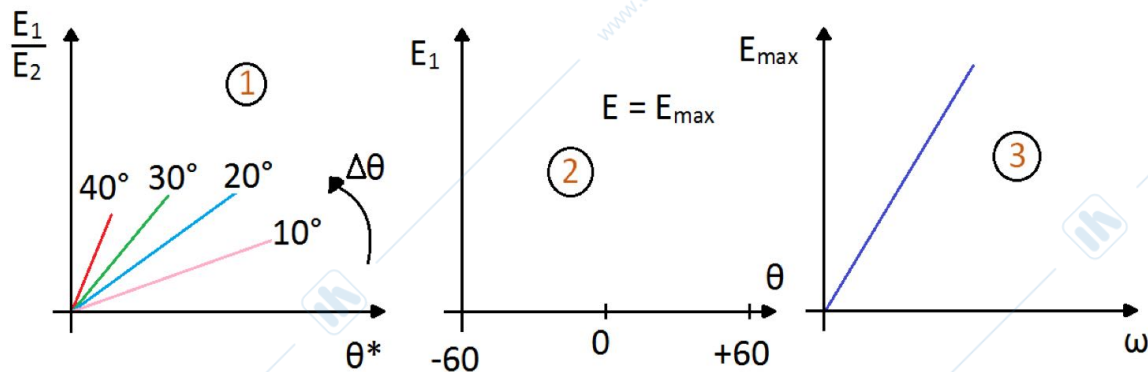


## 8. Misure di Velocità



Anemometro a filo caldo (a  $T$  costante).

- Il sensore è costituito da un filo scaldato ad una temperatura superiore di quella del fluido in cui si trova esposto. Il flusso d'aria che lambisce il sensore tende a raffreddarlo. Un circuito a ponte mantiene il sensore ad una  $T$  costante (per effetto Joule) qualunque sia la velocità del fluido. Maggiore sarà la potenza per mantenere la  $T$  costante e maggiore sarà la velocità. La potenza dissipata è direttamente proporzionale alla velocità dell'aria.
- Dalla taratura ottengo i seguenti grafici:



Posiziono l'anemometro a caso e rilevo  $E_1$  poi lo ruoto di un angolo  $\theta$  noto e rilevo  $E_2$ .

- Nel grafico ① sfruttando le conoscenze di  $\Delta\theta$  e di  $E_1/E_2$  trovo  $\theta^*$ , che è l'angolo rispetto alla direzione del flusso. Attraverso la conoscenza di  $\theta^*$  e  $E_1$  trovo un punto nel grafico ②. Cerco la curva che passa per quel punto e così ho trovato la  $E_{max}$  relativa a quella curva. Sfruttando il grafico ③ trovo  $\omega$  con la sua  $E_{max}$  che ho appena trovato. Posso immaginare il grafico ② giacente sul piano del grafico ③ come se  $\theta^*$  fosse uscente dal grafico.
- Per fare prima esistono anemometri di questo tipo con 2 o 3 fili.

Il primo filo per avere già due valori di tensione ed un  $\Delta\theta$  fissato ed il secondo per avere una misurazione della velocità nelle tre direzioni.

I fili sono piccolissimi per non disturbare il flusso, quindi le inerzie sono nulle e posso misurare velocità molto alte. Devo evitare che il filamento bruci.

Noi misuriamo una  $\Delta V$  od una  $\Delta i$  per risalire poi alla  $V$ -

Ne esistono di tre tipi:

$T, \Delta V, \Delta i$  costanti

Con il tipo a  $T$  costante devo fornire una potenza per mantenere le condizioni costanti.

Principio analogo per gli altri 2

Questi anemoemtri a filo caldo sono usati per la ricerca in fluidodinamica sia per misure che controlli di flussi d'aria nel campo del condizionamento d'aria (HVAC), della qualità dell'aria (indoor air quality) e dell'igiene industriale.

Sono sensori molto sottili in grado di seguire anche flussi ad elevata turbolenza nel campo

tridimensionale.

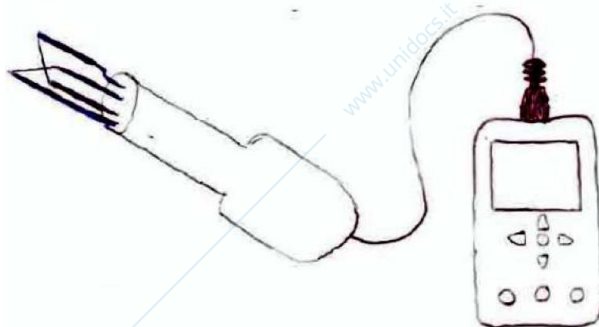
Non disturbano il flusso.

Elevata velocità di risposta

Misura diretta

sensibilità a basse velocità

accuratezza e ripetibilità misure



Voltmetro  
compreso di  
generatore di  
corrente

Taratura dipende da caratteristiche fluido, pressione, temperatura

Molto delicati

## **PROVE NON DISTRUTTIVE**

I controlli o prove non distruttive sono una classe di controlli che differenziano dalle misure ma che compongono comunque una parte importante dell'ambito delle misure e collaudi.

Quando prendiamo in analisi un materiale, si assumano come ipotesi la sua continuità, isotropia, omogeneità e linearità elastica. Attraverso queste ipotesi, come abbiamo visto al corso di SDC, possiamo determinare le tensioni e le deformazioni causate da un determinato sistema di carico su di un componente. Tale modello matematico poi viene confermato dalle misure che abbiamo fatto fino ad ora.

Tutto questo però è teoria, nella realtà il materiale subisce un **degrado** che ne determina un peggioramento delle proprietà. Di un materiale quindi attraverso queste prove non distruttive vogliamo andare a verificare la sua **integrità strutturale, ovvero la capacità di assolvere alla funzione strutturale prevista nel modo e nelle condizioni previste per un arco di tempo desiderato**. Secondo, infatti, la teoria di SDC una volta dimensionato un componente, durerebbe all'infinito perché tutte le grandezze di studio sono tempo invarianti. Nell'atto pratico invece qualsiasi componente, anche se dimensionato ad oc, prima o poi arriverà a rottura.

Il deterioramento dell'integrità strutturale si manifesta solitamente con la comparsa di difetti di vario genere già durante dei processi di fabbricazione (esempio la saldatura, la fusione, la tornitura etc.).

I controlli non distruttivi hanno dunque lo scopo di determinare gli eventuali difetti presenti nella struttura e quando questi più o meno si genereranno in modo tale da determinare un tempo dopo il quale eseguire una sostituzione. I controlli non distruttivi quindi, indicati con la sigla **CnD** non sono una misura effettiva, ma un processo diagnostico che mira alla valutazione dell'integrità strutturale e come questa varia nel tempo.

Dobbiamo prima di tutto distinguere i termini, per cui si definisce **danneggiamento** la variazione di una proprietà intrinseca della struttura, **degrado** come questa varia nel tempo e **difetto** la sua manifestazione esteriore. **Con il controllo non distruttivo non possiamo misurare quindi il degrado in quanto tale, come modificazione microstrutturale, ma solo la sua manifestazione esteriore ovvero i difetti.**

Tale stato di degrado dipende da molteplici fattori, a partire dalle tensioni interne al materiale che si possono generare anche in fase di produzione, dai difetti microcristallini come vacanze, scorie e dislocazioni, tensioni residue etc. Questo comporta che io non possa conoscere a priori lo stato di degrado di un componente prodotto visto l'enorme quantità di variabili che influenzano il processo.

In fase di progetto posso quindi seguire diversi approcci, il primo dei quali è quello di progettazione **a vita infinita** dove supponiamo di non sottoporre un componente a uno sforzo superiore a quello del suo limite a fatica (**vedi appunti Costruzioni di macchine**).

In altri casi si segue invece **l'approccio safe-life** basato cioè sulla previsione di una vita finita del componente. Questo secondo approccio in molti casi conviene, per far sì che la struttura in questione abbia delle dimensioni ridotte e costi di produzione inferiore, anche a discapito di una futura sostituzione. L'approccio safe-life nasce in ambito della progettazione di impianti nucleari, in quanto delle volte può essere più sicuro progettare immaginando di dover sostituire prima o poi il componente piuttosto che senza prevedere un superamento delle forze limite. In altri casi può convenire addirittura accettare la presenza di difetti all'interno del materiale e progettare tenendo conto della loro pericolosità seguendo un approccio **fail-safe** (ovvero rottura sicura, per cui vado a dimensionare il componente in modo tale che quando si rompe lo possa sostituire agilmente e che non causi danni a niente e nessuno), oppure in controllo **damage tolerant** (dove vengono usate teorie della meccanica delle fratture per tenere sotto controllo i difetti e valutarne la loro crescita e pericolosità).

Tutti questi approcci richiedono però che si possa evidenziare a priori o meno, la presenza di difetti e valutarne la loro entità, per cui occorrono i CnD.

**Ogni tecnica di controllo è caratterizzata da una minima dimensione del difetto rilevabile.**

### Il difetto

Il difetto come abbiamo detto è la manifestazione esterna del degrado, ma cosa causa il degrado di un corpo. Come abbiamo visto a costruzioni di macchine, il degrado, per cui il difetto e la sua propagazione, possono essere originati solo da carichi alternati. Il degrado può anche dipendere dall'ambiente, corrosivo o termico. Ogni forma di degrado è poi irreversibile e non può essere quindi rimosso anche se il componente riassume al forma di partenza.

Il difetto quindi è un danneggiamento, localizzato, irreversibile e misurabile correlato ai meccanismi di degrado e all'entità del danno. **Il difetto, quindi, è una sintesi della storia del danneggiamento pregresso subito dal materiale.**

Ragionando quindi in un approccio damage tollerant, mettendoci quindi nell'ottica di misurare tale difetto, dobbiamo introdurre un **parametro di controllo del danno** oltre il quale è opportuno non andare e rispetto al quale costruire una scala di misura.

La scala di misura del danno è ovviamente poi completamente opposta a quella dell'integrità strutturale per cui, **il massimo danno corrisponde alla minima integrità.**

**I difetti possono essere classificati** in funzione della loro **entità** in:

- difetti non rilevabili, che possono essere stimati e sopportare che esistano sempre questi difetti.
- difetti non registrabili
- difetti registrabili
- difetti di dimensione limite accettabile
- difetti non accettabili, ma comunque non invalidanti per il pezzo perché in zone non molto importanti e poco sollecitate
- difetti non accettabili e invalidanti

in funzione **della loro origine**:

- dovuti alla fabbricazione
- dovuti all'esercizio

**in base alla forma**, che ne determina la concentrazione di sforzo:

- planare, dovuto ad un processo di laminazione ad esempio
- volumetrica dovuta ad un intaglio causato da un componente.
- ramificata
- nube di difetti, dovuta a un'azione di un agente acido o a una saldatura.

in base **al tipo**:

- cricca
- delaminazione
- taglio
- inclusione di scoria
- porosità
- mancanza di materiale di apporto

**in base alla posizione:**

- nel materiale di base o di apporto
- superficiale
- sub-superficiale
- interno

**Ovviamente, non tutte le prove mi permettano di misurare tutti i difetti e le loro caratteristiche per cui, in funzione del difetto ci sono manuali che indicano la dimensione accettabile massima e come misurare al meglio il difetto stesso.**

Il damage tollerant come sistema ovviamente prevede quindi una serie di **ispezioni e controlli** che coinvolge una squadra specializzata che in funzione dei carichi, della storia dei componenti e con l'aiuto delle tabelle sopra citate permette di valutare la salute dell'impianto e i pezzi da sostituire.

Le norme ovviamente definiscano il grado di qualificazione della squadra che è pari a quello dell'estensimetria.

**Dall'ispezione alla scelta accetto/rifiuto**

La procedura prevede di eseguire il controllo non distruttivo seguendo i seguenti passaggi. Si esegue la prova secondo normativa, da cui si ricava le così dette **indicazioni** ovvero delle informazioni sullo stato di degrado. I dati devono poi essere **interpretati** e determinare se questi sono dati reali, falsi o non rilevanti.

Una volta isolati i dati di nostro interesse, si eseguano i conti e i controlli per poi decidere infine se il danno eventualmente presente è su una zona di interesse che deve essere tutelata. **In funzione di questo si accetta o si rifiuta il componente.**

Spesso le tecniche non distruttive possono essere utilizzate anche come sistemi di indagine non distruttiva della microstruttura del materiale, le sue proprietà meccaniche o la sua composizione chimica, in modo tale da evitare di dover danneggiare noi stessi il componente prelevandone una parte.

Tra le prove non distruttive figurano ovviamente un gran numero di prove che vanno dall'ispezione visiva alla termografia. Ovviamente ogni giorno queste prove diventano sempre più evolute, applicabili e precise.

Queste vengono eseguite ogni qual volta io desidero e posso cominciare fin da subito dalla fase di produzione per verificare la qualità del prodotto, migliorare il processo di produzione, la qualità dei materiali primi etc. Vengono impiegati molto anche in ambito di controllo dei trattamenti termici e superficiali, per controllare il processo di assemblaggio e per monitorare il componente in esercizio.

**Valutazione della vita residua**

Un difetto ha la sua velocità di crescita e propagazione che dipende dallo stato di sollecitazione e dal grado di danneggiamento già presente. Graficando quindi la velocità di propagazione in funzione del difetto preesistente otteniamo questo grafico:



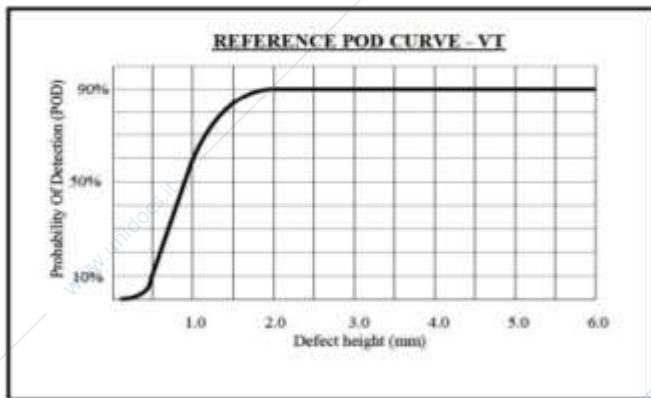
Tale grafico stabilisce una soglia critica di danneggiamento ovvero, una soglia oltre la quale si impone la sostituzione perché da lì in poi la propagazione della cricca diventa troppo veloce e porterebbe alla rottura catastrofica del pezzo.

Il tutto è correlato anche a un tempo di propagazione della cricca il quale deve essere assolutamente determinato in

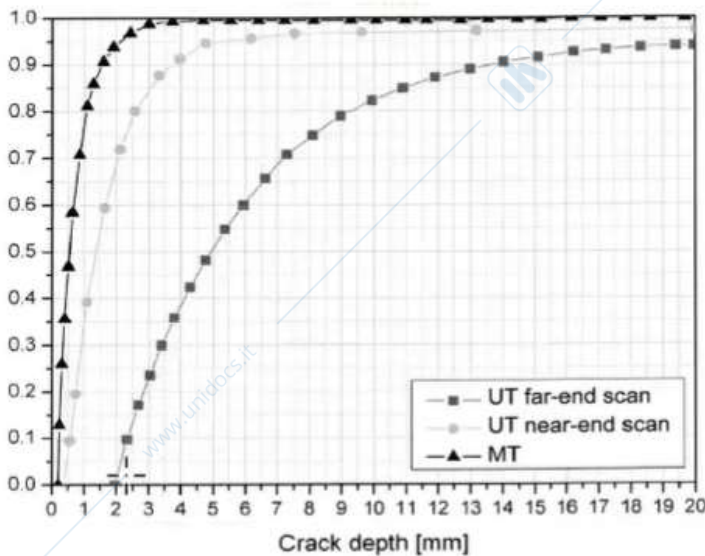
modo tale da garantire che il controllo successivo non si sia già arrivati alla rottura.

### Valutazione della vita residua e la curva POD

Elemento cruciale di ciascuna tecnica NDT per la sua applicazione affidabile è la capacità di rilevare i difetti e valutare la posizione e le dimensioni dei difetti. È quindi importante quantificare l'efficacia delle tecniche NDT. Questo viene fatto introducendo il concetto di probabilità di rilevamento (POD) per stabilire la capacità di un'ispezione di rilevare i difetti. La curva POD mette in relazione la probabilità di rilevamento con un parametro caratteristico del difetto, solitamente la sua dimensione.



POD – Ispezione visiva



POD – Esempio con assile ferroviario

durante i test di prova di recipienti in pressione. Le AE è anche un metodo di monitoraggio strutturale continuo, ad esempio sui ponti. Anche le perdite in tubazioni ed in impianti e la corrosione attiva sono fonti di AE rilevabili.

La tecnica AE prevede l'utilizzo di sensori piezoelettrici disposti sul componente in prova. I sensori convertono le onde di pressione che si propagano nel materiale in segnali elettrici, che vengono trasmessi a un PC di acquisizione per l'elaborazione. **Man mano che il danno aumenta nel componente, c'è un maggiore rilascio di energia.** Per la valutazione e il monitoraggio dell'integrità strutturale dei componenti vengono conteggiate l'attività e l'intensità dell'emissione acustica (numero di eventi sopra una soglia, tasso di rilevazione degli eventi).

Questa curva evidenzia ad esempio come l'ispezione visiva sia utile, poco affidabile in quanto sviluppa il 90% di probabilità di rilevamento solo quando il difetto ha raggiunto dimensioni considerevoli.

Per tracciare questa curva è stato fatto uno studio probabilistico dove la prova veniva ripetuta in diverse occasioni con diverse dimensioni del difetto. A dire il vero una curva POD può essere anche messa in relazione al componente sul quale vogliamo misurare il danneggiamento. Come, ad esempio, nella curva per assile ferroviario riportata qui sotto per diverse anche tipologie di prove.

La stima del POD si basa tipicamente sulla produzione di un gran numero di campioni di difetti realistici, seguiti da prove pratiche della procedura di ispezione. Queste possono essere attività costose e che richiedono tempo.

### Tecnica dell'emissione acustica

Uno dei controlli NDT più comuni e semplici dopo quello visivo sono, tutti quei controlli effettuati "sentendo come suona il pezzo" per cui con uno strumento acustico. Tecnica NDT passiva, che si basa sul rilevamento delle onde ultrasonore emesse da difetti attivi sotto un carico. I sensori dispersi sulla superficie della struttura rilevano l'AE (Acoustic Emission). È anche possibile rilevare AE dalla plasticizzazione in aree altamente sollecitate prima che si formi una cricca. E' utilizzato spesso

La tecnica consente il monitoraggio di grandi strutture e impianti durante il funzionamento. Utilizzando più sensori, è possibile localizzare le sorgenti di emissione acustica (e quindi il danno) con tecniche di triangolazione. Tramite l'analisi del segnale è inoltre possibile determinare la presenza di diversi meccanismi sorgente.

Esistono due metodi di test AE: **transitorio e continuo**. Il metodo transitorio cattura i burst AE che superano una o più soglie ed estrae le caratteristiche come l'ampiezza dei picchi. Questo metodo è adatto per testare difetti come cricche.

**Il metodo continuo invece acquisisce tutti gli eventi entro un periodo di tempo impostato, ad esempio 1/10 di secondo. Quindi, vengono estratte caratteristiche come il livello medio del segnale e i valori del quadrato medio (RMS).** Questo metodo è adatto per applicazioni in cui c'è molta AE di fondo o l'ampiezza AE è bassa, ad esempio quando si testano i riduttori o si rilevano perdite nelle tubazioni.

I test delle emissioni acustiche possono essere condotti in laboratorio, così come sul campo, sia per periodi relativamente brevi, come poche ore, sia per periodi più lunghi, come pochi mesi. I metodi di trasmissione dati wireless consentono di analizzare i dati da remoto. Questo è un loro grande vantaggio a cui si aggiungono anche le seguenti considerazioni:

- Capacità di rilevare diverse tipologie di danneggiamento
- Può essere condotto durante il funzionamento
- Può quantificare e qualificare il danno in funzione delle firme acustiche
- Consente il monitoraggio globale di una struttura e in condizioni operative reali
- È un metodo non invasivo applicabile in ambienti pericolosi, corrosivi e nucleari (può anche essere condotto a distanza).
- Può essere effettuata in zone dove l'accesso non sarebbe garantito.

Solitamente la curva POD delle tecniche ultrasuoni necessitano di un'ulteriore ispezione per diagnosticare completamente i problemi ed è oltretutto impossibile rilevare i difetti che non si muovano o crescano. Come metodo di rilevazione è poi solitamente più lento delle altre NDT.

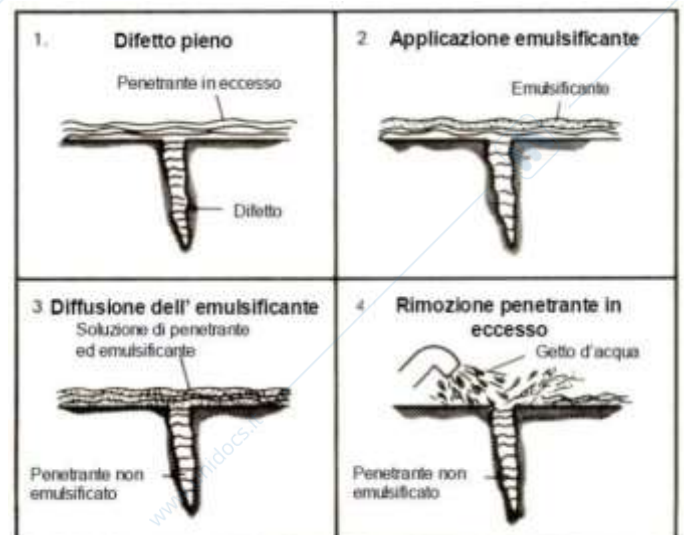
### Ispezione visiva

Sembra una tecnica butta un po' lì, ma in realtà è una prova normata e per il quale si ha bisogno di uno specifico brevetto per eseguirle. L'esame visivo infatti non è classico a vista, ma viene agevolato da specchi, lenti di ingrandimento, borosonde e robot radiotelecomandati che solitamente entrano in luoghi piuttosto pericolosi.

Con un'ispezione visiva possiamo notare, le porosità superficiali, le cricche e le deformazioni esterne, senza però poter valutare il tempo di vita rimanente e la velocità di propagazione della cricca.

### Liquidi penetranti

Possono individuare bene i difetti superficiali. Il loro funzionamento è basato sull'uso di liquidi penetranti, ovvero a bassa tensione superficiale che riescano ad entrare negli anfratti più piccoli. Il componente immerso quindi nel liquido si riempirà di questa sostanza, dopo di che, grazie ad una polvere emulsionante e un lavaggio ad acqua, la parte in esubero non penetrata nelle cricche viene lavata via in



modo tale da lasciare solo la parte di fluido che ha trovato spazio all'interno di un difetto. Questo colorerà quindi la superficie del corpo, che diventa visibile ad occhio nudo o tramite tecniche laser.

Rispetto alla semplice ispezione visiva, l'impiego di liquidi penetranti rende più agevole (o addirittura possibile) la visualizzazione dei difetti da parte dell'operatore. Ciò è dovuto essenzialmente a due fattori:

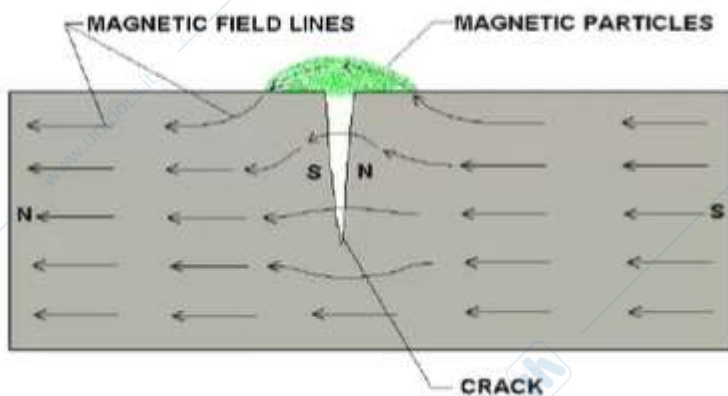
- il metodo LPI produce un'indicazione che, essendo di dimensioni significativamente maggiori di quelle del difetto, è molto più visibile sulla superficie.
- l'indicazione che si ottiene possiede un elevato livello di contrasto rispetto alla superficie del pezzo. Per esempio, nei controlli effettuati in luce ordinaria si impiega una sostanza penetrante rosso brillante che emerge chiaramente sullo sfondo della sostanza di "sviluppo" di colore bianco.

In generale, per contrasto si intende la differenza tra il colore (o la tonalità) dell'oggetto che si sta osservando e il colore (o la tonalità) dello sfondo. Riducendo la differenza nelle tonalità di colore, si peggiora il contrasto e, conseguentemente, diminuisce la percettibilità dell'oggetto osservato quindi, dal punto di vista fisico, la sensibilità al contrasto, può essere pensata come una misura di quanto un'immagine può essere "sbiadita" prima che diventi indistinguibile rispetto ad un campo uniforme circostante.

### Magnetoscopia

Come sappiamo, se rompiamo una barretta magnetica questa riforma nuovamente due poli distinti, per cui come abbiamo già assunto empiricamente diverse volte al corso di fisica 2, non esiste il monopolo magnetico.

Se però la rottura della barretta magnetica non è completa ma si origina una zona di discontinuità del campo magnetico che assume una forma del tipo in figura. Il principio del metodo quindi è semplice, per cui si sa che, se il magnete non venisse completamente tagliato, ma solo interrotto parzialmente, due nuovi poli si creerebbero sui due lati apposti della cricca. Se piccole particelle metalliche vengono ora introdotte sulla superficie del sistema, la polvere (solitamente limatura di ferro) sarà attratta non solo dai poli originali, ma anche da quelli che si generano ai bordi della cricca.



L'unico requisito essenziale per poter eseguire questo tipo di controllo è che il componente da testare sia composto da materiale ferromagnetico (sono tali ad es. il ferro, il nichel, il cobalto e alcune delle loro leghe).

Il metodo funziona anche su di materiali particolari detti, **paramagnetici** (materiali come il molibdeno e il litio che possiedono

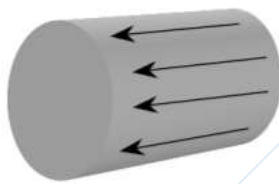
una minore sensibilità ai campi esterni ma che si magnetizzano se presenti e che non conservano nessuna traccia di magnetismo dopo che il campo viene rimosso).

Per eseguire questa prova la procedura è semplice.

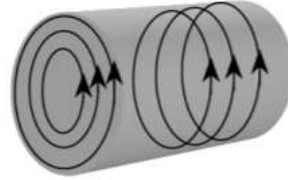
- Si parte preparando la superficie, pulendo sporco e polvere in eccesso.
- Magnetizzando la superficie valutando bene anche il campo e le linee di forza che questo genera, valutando la differenza attesa da una situazione ideale e quella ottenuta realmente valutando così possibili difetti.

In un componente si possono poi formare diverse tipologie di campi magnetici, anche se due sono i principali, rettilinei o circolari.

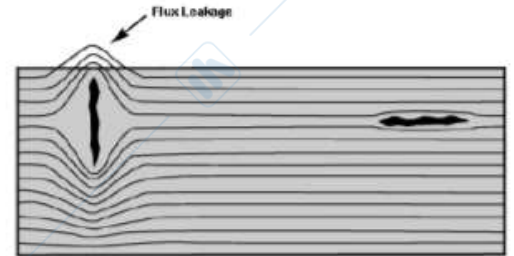
In funzione di come abbiamo generato il campo magnetico poi sarà più o meno facile vedere delle cricche per cui dobbiamo applicarli entrambi in momenti diversi.



Linee di forza rettilinee

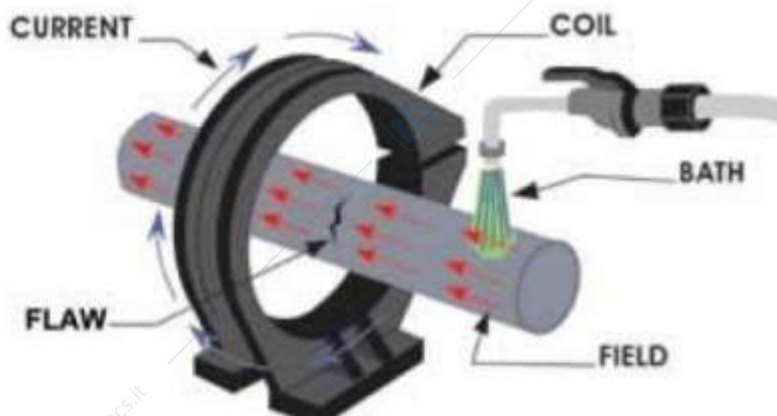


Linee di forza circolari



Un angolo compreso tra 45 e 90° tra direzione delle linee del campo e direzione del difetto è essenziale affinché si formi un'indicazione e, poiché i difetti possono presentarsi con orientazioni assolutamente casuali, ogni parte è di regola magnetizzata in due direzioni tra loro ortogonali.

La magnetizzazione del pezzo può essere eseguita attraverso un passaggio diretto di corrente sul pezzo da testare o con l'azione di un campo magnetico generato in un secondo conduttore disposto nelle sue vicinanze.



Il livello di magnetizzazione deve essere scelto accuratamente, infatti se esso fosse troppo basso alcuni difetti potrebbero non essere individuati mentre, viceversa, in caso di magnetizzazione troppo elevata le linee di flusso di sfondo possono mascherarne la presenza.

La polvere deve avere poi dei requisiti fondamentali per cui:

- Comportamento magnetico
- Geometria delle particelle (fattore che influenza la fluidità di movimento e la possibilità di scorrimento sul pezzo)
- Visibilità degli agglomerati formati in corrispondenza di un difetto
- Granulometria (è necessario impiegare un mix di particelle di differenti dimensioni per poter rilevare difetti grandi e piccoli)

La magnetizzazione è poi troppo sensibile come strumento di rilevamento e si fa influenzare anche con poco purtroppo. Questo è dovuto al fatto che rileva tutti i difetti anche quelli detti **sub superficiali**.

La magnetizzazione è poi troppo sensibile come strumento di rilevamento e si fa influenzare anche con poco purtroppo. Questo è dovuto al fatto che rileva tutti i difetti anche quelli detti **sub superficiali**.

I difetti **superficiali** tendono a fornire indicazioni nitide, strette e ben delimitate, con particelle ben legate assieme tra loro. È ben visibile una sorta di accumulo di particelle che è tanto più grande quanto più

profondo è il difetto. I difetti **subsuperficiali** forniscono indicazioni più larghe e sfocate con particelle meno aderenti l'una sull'altra.

**Le false indicazioni** non sono causate da forze di tipo magnetico, infatti alcuni assembramenti di particelle sono formati a seguito della presenza della rugosità superficiale oppure originati da azioni di tipo meccanico.

Le indicazioni non rilevanti sono la diretta conseguenza di distorsioni del campo magnetico che non sono collegate alla presenza di difetti:

- L'accumulazione di particelle magnetiche può verificarsi in corrispondenza degli spigoli o nei punti di variazione delle sezioni del pezzo.
- Punti di unione di differenti materiali rappresentano una discontinuità nel valore della permeabilità magnetica del materiale e dunque possono fornire un'indicazione non rilevante più o meno netta.
- Contorni dei cordoni di saldatura possono fornire indicazioni non rilevanti a causa della presenza di decarburazioni o per l'esistenza di stress residui non rilassati con opportuni trattamenti termici.
- Lavorazioni meccaniche possono anch'esse essere causa di variazioni nella permeabilità magnetica e forniscono indicazioni sfocate
- Negli accoppiamenti forzati possono essere presenti finissimi gap d'aria che originano indicazioni piuttosto nette.

**Una volta terminata la prova di ricorda anche che è necessario andare a smagnetizzare il pezzo affinché questo poi non reagisca con altri componenti della struttura.**

### Tecnica raggi x o raggi $\gamma$

Il componente è interposto tra la sorgente di raggi X o  $\gamma$  e la lastra. Il materiale assorbe parte dell'energia dei raggi x e solo una parte arriva ad impressionare la lastra. Se c'è un vuoto interno al materiale, si ha minore assorbimento e quindi una maggiore esposizione della lastra.

L'immagine ottenuta è una proiezione bidimensionale del volume e dunque, come tale, non offre alcuna informazione sulla posizione in termini di profondità.

**La tomografia computerizzata (TC) è uno dei metodi NDT avanzati**, basata sulla radiografia, che fornisce immagini sia in sezione trasversale che in volume 3D dell'oggetto in esame. Queste immagini consentono di ispezionare la struttura interna dell'oggetto senza la sovrapposizione intrinseca associata alla radiografia 2D. **Questa funzione consente un'analisi dettagliata della struttura interna di un'ampia gamma di componenti (Vantaggio enorme, è applicabile ovunque).**

**Per quanto riguarda i raggi X**, questi vengono prodotti tramite un filamento di tungsteno, riscaldato fino all'incandescenza da una corrente, emette un fascio di elettroni che si dirige verso l'anodo (caricato positivamente). Questo tipo di emissione di elettroni, che avviene a partire da un filamento riscaldato, è chiamata "effetto termoionico"; l'emissione termoionica è funzione della temperatura del filamento. Gli elettroni liberati dal filamento sono successivamente attratti verso il bersaglio con velocità dipendente dalla differenza di potenziale fornita ai due capi del sistema. Questo è importante in quanto ci dice che i raggi x possono essere prodotti anche senza ricorso ad un elemento in decadimento. Modificando poi la corrente di alimentazione del filamento e la tensione di alimentazione imposta possiamo gestire al meglio i raggi e la loro intensità.

La capacità di penetrazione dei raggi dipende poi dalla lunghezza d'onda del raggio stesso, per questo motivo si usano anche i raggi gamma, più pericolosi e prodotti solo da elementi in decadimento, ma molto più precisi.

L'intensità dei raggi X decresce con il quadrato della distanza come accade per tutti gli altri tipi di onde elettromagnetiche.

In una comune prova radiografica abbiamo poi una pellicola radiografica a fine corsa per cui dobbiamo anche parlare un po' di questa. Una comune pellicola radiografica è composta da strati:

- due strati esterni di gelatina indurita per proteggere l'emulsione;
- due strati di emulsione sensibile (cristalli di bromuro di argento);
- due strati sottilissimi per assicurare l'aderenza dell'emulsione al supporto trasparente;
- uno strato di supporto trasparente (in acetato di cellulosa o poliestere).

I vantaggi sono dunque:

- Si possono ispezionare componenti assemblati e strutture complesse
- Preparazione minima della superficie richiesta
- Rileva difetti sia superficiali che interni
- Fornisce una registrazione permanente dell'ispezione

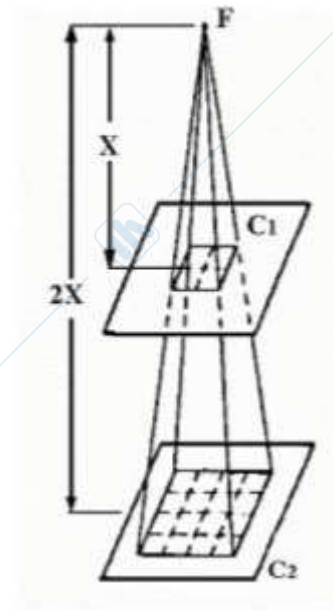
Tra i suoi contro abbiamo invece il fatto che è sensibile ai cambiamenti di spessore, per cui il pezzo più è liscio e a spessore costante meglio è e richiede anche il controllo periodico dello stato di salute dell'operatore.

### Metodo delle correnti indotte

Permette il rilevamento di difetti, misurazioni dello spessore di materiale e rivestimenti, identificazione del materiale e determinazione delle condizioni di trattamento termico di determinati materiali. Il funzionamento di basa su di una bobina eccitata con una corrente alternata, la quale viene posta in prossimità della superficie di prova, generando un campo magnetico variabile che interagisce con il componente e produce correnti parassite. Le variazioni di queste correnti parassite vengono monitorate mediante l'uso di una bobina ricevente o misurando le variazioni della corrente alternata che scorre nella bobina di eccitazione primaria. Le variazioni di conducibilità elettrica, la permeabilità magnetica del componente, o la presenza di eventuali discontinuità, causano una variazione della corrente parassita e una corrispondente variazione di fase e ampiezza della corrente misurata. Le modifiche vengono visualizzate su uno schermo e vengono interpretate per identificare i difetti.

La densità delle correnti parassite e la sensibilità ai difetti è maggiore in superficie e questa diminuisce con la profondità. Il tasso di diminuzione dipende dalla "conducibilità" e "permeabilità" del metallo. La permeabilità è la facilità con cui un materiale può essere magnetizzato. I metalli non magnetici come gli acciai inossidabili austenitici, l'alluminio e il rame hanno una permeabilità molto bassa, mentre gli acciai ferritici hanno una permeabilità magnetica diverse centinaia di volte maggiore. La conduttività favorisce un maggiore flusso di correnti parassite sulla superficie nei metalli ad alta conduttività e una diminuzione della penetrazione in metalli come rame e alluminio.

La profondità di penetrazione può essere variata cambiando la frequenza della corrente alternata: minore è la frequenza, maggiore è la profondità di penetrazione. Pertanto, le alte frequenze possono essere utilizzate per rilevare i difetti vicino alla superficie e le basse frequenze per rilevare i difetti più profondi.



## GLI ULTRASUONI

Si basano sullo stesso principio dell'ecografia, per cui imprimendo delle onde di pressione in un corpo, queste possono essere riflesse o deviate dai difetti e impurità. Studiando le variazioni dell'onda sonora e vedendo come questa interagisce con il corpo allora possiamo determinare posizione e dimensione del difetto.

### La fisica degli ultrasuoni

Un'onda sonora dipende da una serie di parametri che conosciamo già, ma che è bene ripetere e sono: **ampiezza, frequenza, periodo e lunghezza d'onda**. Questi parametri descrivono quindi il **modo di vibrare dell'onda**.

Le onde si suddividono in onde **longitudinali**, che causano un movimento longitudinale delle particelle, **trasversali**, dove invece le particelle si muovono in modo perpendicolare al moto dell'onda ed infine le onde **superficiali** le quali si generano solo sulla superficie di un corpo o di un fluido. In funzione della tipologia dell'onda e del mezzo di propagazione si definiscono diverse formule per la **velocità di propagazione**:

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{onde longitudinali in barra sottile}$$

$$V = \sqrt{E \cdot \frac{1 - \nu}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad \text{onde longitudinali su largo fascio}$$

$$V = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{onde trasversali}$$

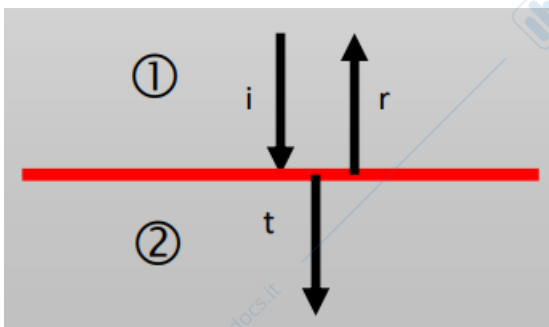
Come possiamo vedere la velocità sembra dipendere solo dalle caratteristiche elastiche del materiale (determinabili, infatti, anche con gli ultrasuoni), anche se in realtà dovremmo considerare anche una dipendenza **dalla temperatura e dallo stato di sforzo del materiale**.

Essendo G il modulo di elasticità trasversale che vale circa la metà di E allora le onde trasversali si propagano con una velocità dimezzata. Le onde trasversali poi non si propagano nei liquidi non avendo elasticità trasversale, ma muovendosi sempre per definizione una volta sottoposti a sforzo di taglio.

Quando un'onda colpisce un mezzo quindi abbiamo diverse capacità di propagazione al variare della densità. Per questo motivo definiamo **l'impedenza acustica**:

$$z = \frac{p}{V}$$

dove P è la pressione, V la velocità.



Un'onda che colpisce un corpo può poi attraversare o essere riflessa. Indicando con 1 il primo mezzo di propagazione e con 2 il secondo, si definisce:

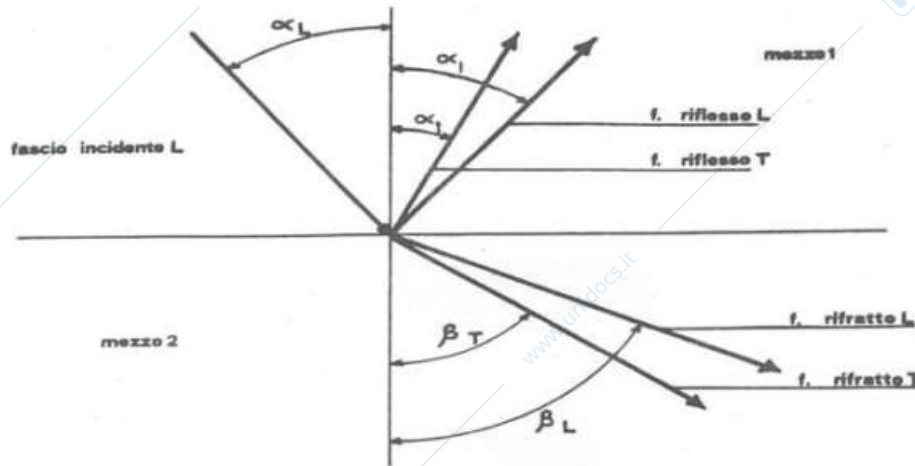
$$R = \frac{p_r}{p_i} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad \text{coefficiente di riflessione}$$

$$T = \frac{p_t}{p_i} = \frac{2z_2}{z_2 + z_1} \quad \text{coefficiente di trasmissione}$$

Se l'onda torna completamente indietro R assume valore -1 mentre se questa si propaga tutta abbiamo T=1. È chiaro che R+T deve sempre dare 0. **Nota:** trasmesso e rifratto sono sinonimi.

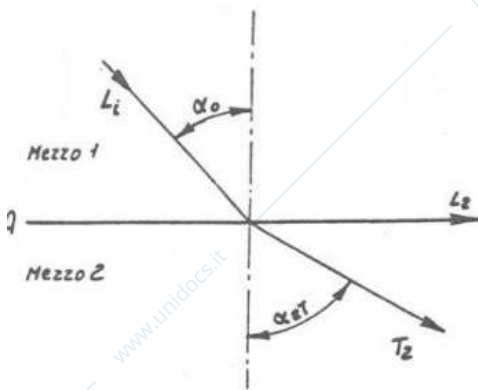
Nei materiali metallici in contatto con aria, o più in generale dove abbiamo uno  $z_1 \gg z_2$ , l'onda è sempre in prima approssimazione interamente riflessa.

**Quando un'onda longitudinale non colpisce in modo perpendicolare un corpo, oltre che alla parte riflessa o trasmessa nasce sempre anche una parte di onda trasversale.**



Le relazioni che legano questi fenomeni sono state definite da Snell dal quale sappiamo che:

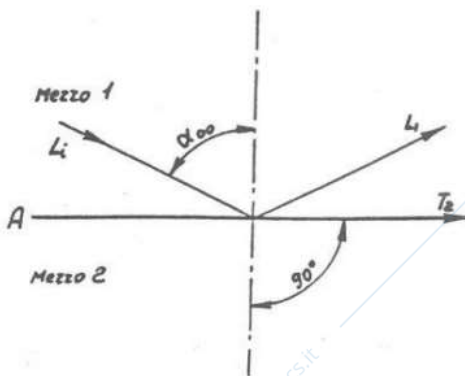
$$\frac{\sin \alpha_{Li}}{v_{1L}} = \frac{\sin \alpha_{Lr}}{v_{1L}} = \frac{\sin \alpha_{Lt}}{v_{1T}} = \frac{\sin \beta_{Lr}}{v_{2L}} = \frac{\sin \beta_{Lt}}{v_{2T}}$$



Primo angolo critico

Adesso, definisco il primo angolo critico come l'angolo di incidenza per il quale l'onda longitudinale rifratta non genera onda trasversale e l'onda riflessa corre parallela alla superficie del mezzo 2. Se supero tale angolo l'onda rifratta non esiste più e tutta la componente sarà riflessa.

Definisco invece il secondo angolo critico, come l'angolo di incidenza per il quale un'onda longitudinale genera solo riflessione con una componente trasversale parallela alla superficie. Superato tale angolo la componente trasversale non esiste più.



Secondo angolo critico

### La propagazione nei mezzi

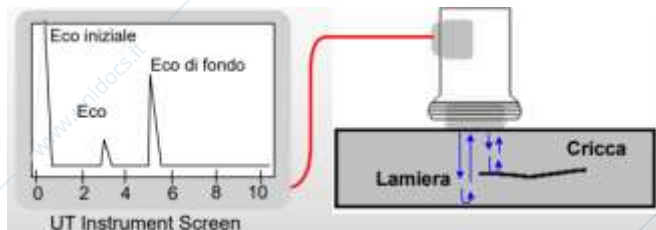
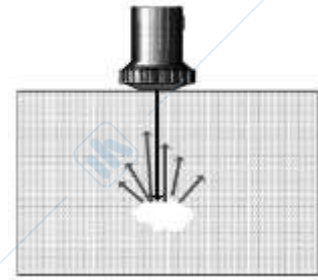
Quando un'onda propaga in un mezzo trasmissivo, una parte della sua energia viene assorbita, tale processo di dissipazione viene proprio detto **assorbimento**. L'assorbimento è maggiore a frequenza più alte, usare quindi un segnale ad alta frequenza vedremo mi permette di essere più preciso ma di avere poca profondità di penetrazione delle onde nel mezzo. Oltre all'assorbimento legato alla frequenza si verifica anche il fenomeno delle **scattering, ovvero una perturbazione dell'onda sonora dovuta al differente forma del reticolo cristallino da grano a grano. Questo effetto è molto dipendente da  $\lambda$ .**

L'onda emessa dai sistemi ad ultrasuoni non sono poi mono-frequenza ma ricoprono una vasta gamma. Le parti di onda ad alta frequenza saranno quindi attenuate subito, mentre le frequenze più basse

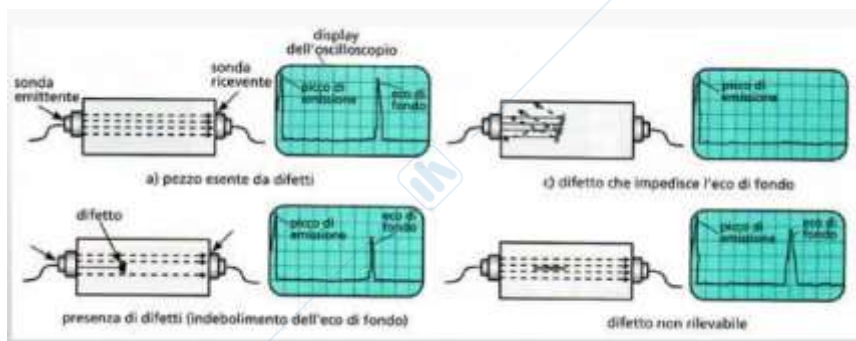
saranno quelle che vanno a comporre il segnale che ritornerà indietro ovvero l'eco. Dall'analisi dell'eco io sono in grado di ottenere molte informazioni sul mezzo trasmissivo.

### Principi di controllo

È possibile quindi andare ad utilizzare gli ultrasuoni come prova non distruttiva. Immettendo infatti un fascio sonoro noto all'interno di un componente, possiamo andare a studiare il difetto analizzando la parte riflessa dell'onda. **La sonda, solitamente un piezo-elettrico è in grado sia fare da emettitore che ricevente.** Questa tipologia di montaggio viene chiamata **pulse-echo**, ma nulla mi vieta di andare a piazzare una sonda ricevente dal lato opposto del pezzo. **Questa forma di montaggio è chiamato montaggio in trasmissione.**



Qui in figura possiamo vedere un sistema pulse-echo ed il suo diagramma ampiezza del segnale di ritorno e tempo di attesa dell'eco.



Quelli qui sotto invece sono diverse configurazioni del sistema a trasmissione. Interessante risulta essere soprattutto l'ultimo grafico dove si vede come se le onde sonore corrono nella stessa direzione di propagazione della cricca il difetto non è rilevabile. Questo problema presente in entrambe le configurazioni di montaggio **evidenza la necessità di movimento delle sonde su tutto il componente.**

A livello di strumentazione ogni sistema ad ultrasuoni a poi bisogno sia di una sonda generatrice che ricevitrice, che di un **oscilloscopio**, strumento che mi permette di rappresentare il grafico ampiezza-tempo di risposta a display andando a leggere la variazione di tensione sul cristallo piezo elettrico ricevitore.

Le onde immesse dalle sonde nel sistema ovviamente non sono mai continue, ma sempre date ad in impulsi per facilitare la lettura di echi dovuti ai difetti.

### I trasduttori ultrasuoni

Un trasduttore ad ultrasuoni viene definito in funzione del range di frequenza emesso, solitamente variabile dagli 0 ai 10 MHz fino ai 13,5 MHz. Ogni trasduttore invia poi singoli impulsi, che vengono con frequenza variabili in funzione della tensione che forniamo al cristallo. I trasduttori poi generano due tipi di fasci, **focalizzati** o **non focalizzato** (a forma di cono). **Un fascio focalizzato si ottiene con un cristallo sagomato a lente o con una lente secondaria posta tra il corpo e il generatore di pressione.** Gli ecografi sono macchine estremamente complesse che addirittura hanno focalizzazione variabile. Aumentare o ridurre la focalizzazione permette di gestire la porzione di corpo analizzata o spazzata dal raggio sonoro.

Più il trasduttore genera onde ad altre frequenze più riuscirà a vedere anche difetti piccoli, **ovvero aumenta la risoluzione. Questo è dovuto alla capacità di riuscire a smorzare meglio le onde ad alta frequenza.**

**La sensibilità di un trasduttore ultrasonico**, ovvero la sua capacità di trovare un difetto, dipende dalla **lunghezza d'onda** mentre la sua **risoluzione** intesa come capacità di distinguere anche difetti veramente piccoli o particolarmente vicini dipende dalla **frequenza**.

### Accoppiamento sonda componente

Come sappiamo, rispetto ai solidi e ai fluidi le onde sonore si propagano molto peggio in aria. Per questo motivo molto spesso le prove ad ultrasuoni se il componente può essere smontato vengono eseguite in una vasca con acqua o altri fluidi ad alta velocità di percorrenza. Qualora invece questo non sia possibile si va ad introdurre l'uso di una gelatina (come nelle risonanze all'ospedale) che garantisce una minor dispersione del segnale. Oltre a queste accortezze molto spesso vengono introdotte anche le linee di ritardo, ovvero dei dischetti di plexiglass che mi garantisce la formazione di un fronte di onda piano nel componente. Se non le

inserissi, le onde appena emesse farebbero interferenza con un eventuale eco originato da un errore in superficie.

Fare la misura in acqua o inserire la linea di ritardo mi permette di visionare al meglio anche gli errori in prossimità della superficie.

Anche le dimensioni della sonda influiscono sul fascio e sulla sua propagazione. **Tanto più una sonda è piccola in diametro e tanto più l'onda sonora divergerà in tutte le direzioni, mentre una**

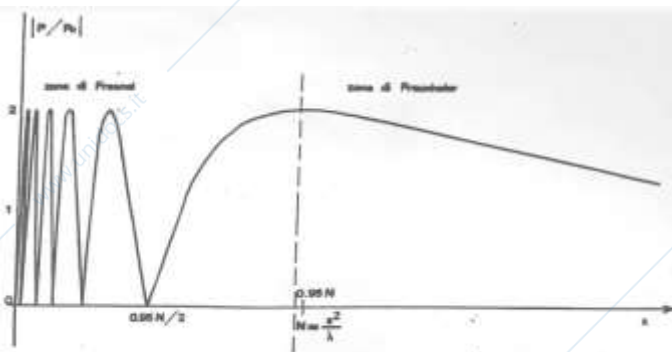


Fig. 109 - Andamento della pressione sonora lungo l'asse del trasduttore.

**sonda di grandi dimensioni formerà un raggio più conico.**

L'angolo di divergenza del cono è proporzionale al rapporto tra la lunghezza d'onda emessa e il diametro della sonda:

$$\sin \alpha \propto \frac{\lambda}{D}$$

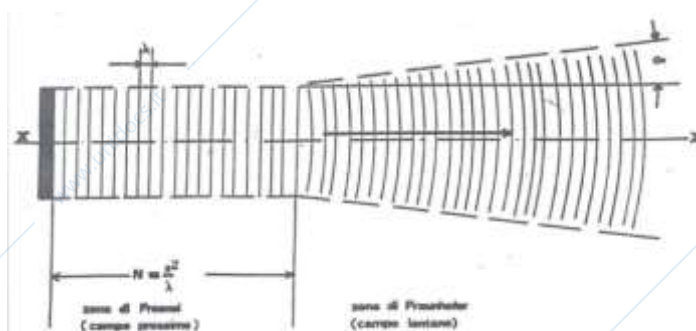


Fig. 110 - Campo di radiazione del trasduttore.

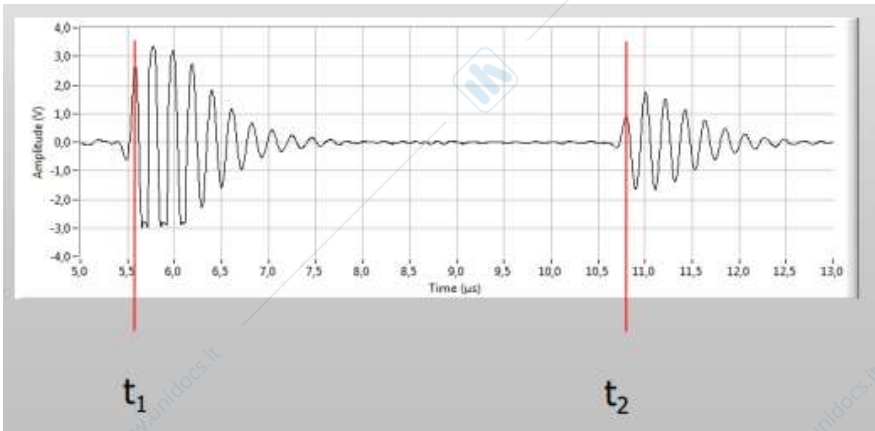
Come possiamo vedere l'onda diverge sempre in ogni caso, per questo motivo si ricorre alle sonde focalizzate quando si richiede di avere un fascio piccolo anche in profondità.

### La zona morta

La zona morta corrisponde alla prima zona di contatto tra l'onda e il materiale, dove l'oscilloscopio non riesce a vedere un difetto. Concettualmente simile al concetto della linea di ritardo, questo effetto non è dovuto alla propagazione dell'onda in aria però alla stabilizzazione del segnale, ma proprio al fatto che in prossimità della prima superficie del materiale l'eco di un difetto potrebbe confondersi con l'onda generata che entra. Questo mi comporta una zona cieca iniziale, dove il tempo di rimbalzo dell'eco è uguale al tempo di penetrazione dell'onda. Questo effetto si può verificare anche in profondità nel caso in cui la sonda non sia abbastanza smorzata e se un eco di fondo pezzo arriva nella sonda ricevente nello stesso istante di un eco di difetto.

## Dimensioni del difetto

Prima di tutto definiamo l'asse dei tempi, per cui se imprimo un impulso in un corpo, il tempo trascorso tra l'invio e ritorno dell'impulso mi definisce la lunghezza del pezzo.

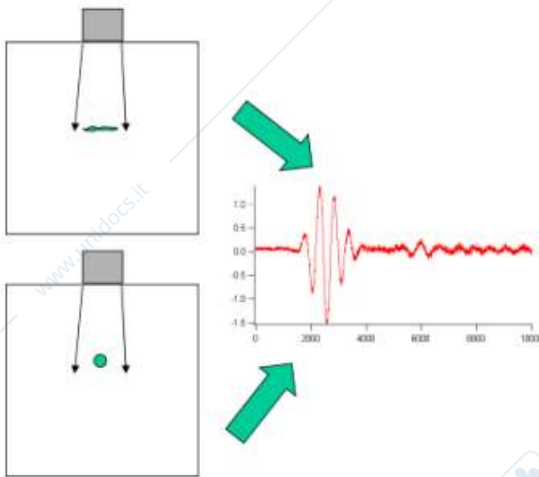


La normativa poi definisce una procedura di **calibrazione delle sonde** che vengono tarate su degli appositi blocchi con difetti noti. Dalla calibrazione si ricava indicazioni sulla sensibilità, la velocità, l'angolo di rifrazione, la grandezza del fascio e quant'altro.

Una volta quindi determinato l'asse dei tempi e calibrata la sonda possiamo passare allo studio del difetto in se per se.

Come possiamo immaginare la prima informazione sul difetto che possiamo ricavare è quella della sua irregolarità. **Un difetto molto rugoso infatti, riflette l'onda con diverse direzioni mentre un difetto omogeneo la riflette con un fascio più stretto.**

Se il riflesso è particolarmente rugoso, lo scattering riduce molto il numero di onde che rimbalzano direttamente sulla sonda, infatti solo quella che arriva perpendicolare al difetto tornerà indietro producendo un eco sensibile mentre, mentre tutte le altre onde torneranno al ricevitore di rimbalzo. In questo caso un ruolo fondamentale la gioca l'esperienza dell'operatore.



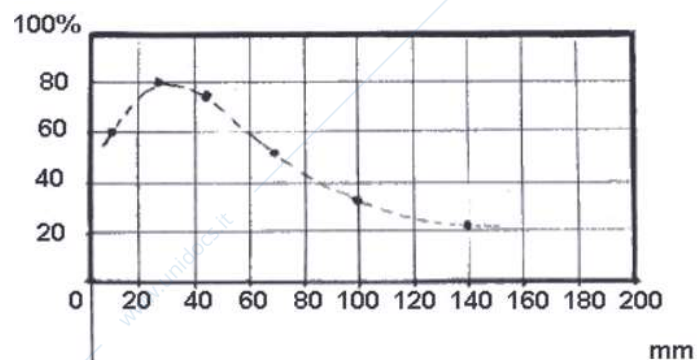
Un difetto tondeggiante come in figura causerà quindi un piccolo eco e un grande scattering con tante onde di rimbalzo, mentre un difetto lineare creerà un eco grande e definito. **Il tempo di arrivo dell'eco invece ci fornisce ottime indicazioni sulla profondità del difetto.**

Per riuscire a riconoscere le imperfezioni, in poche parole per tarare l'oscilloscopio e l'osservatore, sono stati definiti dalla normativa dei blocchi appositi con difetti noti che ci danno indicazioni sulla forma dell'eco di alcuni difetti.

Questi blocchi sono di dimensioni diverse, ma tutti con lo stesso difetto. Noto l'impulso quindi posso avere informazioni di come varia la forma dell'eco in funzione delle profondità. Queste curve sono dette **curve DAC** e ci

dicono fondamentalmente che **un difetto delle stesse dimensioni, da echi minori a profondità maggiori.**

**Un eco più grande non significa quindi che il difetto è più grande, questo vale solo se i tempi di arrivo degli echi e le dimensioni del pezzo sono uguali.** Se questi sono diversi allora l'eco più piccolo non è dato da un difetto minore, ma solo più profondo.



Solo muovendo la sonda quindi posso andare a dimensionare il difetto. L'ampiezza dell'eco che ricevo poi mi dà indicazioni sulla profondità del difetto stesso.

Se un difetto è più grande del fascio si dice che si comporta come **grande riflettore**, la profondità del difetto è data da:

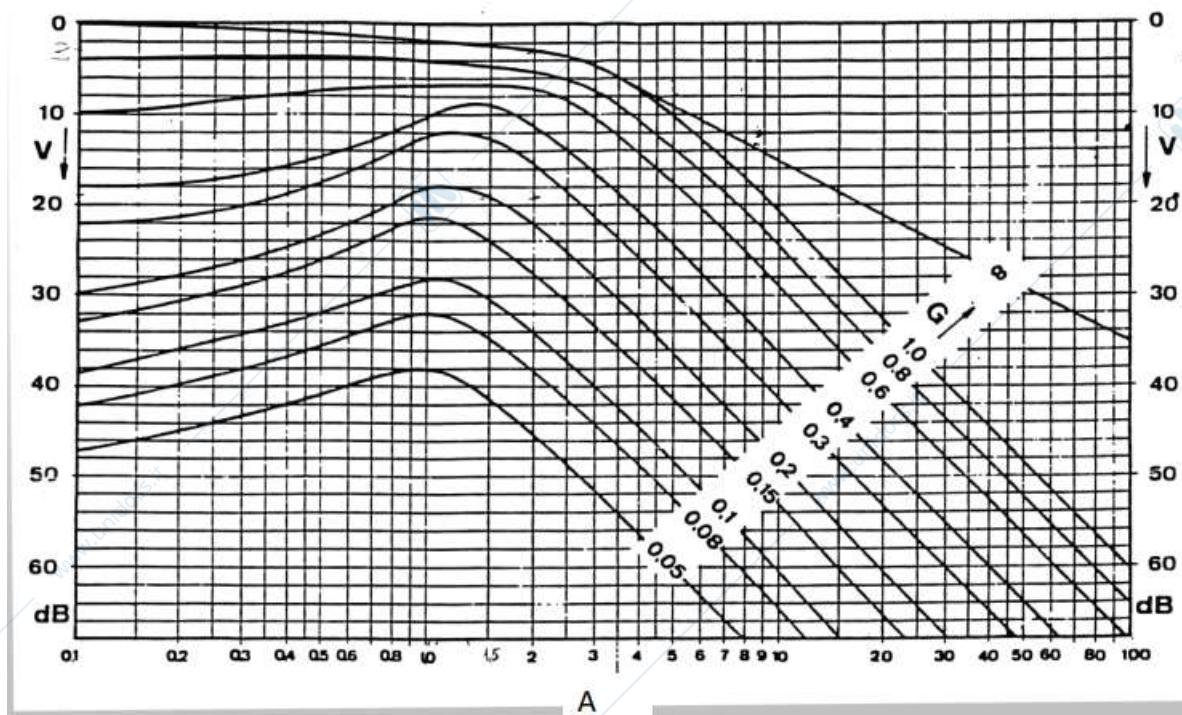
$$H_r = H_0 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{A}$$

Al contrario se il difetto è piccolo si dice che si comporta come piccolo riflettore e si ha che:

$$H_f \propto \pi^2 \cdot \frac{G^2}{A^2}$$

( $A = a/N$  e  $G = D_f/D_s$  dove  $a$  è la distanza del riflettore, ovvero del difetto,  $N$  è la lunghezza del campo prossimo,  $D_f$  e  $D_s$  sono le dimensioni del difetto e della sonda e  $H$  infine è l'ampiezza del segnale dove con il pedice 0 si vuole indicare l'ampiezza di partenza).

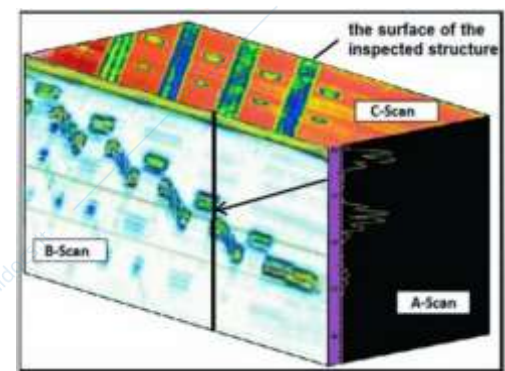
**Queste formule sono state però per una più facile interpretazione diagrammate per dei valori costanti di A e G e hanno dato le curve AVG teoriche.** Si indicano con il termine teoriche perché ottenute solo dai calcoli non considerando la tipologia di materiale in analisi.



Le curve DAC quindi ci permettano di valutare la profondità del difetto mentre le curve AVG la loro dimensioni.

### Metodi di indagine

La normativa UNI EN 583-5 prevede diverse tipologie di analisi in funzione del piano di movimentazione della sonda. L'indagine **A-scan** prevede di muovere la sonda in linea retta su di un componente in modo da determinare profondità e entità del difetto. Il metodo **B-scan** prevede di andare a movimentare invece il pezzo in modo tale da leggere le posizioni del difetto. L'analisi **C-scan** indaga invece muovendosi su di un piano XY indicando



posizione e intensità del difetto, ma non la sua profondità. Infine, abbiamo il metodo **S-scan** che muove la sonda secondo un sistema di coordinate polari.

### **Applicazioni e vantaggi**

Ovviamente le applicazioni sono moltissime a partire dall'analisi del difetto di incollaggio, saldatura, brasatura nei metalli fino alla capacità di penetrazione di alcuni trattamenti. Il loro campo di applicazione maggiore resta comunque la capacità di verifica strutturale.

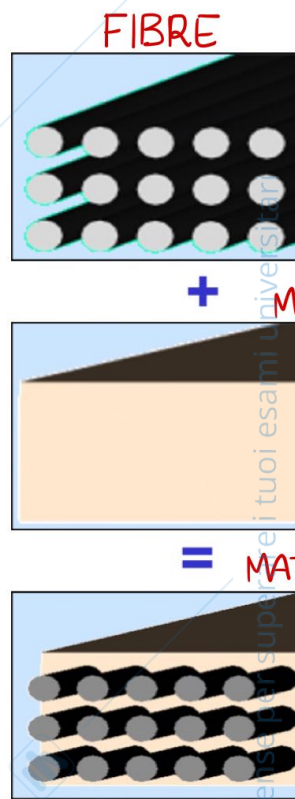
I vantaggi sono notevoli in quanto possiamo vedere sia difetti superficiali che interni, non necessitano di un accesso da tutte le parti e una applicabilità praticamente universale. Gli svantaggi sono invece legati alla difficoltà della lettura e interpretazione dei dati e alla differente capacità di riuscire ad analizzare i difetti al variare del materiale.

Negli ultimi anni si va poi imponendo una tecnica di eccitazione tramite laser che prevede di utilizzare l'effetto termo acustico per riuscire ad eccitare senza contatto. Questo ci permette di fare controlli anche di pezzi in condizione operativa.

Altri metodi di eccitazione ad oggi sono usati sono gli ultrasuoni a onda magnetica che non necessita il contatto.

# MATERIALI COMPOSITI

- Rientrano nella categoria dei **materiali compositi** quei materiali ottenuti mediante l'unione di due o più componenti dalle caratteristiche fisico-chimiche tali da renderli a livello macroscopico:
  - diversi,
  - insolubili,
  - riconoscibili.
- La composizione "**matrice+fibre**" permette di ottenere proprietà considerevolmente diverse dalle proprietà dei singoli costituenti.



Danneggiamento dei materiali compositi

- 1) fessurazione della matrice;
- 2) scollamento fibra matrice (debonding);
- 3) scollamento delle lamine (delaminazione).
- 4) rottura della fibra;

Il danneggiamento per fatica può iniziare molto prima del cedimento e la formazione di cricche di fatica può in alcuni casi, subire un arresto e non portare affatto alla rottura dell'elemento

Il danneggiamento per fatica inizia quasi sempre mediante la formazione di cricche nelle lamine in cui la direzione delle fibre forma l'angolo più grande con la direzione di applicazione del carico. In un laminato cross-ply, per esempio, le cricche di fatica iniziano sempre nelle lamine a  $90^\circ$  e risultano disposte sempre in direzione ortogonale al carico applicato.

## Termografia

La termografia utilizza telecamere termografiche per rilevare la radiazione nel campo dell'infrarosso dello spettro elettromagnetico e produce immagini di questa radiazione termica, note come termogrammi.

Tutti gli oggetti con una temperatura superiore allo zero assoluto emettono radiazioni infrarosse all'aumentare della temperatura di un oggetto, aumenta anche la quantità di radiazione che emette, il che significa che è possibile "vedere" con la termografia, senza illuminazione visibile, variazioni di temperatura.

Termografia passiva: utilizza la temperatura naturale di un oggetto per creare un'immagine,

Termografia attiva: prevede il riscaldamento della superficie di un oggetto e quindi l'osservazione del decadimento del calore mentre si raffredda.

La stimolazione termica può essere fatta da diverse fonti di calore tipo Lampada, Flash, Laser, Ultrasuoni, Induzione ecc. che deve essere sincronizzata dal PC con l'acquisizione dell'immagine. Il PC di controllo deve permettere di regolare i parametri della termocamera e i tre principali parametri della stimolazione termica:

1. Potenza
2. Frequenza
3. Durata del ciclo
4. La distanza tra sistema di stimolazione e oggetto deve essere fissata dall'operatore in base al tipo di stimolazione, potenza massima disponibile e grandezza del provino.

La termografia è in grado di ispezionare ampie aree, non richiede il contatto con l'oggetto da testare e può evidenziare difetti compresa la corrosione; cracking; delaminazione; debonding; danno da impatto; umidità; porosità e vuoti.

## Shearografia

La shearografia, metodo ottico interferometrico, è un metodo non distruttivo in grado di rivelare difetti superficiali o sub-superficiali rapidamente anche su grossi componenti a geometria complessa laddove metodi, quali radiografia o ultrasuoni, sono inapplicabili o hanno scarsa applicazione.

Quando una sorgente laser monocromatica e coerente viene proiettata su una superficie ruvida, la microstruttura della superficie fa sì che la sorgente di luce si disperda formando un pattern di diffrazione (speckle). Ciò è dovuto all'effetto dell'interferenza della luce.

Quando la forma della superficie cambia (cioè quando l'oggetto viene caricato), il pattern di diffrazione cambia

Una frangia consiste in una trasformazione grigio / grigio, nota anche come salto di fase  $2\pi$ . Pertanto, le frange possono essere confrontate con le linee isometriche (linee costanti) dei livelli di spostamento fuori dal piano della superficie. Il numero di frange fornisce una chiara indicazione di quanto sia vicina / lontana una discontinuità alla superficie o quanto forte / debole sia una discontinuità rispetto al materiale non difettato.

Questo pattern di frange contiene informazioni sulla deformazione relativa del componente tra i suoi due stati (prima e dopo lo stress) ed è costituito da una serie di frange bianche e nere caratteristiche. Quando non ci sono difetti all'interno del componente, si otterrà un motivo a frange regolare (solitamente sotto forma di frange uniformemente distribuite). Quando è presente un difetto (ad esempio un vuoto, una cricca o una delaminazione), l'andamento regolare delle frange viene alterato.

Ciò consente di identificare il difetto. Inoltre, il pattern di frange può anche essere utilizzato per misurare quantitativamente la deformazione del componente, rendendo la shearografia una potente tecnica di misurazione della deformazione / sollecitazione a campo pieno senza contatto.

A seconda della resistenza del materiale superficiale, la tecnica shearografia può rilevare la maggior parte delle discontinuità che si verificano entro 30 mm (e in alcuni casi fino a 40 mm) sotto la superficie.

**Benefici**

- Ispezione rapida su tutto il campo
- Senza contatto
- Alta sensibilità
- In grado di distinguere tra deformazione in piano e fuori piano

**Applicazioni**

- Scafi di barche in composito
- Saldature supporto ponte
- Aerospaziale
- Produzione di energia
- Olio e gas

## Ultrasuoni sui sandwich

Le modalità **Pulse-echo**. Il trasmettitore emette energia acustica nella componente da ispezionare. In seguito l'energia viene captata dal ricevitore. In una condizione di integrità del materiale composito, una parte dell'energia acustica è attenuata dalle componenti della struttura. Quando la sonda è posizionata sopra un'area di un materiale composito soggetta a perdita di aderenza, la quantità di energia che ritorna al ricevitore è maggiore, pertanto si ha una variazione dell'ampiezza.

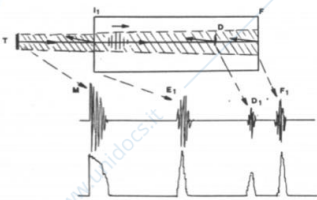
**Metodi in Trasmissione:** le onde ultrasonore, ad ampiezza relativamente alta, attraversano la componente da ispezionare e un trasduttore ricevente situato sull'altro lato della componente misura l'attenuazione del segnale.

I risultati vengono in genere presentati mediante immagini **C-scan**. Questa tecnica è molto diffusa ed è molto affidabile. Gli ultrasuoni permettono il rilevamento di perdite di aderenza nella parte interna e esterna dei rivestimenti, l'individuazione della presenza di liquidi e l'identificazione dello schiacciamento della parte interna della struttura. Tuttavia è impossibile usare questa quando non è possibile l'accessibilità da entrambi i lati della struttura.

**Metodi in pulse-echo:** risulta necessario l'impiego efficace di trasduttori a bassa frequenza e di tecniche di acquisizione dell'eco di fondo. La delaminazione del rivestimento esterno e le perdite di aderenza tra il rivestimento esterno e la parte centrale della struttura sono caratterizzate da un'attenuazione del segnale dell'eco di fondo, in quanto riduce la compattezza della struttura causando una variazione di risonanza per le lunghezze d'onda maggiori e riducendo pertanto la frequenza della risonanza.

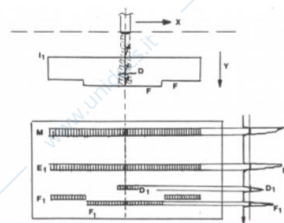
### Presentazione del segnale: A-Scan

- 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 ispezionata



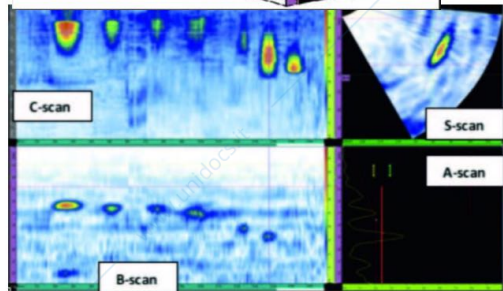
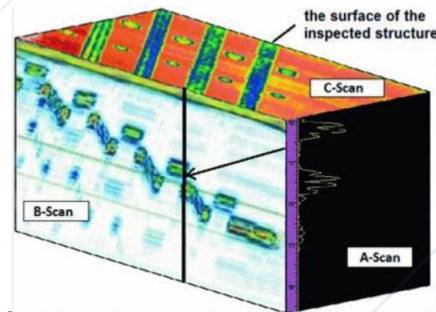
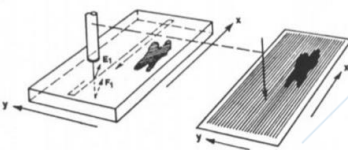
### Presentazione del segnale: B-Scan

- 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



## **COLLAUDI**

### INTRODUZIONE

Il collaudo, in generale, è una verifica, di consistenza e prestazionale di un impianto o di un edificio in cui si verificano dei requisiti e delle specifiche che devono essere rispettate.

In molti ambiti il collaudo è obbligatorio per legge. Le responsabilità, in caso di danni, sono prima di tutto del collaudatore, poi del direttore dei lavori e infine del progettista.

Per diventare collaudatori è necessaria esperienza, generalmente misurata in anni di lavoro in un determinato ambito. Dopo 8/10 anni di lavoro in un settore, ci si può iscrivere all'albo e diventare collaudatori.

La nomina del collaudatore può avvenire o al termine del progetto o in corso d'opera, specialmente se vanno effettuati controlli impossibili da fare a valle della realizzazione (es: verifica dei materiali). Una volta che il collaudatore viene nominato dalla committenza, inizia le verifiche. Il compito del collaudatore è tutelare il committente nei rapporti con i costruttori e garantire che i lavori rispecchino il progetto.

Può anche accadere che il collaudatore venga interpellato in corso di contratto, cioè durante la decisione delle specifiche dell'impianto; in questo caso particolare il collaudatore interviene a valle del progetto.

La specifica di collaudo è una sorta di accordo fra le parti, riguardo a determinate specifiche; essa è quindi una lista di operazioni da fare, che, se superate, garantiscono il superamento di collaudo. All'interno di questa lista si trovano ad esempio le descrizioni dei controlli, degli strumenti e delle procedure.

L'ASME è una società molto importante nel settore delle normative, si avvale dell'aiuto di ingegneri provenienti da tutto il mondo.

### **ESEMPIO**

#### **NORMA PER IL COLLAUDO DI UNA CALDAIA A RECUPERO (HRSG) GAS TURBINE HEAT RECOVERY STEAM GENERATOR**

Valutazione dell'efficienza:

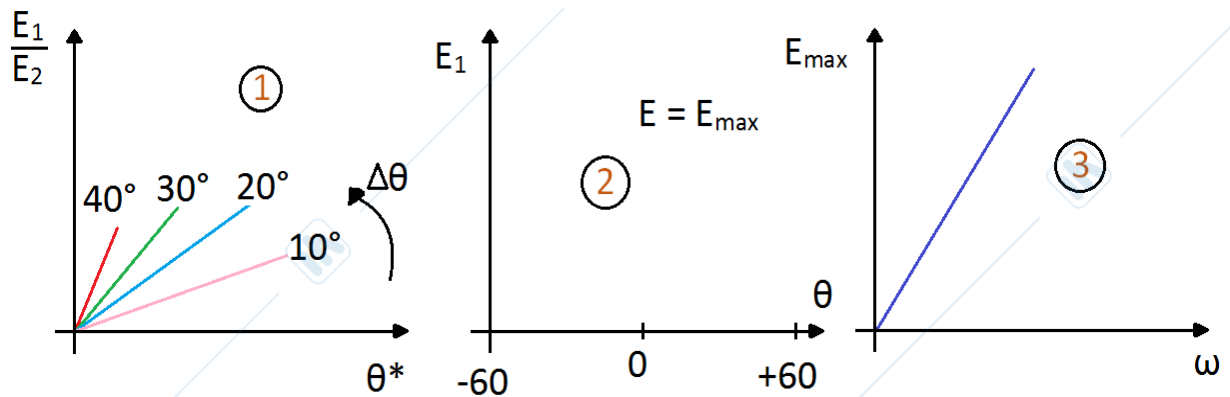
Da norma, vi sono tre metodi per determinare l'efficienza di una caldaia a recupero:

- Metodo input-output:  
l'efficienza è definita come rapporto tra il calore in uscita (ossia il calore assorbito dai fluidi di lavoro) e il calore in entrata.
- Metodo thermal loss:  
Il metodo thermal loss definisce l'efficienza come il 100% meno un quoziente espresso in percentuale. Il quoziente ha al numeratore tutte le perdite di calore e al denominatore il calore in entrata.
- Metodo effectiveness  
Questo metodo definisce le performance dell'HRSG come il rapporto tra il salto di entalpia dei gas attraverso l'HRSG sul metodo massimo teoricamente possibile. Tale rapporto viene poi espresso in percentuale. Per usare questo metodo occorre conoscere in più punti le temperature dei gas e del vapore.

## 8. Misure di Velocità

Anemometro a filo caldo (a  $T$  costante).

- Il sensore è costituito da un filo scaldato ad una temperatura superiore di quella del fluido in cui si trova esposto. Il flusso d'aria che lambisce il sensore tende a raffreddarlo. Un circuito a ponte mantiene il sensore ad una  $T$  costante (per effetto Joule) qualunque sia la velocità del fluido. Maggiore sarà la potenza per mantenere la  $T$  costante e maggiore sarà la velocità. La potenza dissipata è direttamente proporzionale alla velocità dell'aria.
- Dalla taratura ottengo i seguenti grafici:



Posiziono l'anemometro a caso e rilevo  $E_1$  poi lo ruoto di un angolo  $\theta$  noto e rilevo  $E_2$ .

- Nel grafico ① sfruttando le conoscenze di  $\Delta\theta$  e di  $E_1/E_2$  trovo  $\theta^*$ , che è l'angolo rispetto alla direzione del flusso. Attraverso la conoscenza di  $\theta^*$  e  $E_1$  trovo un punto nel grafico ②. Cerco la curva che passa per quel punto e così ho trovato la  $E_{max}$  relativa a quella curva. Sfruttando il grafico ③ trovo  $\omega$  con la sua  $E_{max}$  che ho appena trovato. Posso immaginare il grafico ② giacente sul piano del grafico ③ come se  $\theta^*$  fosse uscente dal grafico.
- Per fare prima esistono anemometri di questo tipo con 2 o 3 fili.

Il primo filo per avere già due valori di tensione ed un  $\Delta\theta$  fissato ed il secondo per avere una misurazione della velocità nelle tre direzioni.

I fili sono piccolissimi per non disturbare il flusso, quindi le inerzie sono nulle e posso misurare velocità molto alte. Devo evitare che il filamento bruci.

Noi misuriamo una  $\Delta V$  od una  $\Delta i$  per risalire poi alla  $V$ -

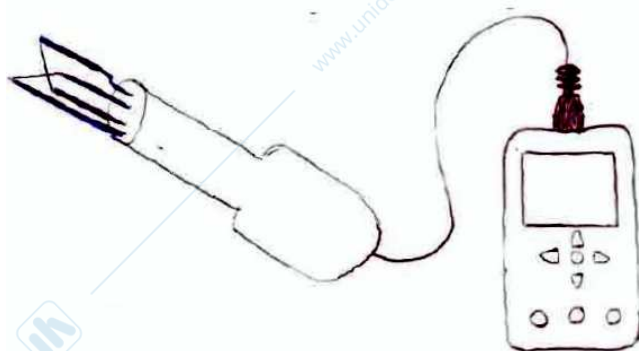
Ne esistono di tre tipi:

$T, \Delta V, \Delta i$  costanti

Con il tipo a  $T$  costante devo fornire una potenza per mantenere le condizioni costanti.

Questi anemometri a filo caldo sono usati per la ricerca in fluidodinamica sia per misure che controlli di flussi d'aria nel campo del condizionamento d'aria (HVAC), della qualità dell'aria (indoor air quality) e dell'igiene industriale.

Sono sensori molto sottili in grado di seguire anche flussi ad elevata turbolenza nel campo tridimensionale.



Voltmetro  
compreso di  
generatore di  
corrente

Esistono anche anemometri a coppette, per la misurazione della velocità e della pressione del vento.

Quelli a filo caldo invece, possono essere inseriti nei condotti per misurare la velocità del flusso. Sono formati da una sonda metallica, con due supporti aghiformi alle estremità è saldato un sensore, il filo caldo, riscaldato con una corrente  $i$ .

## 9. Fondamenti di Acustica

**Suono:** Fenomeno oscillatorio, per mezzo del quale dell'energia meccanica di vibrazione viene propagata attraverso un mezzo (elastico), è una forma di energia che si propaga attraverso variazioni di pressione, molto inferiori rispetto alla pressione atmosferica e che l'orecchio umano è in grado di percepire.

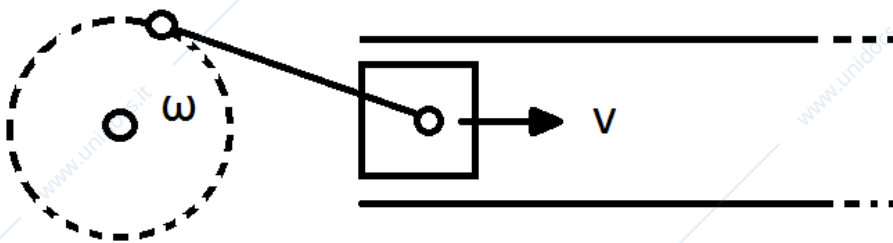
Noi tratteremo l'**acustica**, argomento che riguarda la variazione di un qualcosa non costante nel tempo: la pressione acustica è diversa da quella che noi misuriamo in altri corsi, poiché essa **varia nel tempo ed è un'oscillazione, quindi la sua propagazione avviene per la combinazione di due proprietà:**

(1) **Inerzia** } **Del mezzo di propagazione;** la trattazione si riconduce alla  
(2) **Elasticità** } meccanica delle onde.

Tratteremo perturbazioni piccole, che mantengono cioè valori molto piccoli di ampiezza; come range di valori parliamo di:

$20 \mu Pa$  ~  $200 Pa$  { min: Soglia dell'udibile  
(min) ~ (max) { max: Soglia del dolore

Come trattiamo tale oscillazione? La trattiamo come un pistone, guidato da un manovellismo, che agisce su un tubo infinito con fluido in quiete, a velocità costante ( $v$ ):



Le particelle, sottoposte ad una forza (pistone) reagiscono e quindi oppongono una forza uguale e contraria,

comprimendosi o rarefacendosi in alternanza, questo è dovuto, appunto a:

- **L'elasticità del mezzo**, necessaria perché le particelle a seguito della trasmissione di energia cercano di ricondursi alla posizione di riposo originaria.
- **L'inerzia**, dovuta alla massa e quindi alla possibilità di trasferire energia alle particelle adiacenti.

(Assunzioni: fluido omogeneo, isotropo, perfettamente elastico, trascurare viscosità e conduzione termica).

Le onde sonore possono essere di due tipi:

- 1. Longitudinali:** Nella stessa direzione di propagazione (es: pistone del manovellismo, molla in trazione o compressione).
- 2. Trasversali:** In direzione differente da quella di propagazione (es: corda tesa).



Occorre distinguere tra il moto delle particelle attorno alla propria posizione di equilibrio e la propagazione dell'onda sonora: quest'ultima giunge all'orecchio umano come variazione rispetto alla pressione statica (atmosferica).

- Nei fluidi (gas ed aeriformi) la propagazione avviene per onde di compressione (longitudinali), mentre nei solidi ci possono essere anche onde di tagli (trasversali) in cui il fenomeno vibratorio è normale alla direzione di propagazione. Nei solidi esiste una componente di resistenza elastica alla componente di taglio.
- Come si propagano le onde? Consideriamo un volume  $V_o$  di fluido, di dimensioni  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  e densità  $\rho$ , sottoposto ad una variazione di pressione statica ( $p_o$ ) che comporta uno spostamento delle sue superfici (ad esempio lungo  $x$ ) e, nel contempo una forza di opposizione proporzionale alla superficie lungo lo stesso asse; avremo allora che:

$$\begin{cases} p_o, \rho_o = \text{costante} \\ v_o = 0 \end{cases} // \text{ fluido in quiete} \quad \text{Le grandezze stazionarie sono indicate con il pedice } o$$

Equazioni linearizzate (valgono per le piccole oscillazioni):

$$\begin{cases} \nabla p = -\rho_o \frac{\partial \vec{u}_o}{\partial t} & \text{Quantità di moto } (\vec{u}_o, \text{fluttuazione della velocità, entità di quanto}) \\ \frac{\partial p}{\partial t} + p_o \nabla \vec{u} = 0 & \text{Continuità } (\vec{u}, \text{velocità delle particelle}) \end{cases}$$

(Nota:  $\vec{u}_o$  varia la velocità intorno al punto di equilibrio)

Equazione di stato del mezzo:

$$p = \rho RT \quad \left[ \frac{1}{p_o} \frac{\partial p}{\partial t} = \gamma \frac{\partial (p - p_o)/p_o}{\partial t} \right]$$

Trasformazione isentropica:

$$pv = \text{costante} \quad [s = \text{costante}]$$

Se combiniamo le equazioni precedenti, otteniamo:

$$\nabla^2 p = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad \text{Equazione di D'Alambert (eq. delle onde)}$$

Cos'è  $c$ ? La relazione è la seguente:

$$c = \sqrt{\left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_s} = \sqrt{\gamma RT} \quad \text{Velocità del suono in condizioni isoentropiche (velocità con la quale si propaga nello spazio le fluttuazioni di pressione)}$$

Nel caso monodimensionale:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \rightarrow \text{soluzione: } p = \varphi(x + ct) + \psi(ct - x)$$

Con  $\varphi$  e  $\psi$  funzioni arbitrarie. Quando l'onda si propaga nella direzione positiva dell'asse  $x$ , vale solo il secondo termine: la funzione  $\psi$  rappresenta l'onda di pressione diretta, in quanto dopo un tempo:  $t_1 = t + 1$  si ha  $x_1 = x + ct$ . Viceversa, la funzione  $\varphi$  rappresenta un'onda di pressione che si muove nel verso negativo delle  $x$ .

Se mi pongo solidale al fronte d'onda, in riferimento al moto del pistone, potrò scrivere continuità e quantità di moto in condizioni stazionarie, per cui potrò ricavarmi la legge denominata **Ohm Acustica**:

$$\frac{\Delta p}{v} = \rho_0 c \quad \begin{cases} v = \text{Velocità pistone} \\ c = \text{Velocità del suono} \end{cases}$$

Con  $Z = \rho_0 c = \text{Impedenza acustica caratteristica (valore intrinseco)}$ .

Naturalmente nello spazio le onde si propagano tramite sfericità, per cui l'equazione d'onda, in coordinate sferiche, sarà:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (\text{monodimensionale})$$

Ed ho come soluzione:

$$p = \frac{1}{r} \varphi_{\pm} \left( t \mp \frac{r}{c} \right) \rightarrow \begin{cases} p = \frac{A}{2} e^{j[\omega t - u]} \\ u = \frac{(1 - \frac{j}{kr}) p}{\rho c} \end{cases} \rightarrow p = \frac{\rho_0}{4\pi r} \frac{\partial}{\partial t} Q \left( t - \frac{r}{c_0} \right)$$

La propagazione decade per  $1/r$ , lontano dalla sorgente.

Trattiamo adesso la **velocità del suono**: è una grandezza importante per l'acustica, poiché è indispensabile per la conoscenza della propagazione in aria e nei fluidi in ambienti chiusi od aperti, per la trasmissione per via solida, per fenomeni di elaborazione strutturale o per determinare alcune proprietà acustiche di materiali:

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}} = \sqrt{\gamma RT} \rightarrow \text{Propagazione nei gas (condizioni isoentropiche)}$$

$$c = \sqrt{\frac{\beta}{\rho_0}} = \sqrt{\gamma \frac{\delta}{\rho_0}} \rightarrow \begin{cases} \text{Propagazione in tutti i fluidi (gas o liquidi)} \\ \beta = \text{Modulo di elasticità adiabatico} \\ \gamma = \text{Modulo di elasticità isotermico (più facilmente determinabile rispetto a quello adiabatico)} \end{cases}$$

$$\beta = \gamma \delta$$

$$c = \gamma \sqrt{\frac{E}{\rho}} \rightarrow \begin{cases} \text{Propagazione in tutti i fluidi e solidi} \\ E = \text{Modulo di elasticità} \end{cases}$$

Velocità maggiore nei mezzi con  $E$  elevato e bassa densità.

Vediamo le proprietà delle onde sonore (nell'acustica applicata):

- **Frequenza ( $f$ )**: Il numero di volte in un secondo in cui si ripete il fenomeno, essa si misura in Hertz ( $Hz$ ); essa rappresenta il tono (alto o basso).
- **Lunghezza d'onda ( $\lambda$ )**: Distanza in metri tra due fronti d'onda successiva; essa rappresenta la distanza tra i picchi.

Esse sono legate dalla seguente relazione:

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT \quad \begin{cases} c = \text{Velocità del suono} \\ T = \text{Periodo dell'onda (secondi)} \end{cases}$$

- **Pressione Efficace (RMS):** Radice quadrata della media quadratica della pressione acustica (lo definisco poiché per la variazione di pressione ho valori positivi e negativi):

$$p_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}, \quad p = p(t) = A \sin(\omega t) = A \sin(2\pi f t)$$

(le particelle oscillano in modo armonico, se ho una sola onda da trasmettere → tono puro)

Si può anche dimostrare, in questo caso, che la pressione efficace è data da:

$$p_{eff} = \frac{p_{max}}{\sqrt{2}}$$

- **Potenza Sonora (P<sub>w</sub>, W):** Energia irradiata da una sorgente sonora nell'unità di tempo → lavoro, attraverso la superficie A, prodotto da una forza di pressione p per la velocità di spostamento della particelle v intorno al punto di equilibrio:

$$\left. \begin{aligned} W &= \frac{L}{s} = \frac{F \cdot s}{t} = (p \cdot A) \frac{s}{t} = p A v \\ \frac{p}{v} &= \rho c \text{ (Ohm acustica)} \end{aligned} \right\} W = \frac{p^2}{\rho c} \cdot A \text{ [W]} \text{ può variare in un tempo molto ampio}$$

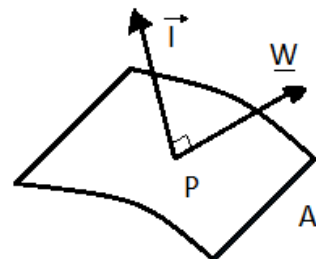
Se considero una sorgente puntiforme nello spazio:

$$W = \frac{p^2}{\rho c} \cdot 4\pi r^2$$

- **Intensità Sonora (I):** Flusso di energia acustica che attraversa le superfici, nell'unità di tempo, in condizioni unitarie e normali alle velocità:

$$I = \frac{W}{A} = \frac{p^2}{\rho c} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (p = p_{eff} \text{ (cond. reali)})$$

→ è un vettore



- **Pressione Acustica (p(t)):**

$$p(t) = p_a + p_v(t) \begin{cases} p_a = \text{pressione del fluido non disturbato} \\ p_v(t) = \text{pressione fluttuante responsabile della sensazione acustica} \end{cases}$$

Se:  $p_v(t)$  è di tipo armonico  $\rightarrow p_v(t) = p_o \sin(2\pi ft + \varphi)$  (in generale  $p_v$  è somma di infinite componenti armoniche nella banda dell'udibile (20 ~ 20000 Hz))

- **Livelli:** La caratteristica principale delle grandezze acustiche è quella di presentare un campo di variazione estremamente ampio; per questo ricorriamo a scale longitudinali, in particolare il decibel ( $dB$ ); quest'ultima non è propriamente un'unità di misura acustica, ma esprime una quantità relativa, cioè rapportata ad una quantità di riferimento, la misura così espressa si indica con il termine di livello; in questo caso avremo:

$$dB = 10 \log_{10} \frac{\sigma}{\sigma_{ref}} \quad \begin{cases} \sigma = \text{Grandezza generica} \\ \sigma_{ref} = \text{Grandezza di riferimento} = \sigma_o \end{cases}$$

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{p}{p_o} \right)^2 = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_o} \right) = \text{Livello di pressione sonora} \\ p_o = 20 \mu Pa \text{ (soglia dell'udibile)}$$

$$L_W = 10 \log_{10} \left( \frac{W}{W_o} \right) = \text{Livello di potenza sonora} \\ W_o = 10^{-12} W \text{ (soglia di potenza)}$$

$$L_I = 10 \log_{10} \left( \frac{I}{I_o} \right) = \text{Livello di intensità sonora (modulo del vettore)} \\ I_o = 10^{-12} \frac{W}{m^2} \text{ (soglia di intensità, su superficie unitaria)}$$

- **Rumore:** Un suono sgradevole, fastidioso e/o dannoso, legato alle variazioni di pressione indotte dalle vibrazioni meccaniche delle strutture della macchine oppure ai cicli termodinamici dei fluidi operanti tra le macchine (es: gas di scarico).

**Fastidio:** Lo si controlla all'interno dei luoghi di vita e lo si riferisce al rumore dovuto a sorgenti, infrastrutture.

**Danno:** Quando il livello sonoro è superiore a certi valori (80 dB) e l'esposizione è prolungata, può portare ad ipoacusia, stress ed altre malattie cardiovascolari.

Esercizio / osservazione:

Supponiamo che in un punto, a causa di una sorgente di rumore, si è rilevato un livello di potenza sonora di 67 dB. Qual è il livello se si attiva un'ulteriore sorgente di rumore uguale alla precedente e pressappoco nello stesso punto?

La potenza sonora raddoppia per cui, detto  $A$  il valore originale della potenza sonora, abbiamo:

$$L_w = 10 \log(2A) = 10 \log(2) + 10 \log(A) = 10 \log(A) + 3$$

Per ogni raddoppio in scala lineare della potenza sonora del rumore emesso dalla sorgente, il livello di  $dB$  aumenta di 3. Se il rumore quadruplica il livello si incrementa di 6 e così via (seguendo le potenze di due).

Se faccio tale ragionamento anche per la pressione, avremo che:

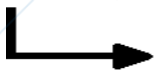
$$L_p = 20 \log(2p) = 20 \log(2) + 20 \log(p) = 20 \log(p) + 6$$

Per ogni raddoppio in scala lineare della pressione sonora del rumore emesso dalla sorgente, il livello  $dB$  varia di 6.

Come misurare tali livelli delle grandezze acustiche? Essi possono essere misurati globalmente per il valore che assumono in tutta la banda delle frequenze udibili, oppure in un campo più ristretto (banda). La conoscenza dei livelli in diverse bande di frequenza può risultare assai utile per valutare ad esempio il contributo sul rumore globalmente emesso delle diverse armoniche. La gamma di frequenze udibili può essere suddivisa convenzionalmente in:

1. Bande di ottava (8 intervalli non sovrapposti).
2. Terzi di bande di ottava (24 intervalli non sovrapposti, suddivisione più fine).

(Un'ottava risulta dalla suddivisione della gamma delle frequenze variabili in modo che ogni banda risulti compresa fra le due frequenze che stanno tra loro nel rapporto 2: 1. Ogni banda è identificata con la sua frequenza centrale, che è la media geometrica delle due estreme).



p. 40: rappresentazione del rumore in bande di ottava ed in terzi di bande di ottava (differenze di grafico).

Vediamo adesso le diverse tipologie di rumore, per comprendere meglio le conseguenze psicofisiche del rumore (prese in considerazione dalle normative):

- **Rumore Continuo**: Livello energetico relativamente costante nel tempo di osservazione.
- **Rumore Discontinuo**: Durante il tempo di osservazione, il rumore si interrompe più volte per periodi non inferiori al secondo.

- **Rumore A Tempo Parziale**: Caratteristico di una sorgente (continua o discontinua) che funzioni per un periodo limitato del giorno.
- **Rumore Impulsivo**: Impulsi sonori di breve durata ed intensità molto elevata chiaramente udibili nel rumore complessivo (es: magli o presse).
- **Rumore Impulsivo Ripetitivo**: Impulsi sonori di intensità minore rispetto al caso precedente, ma emessi a cadenza di ripetizione più elevata.
- **Rumore con Componenti Tonalì**: Presenza di una componente a frequenza fissa chiaramente avvertibile sovrapposta al restante rumore ambiente.

Oltre al tipo ed al livello di rumore, il disturbo (annoyance) dipende anche dalla sua frequenza: a parità di intensità i rumori ad alta frequenza disturbano maggiormente, rispetto alle basse frequenze. Allora, perciò, l'effetto di quest'ultima è condensata nelle curve di uguale livello di disturbo, note anche come **Curve NR** (Noise Rating), servono a determinare la soglia di rumore accettabile in ambienti chiusi.

$$\left\{ \begin{array}{l} NR < 40 \rightarrow \text{Il lavoro mentale è reso possibile con livelli energetici bassi} \\ 40 < NR < 60 \rightarrow \text{Disturbo crescente} \\ NR > 60 \rightarrow \text{I rumori possono provocare dolore e lesioni all'apparato uditivo} \end{array} \right.$$

I parametri fisici che determinano il danno del rumore sull'uomo sono tre:

1. Livello di pressione sonora.
2. Tempo di espansione  $\rightarrow$  si osserva che l'orecchio non manifesta fenomeni di adattamento e che il tempo di recupero, a parità di livello, cresce notevolmente con il tempo di esposizione.
3. Composizione spettrale del rumore  $\rightarrow$  uno spettro diffuso su tutta la banda dell'udibile genera meno disturbo di uno che evidenzia componenti tonali o concentrate su bande di 1/3 di ottava.

Per pesare il rumore rilevato sperimentalmente, usiamo le **curve isofoniche**: rappresentano la precisione sonora che deve posseder un tono puro al variare della frequenza per indurre la stessa sensazione uditiva rispetto ad una frequenza di riferimento (1000 Hz), cioè la stessa sensazione che si prova a 1000 Hz, la sensazione uditiva si misura in phon.

Per valutare gli effetti fisiologici del rumore, occorre tenere conto del fatto che l'orecchio non è ugualmente sensibile a tutte le frequenze; il contenuto di frequenza corrispondente alla massima sensibilità dovrà nella valutazione essere penalizzato

rispetto ai contenuti per i quali l'orecchio è meno sensibile. Occorre pertanto correggere le misure di rumore con **filtri di pesatura** (filtro più usato ~ imposto dalle normative ~ è la pesatura  $A$ , a 40 phon): si adottano tali curve per fare in modo che, da una misura di una grandezza fisica (qui è la pressione sonora), sia possibile misurare le sensazioni uditive; nel simulare la risposta dell'orecchio umano, occorre attenuare la pressione sonora dei suoni a frequenza più basse, a cui siamo sensibili.

Rumore ed ambiente di lavoro: Il concetto base è quello di **dose di rumore**, accumulo dell'energia sonora subita durante il tipico turno di lavoro:

$$Dose = \text{Livello di intensità} \times \text{Durata dell'esposizione}$$

La misura viene effettuata con fonometri integratori capaci di fornire direttamente la dose di esposizione in  $dB(A)$ , come richiesto dalle normative.

Per cui agiremo tramite **prevenzione**: riduzione entro i limiti di sicurezza della dose di rumore assorbita dal soggetto esposto; possiamo procedere per tre vie:

1. **Riduzione del rumore emesso dalla fonte** (tramite modifiche adeguate allo scopo): via radicale, ma spesso difficile da applicare.
2. **Interventi sulle caratteristiche di assorbimento del locale.**
3. **Dotare gli addetti di apparecchi di protezione di adeguate caratteristiche isolanti** (ultima risorsa, esempi: cuffie antirumore, tamponi, auricolari).

Si definisce il **Livello continuo equivalente di pressione ponderato  $A$** :

$$L_{eq}(A), T = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] dB(A) \quad \begin{cases} p_A(t): \text{Pressione istantanea secondo} \\ \text{la curva } A \text{ isofonica} \\ p_0: \text{Pressione di riferimento} \end{cases}$$

Esprime il livello energetico medio del rumore ponderato in curva  $A$  nell'intervallo di tempo considerato (livello imposto dalle normative, può variare).

Come si propaga il rumore in un fluido? Distinguiamo i due casi ideali:

1. **Ambiente libero** (suono non incontra ostacoli nel suo percorso, quindi camera con pareti perfettamente assorbenti, camera anecoica).
2. **Ambiente riverberante** (suono riflesso dalle pareti, creando all'interno dell'ambiente un campo diffusivo, in cui non si riesce a distinguere un punto origine delle perturbazioni acustiche, camera con pareti perfettamente riverberanti, camera riverberante).

**Ambiente Libero:** La propagazione dipende dal tipo di sorgente, di solito:

- Puntiforme (es: macchina a sufficiente distanza (esaminiamo solo questa)).
- Lineare (es: autostrada vista come curva che emette rumore ad ogni suo segmento).
- Altre più complesse, in funzione della superficie emittente.

Nel caso di sorgente puntiforme  $P$ , essa emette un campo d'onde sferico che si propaga con la stessa velocità in tutte le direzioni (divergenza); allora il legame tra potenza sonora e pressione sonora è la seguente (emisferico), ipotesi solo divergenza:

$$\left. \begin{aligned} L_p &= L_w - 10 \log(4\pi r^2) = L_w - 10 \log(4\pi) - 20 \log(r) = L_w - 20 \log(r) - 11 \\ \text{Se } c' \text{ è il suolo (considerato perfettamente assorbente)} \\ L_p &= L_w - 10 \log(2\pi r^2) = L_w - 20 \log(r) - 8 \text{ (semisferico)} \end{aligned} \right\}$$

L'attenuazione del livello del rumore con la distanza (divergenza) varia a seconda del tipo di sorgente:

- Puntiforme: Ogni raddoppio di distanza ( $r$ ) dal centro mi comporta una attenuazione del rumore di  $6 \text{ dB}$ .
- Lineare: Ogni raddoppio di distanza ( $r$ ) dall'asse mi comporta una attenuazione del rumore di  $3 \text{ dB}$ .

Se considero allora due punti ( $P_1, P_2$ ) distanti rispettivamente  $r_1$  e  $r_2$  da una sorgente con potenza sonora nota  $L_w$ :

$$\begin{cases} L_{p(1)} = L_w - 20 \log(r_1) - 8 \\ L_{p(2)} = L_w - 20 \log(r_2) - 8 \end{cases} \rightarrow L_{p(1)} - L_{p(2)} = 20 \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$$

consente di stimare il livello di pressione sonora in un punto qualsiasi, noto un altro.

La trattazione che abbiamo fatto è del tutto teorica, poiché abbiamo tenuto conto della divergenza e non dell'eventuale direzionalità della sorgente né dei fenomeni di attenuazione diversi dalla divergenza:

1. Attenuazione dovuta agli ostacoli o barriere ( $A_b$ ).
2. Attenuazione dovuta all'assorbimento dell'aria ( $A_a$ ).
3. Attenuazione per effetto suolo ( $A_s$ ) // influenza: conformazione + vegetazione.

## ACUSTICA:

Suono= fenomeno ondulatorio per il quale l'energia meccanica di vibrazione viene propagata attraverso un mezzo elastico.

Si realizza con la propagazione di una perturbazione oscillante di alcune grandezze fisiche. L'orecchio umano avverte le perturbazioni di pressione (range da  $20\mu\text{Pa}$  a  $200\text{Pa}$ ).

Proprietà delle onde sonore:

1. frequenza e lunghezza d'onda [relazione]
2. pressione efficace [formula]
3. potenza sonora: energia emanata dalla sorgente sonora [formula]
4. intensità sonora: flusso di energia acustica [formula]
5. pressione acustica [formula]
6. livelli, esprimono il rapporto logaritmico tra la quantità misurata e una di riferimento [dB=decibel]. Ne utilizziamo 3: SPL (pressione acustica), IL (intensità sonora) e  $L_w$  (potenza acustica).
7. rumore= suono sgradevole, rappresenta un danno fisico se superiore a 80dB.

I rumori si dividono, a seconda dell'ampiezza del livello di potenza acustica e di frequenza, in: continuo, discontinuo, a tempo parziale, impulsivo, impulsivo-ripetitivo, a componenti tonali.

I parametri che condizionano il dolore uditivo sono: livello di  $p(t)$ , tempo di espansione, composizione spettrale (più è rumore bianco, meglio è).

Infatti, le onde acustiche si misurano sia nel dominio del tempo che in quello delle frequenze (spettri).

La misura dei livelli avviene in due tipologie: a bande di ottava (8 intervalli non sovrapposti) o a terzi di bande di ottava (24 intervalli non sovrapposti).

Le curve isofoniche sono curve a sensazione uditiva costante, che riportano al variare di  $f$  il livello di pressione sonora (SPL).

I microfoni capacitivi sfruttano la distanza tra le armature per calcolare la pressione che vi è stata applicata, dalla quale si ha una variazione di  $C$  e quindi di  $V$ =tensione applicata.

Misura della potenza in campo libero:

1. si registrano le condizioni sonore ambientali (rumori esterni, riverberi, ...)
2. si installano le sorgenti acustiche (cosa fa rumore)
3. si posizionano le varie postazioni microfoniche ( $6 < n < 24$ )
4. la sorgente viene messa in funzione a specifiche condizioni operative e viene registrata la pressione sonora a bande di ottava
5. vengono corrette le pressioni con i rumori di fondo e le condizioni ambientali, attraverso 2 coefficienti [formule]
6. viene misurata  $\{L_p\}$ =pressione sonora media
7. si calcola la potenza acustica  $L_w$  [formula]

## 10. NDT (Misure non Distribuite)

Si intende l'insieme delle procedure e delle tecniche volte alla valutazione della difettosità / integrità dei materiali o di manufatti senza alterarne o danneggiarne lo stato; esse sono utilizzate anche per:

- Caratterizzazione della microstruttura e composizione chimica.
- Stima delle proprietà fisiche del materiale.
- Valutazione dello stato di tensione.

Avremo vari tipi di prove non distruttive, le più importanti sono:

1. Metodo radiografico.
2. Metodo ultrasonoro.
3. Metodo magnetoscopico.
4. Metodo dei liquidi penetranti.
5. Ispezione visiva.

Tali prove sono molto utilizzate in molte fasi della produzione dei componenti (nello sviluppo del prodotto, per verificare la qualità dei materiali in ingresso, per controllare e migliorare il processo produttivo, per controllare i trattamenti termici e superficiali, per controllare l'assemblaggio, per monitorare il componente in esercizio).

Nel campo dell'integrità strutturale, esse vengono eseguite allo scopo di rilevare:

- La presenza di eventuali difetti (detection).
- Di identificare la tipologia (characterization).
- Definirne la posizione (location).
- Definire le dimensioni (sizing).

**Ispezione visiva:** Metodo di base di ispezione, in cui vengono utilizzati baroscopi, fibre ottiche, ingrandimenti, specchi, robot (che permettono ispezioni in parti inaccessibili o pericolose per l'uomo, quali gasdotti, strutture sottomarine).

**Liquidi penetranti:** Metodo con il quale individuare difetti di tipo superficiale, tramite liquidi con bassa tensione superficiale, il componente viene spruzzato, lavato (dando il tempo alla penetrazione), sviluppato (mezzo di contrasto (rilevatore), cioè si usano polveri per tirare in superficie il liquido) ed analizzato visivamente (con vernice fluorescente o luce UV).

**Magnetoscopica:** Il componente viene magnetizzato e spruzzato con un liquido fluorescente contenente particelle ferrose ed osservato con luce UV; le particelle si dispongono lungo le linee di flusso magnetico sulla superficie del componente, se ci sono difetti o cricche, le linee di flusso si alterano.

**Raggi X:** Il componente è interposto tra la sorgente di raggi x e la lastra; il materiale assorbe parte dell'energia dei raggi x e solo una parte arriva ad impressionare la lastra, se c'è un vuoto all'interno del materiale, si ha minore assorbimento e quindi una maggiore esposizione della lastra.

**Correnti indotte:** Un campo magnetico è generato da una bobina alimentata da corrente alternata, che produce nel pezzo da esaminare delle correnti indotte; tali correnti influenzano il valore dell'impedenza della bobina che le ha generate, la presenza di una qualsiasi discontinuità, modifica l'intensità ed il percorso delle correnti indotte e quindi l'impedenza del circuito, la cui variazione è indice di possibile difettosità.

**Ultrasuoni:** Fornisce informazioni sulla situazione interna in un componente in termini di variazione delle modalità di propagazione e riflessione di un'onda ultrasonora nel passaggio, attraverso il componente (difettato) da un pulsatore (generatore d'onde ultrasonore) ad un ricevitore; ha molte applicazioni:

- Difettoscopia.
- Misure di spessore (corrosione, erosione).
- Verifiche di giunti incollati o brasati.
- Stima delle dimensioni del grano.
- Verifica della frazione di vuoto in plastici e composti.

**Vantaggi:** Rilevare difetti superficiali ed interni, controllare spessori notevoli, eseguire controlli con accessibilità da un solo lato, dimensionare e posizionare la discontinuità ridotta preparazione dei pezzi, risultati in tempo reale, rappresentazioni bi/tridimensionali molto significative.

**Svantaggi:** Accessibilità della superficie, addestramento ed esperienza del personale, mezzi di accoppiamento, materiali rugosi (di forma irregolare, molto sottili o disomogenei possono essere difficili da ispezionare, complessità nelle tarature preliminari, importanza della giacitura del difetto, difficoltà nel controllo di materiali a grano grosso o struttura austenitica.

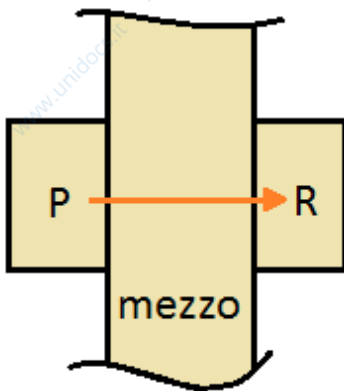
L'efficacia di tale ispezione dipende da:

1. Tipo ed orientazione della discontinuità.
2. Componente ispezionato.
3. Tecnica e procedura utilizzata.
4. Esperienza dell'ispettore.

Il materiale è un filtro che modifica il segnale che lo attraversa (modifica segnale).

$P$  = Pulse (ingresso segnale ~ pulsatore).

$R$  = Receive (acquisizione segnale in uscita ~ ricevitore).



Esso, in quando sonda, produce un fascio ultrasonico (con frequenze che vanno dai 20  $KHz$  fino ad 1  $GHz$ ), costituito da onde meccaniche che si propagano nel mezzo; la sonda è un trasduttore piezoelettrico, converte cioè un impulso elettrico in vibrazione meccanica e viceversa.

Ultrasuoni = fenomeno ondulatorio [ $y = A \sin(\omega t)$ ]. Ci sono vari modi vibrare:

1. Onde longitudinali (spostamento particelle parallelo alla direzione di propagazione dell'onda, si propagano liquidi, solidi, gas).
2. Onde trasversali (spostamento particelle perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda, si propagano solo nei solidi).
3. Onde superficiali (Rayleigh ~ la propagazione avviene lungo l'interfaccia tra due mezzi differenti ~ di solito due fluidi con densità differenti).

Due metodi di osservazione:

1. Pulse – Receive (classico).
2. Pulse – Echo (sonda emette il segnale che poi viene ricevuto dalla sonda stessa o da un secondo trasduttore).

Metodi per la valutazione di integrità di un materiale; si prova di prove non distruttive:

1. ispezione visiva: attraverso ingrandimenti, specchi o robot;
2. liquidi non corrosivi, attraverso i quali si analizzano difetti superficiali analizzando visivamente con l'aiuto di luci UV;
3. ispezione magnetoscopica: il componente viene spruzzato con un liquido fluorescente. Questo seguirà le linee di flusso magnetico e se varieranno, ci sono delle cricche.
4. raggi X: il componente viene frapposto tra una sorgente di raggi X e una lastra; il componente assorbirà una certa quantità di energia, ma se in qualche punto ne assorbirà meno (o meglio, la lastra di più) si avranno dei vuoti nel pezzo.
5. correnti indotte: si genera un campo magnetico con una bobina alimentata ad AC, che produce correnti indotte. Eventuali discontinuità andranno a modificare il valore dell'impedenza del circuito nominale.
6. ultrasuoni: fornisce indicazioni sulla situazione interna del pezzo; esso rappresenta un filtro per un segnale a ultrasuoni e studiandone la variazione di propagazione si può analizzare lo stato del pezzo.