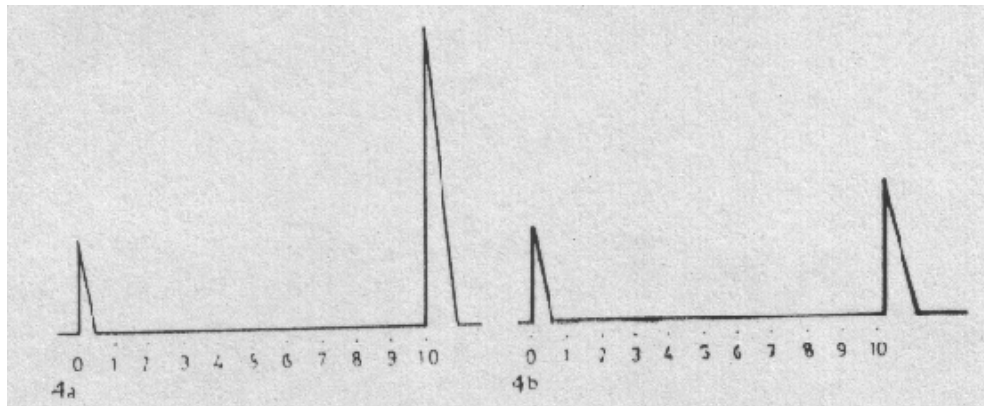


Fig. 3.22 – Esempi di echi ultrasonori su provino –

3.7 Accoppiamento ultrasonoro

3.7.1 Fluidi di accoppiamento

Poiché gli ultrasuoni vengono fortemente attenuati dall'aria, l'accoppiamento tra sonda e provino da testare è ottenuto mediante un opportuno fluido, normalmente costituito da acqua (spesso emulsionata) od oli minerali con viscosità variabile a seconda dell'impiego, o grasso (particolarmente usato per le superfici scabre). Per controlli ad elevate temperature (fino a 400°C) si utilizzano invece particolari fluidi al silicone.

Se il mezzo d'accoppiamento mantiene spessori inferiori ad un ventesimo della lunghezza d'onda degli US, non si ha l'influenza di nessuna perturbazione sulla propagazione. Quando lo spessore diventa confrontabile con la lunghezza d'onda, il mezzo di accoppiamento condiziona in modo significativo la trasmissione dei treni d'onda dal cristallo al pezzo. In particolare, nel fluido, si generano numerose riflessioni con conseguente diminuzione dell'energia trasmessa e aumento considerevole della zona morta.

Nella scelta del fluido di accoppiamento si cerca di raggiungere un compromesso tra molteplici fattori, alcuni riguardanti il solo fluido, altri caratteristici dell'interazione fluido – pezzo e fluido – impianto:

- *Caratteristiche fisico/chimiche del fluido*
- *Ripetibilità delle prove*
- *Interfacciamento chimico con il provino*
- *Interfacciamento chimico con il sostegno del provino e con la struttura della vasca*
- *Costi e disponibilità*
- *Sicurezza dell'utilizzo*
- *Velocità di immissione ed espulsione del fluido nella vasca di prova*
- *Smaltimento del fluido nell'ambiente*

Tra le caratteristiche fisico/chimiche, assumono notevole rilevanza, nell'utilizzo per l'accoppiamento US, la trasparenza del fluido, per quanto riguarda il controllo visivo della prova, e la composizione chimica, per quanto riguarda la compatibilità con il resto dell'impianto.

Per la ripetibilità nel tempo delle prove è necessario utilizzare un fluido di accoppiamento che permetta una precisa caratterizzazione. In particolare si cerca un fluido che mantenga inalterate la propria impedenza acustica Z e il proprio coefficiente di assorbimento α con l'ambiente, e quindi con la temperatura. In alcuni fluidi questi parametri sono in funzione della temperatura.

Occorre pertanto una termoregolazione del fluido, con conseguente aumento dei costi dell'impianto.

Per quanto riguarda l'interfacciamento chimico, esso va verificato sia per gli accoppiamenti fluido/provino sia per gli accoppiamenti fluido/struttura dell'impianto, comprendendo anche il sostegno ad immersione per il provino.

Tale verifica deve assicurare il normale funzionamento di organi ed attrezzature, la resistenza alla corrosione e l'impossibilità di formazione di depositi.

Inoltre la verifica fluido/provino deve escludere la reazione chimica tra i due elementi durante la prova e che la presenza del fluido non modifichi la risposta agli US. Si tende pertanto a scegliere fluidi che non unghano e che siano facilmente rimovibili e smaltibili nell'ambiente al termine della prova.

Occorre inoltre verificare la bagnabilità, in altre parole la capacità del fluido di aderire alla superficie del provino.

Per valutare tale parametro è necessario che la tensione superficiale del fluido sia inferiore o circa uguale a quella dei legami fluido/provino. Un'elevata bagnabilità fa in modo che, durante il posizionamento del pezzo, si riduca il fenomeno di formazione di bolle d'aria, che possono alterare il controllo ad ultrasuoni all'interfaccia pezzo/fluido. Può creare qualche difficoltà anche l'eventuale lavaggio post-prova del pezzo, specie quando si utilizzano fluidi oleosi, comportando possibili costi aggiuntivi. Un fluido come l'acqua consente la termostatazione, semplicemente disponendo una sorgente a temperatura maggiore ed una minore rispetto alla temperatura di test. Ciò consente di risparmiare sul costo dell'impianto, anche se l'acqua mantiene all'incirca costante la propria densità e impedenza acustica al variare della temperatura. Occorre inoltre ricordare due fattori di scelta del fluido, direttamente collegati all'esecuzione della prova ed in particolare all'energia del fascio US:

- *Riflessione all'interfaccia*
- *Assorbimento nel fluido*

3.7.2 Riflessione in corrispondenza dell'interfaccia

Nel paragrafo 3.3.5 sono state riportate le relazioni che legano le energie trasmesse e riflesse nel passaggio tra due mezzi con diversa impedenza acustica Z .

Nella scelta del liquido d'accoppiamento ottimo per la trasmissione dell'energia ultrasonora si deve tenere conto di tutte le superfici di separazione incontrate dagli US. E' inoltre importante avere bassi livelli di riflessioni secondarie, che possono essere un disturbo per l'acquisizione del segnale US.

Sia nella tecnica pulse-echo sia nella tecnica per trasmissione, esistono varie superfici di separazione:

- *Sonda-fluido*
- *Fluido-provino*
- *Provino-fluido*
- *Fluido-sonda*

Tuttavia le due tecniche hanno esigenze del tutto differenti nella scelta del fluido di accoppiamento. La tecnica per trasmissione necessita di un accoppiamento che massimizzi l'energia trasmessa, ottenendo così una maggiore penetrazione del fascio US ed una migliore definizione del difetto.

Nella tecnica pulse-echo è necessario un buon accoppiamento tra sonda e fluido. L'accoppiamento tra fluido e pezzo da testare esige un compromesso tra la necessità di trasmettere al provino sufficiente energia, con buon eco frontale e sufficiente eco di fondo, e di ottenere una sufficiente definizione della parte di segnale acquisito che interessa il provino.

3.7.3 Assorbimento nei fluidi d'accoppiamento

I fluidi di accoppiamento sono omogenei ed isotropi, pertanto presentano un'attenuazione degli US solo per assorbimento, mentre è assente, almeno alla frequenza dei controlli non distruttivi ultrasonori (1÷10 MHz), il fenomeno della diffusione. Solo la presenza di bolle od impurità potrebbe reintrodurla accidentalmente. Il modello di assorbimento è quello già descritto nel paragrafo 3.4.1.

3.7.4 Tecniche di accoppiamento

Al fine di ottenere una corretta interposizione del fluido d'accoppiamento tra sonda e provino, si possono utilizzare più tecniche.

- *Immersione completa in vasca*

Il pezzo da controllare e la sonda sono completamente immersi nel fluido (Fig. 3.23).

L'accoppiamento ha quindi caratteristiche costanti su tutto il pezzo. E' possibile controllare in maniera ottimale le caratteristiche del fluido (temperatura, bolle, impurità), nonché la distanza tra sonda e pezzo.

Non vi sono, infatti, particolari limitazioni per la scansione, almeno fino al raggiungimento delle dimensioni massime in vasca previste per la movimentazione sui tre assi della sonda. In generale l'immersione completa in vasca non pone limitazioni neanche alla forma del pezzo, a patto di disporre di un sistema di movimentazione degli assi dotato di sei gradi di libertà. Tuttavia, l'attrezzatura a disposizione presso il Laboratorio US del Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale del Politecnico di Milano, prevede un sistema di movimentazione a quattro gradi di libertà (tre traslazioni X,Y,Z ed una rotazione sull'asse Z), che limita il controllo ai soli provini piani. Eventuali limitazioni derivano dalle dimensioni massime del pezzo, che dipendono dalle dimensioni della vasca ed anche dalle dimensioni e dall'ingombro del sostegno del provino. Per questo motivo uno dei compiti è quello di progettare un sostegno che vincoli il provino, garantendo massima flessibilità, in termini di dimensioni del provino alloggiato, e minimo ingombro all'interno della vasca. Si deve comunque raggiungere un compromesso tra le varie caratteristiche del sostegno, in base al tipo di fissaggio già progettato e presente nella vasca. A tal proposito si fa riferimento al capitolo competente.

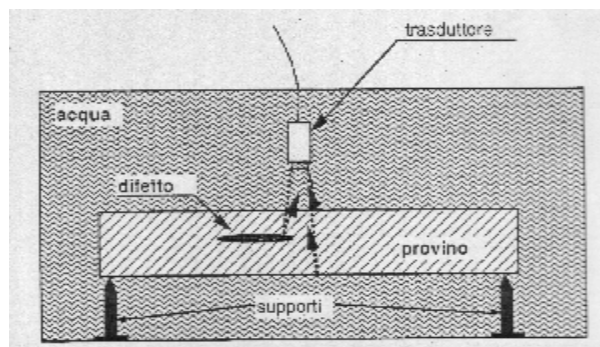


Fig. 3.23 – Tecnica di controllo ad immersione completa –

- *Tecnica degli squirter*

E' una tecnica utilizzata per le analisi ad US in trasmissione su provini piani.

Per l'accoppiamento si usano due colonne di fluido contrapposte e dirette sul punto in cui si intende effettuare l'indagine, generate da ugelli dai quali fuoriesce il fluido in pressione (Fig. 3.24).

A tal proposito è necessario un impianto idraulico che fornisca portata e pressione sufficiente, con notevole aumento del costo totale.

Il dimensionamento dell'impianto idraulico presenta notevoli problemi nella progettazione degli ugelli, che devono garantire un flusso laminare con caratteristiche adeguate.

Si devono evitare anche formazioni di bolle nel fluido dovute alla cavitazione, nonché la variazione di temperatura del fluido stesso.

Per ottenere l'ortogonalità tra getto e provino sono necessarie pressioni elevate, le quali possono generare notevoli vibrazioni in provini di piccolo spessore, disturbando l'esecuzione della prova.

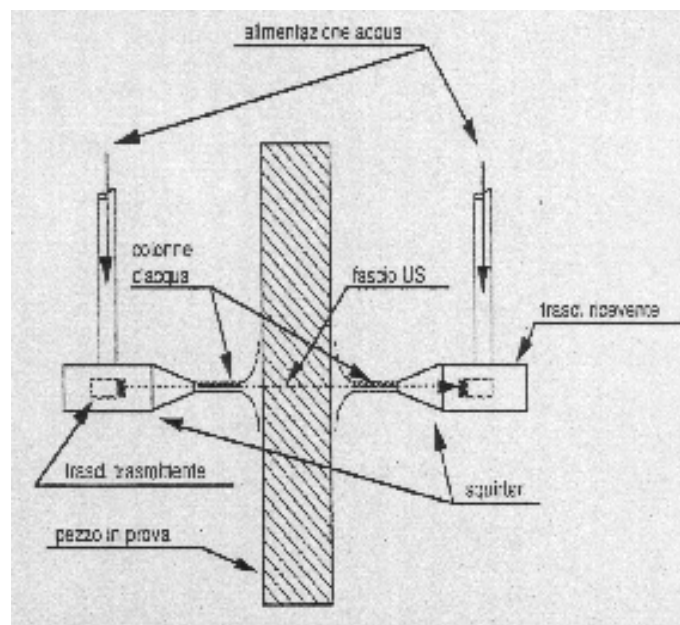


Fig. 3.24 – Tecnica degli squirter -

- *Tecnica del pattino piano*

Essa utilizza un pattino che guida il fluido per accoppiare in modo adeguato sonda e provino. Viene impiegata nelle analisi con tecnica pulse-echo per provini di grandi dimensioni. La progettazione del pattino richiede particolare attenzione, in quanto deve garantire il bilancio tra la portata entrante e la portata in uscita. Questa tecnica prevede inoltre pressioni limitate, evitando così l'insorgere di fenomeni vibratorii del provino. La forma del pattino deve essere tale da copiare la forma del pezzo da esaminare, pertanto si tratta di forme regolari come quelle piane o cilindriche.

3.7.5 Posizione relativa tra sonda e pezzo

La posizione relativa tra sonda e provino è un problema che riguarda i controlli in immersione eseguiti con la tecnica per riflessione. In questo caso, infatti, è possibile variare la distanza di accoppiamento agendo sulla quota della sonda, al fine di evitare la comparsa degli echi multipli tra eco frontale ed eco di fondo. In un controllo pulse-echo esistono delle superfici di separazione, ognuna delle quali è sede di fenomeni di riflessione, le cui intensità sono funzioni delle impedenze dei due mezzi fluido e provino. Inoltre, il tempo che intercorre tra emissione e ricezione dell'eco è funzione del percorso nei mezzi e quindi della velocità di propagazione degli US.

La distanza di accoppiamento va scelta in modo tale che il tempo dell'eco di fondo sia inferiore al primo dei possibili echi secondari (Fig. 3.25):

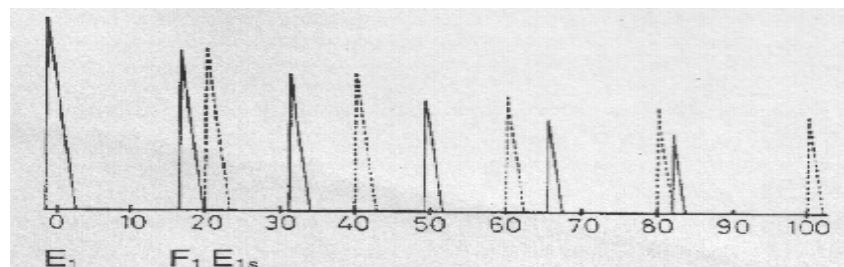


Fig. 3.25 – Rappresentazione generale degli echi multipli -

Il primo di questi echi secondari è dovuto alle seguenti riflessioni: fluido/provino, fluido/sonda e fluido/provino. Può succedere che tale riflessione giunga prima dell'eco di fondo, se la distanza lo permette. Pertanto il tempo tra emissione e rilevamento è il doppio dell'eco frontale.

La scelta della distanza di accoppiamento tra sonda e provino deve essere tale per cui il tempo dell'eco frontale sia maggiore della differenza tra il tempo dell'eco di fondo ed il tempo di eco frontale, cioè formalmente:

$$T_{1s} = 2T_F \quad T_F > (T_B - T_F) \quad [3.7.5.a]$$

In particolare, dalle Fig. 3.26.a e 3.26.b, è possibile notare l'andamento dei fasci trasmessi e riflessi dalle superfici di discontinuità.

Per motivi di visualizzazione si è volutamente rappresentato in modo obliquo gli echi dovuti alle superfici di separazione.

Osservando in particolare i fasci riflessi, si nota come ai due echi principali E1 (front eco, prodotto dall'interfaccia I_e) ed F1 (back eco, prodotto dall'interfaccia I_f) seguano una serie di echi secondari, detti echi multipli, prodotti da riflessioni successive (E1', E1'', etc.. ed F2, F3, F1', F2', etc..).

Naturalmente l'intervallo interessante per il controllo US sarà quello compreso tra gli echi E1 ed F1.

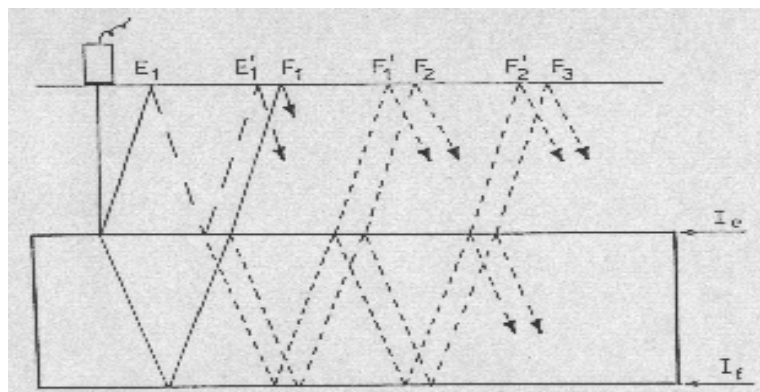


Fig. 3.26.a – Schema dei successivi fasci trasmessi e riflessi –

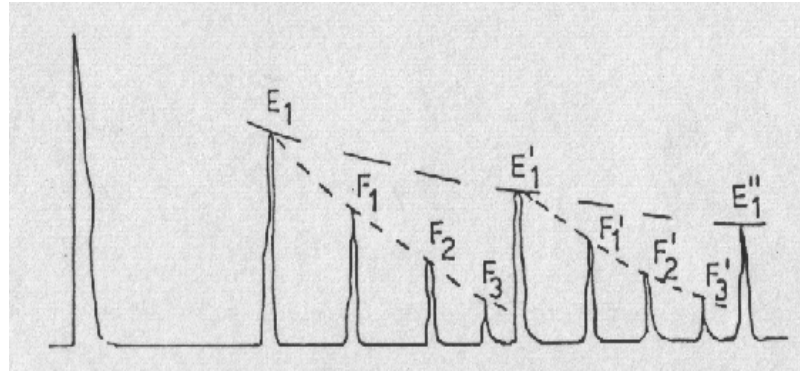


Fig. 3.26.b – Formazione dei relativi echi primari e secondari -

Se il provino contiene un difetto (Fig. 3.26.c), si può notare la formazione di un ulteriore eco D, compreso tra i due principali E1 ed F1. Dalla posizione relativa tra questi tre echi si può risalire alla profondità del difetto.

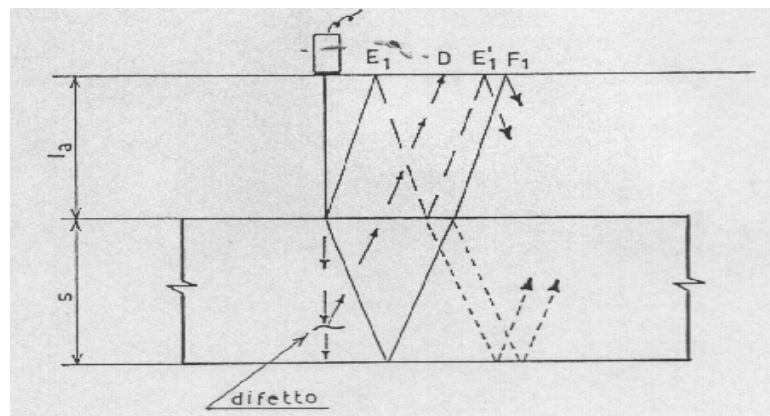


Fig. 3.26.c – Fasci US in presenza di difetto -

Sono valide le seguenti relazioni:

$$T_F = 2\left(\frac{d_a}{V_a}\right) \quad (T_B - T_F) = 2T_P = 2\left(\frac{s}{V_m}\right) \quad [3.7.5.b]$$

In base alla disuguaglianza 3.7.5.a, risulta che:

$$d_a > s \cdot \left(\frac{V_a}{V_m}\right) \quad [3.7.5.c]$$

in cui con (s) si è indicato lo spessore del provino, con (V_a) la velocità di propagazione nel fluido, con (V_m) quella nel materiale e con (d_a) la distanza di accoppiamento sonda/provino. La formazione degli echi secondari è associata anche ai difetti che si vogliono rilevare.

E' possibile che, tra eco frontale ed eco di fondo, oltre all'eco del difetto presente alla quota (d_d) , si presenti anche un eco secondario alla quota $(2d_d)$, immagine del difetto precedente.

A questi tipi di eco non si può porre rimedio agendo sulla distanza d'accoppiamento.

Nei materiali compositi è anche possibile che difetti come le delaminazioni si presentino effettivamente a distanze multiple. Di questo occorre tenerne conto quando si interpretano i risultati della scansione.

3.8 Criteri di scelta delle sonde US relativi ai materiali compositi

Un criterio del tutto generale di scelta della sonda US consiste nel selezionare la frequenza di funzionamento della stessa:

- *Frequenza 10 Mhz:*

Viene utilizzata per controlli su provini con spessori compresi tra 1.5 e 5 mm. Inoltre può essere sfruttata per una classificazione dei materiali in base al grado di assorbimento e di diffusione dell'energia ultrasonora.

Possano essere rilevati difetti di piccola entità.

- *Frequenza 6 Mhz:*

Viene usata nei controlli ad immersione e nei controlli a livello industriale, con esigenze di elevata precisione, per misure di spessore su materiali ad elevata trasparenza ultrasonora.

- *Frequenza 4 Mhz:*
E' utilizzata nei normali controlli industriali di saldature, organi trafilati, forgiati e fucinati, con superfici di accoppiamento lisce. E' adatta per ricerca di piccole discontinuità.
- *Frequenza 2 Mhz:*
L'utilizzo è identico a quello della sonda da 4 Mhz. Cambia il tipo di superficie di accoppiamento, che in questo caso prevede una normale finitura.
- *Frequenza 1 Mhz:*
Viene utilizzata per controlli su acciai austenitici, fusioni di grosso spessore, materie plastiche e ceramiche.
- *Frequenza 0.5 Mhz:*
E' sfruttata per controlli su materiali refrattari, ghisa e fusioni in acciaio austenitico.

Per quanto riguarda la scelta delle sonde per indagini nei materiali compositi, essa è influenzata dai seguenti fattori:

- Attenuazione degli US da parte del composito in funzione della frequenza e dello spessore del laminato. L'attenuazione, come indicato nei paragrafi dedicati a questo fenomeno, aumenta al crescere della frequenza. Pertanto i valori entro cui si opera per i controlli non distruttivi (CND) sono compresi tra 1 e 10 Mhz. All'interno di questa gamma di frequenze, la scelta, in funzione dell'assorbimento, è condizionata dallo spessore del laminato (uno spessore elevato causa attenuazione maggiore). Nella tecnica di indagine per trasmissione, con un solo passaggio del fascio US nel composito, si hanno minori problemi legati all'attenuazione. Il diametro del trasduttore e la geometria della sonda influiscono sull'intensità del fascio US. Sono da preferirsi sonde piane di piccolo diametro e con lunghezza N limitata, oppure sonde focalizzate, caratterizzate da una maggiore intensità del fascio.

- *Dimensioni del difetto minimo da rilevare*

Esse dipendono dalla lunghezza d'onda degli US nel mezzo da esaminare e sono funzione della frequenza. Teoricamente sono rilevabili difetti aventi spessore ($d > \lambda/4$), mentre nella pratica la risoluzione è ($d > \lambda/2$) o addirittura ($d > \lambda$).

Ad esempio, con frequenze di 6 Mhz si possono rilevare difetti con spessore maggiore di 125 μm . Il diametro del fascio US influenza invece la selettività (rilevazione in pianta). Un fascio US di ridotte dimensioni trasversali permette l'isolamento delle singole discontinuità, fornendo anche possibili informazioni sulla parziale sovrapposizione dei difetti, con migliore definizione dei margini.

- *Spessore della lamina in composito*

Se lo spessore del provino è paragonabile a ($\lambda/2$), si può creare un aumento notevole della diffusione e quindi dell'attenuazione. Occorre inoltre tenere presente la frequenza di risonanza di ogni singola lamina, definita dalla seguente relazione:

$$f_R = \left(\frac{c}{2t} \right) \quad [3.8.a]$$

in cui c è la velocità di propagazione degli US nel composito e t è lo spessore di ogni singola lamina.

- *Zona morta*

Essa dipende dalla durata dell'impulso ultrasonoro. Ipotizzando una durata di circa 1 μs , con velocità di propagazione in acqua di circa 1300 m/s, si ottiene una lunghezza della zona morta pari a 1,3 mm. Pertanto la distanza di accoppiamento deve essere superiore a tale valore.

Sia la zona morta che la distanza di accoppiamento sono molto piccole, ampiamente al di sotto della distanza N dei trasduttori piani. Le caratteristiche tecniche, variabili per ottimizzare la scelta della sonda da impiegare, sono le seguenti:

- *Tipologia della sonda*

Va scelta in relazione al fluido di accoppiamento. Deve garantire la compatibilità chimica ed anche una buona trasmissione del fascio US.

- *Sonda focalizzata o non focalizzata*

La scelta deve assicurare l'energia ultrasonora necessaria, con un fascio di dimensioni non troppo elevate rispetto al difetto minimo da rilevare.

La possibilità, data dalle sonde focalizzate di effettuare un C-scan stratificato variando la distanza sonda/provino, non può essere sfruttata nel caso di piccoli spessori (dell'ordine dei mm) della lamina, in quanto l'estensione nello spessore della macchia focale risulta maggiore dello spessore stesso del provino.

Inoltre ciò causa un aumento dei tempi di acquisizione ed elaborazione, nonché della memoria necessaria, a causa di un numero maggiore di scansioni complete, effettuate a varie distanze sonda-provino.

- *Diametro della sonda*

E' da preferirsi una sonda che fornisca, alla distanza richiesta, un fascio dalle dimensioni paragonabili con quelle del difetto minimo e non inferiori a quelle del passo d'acquisizione.

Per le sonde piane, alla distanza focale N , la dimensione del fascio utile, in cui è concentrato il 50 % dell'energia US, è pari a circa $1/3$ del diametro D .

Per le sonde focalizzate, la dimensione del fascio è invece rappresentata dalla larghezza della macchia focale.

- *Frequenza del trasmettitore*

La scelta di questo parametro è condizionata dalle apparecchiature elettroniche di supporto, le quali devono garantire una trasmissione ed una ricezione del segnale senza distorsioni.

Appare evidente che dispositivi con queste caratteristiche hanno un costo elevato.

Occorre inoltre garantire una frequenza di campionamento molto superiore rispetto alla frequenza della sonda, per poter acquisire anche le armoniche di ordine superiore.

Dal momento che il diametro e la frequenza della sonda incidono sull'angolo di divergenza del fascio US, un'eccessiva dilatazione del fascio può limitare la penetrazione e la sensibilità nel caso di spessori elevati.

Nei laminati in composito è importante poter condurre delle indagini anche sulle prime lamine ed interlamine. Pertanto è importante che la sonda fornisca un fascio US di intensità sufficiente e di durata limitata. Questo si traduce, sull'oscilloscopio, in un picco elevato e rapidamente smorzato. Purtroppo questa condizione non è semplice da ottenere. E' evidente che un eco frontale poco smorzato può coprire l'eco dovuto alle discontinuità superficiali.

Quanto detto è in relazione al rapporto tra il picco dell'eco frontale e il picco dell'eco del difetto.

Questo rapporto è tanto maggiore quanto più la distanza tra questi picchi è elevata, poiché è minore l'energia, riflessa dal difetto, che incide sulla sonda nel cammino di ritorno, in funzione del coefficiente di assorbimento del materiale.

Se il difetto risiede nelle immediate vicinanze della prima superficie, è possibile che il suo eco non sia percepito, nel caso in cui l'eco frontale sia poco smorzato. Ciò dipende dallo spessore del composito, oltre che dall'impostazione della potenza di emissione degli impulsi US (damping).

La risposta caratteristica di una sonda equivale a quella di un oscillatore smorzato, il cui picco massimo è funzione del valore di tensione elettrica applicata.

La frequenza di oscillazione e lo smorzamento sono determinati rispettivamente in base alle caratteristiche fisiche del cristallo della sonda ed alle caratteristiche della colata di smorzamento attorno al cristallo della sonda stessa.

E' necessario trovare un compromesso che garantisca contemporaneamente un picco massimo elevato ed un elevato smorzamento.

La sonda scelta deve fornire un tempo di smorzamento basso e nel contempo un fascio US di intensità sufficiente.

Nella Tab. 3.4 sono riportate le lunghezze d'onda nei materiali compositi, con velocità di propagazione variabile tra 3000 e 4000 m/s per le sonde a disposizione.

Tipo di Sonda Gilardoni	Frequenza nominale (MHz)	Lunghezza d'onda λ (mm) a c=3000 (m/s)	Lunghezza d'onda λ (mm) a c=4000 (m/s)
BDF ½ - 1	1	3	4
BDF ½ - 2	2	1,5	2
BDF 10 - 4	4	0,75	1
BDF 1/4 - 6	6	0,5	0,67

Tab. 3.4 – Caratteristiche Sonde Gilardoni -

La lunghezza d'onda λ è data dalla 3.2.b.

Lunghezze d'onda ridotte, ovvero alte frequenze di emissione del fascio US, permettono, a parità di smorzamento delle oscillazioni, limitate zone d'ombra per l'eco frontale ed una migliore definizione spaziale, lungo l'asse del fascio, della posizione del difetto.

3.9 Metodi di rappresentazione dei segnali US

Per caratterizzare un controllo non distruttivo, occorre costituire un database di informazioni, sotto forma di segnali acquisiti nel tempo, al quale devono seguire complesse fasi di elaborazione e presentazione dei dati.

L'elaborazione numerica del segnale acquisito nel dominio del tempo, comprende l'analisi di tante forme d'onda complete quanti sono i punti di campionamento sul provino.

Alcuni metodi di presentazione dei segnali US sono riportati nei seguenti paragrafi.

3.9.1 Metodo A-scan

L'A-scan è la rappresentazione nel dominio del tempo del segnale US, ricevuto da una sonda a punto fisso per trasparenza o per riflessione.

Il segnale meccanico, vale a dire onde di pressione, è convertito in segnale elettrico di tensione dalla sonda. Detto segnale, opportunamente amplificato, viene poi visualizzato attraverso un tubo a raggi catodici (CRT). L'insieme dei campioni compresi tra l'eco frontale e l'eco di fondo è digitalizzato e memorizzato, formando così il database disponibile ad una successiva elaborazione numerica (Fig.3.27).

L'A-scan di un segnale ottenuto per riflessione permette di risalire ad importanti informazioni (quali l'ampiezza delle oscillazioni prodotte dalle superfici di discontinuità e l'intervallo di tempo tra front echo e back echo). Da queste è possibile calcolare lo spessore del laminato, conoscendo la velocità di propagazione nel materiale, o viceversa. Inoltre sono calcolabili lo spessore e la profondità del difetto, nonché il coefficiente k di assorbimento del mezzo. Dall'A-scan di un segnale ottenuto per trasparenza è invece possibile ricavare l'assorbimento energetico del segnale e, per confronto con un segnale campione, verificare la presenza di un eventuale difetto, stabilendone l'estensione in pianta. Non è possibile però risalire alla posizione del difetto nello spessore.

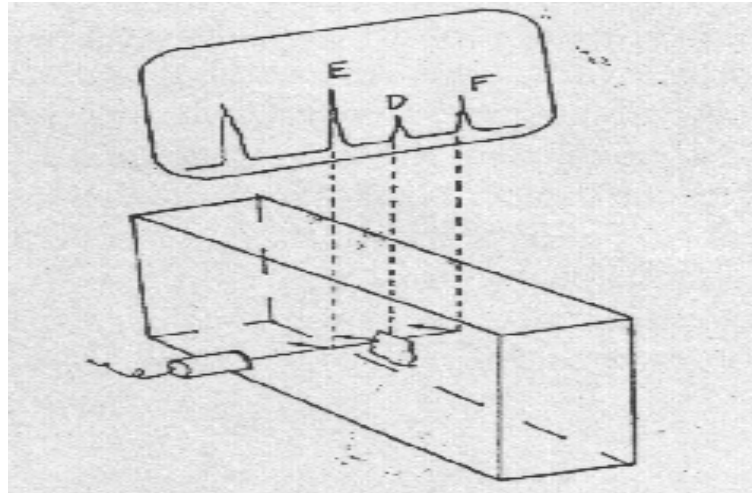


Fig. 3.27 – Visualizzazione A-scan -

3.9.2 Metodo B-scan

Il B-scan è una rappresentazione sintetica degli A-scan, ottenuti con tecnica pulse-echo su una linea di scansione (Fig.3.28.a e 3.28.b).

La rappresentazione è una vista in sezione del provino lungo la linea di scansione. Da essa si leggono lo spessore del provino, la posizione relativa sonda-provino e, se il moto della sonda è rettilineo, anche la planarità della superficie frontale del pezzo, e naturalmente i difetti nello spessore.

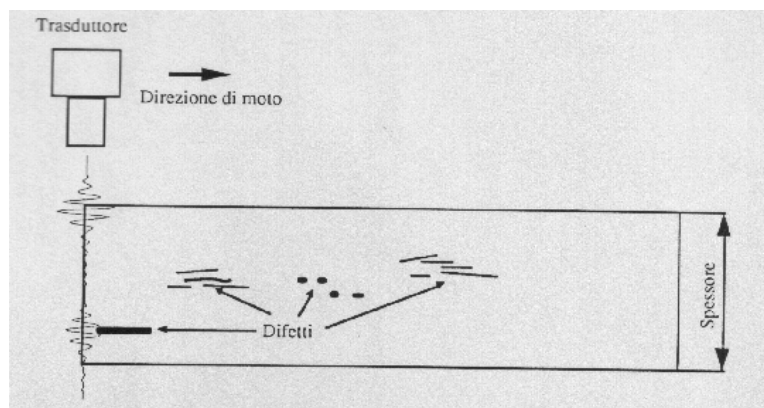


Fig. 3.28.a – Tecnica B-scan con vista frontale -

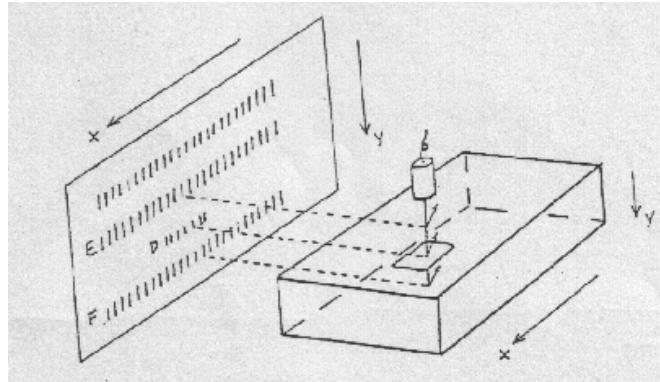


Fig. 3.28.b – Tecnica B-scan con vista 3D –

Il passaggio da una visualizzazione del tipo A-scan ad una del tipo B-scan consiste nei seguenti passaggi:

- *Definizione del passo di acquisizione, cioè della distanza che intercorre tra due A-scan successivi.*
- *Definizione del valore in tensione dei picchi, ritenuto costante nel tempo e variabile nello spessore con legge logaritmica, per tenere conto dell'attenuazione subita dal fascio US nel materiale.*
- *Rappresentazione nel piano della sezione dei dati ottenuti, quali l'eco frontale, l'eco di fondo e la posizione nello spessore dei difetti rilevati.*

In un B-scan viene evidenziata la presenza, la posizione nello spessore e l'estensione lungo la linea di scansione della difettologia.

3.9.3 Metodo C-scan

Il C-scan è la rappresentazione bidimensionale in pianta del laminato e degli eventuali danneggiamenti interni, senza fornire informazioni degli stessi nello spessore.

L'utilizzo dei colori permette di rappresentare l'estensione della discontinuità in direzione normale al fascio US.

Il C-scan rappresenta una sintesi grafica dei dati di un A-scan, per riflessione o per trasparenza, sulla superficie del provino.

Dei segnali ottenuti con la tecnica per riflessione, si prende in esame la zona compresa tra l'eco frontale e l'eco di fondo.

Per tener conto dell'attenuazione del segnale, dovuta all'assorbimento e alla diffusione del materiale, si deve amplificare opportunamente tutto il segnale in funzione dello spessore, secondo le formule descritte nel paragrafo 3.4. In base al confronto con l'A-scan di un segnale di riferimento, relativo ad un laminato non danneggiato, si evidenziano i picchi anomali, associando all'ampiezza in tensione del picco il colore corrispondente ed ottenendo così una mappatura dei difetti.

Utilizzando la tecnica per trasparenza, si ricava l'assorbimento di energia del segnale prodotto dal materiale stesso e dalla presenza di eventuali difetti. Il confronto avviene tra l'assorbimento minimo del materiale integro e l'assorbimento determinato in corrispondenza del difetto.

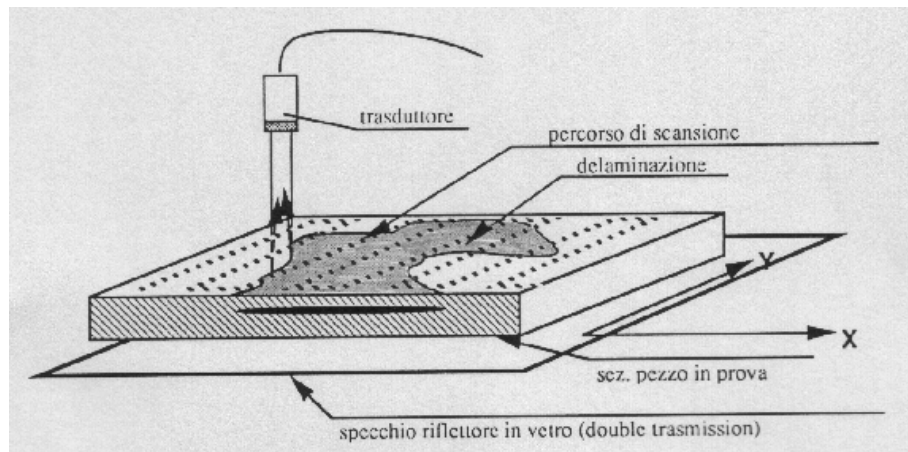


Fig. 3.29 – Visualizzazione C-scan –

3.9.4 Metodo F-map

L'F-map è una tecnica mirata al riconoscimento della tipologia del difetto e alla rappresentazione del medesimo mediante associazione tra tipologia del danno e colore.

Per effettuare l’F-mapping, è necessario disporre a priori dei modelli dei segnali, elaborati nel dominio del tempo o nel dominio delle frequenze, ai quali associare univocamente una tipologia di difetto ottenuta mediante prove distruttive.

Partendo da un segnale ottenuto con la stessa tecnica usata per la costituzione dei modelli (riflessione o trasparenza), si effettua un confronto con i modelli campione.

La tecnica permette quindi di avere una rappresentazione in pianta dei difetti, permettendo di valutare anche l’estensione e la tipologia, mentre non si può ottenere nessuna informazione riguardo la profondità del danneggiamento.

3.9.5 Rappresentazioni 3D

Lo scopo di una rappresentazione tridimensionale è quello di condensare tutte le informazioni di posizione ed estensione del difetto in tre dimensioni, eventualmente correlate alla tipologia del difetto stesso.

Esiste una rappresentazione, denominata D-scan, studiata dalla *Dornier Deutsch Aerospace*, che propone, a parità di danno, diverse tonalità dello stesso colore associato al difetto, in funzione della posizione nello spessore. Evidentemente il limite di questa tecnica risiede nell’impossibilità di rappresentare difetti sovrapposti.

Esistono inoltre tecniche di rappresentazione tridimensionali, come la tecnica Slicing, ottenute sovrapponendo più rappresentazioni bidimensionali effettuate per diversi spessori. Essa consente rappresentazioni di tipo C-scan o F-map su spessori limitati ed è descritta nei seguenti passi:

- *Elaborazione del segnale tra eco frontale e di fondo per compensare l’attenuazione del materiale.*
- *Definizione delle “fette” di spessore e degli intervalli di tempo, attraverso delle porte digitali del segnale.*
- *Rappresentazione dei risultati mediante tecnica C-scan o F-map, partendo dall’elaborazione su ogni singola fetta di spessore.*

I problemi connessi a questa tecnica, oltre all'aumento del tempo di calcolo, sono legati alla necessità di posizionare i “gate” digitali, partendo non dall'inizio del segnale, ma dall'eco frontale, per evitare i problemi dovuti all'insufficiente complanarità tra la superficie della scansione e la superficie del pezzo.

Inoltre, è bene osservare che i gate non devono coincidere con l'interlamina, al fine di rendere più leggibili i difetti interlaminari.

3.9.6 Rappresentazioni accessorie

Attraverso la tecnica pulse-echo, con moto planare della sonda ed aggancio dell'acquisizione fissato sull'emissione, è possibile ottenere alcune semplici rappresentazioni della geometria del pezzo:

- *Mappatura degli spessori del provino*
- *Scostamento dalla planarità nel caso di pezzi piani o dalla forma di riferimento nel caso di corpi curvi.*

Oltre ai difetti nel pezzo, è possibile una rappresentazione della finitura superficiale del provino.

Finitura, rugosità ed imperfezioni determinano, infatti, il valore dell'energia riflessa e quindi l'ampiezza dell'eco frontale.