



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 2011A -

ANNO: 2016

A P P U N T I

STUDENTE: Marianna Bastianelli

MATERIA: Scienza e Tecnologia dei Materiali + Mappe

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

INTRODUZIONE

Lez. 1A – 1B

(Ashby) Cap. 1 – 2 – 3

Un materiale è un solido in grado di svolgere almeno una determinata funzione (meccanica, termica, ottica, magnetica, elettrica, ecc).

Lo studio dei materiali consente di ottenere delle linee guida per effettuare la scelta più appropriata in ogni caso specifico, in base alle sue proprietà:

- Meccaniche
- Fisiche
- Termiche
- Elettriche
- Magnetiche
- Ottiche
- Chimiche

Classificazione dei materiali

La prima classificazione necessaria risulta essere la differenziazione fra **materiali naturali** (di origine geologica come pietre, rocce, argille, ... o di origine chimica come cellulosa, caucciù, carbone, ...) e **materiali sintetici** (ottenuti per trattamento).



È possibile suddividere i materiali in base alle caratteristiche che presentano. Questa suddivisione è rappresentata nella figura a destra e verrà approfondita a breve.

Le proprietà finali di un materiale vengono influenzate anche dal percorso produttivo di formatura adottate nel processo di produzione.

A seconda del procedimento di fabbricazione usato, le proprietà del materiale possono variare, esercitando un'influenza diretta sul rendimento, sull'affidabilità e sulla durata del prodotto.

- Isolanti termici ed elettrici
- Generalmente altofondenti (T_f allumina = 2054°C ; T_f zirconia = 2680°C ; T_f silice = 1710°C)
- Resistono bene alle alte temperature (caratteristica chiamate refrattarietà, ovvero la capacità di mantenere inalterate caratteristiche chimiche fisiche e meccaniche anche se esposti per lungo tempo ad alte temperature)
- Resistono bene agli ambienti aggressivi (inerzia chimica)
- Possono presentare elevate caratteristiche meccaniche e elevata durezza
- Sono fragili, ovvero si rompono dopo essersi deformati solo in modo reversibile (deformazioni elastiche)
- Formatura prevalentemente da polveri (da fuso solo per i vetri)

- **Polimeri**

Materiali organici costituiti da lunghe catene molecolari (macromolecole) nelle quali uno o più gruppi (detti monomeri) si ripetono concatenandosi.

Molti polimeri sono costituiti unicamente da carbonio ed idrogeno, mentre altri contengono anche ossigeno e/o azoto e/o fluoro.

I polimeri sono caratterizzati a livello atomico da legami forti intra-catena (covalenti) e da legami inter-catena, prevalentemente deboli interazioni di Van der Waals (dipolo indotto – dipolo indotto, dipolo – dipolo e legami idrogeno)

Le proprietà dei polimeri sono molto variabili da famiglia a famiglia:

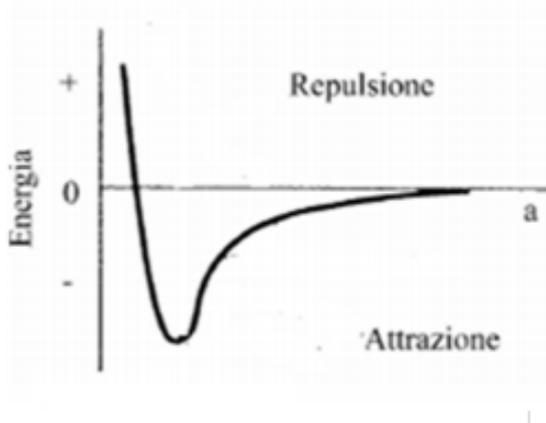
- Termoplastici (TP) sono duttili (deformazione plastica, irreversibile, anche estesa prima di rompersi)
- Termoindurenti (TI) sono fragili (deformazione elastica, reversibile)
- Elastomeri, presentano una estesissima deformazione elastica prima di rottura

I polimeri presentano anche delle caratteristiche comuni, quali:

- Bassa densità
- Facile deformazione
- Bassa resistenza meccanica
- Bassa temperatura di decomposizione e di rammollimento
- Alta reattività chimica
- Riciclabilità a fine vita (TP)

I compositi vengono principalmente suddivisi in:

- Ceramic Matrix Composite: CMC
- Metal Matrix Composite: MMC
- Polymer Matrix Composite: PMC
- GFRP: Glass-Fiber-Reinforced Polymer
- CFRP: Carbon-Fiber-Reinforced Polymer
- Fibre: Carbonio, Vetro, Aramidiche (Kevlar®)



A distanza infinita l'interazione è nulla. Al diminuire della distanza a tra gli atomi iniziano a manifestarsi forze attrattive o repulsive.

Avvicinandosi gli atomi si attraggono e l'energia diminuisce mentre a (la distanza fra di essi) diminuisce.

A partire da una certa distanza, avvicinandosi gli atomi si respingono e l'energia cresce mentre a diminuisce.

La curva di Condon-Morse si ottiene per integrazione della curva della forza che si esercita tra due atomi interagenti.

a_0 rappresenta la condizione di equilibrio dinamico ed è definita distanza di legame.

Al punto a_0 corrisponde l'energia E_0 definita energia di legame.

Se voglio rompere un legame dovrò portare i due atomi all'infinito e fornire un quantitativo di energia pari a E_0 .

Elevati valori di E_0 , in valore assoluto, indicano dunque resistenze del materiale elevate.

$$E_0 \text{ covalente (ceramici)} > E_0 \text{ metallico} \gg E_0 \text{ Van der Waals (polimeri)}$$

NB: Le curve di Condon-Morse rappresentano solo trasformazioni **reversibili** perché se l'energia esterna viene a cessare, l'energia che tiene uniti i due atomi li richiama nelle rispettive posizioni di partenza. Pertanto, esse giustificano solamente la deformazione elastica.

Legami

- **Il legame metallico** consiste nella presenza ioni metallici avvolti in una nube di elettroni delocalizzati. Gli elettroni sono liberi di muoversi, determinando le ottime qualità di conduttori sia elettrici che termici dei metalli.
Non c'è direzione preferenziale di legame ed il legame è energeticamente forte.
Il legame metallico determina le seguenti proprietà:
 - Energia di legame medio alta
 - Resistenza a rottura medio alta
 - Temperatura di fusione medio alta
 - λ bassa
- **Il legame covalente**, tipico dei ceramici, è caratterizzato da atomi legati mettendo in condivisione gli elettroni sugli orbitali più esterni.
A differenza del legame metallico non ci sono elettroni liberi ed esiste una direzione preferenziale, che determina la fragilità del materiale.
Il legame è energeticamente molto forte.
Il legame covalente fornisce ai ceramici le seguenti proprietà:
 - Energia di legame alta
 - Resistenza a rottura alta
 - Temperatura di fusione alta
 - λ molto bassa
- **Legami secondari** caratterizzano i polimeri. I legami esistenti internamente alla catena sono forti (covalenti) ma i legami esistenti tra le catene sono essenzialmente deboli.
Non ci sono elettroni liberi, sono quindi isolanti.
Il legame è condizionato dalla posizione reciproca delle catene e l'agitazione termica influenza molto le caratteristiche del materiale in cui è presente tale legame.
Questo tipo di legame energeticamente debole va a conferire le seguenti proprietà:
 - Energia di legame bassa
 - Resistenza a rottura bassa
 - Temperatura di fusione bassa
 - λ alta

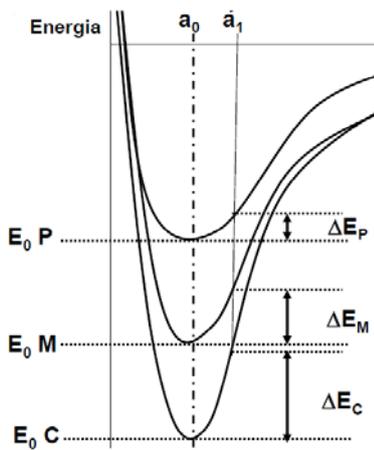
Deformazioni

Si ha una deformazione **elastica** quando è reversibile, ovvero la deformazione cessa al cessare dello stress esterno che la genera.

Si ha una deformazione **plastica** quando è irreversibile, ovvero al cessare dello stress la deformazione rimane, e si ha una deformazione residua.

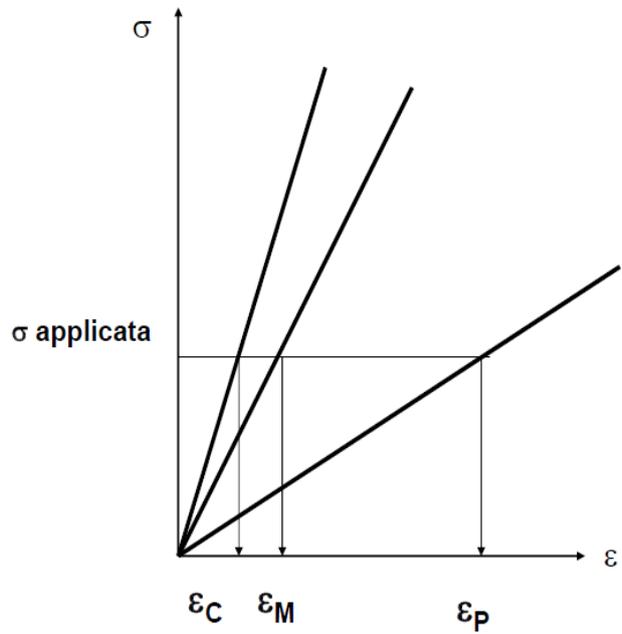
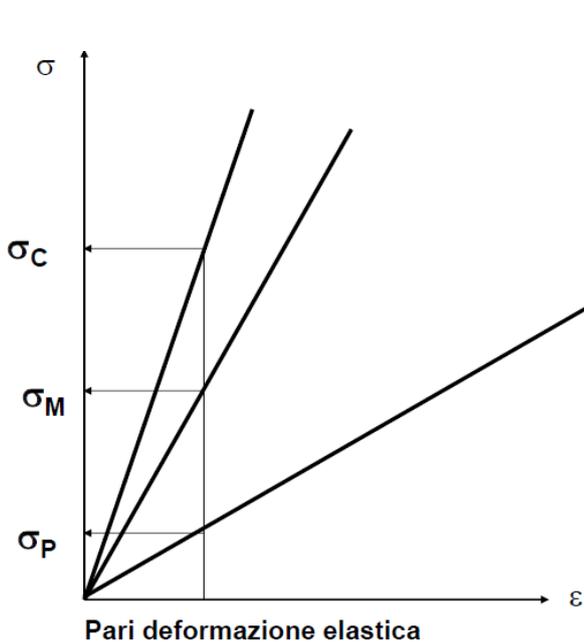
La capacità di reagire agli stress esterni deformandosi dipende anche dall'energia di legame e quindi anche dal tipo di legame.

cioè il materiale riacquista dimensioni e forma di partenza quando la sollecitazione viene rimossa.



Essendo una conseguenza del tipo di legame, per avere una stessa deformazione elastica dovrò imporre sollecitazioni minori ad un materiale polimerico che presenta un'energia di legame bassa, medie ad un materiale metallico che presenta un'energia di legame media, e alte ad un materiale ceramico che presenta un'elevata energia di legame.

A livello microscopico, chiamando la rigidezza di legame S e la distanza di legame a_0 otteniamo il modulo di Young mediante il rapporto $E = \frac{S}{a_0}$



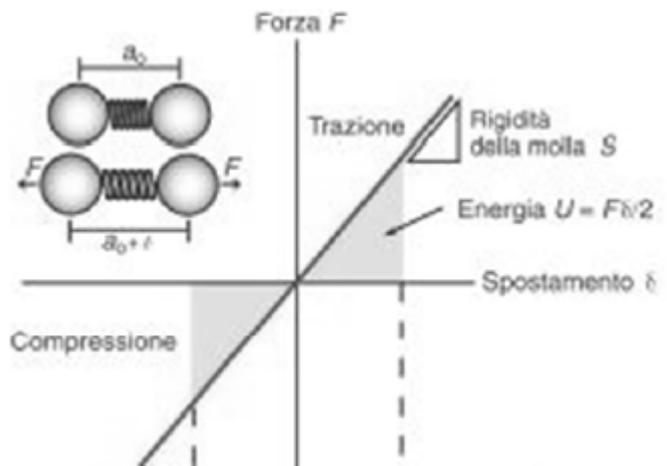
Per quanto riguarda le sollecitazioni uniassiali distinguiamo due casi:

- Trazione uniassiale

Sollecitazione $\sigma = \frac{F}{A}$
 Deformazione $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$
 $\Delta L = L - L_0 (>0)$

- Compressione uniassiale

Sollecitazione $\sigma = -\frac{F}{A}$
 Deformazione $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$
 $\Delta L = L - L_0 (<0)$



Curve sforzo-deformazione e costanti elastiche

Il tratto iniziale fino al limite elastico σ_{el} è all'incirca lineare (Seguendo la legge di Hooke) ed è elastico, nel senso che la deformazione è reversibile, quindi torna alla sua forma originale quando la deformazione è reversibile.

Gli sforzi superiori al limite elastico inducono una **deformazione permanente** (comportamento plastico) oppure frattura fragile.

Nell'ambito del regime elastico lineare, come detto in precedenza valgono:

$$\begin{aligned} \sigma &= E\epsilon \\ \tau &= G\gamma \\ P &= K\Delta \end{aligned}$$

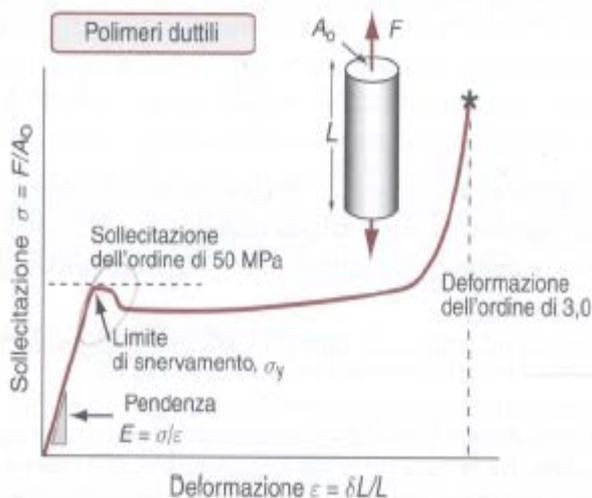
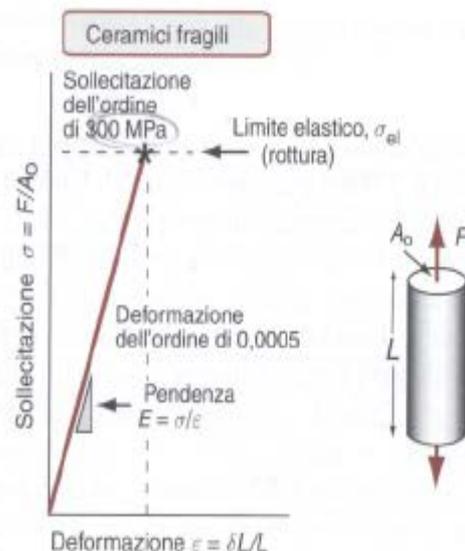
Con E, G e K costanti elastiche misurate in N/m² o Pa.

Il modulo di young E, il modulo di taglio G e il modulo di elasticità cubica K, sono tra loro connessi, ma per collegarli reciprocamente ci serve un'altra quantità, il coefficiente di Poisson.

Quando allungato lungo una certa direzione, l'elemento da noi considerato, in genere, si accorcia nelle altre due direzioni. **Il rapporto di Poisson ν** è l'opposto del rapporto tra la deformazione laterale o trasversale ϵ_t e quella assiale ϵ .

$$\nu = - \frac{\text{Deformazione trasversale } \epsilon_t}{\text{Deformazione longitudinale } \epsilon}$$

Si mette il segno negativo davanti al rapporto perché, essendo un rapporto fra una deformazione dovuta a una trazione ed una dovuta ad una compressione, hanno il segno discorde. Quindi, volendo il modulo di Poisson con segno positivo, mettendo il segno meno davanti al rapporto risolvo il problema.



Solidi cristallini ei solidi amorfi

La densità è principalmente definita dal peso atomico ed è influenzata, in misura inferiore, dalla dimensione atomica e dal modo in cui gli atomi si impaccano.

- I **metalli** presentano una densità elevata perché sono fatti di atomi pesanti che si impaccano facilmente.
- I **ceramici** presentano basse densità rispetto ai metalli in quanto contengono atomi più leggeri.
- I **polimeri** hanno invece una densità bassa perché costituiti da atomi leggeri e organizzati in impaccamenti con bassa densità.

È difficile ottenere materiali con bassa densità, considerando che anche il materiale con un basso peso atomico e una struttura cristallina molto aperta raggiunge densità non di molto inferiori a quella dell'acqua. Per avere bassissime densità risulta quindi necessario ricorrere a **schiume**, materiali con una struttura a celle, che presentano numerosi spazi vuoti.

Le strutture atomiche sono compatte, non solo nel piano, ma anche nelle tre dimensioni spaziali.

Alcuni materiali hanno una struttura atomica disposta ordinatamente secondo strutture che si ripetono. Vengono chiamati **materiali cristallini**.

Altri materiali invece sviluppano tali disposizioni senza ripetersi. Vengono chiamati **materiali amorfi**.

Si chiamano, invece, **monocristalli**, quei materiali che come il quarzo si sviluppano lungo tutta la struttura come un unico cristallo.

Le celle elementari

Esistono sette geometrie diverse di disposizione dei cristalli, dette sistemi cristallini

1. Cubico
2. Tetragonale
3. Ortorombico
4. Romboedrico
5. Esagonale
6. Monoclinico
7. Triclinico

Sistema	Parametri reticolari	Geometria
Cubico	$a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	
Tetragonale	$a=b \neq c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	
Ortorombico	$a \neq b \neq c$ $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	
Romboedrico	$a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$	
Esagonale	$a=b \neq c$ $\alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$	
Monoclinico	$a \neq b \neq c$ $\alpha=\gamma=90^\circ \neq \beta$	
Triclinico	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

Allotropia e polimorfismo

I reticoli cristallini dei materiali possono presentare una diversa struttura a seconda delle temperature a cui ci si trova.

Si deve però distinguere fra:

- **Passaggi di stato**, dove la sostanza cambia stato, ad esempio passa da liquido a solido.
- **Passaggi di fase**, dove si passa da una struttura reticolare ad un'altra con un uguale stato compositivo (solido, liquido o gassoso)

Per calcolare il volume occupato e quindi il volume interstiziale si introduce del liquido o gas nel materiale e si calcola per sottrazione il volume occupato.

Densità ρ

La densità di un materiale dipende, come accennato in precedenza, dal peso atomico e dal FIA.

- I **metalli** presentano pesi atomici e FIA elevati, dovuti a non aver vincoli geometrici precisi da rispettare. Ciò comporta una densità elevata.
- I **ceramici** presentano pesi atomici e FIA bassi, dovuti ai vincoli come angoli di legame e rapporti stechiometrici. Ciò comporta una densità più bassa rispetto ai metalli.
- I **polimeri** presentano pesi atomici bassi e non ha senso parlare di fattore di impaccamento atomico, perché essendo strutturati in catene non hanno una distribuzione strutturata.

Proprietà intrinseche ed estrinseche

Le proprietà **intrinseche** dei materiali dipendono dalle proprietà atomiche e pertanto sono difficilmente modificabili. (Ad esempio, la densità e il modulo elastico sono proprietà intrinseche).

Le proprietà **estrinseche** invece sono più controllabili perché dipendono dalle microstrutture.

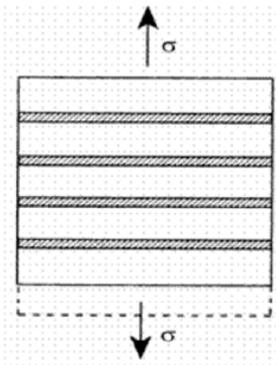
Come modifico la densità e il modulo elastico?

In alcuni casi risulta necessario modificare anche alcune proprietà intrinseche, è difficile ma non impossibile.

È possibile modificare la densità inserendo dei vuoti nelle strutture. Questo di conseguenza può anche diminuire il modulo elastico, perché le sollecitazioni agiscono su una minore area.

- Per creare dei vuoti nei polimeri si inseriscono sostanze idrosolubili o che si trasformano in gas, in modo da poter modificare la struttura ma poi essere facilmente eliminate.

- Trazione in direzione **perpendicolare alle fibre**



La σ subita da matrice e fibre in queste condizioni è identica. Siamo nel caso di isosollecitazione.

$$\epsilon_{composito} = f_f \epsilon_f + (1 - f_f) \epsilon_m$$

$$\epsilon_{composito} = \frac{f_f \sigma}{E_f} + \frac{(1 - f_f) \sigma}{E_m}$$

$$E_{composito} = \frac{\sigma}{\epsilon_{composito}} = \frac{1}{\frac{f_f}{E_f} + \frac{1 - f_f}{E_m}}$$

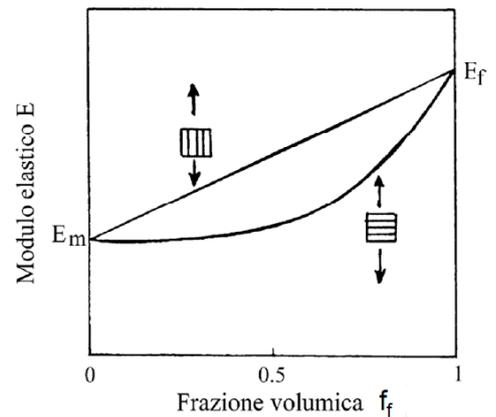
In questo caso si segue la regola della miscela inversa.

Questo grafico ci aiuta a capire quante fibre usare per aumentare il modulo elastico.

Nel caso di forza parallela alle fibre si ha un aumento di E proporzionale all'aggiunta di fibre.

Nel caso di forza perpendicolare alle fibre, fino ad un valore di frazione volumica delle fibre pari a 0,5 vanno a modificare pochissimo il modulo elastico.

I compositi a fibre lunghe e allineate sono materiali anisotropi. Per ovviare a questo problema, spesso si sovrappongono lamine con fibre non parallele, in modo da rafforzare la struttura.



Proprietà specifiche

A seconda di cosa vogliamo dal materiale, può risultare utile considerare una proprietà in rapporto con la densità del materiale.

$$\text{Proprietà specifica} = \frac{\text{valore assoluto della proprietà}}{\text{densità}}$$

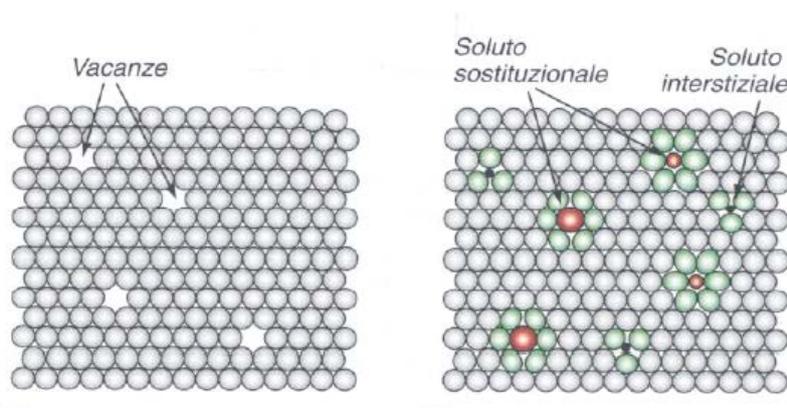
Le mappe di Ashby aiutano a restringere il campo di ricerca in base a ciò che vogliamo

Difetti puntuali

Difetti adimensionali o puntuali, possono essere vacanze, lacune o difetti interstiziali, dove risulta presente una mancanza (vacanza) o un'aggiunta di atomi negli interstizi (difetto interstiziale).

Nel caso delle **vacanze**, a causa della mancanza di uno o più atomi si ha una contrazione del reticolo a causa dell'attrazione tra gli atomi circostanti il vuoto.

Nel caso di **difetti interstiziali** invece, a causa dell'aggiunta di nuovi atomi (generalmente di natura diversa da quelli presenti già nel reticolo) si ha una dilatazione del reticolo. Più precisamente si inseriscono atomi di soluto in quelli di solvente.



I difetti puntuali hanno come conseguenza la possibilità di creare leghe e la diffusione allo stato solido, di cui parleremo in seguito.

Soluzioni solide sostituzionali

Una soluzione solida sostituzionale si ha quando un atomo diverso dagli atomi del solvente va ad occupare una posizione reticolare, sostituendo un atomo del reticolo.

Si possono distinguere tre casi:

- Il raggio atomico dell'atomo sostituito è simile al raggio atomico dell'atomo che viene sostituito, questo permette di avere variazioni nella struttura del reticolo molto piccole.
- Il raggio atomico dell'atomo sostituito è maggiore del raggio atomico dell'atomo sostituito, questo comporta uno spostamento degli atomi circostanti creando uno stato di deformazione locale attorno al difetto, seguita da compressione dei legami degli atomi delle cinture adiacenti
- Il raggio atomico dell'atomo sostituito è minore del raggio atomico dell'atomo sostituito, questo comporta una compressione dei legami seguita da trazione degli atomi legati alle cinture adiacenti.

Nel caso di solido ionico bisogna tenere conto, nella fase di sostituzione, in quale tipologia di vacanza questa avviene, cioè se sostituisco uno ione positivo o uno negativo. Infatti deve essere rispettata la neutralità della molecola.

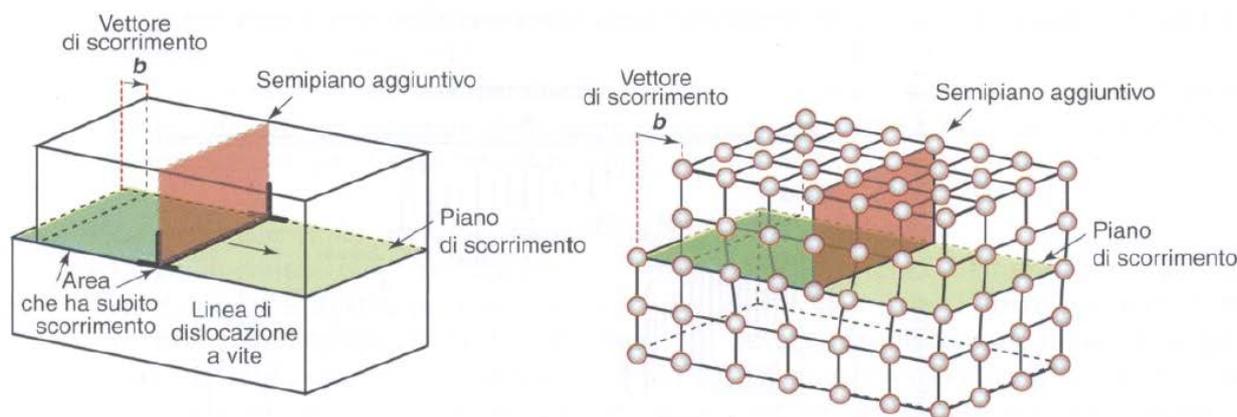
La diffusività cambia valore in base al reticolo cristallino (diffusività di un reticolo CCC è diversa da quella di un reticolo CFC)

La diffusività non va confusa con la solubilità, infatti la seconda indica la quantità di atomi di un elemento posso disciogliere in un altro.

Riprendendo l'esempio sopra, volendo inserire degli atomi di carbonio in una struttura cristallina del ferro, in una cella CCC ho più spazio (FIA minore 68%) in cui un atomo di carbonio può inserirsi, rispetto una CFC (FIA maggiore 74%). L'atomo di carbonio ha però un raggio atomico maggiore dello spazio disponibile nel reticolo, questo quindi va a stringere di molto i restanti interstizi, e in questo modo viene limitato l'inserimento di nuovi atomi di carbonio. Essendo il CFC più compatto, permette solo ad un basso numero di atomi di carbonio di penetrare nella struttura cristallina, non avendo quindi una grande variazione di spazio disponibile. Questo spiega perché, nonostante il CCC abbia un fattore di impaccamento atomico inferiore a quello del CFC, risulti comunque meno solubile.

Difetti di linea

Per difetto di linea si intende lo spostamento rispetto ad un piano di scorrimento di atomi. Avvenendo tale spostamento non si ha una traslazione di entrambi gli estremi ma solo di uno dei due. A causa di ciò viene a formarsi un semipiano aggiuntivo. Il vettore di scorrimento di Burgers \vec{b} indica la direzione e l'entità di tale spostamento.



Si possono avere due tipi di dislocazione:

- A **spigolo**, con lo scorrimento perpendicolare al piano aggiuntivo
- A **vite**, con lo scorrimento parallelo al piano aggiuntivo

È possibile però avere anche una dislocazione mista.

Per far muovere le dislocazioni c'è bisogno di una sollecitazione meccanica. Lo spostamento della dislocazione ha come effetto macroscopico la duttilità. La duttilità è una caratteristica dei metalli perché dipende dall'adirezionalità del legame metallico che non va ad interferire con il movimento delle dislocazioni.

- **Precipitati**

Si creano nel caso di soluzioni solide con miscibilità parziale. I precipitati infatti sono semplicemente eccessi di soluto.

I bordi di grano sono posti ideali per i precipitati, infatti se essi sono troppo grandi per penetrare nel reticolo senza creare tensioni troppo elevate, vengono confinati nei bordi di grano.

e sull'asse delle ordinate avremo le temperature dei due componenti (un componente sulla destra e uno sulla sinistra).

Possiamo distinguere tre casi:

1. Totale miscibilità allo stato solido e allo stato liquido.
2. Totale miscibilità allo stato liquido e completa immiscibilità allo stato solido.
3. Totale miscibilità allo stato liquido e parziale miscibilità allo stato solido.

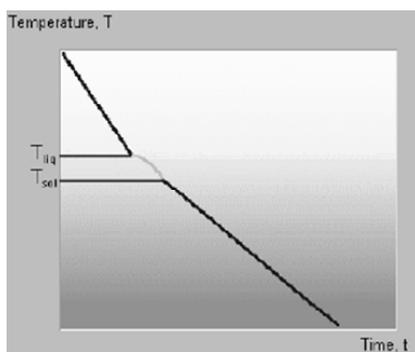
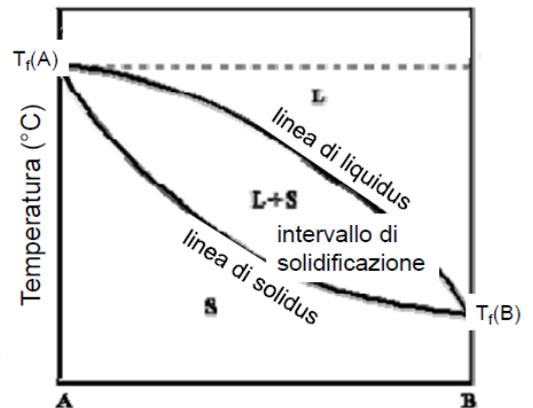
Andiamo ad analizzare i tre casi singolarmente.

Totale miscibilità allo stato solido e allo stato liquido

Partendo dall'alto, troviamo prima la linea di liquidus, condizione di temperatura in cui il sistema inizia a solidificare (temperatura di formazione del primo granello solido).

Sotto la linea di liquidus avremo un intervallo di solidificazione in cui coesisteranno liquido e solido in diverse percentuali a seconda della temperatura.

Scendendo ancora troviamo la linea di solidus, condizione di temperatura in cui il sistema diventa completamente solido (temperatura di formazione dell'ultimo granello di solido).



Nel caso di sistema puro, la temperatura di passaggio di stato tra liquido a solido rimane costante. Nel caso invece in cui si ha una concentrazione inferiore al 100% quindi con presenza di più componenti, la temperatura inizia a diminuire fino a raggiungere la linea di solidus, con una pendenza diversa rispetto all'andamento fino al passaggio di stato. Infine, terminato il passaggio di stato, avremo una pendenza della temperatura ancora diversa dalle due precedenti.

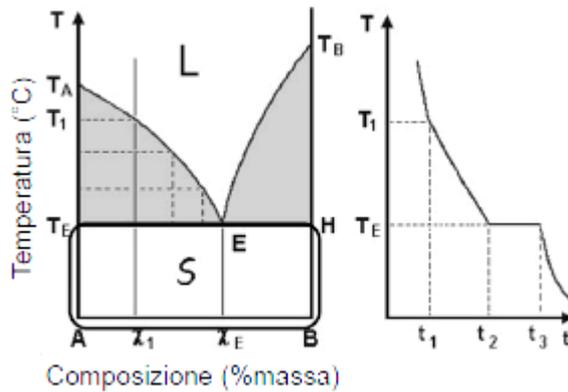
Esaminiamo il comportamento al raffreddamento.

Si ha una situazione iniziale definita come C_0 caratterizzata dalla percentuale di miscela del componente e dalla temperatura.

Totale miscibilità allo stato liquido e completa immiscibilità allo stato solido

Un punto notevole in questo grafico è il punto E, il punto dove avviene la trasformazione eutettica, ovvero si passa dalla fase liquida a completa miscibilità alla fase solida a completa immiscibilità. In questo punto sono presenti tre fasi, la fase liquida A+B e le fasi solide A e B separate.

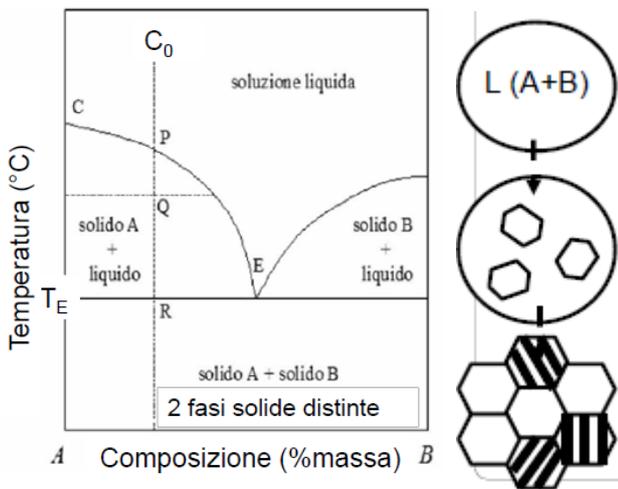
La struttura del solido che si forma solo nel punto eutettico, è lamellare. Saranno presenti lamelle di A puro alternate a lamelle di B puro.



La temperatura eutettica T_E presente nel grafico è considerata come la linea di solidus, perché al di sotto di T_E non ho più alcun liquido.

Se non avviene il raffreddamento passando dal punto E la struttura del solido sarà diversa.

Analizziamo il comportamento al raffreddamento non passante per il punto E.



All'inizio avremo una soluzione liquida di A e B, e raffreddando, il primo solido che si forma è composto da A puro (Primario). Il liquido continuerà ad impoverirsi di A fino a raggiungere T_E .

Quando raggiungiamo la temperatura eutettica, il liquido rimanente subirà una trasformazione eutettica (isoterma a T_E), quindi si depositerà in lamelle. Otterremo una struttura composta dal solido A + il solido B lamellare.

Se si attraversa la zona SolidoB+Liquido, il processo sarà identico ma invertito (solido B + solido A lamellare).

Totale miscibilità allo stato liquido e parziale miscibilità allo stato solido

Come per la miscibilità totale avremo linee di solidus e di liquidus. In questo caso però, a seconda delle condizioni di C_0 avremo la formazione dolo di un solido, solo dell'altro o la miscela dei due.

(Di seguito vengono spiegati i quattro casi per il solido A, ma il tutto vale specularmente anche per B)

Trasformazione eutettoidica

È una trasformazione invariante ($\text{Varianza}=0$) e avviene in condizioni rigidamente isoterme.

Consiste nella formazione di una struttura eutettica a lamelle alternate di solido 2 e di solido 3 a partire da un solido 1.

sezione trasversale varia). La lunghezza utile del provino è definita dalla normativa e rappresenta il tratto del provino in cui con buona approssimazione è verificata l'ipotesi che la tensione normale è distribuita uniformemente lungo la sezione trasversale. Durante la prova che viene effettuata per la creazione del grafico si generalizza il discorso riportando la σ non rispetto ad L ma rispetto ad un parametro ϵ indipendente dalle dimensioni geometriche di L.

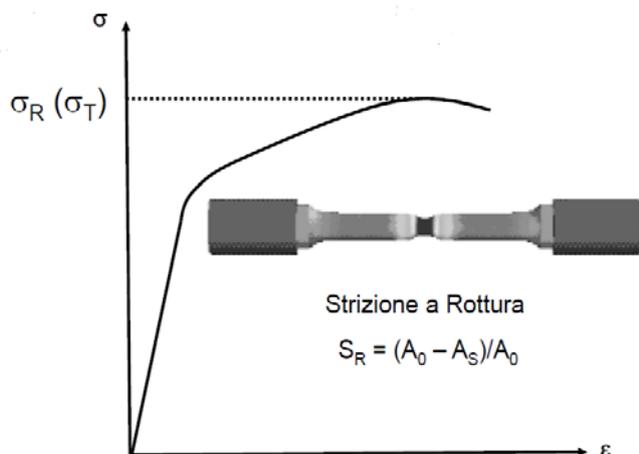
Chiamiamo ϵ dilatazione. È adimensionale ed è data dal rapporto della variazione della lunghezza rispetto alla lunghezza utile: $\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$

In maniera analoga anche per σ , non consideriamo la $\sigma_{effettiva}$ (cioè carico diviso area effettivamente sotto carico) ma per convenzione (e facilità) si utilizza nel calcolo di

$$\sigma = \frac{F}{A_{iniziale}}$$

Nei grafici sforzo deformazione possiamo identificare un punto $\sigma_{0,2}$ che si Usa quando si ha la difficoltà nella determinazione della σ_y del metallo a causa di fluttuazioni (come nel grafico sopra).

Il $\sigma_{0,2}$ viene anche detto σ di snervamento convenzionale. Fino al raggiungimento delle σ_y o $\sigma_{0,2}$ il comportamento del materiale rientra in campo elastico. Superato questo limite entriamo nella zona plastica, o meglio elastico-plastica.



La curva continua fino ad un punto dove si ha la resistenza di rottura a trazione.

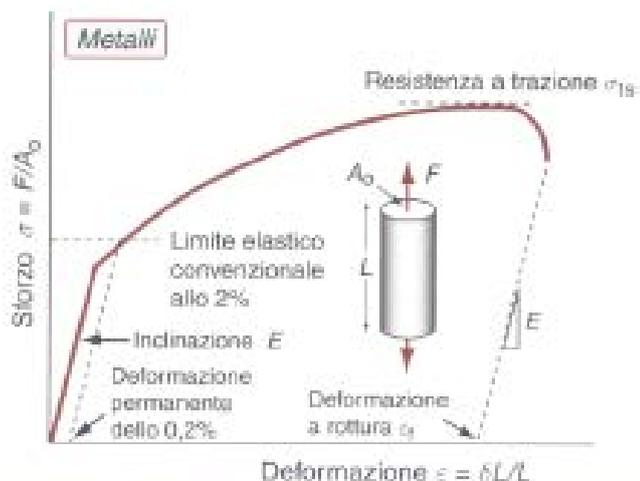
Questo punto viene preso come riferimento perché nel provino avviene una deformazione disomogenea distribuita. Il fenomeno della strizione prevede un assottigliamento sulla zona utile del provino.

La strizione a rottura è indice della deformazione di sezione a causa della strizione e si calcola come $S_R = \frac{A_0 - A_S}{A_0}$

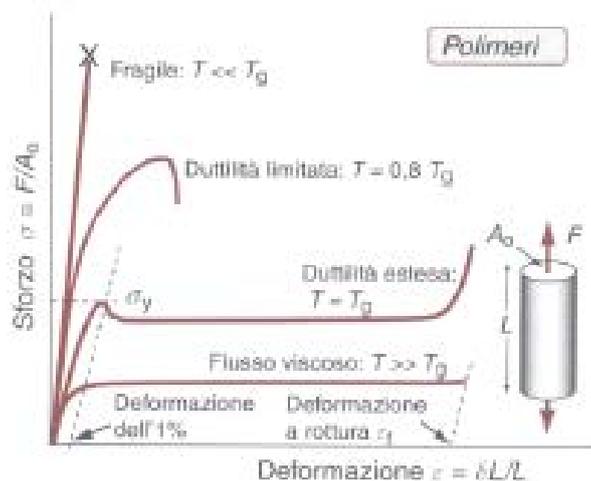
Nell'ultima fase di test, quando il provino arriva a rottura, recupera la deformazione elastica.

Si definisce energia di rottura il lavoro per unità di volume necessario ad arrivare a rottura

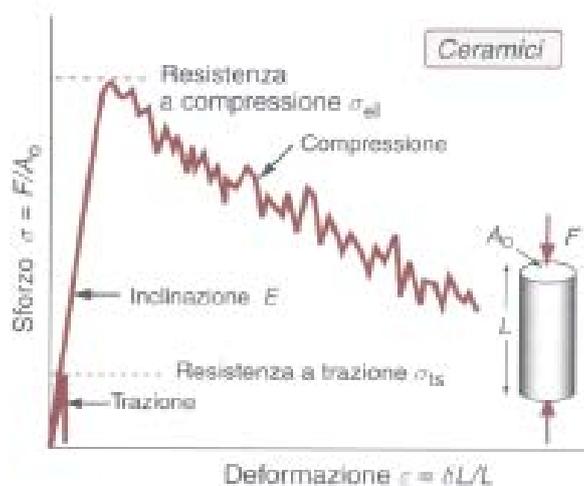
$$dW = \frac{FdL}{V} = \frac{FdL}{A_0 L_0} = \frac{F}{A_0} \frac{dL}{L_0} = \sigma d\epsilon$$



Curva sforzo-deformazione per un metallo.



Curva sforzo-deformazione per un polimero.



Curva sforzo-deformazione per un ceramico.

DIFETTI

Lez. 3C

(Ashby) Cap. 6

Il ruolo dei difetti sulla duttilità dei metalli

I difetti agiscono come ostacoli al moto di dislocazione del reticolo cristallino metallico, limitandone di fatto la duttilità.

I cristalli sono dotati di una forza resistente per unità di lunghezza, la quale deve essere superata per iniziare il processo di dislocazione e quindi la duttilità.

Uguagliando il lavoro compiuto dal taglio dello spostamento b sull'area di lati L_1 e L_2 con quello compiuto dalla forza resistente:

$$W = \tau L_1 L_2 b = f L_1 L_2 \quad \tau = \frac{f}{b}$$

Questo lavoro W viene compiuto contro $f L_1$ per una lunghezza pari a L_1 in corrispondenza di uno spostamento L_2 perché la linea di dislocazione si muove di questa entità in opposizione a f fornendo un lavoro totale di $f L_1 L_2$

Il rapporto $\frac{f}{b}$ è il valore minimo per il quale una tensione τ riesce ad iniziare il processo di dislocazione provoca un aumento nell'energia potenziale degli atomi dislocati, questo provoca come reazione lineare T nella dislocazione. Essa è un'energia per lunghezza unitaria definita come $T = \frac{1}{2} E b^2$

Gli atomi vicini al vertice della dislocazione sono spostati rispetto alle loro posizioni ideali, quindi essi possiedono una più elevata energia potenziale. Per mantenere l'energia potenziale del cristallo più bassa possibile, la dislocazione cerca di mantenersi la più corta possibile. Si comporta come se le fosse associata una tensione lineare T , come avviene per una striscia elastica.

Rafforzamento dei metalli

La resistenza intrinseca nella struttura cristallina di un metallo è relativamente bassa in quanto i legami metallici adirezionali non oppongono troppa resistenza allo slittamento.

Nei ceramici invece i legami fortemente direzionali rendono il reticolo duro e fragile.

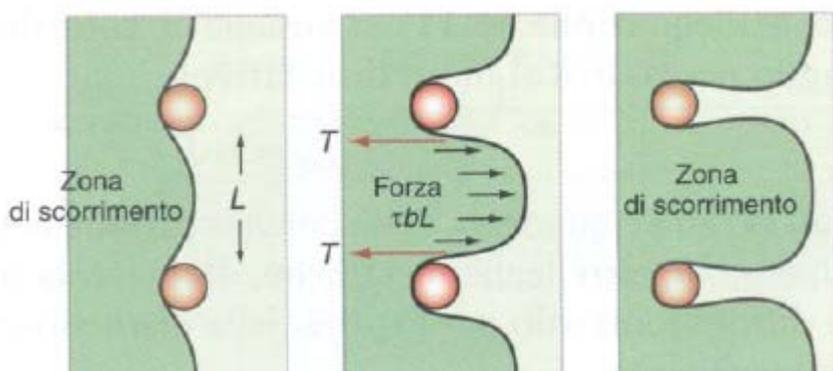
Nei metalli può essere utile rafforzare il reticolo in modo da migliorarne la resistenza.

Si può procedere al rafforzamento del reticolo nei seguenti modi:

- Rafforzamento per soluzione solida (leghe)

In entrambi i casi includiamo nella struttura cristallina particelle rigide che si oppongono con forza alla deformazione. Tuttavia, quando si hanno particelle troppo resistenti per permettere alla dislocazione di attraversarle la dislocazione viene spinta in mezzo ad esse, e via via si flette creando un raggio sempre più ristretto. Il raggio raggiunge il valore minimo quando diventa pari a metà della distanza tra le particelle, il materiale poi sopporta carichi inferiori alla condizione normale di esercizio.

La forza totale agente su un segmento di lunghezza L è solamente controbilanciata dalla forza 2T dovuta alla tensione lineare che agisce su entrambe le parti del rigonfiamento. La dislocazione fuoriesce quando: $\tau = \frac{2T}{bL} \approx \frac{Eb}{L}$



Per ottenere questo risultato i due materiali devono avere alta solubilità reciproca ad alta temperatura e una solubilità molto più bassa a temperatura ambiente. In modo da essere sicuri che venga attraversata la linea di solidus nei diagrammi di stato e quindi che si formino i precipitati.

Con un **raffreddamento lento** i precipitati vanno a concentrarsi sui bordi di grano e, avendo più tempo per formarsi saranno di dimensioni più grandi, mentre con un **raffreddamento rapido** si ha un blocco dei fenomeni di precipitazione e si forma una soluzione sovrasatura.

La temperatura a cui si formano i precipitati influisce, quindi, sulla dimensione, la quantità e la posizione dei precipitati.

Questo metodo di rafforzamento è molto efficace, per esempio le leghe di alluminio rafforzate in questa maniera possono essere fino a 15 volte più resistenti dell' alluminio puro.

Rafforzamento da bordi di grano

L'elevato numero di dislocazioni presenti naturalmente dentro un materiale a causa della formazione di grani durante la fase di raffreddamento porta alla formazione di una quantità elevatissima di ostacoli che si oppongono allo slittamento.

Una dislocazione presente in un grano non può semplicemente scivolare sul successivo in quanto i piani di scorrimento non sono allineati.

Questo fornisce un ulteriore contributo alla resistenza $\tau_{gb} = \frac{k_p}{\sqrt{D}}$ con k_p costante di Petch e D la dimensione media di grano, quindi, più piccoli sono i bordi di grano maggiore è la forza resistente.

FRATTURA E TENACITA' A FRATTURA

Lez. 4

(Ashby) Cap. 8

La resistenza è la capacità di opporsi alla deformazione plastica.

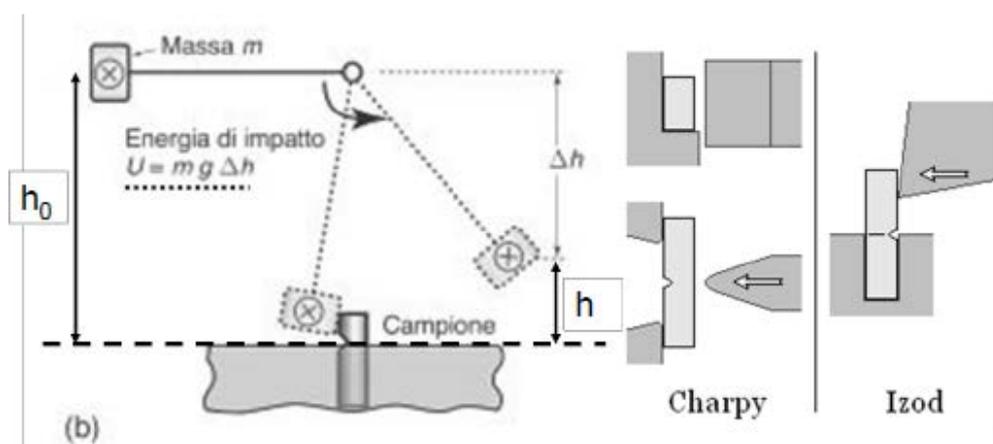
La tenacità è la resistenza di un materiale alla propagazione di una frattura.

La resilienza è la capacità di un materiale di resistere a sollecitazioni impulsive.

Prove

Le prova di tenacità prevede la trazione di provini intagliati per simulare la presenza di una cricca.

Le prove di resilienza, per testare la capacità di resistere a sollecitazioni impulsive, prevedono una simulazione di un urto impulsivo. La resilienza è l'energia per unità di superficie assorbita da un materiale portato a rottura.



Materiali fragili

La formazione di una cricca ha un costo in termini di energia pari a due volte l'energia superficiale del materiale $G_c \geq 2\gamma$ (con G_c tenacità e γ energia superficiale del materiale).

Questo vale in senso assoluto per materiali fragili, ma anche per quelli plastici, ma in questo caso l'energia richiesta sarà maggiore in quanto si necessita di rompere la duttilità iniziale del materiale.

A causa della deformazione elastica del materiale il corpo assorbe, per poi rilasciare, una certa quantità di energia. Come visto in precedenza, integrando la funzione che lega la deformazione allo sforzo, troviamo l'energia immagazzinata $W = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E}$

Se si considera un componente in cui è presente una fessura, una cricca di lunghezza c , la presenza della cricca induce un rilassamento di sollecitazione in una zona semi cilindrica di raggio c , il che induce la liberazione dell'energia elastica in essa contenuta, pari a $W_c = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} \pi c^2$

La propagazione della cricca dovrà generare un aumento della superficie della stessa, l'energia liberata quindi dovrà compensare quella necessaria alla formazione dell'elemento infinitesimo di c $dW = \frac{\sigma^2 \pi c}{2E} dc = G dc$

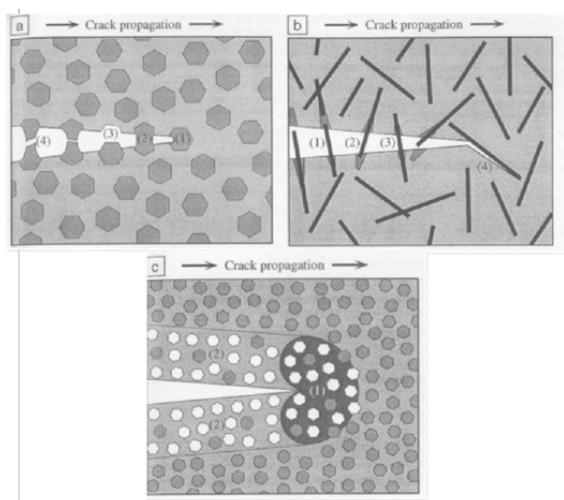
Quindi di conseguenza $K_{Ic} = \sqrt{G_c 2E}$

I materiali duttili presentano un rilevante contributo alla tenacità fornito dall'energia consumata nella deformazione plastica.

I materiali fragili resistono bene a compressione perché la trazione facilita l'apertura dei difetti, mentre la sollecitazione a compressione tende a chiuderli, o comunque a ridurli.

La zona plastica al vertice della cricca (nei metalli o nei materiali plastici in generale) aumenta la tenacità in quanto assorbe parte dell'energia necessaria alla propagazione della cricca. Più lo sforzo è intenso, più la zona plastica circostante sarà ridotta.

Meccanismi di tenacizzazione



Per opporsi alla cricca, quindi aumentare la tenacità del materiale si può proseguire in tre modi:

- a) Per **pontaggio** con deformazione plastica di una seconda fase duttile che si va a sovrapporre alla cricca, tenendola in posizione.
- b) Per **deflessione** del percorso di cricca, pontaggio e pull-out di rinforzi fibrosi
- c) Per **trasformazione di fase**

Il problema della fatica

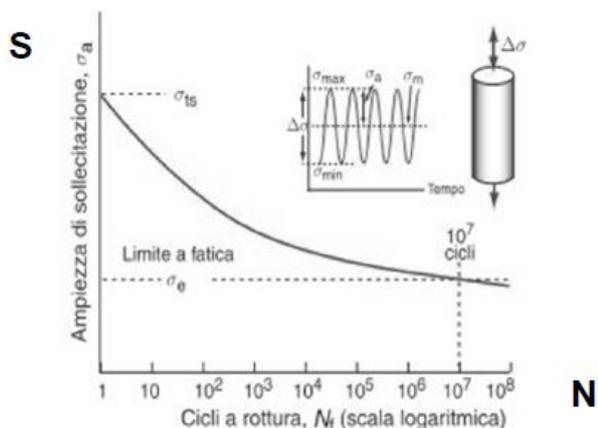
Circa l'80% dei metalli si rompe a causa della fatica, ogni elemento infatti durante la sua vita operativa sarà soggetto a cicli di carico e scarico.

Possiamo definire due diversi tipi di rottura per fatica, a bassi e ad alti cicli. Ingegneristicamente sono molto più importanti le seconde.

Il problema della fatica può essere affrontato in due modi a seconda della condizione in cui troviamo i componenti.

- Con un **componente non danneggiato**, si ipotizza un campione privo di difetti, tutta l'energia dissipata verrà quindi assorbita per la formazione del nuovo difetto. La fatica è controllata dall'innesco.
- Con un **componente danneggiato**, si ipotizza la presenza di cricche che si propagheranno. La fatica è controllata dalla propagazione della cricca.

Curve di Wohler



Sperimentalmente si eseguono un numero elevato di test su un materiale, portando i campioni a rottura per fatica. Si uniscono i dati dello sforzo applicato con il numero di cicli necessari per la rottura individuando una distribuzione normale.

A seconda della precisione richiesta si possono individuare curve con diverse percentuali di rischio di fallimento.

Considerando lo sforzo medio durante la sollecitazione avremo a possibilità del 50% che il pezzo si rompa prima di giungere al numero di cicli rappresentato dalla funzione.

$$\sigma_{medio} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad \sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad \text{se } R = -1 \rightarrow \sigma_{medio} = 0 \quad \text{se } R = 0 \rightarrow 0 < \Delta\sigma < \sigma_{max}$$

Per molti materiali esiste un limite di fatica (endurance limit) oltre il quale il componente non si romperà mai a fatica, per i materiali a base di Fe è sopra i 10⁷ cicli. Il σ_e associato all'endurance limit, per fare in modo che il materiale sopporti la vita a fatica, dovrà essere maggiore del σ_{medio} applicato sul materiale.

Gli esami non distruttivi non possono darci la certezza che non esista cricca, ma possono confermare che non esistano cricche superiori alle dimensioni limite di risoluzione del metodo adottato.

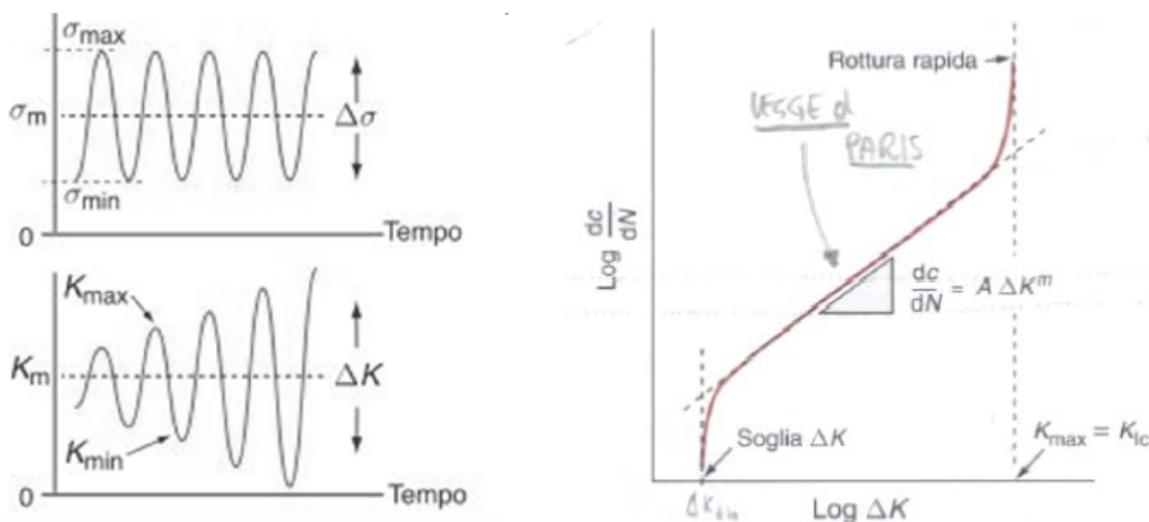
Considerando un carico ciclico costante avremo un aumento dell'intervallo di sollecitazione ΔK dato dalla propagazione della fessura di lunghezza c .

$$K_c = \sigma \sqrt{\pi c}$$

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} = \Delta \sigma \sqrt{\pi c}$$

La velocità di accrescimento della cricca $\frac{dc}{dN}$ è descritta dalla legge di Paris, che individua una soglia minima sotto la quale la cricca non si propaga, e oltre la quale si propaga per un certo intervallo, quasi linearmente e un limite superiore dove si ha una rapida rottura.

$$\frac{dc}{dN} = A \Delta K^n$$



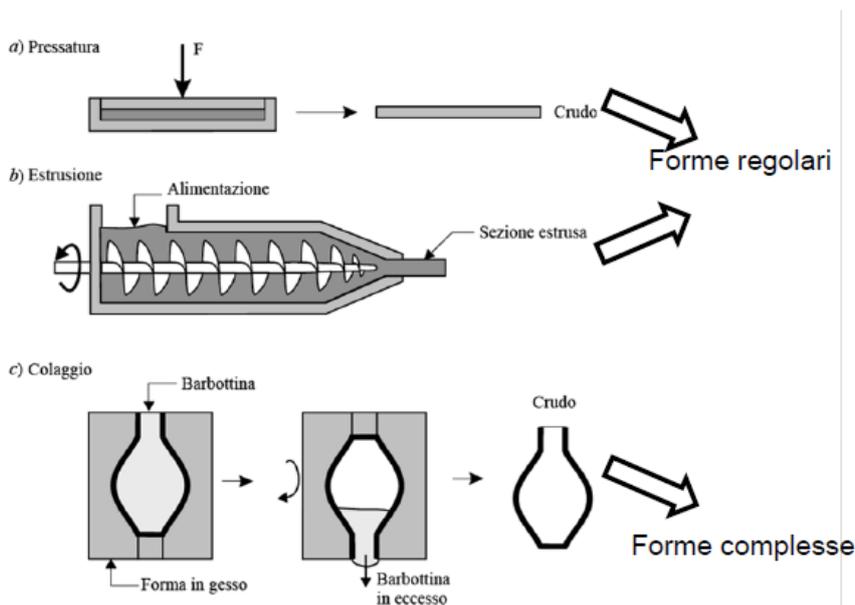
Per aumentare la resistenza a fatica, si deve considerare che le cricche si propagano solo durante la fase di trazione del ciclo di sollecitazione, mentre la compressione avvicina i lembi della cricca, tendendo a chiuderla.

Le cricche di fatica si originano prevalentemente sulla superficie del componente causando stress compressivi superficiali.

Pallinatura, sabbiatura, lucidatura vengono usati per indurre un sottile strato superficiale ad essere soggetto ad una sollecitazione residua di compressione, in modo che ogni cricca che giaccia in questa zona resterà chiusa anche quando la sollecitazione media attraverso l'intera sezione del componente è a trazione.

Tipologia	Mezzo	Tenore in acqua (%)	Tecniche
Getto - Casting	Liquido	30-35	Slip casting
Idro-plastico	Plastico	15-20	Estrusione, Iniezione
A secco	Secco/semi-secco	5-10	Pressatura

- La pressatura consiste in una compressione meccanica (anche superiori a 50 MPa) al fine di ottenere un prodotto dalle elevate caratteristiche meccaniche. in questo caso le proprietà del prodotto dipendono dalla granulometria, dall'umidità, dalla composizione delle materie prime, dal contenuto di acqua e dalla pressione di lavoro.
- L'estrusione si può applicare a miscele sufficientemente plastiche (almeno con il 15%÷20% di acqua) e consiste nell'estrudere da una trafilatura e tagliate successivamente alla lunghezza desiderata.
- La colatura si può applicare a miscele ad alto tenore d'acqua e consiste nel colare la miscela in uno stampo assorbente che trattiene, in base al tempo di esposizione, un certo spessore di materiale contro le proprie pareti. La barbotina (miscela in eccesso) viene eliminata in seguito.



La sinterizzazione è il passaggio da un compatto di polveri ad un materiale coerente sotto l'azione del calore. Durante questa trasformazione la forma del pezzo viene conservata, mentre il suo volume generalmente si riduce in seguito all'avvicinamento e alla sovrapposizione dei grani costituenti la polvere.

Dal punto di vista energetico un sistema massivo è più stabile di un sistema disperso, in quanto in esso è ridotta l'energia libera superficiale.

I MATERIALI POLIMERICI

Lez. 7A - 7B

I polimeri sono costituiti da ripetizione di monomeri, fino a formare catene lunghe più o meno ramificate.

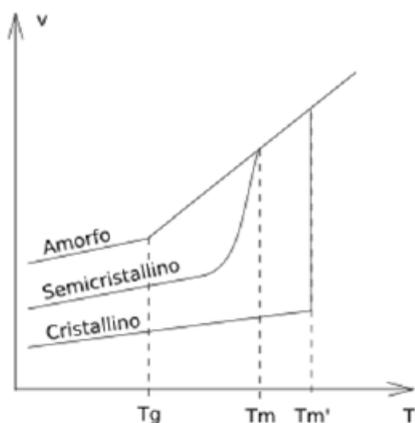
La polimerizzazione può avvenire per addizione successiva di monomeri o per condensazione, dove i monomeri sono dotati di gruppi funzionali (-OH) capaci di reagire tra loro e di legarsi con eliminazione di un sottoprodotto (solitamente acqua).

Possiamo in qualsiasi caso distinguere un omopolimero (costituito da monomeri uguali) o copolimero (costituiti da monomeri diversi).

Le caratteristiche fisiche del polimero dipendono dalla struttura delle macromolecole, dalla loro organizzazione e dalla loro lunghezza.

I polimeri possono essere classificati come:

- Termoplastici non reticolati, flessibili e resistenti, rammolliscono ad alte temperature.
- Termoindurenti fortemente reticolati, più rigidi e resistenti dei termoplastici, in seguito ad un trattamento termico che ne aumenta la reticolazione.
- Elastomeri debolmente reticolati, capaci di grandi allungamenti con recupero totale. La vulcanizzazione provoca negli elastomeri la formazione di legami trasversali che agiscono da punti di richiamo



Temperatura di transizione vetrosa

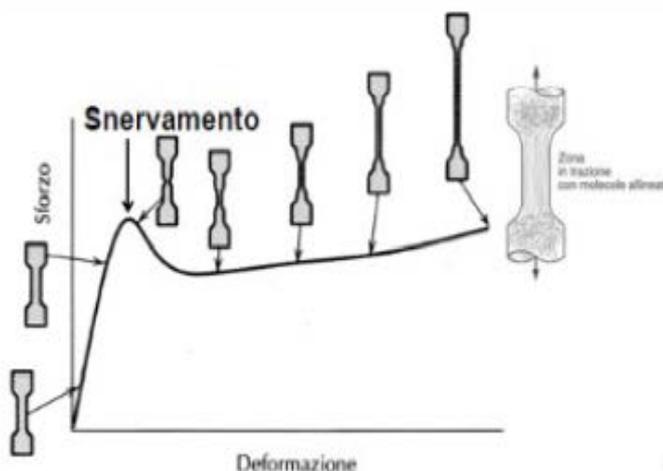
Il passaggio dallo stato solido allo stato fluido avviene in un intervallo di temperatura tanto più ampio quanto meno è reticolata o cristallina la struttura. All'aumentare della temperatura ci sarà un aumento della viscosità.

La temperatura di transizione vetrosa è una temperatura limite, dipendente dalle forze intermolecolari, dal grado di cristallinità al di sopra della quale avremo un polimero flessibile.

La fase amorfa, superata la T_g con le catene libere di scorrere, porterà ad un polimero gommoso, mentre al di sotto della T_g il polimero sarà duro, rigido e fragile, con comportamento cristallino.

I materiali termoplastici se sottoposti a sollecitazioni mostrano capacità di opporsi elasticamente alla deformazione fino ad un punto di inizio plasticità.

In questa prima fase le fibre delle macromolecole si orientano progressivamente nella direzione della sollecitazione. Superato il punto di snervamento avremo un fenomeno detto strizione, dove le molecole si orientano tutte nella direzione della sollecitazione e si allungheranno fino al raggiungimento della massima resistenza del materiale.



I materiali termoindurenti (come i termoplastici) sono sensibili alla temperatura. Anche per loro esiste una temperatura di transizione vetrosa, oltre la quale il materiale degrada.

Si può notare una diminuzione della velocità di diminuzione di E all'aumentare di T con l'aumentare del grado di reticolazione.

Resina epossidica con $T_g = 150^\circ\text{C}$

$T < 30^\circ\text{C}$: fragile, segue la legge di Hooke

$30^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C}$: Fragile, con deboli deviazioni da linearità

$100^\circ\text{C} < T$: Duttilità molto contenuta

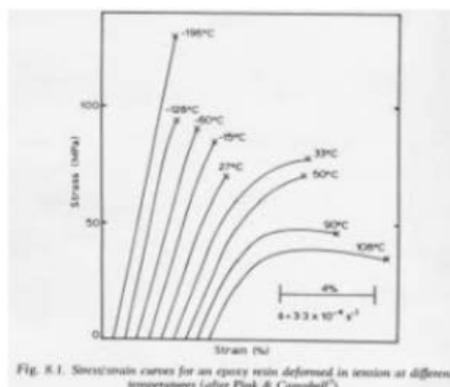


Fig. 8.1. Stress-strain curves for an epoxy resin deformed in tension at different temperatures (after Flak & Campbell).

La risposta meccanica delle resine termoindurenti al di sotto della transizione vetrosa viene schematizzata come segue

Crazing

Il fenomeno di crazing consiste nella formazione di cricche interne al materiale plastico. Può anche essere un fenomeno momentaneo, in seguito ad una sollecitazione si formano questi spazi tra le molecole, detti crazes (che fungono da collegamento tra le superfici) visibile per il fatto che questi spazi diffondono la luce, rendendo bianco il materiale. Se l'effetto di trazione permane, possiamo arrivare ad una vera e propria cricca con conseguente rottura.

Quando il crazing limita la duttilità sotto trazione, rilevanti deformazioni plastiche possono essere ancora possibili in compressione per scorrimento bande. All'interno di ogni banda, avviene lo scorrimento di taglio, una compressione continua provoca l'aumento del numero di bande di scorrimento il che provoca un aumento della deformazione totale.

Viscoelasticità e viscoplasticità

Anche il tempo ha un ruolo fondamentale nella risposta meccanica dei polimeri. In seguito ad una sollecitazione impulsiva il materiale continua a deformarsi nel tempo per ritornare alla condizione iniziale.

MATERIALI E ALTE TEMPERATURE

Lez. 8A - 8B

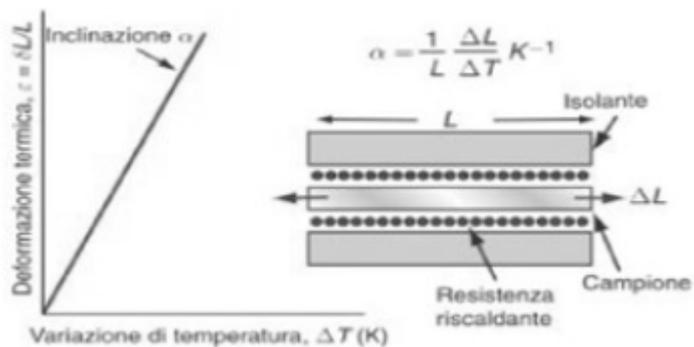
(Ashby) Cap. 12 - 13

Quando sottoposto a riscaldamento, un qualsiasi materiale tende a dilatarsi. Questo fenomeno è dovuto alla vibrazione degli atomi intorno alla loro posizione in quiete. Questo movimento però è asimmetrico, con una maggior dislocazione in termini espansivi invece che di richiamo.

La deformazione termica è definita dal coefficiente di espansione termica lineare, definito come $\alpha = \frac{dL}{L_0} \frac{1}{dT}$ [$^{\circ}C^{-1}$]

Il modulo di espansione termica è tanto più alto tanto meno è forte il legame interno tra gli atomi del materiale.

La capacità termica di un materiale è misurata a pressione costante, indica la quantità di calore necessaria ad innalzare di un grado (C o K) un'unità di massa di materiale scelto.



È una proprietà che definisce l'attitudine del materiale a trasferire energia termica da un sistema ad alta temperatura ad uno a bassa temperatura.

È la misura indiretta della capacità degli atomi di vibrare intorno alla loro posizione di riposo.

La conducibilità termica misura la capacità di un materiale di essere attraversato da un flusso termico stazionario, più alta è la conducibilità termica più il flusso di calore sarà trasmesso velocemente e con meno perdite.

Il flusso segue sempre il gradiente di temperatura passando da sorgenti a T maggiore verso T inferiori. Il flusso termico è descritto dalla prima legge di Fick applicata al flusso termico

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

La conduzione di calore può avvenire per vibrazione degli atomi per movimento degli elettroni liberi o per irraggiamento.

La temperatura influenza la conducibilità termica, se il moto dell'energia termica avviene per propagazione elettronica all'aumentare della T aumenta il disordine e il moto degli elettroni risulta ostacolato. Se il moto dell'energia termica avviene per vibrazioni atomiche allora al crescere della T risulta favorito ma aumenta il disordine e questo ostacola la conducibilità.

La diffusività misura la velocità di trasmissione del calore in un solido quando siamo in presenza di un flusso termico transitorio $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$

