

## 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).

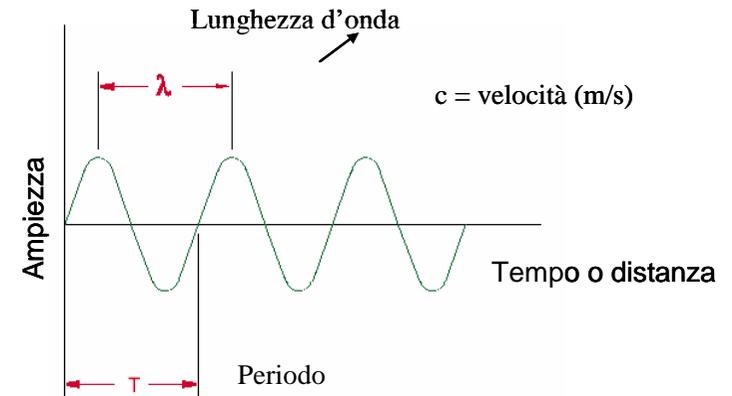
# Principi fisici

✓ 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.



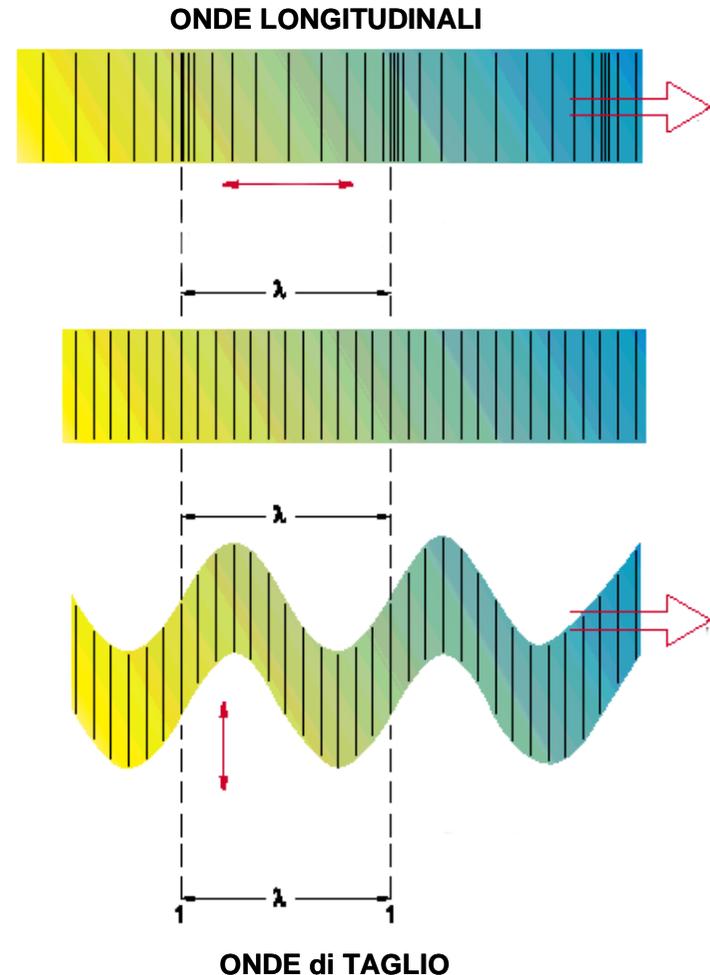
$$f = \frac{1}{T} \quad \lambda = \frac{c}{f} \quad \lambda = cT$$

# 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

---

<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	
<b>Lamb</b>	Componenti della vibrazione perpendicolari alla superficie	Solidi sottili	

---

# 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

✓ 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

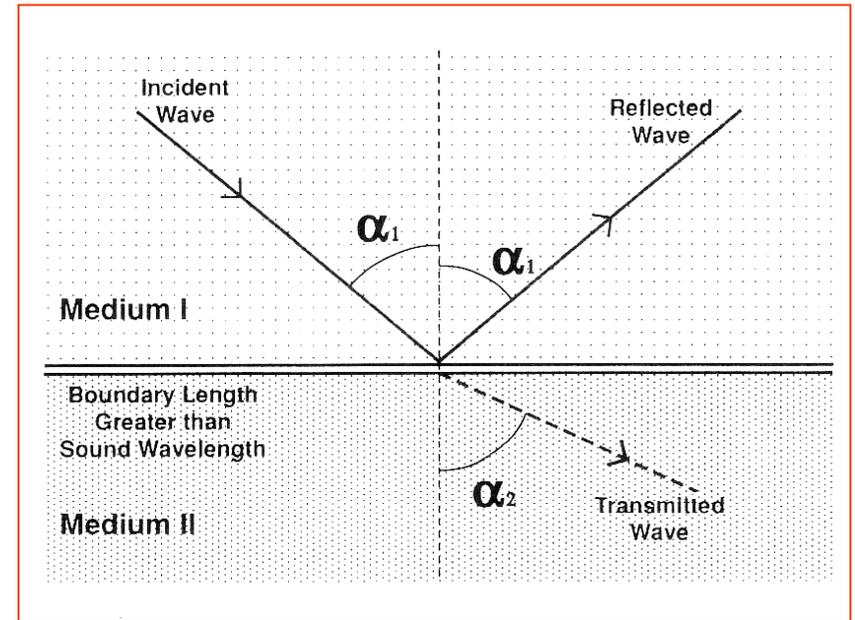
Mezzo	Velocità (m/s)	Mezzo	Velocità (m/s)	Mezzo	Velocità (m/s)
Acciaio	5900	Ferro	5900	Plexiglass	2700
Acciaio Inox	5800	Ghiaccio	4000	Quarzo	5800
Acqua	1480	Gomma	1800	Rame	4700
Alluminio	6320	Nickel	5600	Titanio	6100
Aria	330	Oro	3200	Tungsteno	5200
Berillio	12900	Platino	3300	Zinco	4200

# 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.

# 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



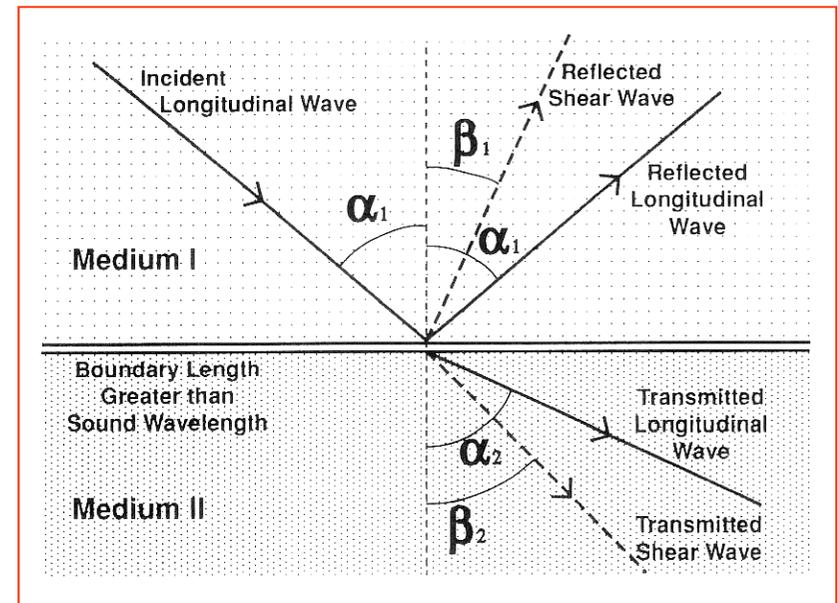
$$\frac{\text{sen} \alpha_1}{\text{sen} \alpha_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

# 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.



# 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.

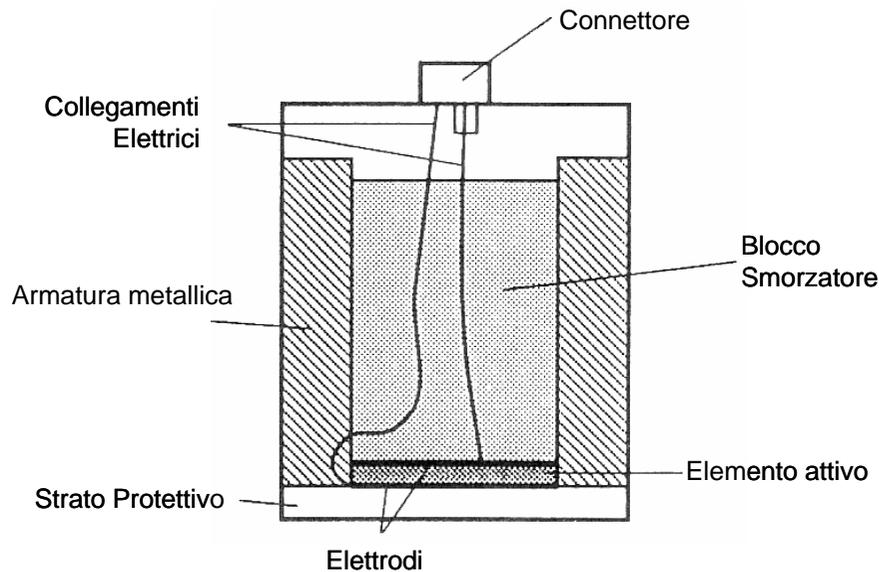
## Le qualità che dovrebbe possedere un buon mezzo accoppiatore sono:

- 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

- ✓ Nei CND, la sorgente di produzione degli ultrasuoni è rappresentata da particolari materiali (quarzo, titanato di bario, solfato di litio ecc.) caratterizzati da una proprietà comune denominata piezoelettricità
- ✓ I trasduttori ultrasonici sfruttano il cosiddetto effetto piezoelettrico inverso per generare sollecitazioni meccaniche (vibrazioni) quando il materiale è sottoposto ad una differenza di potenziale.
- ✓ Viceversa, l'analisi delle onde riflesse o trasmesse da un certo componente, può essere realizzata grazie all'effetto piezoelettrico, che si concretizza in una differenza di potenziale che insorge fra due facce di un cristallo dei materiali sopraelencati, sotto l'azione di una sollecitazione meccanica.

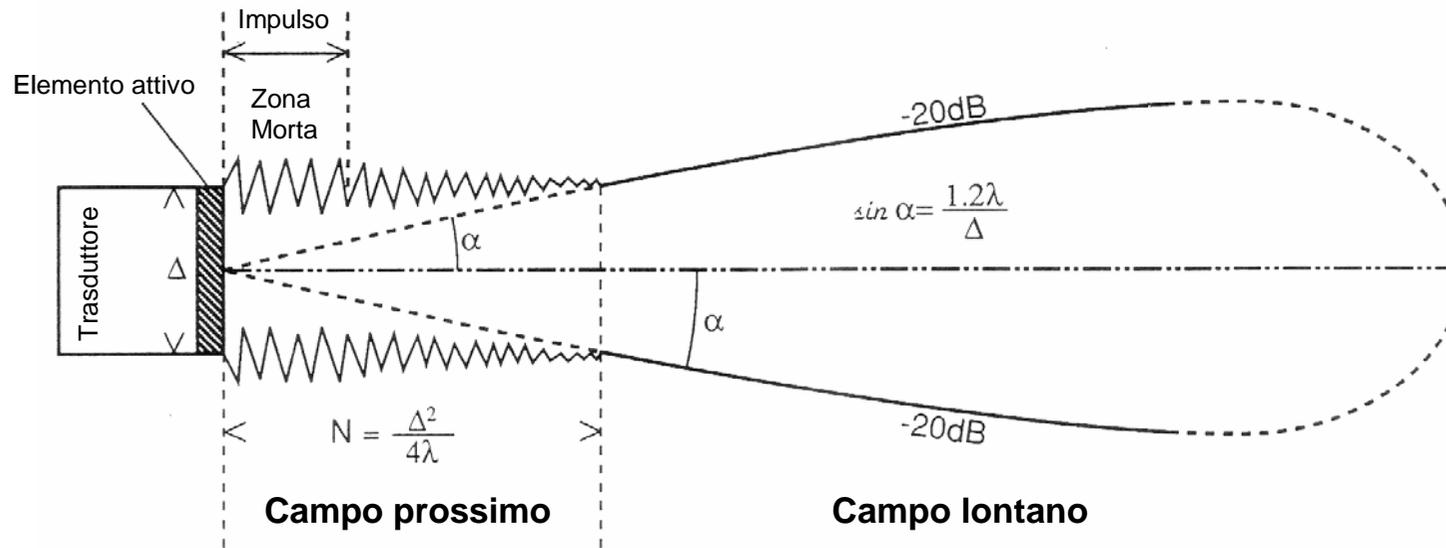
# Struttura dei trasduttori ultrasonici



- ✓ **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

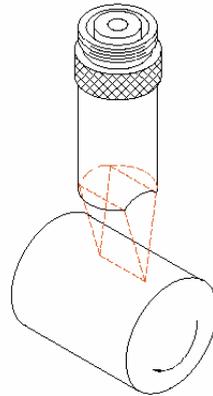
# Campo acustico di un trasduttore



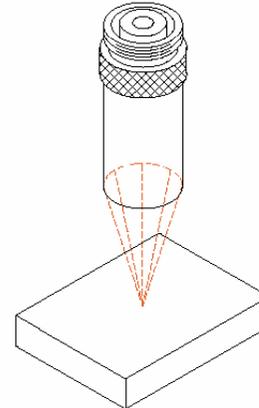
- ✓ L'intensità delle onde ultrasoniche all'interno del fascio generato dal trasduttore non è costante, ma varia a causa delle dimensioni finite della sorgente che danno luogo a fenomeni di diffrazione.
- ✓ Nel campo prossimo l'intensità è fluttuante tra un valore minimo ed uno massimo. All'interno del 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

# Trasduttori focalizzati

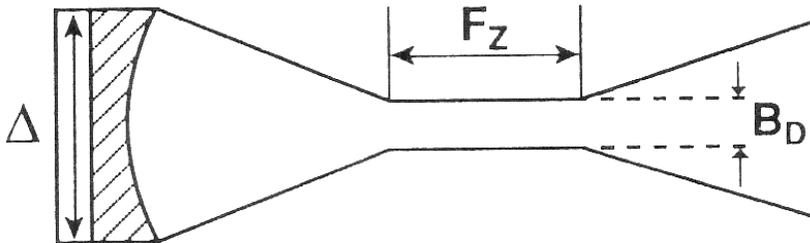
Dal punto di vista delle proprietà del campo acustico, i trasduttori focalizzati sono caratterizzati dai seguenti parametri:

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

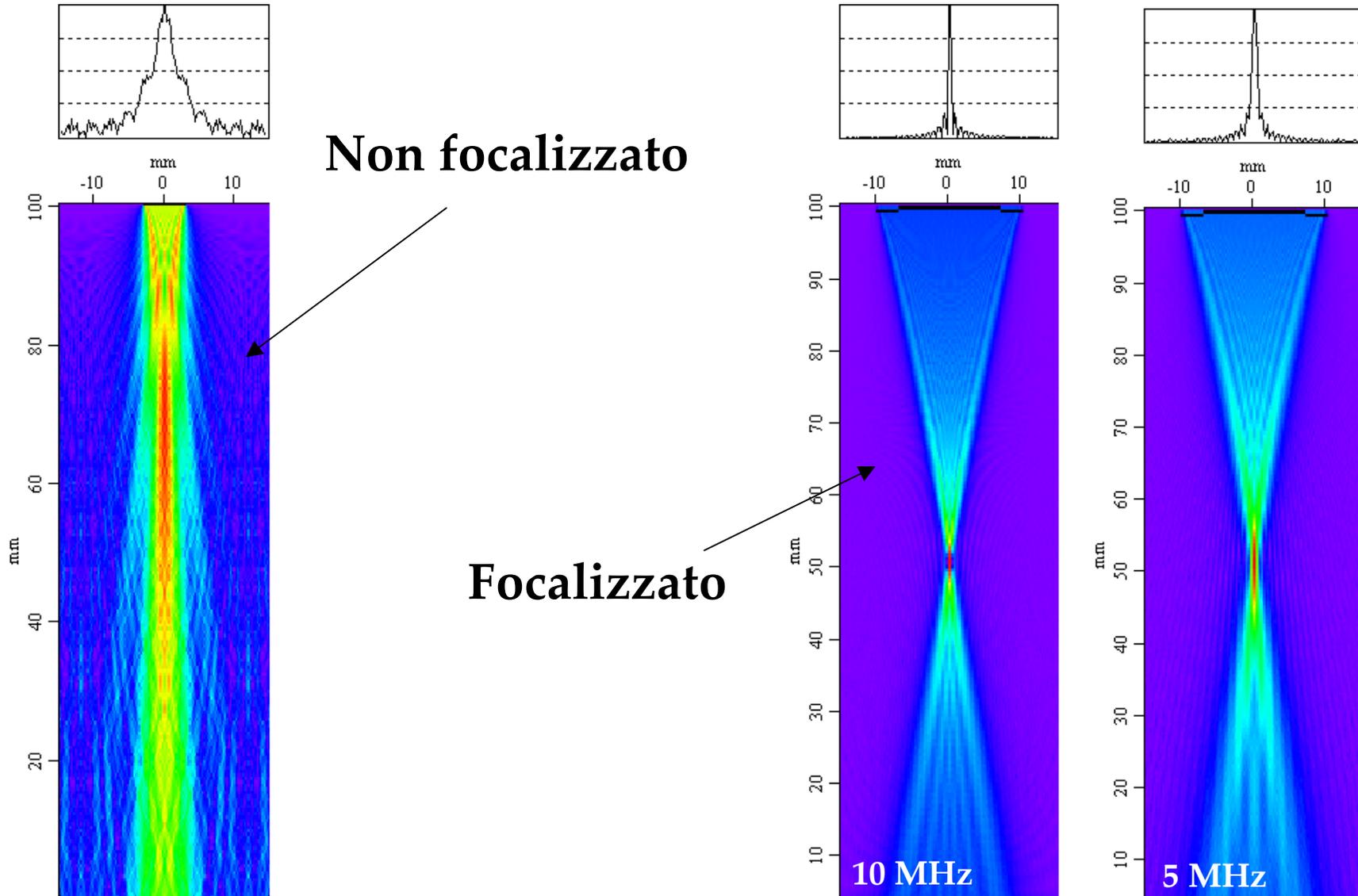
$$BD(-6dB) = \frac{1.02Fc}{f\Delta}$$

✓ 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

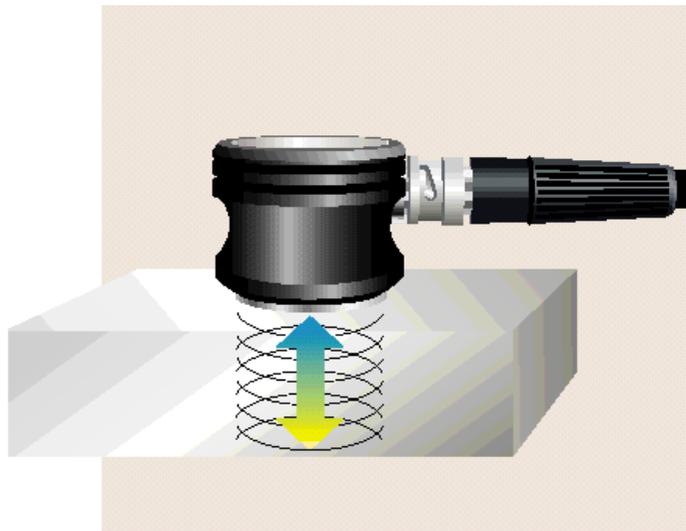
$$F_Z = N \cdot S_F^2 \cdot \left[ \frac{2}{1 + 0.5S_F} \right]$$



# Campo acustico di un trasduttore



# 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.

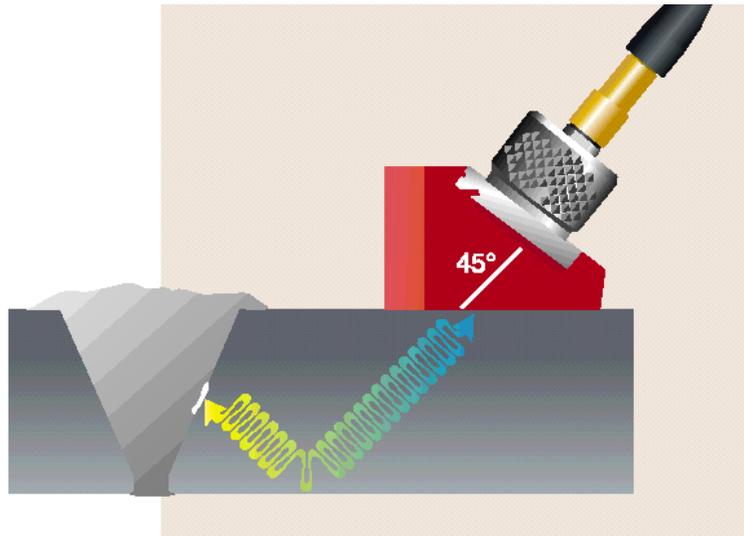
## Vantaggi:

- 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

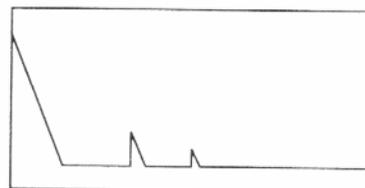
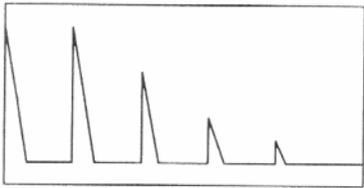
## Applicazioni:

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

# Quale trasduttore scegliere?

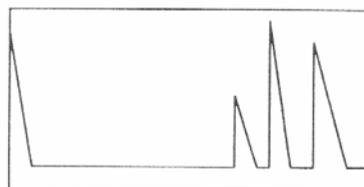
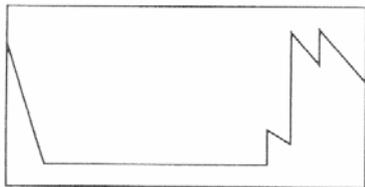
Basse frequenze

Alte frequenze



*Elevato livello di penetrazione  
Scarsa risoluzione spaziale*

*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:

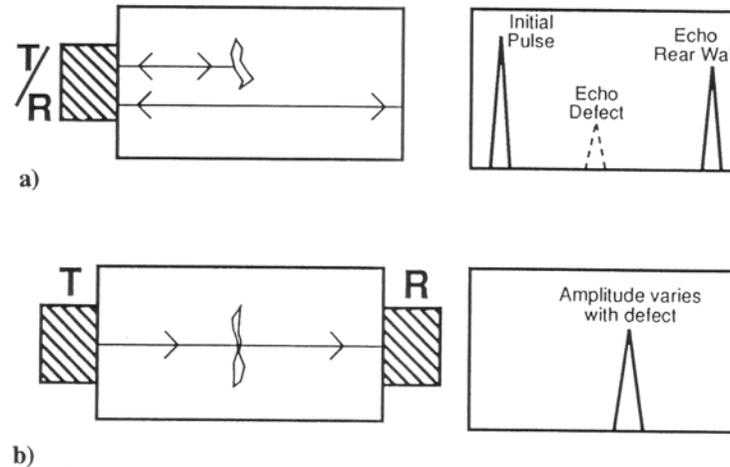
## 1. Tecniche “pulse-echo” (o “eco-impulso”)

Le onde ultrasoniche investono il pezzo da testare, 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

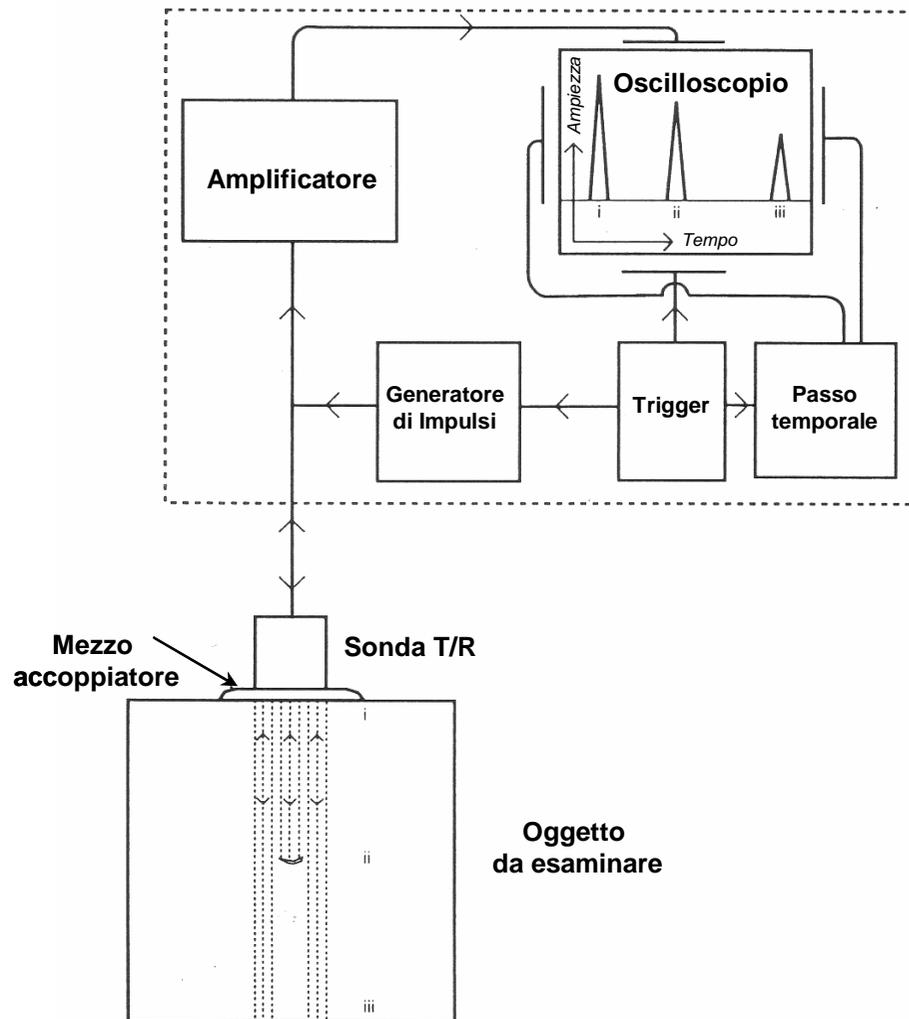
# Le tecniche di ispezione



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

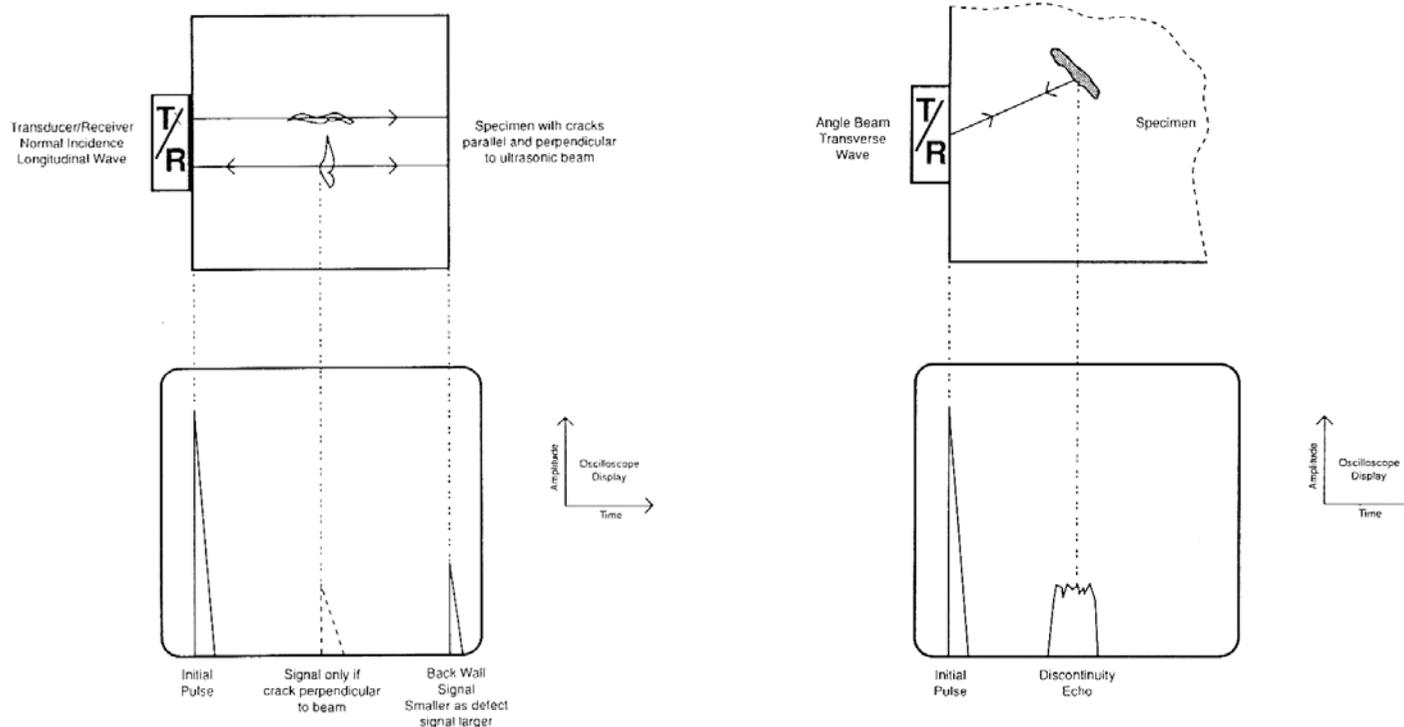


- ✓ Il trasduttore genera le onde ultrasoniche sotto forma di impulsi che vengono riflessi dalla superficie opposta del pezzo o da eventuali discontinuità presenti al suo interno e raccolti dallo stesso trasduttore (che dunque in questo caso agisce da ricevitore).
- ✓ Il tempo necessario all'impulso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

# 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.*

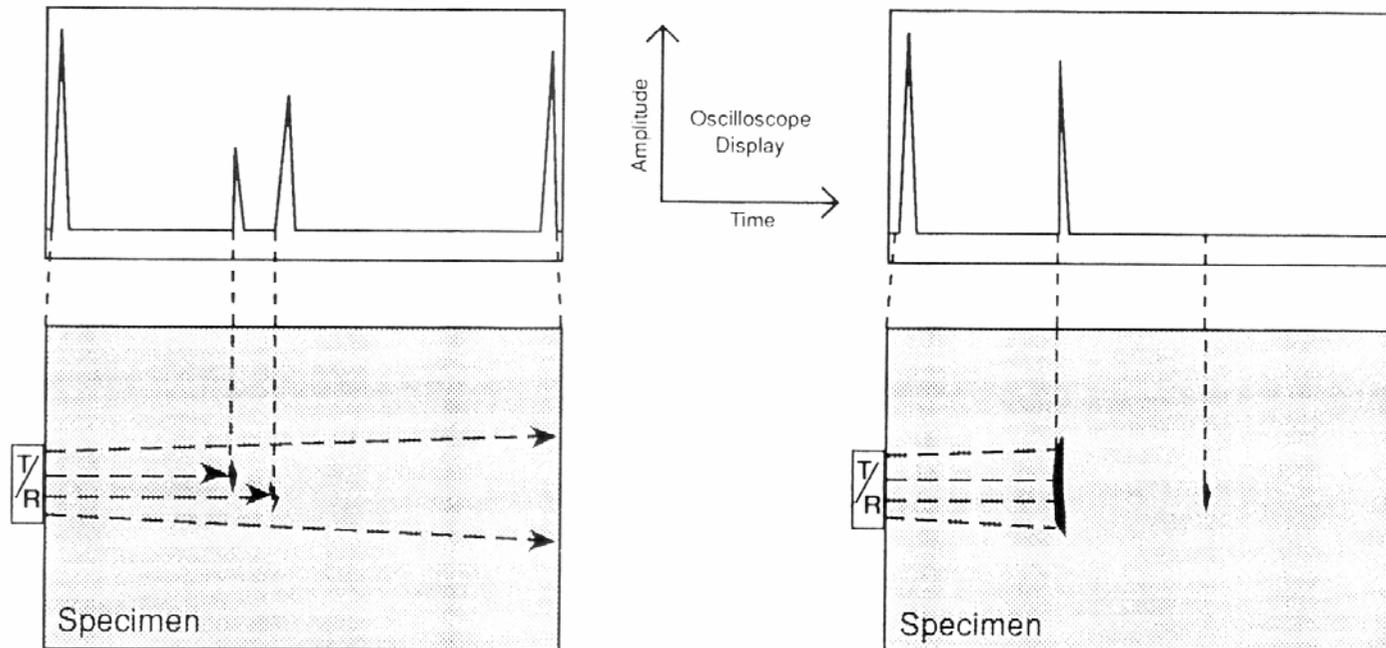
## Difetti isolati



# 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”

La tecnica ultrasonica di controllo in immersione consiste nell’immergere completamente il pezzo da testare in acqua (o altro idoneo mezzo accoppiatore) prima dell’esecuzione dell’analisi.

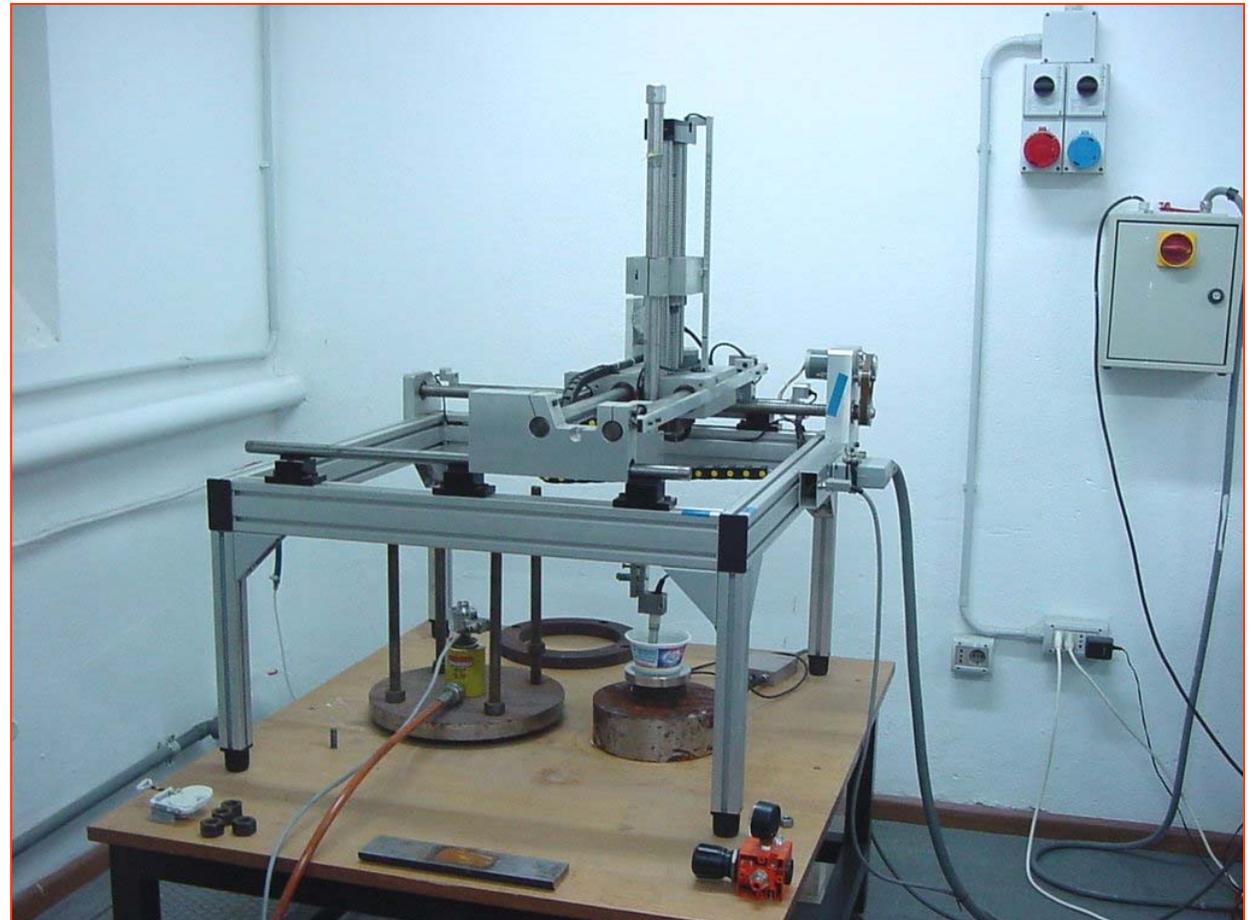
## Tale procedura consente di ottenere alcuni indubbi vantaggi:

- ✓ 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

## Sensibilità e risoluzione

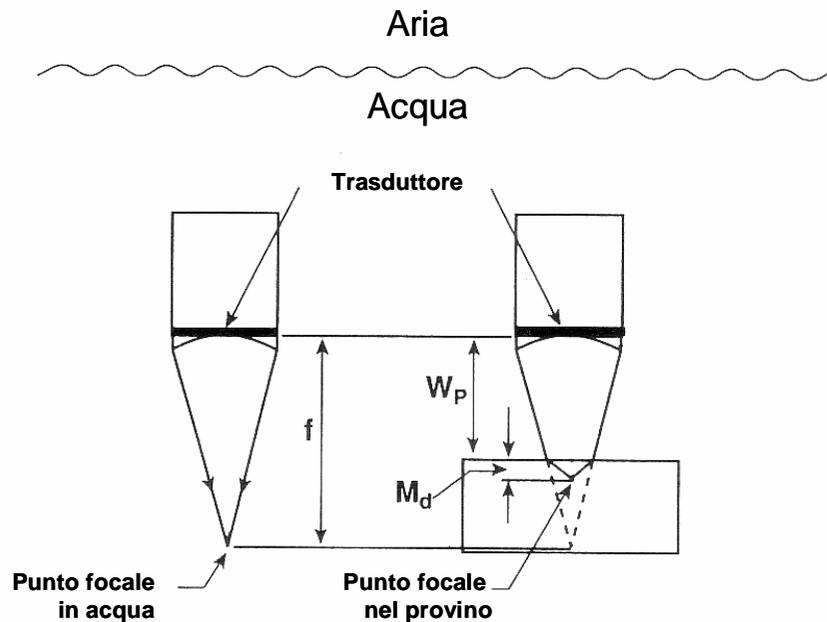
- ✓ La **sensibilità** rappresenta la capacità di un sistema ultrasonico di rilevare un difetto posizionato ad una data profondità in un pezzo. Maggiore è l'intensità del segnale ricevuto dal difetto (o riflettore) maggiore è la sensibilità del sistema
- ✓ La **risoluzione assiale** rappresenta la capacità 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 ad immersione



# Controllo in immersione

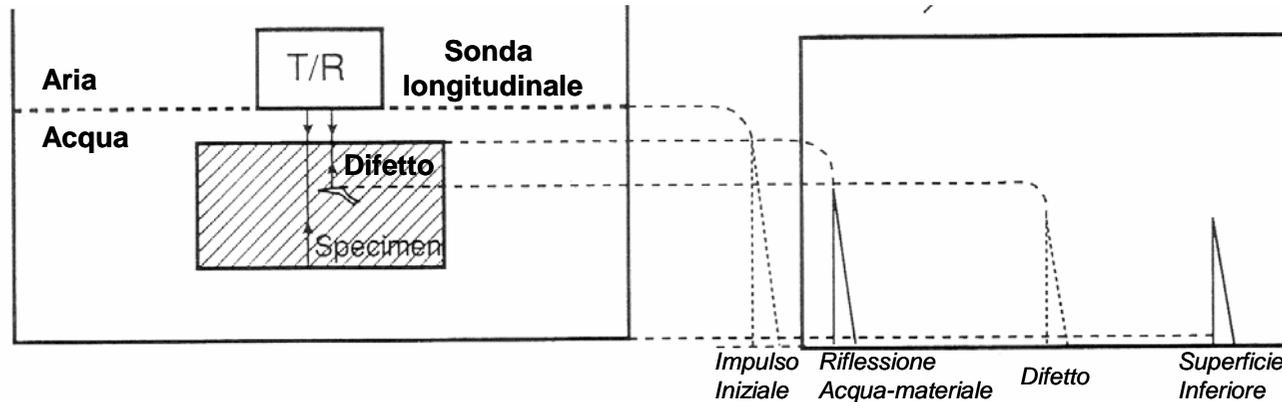
✓ Quando si eseguono controlli in immersione con sonde focalizzate, occorre tenere presente che **il fascio ultrasonico si propaga in due mezzi a diversa impedenza acustica** (l'acqua e il materiale di cui è composto il pezzo) e ciò modifica sensibilmente la lunghezza focale.



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

✓ 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 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.