

## Il Metodo Ultrasonico (UT)

- ✓ Il suono si propaga nei corpi mediante la **vibrazione elastica degli atomi e delle molecole che lo compongono** ad una velocità dipendente dalle caratteristiche meccaniche del materiale attraversato.
- ✓ La presenza di imperfezioni o disomogeneità nel corpo, provoca l'insorgere di fenomeni di scattering che si manifestano con la presenza di **eco spurie, riverberi e, in generale, attenuazione dell'onda sonora.**
- ✓ È su questi principi che si basano i controlli non distruttivi con il metodo ultrasonico (UT).

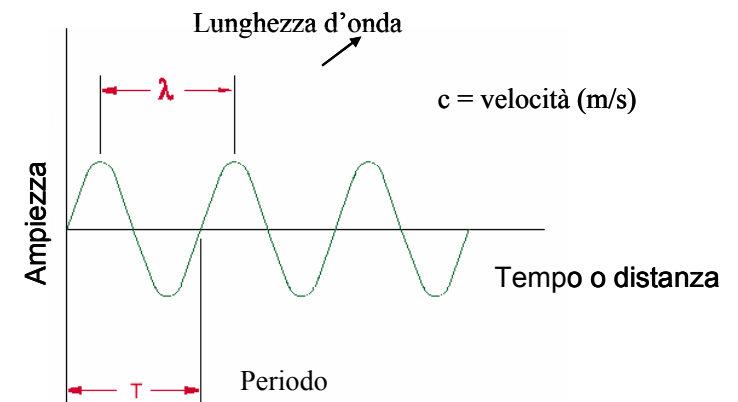
# Principi fisici

✓ Quando un corpo viene perturbato ad una delle sue estremità, la perturbazione si propaga in esso in un certo tempo (finito) sotto forma di onda sonora originata dalla vibrazione delle molecole e degli atomi che compongono il materiale.

✓ Come per tutti i fenomeni ondulatori, è possibile definire per le onde sonore una **lunghezza d'onda  $\lambda$** , un **periodo  $T$**  e una **frequenza  $f$** , grandezze che sono legate fra loro dalle relazioni qui riportate, nelle quali  $c$  rappresenta la velocità di propagazione del suono nel mezzo considerato.

✓ Tuttavia, a differenza della luce, le onde acustiche **necessitano per la loro propagazione, di un mezzo elastico nel quale viaggiare**. Ciò spiega perché nel vuoto non si propaga alcun suono.

✓ Quando la frequenza di tale onda sonora è compresa nel range 20-20000 Hz si parla di suoni udibili, mentre laddove il valore di 20 KHz sia oltrepassato si parla di ultrasuoni.



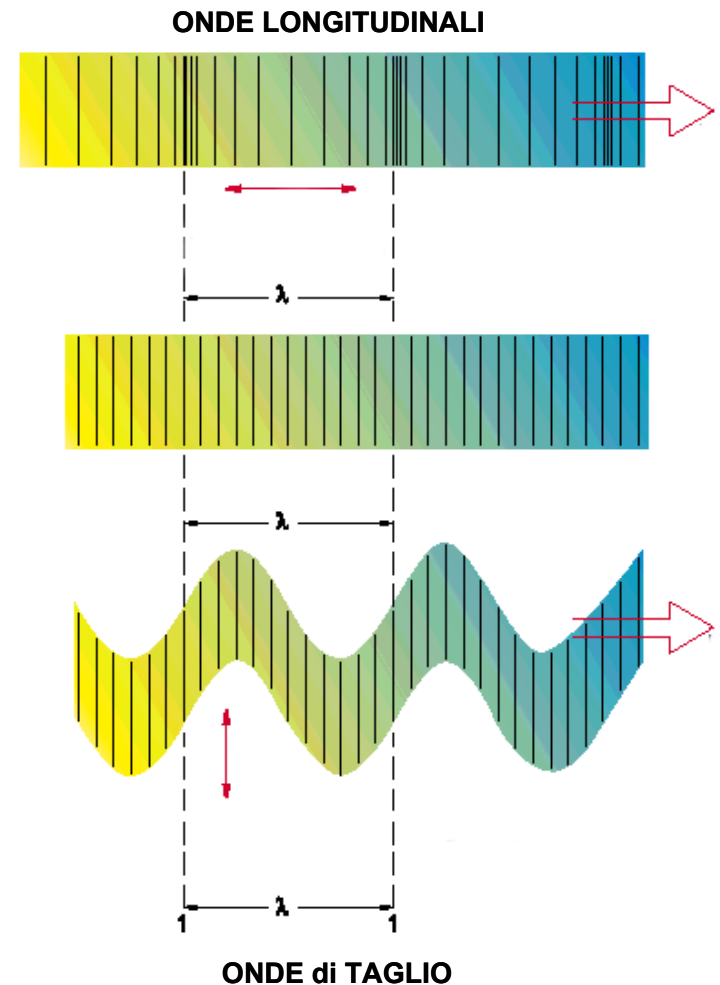
$$f = \frac{1}{T} \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad \lambda = cT$$

# Propagazione delle onde ultrasoniche

*La propagazione delle onde acustiche (siano esse udibili o ultrasoniche) può avvenire nei materiali secondo differenti modalità*

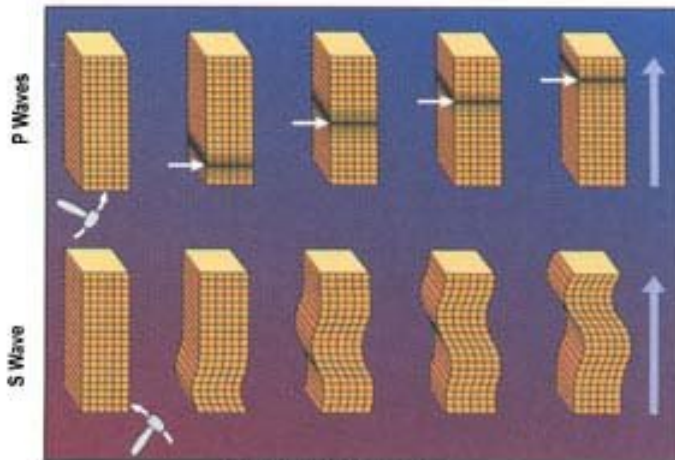
✓ Si parla di **onde longitudinali** quando l'oscillazione delle particelle elementari di cui si compone il materiale avviene parallelamente alla direzione di propagazione dell'onda stessa

✓ Si definiscono **onde trasversali** quelle per le quali il fronte d'onda si muove ortogonalmente rispetto alla direzione del movimento delle particelle eccitate.

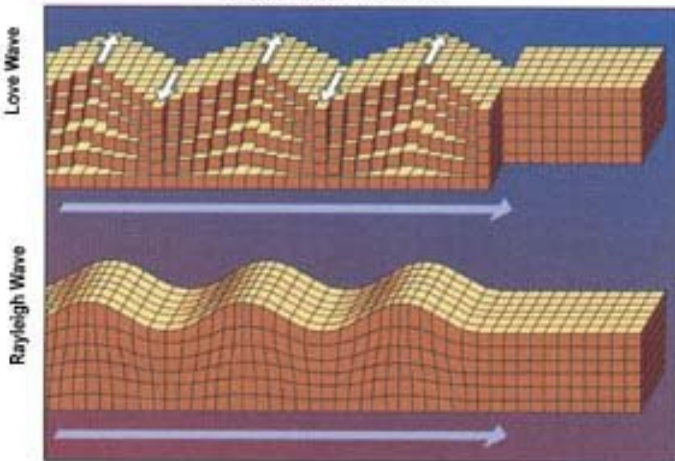


# Approfondimenti teorici

## Body Waves



## Surface Waves



|  |   |                                   |   |
|--|---|-----------------------------------|---|
| <b>Longitudinali (compressione, dilatazione)</b> | Parallelo alla direzione di propagazione dell'onda      | Sostanze solide liquide e gassose | Largamente impiegate nei CND  |
| <b>Trasversali (taglio)</b>                      | Perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda | Solidi                            | La velocità di propagazione è circa la metà rispetto a quelle longitudinali |
| <b>Superficiali (Rayleigh)</b>                   | Moto ellittico  | Solidi piezoelettrici             |   |

## Approfondimenti teorici

✓ Le onde sonore (indipendentemente dalla loro frequenza) si propagano nei materiali **sotto l'influenza di una pressione locale P** definita "**pressione sonora**" che rappresenta, in sostanza, la sovrappressione a cui sono sottoposti gli atomi e molecole rispetto alla pressione standard atmosferica.

✓ Poiché atomi e molecole sono legati tra loro in modo elastico, tale sovrappressione si propaga lungo tutto il corpo e, se si indica con **Q** la **velocità di spostamento** delle particelle, si definisce l' Impedenza Acustica Specifica del mezzo **Z** mediante la relazione:

$$Z = \frac{P}{Q} = \frac{\text{Pressione acustica}}{\text{Velocità di spostamento}}$$

✓ In pratica, l'impedenza acustica caratterizza il comportamento del suono nei confronti di un dato materiale ed è stato dimostrato, a tale proposito, che essa è legata alle proprietà fisiche del materiale mediante l'espressione

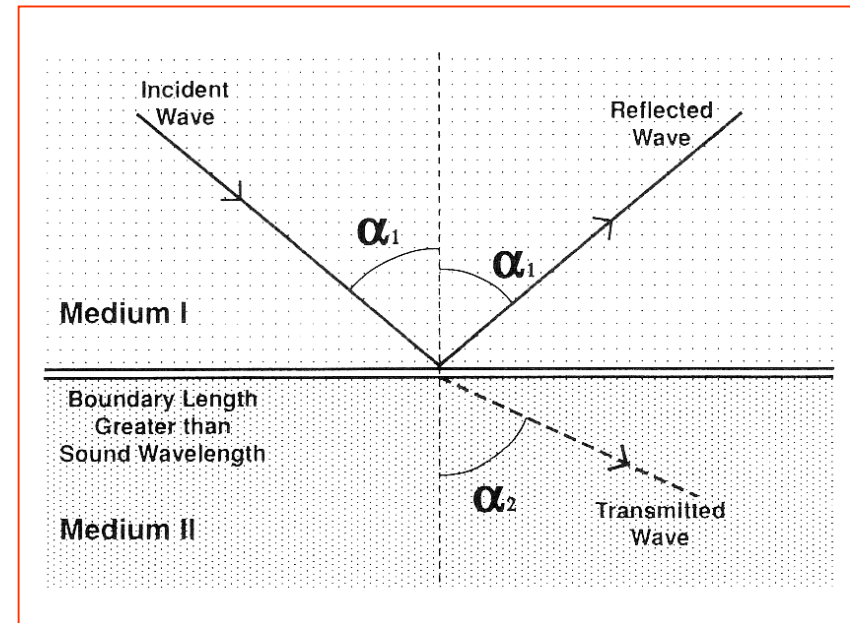
$$Z = \rho V$$

$\rho$  = densità

$V$  = velocità di propagazione

# Riflessione e trasmissione degli ultrasuoni

✓ Nella figura a lato è illustrata, in modo semplificato, la riflessione di un'onda ultrasonica incidente sulla superficie di separazione tra due mezzi aventi differente impedenza acustica: **l'onda incidente e quella riflessa sono inclinate dello stesso angolo  $\alpha_1$** , che è in generale diverso dall'angolo  $\alpha_2$  secondo il quale si propaga l'onda trasmessa. Gli angoli  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  sono espressi dalla legge di Snell



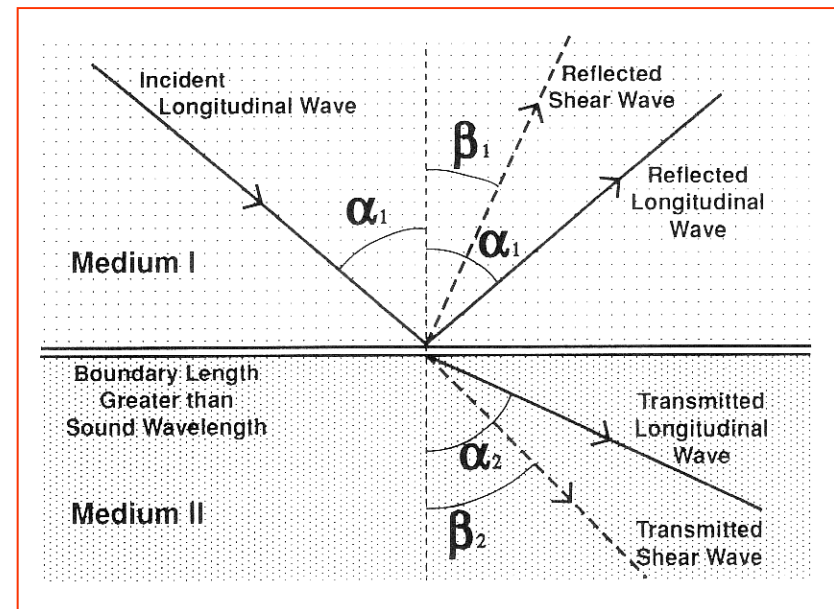
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

# Riflessione e trasmissione degli ultrasuoni

✓ Quando un'onda ultrasonica incide sulla superficie di separazione tra due mezzi **una componente dell'onda longitudinale è convertita in un'onda trasversale riflessa** nella regione del mezzo 1 **ed in un'onda trasversale trasmessa** nel mezzo 2.

✓ Gli angoli  $\beta_1$  e  $\beta_2$  secondo i quali tali componenti si propagano sono ancora una volta governati dalla legge di Snell a patto che le velocità considerate non siano più quelle relative alle onde longitudinali ma quelle proprie delle onde trasversali.

✓ Poiché le onde longitudinali viaggiano più velocemente delle trasversali (il rapporto è circa 2:1), gli angoli di riflessione e trasmissione  $\beta$  sono in generale minori di quelli  $\alpha$ , come mostrato in figura.



# Riflessione e trasmissione degli ultrasuoni

- ✓ Il controllo mediante ultrasuoni si basa essenzialmente sull'analisi delle variazioni delle caratteristiche delle onde riflesse e trasmesse quando il fascio incontra una discontinuità.
- ✓ La relazione fondamentale che governa la riflessione di un'onda ultrasonica che incide sulla superficie di separazione tra due mezzi di impedenza acustica diversa  $Z_1$  e  $Z_2$  è stata formulata nel 19° secolo da Poisson e matematicamente si esprime nella forma:

$$R = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)$$

- ✓ Analoga relazione può essere scritta per ciò che riguarda il coefficiente di trasmissione T

$$T = \frac{4Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2}$$



# Riflessione e trasmissione degli ultrasuoni

| Mezzo        | Velocità (m/s) | Mezzo    | Velocità (m/s) | Mezzo      | Velocità (m/s) |
|--------------|----------------|----------|----------------|------------|----------------|
| Acciaio      | 5900           | Ferro    | 5900           | Plexiglass | 2700           |
| Acciaio Inox | 5800           | Ghiaccio | 4000           | Quarzo     | 5800           |
| Acqua        | 1480           | Gomma    | 1800           | Rame       | 4700           |
| Alluminio    | 6320           | Nickel   | 5600           | Titanio    | 6100           |
| Aria         | 330            | Oro      | 3200           | Tungsteno  | 5200           |
| Berillio     | 12900          | Platino  | 3300           | Zinco      | 4200           |

# Riflessione e trasmissione degli ultrasuoni

- ✓ È interessante osservare che **l'impedenza acustica è molto bassa nei gas** (circa quattro ordini di grandezza minore rispetto a quella dei solidi) e ciò comporta valori del coefficiente di riflessione molto elevati alla superficie di separazione solido-gas (per esempio acciaio-aria, caso frequente nella pratica).
- ✓ In sintesi ciò si traduce **nell'impossibilità di far propagare le onde ultrasoniche nell'aria dopo che queste hanno attraversato un materiale solido** e questo spiega anche la necessità di interporre un opportuno strato di una sostanza solida, liquida o viscosa tra il trasduttore ed il pezzo da testare per poter eseguire il controllo in modo efficace.

# Attenuazione delle onde ultrasoniche

- ✓ Il fascio ultrasonico generato da un trasduttore, come si vedrà meglio in seguito, è divergente e ciò comporta una progressiva riduzione del contenuto energetico degli ultrasuoni, nonché un aumento delle dimensioni della zona illuminata.
- ✓ Inoltre, **durante l'attraversamento del materiale, le onde ultrasoniche sono soggette a fenomeni di attenuazione** provocati essenzialmente da **assorbimento e scattering** che agiscono in maniera dissipativa. In generale, la riduzione di intensità per un percorso  $x$  in un dato materiale può essere espressa mediante la relazione:

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}$$

- ✓ A sua volta, il coefficiente di assorbimento può essere idealmente scisso nella somma di due contributi:

$$\mu = \mu_\tau + \mu_s$$

uno legato all'assorbimento "reale", (funzione della frequenza dell'onda incidente e frutto dalla dissipazione energetica che si genera in forza dell'attrito molecolare) e uno derivante dallo scattering, che è funzione essenzialmente della dimensione delle particelle di cui si compone il mezzo attraversato.

# I mezzi accoppiatori

- ✓ Quando una sonda ultrasonica deve essere posizionata sul componente da testare, è buona regola interporre tra essa e la superficie del pezzo uno strato costituito da una sostanza (liquida o gelatinosa) che viene detta “mezzo accoppiatore” (in inglese “couplant”).
- ✓ Il mezzo accoppiatore provvede a fornire un opportuno passaggio per l’onda ultrasonica dalla superficie radiante del trasduttore fino al materiale ed evita che l’onda ultrasonica possa essere completamente riflessa a causa della presenza di aria immediatamente a contatto con il trasduttore.

## Le qualità che dovrebbe possedere un buon mezzo accoppiatore sono:

- inumidire opportunamente le superfici del trasduttore e del pezzo da testare
- escludere qualunque bolla d’aria dal percorso del raggio sonoro
- riempire tutte le irregolarità presenti nella superficie del pezzo per creare una regione di ingresso regolare
- consentire il libero movimento della sonda
- essere facile da applicare e da rimuovere e non essere tossico

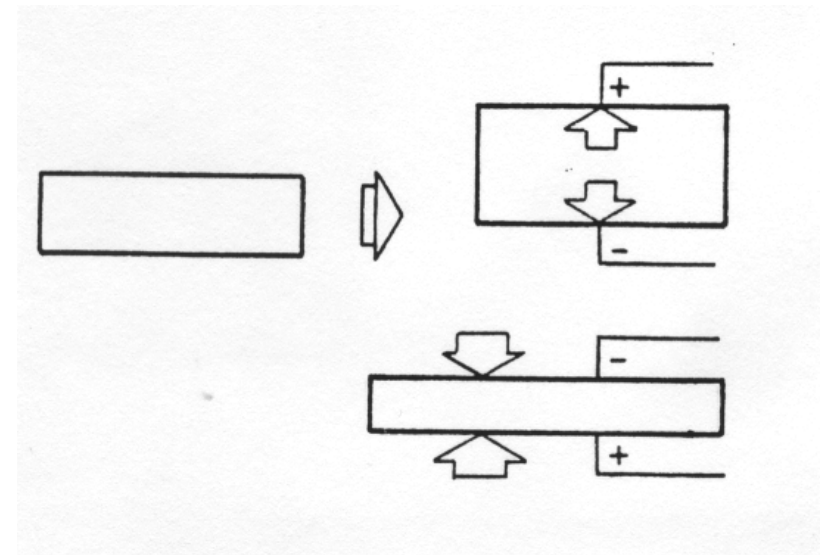
# La produzione degli ultrasuoni

✓ La deformazione iniziale del trasduttore, che è necessaria per farlo entrare in oscillazione, è ottenuta sfruttando il fenomeno della **piezoelettricità**

✓ Questo fenomeno, che esprime l'abbinamento di due manifestazioni (una di natura meccanica e l'altra di origine elettrica) si riferisce al passaggio spontaneo dall'una all'altra di queste manifestazioni

✓ Se alle due superfici opposte di un blocco di materiale piezoelettrico viene applicata una tensione elettrica, il materiale si espande (o si contrae)

✓ Viceversa, se si sottopone l'elemento trasduttore ad uno sforzo capace di deformarlo, tra le superfici opposte si realizza una tensione elettrica



# La produzione degli ultrasuoni

La piezoelettricità rende possibile il comportamento del trasduttore sia come elemento trasmettitore di oscillazioni e sia come ricevitore

✓ **Come trasmettitore:** applicando una tensione elettrica di breve durata (impulso) al trasduttore questo si deforma e, al cessare della tensione, compie una serie di oscillazioni smorzate fino a riprendere la configurazione iniziale.

✓ In corrispondenza di ciascun impulso, il trasduttore sviluppa una successione di oscillazioni smorzate, costituenti un treno di onde

✓ Tipicamente un pulsatore ultrasonico è in grado di produrre da alcune centinaia a diverse migliaia di impulsi al secondo

✓ L'ampiezza (e quindi la durata) di queste oscillazioni dipende dal valore della tensione applicata mentre la loro frequenza dipende dallo spessore del trasduttore

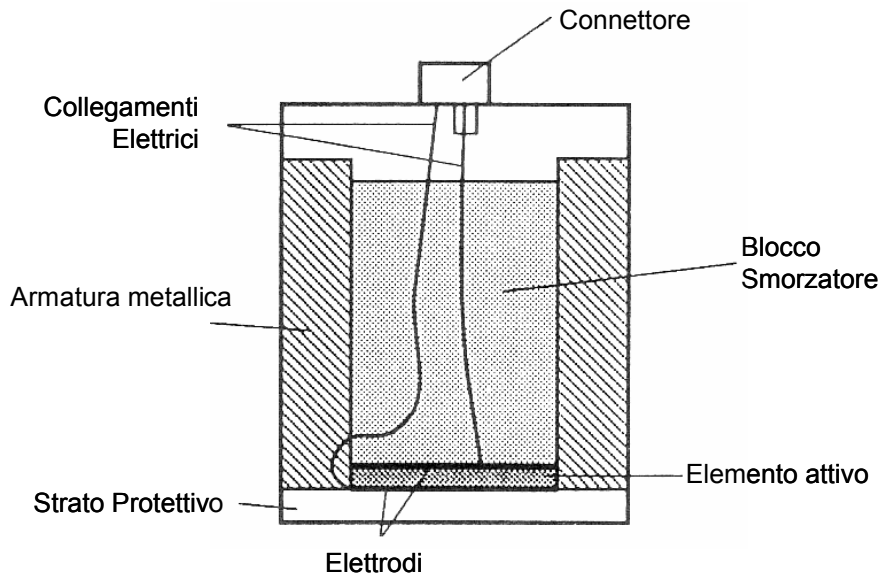
✓ **Come ricevitore:** quando il trasduttore in quiete viene appoggiato sulla superficie di un pezzo che vibra, la vibrazione è trasmessa per contatto

✓ Se la frequenza di vibrazione coincide con quella propria del trasduttore, ossia quella per la quale esso oscilla spontaneamente, quest'ultimo produce vibrazioni apprezzabili

✓ Si viene dunque a costituire una tensione elettrica tra le due superfici, caratterizzata da un'alternanza delle posizioni dei segni + e - sulle superfici stesse, ogniqualevolta il trasduttore passa dalla condizione di massima estensione a quella di minima contrazione

✓ In tali condizioni, il trasduttore oscillante equivale ad un generatore di tensione alternata, che viene trasmessa al pulsatore e da questo all'oscilloscopio

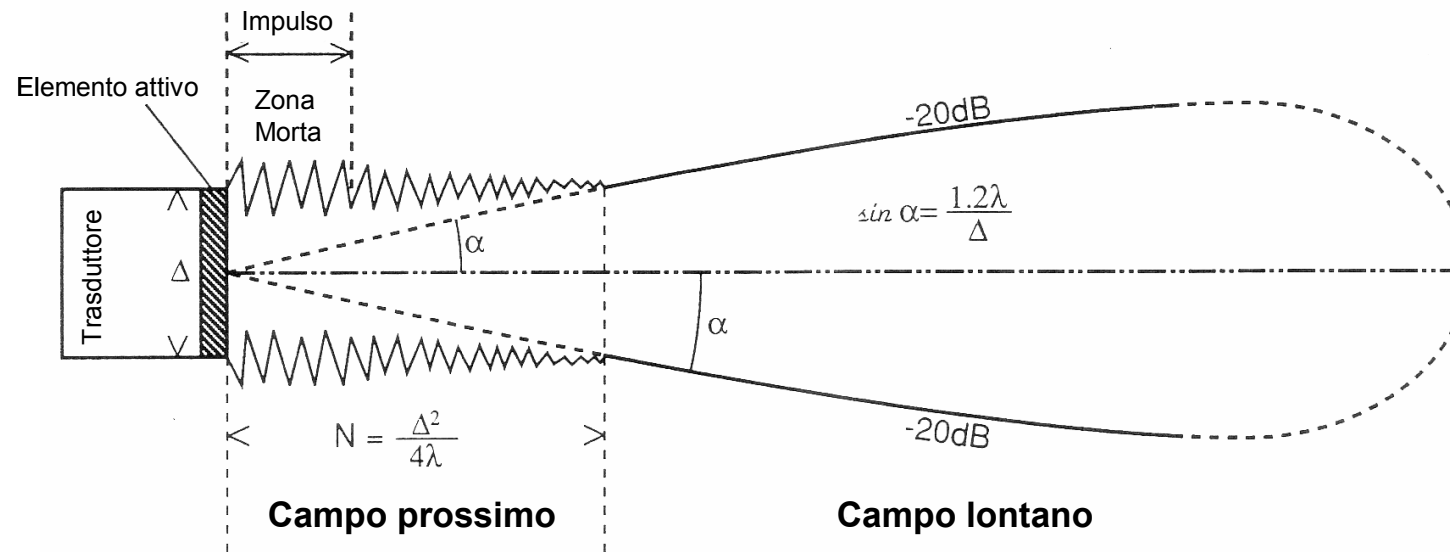
# Struttura dei trasduttori ultrasonici



- ✓ Disco oscillatore (elemento sensibile)
- ✓ Strato protettivo
- ✓ Blocco di smorzamento
- ✓ Involucro rigido metallico
- ✓ Connessioni elettriche necessarie per il collegamento della sonda con i sistemi di acquisizione e controllo.

- ✓ I materiali con il quale si realizzano attualmente i trasduttori ultrasonici sono, in generale appartenenti alla famiglia dei **piezo-ceramici polarizzati**
- ✓ Un fattore estremamente importante ai fini della scelta del trasduttore è rappresentato dallo **smorzamento dell'oscillatore** una volta che l'impulso di onde meccaniche è stato prodotto.
- ✓ Le superfici dell'oscillatore sono ricoperte con un sottile strato metallico in modo tale che sia garantito il comportamento da elettrodo
- ✓ L'elemento radiante è protetto dal mondo esterno mediante rivestimento con uno **strato cosiddetto "di usura"** (a volte indicato con il nome di "zeppa" o "scarpa") che provvede ad evitare il danneggiamento accidentale, o causato dall'uso, nonché la contaminazione con agenti solidi o liquidi

# Campo acustico di un trasduttore

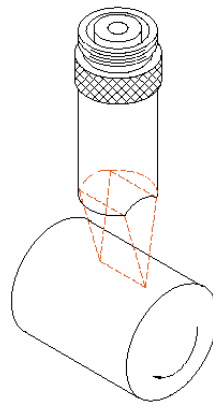


- ✓ L'intensità delle onde ultrasoniche all'interno del fascio generato dal trasduttore non è costante, ma varia a causa delle dimensioni finite della sorgente che danno luogo a fenomeni di diffrazione.
- ✓ Nel campo prossimo l'intensità è fluttuante tra un valore minimo ed uno massimo. All'interno del campo prossimo, la distanza corrispondente al tempo di durata dell'impulso si definisce "zona morta"
- ✓ A parità di materiale testato, sonde ad alta frequenza possiedono una lunghezza di campo prossimo più grande.
- ✓ Il fascio ultrasonico, superata la zona del campo prossimo tende a presentare caratteristiche di maggiore stabilità e, dal punto di vista geometrico, si fa evidente la tendenza a divergere

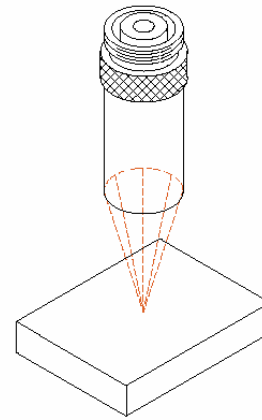


# Trasduttori focalizzati

- ✓ Nei trasduttori focalizzati le onde ultrasoniche vengono direzionate impiegando opportuni sistemi di “lenti acustiche” oppure (come capita più di frequente) modellando opportunamente la superficie dell’elemento radiante in modo tale che **l’emissione sia concentrata virtualmente su una linea** (focalizzazione cilindrica) o **su un punto** (focalizzazione sferica).
- ✓ I trasduttori focalizzati vengono **impiegati essenzialmente nelle ispezioni in immersione** e consentono di ottenere elevati livelli di risoluzione che sono richiesti in modo particolare quando si eseguono scansioni automatizzate di provini anche a geometria complessa.



Focalizzazione cilindrica



Focalizzazione sferica

## Sensibilità e risoluzione

- ✓ La **sensibilità** rappresenta la capacità di un sistema ultrasonico di rilevare un difetto posizionato ad una data profondità in un pezzo. Maggiore è l'intensità del segnale ricevuto dal difetto (o riflettore) maggiore è la sensibilità del sistema
- ✓ La **risoluzione assiale** rappresenta la capacità di un sistema ultrasonico di produrre simultanee e distinte indicazioni da riflettori dislocati su punti molto vicini tra loro
- ✓ La **risoluzione superficiale** rappresenta la capacità di un sistema ultrasonico di rilevare difetti posizionati vicino alla superficie del pezzo

# Trasduttori focalizzati

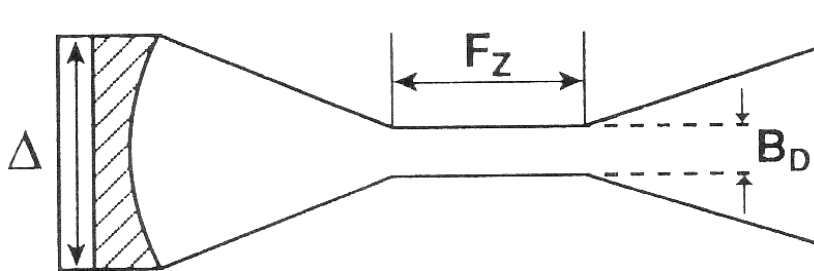
Dal punto di vista delle proprietà del campo acustico, i trasduttori focalizzati sono caratterizzati dai seguenti parametri:

✓ Il **diametro focale a -6dB BD** (riduzione dell'ampiezza del segnale del 50%) che è espresso dalla relazione

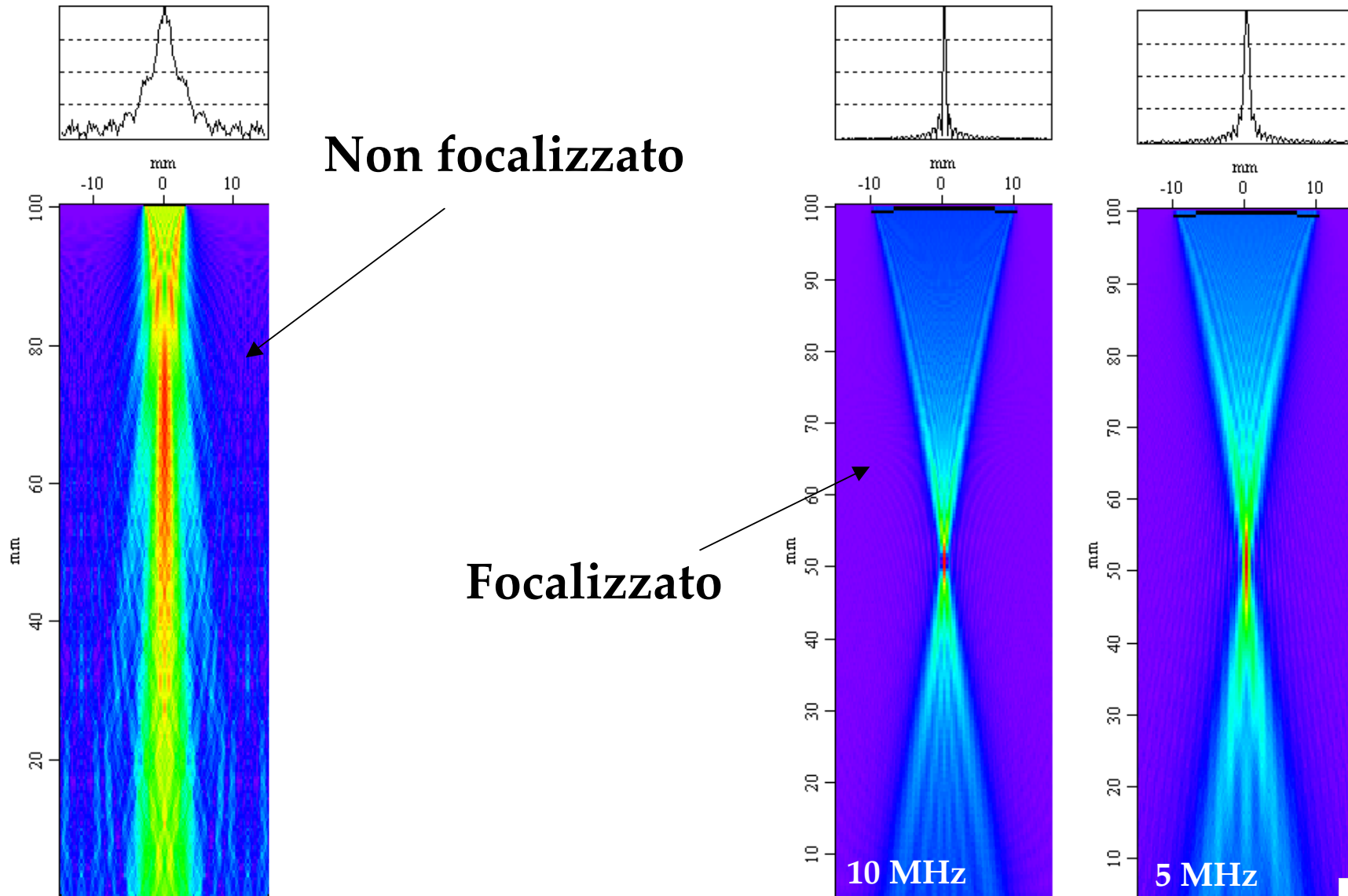
$$BD(-6dB) = \frac{1.02Fc}{f\Delta}$$

✓ La **lunghezza della zona focale  $F_Z$** , che esprime in sostanza la dimensione della regione spaziale nella quale il fascio si mantiene a sezione costante e pari al diametro BD

$$F_Z = N \cdot S_F^2 \cdot \left[ \frac{2}{1 + 0.5S_F} \right]$$



# Campo acustico di un trasduttore



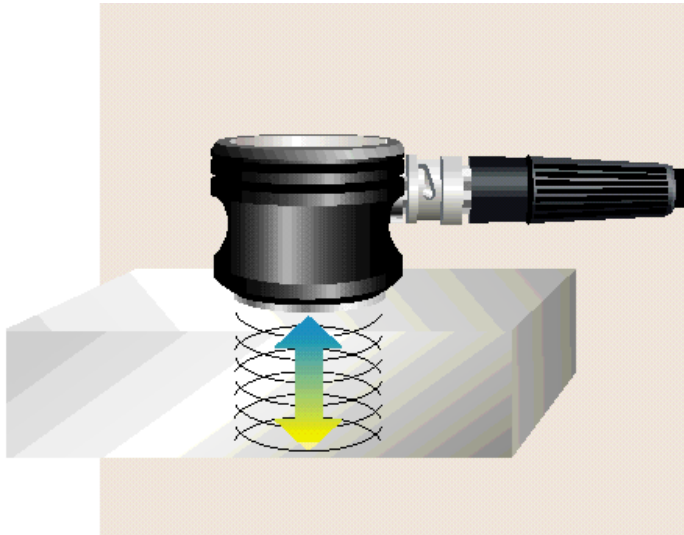
Non focalizzato

Focalizzato

10 MHz

5 MHz

# Trasduttori a contatto standard



Un trasduttore a contatto è costituito da un singolo cristallo che emette onde longitudinali, progettato per l'uso a diretto contatto con il pezzo da testare.

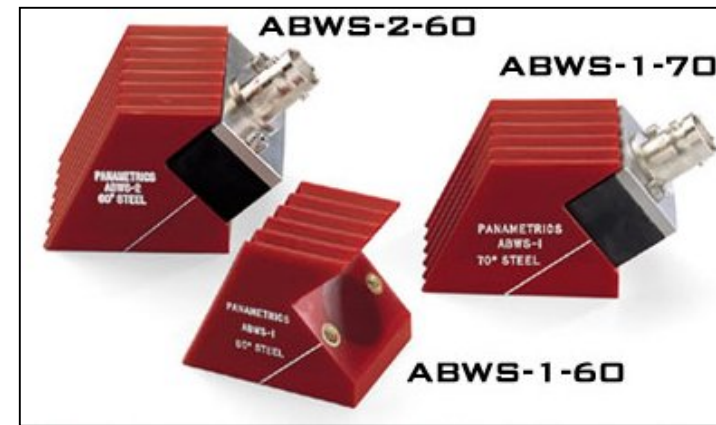
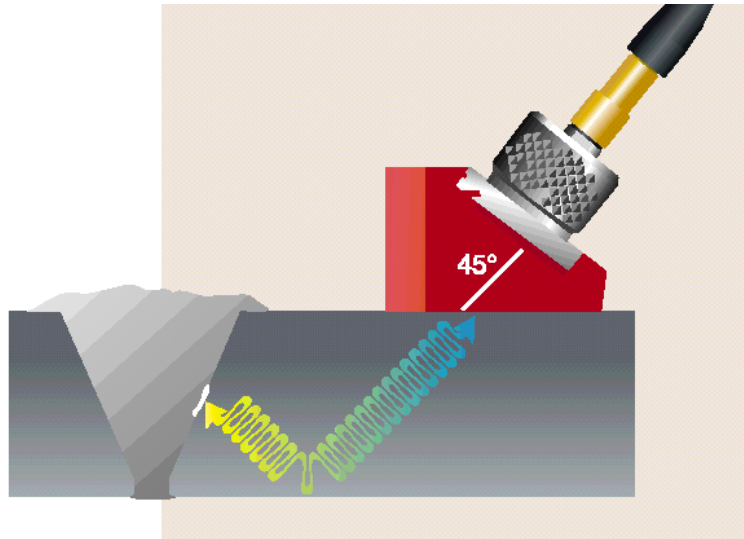
## Vantaggi:

- elevata resistenza per l'uso industriale
- l'impedenza acustica del cristallo è prossima a quella di molti metalli

## Applicazioni:

- rilevamento difetti e cricche
- misure di spessore
- caratterizzazione dei materiali
- ispezione di piastre, billette, barre, getti etc.

# Trasduttori a contatto angolati



Un trasduttore angolato è costituito da un singolo cristallo orientato in modo tale da produrre onde ultrasoniche longitudinali o di taglio per ispezioni oblique. L'impiego tipico di questo tipo di sonde è la ricerca di difetti posizionati in modo non parallelo alle superfici del pezzo

## Vantaggi:

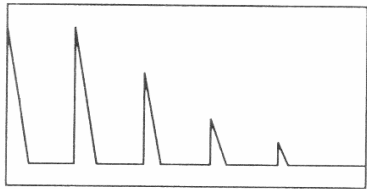
- l'angolo è pienamente personalizzabile

## Applicazioni:

- rilevamento difetti e cricche
- ispezione di piastre, billette, barre, getti etc. o componenti finiti per la verifica strutturale o delle saldature

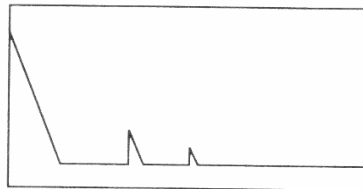
# Quale trasduttore scegliere?

Basse frequenze

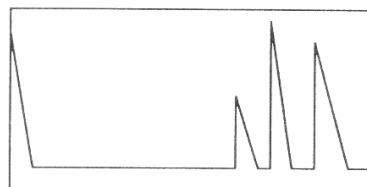
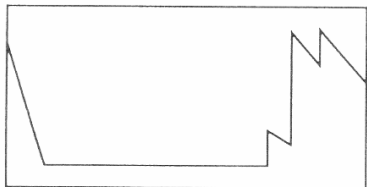


*Elevato livello di penetrazione  
Scarsa risoluzione spaziale*

Alte frequenze



*Basso livello di penetrazione  
Elevata risoluzione spaziale*



✓ La selezione del trasduttore ottimale per un certo tipo di controllo, **dipende in larga misura dalle caratteristiche del materiale da testare** e, in particolare, dalle sue **capacità di attenuazione** del fascio ultrasonico.

✓ In generale le onde ultrasoniche ad **alta frequenza** presentano migliori caratteristiche **per ciò che riguarda la risoluzione** mentre le onde di **bassa frequenza** sono **maggiormente in grado di penetrare elevati spessori di materiale** o (ciò che è lo stesso) di consentire l'esecuzione di indagini su materiali fortemente assorbenti come gomme, plastiche ecc.

# Le tecniche di ispezione

In generale, i CND eseguiti con il metodo ultrasonico si suddividono in due grandi famiglie:

## 1. Tecniche “pulse-echo” (o “eco-impulso”, “in riflessione”)

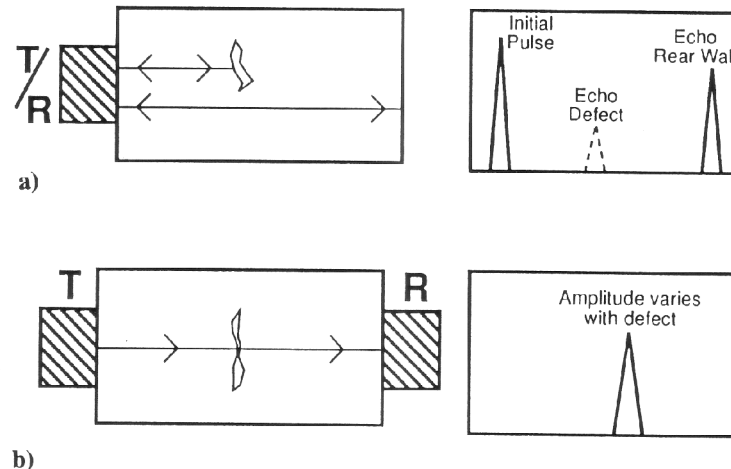
Le onde ultrasoniche investono il pezzo da testate, penetrano in esso e vengono riflesse e rifratte dalle superfici che delimitano il componente stesso. Sono proprio le riflessioni interne (eco) che vengono esaminate e forniscono informazioni sulla presenza di eventuali difetti nel pezzo

## 1. Tecniche “through-transmission” (“ in trasmissione”)

Nelle tecniche in trasmissione si esamina esclusivamente l’onda che ha attraversato il corpo senza tenere in considerazione le eco riflesse



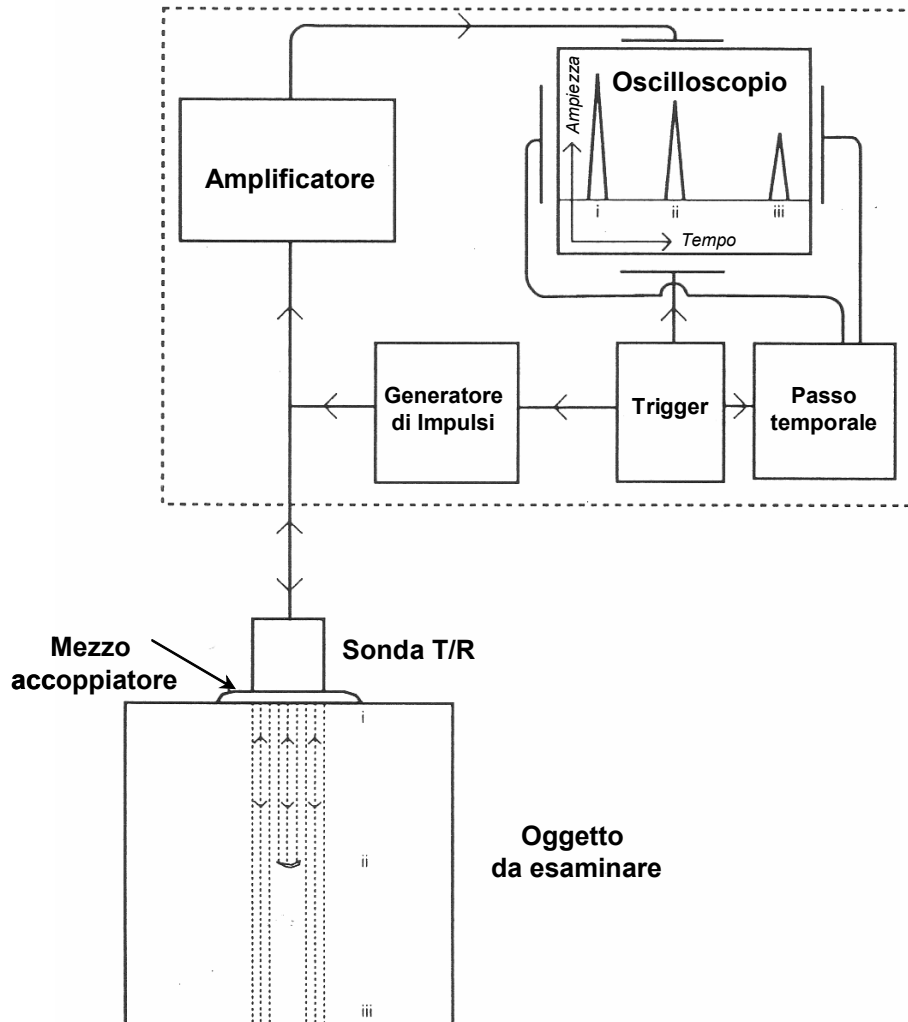
# Le tecniche di ispezione



- Nello schema a) è proposto un controllo in riflessione che impiega un solo trasduttore (che incorpora in sé le funzioni T ed R. L'onda ultrasonica viene emessa dal trasduttore, attraversa il materiale e viene riflessa sia dalla superficie opposta del pezzo ("Echo Rear Wall") che dal difetto. Il segnale ultrasonico mostra dunque tre tracce distinte e facilmente identificabili.

- Lo schema di controllo b) rappresenta la classica situazione di impiego della tecnica in trasmissione, che prevede l'impiego di due trasduttori uno dei quali emette il fascio di onde ultrasoniche (T) mentre l'altro, posto sulla superficie opposta a quella di ingresso delle onde, raccoglie le onde stesse dopo che esse hanno attraversato il pezzo e sono state riflesse dalle eventuali discontinuità incontrate lungo il percorso.

# Setup per la tecnica pulse-echo



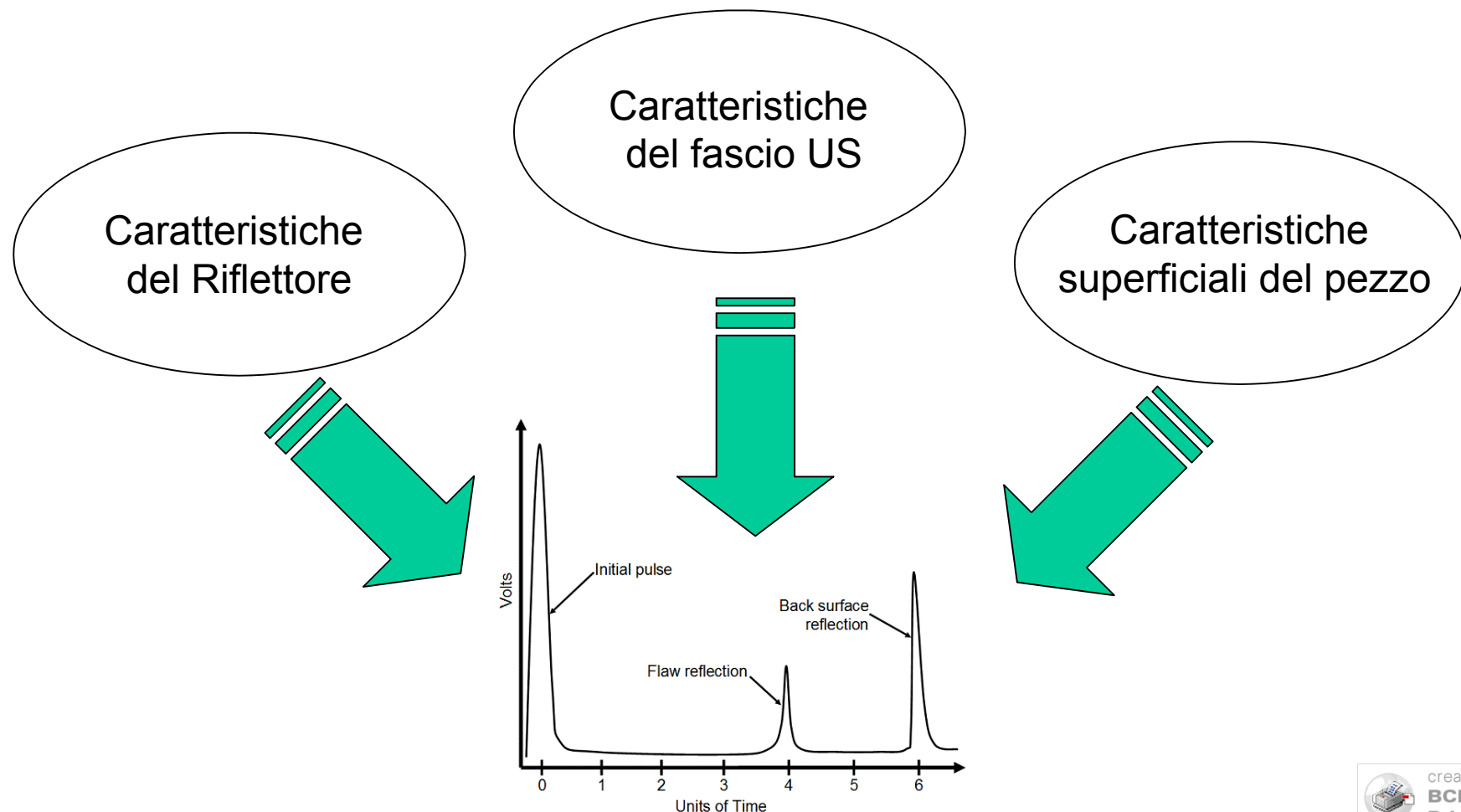
✓ Il trasduttore genera le onde ultrasoniche sotto forma di impulsi che vengono riflessi dalla superficie opposta del pezzo o da eventuali discontinuità presenti al suo interno e raccolti dallo stesso trasduttore (che dunque in questo caso agisce da ricevitore).

✓ Il tempo necessario all'impulso per percorrere la distanza tra le due superfici opposte dell'oggetto è mostrato sul display dell'oscilloscopio e, per garantire una più facile leggibilità del segnale, gli impulsi sono inviati ad intervalli di tempo regolari.

✓ La presenza di un difetto da' origine ad un segnale che si colloca temporalmente in anticipo rispetto alla eco legata alla riflessione del fascio ultrasonico sulla superficie del pezzo opposta a quella di ingresso

# Valutazione entità difetti

In un controllo ultrasonico in riflessione, l'ampiezza dell'onda riflessa (dalla quale scaturiscono tutte le valutazioni relative alla caratterizzazione delle discontinuità) è tipicamente influenzata da tre parametri

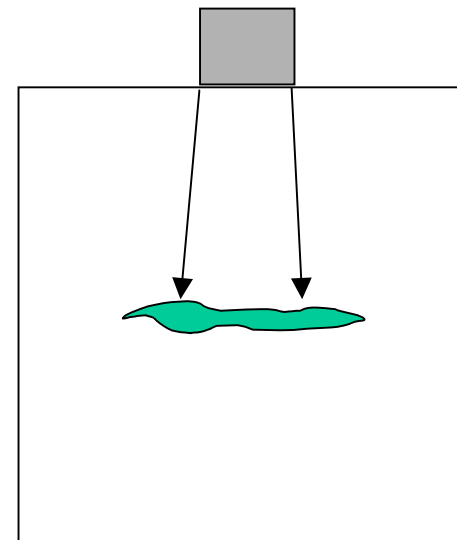
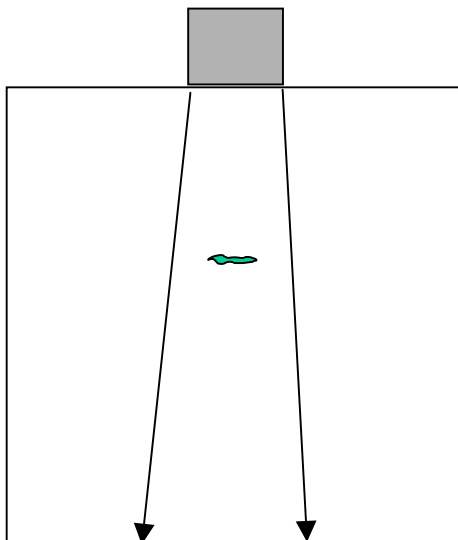


# Valutazione entità difetti

- **Le caratteristiche del riflettore** che influenzano l'ampiezza dell'onda riflessa sono:
  - ✓ *la conformazione (geometria di contorno)*
  - ✓ *l'orientamento (riflettori a  $90^\circ$  ben visibili, a  $0^\circ$  praticamente invisibili)*
  - ✓ *la rugosità (alta rugosità  $\Rightarrow$  scattering)*
  - ✓ *la grandezza (area)*
- **Le caratteristiche del fascio ultrasonoro** influenzano l'ampiezza dell'eco riflessa al variare della distanza tra l'area riflettente e il trasduttore. Nelle sonde longitudinali, dunque, si riscontrano comportamenti differenti a seconda che il riflettore si trovi all'interno del campo prossimo o di quello lontano; nelle sonde focalizzate la risposta varia a seconda che ci si trovi o meno nella zona focale.
- **Le caratteristiche del pezzo in esame** che influenzano l'ampiezza del segnale riflesso sono legate al suo grado di rugosità, da cui dipende la trasmissione del fascio ultrasonoro attraverso l'interfaccia sonda-materiale e alla sua "trasparenza" (caratteristiche attenuative)

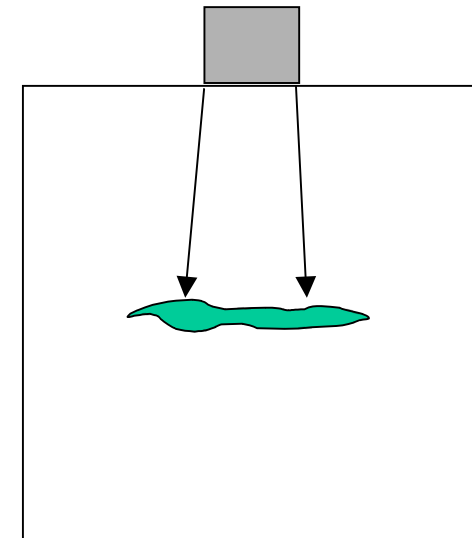
# Rilevamento di discontinuità

- La discontinuità rappresenta un ostacolo alla propagazione delle onde ultrasoniche all'interno del materiale
- Il disturbo si concretizza, dal punto di vista fisico, in una variazione delle proprietà acustiche dei mezzi attraversati dal fascio ultrasonico
- A seconda del rapporto tra dimensione del fascio prodotto dal trasduttore e dimensioni della discontinuità si distinguono due casi di interesse



# Grandi discontinuità

- Si definisce “discontinuità grande” quella avente dimensioni superiori rispetto al fascio incidente
- In questo caso, la propagazione dell'intero fascio è ostacolata dalla presenza della discontinuità
- Il segnale sul monitor dell'oscilloscopio presenta (oltre al picco di emissione) soltanto il picco corrispondente alla riflessione sulla discontinuità, e dunque è possibile stimare la sua profondità
- Il segnale può presentarsi invariato anche per differenti posizioni della sonda in funzione del rapporto tra dimensioni della discontinuità e larghezza del fascio



## Grandi riflettori

Se un riflettore presenta una superficie dimensionalmente superiore alla sezione del fascio ultrasonoro, quest'ultimo viene riflesso totalmente.

Nel caso di sonde a fascio longitudinale, l'ampiezza dell'eco riflessa, in funzione della posizione del riflettore sarà:

- *Nel campo prossimo pari all'ampiezza dell'eco del fascio incidente*
- *Nel campo lontano, decrescente linearmente con la distanza dal riflettore*

Nel caso di sonde focalizzate tutto il fascio viene riflesso essendo la macchia focale molto piccola.

Per valutare razionalmente le dimensioni di tali riflettori viene normalmente impiegata la **“tecnica del contorno”**

# Tecnica del contorno

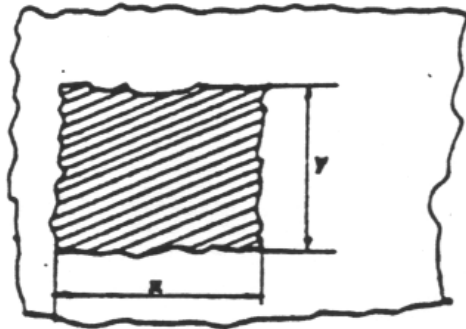
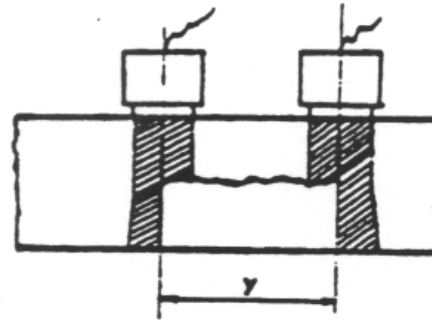
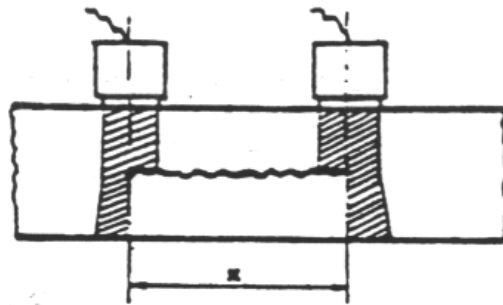
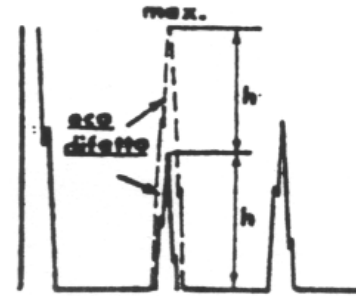
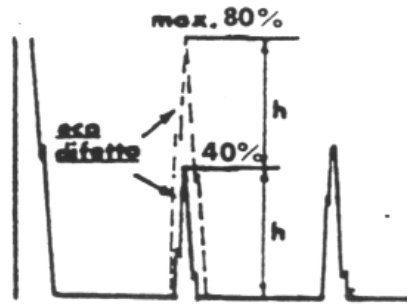
La tecnica del contorno viene impiegata nella determinazione dell'estensione di riflettori di dimensione maggiore o uguale a quella del diametro del fascio ultrasonoro

- a) Si porta il trasduttore al centro del riflettore e si regola il pulsatore fino all'ottenimento di una eco di risposta pari all'80% dell'altezza utile dello schermo
- b) si fa traslare il trasduttore prima lungo un asse e poi secondo l'altro asse ortogonale sino a rilevare 4 punti in cui si ha dimezzamento dell'ampiezza dell'eco riflessa (-6dB)
- c) rilevando le distanze tra i punti nei quali si è rilevato il dimezzamento si ottengono le dimensioni del riflettore

La tecnica del contorno trova larga applicazione nel controllo di lamiere e saldature. Naturalmente quando vengono utilizzati trasduttori ad immersione focalizzati la precisione della misura aumenta considerevolmente in ragione della ridottissima macchia focale (dell'ordine di pochi mm)

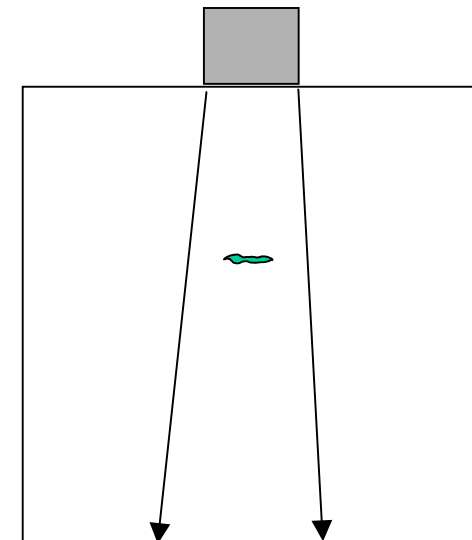


# Tecnica del contorno



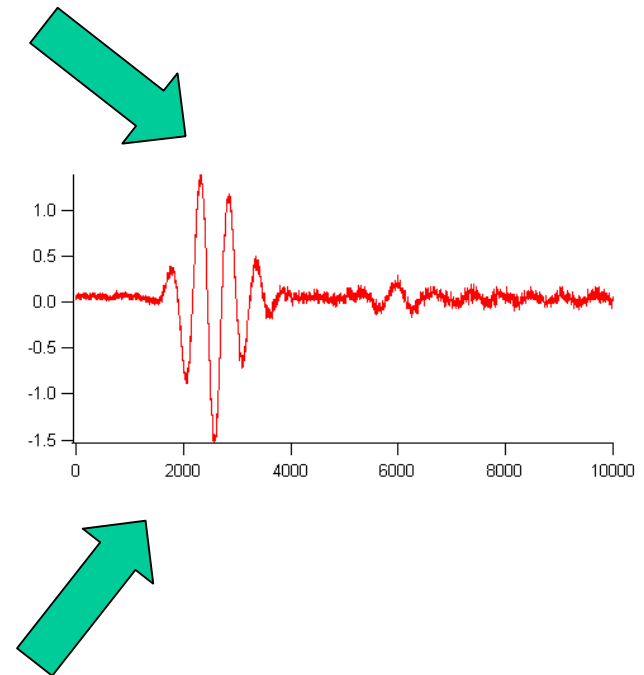
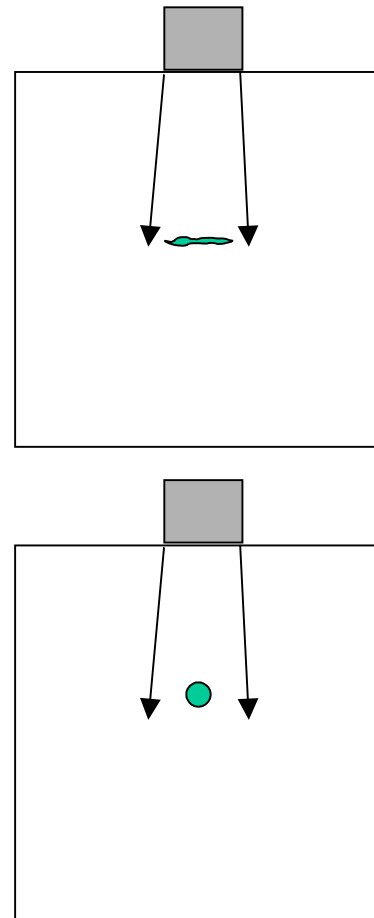
# Piccole discontinuità

- Si definisce “discontinuità piccola” quella di dimensioni inferiori rispetto al fascio
- In questo caso, una porzione del fascio incidente è riflessa dalla discontinuità
- La parte restante prosegue indisturbata il suo percorso e viene riflessa dalla superficie inferiore del pezzo
- Il segnale sul monitor dell'oscilloscopio presenta (oltre al picco di emissione) un picco di fondo (corrispondente alla riflessione sulla seconda parete del pezzo) ed un picco anticipato di un tempo proporzionale alla profondità della discontinuità nel volume.



# Valutazione entità difetti

- La valutazione dell'estensione dei riflettori si esegue per comparazione impiegando segnali di riferimento provenienti da riflettori noti
- Tecniche impiegate: curve Distanza-Ampiezza (DAC) per la definizione del diametro equivalente (piccoli riflettori)
- Per diametro equivalente di una indicazione si intende il diametro di un riflettore circolare, posto alla stessa profondità, che riflette verso il trasduttore la stessa pressione acustica, fornendo sul video dell'oscilloscopio, un segnale di uguale ampiezza rispetto a quello dell'indicazione incognita



# Valutazione entità difetti

## Caso di un piccolo riflettore:

Se un riflettore presenta una superficie dimensionalmente inferiore alla sezione del fascio ultrasonoro, soltanto la parte del fascio corrispondente al riflettore viene riflessa verso il trasduttore; in questo caso il riflettore si comporta a sua volta come emettitore.

Nel caso di sonde longitudinali, l'ampiezza dell'eco riflessa in funzione della posizione del riflettore sarà:

- *nel campo prossimo proporzionale all'area del riflettore (intesa come sezione normale al fascio) indipendentemente dalla distanza riflettore-trasduttore*
- *nel campo lontano, proporzionale all'area del riflettore con diminuzione legata al quadrato della distanza riflettore-trasduttore a causa della divergenza del fascio*

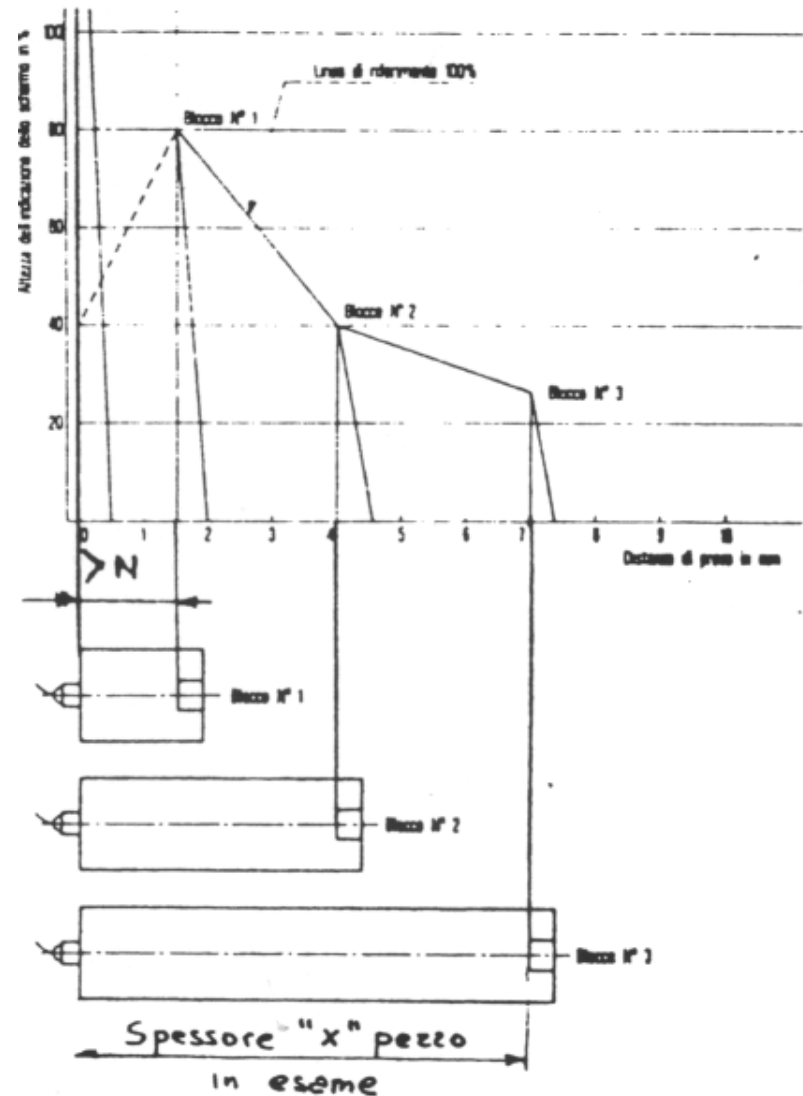
Per la valutazione razionale delle dimensioni di tali riflettori viene normalmente impiegata la tecnica delle Curve Distanza Ampiezza (DAC)

Nel caso di sonde focalizzate, l'ampiezza dell'eco riflessa sarà massima in corrispondenza del fuoco della sonda e risulterà indebolita al di fuori del campo focale

# Tecnica delle curve distanza-ampiezza

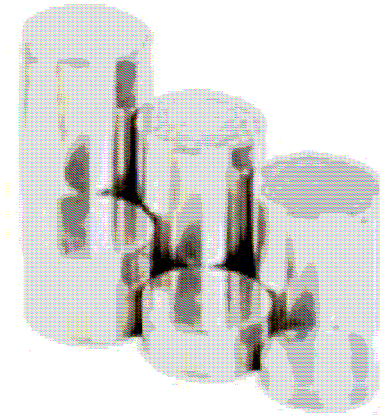
Tale metodica trova impiego nella valutazione di piccoli riflettori e implica l'uso di:

- Curve Distanza Ampiezza (DAC, Distance Amplitude Correction) ricavate mediante l'utilizzo di blocchi campione o su difetti artificiali localizzati sullo stesso particolare in esame
- Curve caratteristiche di tipo universale (DGS, Distance Gain Size)
- La curva DAC si costruisce posizionando la sonda sul blocco più corto e portando l'ampiezza dell'eco riflessa dal foro all'80% dell'altezza dello schermo e poi posizionando la sonda sugli altri blocchi; si registrano così le ampiezze delle eco riflesse dai fori dei successivi blocchi utilizzati. Congiungendo i punti si ottiene la curva DAC



# Tecnica delle curve distanza-ampiezza

Nel caso in cui si utilizzino i blocchi campione, occorre correggere la curva DAC aumentando o diminuendo il livello di amplificazione in funzione della differenza di attenuazione esistente tra il materiale con cui sono realizzati i blocchi ed il materiale del pezzo oggetto del controllo finale



Quando si impiegano sonde longitudinali, dovendo ispezionare un particolare di spessore "x", la curva DAC può essere ottenuta utilizzando due o più blocchi campione, in funzione dello spessore da esaminare, il primo con lunghezza utile (distanza superficie-foro a fondo piatto) leggermente maggiore del campo prossimo della sonda e l'ultimo pari allo spessore "x" del particolare in esame



# Tecnica delle curve distanza-ampiezza

Normalmente le specifiche si limitano a definire il giudizio di accettazione o di rifiuto sulla base dell'osservazione che l'ampiezza generata dalla riflessione sulla discontinuità superi o meno la curva DAC

Tuttavia se si vuole eseguire una valutazione quantitativa delle dimensioni della discontinuità si può ricorrere alla relazione

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{A_1}{A_2}$$

Nella quale  $H_1$  è l'altezza della curva DAC alla profondità della discontinuità,  $H_2$  è l'altezza dell'eco prodotto dalla discontinuità,  $A_1$  l'area del foro campione con cui è stata ricavata la curva DAC e  $A_2$  l'area (incognita) della discontinuità riscontrata

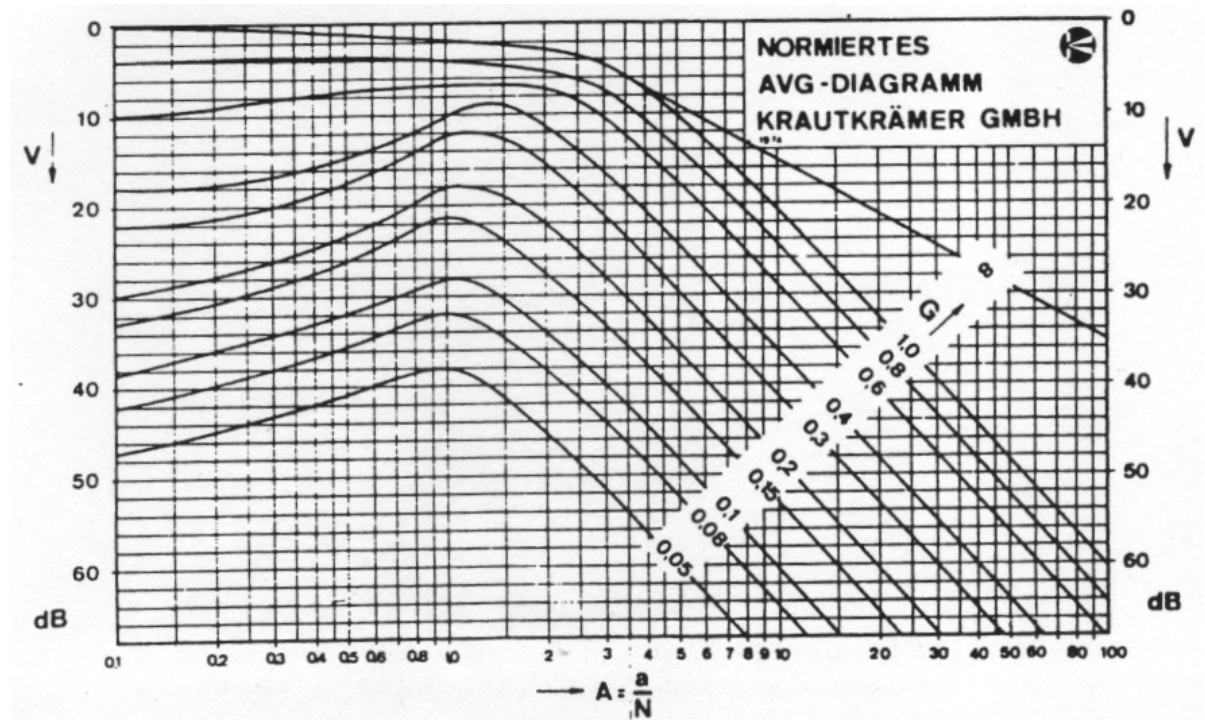
Come accennato, questa tecnica presuppone una adeguata compensazione tra curva DAC ricavata sui blocchi campione e l'eventuale attenuazione strutturale presente sul particolare in esame



# Curve caratteristiche DAC

In questo caso la valutazione viene fatta utilizzando diagrammi caratteristici DAC che riportano sotto forma di curva le ampiezze dei segnali che si avrebbero sullo schermo dalla riflessione di difetti circolari di dato diametro situati a differenti profondità

Il diagramma, cioè, stabilisce un rapporto tra le ampiezze dei segnali di difetti equivalenti di diverso diametro al variare della loro distanza dal trasduttore

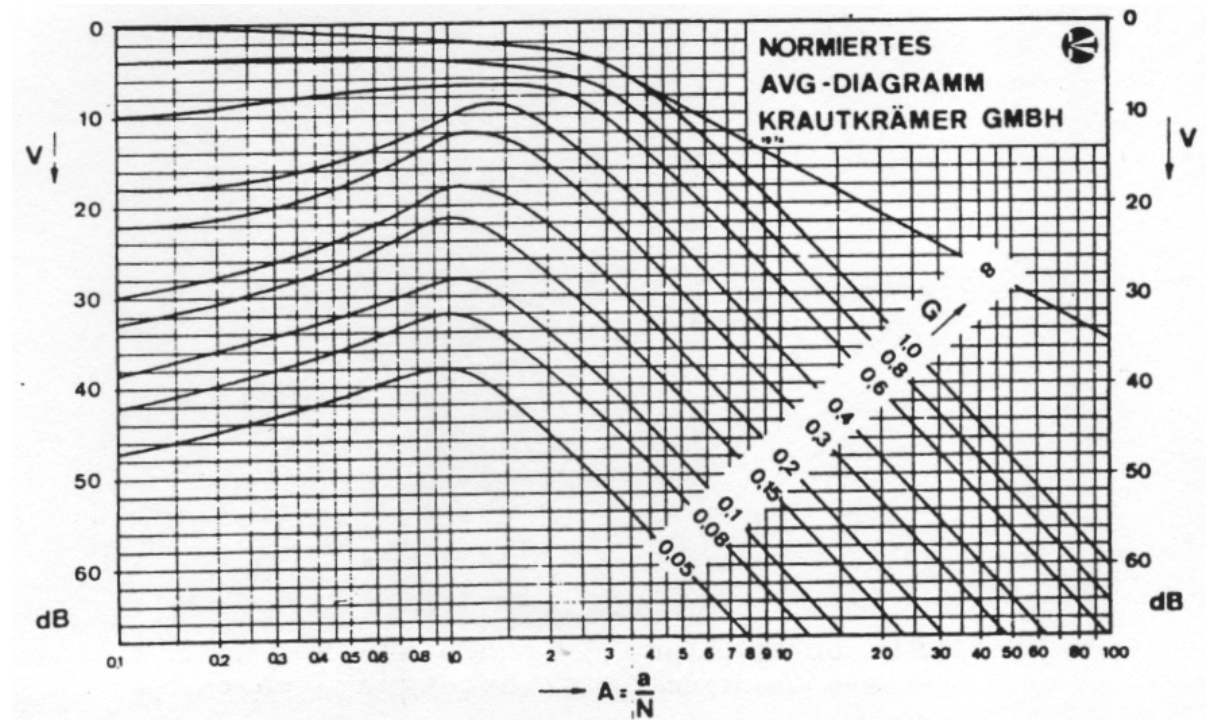




# Curve caratteristiche DAC

Tali curve possono essere riferite solo ad un singolo tipo di sonda e materiale o essere di tipo universale, cioè adattabili a tutte le sonde e materiali (però solo nel caso di sonde longitudinali)

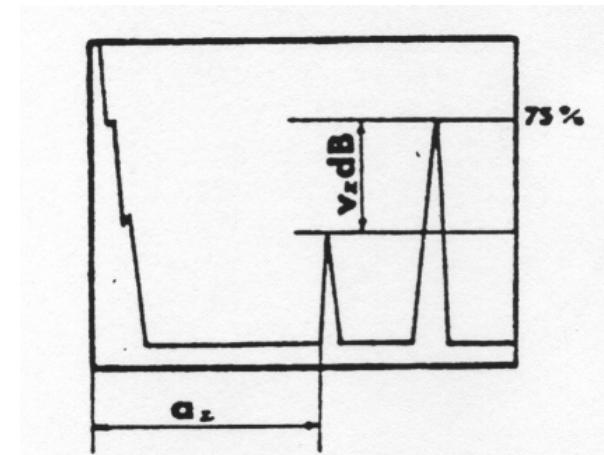
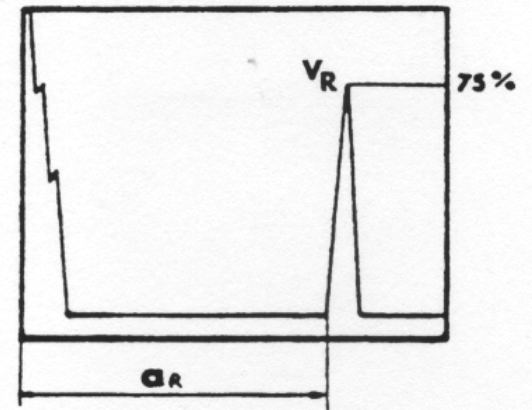
Nel secondo caso, occorre realizzare una procedura di adattamento



# Curve caratteristiche DAC

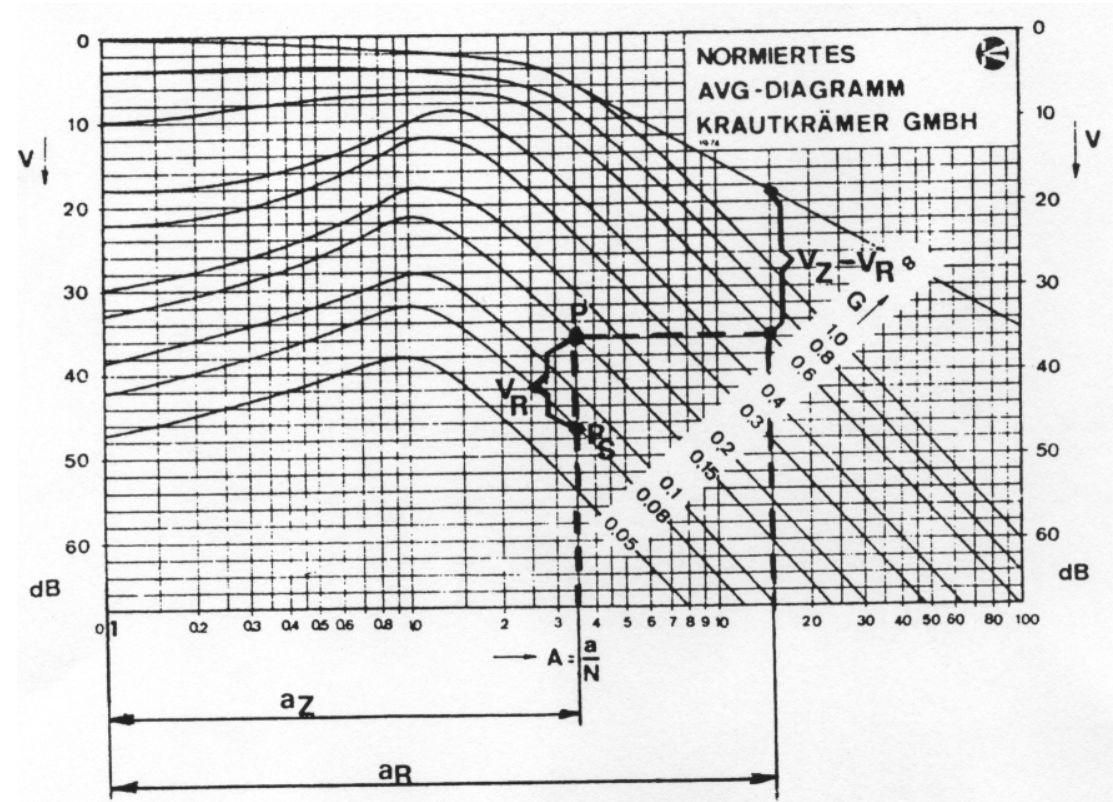
La valutazione dei difetti si esegue nel seguente modo:

1. Si porta l'eco di fondo al 75% dell'altezza utile dello schermo e si annotano i valori di tempo e ampiezza  $a_R$  e  $V_R$
2. Si legge sul diagramma, in corrispondenza dell'incrocio tra la distanza  $a_R$  e la curva  $\infty$  il valore sulle ordinate dei dB del diagramma
3. Individuata l'eco massima del difetto, si registrano i valori  $a_Z$  e  $V_Z$



# Curve caratteristiche DAC

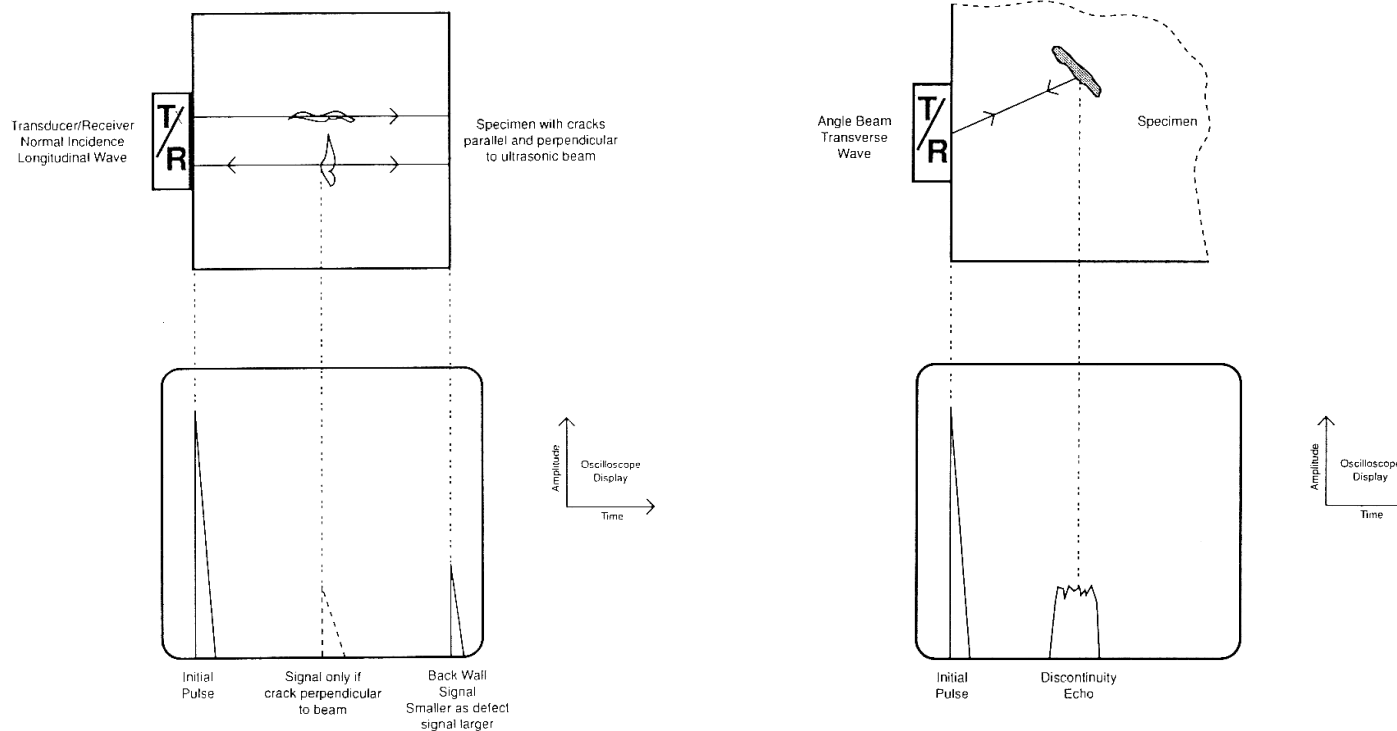
4. Alla distanza  $a_R$  dalla curva infinito si sottraggono i dB ottenuti dalla differenza  $V_Z - V_R$
5. Traslando sulle ascisse si incontra l'ordinata in corrispondenza della distanza  $a_Z$  e si marca il punto P
6. Si vede quale curva passa per il punto P e sia ha il diametro equivalente del difetto in assenza di attenuazione del materiale (moltiplicando il valore letto sulla curva per il diametro del trasduttore)



# Interpretazione del segnale

*La comparsa di una eco inattesa sul display dell'oscilloscopio non è di per sé informazione sufficiente per attestare che il pezzo è caratterizzato da difettosità.*

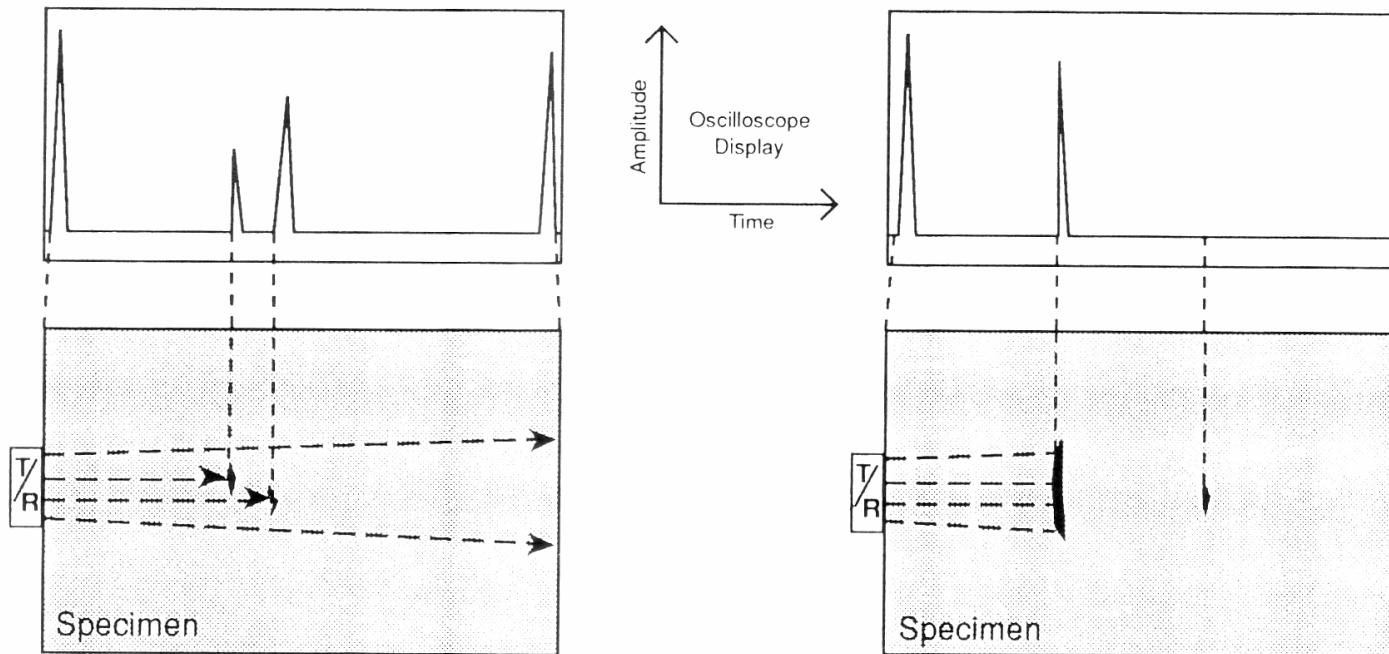
## Difetti isolati



# Interpretazione del segnale

*La comparsa di una eco inattesa sul display dell'oscilloscopio non è di per sé informazione sufficiente per attestare che il pezzo è caratterizzato da difettosità.*

## Difetti multipli





## Controlli “in immersione”

Un problema fondamentale che si pone nel CND ultrasonoro è rappresentato dalla necessità di garantire un accoppiamento acustico sonda-pezzo adeguato e costante perché attraverso di esso viene trasmesso il flusso dell'energia ultrasonora in emissione e ricezione.

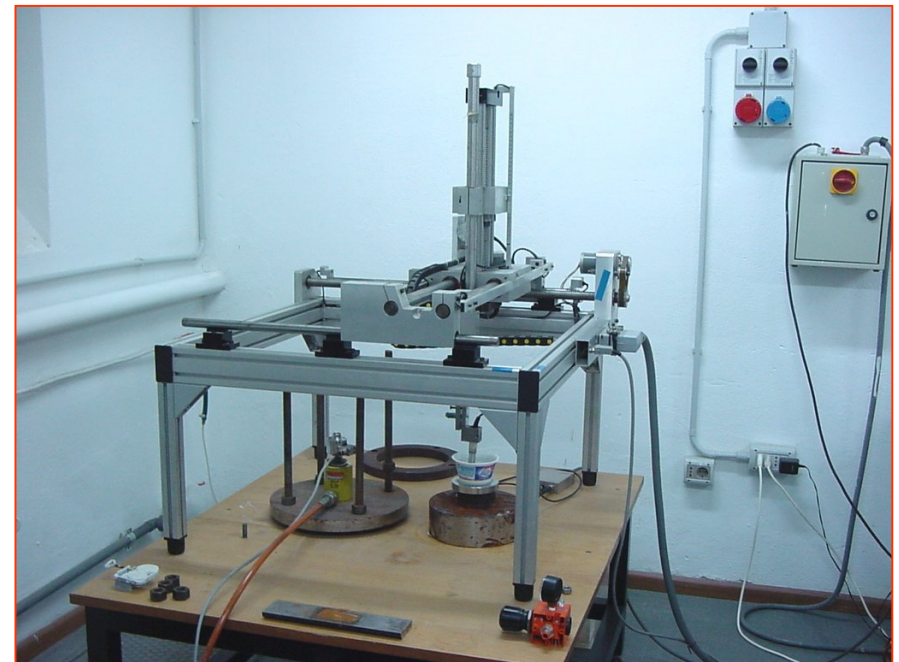
Nel metodo in immersione questo problema è risolto immergendo sia il trasduttore che il pezzo in acqua (o altro liquido opportuno); in tal modo gli ultrasuoni vengono inizialmente trasmessi in acqua e, solo dopo un certo percorso in essa, giungono all'interfaccia liquido-pezzo dove ha inizio il percorso nel materiale

### Tale procedura consente di ottenere alcuni indubbi vantaggi:

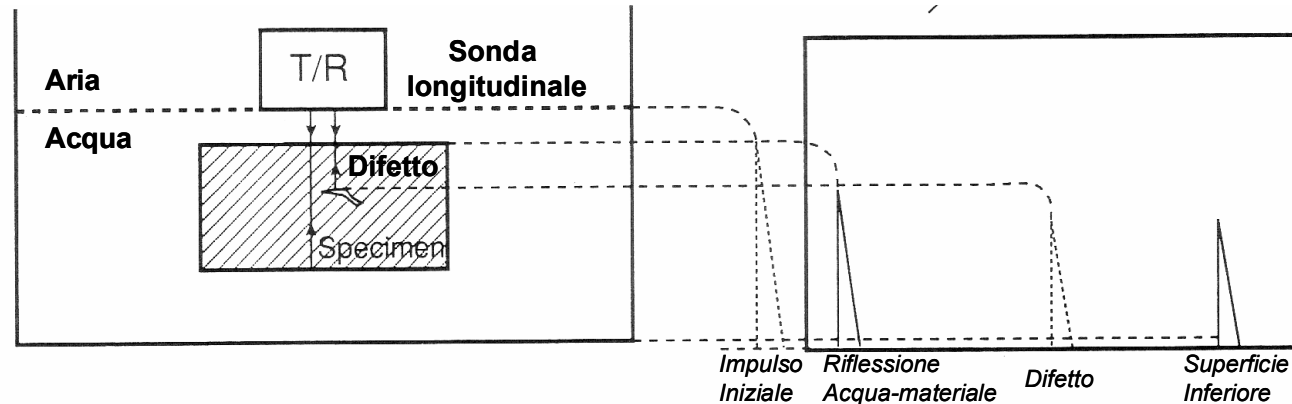
- ✓ L'accoppiamento tra sonda e pezzo è assolutamente costante e uniforme (e ciò garantisce una altrettanto uniforme sensibilità e stabilità del segnale)
- ✓ Possono essere testati pezzi aventi anche geometria complessa
- ✓ Possono essere impiegati sistemi di ispezione automatizzati
- ✓ La possibilità di impiegare sonde focalizzate aumenta la risoluzione e la sensibilità del sistema

# Controlli “in immersione”

- Nelle realizzazioni più semplici il sistema di controllo è costituito da una vasca munita di guide sulle quali scorre un carro ponte con slitta mobile per ottenere i due movimenti fondamentali sul piano (XY); sulla slitta è montato un manipolatore per i movimenti verticali e di rotazione della sonda
- Nelle applicazioni orientate a controlli specializzati le movimentazioni pezzo-sonda vengono adattate in funzione del tipo di test; ad esempio un tondo può essere fatto ruotare mentre la sonda avanza ecc.
- Nei casi di componenti di dimensioni elevate, è possibile superare la necessità di una immersione completa impiegando i cosiddetti “squirter” o “bubblers”



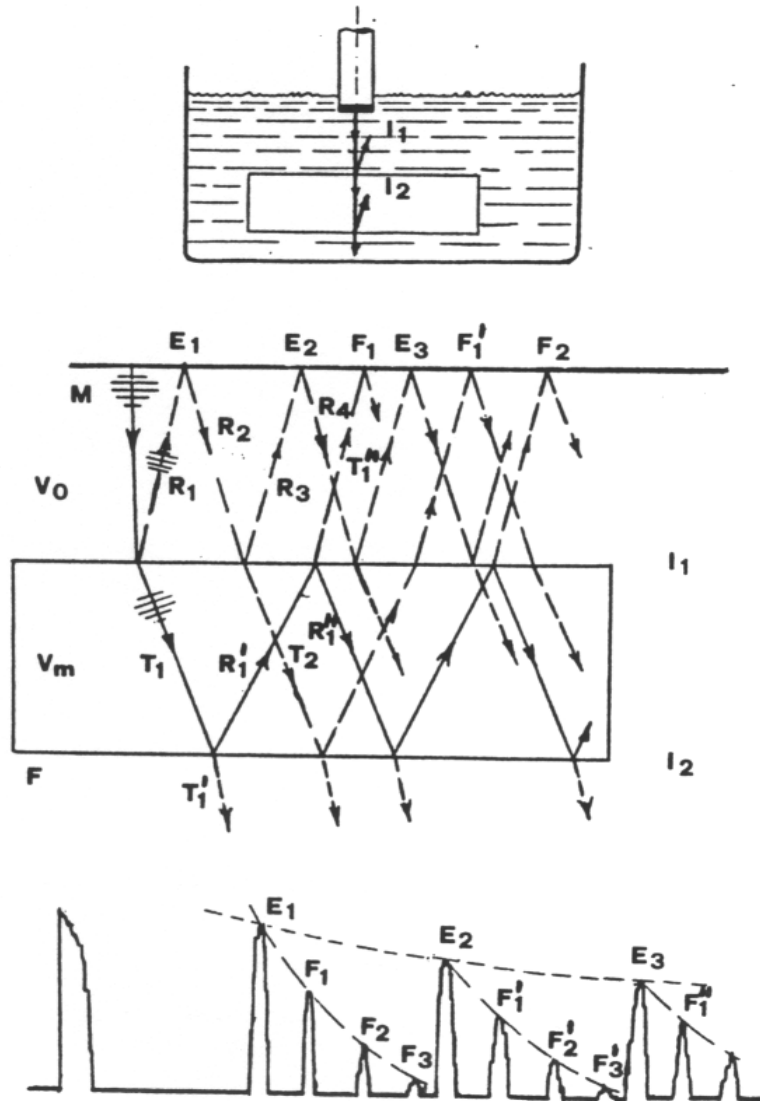
# Controllo in immersione



- ✓ L'oscilloscopio mostra un **primo picco** che è legato all'impulso di emissione del trasduttore (tratteggiato in figura) e un picco di ampiezza minore che rappresenta la prima riflessione sulla superficie di ingresso del fascio
- ✓ Il fascio, che è stato parzialmente riflesso dalla superficie di ingresso e ha prodotto la traccia di ritorno visualizzata nel primo picco, è in parte trasmesso all'interno del componente e prosegue la sua corsa fino ad incontrare la **discontinuità** che, in quanto elemento a diversa impedenza acustica, genera anch'esso una **parziale riflessione e trasmissione**.
- ✓ La riflessione evidenzia un **secondo picco** (tratteggiato) che, come si può intuire, compare solo nel momento in cui **almeno una porzione del fascio ultrasonico va ad incidere sul difetto**, mentre nelle restanti regioni del pezzo si evidenzia una terza eco causata dalla riflessione del fascio sulla superficie inferiore del materiale.



# Principi del controllo ad immersione

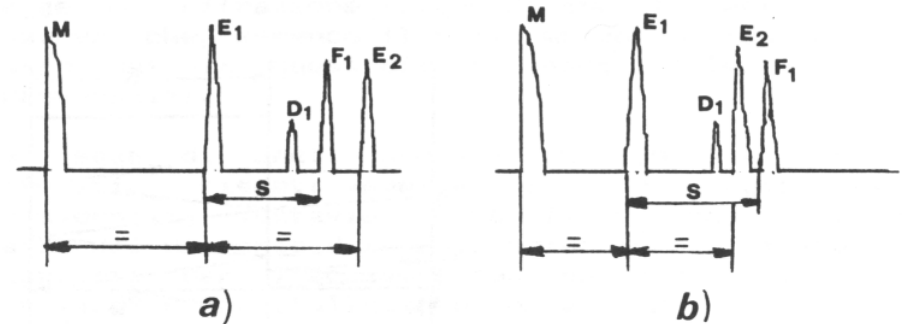
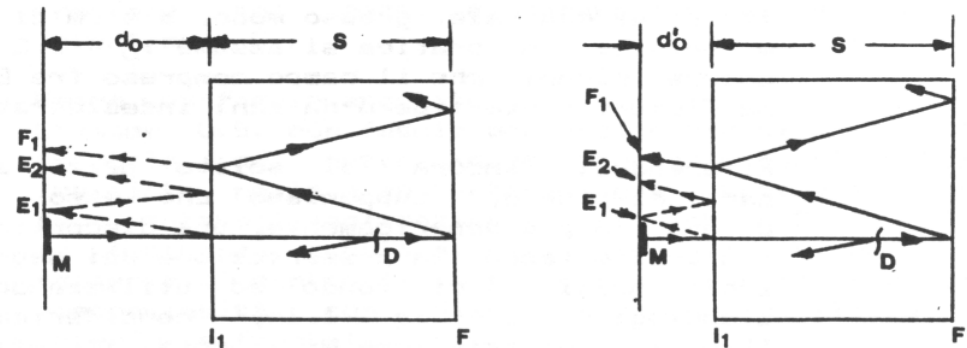


Rispetto al controllo a contatto, occorre considerare il percorso del fascio dal trasduttore al pezzo, con relativi fenomeni di attenuazione nell'acqua, nonché le perdite di segnale aggiuntive originate dalle riflessioni multiple in corrispondenza di tutte le interfacce materiale-acqua presenti.

# Principi del controllo ad immersione

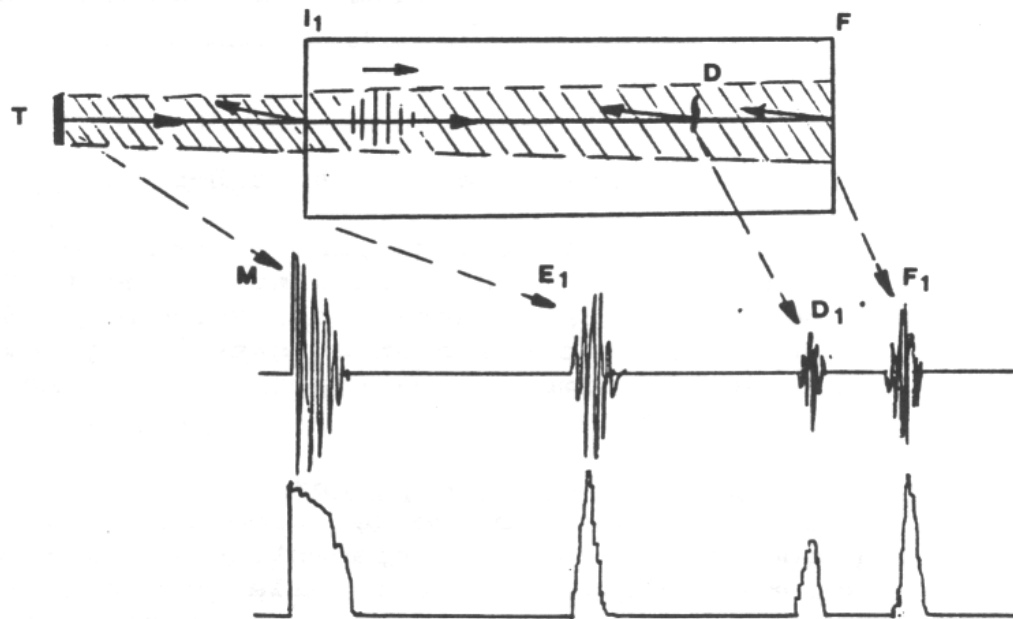
Prima di effettuare il controllo ad immersione occorre verificare che la distanza in acqua sonda-pezzo, sia tale da far sì che il tempo di transito in acqua sia maggiore del tempo di transito nel pezzo

Infatti se questa condizione non è soddisfatta, si corre il rischio che l'eco di seconda emissione si interponga tra l'eco di prima riflessione e quello di fondo (zona potenzialmente interessata dalla presenza di difetti) ostacolando l'indagine



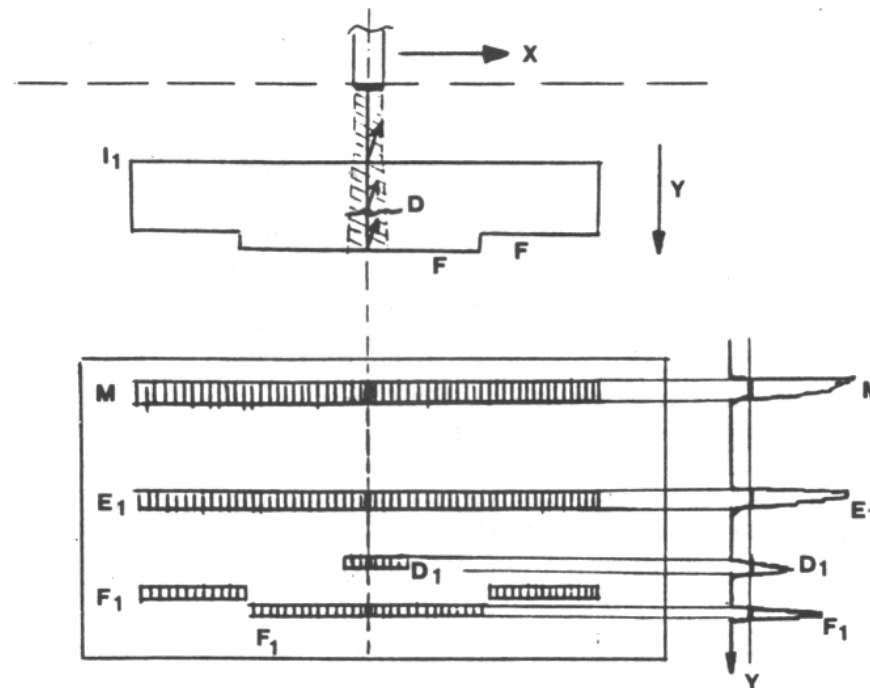
## Presentazione del segnale: A-Scan

- Rappresenta il modo più diffuso di presentazione del segnale ultrasonico. Il trasduttore ispeziona singole zone puntuali
- L'ampiezza del segnale è mostrata in funzione del tempo
- Ad ogni posizione del trasduttore corrisponde una "colonna" di materiale ispezionato



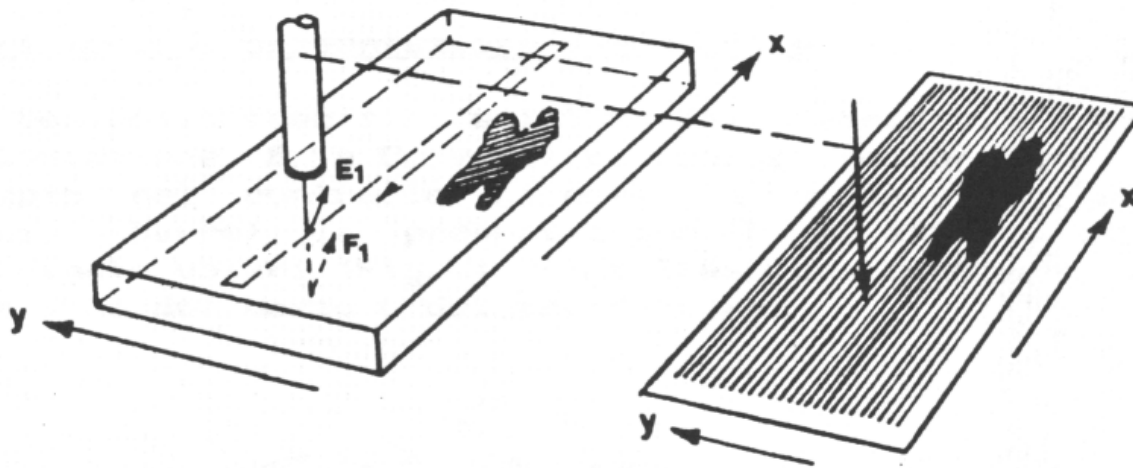
# Presentazione del segnale: B-Scan

- Il trasduttore è movimentato sull'asse X mediante un sistema meccanizzato
- Il segnale rilevato viene accoppiato alla posizione per ciascuna eco monitorata (impulso, prima interfaccia, fondo del pezzo, eventuali difetti)



## Presentazione del segnale: C-Scan

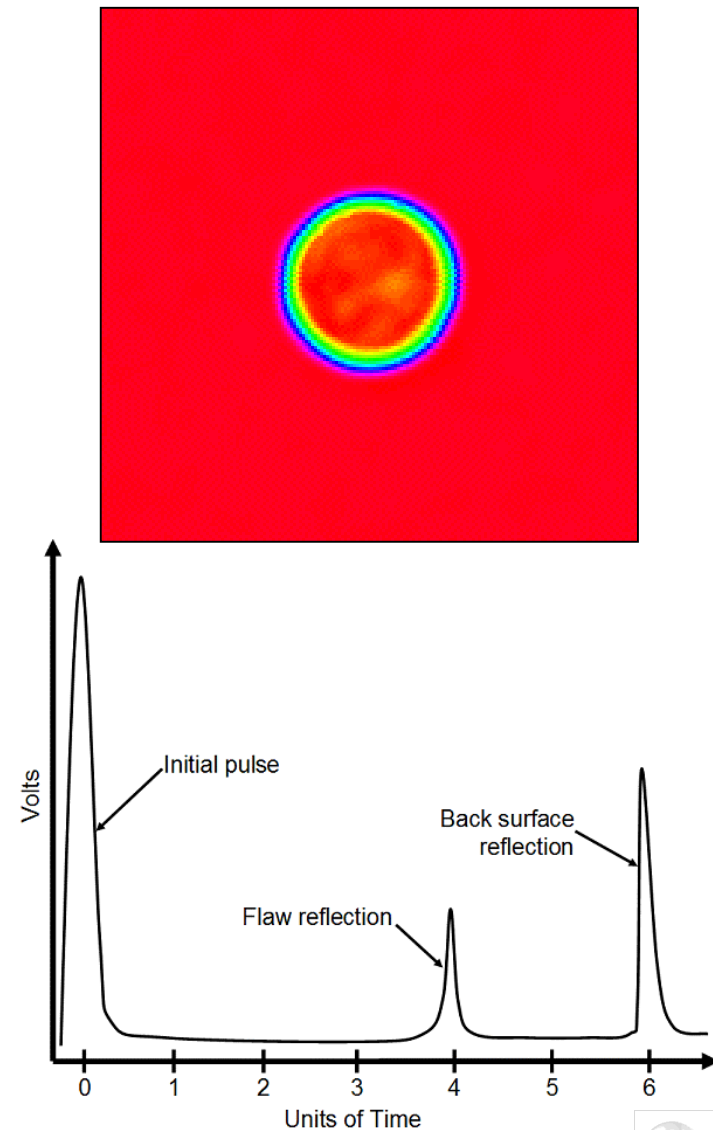
- Il trasduttore è movimentato sul piano XY mediante un sistema automatizzato (tipicamente mediante motori stepper)
- Ad ogni eco riflessa monitorata, si associa una tonalità di grigio o di colore per la rispettiva coordinata.
- In questo modo si riesce a visualizzare il difetto nella sua estensione reale



# Presentazione del segnale: considerazioni

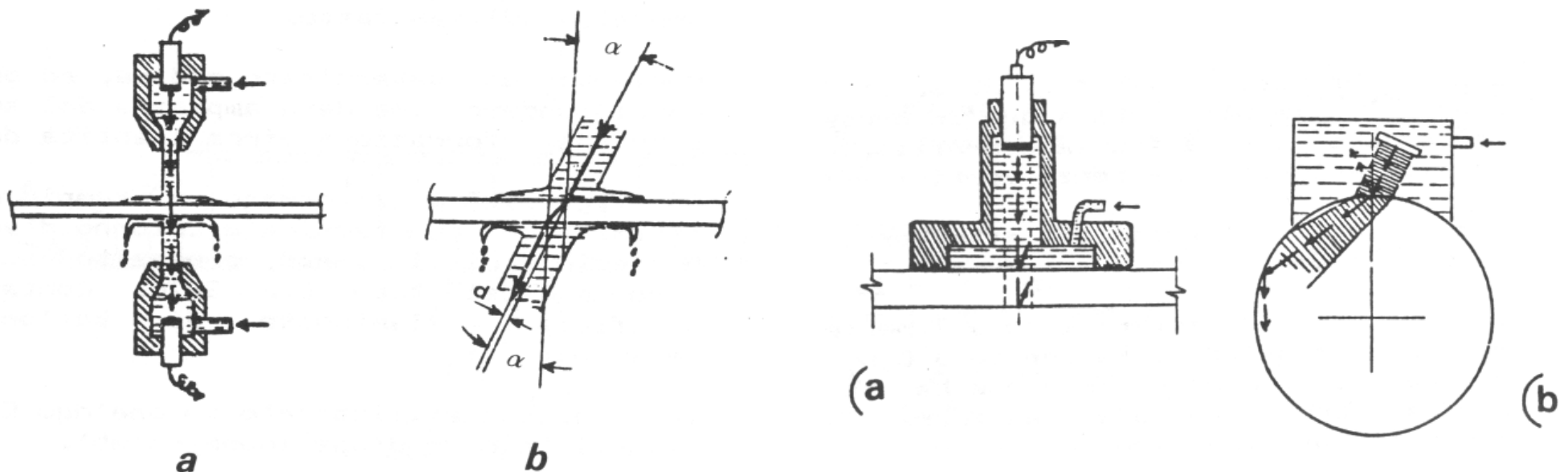
- La presentazione C-Scan presenta l'indubbio vantaggio di mostrare una riproduzione completa di eventuali discontinuità, ma viene a mancare l'informazione sulla profondità, a meno di non acquisire per ciascun punto l'intera forma d'onda per analizzarla a posteriori

- La presentazione A-scan è semplice da realizzare e mantiene tutte le informazioni relative alla profondità delle discontinuità, ma analizza per ciascuna posizione la sola "colonna" di materiale relativa al punto nel quale è posizionata la sonda. È il classico esempio di indagine manuale

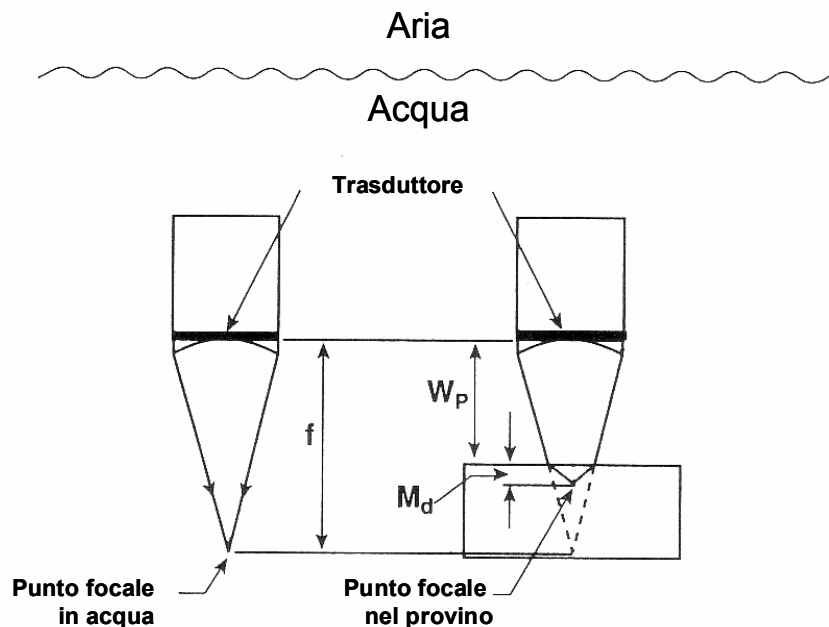


# Applicazioni pratiche

- Pezzo immerso in vasca: è l'applicazione più comune. La sonda è movimentata mediante motori passo-passo e può essere ruotata e/o orientata per mezzo di opportuni manipolatori
- Pezzo non immerso con accoppiamento ottenuto mediante volume d'acqua ridotto: utile per testare oggetti di grandi dimensioni
- Pezzo inserito tra una o due colonne d'acqua (squinter)



# Controllo con sonde focalizzate



- Quando si eseguono controlli in immersione con sonde focalizzate, occorre tenere presente che **il fascio ultrasonico si propaga in due mezzi a diversa impedenza acustica** (l'acqua e il materiale di cui è composto il pezzo) e ciò modifica sensibilmente la lunghezza focale.

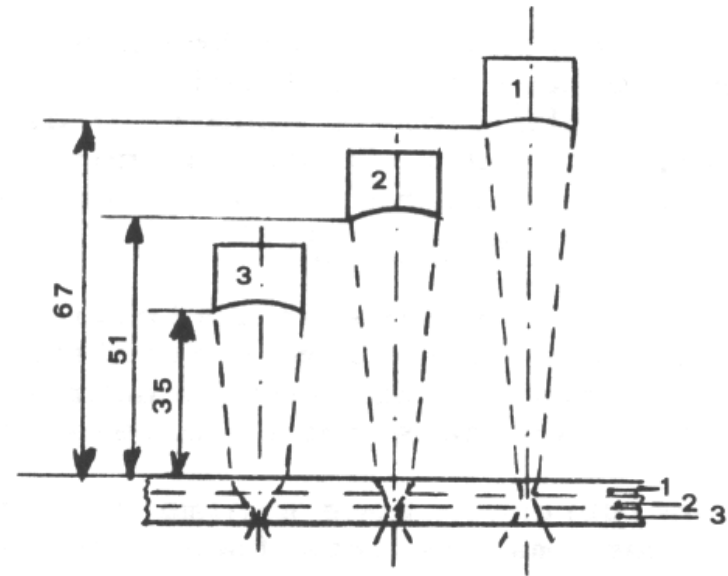
$$\bullet W_p + (V_M/V_A)M_d = f$$

- Da questa relazione è possibile ricavare la posizione del punto focale nel materiale o, eventualmente, stabilire quale percorso devono realizzare le onde ultrasoniche in acqua al fine di focalizzare il fascio su un particolare punto del provino.



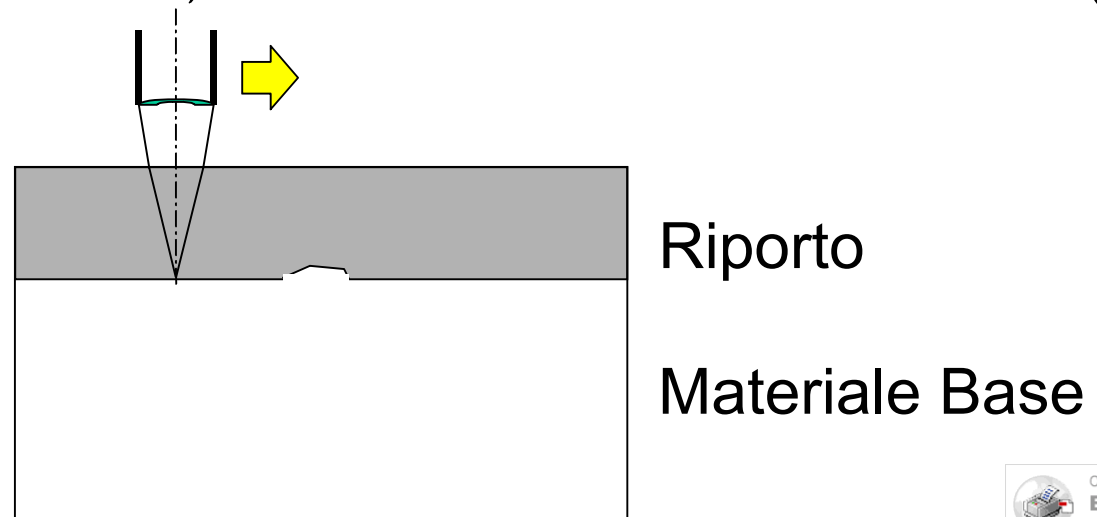
# Controllo con sonde focalizzate

- La tecnica in immersione, unitamente all'impiego di sonde focalizzate, consente l'ispezione dei componenti con la tecnica cosiddetta "a strati"
- In questo caso occorre calcolare la posizione della sonda rispetto al pezzo per ciascuno strato che si vuole esaminare, ricordando che la lunghezza focale viene fornita dal costruttore per un percorso in acqua
- Esempio: sonda  $f=15$  MHz,  $F=100$  mm,  $s=10$
- La focalizzazione sulla superficie superiore del pezzo si ottiene distanziando di 100 mm la sonda dal pezzo
- La focalizzazione sulla superficie inferiore si ottiene riducendo la distanza a 60 mm



# Controllo con sonde focalizzate

- Un tipico esempio è il controllo dei riporti di superleghe (stellite ecc.) per verificare l'aderenza del riporto al metallo base
- Il riporto ha generalmente spessori nell'ordine dei mm, e dunque spesso risulta difficile impiegare sonde a contatto per via della non elevata risoluzione superficiale
- La distanza della sonda dalla superficie viene calcolata opportunamente affinché la zona focale si trovi in corrispondenza dell'interfaccia riporto-materiale base
- Laddove l'aderenza viene a mancare, si realizza una zona di riflessione (nel distacco si introduce aria)



# Tecniche che impiegano riflettori

- Il riflettore del fascio US viene usato nei controlli ad immersione quando esistono particolari problemi di spazio per il posizionamento della sonda
- Tali riflettori, generalmente metallici (occorre valutare attentamente le variazioni di impedenza acustica) possono essere piani oppure curvi in modo da focalizzare il fascio
- Un'interessante possibilità è quella di motorizzare il movimento del riflettore per permettere l'ispezione a 360° del componente

