



Università degli Studi di Napoli
Federico II



Dipartimento di Ingegneria Industriale
Divisione Ingegneria Aerospaziale

CONTROLLI NON DISTRUTTIVI

2016-2017

Controlli non distruttivi

Tecniche di ispezione utilizzate su un materiale o su un componente senza determinarne il danneggiamento o la degradazione.

L'obiettivo è determinare un difetto e definirlo come:

- Tipo
- Forma
- Orientazione
- Posizione

Dal punto di vista industriale lo scopo è quello di emettere un giudizio di **accettazione/rifiuto** di un materiale o di un componente.

DIFETTI

I difetti tipici che si riscontrano mediante CND possono essere genericamente classificati in tre grandi categorie:

I) Difetti di natura intrinseca

Introdotti nel materiale base o nel semilavorato durante il processo di fabbricazione.

II) Difetti di lavorazione

Causati da lavorazioni o processi tecnologici eseguiti sul pezzo nel corso della realizzazione del manufatto (saldature, trattamenti termici, ecc.).

III) Difetti di esercizio

Originati dal normale funzionamento del componente durante il suo ciclo di vita utile.

DIFETTI

- BOLLE D'ARIA , VUOTI
- SOFFIATURA SUPERFICIALE
- BRUCIATURA
- SCHEGGIATURA
- CRICCA
- CRICCA SUPERFICIALE
- MICROFESSURAZIONE
- DELAMINAZIONE
- DIFETTO DI RICOPRIMENTO
- OCCHIO DI PESCE
- INCLUSIONE
- FRATTURA
- MANCANZA DI RIEMPIMENTO
- BUCCIA D'ARANCIA
- BOLLICINA
- PUNTA DI SPILLO
- POROSITA'
- SACCO DI RESINA
- BORDO RICCO DI RESINA
- GRAFFIO
- AVVALLAMENTO (RITIRO)
- SOFFIATURA LINEARE
- CORRUGAMENTO

Controlli non distruttivi

Tali esami hanno subito negli ultimi anni una grande diffusione perché permettono:

- Maggiore sicurezza di funzionamento dei pezzi (vita utile più lunga, minore probabilità di guasti e/o interruzioni);
- Costruzioni più leggere e progettazione *damage-tolerance* (ovvero la previsione di guasti e/o rotture che si presentano sistematicamente su particolari regioni);
- Riduzione dei costi (es. controllo dei semilavorati prima che da essi vengano realizzati i prodotti finiti).

Controlli non distruttivi

Esistono diversi controlli ciascuno più o meno indicato per un determinato materiale, difetto e accessibilità al pezzo.

Le tecniche più utilizzate possono essere così classificate:

- *Ispezioni visive*

- *Liquidi penetranti*

- *Magnetoscopia*

- *Radiografia*

- *Ultrasuoni*

- *Termografia*

Controlli “superficiali”

Controlli “volumetrici”

Ispezione visiva

ESAME VISIVO DIRETTO

- Probabilmente è la tecnica non distruttiva più utilizzata (spesso anche in modo inconsapevole o non codificato).
- E' semplice, facile da applicare ed ha un costo molto basso.
- Spesso viene usata come controllo di completamento ad altre tecniche non distruttive.



ESAME VISIVO REMOTIZZATO

- Generalmente impiegato quando non è possibile accedere direttamente all'oggetto od alla superficie da esaminare.
- Vengono utilizzate apparecchiature più o meno sofisticate (es. specchi, telescopi, endoscopi, fibre ottiche, telecamere).
- La risoluzione dello strumento impiegato deve essere almeno equivalente a quella dell'occhio umano (0.2 mm)



Liquidi penetranti

Principio di funzionamento

- Una sostanza liquida a bassa *tensione superficiale* (ed elevato *potere bagnante*) viene deposta sul pezzo da testare;
- I difetti superficiali e sub-superficiali assorbono il liquido per *capillarità*;
- Una seconda sostanza (rivelatore) mette in evidenza la risalita capillare;
- Si formano delle indicazioni visibili ad occhio nudo, o tramite luce di Wood se si utilizzano penetranti fluorescenti, in corrispondenza della posizione del difetto.

Principi fisici di base

- TENSIONE SUPERFICIALE;
- POTERE BAGNANTE (O BAGNABILITA');;
- CAPILLARITA'.

Liquidi penetranti

Tensione superficiale

E' definita come l'energia richiesta per aumentare l'area della superficie del liquido di una unità.

Si misura pertanto in J/m^2

In altri termini, la tensione superficiale può essere pensata come la forza che agisce tra le molecole alla superficie di un liquido.

Quindi:

- In un liquido ad alta tensione superficiale prevalgono le forze di coesione tra le molecole rispetto alle forze di adesione fra molecole del liquido e superficie del solido.
- Al contrario, per un liquido a bassa tensione superficiale prevalgono le forze di adesione liquido-solido rispetto a quelle di coesione.

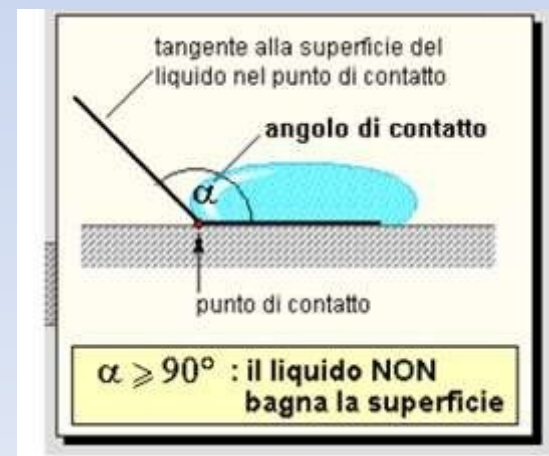
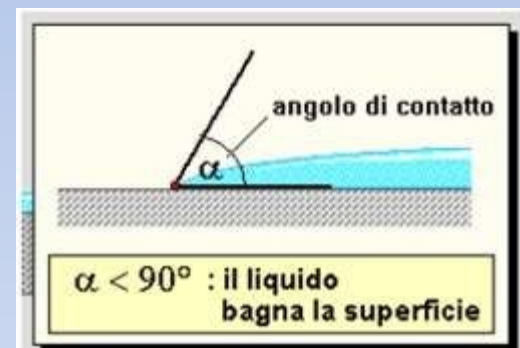


Liquidi penetranti

Bagnabilità

Rende conto dell'attitudine di un liquido ad espandersi su una superficie, ed è quindi favorita da una bassa tensione superficiale.

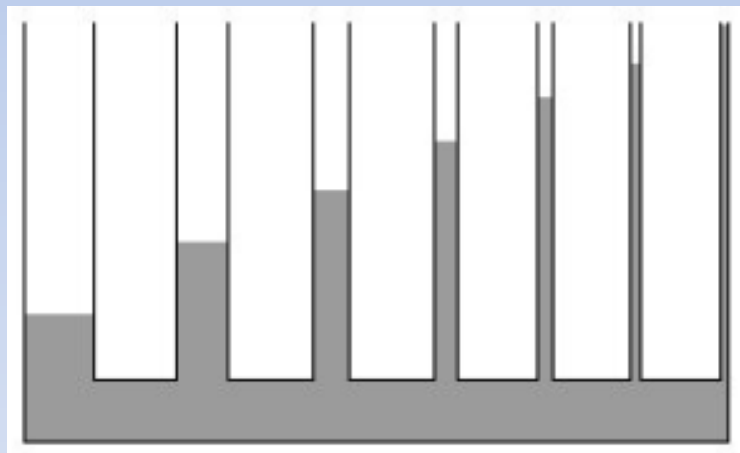
- Se l'angolo di contatto è $<$ di 90° la superficie viene effettivamente bagnata dal liquido.
- Se l'angolo di contatto è $>$ di 90° le forze coesive esistenti tra le molecole sono maggiori di quelle adesive, dunque il liquido assume l'aspetto di gocce disgiunte.



Liquidi penetranti

Capillarità

E' un fenomeno che permette ad un liquido di salire in tubicini molto sottili. Questo fenomeno è spiegato dall'esistenza di forze di attrazione tra le molecole del liquido e le pareti del tubicino.



Quando un liquido è contenuto in un tubo capillare il numero di molecole a contatto con il tubo è molto grande, quindi prevalgono le forze di adesione sulle forze di coesione e il liquido sale per un certo tratto lungo il tubo presentando una superficie concava verso l'alto.

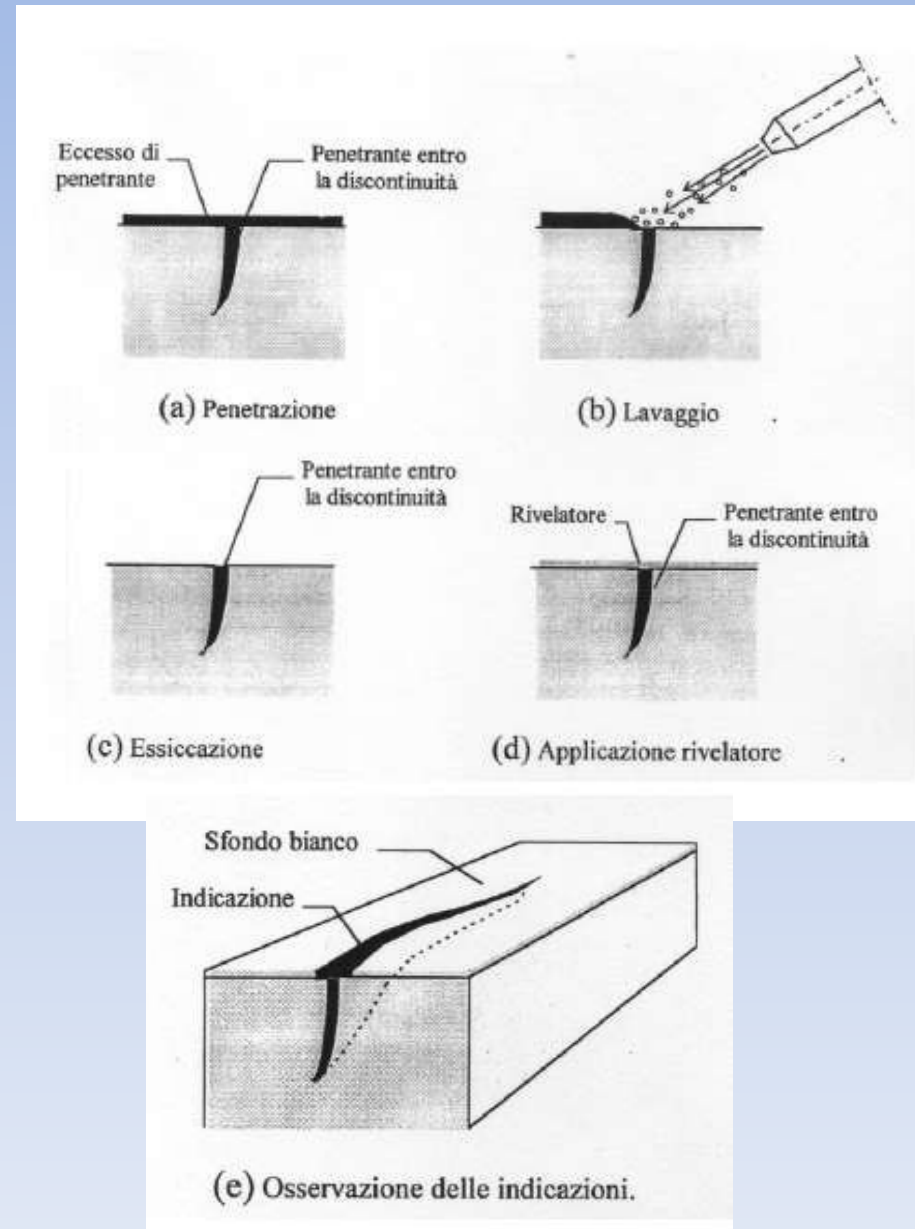
Tale principio fisico, che risulta la base di tutta la metodologia di controllo, rende ispezionabili anche le superfici di difficile accesso indipendentemente dalla loro posizione.

Liquidi penetranti

Schema della procedura di controllo

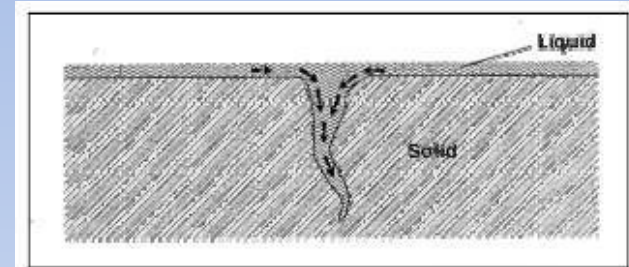
- 1) Preparazione della superficie;
- 2) Applicazione del liquido penetrante;
- 3) Rimozione del penetrante in eccesso;
- 4) Attesa per l'essiccazione;
- 5) Applicazione del rivelatore;
- 6) Osservazione delle indicazioni.

Ovviamente è necessaria una pulizia post-esame, tramite acqua o solventi, per ragioni estetiche e per evitare fenomeni di corrosione e/o grippaggio durante il funzionamento del pezzo.



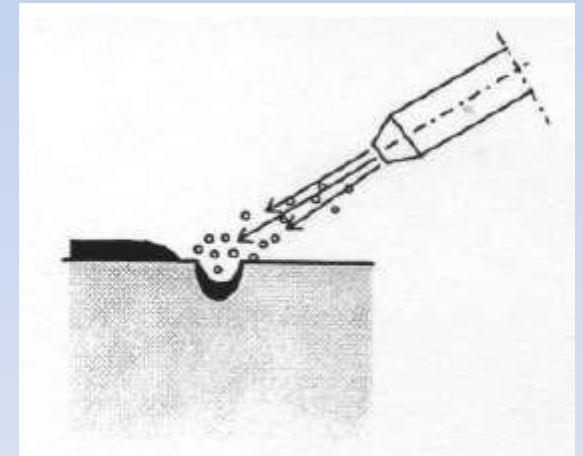
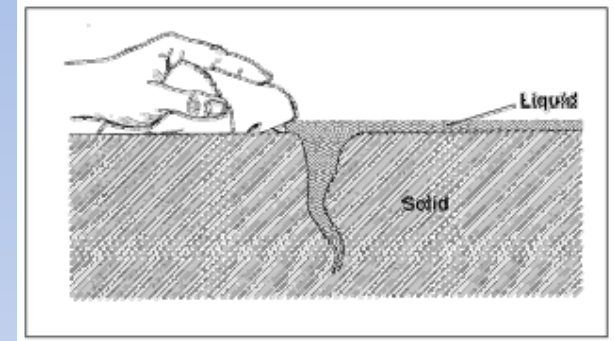
Liquidi penetranti

- ✓ Una volta che la superficie da testare è stata accuratamente ripulita, sgrassata e asciugata, il penetrante, solitamente rosso o fluorescente, viene applicato per *immersione, spennellatura o spruzzatura*.
- ✓ Il penetrante deve costituire uno *strato uniforme* esteso a tutta la superficie da esaminare e deve essere lasciato agire per un tempo sufficiente a consentire il massimo assorbimento possibile da parte del difetto.
- ✓ Il *tempo di penetrazione* dipende dal tipo di discontinuità da rilevare e dal tipo di prodotto impiegato per il controllo (in genere si assume un tempo pari a 10 minuti).



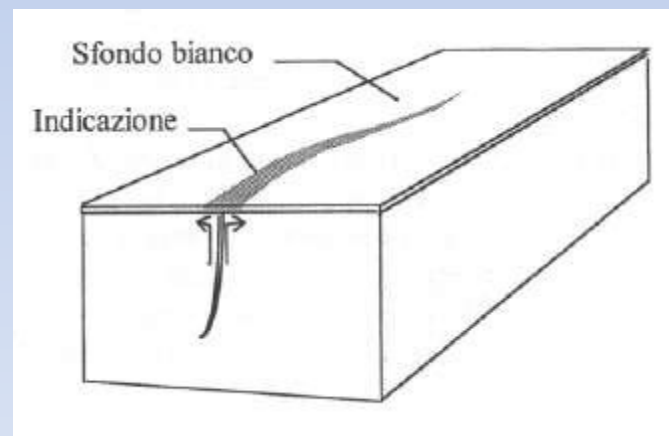
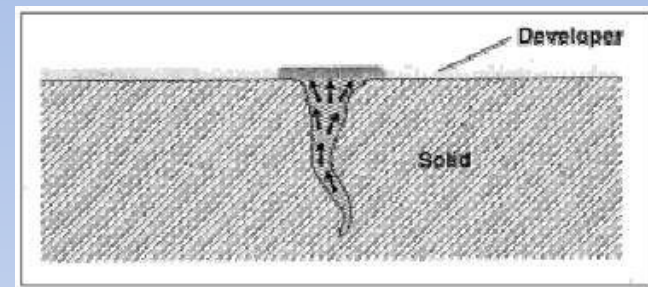
Liquidi penetranti

- ✓ *L'eccesso di penetrante* deve essere rimosso, mediante panno leggermente imbevuto, acqua corrente o con lavaggio a spruzzo, ponendo molta attenzione a non eliminare anche il liquido intrappolato nei difetti.
- ✓ Lavaggi incompleti riducono l'*efficacia* del controllo a causa di macchie che si formano nelle zone poco pulite che presentano dei residui.
- ✓ L'*essiccazione* avviene in tempi estremamente rapidi (pochi minuti).



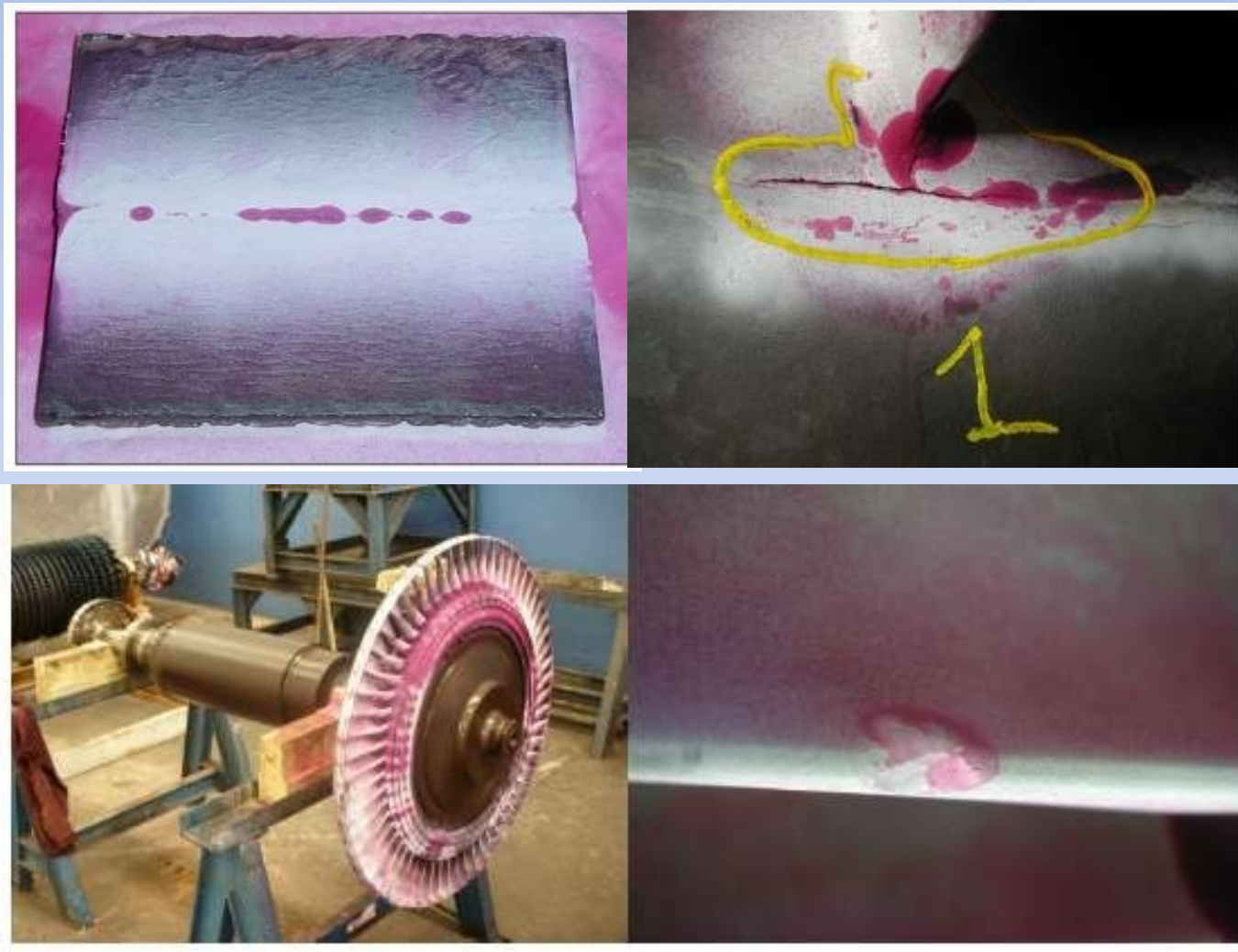
Liquidi penetranti

- ✓ Dopo l'essiccazione si applica un sottile strato di **rivelatore** (bianco o fluorescente) allo scopo di assorbire ed attirare verso la superficie il penetrante rimasto intrappolato nelle discontinuità.
- ✓ Solitamente l'indicazione si presenta leggermente allargata rispetto alle dimensioni effettive del difetto e tende a crescere nel tempo fino a stabilizzarsi dopo un certo **tempo di rivelazione** (in genere assunto pari a 5 minuti).
- ✓ Qualora si esegua l'esame con lampada ultravioletta (**luce di Wood**) e penetrante fluorescente, l'operatore deve avere l'accortezza di abituare la vista al buio prima dell'ispezione.



Liquidi penetranti

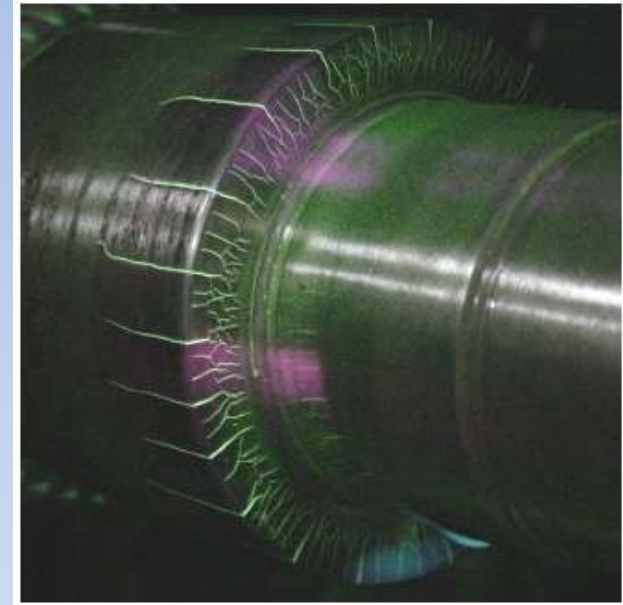
ESEMPI



Magnetoscopia

Descrizione generale

- Questa tecnica si basa sull'analisi delle variazioni nel campo magnetico che si verificano in presenza di difetti superficiali o sub-superficiali;
- Può essere applicato solo su materiali **ferromagnetici** (es. ferro, nichel, cobalto ed alcune delle loro leghe);
- E' un tipo di controllo molto diffuso nell'industria petrolchimica, automobilistica ed aerospaziale.



Principio fisico di base

- MAGNETISMO

Magnetoscopia

Magnetismo

E' definito come la proprietà della materia di attrarre a sé altra materia, scoperta dai Greci. Gli oggetti che possiedono tale proprietà si definiscono ***magnetici o magnetizzati***.

In base al loro rapporto col magnetismo possiamo distinguere:

- 1) **Materiali diamagnetici**: non possono essere magnetizzati; sono debolmente respinti dal magnetismo (es. rame, argento, oro, mercurio, ecc.).
- 2) **Materiali paramagnetici**: possono essere magnetizzati; sono influenzati dai campi magnetici (es. magnesio, platino, molibdeno, alluminio, ecc.).
- 3) **Materiali ferromagnetici**: è una sottoclasse dei paramagnetici; vengono fortemente attratti dai campi magnetici (es. ferro, nichel, cobalto, ecc.).

Magnetoscopia

Schema della procedura di controllo

- 1) Preparazione della superficie;
- 2) Magnetizzazione del pezzo;
- 3) Applicazione della polvere magnetica;
- 4) Illuminazione e ispezione della superficie;
- 5) Demagnetizzazione del pezzo (opzionale).

La presenza di cricche o altri difetti provoca una “rottura” del campo magnetico naturale del pezzo, e le particelle di metallo magnetizzato si raggruppano in corrispondenza della discontinuità mettendo in evidenza il difetto.



Magnetoscopia

1) Preparazione della superficie

- ✓ In questa fase preliminare occorre verificare che la superficie del pezzo da testare sia esente da grasso e polvere.
- ✓ La presenza di contaminanti può ostacolare il movimento delle particelle magnetiche sotto l'azione del campo esterno, rendendo difficoltosa la visualizzazione dei difetti.
- ✓ Olio e grasso attenuano l'attrazione delle particelle da parte del campo esterno e alterano il loro accumulo producendo false indicazioni.



Magnetoscopia

2) Magnetizzazione del pezzo

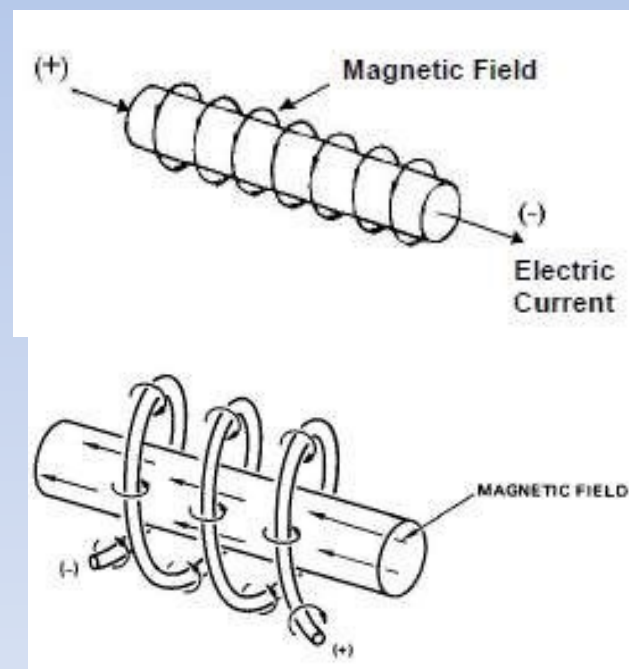
In questa fase si procede all'applicazione del campo magnetico sul pezzo da testare.

SISTEMA ELETTRICO

Si ottiene un campo magnetico circolare sul pezzo mediante il passaggio di una corrente elettrica.

SISTEMA MAGNETICO

Si ottiene un campo magnetico longitudinale mediante l'introduzione del pezzo in una bobina percorsa da corrente elettrica.

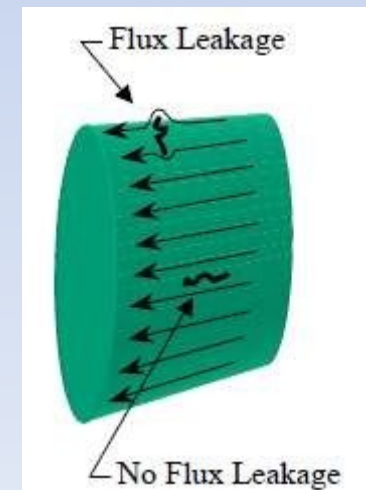
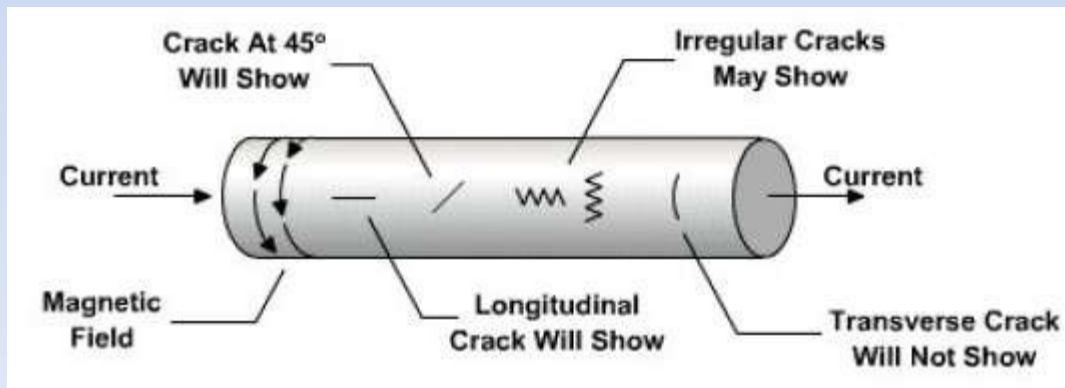


Il tipo di campo magnetico da generare per il controllo dipende dal presunto orientamento dei difetti che ci si aspetta di riscontrare e dalla geometria del pezzo.

Magnetoscopia

2) Magnetizzazione del pezzo

- ✓ La direzione del campo magnetico è particolarmente critica, infatti, affinché esso venga alterato in modo significativo, è necessario che la discontinuità sia il più possibile perpendicolare alle linee di induzione.
- ✓ Se la discontinuità giace su un piano parallelo alle linee di induzione non si produce alcun accumulo di particelle.
- ✓ Solo i difetti che presentano un orientamento tra i 45 e i 90 gradi (condizione di massima visibilità) rispetto alla direzione delle linee di induzione possono essere rilevati.



Magnetoscopia

3) Applicazione della polvere magnetica

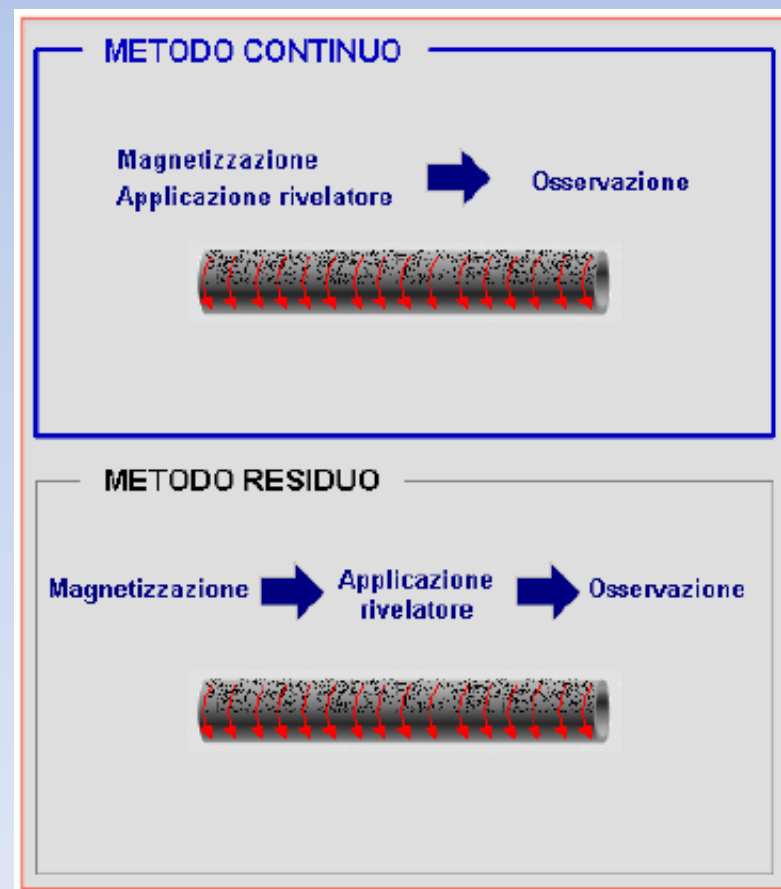
La prova con polveri magnetiche può essere eseguita con due modalità:

METODO CONTINUO

L'applicazione del rivelatore avviene assieme alla magnetizzazione del pezzo (o immediatamente prima).

METODO RESIDUO

Il rivelatore viene applicato dopo che è cessata l'operazione di magnetizzazione, sfruttando il magnetismo residuo del pezzo.



Magnetoscopia

4) Illuminazione e ispezione della superficie

- ✓ Occorre disporre di un buon livello di illuminazione (almeno 1000 lux) per particelle colorate, e di una lampada ultravioletta (luce di Wood) nel caso si utilizzino polveri fluorescenti.
- ✓ I *difetti superficiali* tendono a fornire indicazioni nitide, strette e ben delimitate.
- ✓ I difetti *sub-superficiali* forniscono indicazioni più larghe e sfocate.
- ✓ Possono apparire delle indicazioni non rilevanti, che non rappresentano quindi dei difetti, nel caso di spigoli, punti di unione tra differenti materiali, lavorazioni meccaniche.



Magnetoscopia

5) Demagnetizzazione del pezzo

E' una fase opzionale del controllo, e si ottiene applicando un campo magnetico di polarità inversa al precedente e di intensità gradualmente decrescente.

Possibili ragioni per cui è necessaria la demagnetizzazione:

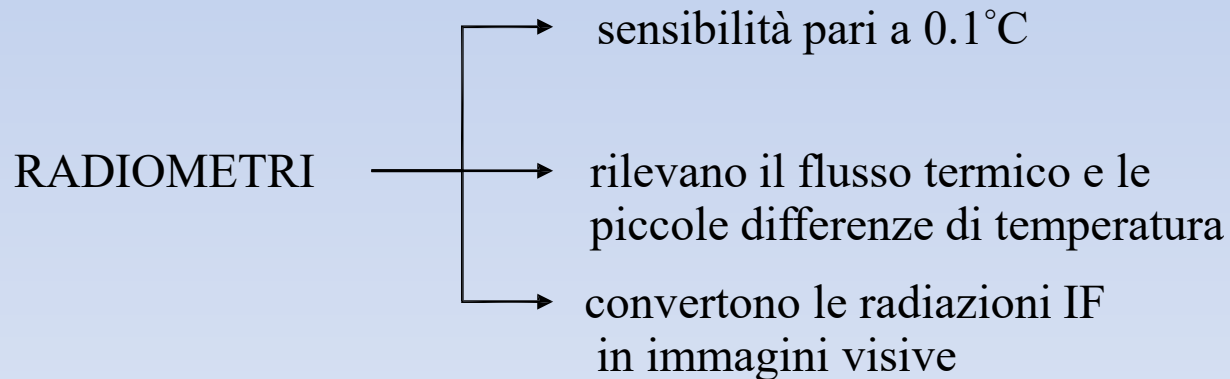
- ✓ Il campo magnetico residuo potrebbe interferire con i successivi processi tecnologici (saldatura, lavorazioni meccaniche ecc.).
- ✓ Le particelle metalliche abrasive possono essere attratte dal componente ed essere causa di danneggiamento superficiale.
- ✓ Possibile interferenza con strumenti di misura posizionati in prossimità del componente.

Termografia

Si basa sul riscaldamento del pezzo da esaminare e sulla successiva misura della temperatura T per effetto delle radiazioni infrarosse emesse dalla superficie.

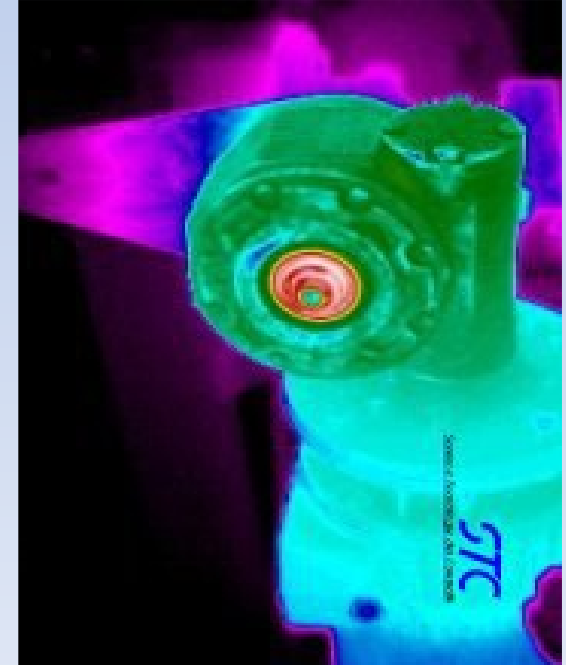
Tutti i corpi che si trovano ad una temperatura superiore a 0 K emettono energia.

La temperatura viene misurata con sensori a distanza che rilevano le emissioni di radiazioni infrarosse.



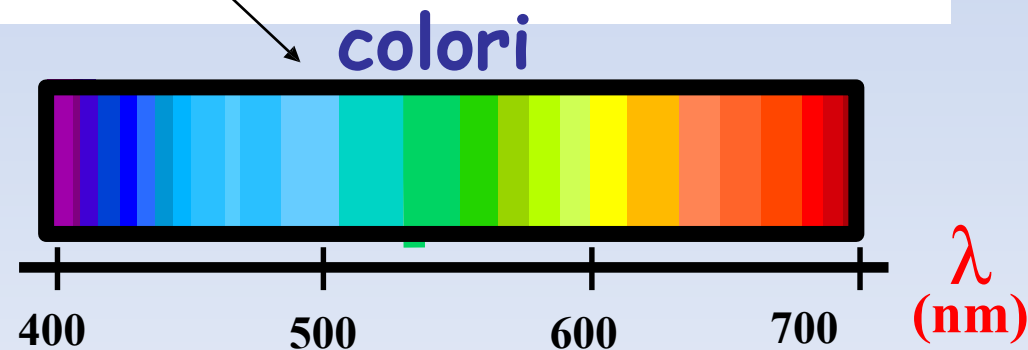
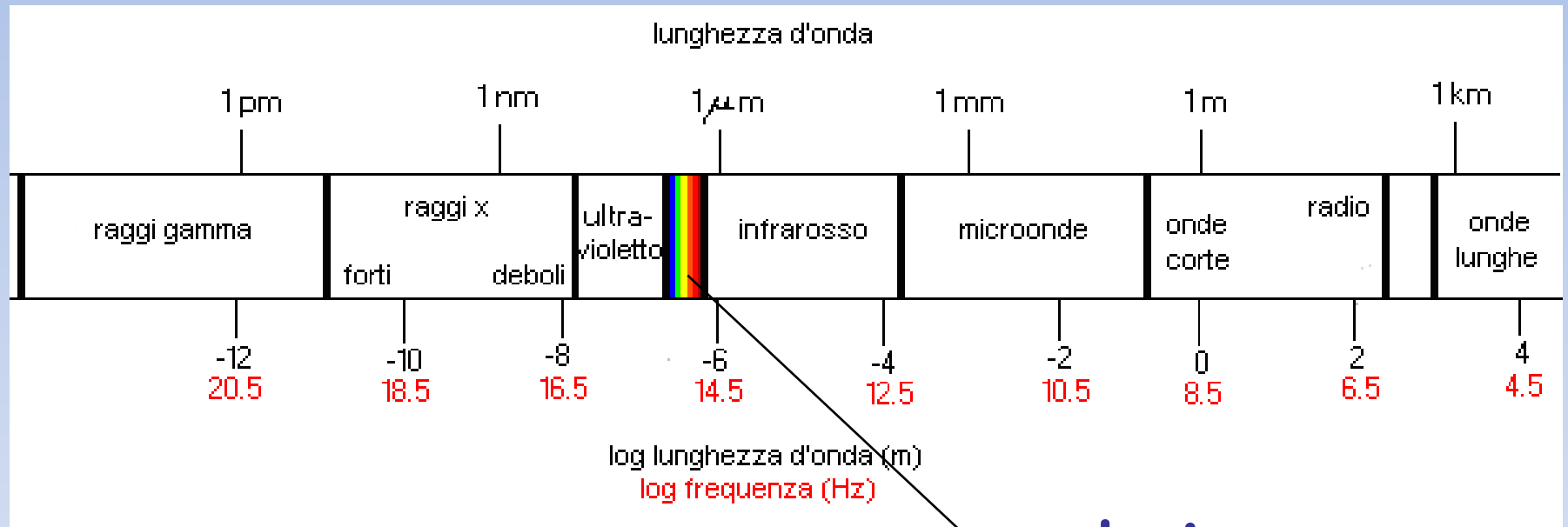
Principio fisico di base

- EMISSIVITA'



Termografia

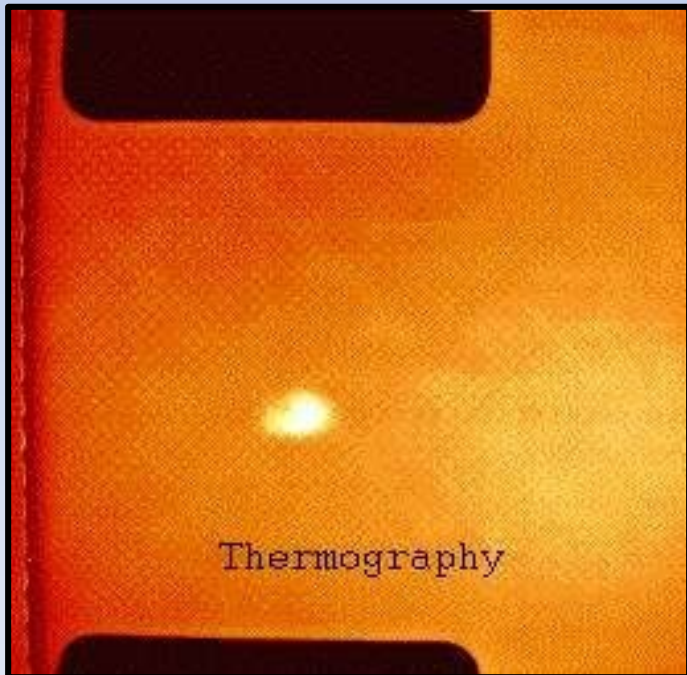
Lo spettro IR è identificato dalle lunghezze d'onda che vanno da 0,7 micron ad oltre i 1000 micron.



Termografia

L'immagine che viene acquisita attraverso una telecamera (termovisore sensibile agli IF) viene poi digitalizzata da uno specifico software che ne mette in risalto i diversi livelli di radiazione/energia attraverso diverse tonalità di grigio o di colori, ottenendo una mappa termografica del corpo osservato.

La termografia fornisce una mappa di isoterme.

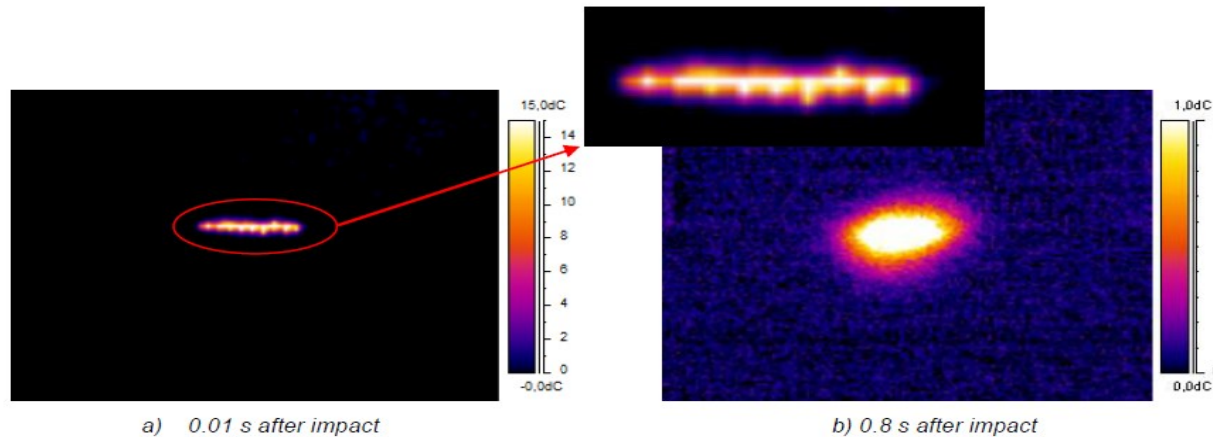


Osservazioni:

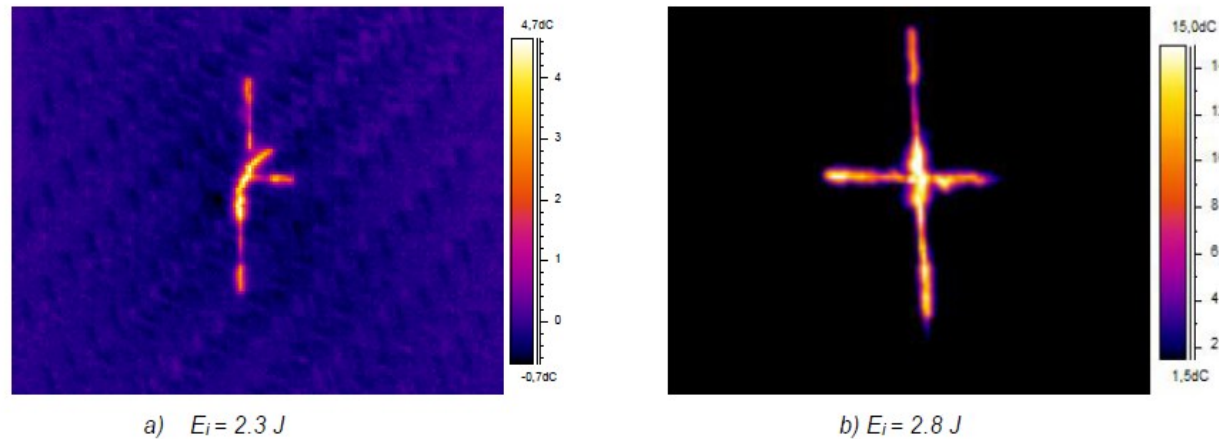
- si rilevano inclusioni e separazioni;
- i difetti sono più facilmente identificabili se sono in superficie;
- si riesce ad “osservare” termicamente il difetto a distanza.

Termografia

Monitoraggio termico di un pannello in carboresina durante un impatto



ΔT images of the C_u specimen for $E_i = 2.8$ J



ΔT images of the C_{cp} specimen taken 0.01 s after impact

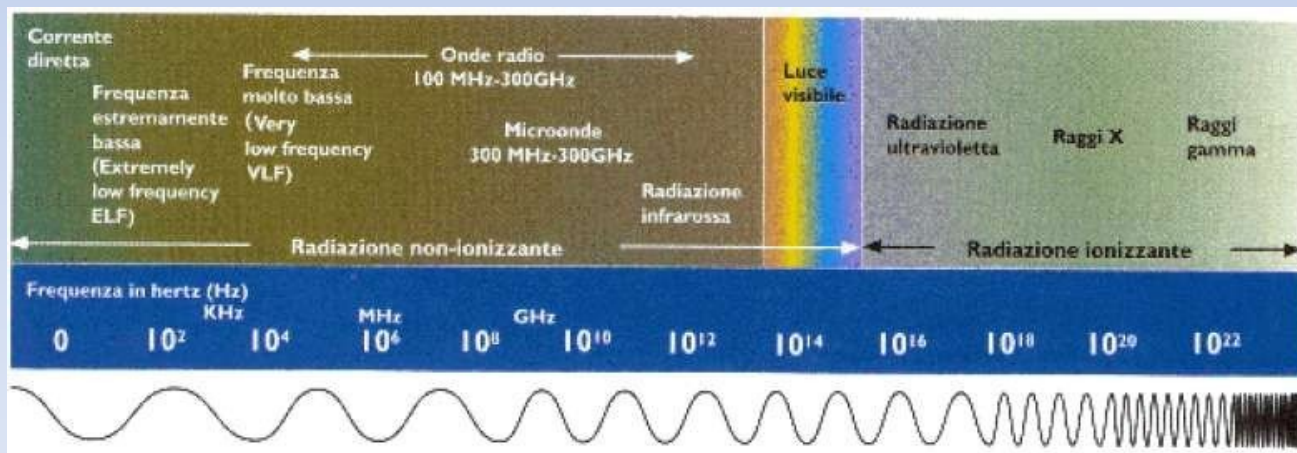
Controlli radiografici

Raggi X

$10^{12} \div 10^{14}$ MHz

Gammagrafia

$> 10^{14}$ MHz



$$\lambda = \frac{c}{f}$$

c = velocità della luce
(300.000.000 m/s)

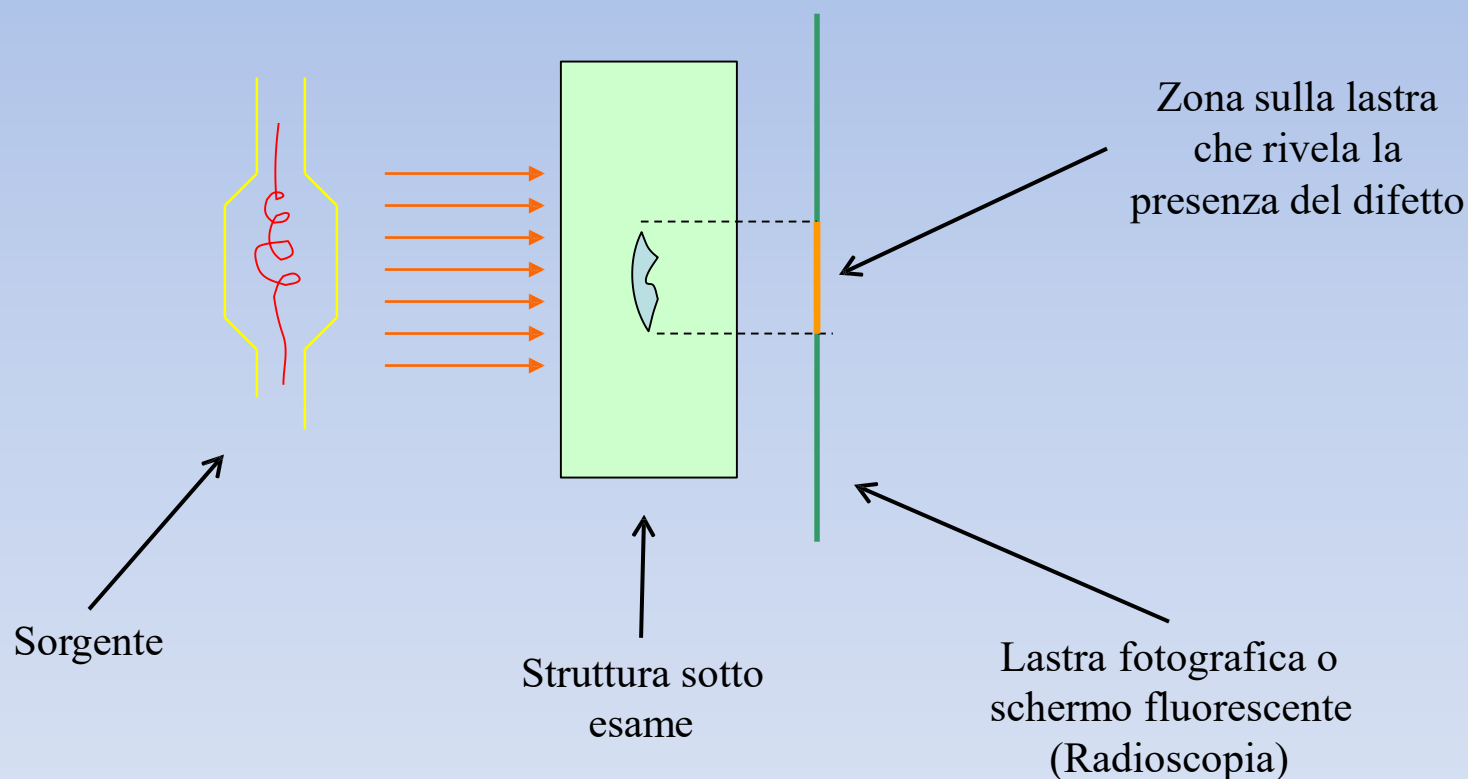
Controlli radiografici

Proprietà dei Raggi X e γ

- Possono penetrare nella materia;
- Sono assorbiti in maniera differenziale;
- Si propagano in linea retta;
- Ionizzano il gas attraversato;
- Non sono deviati da campi elettrici e magnetici;
- La loro velocità di propagazione è pari a quella della luce;
- Provocano la fluorescenza di alcuni materiali.

Controlli radiografici

Si sfrutta la diversità di assorbimento delle radiazioni elettromagnetiche



Principio fisico di base

- Differente assorbimento delle RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

Controlli radiografici

Raggi X

I raggi X sono onde elettromagnetiche con:

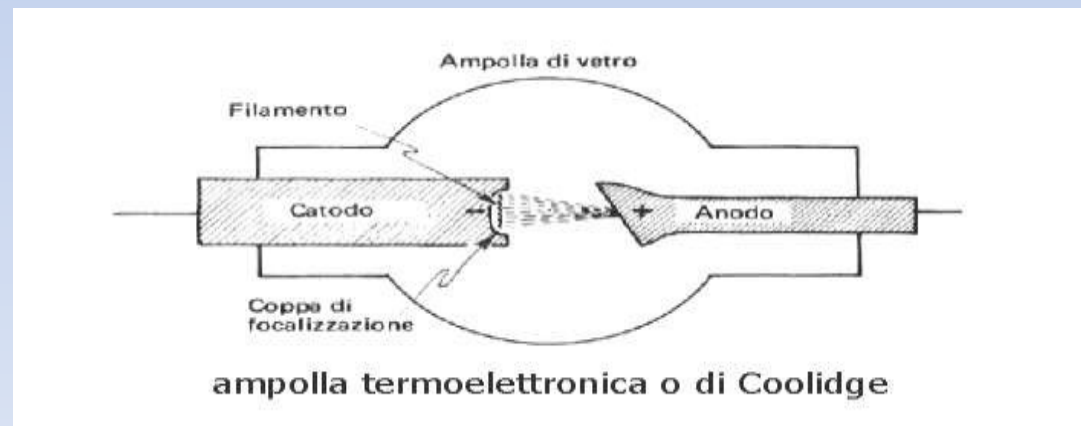
- frequenza $f = 10^{12} \div 10^{14}$ MHz
- lunghezza d'onda $\lambda = 1 \text{ \AA}$

Velocità di propagazione:

$$v = f \cdot \lambda$$

La sorgente di raggi X si chiama “TUBO DI COOLIDGE” : una ampolla in cui è praticato il vuoto ($10^{-5} - 10^{-6}$ Pa) ed in cui sono posti un anodo ed un catodo.

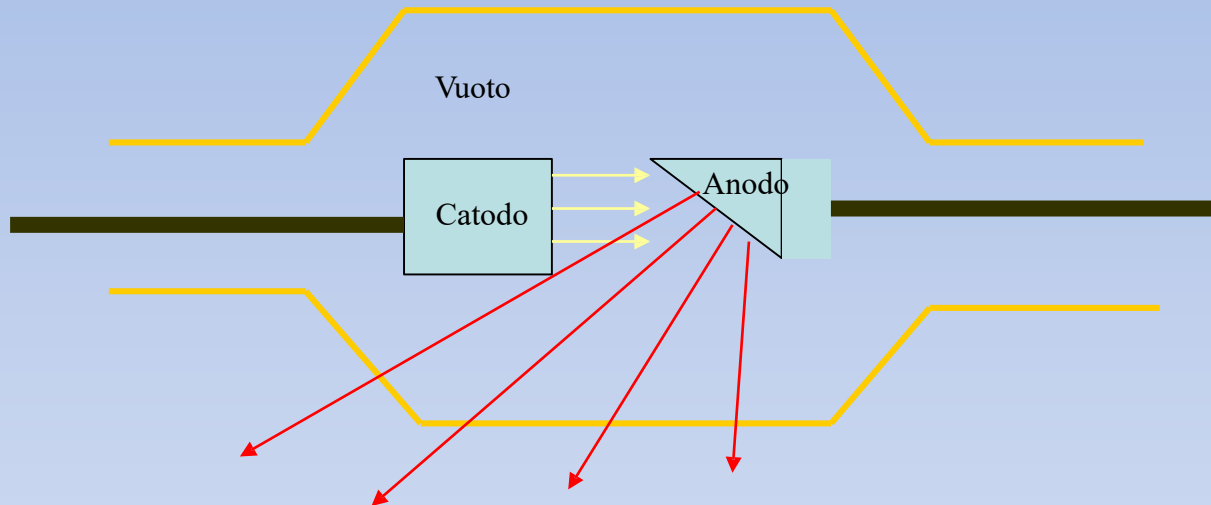
Fornendo una d.d.p. gli elettroni del catodo accelerano e vanno ad urtare violentemente sull'anodo generando i raggi X.



- non tutta l'energia cinetica degli elettroni si trasforma in raggi x
- la tensione in kV influenza il “carattere” del quadro radiologico

Controlli radiografici

Raggi X



Un elettrone ha la tendenza ad occupare l'orbita più interna possibile, cioè quella a minor energia. Pertanto, se un elettrone è strappato dal suo orbitale, subito un altro elettrone di un'orbita più esterna va ad occupare la sede rimasta libera. Quando ciò avviene, quest'ultimo elettrone emette i raggi X, il cui valore energetico è pari alla perdita di energia dovuta al salto dall'orbita originale a quella più interna.

Controlli radiografici

Raggi X

I raggi X penetrano nella materia e vengono da questa assorbiti, per cui la loro intensità diminuisce secondo la seguente legge:

$$E_x = E_0 \cdot e^{-kx}$$

Dove: E_x = intensità radiologica alla profondità x

E_0 = intensità radiologica iniziale

k = coefficiente di assorbimento variabile a seconda del materiale entro cui penetrano i raggi X

Controlli radiografici

Raggi X

Se l'intensità dei raggi X è insufficiente si può intervenire in tre modi:

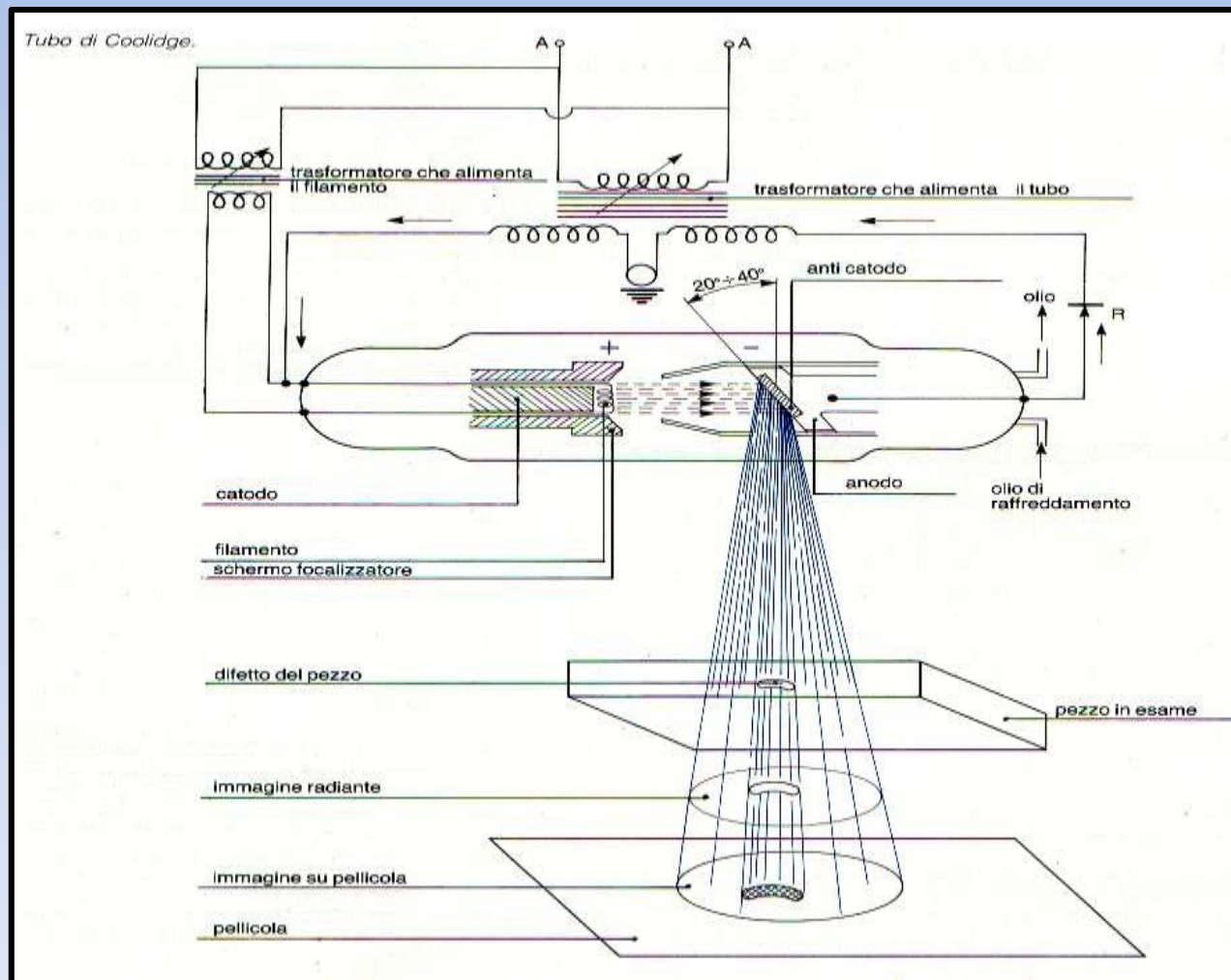
1. Aumentando i mA della corrente anodica “I”;
2. Diminuendo la distanza “d” tra la pellicola e la sorgente dei raggi X;
3. Aumentando il tempo “t” di esposizione.

Intensità:

$$E = \frac{I \cdot t}{d^2}$$

Controlli radiografici

Raggi X

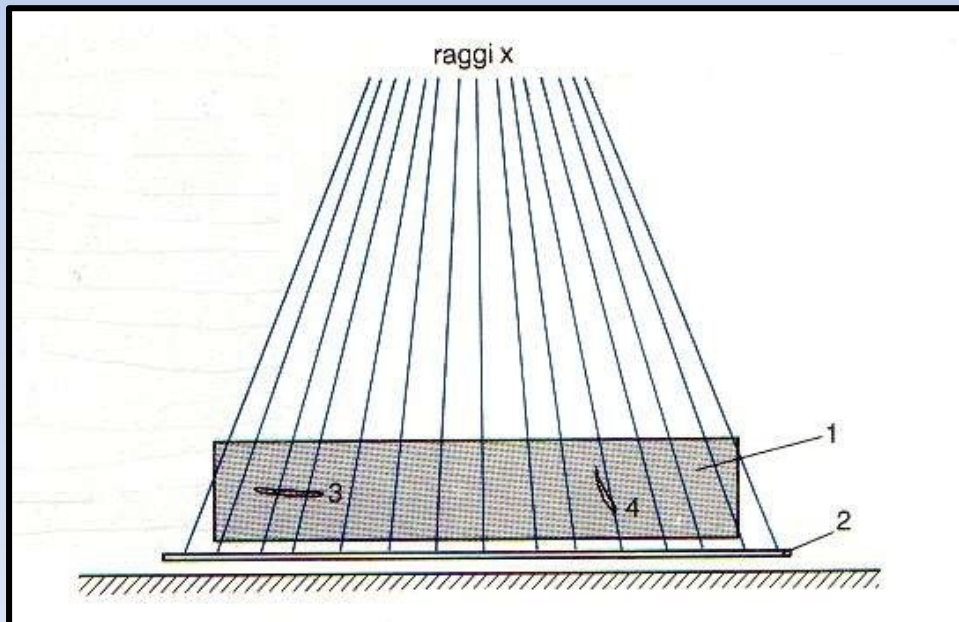


L'informazione ottenibile da un singolo controllo radiografico è *bidimensionale* e, come tale, deve essere integrata con altre radiografie o con altri metodi volumetrici affinché la discontinuità possa essere completamente caratterizzata.

Controlli radiografici

Raggi X

I difetti rilevabili con la radiografia devono essere abbastanza grandi. Difetti di dimensioni inferiori all'1% dello spessore del pezzo non sono rilevabili.



E' opportuno orientare il pezzo in modo che i raggi X siano ortogonali alla direzione della dimensione maggiore del difetto.

A tal proposito, è conveniente ispezionare il pezzo in più direzioni per poterne rilevare tutti i possibili difetti.

Controlli radiografici

Raggi X

A seconda della differenza di potenziale tra anodo e catodo possiamo avere:

Raggi molli: bassa tensione (10-17kV)

Danno un alto contrasto (tonalità marcata di bianco e nero), richiedono tempi di esposizione alti, il difetto è individuabile solo in pezzi con spessori limitati e costituiti da materiali con basso coefficiente di attenuazione ($\mu = 10^{-1}$ cm^{-1});

Raggi duri: alta tensione (110kV)

Danno un basso contrasto (tonalità grigia), permettono di ridurre i tempi di esposizione, possono essere utilizzati su spessori notevoli e per materiali con elevato coefficiente di attenuazione ($\mu = 10^{-2}$ cm^{-1}).

Per i materiali compositi si utilizzano raggi molli

Controlli radiografici

Gammagrafia

Il principio di rilevamento dei difetti è lo stesso dei raggi X, solo che in questo caso si utilizzano raggi ■

I raggi attraversano il pezzo subendo un assorbimento maggiore o minore, incontrando un difetto, per cui la lastra fotografica è rispettivamente meno o più impressionata in modo da rivelare il difetto stesso.

Valida alternativa quando non è possibile reperire l'energia sufficiente ad alimentare i raggi X.

Permette di determinare la porosità e la sua distribuzione, la variazione di intensità e il rapporto resina/fibra.



Controlli radiografici

Gammagrafia

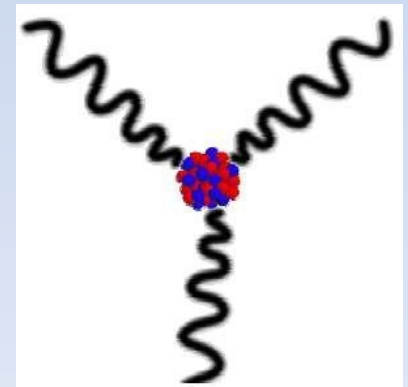
I raggi γ sono radiazioni elettromagnetiche della stessa natura dei raggi X e della luce visibile. Hanno però una lunghezza d'onda minore di quella dei raggi X e quindi sono più penetranti.

I raggi γ sono emanati da sostanze naturali oppure da sostanze attivate artificialmente in pile atomiche mediante un bombardamento con neutroni di elementi naturali stabili.

In gammagrafia sono utilizzate solo sostanze attivate artificialmente: iridio, cesio, cobalto, tullio.

Molto utilizzati sono gli isotopi radioattivi (Iridio 172)

Un isotopo possiede un nucleo instabile che non ha energia sufficiente a mantenersi unito. La disintegrazione spontanea origina un rilascio di energia e materia (*decadimento radioattivo*).



Controlli radiografici

Gammagrafia

La maggior parte degli isotopi radioattivi impiegati nei controlli industriali viene prodotta artificialmente mediante un processo di attivazione a partire da elementi stabili.

La tecnica dell'attivazione neutronica consiste sostanzialmente nell'esposizione del campione contenente l'elemento stabile ad un flusso di neutroni (generalmente provenienti da un reattore nucleare) per un tempo prefissato.



Controlli radiografici

Gammagrafia

Un'apparecchiatura per raggi ■ comprende:



1. Un corpo principale di protezione in piombo
2. Un porta-sostanza radioattiva
3. Un telecomando meccanico
4. Uno o più tubi rigidi o flessibili raccordabili

Controlli radiografici

Gammagrafia

Vantaggi

- Costi ridotti e facilità di trasporto dell'apparecchiatura.
- Elevata penetrazione delle radiazioni tanto da poter esaminare più pezzi insieme.
- Non necessità di elettricità.

Svantaggi

- A differenza dei raggi X, prodotti da una sorgente alimentata, la produzione di raggi gamma non può essere interrotta.
- Rispetto ai raggi X, questo metodo è meno sensibile per spessori sottili.
- Immagini poco contrastate.
- Significativi problemi di sicurezza.

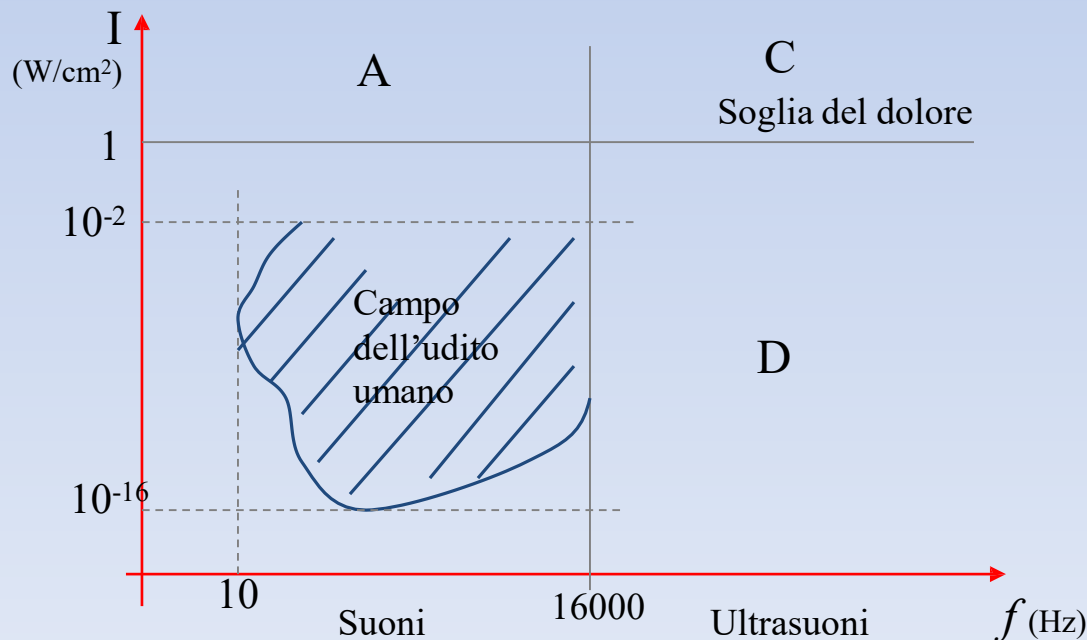
Controllo ad ultrasuoni

Definizione: gli **ULTRASUONI** sono vibrazioni meccaniche di corpi con frequenze maggiori di 16kHz (l'orecchio umano non li percepisce).

Velocità di propagazione delle onde longitudinali: $V_L = \sqrt{\frac{I}{\rho}}$

Intensità dell'onda (I) :

Quantità di energia, associata all'onda, che attraversa una unità di superficie nell'unità di tempo. [W/cm²]

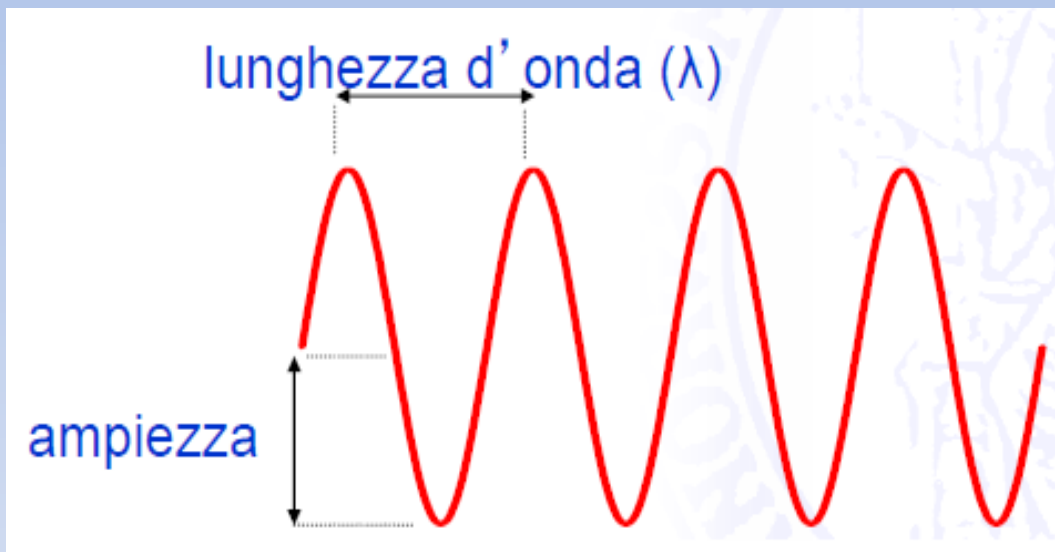


Alla zona D appartengono gli ultrasuoni di bassa intensità utilizzati per i controlli non distruttivi.

Basse intensità ed elevate frequenze.

Controllo ad ultrasuoni

Un'onda sonora è caratterizzata da una **lunghezza d'onda** (distanza fra due picchi consecutivi) e un'**ampiezza** (altezza dei picchi)



c = velocità di propagazione del suono
nel mezzo considerato [m/s]

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

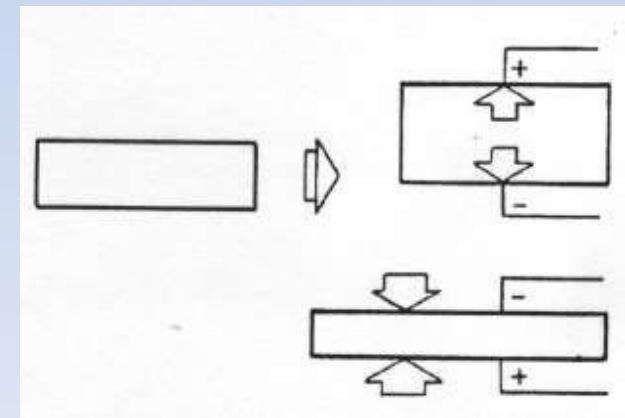
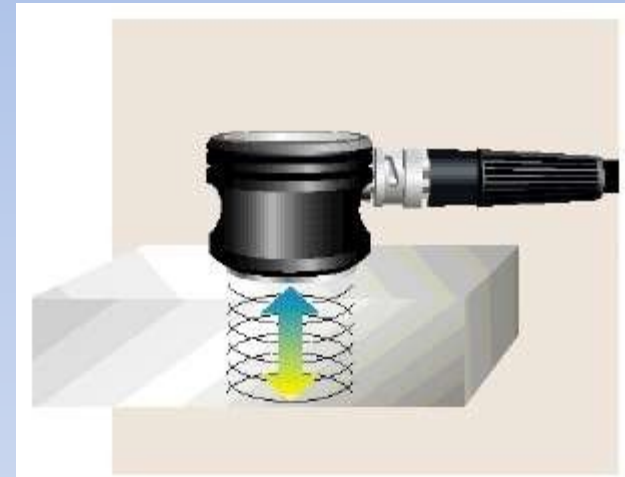
La frequenza è il numero di cicli della forma d'onda ripetitiva per secondo. Si misura in hertz [Hz=1/s]

Il suono si propaga nei corpi mediante la vibrazione elastica degli atomi e delle molecole ad una velocità che dipende dalle caratteristiche del materiale attraversato.

Controllo ad ultrasuoni

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 esprime l'abbinamento di due manifestazioni: una di natura meccanica e l'altra di origine elettrica.
- ✓ Se alle superfici opposte di un blocco di materiale piezoelettrico viene applicata una tensione elettrica, il blocco 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.



Controllo ad ultrasuoni

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 costituenti un treno di onde.
- L'ampiezza (e quindi la durata) di tali 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 oscilla, la vibrazione viene trasmessa per contatto.
- Si viene dunque a costituire una tensione elettrica tra le due superfici, caratterizzata da un'alternanza dei segni + e – sulle superfici stesse, ogniqualevolta il trasduttore passa dalla condizione di massima estensione a quella di massima contrazione.
- In tali condizioni, il trasduttore oscillante equivale ad un generatore di tensione alternata, che viene trasmessa al pulsatore e da questo all'oscilloscopio per la visualizzazione.

Controllo ad ultrasuoni

Si sfruttano i fenomeni di propagazione degli ultrasuoni nei solidi

Presenza difetto



cambiamento delle impedenze acustiche

Principio fisico di base

- Riflessione e trasmissione degli ULTRASUONI

Controllo ad ultrasuoni

Affinché un difetto venga rilevato, occorre che una parte dell'energia ultrasonica proveniente dalla sonda, ritorni dal difetto alla sonda stessa. Sono quindi fondamentali per il rilevamento:

- Orientazione del difetto rispetto alla sonda
- Dimensione del difetto
- Natura della discontinuità

In pratica gli ultrasuoni vengono riflessi se i difetti rappresentano un ostacolo al loro passaggio, cioè se si manifesta una diversa “impedenza acustica” Z del difetto rispetto a quella del pezzo.

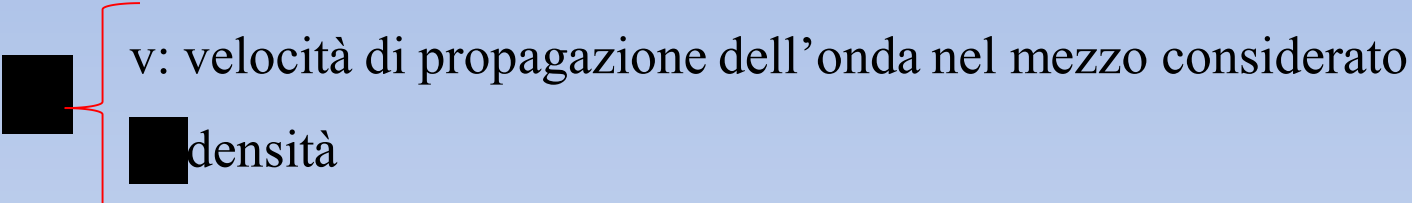
Alcune impedenze
acustiche

	ρ (Kg m ⁻³)	v (ms ⁻¹)	Z (Kg m ⁻² s ⁻¹)	Attenuazione (dB cm ⁻¹ MHz ⁻¹)
Aria	1.3	330	429	>10
Acqua	1000	1480	1.5×10^6	0.002
Grasso	900	1450	1.3×10^6	0.6
Muscolo	1080	1585	1.7×10^6	1.5
Polmone	220	900	0.2×10^6	30
Sangue	1030	1570	1.6×10^6	0.18
Osso	1850	4000	7.4×10^6	8

Controllo ad ultrasuoni

L'impedenza acustica è una caratteristica del mezzo e viene definita come:

$$Z = v \cdot \rho$$



L'onda incontrando una fase con diversa impedenza acustica viene in parte riflessa.

La riflessione sarà tanto più grande quanto maggiore è la differenza delle impedenze.

R: coefficiente di riflessione

Z_m : impedenza del pezzo

Z_d : impedenza del difetto

$$Z_m = v_m \cdot \rho_m$$

$$Z_d = v_d \cdot \rho_d$$



$$R = \left(\frac{Z_m - Z_d}{Z_m + Z_d} \right)^2$$

Controllo ad ultrasuoni

Si dimostra che nel rilevamento di un difetto ha importanza anche il suo spessore rispetto alla lunghezza d'onda delle onde ultrasoniche usate. Precisamente, affinché il difetto sia rilevabile, bisogna che il suo spessore “s” verifichi la relazione:

$$s \geq \frac{\lambda}{4}$$

■ lunghezza d'onda

Se il difetto fosse di spessore inferiore, il fascio ultrasonico lo attraverserebbe senza subire alcun mutamento.

Dato che la velocità (V) nei materiali omogenei ed isotropi è costante nel mezzo, per aumentare la sensibilità del controllo è utile utilizzare frequenze (f) più elevate.

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

N.B.

Il coefficiente di assorbimento $K = \text{fun}(f^2/\rho v^3)$ cresce all'aumentare della frequenza, quindi non si può aumentare troppo quest'ultima onde evitare un rapido smorzamento dell'onda.

Controllo ad ultrasuoni

Quando un'onda ultrasonora attraversa un corpo subisce una naturale attenuazione della sua intensità secondo una legge del tipo:

$$I_x = I_0 \exp(-Kx)$$

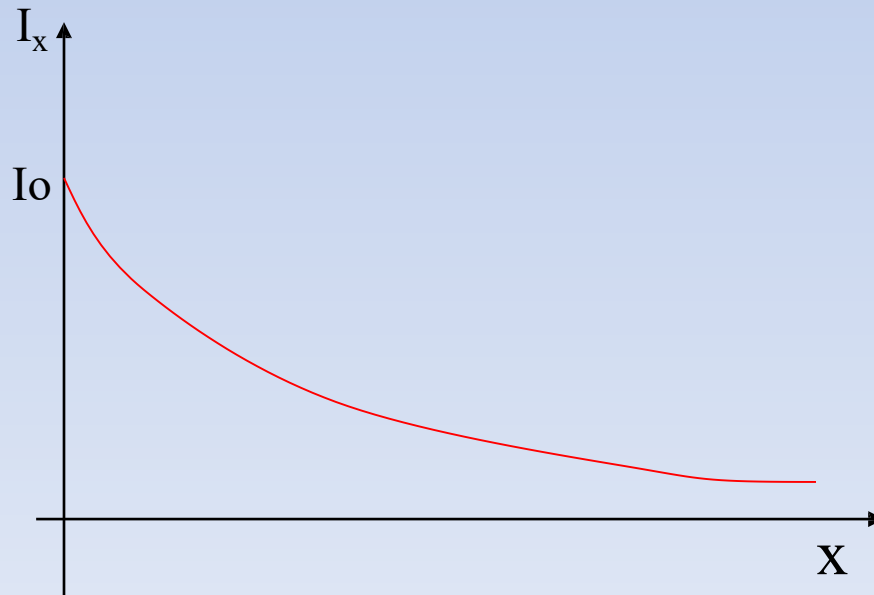
K è il coefficiente di assorbimento che dipende dal materiale e dalla frequenza del segnale.

K cresce all'aumentare della frequenza: $K = \text{fun}(f^2/\rho v^3)$

f: frequenza

■ densità

v: velocità dell'onda



$$K(\text{Alluminio})=1$$

$$K(\text{Acciaio})=12 \div 25$$

$$K(\text{Vetro})=130$$

$$K(\text{Gomma})=13000$$

Controllo ad ultrasuoni

Possono essere impiegate differenti tecniche operative:

Tecnica in
RIFLESSIONE

Tecnica in
TRASPARENZA

Dunque è possibile individuare il difetto misurando la riflessione dell'onda ultrasonora o la sua attenuazione.

N.B.

In entrambe le tecniche si utilizza un mezzo di accoppiamento o addirittura la tecnica “in immersione” per favorire la trasmissione delle onde al pezzo da testare.

Controllo ad ultrasuoni

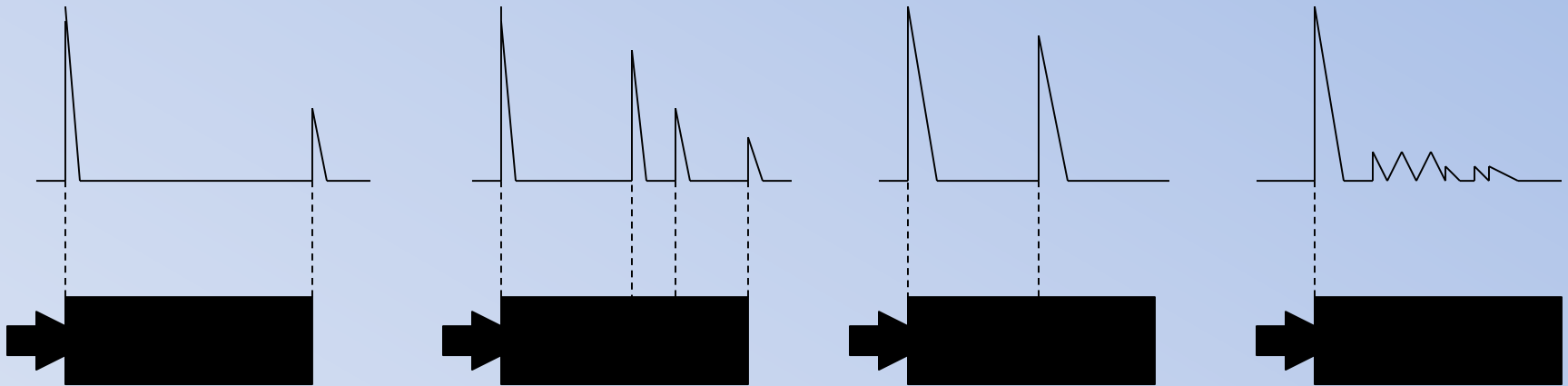
Tecnica in Riflessione (Pulse-echo)

Si utilizzano sonde che fungono contemporaneamente da trasmettitori e ricevitori degli ultrasuoni



Controllo ad ultrasuoni

Tecnica in Riflessione



Pezzo troppo sottile:

Impulso iniziale e la riflessione della superficie opposta interferiscono.

Pezzo troppo spesso:

Eccessiva attenuazione anche in pezzi senza difetti.

Controllo ad ultrasuoni

Tecnica in Riflessione

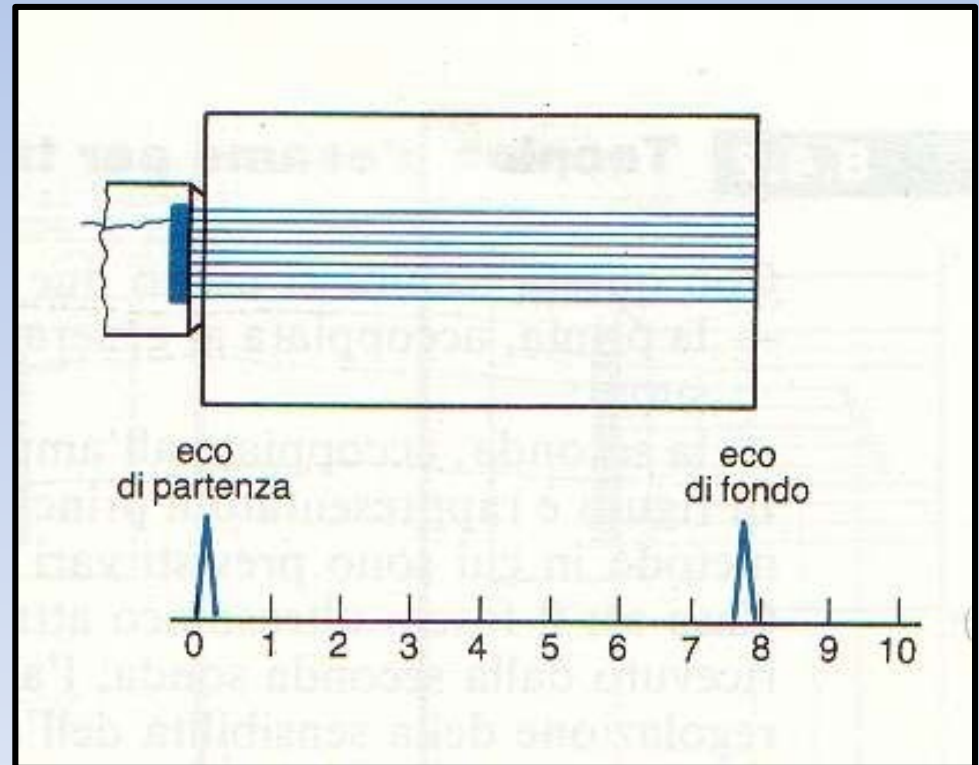
Senza difetti



Difetto normale

Difetto esteso

Difetto parallelo



Controllo ad ultrasuoni

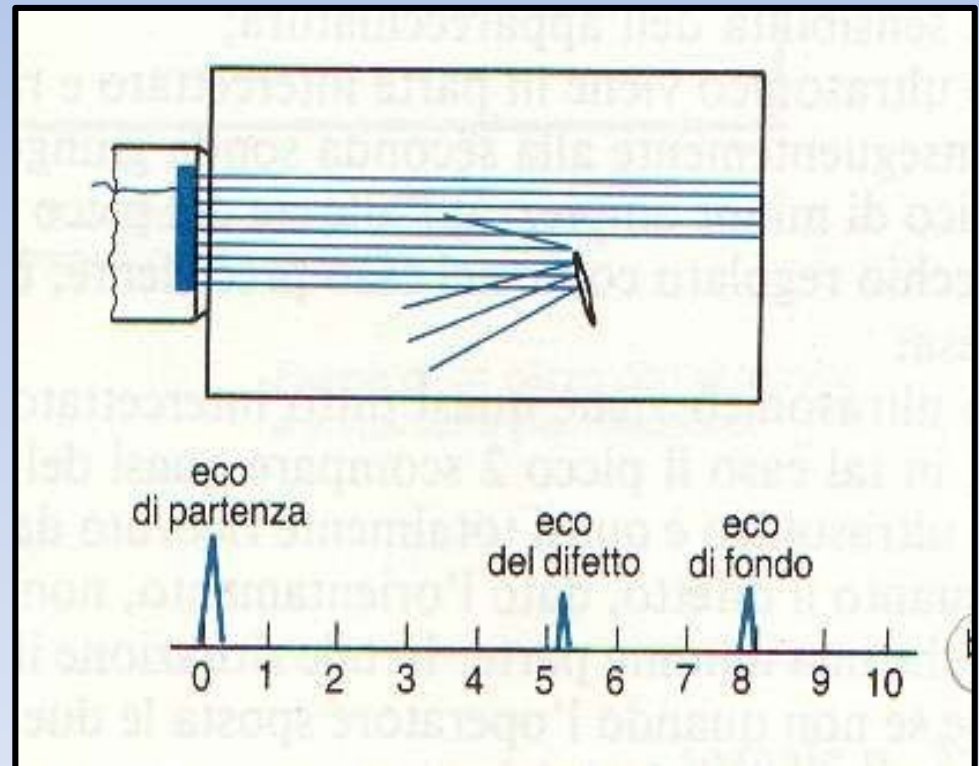
Tecnica in Riflessione

Senza difetti

Difetto normale

Difetto esteso

Difetto parallelo



Controllo ad ultrasuoni

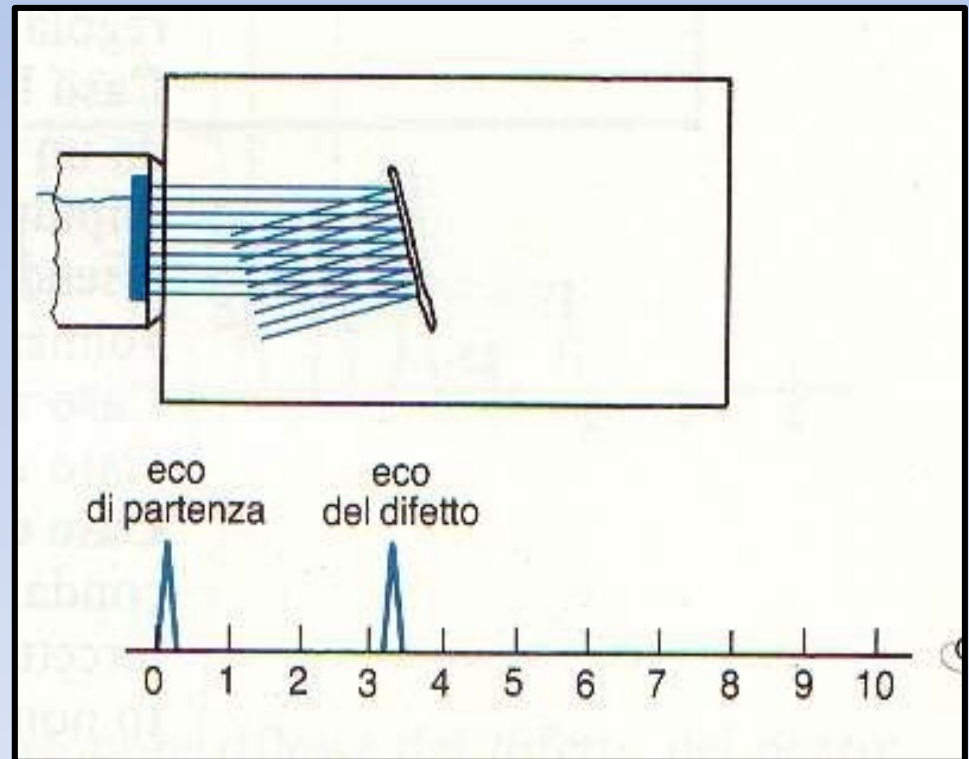
Tecnica in Riflessione

Senza difetti

Difetto normale

Difetto esteso

Difetto parallelo



Controllo ad ultrasuoni

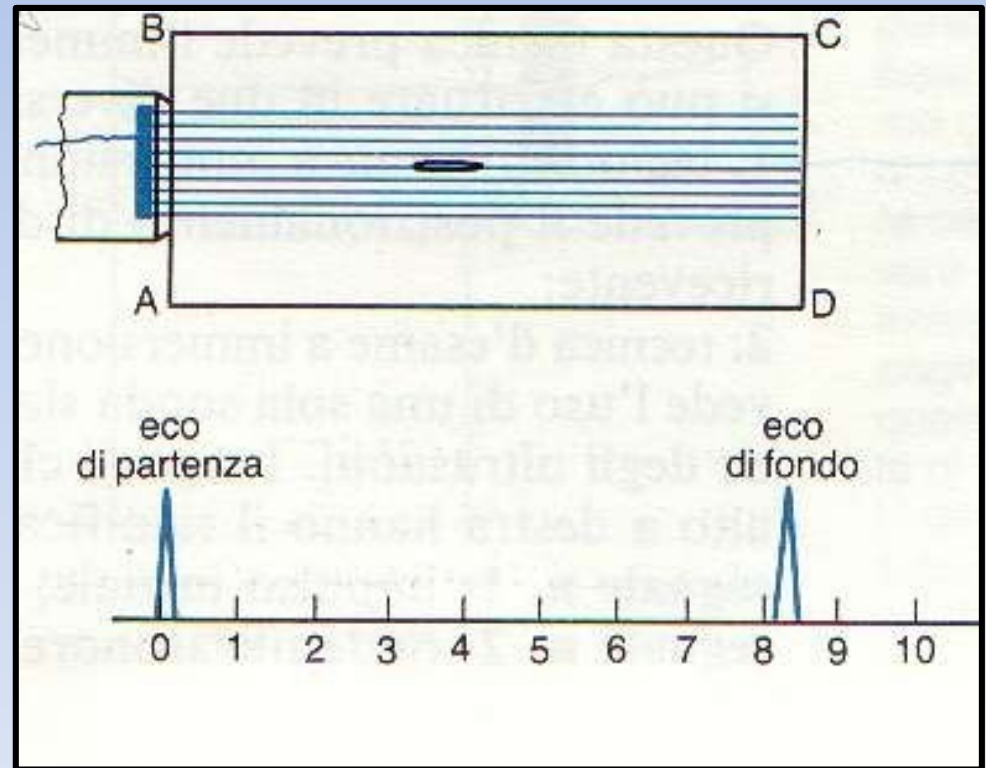
Tecnica in Riflessione

Senza difetti

Difetto normale

Difetto esteso

Difetto parallelo →



Controllo ad ultrasuoni

Tecnica in Riflessione

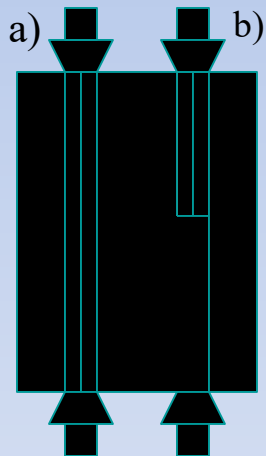
Considerazioni:

- Il difetto viene individuato se l'energia viene riflessa prima di raggiungere la superficie opposta.
- Questo è l'unico metodo che ci consente la localizzazione in profondità del difetto valutando la distanza tra i picchi di riflessione.
- Ottimo per rilevare le delaminazioni
- Il limite di questo sistema è l'impossibilità di ispezionare pezzi di spessore elevati a causa del doppio percorso dell'onda.

Controllo ad ultrasuoni

Tecnica in Trasparenza (Pitch catch)

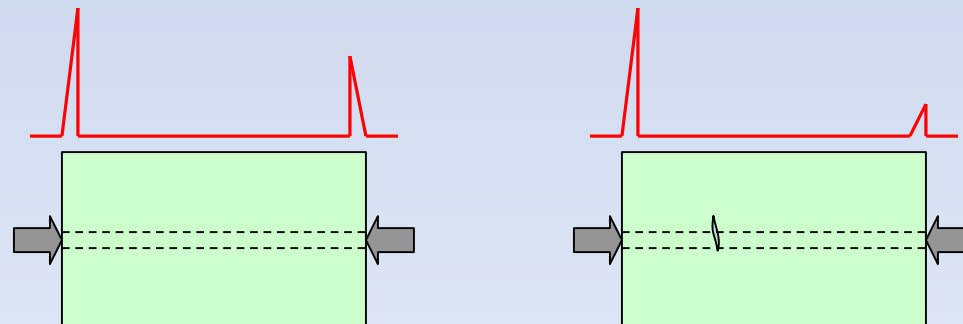
Si utilizzano due trasduttori diversi, uno per l'emissione e l'altro per la ricezione



Presenza del difetto



Diminuzione dell'energia ultrasonora rilevata
dalla sonda ricevente



Controllo ad ultrasuoni

Tecnica in Trasparenza

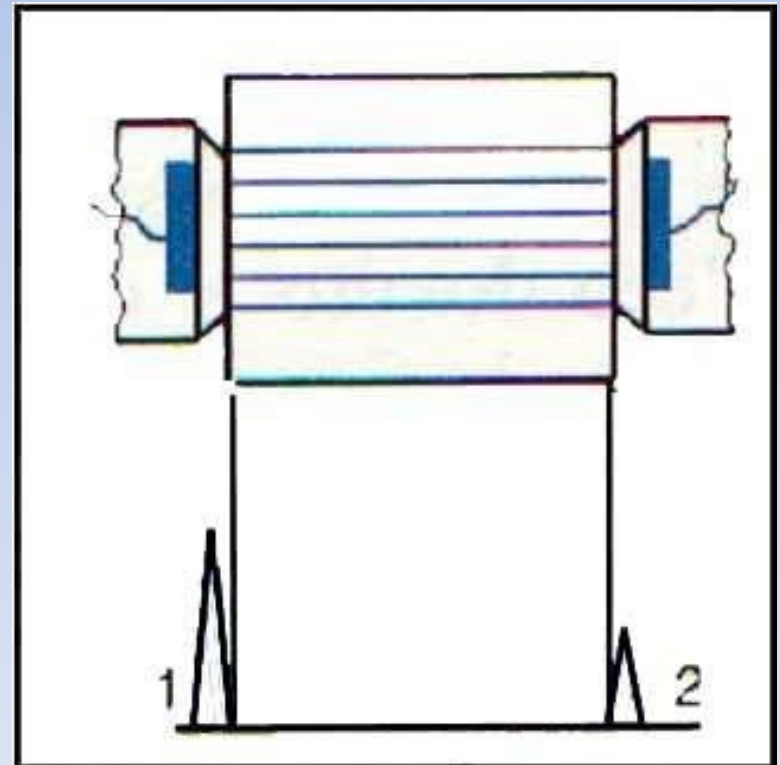
Senza difetti



Difetto normale

Difetto esteso

Difetto parallelo



Controllo ad ultrasuoni

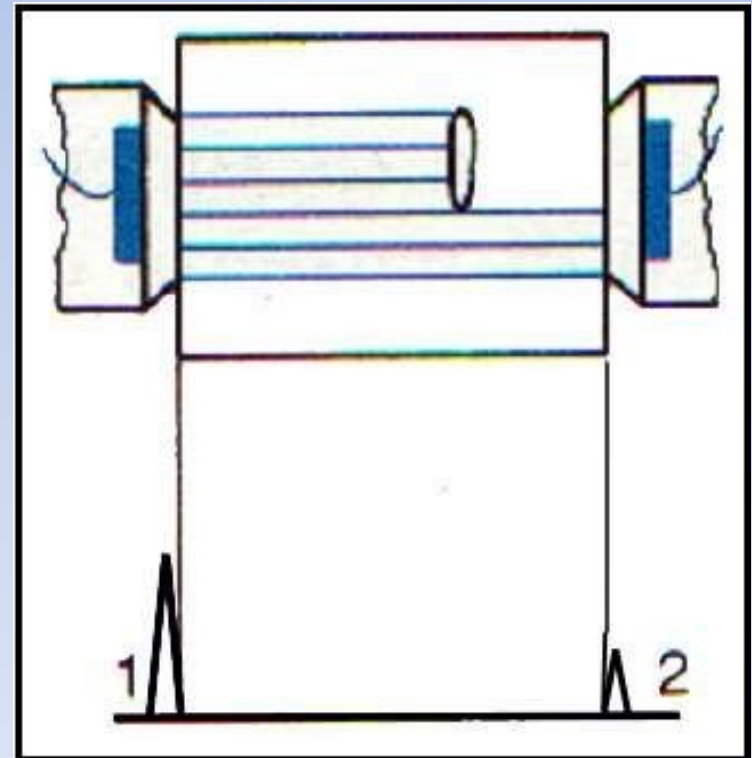
Tecnica in Trasparenza

Senza difetti

Difetto normale

Difetto esteso

Difetto parallelo



Controllo ad ultrasuoni

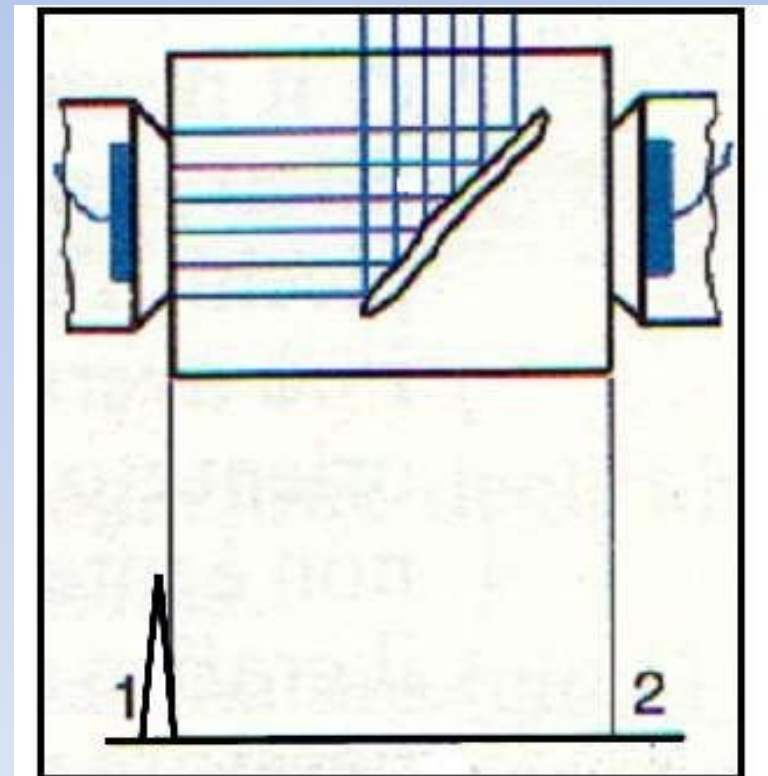
Tecnica in Trasparenza

Senza difetti

Difetto normale

Difetto esteso

Difetto parallelo



Controllo ad ultrasuoni

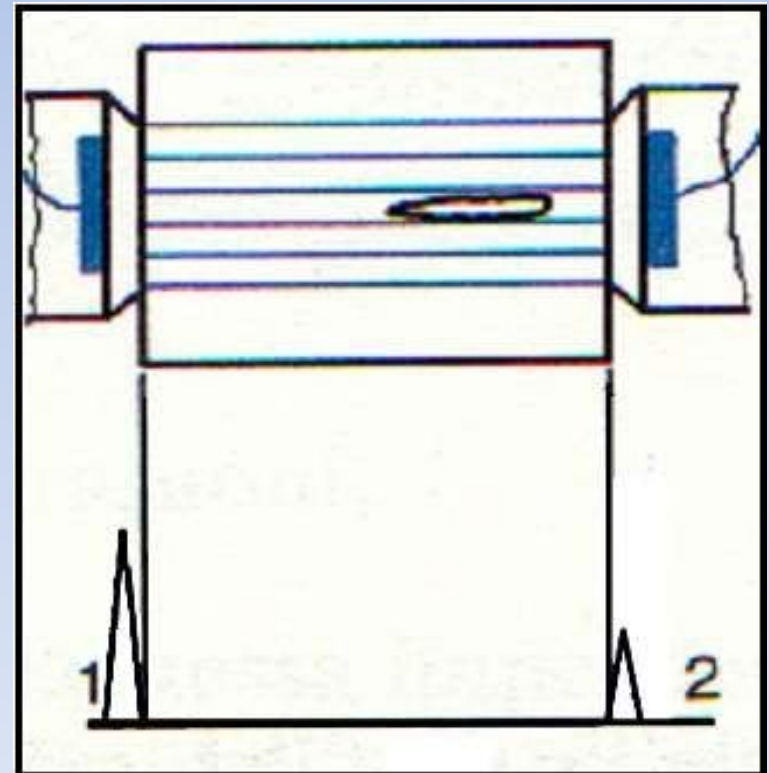
Tecnica in Trasparenza

Senza difetti

Difetto normale

Difetto esteso

Difetto parallelo



Controllo ad ultrasuoni

Tecnica in Trasparenza

Considerazioni:

- Necessità di avere entrambe le superfici accessibili
- Bisogna conoscere la legge di attenuazione dell'onda
- Non si può valutare la profondità dei difetti
- Si dimezza il percorso del fascio
- Necessario l'allineamento delle due sonde

Questo metodo permette di rilevare i difetti meglio della tecnica per riflessione.

Viene utilizzato su pezzi di grandi serie e di forma geometrica semplice.

Controllo ad ultrasuoni

Tecnica in immersione

Con questa tecnica si risolve il problema dell'accoppiamento acustico sonda-pezzo.

In pratica sia la sonda (o le sonde) che il pezzo da testare vengono immersi in acqua o in altro liquido opportuno.

In tal modo gli ultrasuoni vengono inizialmente trasmessi nel liquido e, solo dopo un certo percorso in esso, giungono all'interfaccia liquido-solido dove ha inizio il percorso nel materiale.

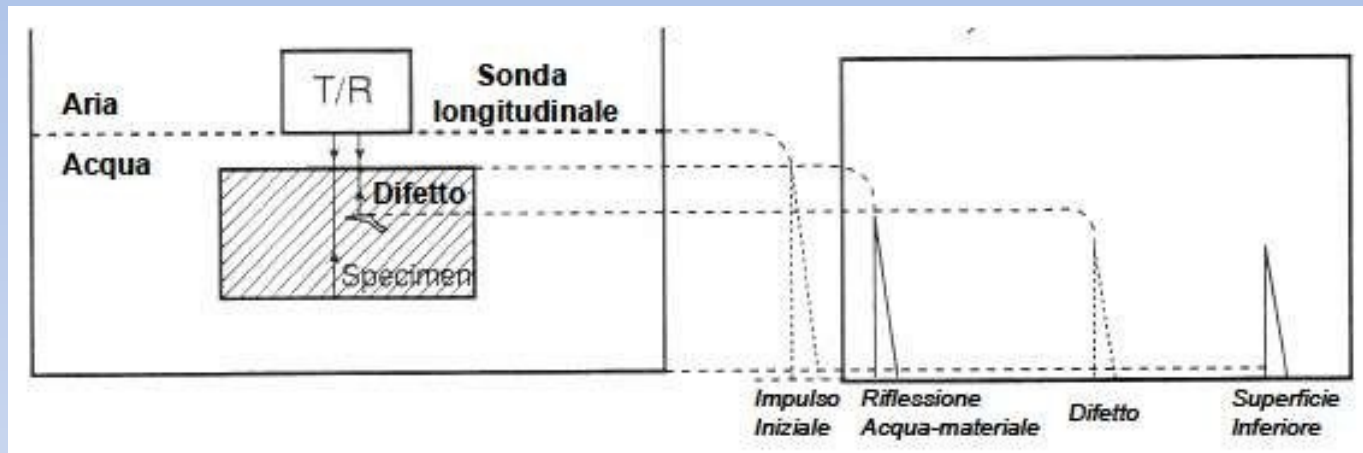


Nelle realizzazioni più semplici il sistema di controllo è costituito da una vasca munita di guide sulle quali scorre un carroponte con possibilità di moto nel piano XY.

Lungo l'asse Z è montato un manipolatore che permette la traslazione verticale e la rotazione della sonda.

Controllo ad ultrasuoni

Tecnica in immersione (es. riflessione)



- Si visualizza un primo picco legato all'impulso di emissione del trasduttore (tratteggiato in figura) ed un picco di ampiezza minore che rappresenta la prima riflessione all'interfaccia liquido-pezzo.
- Se il fascio ultrasonico incontra una discontinuità, si registra un altro picco dovuto alla parziale riflessione da parte del difetto a diversa impedenza acustica.
- Infine si evidenzia un ultimo picco dovuto alla superficie inferiore del pezzo.

Controllo ad ultrasuoni

Tecnica in immersione

Tale procedura consente di ottenere alcuni indubbi vantaggi:

- L'accoppiamento tra sonda e pezzo è assolutamente costante ed uniforme (e ciò garantisce di conseguenza una notevole sensibilità e stabilità del segnale);
- Possono essere testati anche pezzi aventi geometria complessa;
- Possono essere impiegati sistemi di ispezione automatizzati.

Controllo ad ultrasuoni

Oscilloscopio



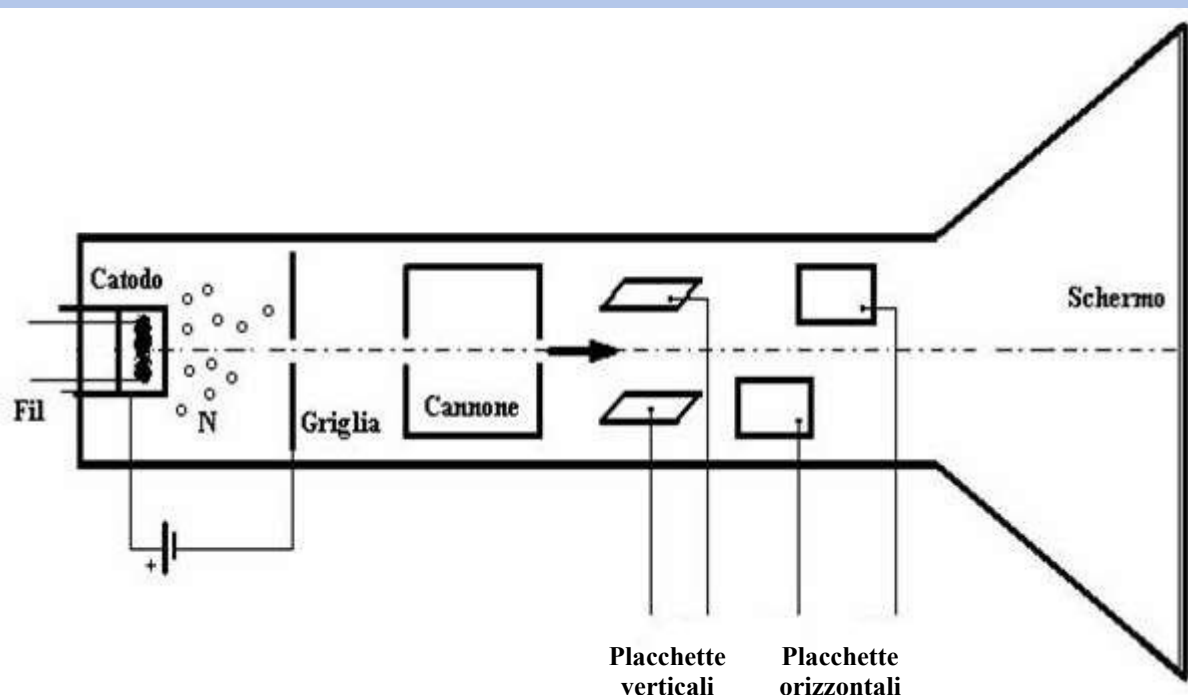
È lo strumento che ci permette di visualizzare su un grafico bidimensionale l'andamento del fascio ultrasonoro collegato alla sonda ricevente.

L'asse orizzontale rappresenta il tempo, mentre l'asse verticale riporta la tensione dovuta agli impulsi riflessi o trasmessi a seconda della tecnica adottata.

L'elemento fondamentale dell'apparecchiatura è il tubo a raggi catodici che è parte integrante dello schermo di visualizzazione

Controllo ad ultrasuoni

Oscilloscopio: tubo a raggi catodici



È un'ampolla di vetro, a vuoto spinto, entro il quale si produce un fascio di elettroni (raggio catodico) che attraverso un sistema di focalizzazione e dopo due deviazioni (orizzontale e verticale) va ad urtare contro lo schermo fluorescente provocando il segnale visibile sul display dell'oscilloscopio.