

**Definizione di emissioni acustiche:** onde di stress o di pressione generate durante processi dinamici all'interno dei materiali.

Processi dinamici che accadono all'interno del materiale che determina la propagazione di onde di stress all'interno del materiale. Abbiamo incontrato già esempi di emissioni acustiche: pezzo di legno sotto carico (lo scricchiolio), rocce vicino al punto di rottura, scorrimento del terreno ecc.

Il segnale sonoro indica che c'è qualcosa che sta cambiando nel materiale a cui si associa l'onda di stress e che poi noi sentiamo, ad esempio: il gesso spezzato, emissione acustica prodotta dal gesso in conseguenza del transitorio generato dalla propagazione della cricca di rottura.

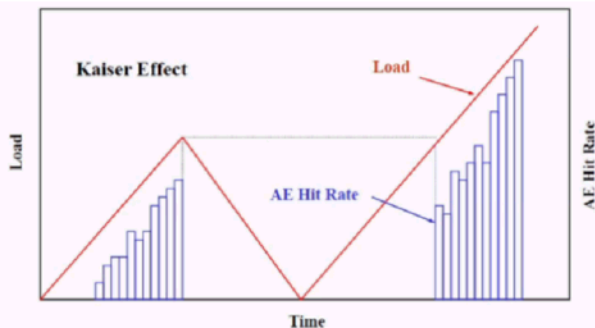
La prima applicazione storica delle emissioni acustiche avviene nell'ambito della sismologia: i terremoti generano onde elastiche che se analizzate consentono di ricavare informazioni sull'energia rilasciata e sulla posizione e profondità dell'evento sismico. La magnitudo viene determinata dall'onda acustica associata dal terremoto, e poi l'epicentro, cioè quale la sorgente dell'onda. E questo si fa utilizzando le cosiddette tecniche di triangolazione cioè io registro il tempo di volo del mio segnale acustico da almeno tre stazioni di osservazione e riesco a determinare la posizione vedendo i ritardi con cui arriva su ciascuna delle tre postazioni.

Storicamente, una delle prime osservazioni acustiche è un fenomeno che i fabbri osservavano e chiamavo il "pianto dello stagno". Quando i fabbri lavoravano lo stagno sentivano un suono molto lamentoso. Fenomeno analogo erano le emissioni osservate durante i trattamenti termici dell'acciaio connessi a trasformazioni martensitiche.

**Come possiamo utilizzare questo fenomeno per trarne delle osservazioni?**

Il nostro punto di riferimento storico, cioè il primo che si è posto questa problematica, fu Josef Kaiser che penso di sistematizzare questo studio. Innanzitutto, lo svincolò dall'elemento di registrazione del suono che fino ad allora era il nostro orecchio, lui realizzò, infatti, una strumentazione di rivelazione del suono. La sua prima idea era cercare di capire quali fossero i materiali che emettevano queste onde di tipo acustico. Cominciò quindi, ad osservare per i vari materiali cosa accadesse, per l'acciaio, per l'alluminio, per il rame, per il piombo, per lo zinco. Gli esperimenti erano molto semplici, sottoponeva un provino a trazione, e osservando il transitorio di deformazione voleva capire se a questo transitorio corrispondeva l'emissione di un'onda acustica. La prima cosa che scoprì era qual che fosse il materiale testato, trovava sempre un'emissione acustica. Questo non era scontato perché altri materiali non emettevano onde sonore che l'orecchio umano era in grado di percepire, ma con la strumentazione lui riuscì a leggere tali emissioni acustiche. Quindi era banalmente un discorso di intensità dell'onda acustica.

Fece, inoltre, un'altra osservazione importante che riguarda l'irreversibilità di questo fenomeno. Se un materiale che viene caricato fino ad un certo livello, poi viene scaricato e poi viene sottoposto ad un secondo livello di carico, non osservo più emissioni acustiche, non si generano più onde sonore nel materiale, che invece c'erano nel primo ciclo, fino a che non supero il livello di stress che ho applicato precedentemente. Ricomincio ad osservare emissioni acustiche se supero il livello di stress che avevo precedentemente avevo applicato. Questo comportamento, questa irreversibilità del fenomeno delle emissioni acustiche, va sotto il nome di *effetto Kaiser*.



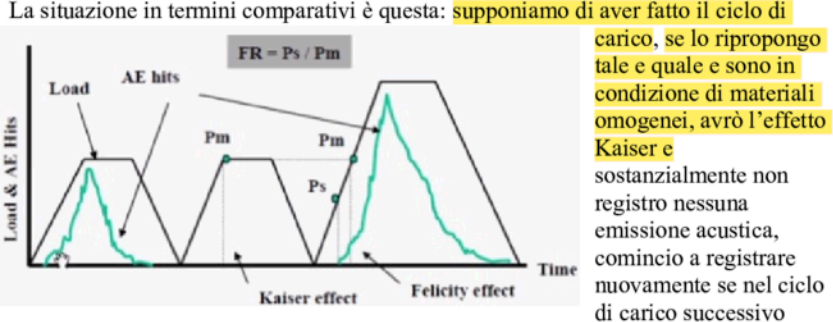
Lo possiamo descrivere in questo modo qui: se prendo il materiale e lo comincio a caricare ad un certo punto vedrò dei segnali di emissioni acustiche. Se riporto a zero, smetto a osservare

emissioni acustiche. Se ricomincio a sollecitare non registro niente finché non porto il carico ad un valore superiore a quello precedentemente applicato.

Questo effetto adesso con il senno di poi possiamo dire che in realtà non è un effetto che si può dire essere vero per tutti i materiale, è evidente quando i materiali hanno una microstruttura omogenea, quindi era veritiero per il set di materiali che Kaiser aveva testato. Per altri materiali, che possono comunque essere analizzati con le emissioni acustiche (compositi, materiali lapidei, cemento) materiali non metallici e non omogenei, si parla, in contrapposizione all'effetto Kaiser, di *effetto Felicity*. Si osserva effetto Kaiser quando in un ciclo successivo di carico per registrare nuovamente emissioni acustiche devo superare il carico massimo applicato precedentemente; si parla, invece, di *effetto Felicity* quando questo non è vero, cioè quando in un ciclo di carico successivo ottengo nuovamente emissioni sonore anche se non supero il carico massimo precedente, ed è tipico di materiali con struttura non omogenea. Si può definire un parametro che si chiama Felicity Ratio (FR) che è il rapporto tra il carico che devo raggiungere nel ciclo  $n+1$ , nel ciclo successivo per ricominciare a osservare emissioni acustiche, rispetto al carico massimo che avevo raggiunto nel ciclo precedente.

$$FR = \frac{\text{carico in corrispondenza del quale compaiono EA nel ciclo } n + 1}{\text{massimo carico raggiunto al ciclo } n}$$

Nel caso delle effetto Kaiser  $FR = 1$ . I materiali non omogenei hanno, invece,  $FR < 1$ .



superò il valore di stress applicato nel ciclo precedente; **se invece sono in presenza di materiali non omogenei comincio a leggere un segnale acustico anche per valori di carico inferiori a quello massimo precedentemente applicato. E anche si può usare questo per capire anche il grado di omogeneità della struttura: tanto più mi allontano dall'effetto Kaiser, tanto più la microstruttura del materiale in esame non sarà omogenea.**

### ***Origine dei fenomeni di emissioni acustiche***

Riguardo l'origine dei fenomeni di emissioni acustiche nei metalli di Kaiser co, la rintracciarono nei fenomeni di scorrimento dei grani cristallini. **Gli studi successivi di Tatro e Schofield dimostrarono, invece, che la fonte primaria di emissioni acustiche era dovuto al moto di dislocazioni che accompagna le deformazioni plastiche.** come conseguenza di questi studi pionieristici la tematica delle emissioni acustiche divenne di grande interesse per scienziati e ingegneri operanti nel campo della ricerca su nuovi materiali, della caratterizzazione dei materiali e delle tecniche non distruttive. **Vi erano comunque fattori che ne limitavano la crescita e la diffusione:** in primi le problematiche legate all'elevatissimo rumore di fondo (la strumentazione era molto sensibile per garantire la lettura), infatti, i laboratori andavano installati in aree isolate, i sistemi di fissaggio opportunamente progettati ed il lavoro andava condotto prevalentemente di notte. Dunegan, Tatro ed Harris proposero una **innovazione**



**frequenze udibili, cioè si chiesero se l'emissione del materiale avesse anche componenti spettrali anche nel campo degli ultrasuoni. Questa fu una scoperta fondamentale dal punto di vista pratico, perché resa questa tecnica applicabile.**

Infatti, vi sono diverse aree di applicazione delle emissioni acustiche:

- Studio delle deformazioni dei materiali
- Studio delle trasformazioni di fase
- Studio delle dislocazioni
- Studio dei materiali compositi
- Studio della meccanica della frattura in provini difettati
- Studio delle deformazioni plastiche (es. in prossimità di una cricca)
- Studio di propagazione di una cricca (infragilimento da idrogeno, stress corrosion, LCF)
- Analisi di integrità strutturale (presenza di difetti, criticità, localizzazione dei difetti, anche nel tempo)

### *Tensioni residue ed emissioni acustiche*

Sin dai primissimi esperimenti nel campo delle emissioni acustiche si è cercato di determinare una qualche correlazione fra lo stato di stress e le emissioni acustiche in corrispondenza di date condizioni fisiche e metallurgiche del metallo stesso. I primi studi, in tal senso vennero condotti su provini in lega di alluminio. Parte di questi provini vennero trattati per indurre uno stato noto di tensioni residue. Gli esperimenti sui provini senza tensioni residue mostrarono grande variabilità in termini di risposta in emissioni acustiche.

Partirono da un'ipotesi molto empirica: che lo stato di tensione residua nel provino determinasse il livello di emissioni acustiche generate da quel provino una volta che tali tensioni fossero liberate, sollecitato a trazione. A seguito degli esperimenti non trovarono ancora correlazione tra i due fenomeni. Quindi cosa influenza l'emissione acustica?

Allora tornarono sull'ipotesi di Kaiser che le emissioni acustiche dipendessero dallo scorrimento dei grani. Venne preparata una serie di specimen di Al puro aventi dimensioni del grano variabile da grani risolvibili al microscopio sino a  $\frac{1}{4}$  inch (monocristallo). Il monocristallo funge da specimen di controllo (idealmente no EA). Ma non registrarono nessuna apprezzabile diminuzione in termini di emissioni acustiche all'aumentare della dimensione del grano. L'idea era che se dipende dallo scorrimento dei grani, più grani ci sono (più e piccola) più emissioni dovrei sentire fino ad arrivare al caso di controllo dove non essendoci grani cristallini, ma un unico cristallo non dovrei leggere proprio nessuna emissione acustica. Solo che innanzitutto non si osservava nessuna diminuzione in termini di emissioni acustiche, ma anche il monocristallo emetteva, quindi, questa ipotesi non giustificava il fenomeno. Era qualcos'altro.

Il concetto successivo, ci si arriva attraverso una serie di concetti successivi, ma a descrizione che abbiamo adesso su che cosa sia in grado di generare le emissioni acustiche è la presenza di difetti attivi all'interno di materiali. Qualche difettosità che sia attiva, che in qualche modo vada incontro ad una qualche modifica, associata ad

un processo dinamico. In presenza di questo difetto noi leggiamo un rate di emissione e un'energia dell'emissione che sono funzione del rate di deformazione, del livello assoluto di stress e del volume di materiale coinvolto.

Abbiamo adesso, rispetto all'epoca, un'idea molto più chiara di cosa si intenda per il termine difetti attivi, cioè che cosa rientra in questa definizione. Quindi pensarono, se ci sono difetti, e questi difetti aumentano ci saranno emissioni acustiche. E in questo senso uno dei primi esperimenti che fecero per provare questa nuova teoria riguardò l'ossidazione dei materiali: lo strato di ossido sul materiale lo posso vedere come un difetto, e il suo avanzamento nel tempo mi garantisce che sia un difetto dinamico. Confrontarono un provino di oro (senza ossidazione) e un provino di alluminio con e senza strato di ossido. Fecero praticamente l'etching del metallo immergendo il campione in una sostanza che andava a rimuovere i prodotti di corrosione ed osservarono una grande attività in termini di emissioni acustiche. Cioè c'era effettivamente un qualche difetto che stava evolvendo, una patina di corrosione che veniva asportata, che stava generando delle emissioni acustiche. Era, quindi, un primo punto a favore di questa teoria. Fu una teoria un po' contestata perché dicevano che non stavano leggendo le emissioni acustiche nel materiale, ma le bolle di aria che si formano all'interno dell'acido che scoppiano generando emissioni acustiche. Allora loro invertirono la polarità, per avere l'etching, quindi non avevano più rimozione dello strato di ossido (gli ioni andavano dall'altra parte del metallo, quindi non avevano più rimozione dello strato di ossido), però avevano comunque la formazione di bolle che non leggevano con il rilevatore, quindi dimostrarono che quello che leggevano non dipendeva dalle bolle di aria che si formavano, ma dall'evoluzione del difetto. Questa si può considerare la prima applicazione delle emissioni acustiche per lo studio della dinamica dei processi di corrosione. Quindi io posso utilizzare dei rilevatori di onde acustiche per capire come si evolvono i processi di corrosione.

Un'altra maniera di inquadrare questo concetto generale di evoluzione dei difetti attivi richiama l'altra ipotesi in campo che le emissioni acustiche fossero legate al movimento delle dislocazioni. Anche la dislocazione può rientrare in questo concetto, perché noi la possiamo vedere come un difetto, che nelle varie fasi di carico del materiale, si propaga all'interno del materiale.

Se noi andiamo a vedere il moto delle dislocazioni nel materiale abbiamo che cominciano ad attivarsi nel primo tratto di carico, dove cominciano a formarsi le





reagire allo stimolo esterno, e poi successivamente continuando ad applicare il carico, il numero di dislocazioni si moltiplica, le bande di Lüders si allargano fino a diventare uniformi su tutto il materiale. È un processo che genera un aumento di temperatura locale del materiale e l'ipotesi era che generasse anche un'emissione di tipo acustico. Cioè che nell'energia totale di deformazione ci fosse una componente elastica ed una componente plastica, e che la componente plastica avesse un canale di dissipazione sia termico che acustico, cioè parte dell'energia veniva trasformata in energia acustica, cioè in onde di stress che si propagano all'interno del materiale. Ora diciamo su questo si può fare tutta un'analisi che trascuriamo.

Questa relazione finale, che in qualche modo è piuttosto intuitiva. La potenza acustica è proporzionale al prodotto tra il tensore di stress e la derivata del tensore di deformazione.

$$dW = \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} / dt$$

La potenza è proporzionale al valore locale di tensione

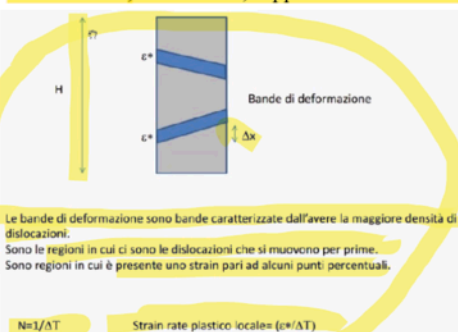
La potenza è proporzionale al flusso delle dislocazioni

Ipotizzando che siano le dislocazioni a generare emissioni acustiche, o meglio che anche le dislocazioni siano una sorgente di emissioni acustiche, allora se calcoliamo l'energia associata al movimento delle dislocazioni, la potenza sarà funzione dello stress e della derivata della deformazione:

$$dW = \sigma_{ij} * \frac{d\epsilon_{ij}}{dt}$$

Quindi Fisher e Lally presero dei cristalli di magnesio (Mg), di rame (Cu), di rame al 7% di alluminio, e li testarono allo stesso livello di stress però con rate di deformazione differente per capire se aumentasse la potenza del segnale acustico che registravano, ed effettivamente ebbero la conferma.

Fecero anche un esperimento di questo tipo qui: supponiamo di avere un monocristallo, di altezza H, supponiamo di deformarlo portandolo al di sopra del



punto di snervamento, abbiamo visto che iniziano a formarsi le bande di deformazione, le bande di Lüders, che sono inizialmente localizzate in determinate regioni del provino. Definiamo  $\Delta t$  l'intervallo di tempo in cui noi registriamo l'intervallo acustico quindi,  $N=1/\Delta t$  è praticamente la frequenza, il rate con cui noi registriamo.

Dopodiché, lo strain rate totale plastico locale, quanto si sta deformando, lo possiamo scrivere come  $\epsilon^*/\Delta t$ , dove  $\epsilon^*$  è la deformazione locale, nelle bande di Lüders, non è la deformazione complessiva, perché abbiamo detto che le dislocazioni sono più reattive e quindi avrò un livello di deformazione differente che chiamo  $\epsilon^*$ .

Lo strain rate totale, invece, cioè quanto si deforma complessivamente il provino per effetto della deformazione localizzata nelle bande di Lüders lo ricavo così:  $\left(\frac{\epsilon^*}{\Delta t}\right) \left(\frac{\Delta x}{H}\right)$  dove  $\Delta x$  è lo spessore delle bande di Lüders.

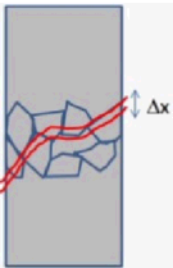
Avendo posto  $N=1/\Delta t$ , allora potrò dire che lo strain rate totale, cioè quanti segnali di onde acustiche leggo al secondo sarà dato da:  $(\epsilon^* * N) \left(\frac{\Delta x}{H}\right)$  cioè è proporzionale allo strain rate che io ho applicato. Questo discorso è strettamente legato a questo:

$dW = \sigma_{ij} * \frac{d\epsilon_{ij}}{dt}$  dove la potenza che io ho applicato è strettamente legata alla strain rate applicato, sto dicendo sostanzialmente la stessa cosa. Il numero di conteggi di emissioni acustiche nel tempo che leggerò è proporzionale allo strain rate plastico totale. Quindi fecero un esperimento banale, andarono ad aumentare lo strain rate e andarono a vedere quanti segnali riuscivano a leggere: ebbero la conferma di quanto appena detto. Se vogliamo andare a confrontare due esperimenti diversi, rispetto al numero di segnali acustici rilevati, ci dobbiamo ricordare di capire qual è lo strain rate con il quale ho ottenuto quel segnale acustico. Non solo c'è anche un'altra considerazione da fare: abbiamo anche che il numero di conteggi al secondo che leggo è proporzionale alla lunghezza del provino. Cioè loro fecero degli esperimenti prendendo, a parità di strain rate, provini di lunghezza differente, e si accorsero che più aumentavano la lunghezza del provino, più aumentava il numero di emissioni acustiche. Era quindi una conferma ulteriore che il modello che avevano ottenuto dei segnali acustici generato dalle dislocazioni aveva le sue fondamenta. Quindi anche in questo caso confrontando due provini di differente lunghezza, a parità delle altre condizioni, ci aspettiamo di avere un numero di segnali acustici rilevati diverso. C'è da notare che non c'è una dipendenza dalla sezione. Se aumenta la sezione del provino non cambia nulla, e anche questo fu sperimentalmente dimostrato. Quindi la sezione non va normalizzata, la lunghezza sì.

Vi sottolineo che questa descrizione del fenomeno è una descrizione che riguarda i monocristalli, finché parliamo di monocristalli valgono i concetti appena detti.

Noto come si comporta il materiale monocristallino possiamo piuttosto semplicemente estendere questi concetti ad un materiale policristallino.

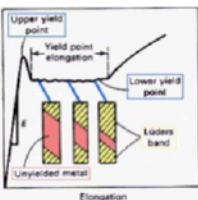
Allora si tratta in qualche modo di andare ad immaginare che per ciascuno di questi grani cristallini, ci sia internamente uno sviluppo delle bande di Lüders, cioè la concentrazione di alcune bande a più alta deformazione, su cui applicare i concetti che abbiamo appena visto.



Per quanto riguarda lo strain rate scorporato, è esattamente quello che abbiamo già detto: se  $\varepsilon^*$  è lo strain locale moltiplichiamo per  $\Delta x$  e dividiamo per  $H$ , quindi  $\varepsilon^* \left( \frac{\Delta x}{H} \right)$ , contributo di  $G$  grani che si deformano in  $\Delta t$ . Dopodiché, dal punto di vista del rate di conteggi, se nel tempo  $\Delta t$  leggevamo un conteggio, un segnale di emissione acustiche, adesso, ciascuno dei grani contribuisce ad emettere un segnale acustico. Quindi nello stesso tempo  $\Delta t$  in cui il monocristallo generava un segnale, il materiale policristallino genererà  $G$  segnali, dove  $G$  è il numero di grani cristallini. Stesso discorso di prima lo strain rate totale è  $\left( \frac{\varepsilon^*}{\Delta t} \right) \left( \frac{\Delta x}{H} \right)$ , che il funzione di  $N=G/\Delta t$  si può anche scrivere  $\varepsilon^* \left( \frac{N}{G} \right) \left( \frac{\Delta x}{H} \right)$ . Ora se denotiamo con  $D$  il diametro del grano e con  $A$  la sezione del provino possiamo dire che  $G=A/D^2$  allora lo strain rate sarà:  $\varepsilon^* \left( \frac{N}{A} * D^2 \right) \left( \frac{\Delta x}{H} \right)$ .

Il rate di conteggi, a parità di strain rate e di dimensioni del grano è proporzionale al volume, al contrario del monocristallo, cioè aumentando la sezione varia anche lo strain rate totale. Il rate di conteggi, a parità di strain rate e volume decresce all'aumentare del diametro del grano. La traccia di emissioni acustiche associata al movimento delle dislocazioni ha una dipendenza complessa dipendendo da molti fattori, tra cui il valore di stress a cui noi portiamo il materiale, dalla dimensione del grano, dalle caratteristiche del provino. Quindi possiamo dare per consolidato il fatto che le dislocazioni siano un importante fonte delle emissioni acustiche.

Un'altra osservazione che fecero sempre Fisher e Lally fu: una volta che tu hai plasticizzato un materiale puoi anche romperlo. E loro si accorsero che poco prima della rottura l'aumento dei conteggi, la rilevazione delle emissioni acustiche, cresceva moltissimo, cosa che la legge formulata non prevedeva. Loro si accorsero che c'era una sorta di deviazione rispetto al comportamento classico, perché prima della rottura vedevano schizzare il livello delle emissioni acustiche. In un certo senso questo rientrava nel quadro generale, in cui però si era cominciato a guardare ai fenomeni delle emissioni acustiche, e non un singolo fenomeno, ma ad una categoria generale di fenomeni legati ai difetti attivi; quindi, in questo caso, alla generazione delle cricche e alla loro propagazione. La cricca in questo caso come difetto, che nel suo propagarsi è quindi un difetto attivo, e che dunque sostanzialmente genera questo tipo di aumento nelle emissioni acustiche. Potremmo dire che è collegato alle dislocazioni, perché l'accumulo delle dislocazioni genera la deformazione di una cricca. Possiamo dire che è un fenomeno che in qualche modo sta concettualmente all'opposto rispetto al comportamento visto prima:



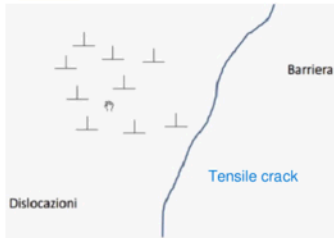
questo era un comportane omogeneo, nel senso che le dislocazioni si muovono nel senso di rendere omogena la deformazione. Cioè, è vero che la deformazione è concentrata nelle bande, ma con il procedere la tendenza è quella di far sì che il provino abbia una deformazione uniforme.



Le cricche a trazione/tensile (modo I) sono cricche in apertura in cui la sollecitazione normale agisce perpendicolarmente al piano della cricca; le cricche di taglio/shear si formano a causa della sollecitazione di taglio che agisce parallelamente al piano della cricca  
Materiali morbidi duttili sono soggetti a tensile crack; materiali fragili e duri a shear crack

Quando, invece, ho delle cricche è come se avessi una deformazione disomogenea, cioè una deformazione che non tende a distribuirsi su tutto il provino.

Quando si muove una dislocazione, quindi, che cosa accade? La dislocazione tende ad omogeneizzare la deformazione o si muove nella direzione di impilarsi con altre dislocazioni andando a generare la cricca? Questo dipende dalla microplasticità del materiale.



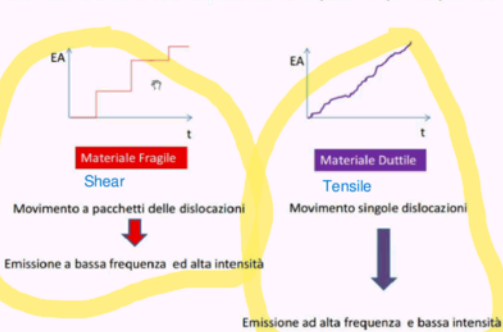
Se ho delle dislocazione e il materiale è tenero, la tendenza è una distribuzione omogenea delle dislocazioni, cioè tendono a distribuirsi nella maniera più omogenea possibile. In un materiale tenero le dislocazioni sono in grado di passare da un piano di scorrimento all'altro.

Viceversa, un altro comportamento è legato a materiali duri, è più legato alla tendenza di impilarsi delle dislocazioni che costituiscono così il nucleo iniziale per lo sviluppo della cricca. In materiali duri (es. metalli, ceramiche) il movimento delle dislocazioni avviene lungo piani di scorrimento e genera accumulo delle stesse in prossimità di una barriera, che dopo un po' superano la barriera e liberano energia, cioè spiega il modo in cui emetto onde sonore.



Questa osservazione è interessante perché a queste due tendenze delle dislocazioni corrispondono due tracce di emissioni acustiche differenti. Un materiale duttile, in cui

Come si manifestano in termini di emissioni acustiche questi due tipi di comportamento



le dislocazioni tendono a muoversi più o meno liberamente lungo il materiale, troviamo una evoluzione delle emissioni acustiche man mano che carico il materiale, come in figura. Le emissioni acustiche crescono in maniera grossomodo lineare. Nel caso di materiale fragile, la traccia dovuta alle dislocazioni "a salti".

Questa è sostanzialmente la differenza, che è fondamentale per uno studio applicativo. Cioè io posso studiare i fenomeni di infragilimento, ad esempio da idrogeno, applicando questo concetto, cioè vedendo come evolve la traccia delle emissioni acustiche da un comportamento tipico di materiale duttile ad uno fragile.

Quindi, quando la cricca si propaga si osserva un brusco aumento delle emissioni acustiche, che è un segnale molto importante perché è un segnale di allerta della failure del materiale, un preludio della rottura del materiale.

### Set up sperimentale per la rilevazione delle emissioni acustiche

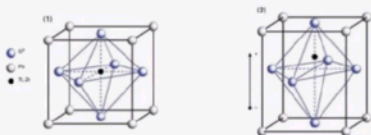
I componenti fondamentali per un set up sperimentale per la rilevazione delle emissioni acustiche sono:

- **Trasduttore:** questo è sostanzialmente lo strumento che rileva il segnale acustico, è un trasduttore elettronico che rileva l'onda sonora e la deve trasformare in un segnale elettrico
- **Sistema di carico:** questo è necessario perché noi abbiamo bisogno di un difetto attivo, cioè un materiale statico senza evoluzioni non emette nulla, quindi c'è bisogno di sollecitarlo in modo da attivare i difetti. Può essere, nella stragrande maggioranza dei casi un sistema meccanico, può essere una camera salina, per monitorare la corrosione, può essere anche un sistema in uso, cioè è un approccio che può essere utilizzato su strutture civili, ponti ad esempio, oppure chiese antiche, ci deve essere un qualche carico, magari anche dovuto al funzionamento steso della struttura, che applica una sollecitazione sulla struttura stessa e attiva le dislocazioni.
- **Elettronica per amplificazione e processing del segnale:** il segnale elettrico del trasduttore ha bisogno di essere amplificato (poi capiamo perché), e poi filtrato e processato.
- **Dispositivo di raccolta dati:** un computer.
- **Display**

### Il trasduttore

I trasduttori più comunemente utilizzati in esperimenti di EA sono i trasduttori piezoelettrici

L'elemento piezoelettrico più diffuso in questo genere di sensori è lo zirconato-titanato di Pb spesso denominato semplicemente PZT o PZT-5



Reticolo cubico simmetrico  
(al di sopra della temperatura di Curie)

Reticolo cubico distorto  
(al di sotto della temperatura di Curie)



Domini Elettrici

Un cristallo piezoelettrico è un cristallo con un reticolo cubico simmetrico (figura a sinistra), che però può, mediante l'applicazione di un forte campo elettrico esterno, arrivare ad avere un struttura distorta (figura a destra).