

In questa struttura distorta si forma un dipolo, c'è uno sbilanciamento di cariche. Se io applico un campo elettrico al cristallo, il campo elettrico a seconda che sia concorde o meno al dipolo, lo estende o lo comprime. E la maniera in cui viene utilizzato, così come lo usavamo per le tecniche ottiche per spostare lo specchio. Io qui lo posso utilizzare al contrario, cioè se io comprimo o dilato il cristallo genero un campo elettrico variabile. Quindi se io mando un'onda di pressione che comprime o dilata il cristallo, leggerò agli estremi di questo cristallo un campo elettrico variabile, e la variazione di questo campo sarà strettamente legata alla variazione dell'onda di pressione che incide il cristallo. Quindi, il trasduttore funziona così: l'onda di pressione viene opportunamente indirizzata sul cristallo che viene trasdotta in un segnale di tensione che è legato all'onda che lo ha prodotto. L'equazione che descrive il comportamento del cristallo piezoelettrico è la seguente:

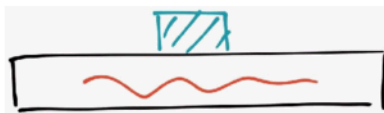
$$\Delta l = \pm E d_{ij} l_0$$

dove E è il campo elettrico applicato, d_{ij} sono i coefficienti piezoelettrici del materiale e l_0 è la lunghezza iniziale del cristallo.

I cristalli piezoelettrici ed il PZT-5 in particolare (il più utilizzato) possiedono una serie di proprietà che li rendono idonei a questa applicazione:

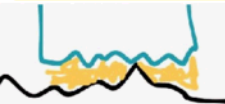
- Bassa impedenza → Buon accoppiamento elettrico con i circuiti a valle
- Robustezza meccanica
- Buon accoppiamento acustico con molti metalli
- Segnale di tensioni in uscita facilmente amplificabile e processabile.

Approfondiamo un secondo il buon accoppiamento acustico con molti metalli. Da un punto di vista sperimentale la situazione in cui ci troviamo è questa:



abbiamo il **materiale**, dentro c'è una qualche **onda** che si sta propagando e noi applichiamo il **trasduttore**. L'onda deve passare dal materiale al sensore. Ogni qual volta che c'è il passaggio di onda da un

oggetto all'altro c'è un fenomeno di riflessione e un fenomeno di trasmissione, che è quello che dobbiamo massimizzare. Il fattore di trasmissione è tanto più migliorato quando gli indici di rifrazione tra i due mezzi sono uguali tra loro, in quanto idealmente è come se avessi lo stesso materiale. Quando noi diciamo che il cristallo piezoelettrico è buono perché ha un buon accoppiamento acustico con molti metalli, stiamo sostanzialmente dicendo che ha un indice di rifrazione che non è molto dissimile da molti metalli.



Però c'è un'altra questione. Se noi andiamo a guardare ancora più in dettaglio la situazione ci troviamo che tra il **trasduttore** e l'**oggetto** l'accoppiamento non è perfetto, tra i due ci sarà sempre del vuoto. Quindi in realtà

l'accoppiamento non è tra il PZT e il materiale, ma tra il PZT e il vuoto. Per questo motivo sul materiale si va ad inserire un **gel di accoppiamento**, spesso del gel

siliconico, che è un mezzo che si interpone tra i due andando a riempire tutti i vuoti, ed ha un indice di rifrazione intermedio tra l'indice del metallo e del PZT (l'abbiamo testato anche sui compositi e va anche bene, anzi forse va anche meglio). E consente dunque un'eccellente propagazione del segnale acustico. Questo è molto importante perché la rilevazione del segnale acustico è critica, e questo è un accorgimento molto importante per la lettura del segnale.

Struttura del trasduttore

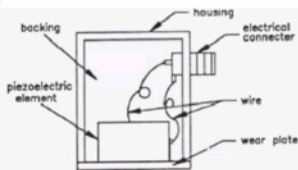
☐ Case Metallico che funge da schermo elettrostatico

☐ Film Plastico di isolamento elettrico dal pezzo in esame

☐ Cavi elettrici che trasportano il segnale di tensione in uscita dal PZT

☐ Connettore elettrico per interfacciamento con l'amplificatore

☐ Supporto (fondamentalmente non supportato ai fini dell'isolamento acustico)



I criteri fondamentali per la scelta di uno specifico trasduttore sono:

- **Dimensioni di cui si è a disposizione per applicare il sensore.** Tenete presente che più è grande il sensore più segnale registriamo, quindi meno diventa critica la registrazione, quindi, se devo andare a fare un'analisi strutturale su pilastri di un edificio, ad esempio, si mettono dei sensori che hanno 20-25 cm di diametro. Se devo fare, invece, l'analisi di un provino di piccole dimensioni ricorrerò a sensori miniaturizzati (3.6 x 2.4 mm x mm).
- **Range di temperatura di funzionamento** (i sensori possono arrivare sino a -200°C e fino a + 540°C).
- **Sensibilità di picco, quanto è sensibile il sensore, questo dipende dal fenomeno che dobbiamo andare a leggere:** ci sono fenomeni più intensi, la propagazione delle cricche genera emissioni acustiche intense, quindi sarà sufficiente un sensore di buona sensibilità ma non ottimale; la rottura delle fibre di un composito è un fenomeno molto energetico da un punto di vista acustico e non ho quindi bisogno di una grande sensibilità del sensore. Viceversa, il movimento delle dislocazioni o fenomeni di micro-cracking all'interno della matrice di un composito sono fenomeni molto meno intensi e quindi richiedono un sensore più sensibile. Alcuni fenomeni, tipo la delaminazione di un composito si trovano un po' nel mezzo.
- **Range di frequenza:** anche questo è un aspetto interessante perché a questi singoli fenomeni (dislocazioni, rottura di fibre ecc.) può essere associato ad una specifica energia ma anche uno specifico spettro di emissione, quindi, una specifica

Sensibilità di picco = sensibilità.

Propagazione di cricche e rottura fibre sono molto energeticamente intensi e richiedono una bassa sensibilità;

Dislocazione e micro-cracking di matrice sono poco intensi e vogliono sensibilità maggiore

Range di Frequenza: ad ogni fenomeno si associa uno specifico spettro di emissione e quindi una frequenza; i sensori

sono progettati per captare una specifica banda con grande sensibilità oppure uno spettro più ampio

la banda di migliore registrazione per il trasduttore è la frequenza di risonanza

frequenza. Quindi la scelta del range di frequenza del sensore ci permette di cogliere o meno determinati fenomeni.

- **Frequenza di risonanza** cioè la frequenza che il sensore registra meglio. Quindi magari quando noi siamo interessati ad uno specifico fenomeno, che emette attorno a quella frequenza, ci può convenire andare a scegliere un sensore che abbia una frequenza di risonanza più vicino possibile a quella del fenomeno che noi vogliamo andare a rilevare.
- **Resistenza ad elevate pressioni**: a volte vengono utilizzati per essere messi all'interno dei recipienti di pressione e studiarne l'infragilimento.
- **Wireless**: stesso tipo di applicazione citata in precedenza, se avete una cisterna a 15-20 m di altezza la cosa migliore può essere avere un sistema di acquisizione a terra e il sensore che manda il segnale in wireless.
- **Resistenza alle radiazioni**, cioè schermati.

Sistema di carico

Sul sistema di carico non c'è molto da dire in termini specifici. L'idea è utilizzare lo stesso sistema di carico che utilizzeremmo comunemente. Può essere un sistema di carico meccanico, o in senso più lato una camera o un forno in cui avvengono certe reazioni o trasformazioni di fase. La progettazione del sistema di carico, all'inizio dell'utilizzo di questa tecnica, era una cosa che di faceva ad hoc perché bisognava limitare il più possibile il rumore, la traccia acustica prodotta dal sistema di carico. Attualmente con lo spostamento delle frequenze nella banda degli ultrasuoni non ci sono grosse problematiche, conviene, è buona norma cercare comunque di capire che il sistema di carico non abbia delle vie di propagazione del suono che verrebbero lette dal sensore, cioè conviene comunque fare qualche prova preliminare per capire qual è l'entità del rumore di fondo prodotta dal sistema di carico. (generalmente non ci sono problemi di questo tipo, però è buona norma farlo).

C'è una strategia, nel caso in cui si dovesse incorrere in un problema di questo tipo qui, ed è cioè lavorare in maniera differenziale. Se ho un sistema di carico che emette di suo delle emissioni acustiche e non riesco con accorgimento ad isolarle allora l'idea è rilevarla in tempo reale, mentre registro il segnale sul provino, e poi lavoro in maniera differenziale: sottraggo un segnale dall'altro.

Elettronica

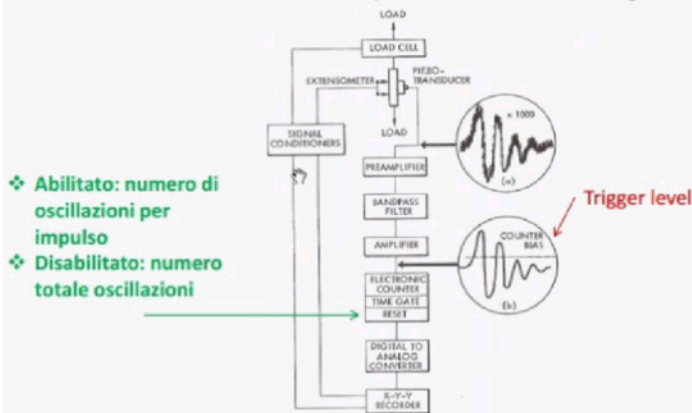
Il segnale una volta rilevato va opportunamente amplificato. Stiamo parlando di segnali piccoli ($10\mu V$), e il sistema di amplificazione è un sistema piuttosto complicato. Tutte le volte che si deve progettare un amplificatore con una grossa amplificazione ci si deve preoccupare di non amplificare anche il rumore. Il segnale in sé per sé è piccolo, ma talvolta nell'operazione stessa di applicare il sensore sul provino si raggiungono segnali dell'ordine dei 100V. Quindi, è un amplificatore che deve essere molto robusto perché deve amplificare molto, ma al tempo stesso deve resistere a degli overshoot di tensione molto alti.

Il componente più delicato dell'intera catena elettronica di amplificazione e processing del segnale è costituito dal preamplificatore.

Configurazioni sperimentali

Metodo Standard:

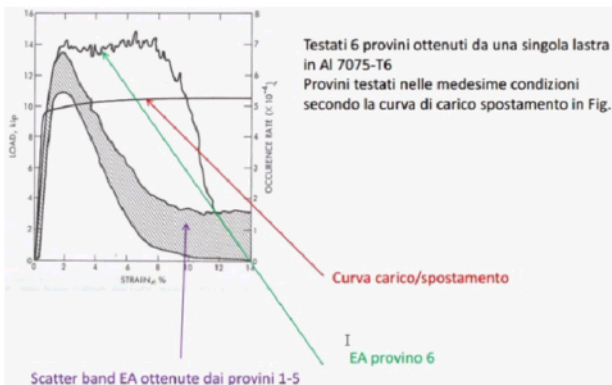
In questo tipo di configurazione si registra l'intero segnale di emissione acustica per poi correlarne numero e caratteristiche ai parametri di test che hanno generato l'emissione



Descrizione del diagramma: load cell è la cella di carico; eventuali altri sistemi di monitoraggio estensimetro, estensometro; posizionamento del trasduttore piezoelettrico; il segnale che viene letto dal trasduttore; il pre-amplificatore; un filtro passa banda che serve già a ripulire un po' il segnale dal rumore; eventualmente un altro amplificatore; poi un parametro essenziale quando si setta il set-up che è il livello di soglia (trigger level), il sistema viene sempre settato in modo da acquisire solo segnali che superano una certa soglia.

Generalmente la soglia viene posta tra i 30-35 dB, cioè tutti i segnali acustici che non superano quella soglia non vengono acquisiti dal sistema, cioè è una maniera in qualche modo di filtrare ulteriormente il rumore; nel caso della corrosione per alcuni materiali è necessario abbassare ulteriormente il valore di soglia a 15-20 dB perché il segnale acustico emesso in questi caso è veramente basso e lasciando la soglia al valore comune rischieremmo di perdere informazioni. Viceversa, ci sono casi dove si ha rumore di fondo della macchina ed è preferibile spostare il valore di soglia a 40 dB per eliminarlo, te ne accorgi perché non stai facendo niente e continui a vedere segnali acustici allora la soglia di accettazione è troppo bassa per escludere il rumore, allora la alzi.

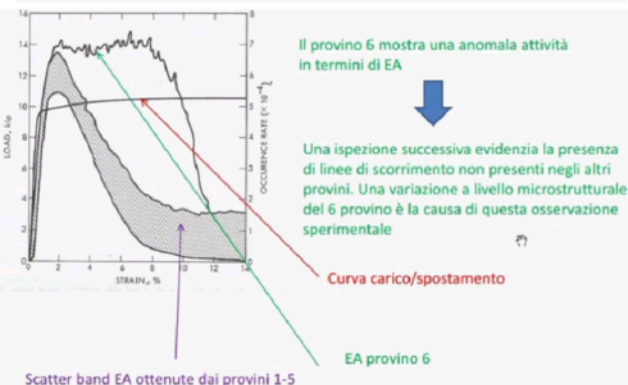
Tenete presente che esistono condizioni di esperimento che si chiama High Signal dove in qualche modo questa soglia viene tenuta volutamente molto alta, per esempio a 55 dB, o 60-65 dB. Perché noi se stiamo indagando una struttura in cui non ci interessano fenomeni di corrosione o dislocazioni, o comunque in generale fenomeni a bassa intensità, ma ci interessa soltanto sapere se ci sono fenomeni di propagazione di cricche a cui è associata elevata energia, allora usiamo il valore di soglia più alto già in partenza proprio per filtrare tutti i segnali che non sono di nostro interesse, magari ci saranno anche delle fasi della propagazione della cricca che saranno escluse dalla soglia, ma a noi non interessa. Va tenuto presente che l'emissione acustica del provino dipende da tanti contributi che molto spesso si sovrappongono, quindi, la frequenza di acquisizione e il valore di soglia sono strumenti utili ad isolare i singoli fenomeni soprattutto quando siamo interessati ad uno specifico fenomeno.



Applicazione

Rispetto alle emissioni acustiche 5 di questi provini hanno mostrato **questa** traccia di emissioni acustiche. Il provino 6 pur mostrando lo stesso comportamento in termini di carico ha mostrato una **traccia** in emissioni acustiche diversa.

Questo comportamento differente si è riuscito a spigare solamente andando al microscopio ed andando a vedere a livello microstrutturale alcune linee di scorrimento che non erano presenti negli altri 5



provini. Quindi è una tecnica che può essere proposta per fare il controllo qualità.

Normative di riferimento

- **ISO 12713:1998**, Non-destructive testing – Acoustic emission inspection – Primary calibration of transducers
- **ISO 12714:1999**, Non-destructive testing – Acoustic emission inspection – Secondary calibration of acoustic emission sensors
- **ISO 12716:2001**, Non-destructive testing – Acoustic emission inspection – Vocabulary
- **ISO/TR 13115:2011**, Non-destructive testing – Methods for absolute calibration of acoustic emission transducers by the reciprocity technique

Però va detto che è un campo di ricerca in pieno fermento, nel senso che negli ultimi anni è stato esteso di molto il range di materiali su cui si opera. Prima si operava principalmente su materiali lapidei, poi sui metalli, adesso si lavora moltissimo anche sui compositi. Gli strumenti di analisi diventano sempre più avanzati. Non si bada più soltanto alle macro-features del segnale (quanta energia c'è nel segnale, qual è l'ampiezza, quanto dura il segnale, la frequenza) ma adesso si comincia a lavorare in maniera più avanzata sullo spettro complessivo del segnale, cioè capire quale è effettivamente la forma d'onda, perché acquisire la forma d'onda del segnale vi permette di associare meglio il singolo segnale acustico alla sorgente che lo ha prodotto. Poi si stanno sviluppando metodi di clustering che ci permettono di associare ogni singolo segnale ad altri segnali, creando dei gruppi che ci permettono di dire: ci sono un set di segnali che ci dice che sta avvenendo macro-cracking; c'è un certo numero di segnali che ci dice che si stanno rompendo le fibre e via dicendo.

Triangolazione

Un'ultima cosa che mi era sfuggita. Noi possiamo localizzare la sorgente del segnale, cioè non solo possiamo dire che un fenomeno sta avvenendo ma possiamo anche localizzarlo con una certa accuratezza, non molto alta però. In maniera semplice viene schematizzata così: se io metto due sensori sul materiale che sto analizzando, A e B, ed ad un certo t_0 si ha l'attivazione di un difetto (rottura di una fibra, movimento di una dislocazione), qui si genererà un'onda sonora che viaggerà sia verso A che verso B. Arriverà in A nel tempo $t_A = t_0 + x_A/v$, cioè il tempo iniziale più il tempo per percorrere la lunghezza x_A , dove v è la velocità di propagazione dell'onda all'interno del dato materiale. Analogamente per B avremo che $t_B = t_0 + x_B/v$. Facendo la differenza dei tempi di volo $t_A - t_B$, cioè misurando il ritardo di B rispetto ad A ottengo: $t_A - t_B = (x_A - x_B)/v$. Quindi nota la velocità di propagazione dell'onda acustica nel dato materiale (da letteratura oppure la misuro) posso ricavare $x_A - x_B$. Ora $x_A + x_B$ lo conosco, perché è la distanza tra i due sensori e quindi ho due equazioni che mi permettono di trovare x_A e x_B , cioè mi permette di andare a dire lungo l'asse dove è posizionata la sorgente. Estendendo questo concetto nel piano andando a mettere più sensori, e facendo appunto la triangolazione tra i tre sensori A, B, C riesco a localizzare il difetto. L'accuratezza che si riesce ad avere è di circa 0.5 cm, che non è altissima, però è una buona accuratezza in casi in cui si hanno in esame strutture molto grandi.