



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1426A -

ANNO: 2015

A P P U N T I

STUDENTE: Aparo

MATERIA: Scienze e Tecnologie dei Materiali. Prof.Vitale

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.**

SCIENZE DEI MATERIALI (VITALE)

LUNEDÌ 3 MARZO 2014

INTRODUZIONE

Cose determinano le proprietà di un materiale?

- * Resistenza meccanica
- * Comportamento alle alte temperature
- * Comportamento al degrado ambientale
- * Proprietà elettriche, magnetiche (che non tratteremo) e ottiche.

CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI

Sono classificati a seconda di:

- * tipo di legame chimico
- * Struttura (cristallina o amorfa)
 - o) CRISTALLINA: struttura ordinata, periodica, gli atomi occupano posizioni ordinate
 - o) AMORFA: (vetri) distribuzione disordinata, simile a quella di un liquido.
- * Proprietà (meccaniche, elettriche ...)
- * Applicazione.

CLASSIFICAZIONE TRADIZIONALE DEI MATERIALI

- * Metalli
- * Ceramiche
- * Polimeri
- * Compositi

LEGAMI

Metalli → metallico

Ceramiche → ionico

polimeri → covalente + forze di Van der Waals + ponti idrogeno

MATERIALI POLIMERICI (caratteristiche della maggior parte di loro)

- * bassa densità
- * non sopportano alte T. (circa 120°C - 300°C in base al Tipo)
- * Isolanti termo-elettrici.
- * Modesta resistenza meccanica
- * Deformabili plasticamente [in genere lavorabili meccanicamente]
- * Alcuni hanno proprietà elastiche (elastomeri: gomma)
- * Alcuni sono riciclabili (termoplastici)

Sono costituiti da composti organici macromolecolari, naturali o sintetici. Sono legati da legami covalenti e anche da legami secondari (Van der Waals e a idrogeno).

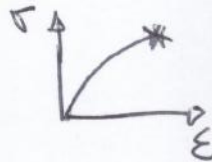
Vengono preparati attraverso la sintesi organica dei monomeri e la loro successiva polimerizzazione.

Per i polimeri si definisce la TEMPERATURA DI TRANSIZIONE VETROSA T_g .

Ci sono due tipi di polimeri

* TERMOINDURENTI

sono sempre fragili \Rightarrow



* TERMOPLASTICI

Due casi:

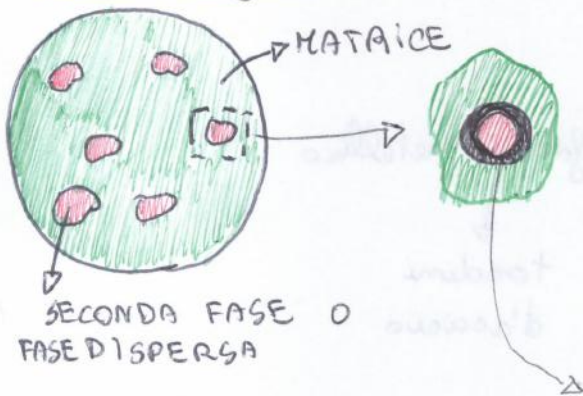
$$T < T_g$$

$$T > T_g$$

MATERIALI COMPOSITI

Sono sistemi eterogenei costituiti da una matrice di tipo ceramico, polimerico o metallico, in cui si trova DISPERSA una seconda fase.

Questo tipo di materiale mostra proprietà NON OTTENIBILI con i singoli costituenti. Ci possono anche essere più fasi.



La matrice è la componente continua che circonda la fase. La seconda fase deve essere presente almeno al 5% in volume. Ci deve inoltre essere un'INTERFACCIA. Si gioca molto con le % in vol.

La zona bordata in nero è l'interfaccia, in cui si passa da

matrice a fase. In base a che materiale voglio ottenere, genero legami più o meno forti nell'interfaccia.

Si distinguono:

- * composito a matrice metallica
- * composito a matrice polimerica
- * composito a matrice ceramica.

Oppure, distinguendoli secondo la seconda fase:

- * composito rinforzati con fibre (lunghe o corte)
- * composito rinforzati con particelle.

(la seconda fase può appartenere ad ognuna delle classi principali dei materiali).

PROPRIETÀ DEI MATERIALI

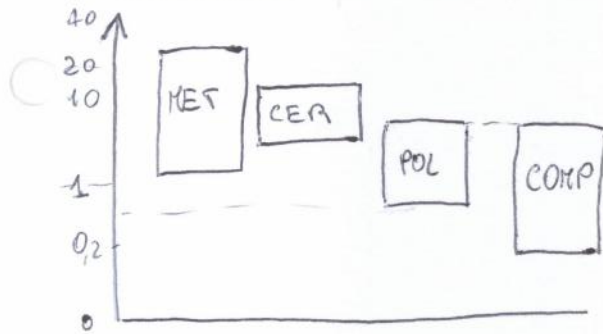
- PROPRIETÀ FISICHE

- * densità
- * proprietà meccaniche (resistenza, rigidità, risposte a sollecitazioni meccaniche)
- * proprietà termiche (collegate alla trasmissione del calore, alla capacità termica, espansione termica ...)
- * proprietà elettriche e magnetiche (risposta a campi elettrici e magnetici, conducibilità elettrica ...)
- * proprietà ottiche (assorbimento, trasmissione, diffusione di luce, ...)

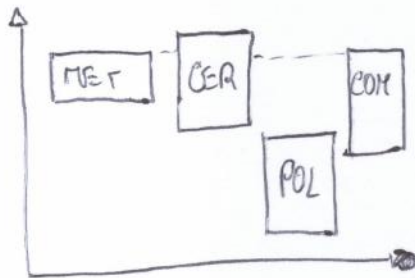
- PROPRIETÀ CHIMICHE

- * composizione chimica
- * risposta al contatto con l'ambiente (reattività chimica, resistenza a corrosione, proprietà superficiali ...)

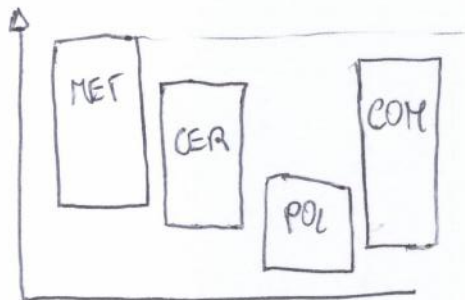
DENSITÀ (g/cm^3)



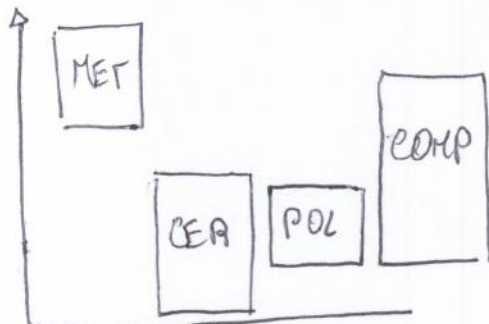
RIGIDEZZA (E-modulo di YOUNG - GPa)



RESISTENZA (carico di rottura MPa)



TENACITÀ (resistenza a frattura)

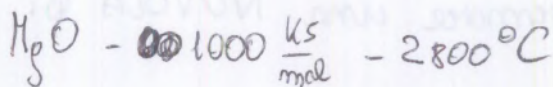
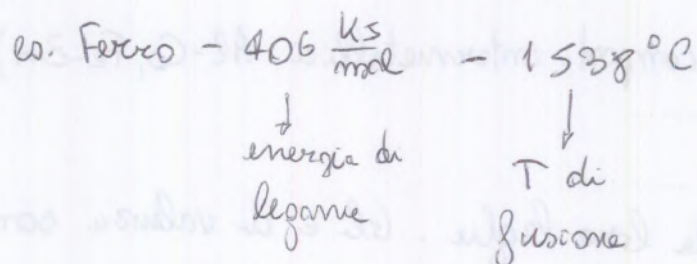


#

LEGAME CHIMICO

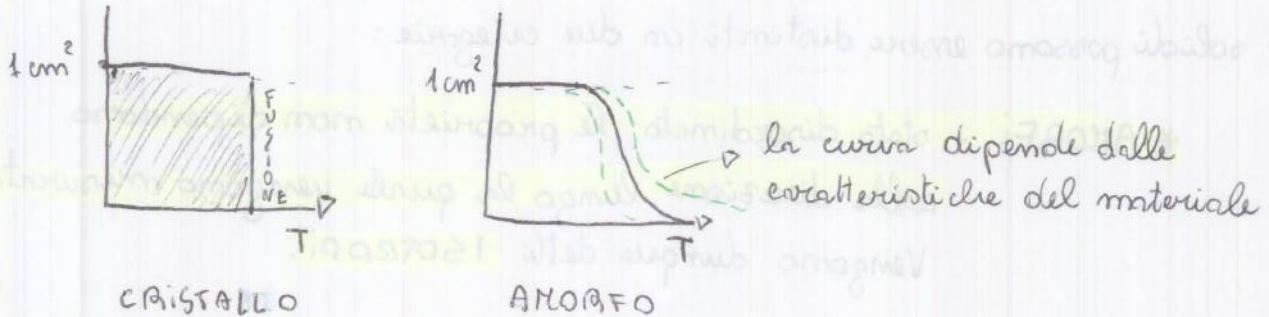
- Il tipo di legame, la sua forza e direzionalità determinano la struttura e molte proprietà del materiale
- Influenza la T di fusione e l'esposizione termica
- Influenza le proprietà meccaniche (duttilità, elasticità ---) e le proprietà elettriche

Si nota che **al crescere dell'energia di legame, cresce la T di fusione**, **ma ciò dipende molto dal tipo di legame**. Ad esempio i mat. metallici hanno energia di legame "ridotta", dunque fondono prima.



I materiali cristallini presentano un punto di fusione netto in dipendenza dalla forza di legame, mentre i solidi amorfi no, in quanto presentano un graduale rammolimento all'aumentare della T , poiché i legami non hanno tutti la stessa energia.

Considerando un cubetto (faccia di 1 cm^2)



Per semplicità si suppone che l'altezza del cubetto vada a 0.

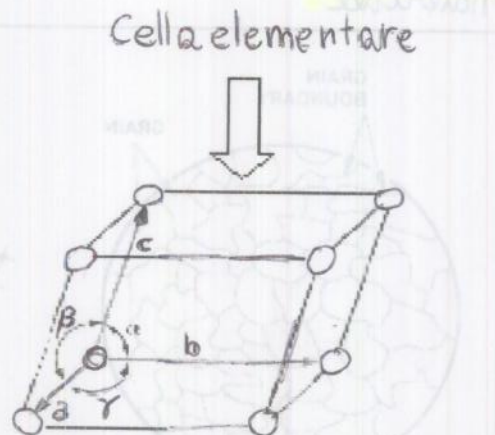
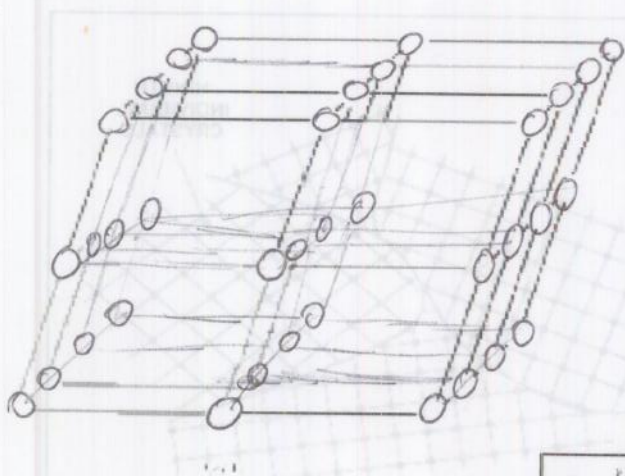
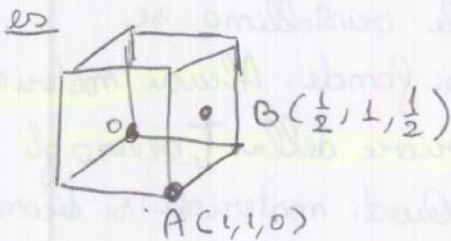
MATERIALI CRISTALLINI

La regolarità della forma esterna dei cristalli naturali suggerisce che i solidi cristallini sono formati dalla ripetizione nello spazio di unità costitutive IDENTICHE

CELLE ELEMENTARI (MATERIALI CRISTALLINI)

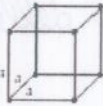

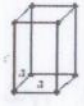

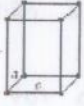


Con 7 (14) tipologie di distribuzione dei ~~materiali~~ cristalli si riescono a descrivere tutti i materiali. La cella elementare è la più piccola porzione di materia che serve a descrivere in modo univoco il materiale in questione. Ogni cella elementare è descritta da 6 parametri (con riferimento ad un reticolo tridimensionale) I lati a, b, c , variando circa tra 0,1 e 0,29 nm e T ambiente in assenza di forze esterne

Fissata l'origine degli assi (x, y, z) in un qualunque punto della cella è possibile definire la POSIZIONE di ogni altro punto attraverso una terna di numeri














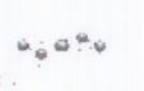

a, b, c (spigoli della cella elementare) e α, β, γ (angoli formati tra gli spigoli) sono i 6 parametri di reticolo

Lattice Parameter Relationships and Figures Showing Unit Cell Geometries for the Seven Crystal Systems

| Crystal System | Relationships | Interaxial Angles | Unit Cell Geometry |
|----------------|-------------------|---|--|
| Cubic | $a = b = c$ | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ |  |
| Hexagonal | $a = b \neq c$ | $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ |  |
| Tetragonal | $a = b \neq c$ | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ |  |
| Rhombohedral | $a = b = c$ | $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ |  |
| Orthorhombic | $a \neq b \neq c$ | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ |  |
| Monoclinic | $a \neq b \neq c$ | $\alpha = \gamma \neq \beta \neq 90^\circ$ |  |
| Triclinic | $a \neq b \neq c$ | $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ |  |

7 CELLE ELEMENTARI

Accanto alle sette celle elementari primitive ne esistono altre sette che contengono i costituenti anche al centro delle celle o al centro delle facce. In totale i reticoli di riferimento sono dunque quattordici (7+7) e sono detti **RETICOLI DI BRAVAIS**

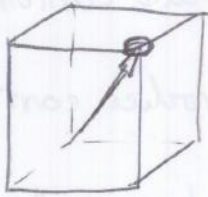
| | | | |
|--|---|---|--|
| <p>CUBIC $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$</p> |  |  |  |
| <p>TRIGONAL $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 120^\circ$</p> |  |  | |
| <p>ORTOROMBIC $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$</p> |  |  |  |
| <p>HEXAGONAL $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$</p> |  | <p>TRIGONAL $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 120^\circ$</p>  | |
| <p>MONOCLINIC $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma \neq \beta \neq 90^\circ$ $a \neq c$</p> |  |  | |
| <p>TRICLINIC $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$</p> |  | | |

4 Types of Unit Cell
 P - Primitive
 I - Body Centred
 F - Face Centred
 C - Side Centred

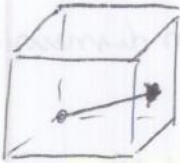
7 Crystal Classes
 14 Bravais Lattices

Questa situazione di omisotropia rende necessario definire un criterio: l'indicizzazione delle direzioni cristallografiche. Gli indici sono vettori e scritti tra parentesi quadre

es.



\Rightarrow questa direzione è $[1, 1, 1]$



\Rightarrow punto $(\frac{1}{2}, 1, \frac{1}{2})$, levo il denominatore (mi servono numeri interi) \Rightarrow direzione $[1, 2, 1]$

DIREZIONI EQUIVALENTI

Nell'ambito del cristallo ci sono delle direzioni equivalenti, nel senso che lungo Φ di esse gli atomi si Φ susseguono alla stessa distanza.

es. $[1, 0, 0]$, $[0, 1, 0]$, $[0, 0, 1]$, $[\bar{1}, 0, 0]$, $[0, \bar{1}, 0]$, $[0, 0, \bar{1}]$

Per racchiuderle tutte, si costituisce una FAMIGLIA DI DIREZIONI

$\Rightarrow \langle 100 \rangle$

Stabilite le direzioni, si possono determinare le coordinate dei piani cristallini. Come per le direzioni, esistono anche PIANI EQUIVALENTI da cui ricavare

FAMIGLIE DI PIANI \Rightarrow es. $\{100\}$

DENSITÀ TEORICA

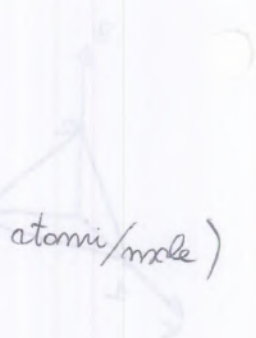
$$\rho = \frac{m A}{V_c N_A}$$

m = numero atomi

A = peso atomico

V_c = volume cella

N_A = Numero Avogadro ($6,023 \cdot 10^{23}$ atomi/mole)



NUMERO DI COORDINAZIONE (N.C.)
 (a) \rightarrow numero di vicini
 (b) \rightarrow numero di legami

FATTORE DI COORDINAZIONE (F.C.)
 Si definisce numero di coordinazione (N.C.) il numero di atomi vicini a un dato atomo come riferimento. Il numero di coordinazione (N.C.) è il numero di legami che un atomo ha con i suoi vicini.

Calcolando gli atomi di forma sferica:

$$F.C. = \frac{\text{Volume atomo cella elementare}}{\text{Volume cella elementare}}$$

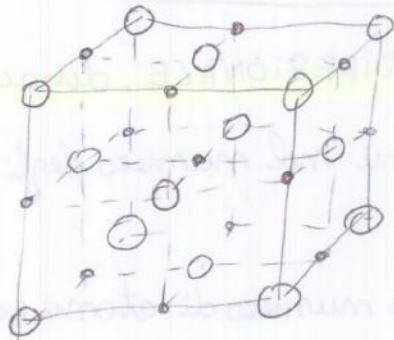
La costante di struttura del cubo $a = a_0$
 $\Rightarrow a = \frac{4}{\sqrt{3}} r$
 numero di atomi in totale 2 sfere

$$F.C. = \frac{2 \cdot \frac{4}{3} \pi r^3}{\left(\frac{4}{\sqrt{3}} r\right)^3} = \frac{2 \cdot \frac{4}{3} \pi r^3}{\frac{64}{3\sqrt{3}} r^3} = 0,68$$

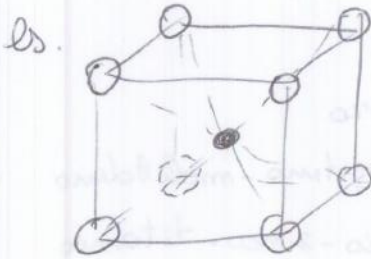
Il numero di atomi in una cella elementare è uguale al numero di legami che un atomo ha con i suoi vicini.

STRUTTURE DI TIPO AX

A = anione ○
X = catione ●



es. $NC = 6$ (Na^+ e Cl^-)
C.F.C. degli anioni
con un catione al centro
del cubo e un altro in
ogniuno dei 12 lati.



$NC = 8$ (Cs^+ e Cl^-)

Anioni nei vertici, singolo catione al centro
della cella.

A_0B = non è una C.C.C. in quanto
ci sono 2 elementi diversi.

(vedi slide per altri esempi)

DENSITÀ TEORICA

$$\rho = \frac{n' (\sum A_c + \sum A_A)}{V_c N_A}$$

n' = numero di unità di formula
nella cella

$\sum A_c$ = somma pesi atomici
dei cationi

$\sum A_A$ = somma pesi atomici
degli anioni

V_c = Volume cella

N_A = num. Avogadro

SOLIDI CRISTALLINI

I materiali allo stato cristallino sono policristallini (grani cristallini orientati casualmente)

Per molte applicazioni è agevole riprodurre dei materiali

MONOCRISTALLINI per evitare problemi causati dai **BOEDI DI GRANO**.
Bisogna dunque evitare che gli atomi si dispongano in ordine casuale, controllando in maniera rigida la temperatura e fornendo un cristallo attorno al quale gli altri cristalli si possono formare \Rightarrow **METODO CZOCHRALSKI**

N.B.

senza bordi di grano, il solido diventa trasparente.

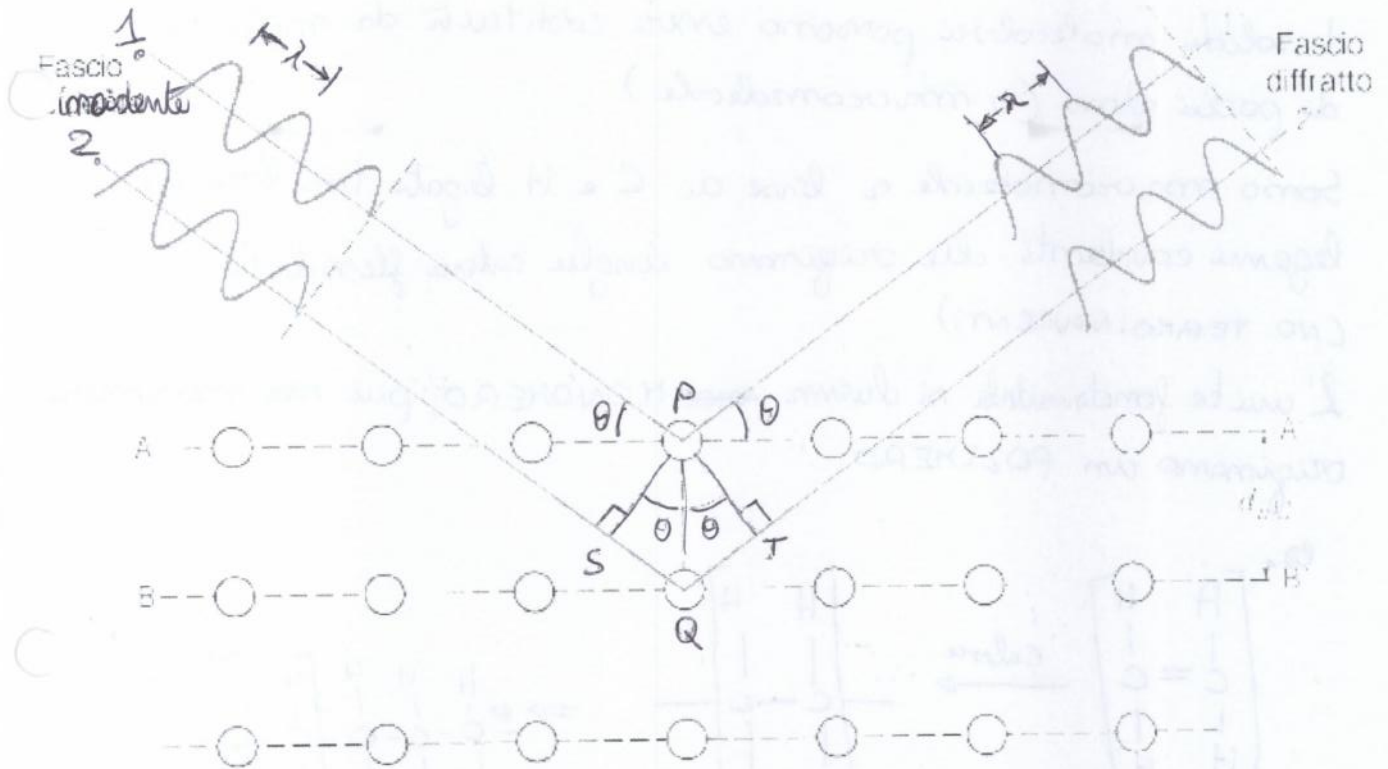
DIFFRAZIONE A RAGGI X

metodo che permette di valutare

- struttura cristallina e parametri reticolari
- fasi cristalline
- dimensione dei grani nei policristallini
- deformazione dei grani, orientamenti preferenziali e stress residui (variazioni dei parametri di cella)
- Se effettuata ad alte T , permette di determinare i coefficienti di dilatazione termica lineare (importante nei materiali anisotropi)
- transizioni di fase, reazioni allo stato solido

La diffrazione avviene quando un'onda incontra una serie di ostacoli disposti ad intervalli regolari che sono in grado di diffrangere l'onda e sono separati da distanze di entità compatibili con la lunghezza d'onda del raggio incidente.

$$\text{RAGGI X} = \lambda \text{ (0,5 - 2,5 \AA)}$$



Un fascio di raggi x , parallelo, monocromatico e coerente, incide
 i piani A e B con un angolo θ (lunghezza d'onda λ)

Perché i raggi x diffratti siano in fase, la distanza che deve percorrere
 il raggio x n° 2, ovvero $\overline{SQ} + \overline{QT}$, deve essere un multiplo
 di λ . (INTERFERENZA COSTRUTTIVA)

\Rightarrow LEGGE DI BRAGG

$$n\lambda = \overline{SQ} + \overline{QT}$$

$n = 1, 2, 3, \dots$ ordine di diffrazione

$$\overline{SQ} + \overline{QT} = 2d_{hkl} \sin \theta$$

$h, k, l =$ indici di Miller

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$

N.B. Per strutture cristalline a simmetria cubica

$$\Rightarrow d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

Con questa tecnica ottengo dei picchi di intensità laddove l'interferenza
 è costruttiva.

TERMOPLASTICI

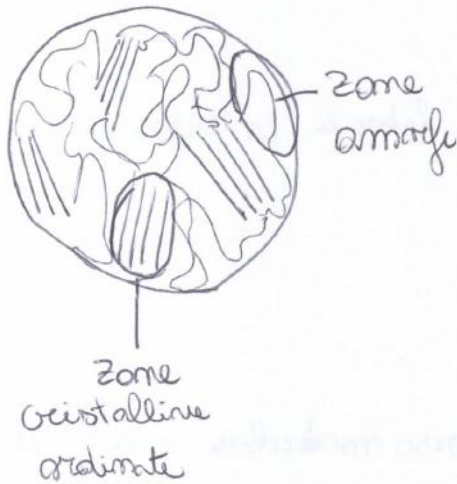
- lineari o ramificati
- Duttile sopra la T_g
- Fragili sotto la T_g
- Rammolliscono se riscaldati
- Riciclabili

TERMOINDURENTI

- Fortemente reticolati
- Duri e fragili
- Amorfi
- se riscaldati carbonizzano
- Non riciclabili

CRISTALLINITÀ PARZIALE DEI POLIMERI

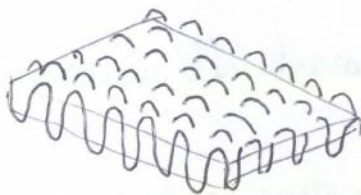
I polimeri o sono amorfi o parzialmente cristallini, solitamente al 50% (al massimo al 95%)



La facilità di cristallizzazione dipende dalla complessità chimica del monomero, dalla presenza di catene laterali e cross-link e dalle condizioni di cristallizzazione.

Ci sono due modelli di cristalli polimerici

- 1) modello a micelle frangiate (visto sopra)
- 2) modello a catena ripiegata



IMPERFEZIONI

Tutti i solidi reali sono "impuri". Per esempio è molto difficile riuscire a raffinare un metallo a purezza superiore al 99,99%.

Ci sono 3 tipi di difetti nei solidi cristallini:

- DIFETTI PUNTFORMI

(soluzioni solide)

- DIFETTI LINEARI

- DIFETTI DI SUPERFICIE

Tali difetti influenzano le proprietà dei materiali. È importante conoscere il tipo di difetto ed il ruolo che svolge sul comportamento del materiale.

In realtà i materiali mono e policristallini non sono così ordinati come si è detto finora, ma sono ricchi di difetti reticolari.

N.B

CONTROLLANDO le imperfezioni reticolari si ottengono materiali con proprietà che essi non possedevano prima.

DIFETTI PUNTUALI

Prevedono la mancanza (VACANZA) di un atomo nel reticolo, oppure la presenza di un atomo più piccolo in posizione INTERSTIZIALE oppure un atomo diverso (in genere più grande) che SOSTITUISCE un atomo del reticolo (ATOMI SOSTITUZIONALI)

Parliamo ora nel dettaglio di questi 3 casi.

2) INTERSTIZIALI

Un atomo di impurezza o del reticolo di base si colloca in posizione interstiziale.

3) SOSTITUZIONALE

Un atomo (grande) di impurezza sostituisce un atomo del reticolo.

SOLUZIONI SOLIDE

Un materiale cristallino può essere formato da un'unica fase, formati ad esempio da soli atomi di rame o ferro.

È possibile ottenere SISTEMI MONOFASICI sostituendo, ad esempio, parte degli atomi di rame con atomi di nichel. Si parla dunque di **SOLUZIONI SOLIDE, omogenee a livello composizionale.**

Nei **METALLI** vengono intenzionalmente aggiunti atomi di impurezza, dato che si migliorano le proprietà meccaniche, la resistenza alla corrosione e si modificano le proprietà ad alte T.

Nei **CERAMICI** invece si aggiungono ioni per migliorare la conducibilità termica e le proprietà meccaniche e piezoelettriche.

Vi sono anche in questo caso soluzioni solide:

- **INTERSTIZIALI**

- **SOSTITUZIONALI**

Per quanto riguarda quelle interstiziali, bisogna notare che i siti interstiziali hanno dimensioni ridotte, dunque vi sarà una ridotta solubilità di soluti interstiziali (**POCO NUMEROSE**)

I materiali sono più facilmente lavorabili allo stato disordinato, dunque si sfruttano molto bene le ~~tra~~ trasformazioni ORDINE-DISORDINE e viceversa.

FASI INTERMEDIE

Due sostanze che non formano soluzioni complete, oltre alle soluzioni primarie possono generare anche soluzioni intermedie, che ~~sono~~ presentano composizione variabile o composti intermedie.

DISLOCAZIONI

Le presenza di questi difetti spiega la deformazione plastica dei materiali.

3 TIPI:

- a SPIGOLO
- a VITE
- MISTE

Non sono difetti di equilibrio ~~ma~~ termodinamico e si formano durante la solidificazione e le lavorazioni meccaniche.

DIFETTI DI SUPERFICIE

- superfici esterne
- bordi di grano (come se fossero un susseguirsi di dislocazioni a spigolo)

Nei bordi di grano la presenza di dislocazioni introduce energie di deformazione (sono più reattivi dei grani)

DIFFUSIONE NON STAZIONARIA

Di solito la diffusione avviene in condizioni non stazionarie il flusso e il gradiente di concentrazione in un punto variano nel t.

SECONDA LEGGE DI FICK

L'aumento della concentrazione in un piccolo elemento di volume con spessore dx è uguale alla diminuzione del flusso attraverso questo elemento.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \Rightarrow \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

(se D è indipendente dalla posizione e quindi dalla composizione)

FATTORI CHE INFLUENZANO LA DIFFUSIONE

- T

$$\Rightarrow D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_d}{RT}\right)$$

D_0 = pre-esponenziale indipendente da T

Q_d = en. di attivazione della diffusione.

CRESCITA DEI GRANI

Un materiale ~~solido~~ policristallino con grani piccoli è meno stabile di uno a grani più grandi a causa dell'energia superficiale. Allora se la T è abbastanza alta, i bordi di grano si spostano e alcuni grani crescono a spese di altri.

Il numero di bordi di grano per unità di volume è inversamente proporzionale al diametro medio dei grani.

$$\frac{dN}{dt} = -K \frac{1}{d} \frac{dd}{dt}$$

$$T = T_0 \left(1 + \frac{\alpha}{2} \frac{d}{d_0} \right)$$

NUCLEAZIONE

La nucleazione è il processo di formazione di nuovi grani da un materiale policristallino.

$$\frac{dN}{dt} = K_1 - K_2 N$$

La nucleazione è un processo di primo ordine.



Un nucleo per potersi accrescere deve raggiungere una **dimensione critica**. Un gruppo di atomi con dimensione inferiore viene detto **embrione**, mentre con dimensione superiore è detto **nucleo**.

Gli embrioni si formano e si ridisciolgono in continuazione a causa dell'agitazione termica.

r^* = raggio critico

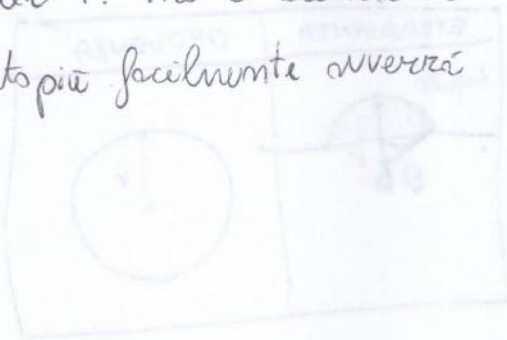
se $r < r^*$ l'energia del sistema diminuisce se gli embrioni si ridisciolgono. Il cluster si chiama embrione e si scioglierà.

se $r > r^*$ l'energia del sistema diminuisce se i nuclei si accrescono. Il cluster si chiama germe o nucleo e diventerà un gramo cristallino.

N.B

la variazione di energia libera totale corrispondente a r^* è inversamente proporzionale al grado di sottoraffreddamento.

r^* diminuisce al diminuire della T . Più è elevato il grado di sottoraffreddamento, tanto più facilmente avverrà l'inizio della trasformazione.



Il grado di sottoraffreddamento richiesto nella nucleazione eterogenea è molto minore rispetto a quello richiesto in quella omogenea.

Se da una fase α (solido) si deve formare una fase nuova β (solido) questa nuclea di preferenza su un bordo di grano della fase α , oppure su interfacce o dislocazioni.

AFFINAMENTO DI GRANO

Si usano affinatori per ottenere grani fini, dunque per migliorare le proprietà meccaniche.

INGROSSAMENTO DEL GRANO

A seguito di un riscaldamento prolungato può verificarsi l'aumento delle dimensioni del grano. (riduzione dell'energia totale).

MONOCRISTALLI

Migliore resistenza allo scorrimento viscoso ad alte T .

TRASFORMAZIONI MARTENSITICHE

Tutti gli atomi di un grano si spostano contemporaneamente in modo da originare la nuova fase.

es. temprer degli acciai

REGOLA DELLE FASI (LEGGE DI GIBBS)

$$V = C - f + n$$

V = gradi di libertà (varianza)

C = componenti chimici presenti

f = fasi coesistenti

n = variabili fisiche attive prese in considerazione nell'equilibrio, ovvero T e p .

La varianza di un sistema è definita come il numero di parametri intensivi che si possono variare a piacere senza cambiare il numero delle fasi del sistema.

es.

Sistemi a 2 componenti

~~$$C = 2 \quad n = 1 (T)$$~~

⊙

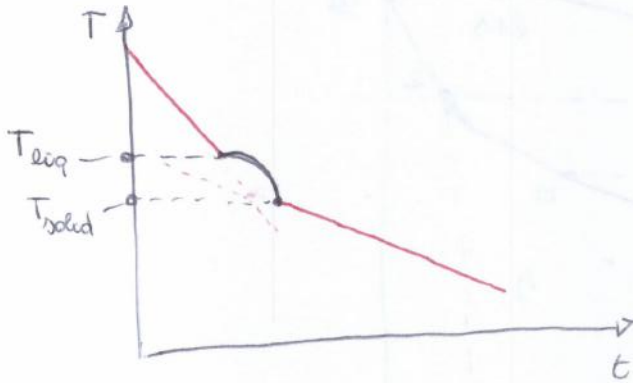
$$V = 2 + 1 - f$$

f = numero fasi

$$f = \begin{cases} 1 (V=2) \\ 2 (V=1) \\ 3 (V=0) \end{cases}$$

DDS. BINARI - COMPLETA MISCIBILITÀ ALLO STATO LIQ. E SOLIDO

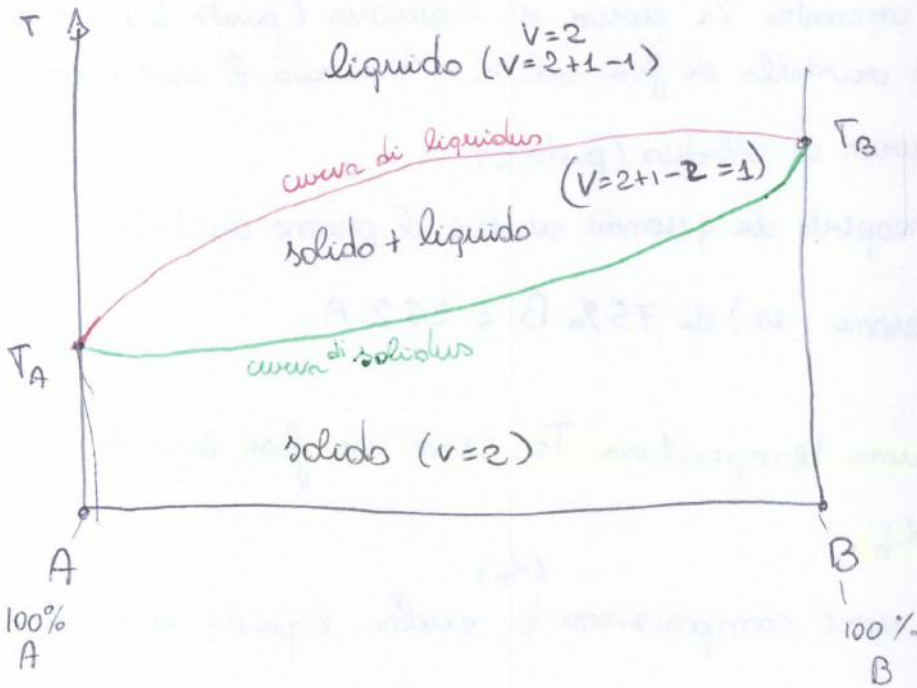
(sistema misto A-B)



T_{eq} : inizia la nucleazione della fase solida

T_{solid} : sparisce l'ultima goccia di fase liquida

se $T_{solid} < T < T_{eq} \Rightarrow$ coesistenza fase liq. e solida.

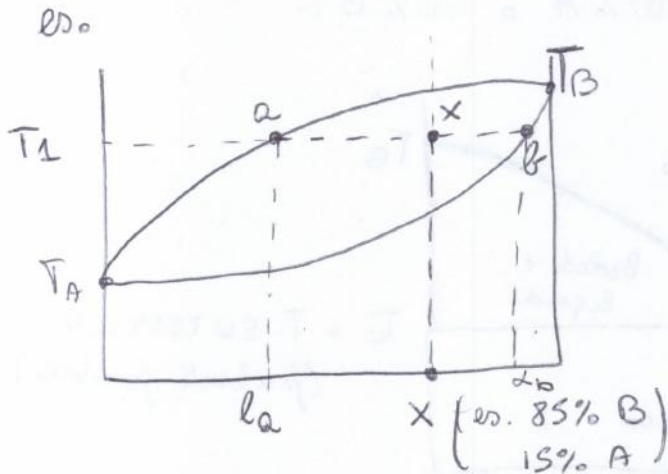


$T_A = T_{fusione\ A\ puro}$

$T_B = T_{fusione\ B\ puro}$

REGOLA DELLA LEVA

Le percentuali in peso relative delle varie fasi in una regione bifasica del dds si calcolano così.



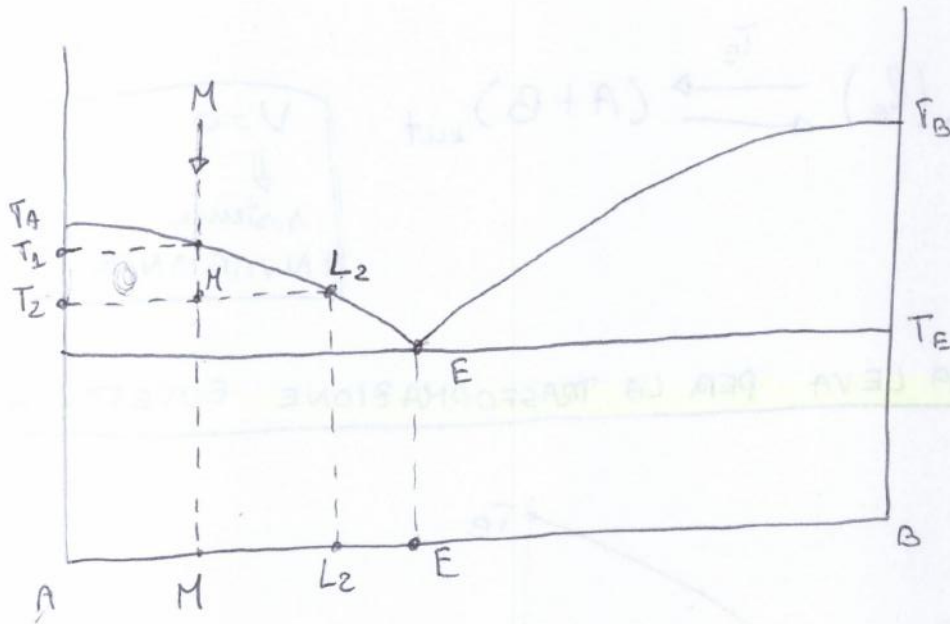
$$a \ T_1 \Rightarrow \begin{cases} \% \text{ liquido} = l_a = \frac{Xb}{Qb} \cdot 100 \\ \% \text{ solido} = \alpha_b = \frac{Qx}{Qb} \cdot 100 \end{cases}$$

N.B

Le ~~trasformazioni~~ trasformazioni espresse nel dds sono **REVERSIBILI**

Nel caso **REALE**, non si ottengono le condizioni di equilibrio
 Si assumono comunque i comportamenti ideali, ovvero che
 le trasformazioni seguono le condizioni di equilibrio.

es Raffreddiamo un liquido di composizione M



- A T_1 si forma il primo cristallo di A puro (100% A)
- Continuando a raffreddare e arrivando a T_2 , il liquido avrà composizione L_2 .

$$T_2 \Rightarrow \begin{cases} \% \text{ A puro} = \frac{M \cdot L_2}{AL_2} \cdot 100 \\ \% \text{ liquido} = \frac{AM}{AL_2} \cdot 100 \end{cases}$$

- Alla T_E il liq ha composizione E.

$$T_E \Rightarrow \begin{cases} \% \text{ A puro} = \frac{ME}{AE} \cdot 100 \\ \% \text{ liquido} = \frac{AM}{ME} \cdot 100 \end{cases}$$

- Alla fine avremo una miscela meccanica di minuti cristalli A puro e B puro (struttura eutettica).

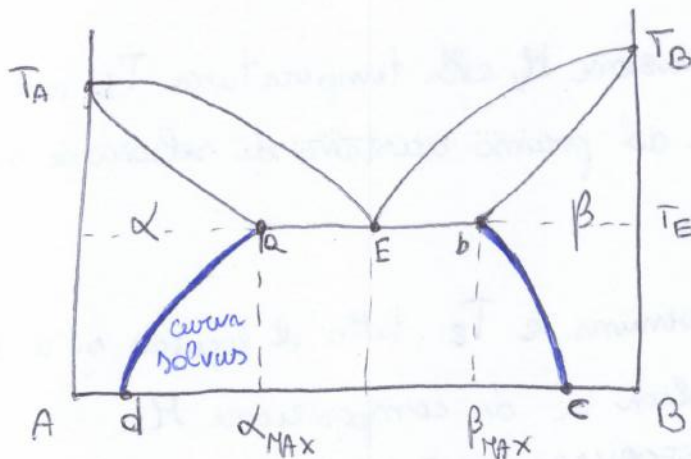
Solidificazione del sistema eutettico

In questo caso NON HO cristalli di deposizione primari perché a T_E esiste solo il liquido a composizione eutettica che si trasforma completamente in $(A_{puro} + B_{puro})_{eut.}$

D.D.S BINARI

SOLUBILITÀ PARZIALE ALLO STATO SOLIDO

⇒ presenza di un EUTETTICO



Due soluzioni solide primarie.

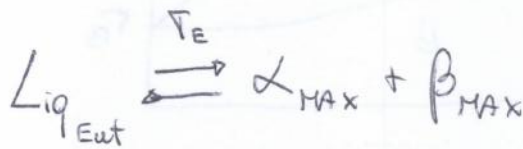
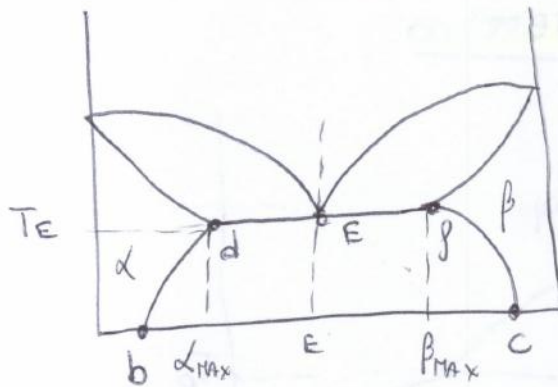
Una ricca nel costituente A, denominata fase α . (soluzione solida di B in A)

Una ricca nel costituente B, denominata fase β . (soluzione solida di A in B)

Sono soluzioni solide limite.

Ai lati della transf. eutettica vi saranno la massima concentrazione di β e di α .

Se si raffredda un liquido di composizione E



l_{eut} si trasforma in un solido bifasico $\alpha + \beta$ ($\alpha_{\text{MAX}} + \beta_{\text{MAX}}$)

Quando scompare l'ultima goccia di liquido, il sistema torna monovariante e la T riprende a scendere.

A raffreddamento completo

$$\% \alpha = \frac{EC}{bc} \cdot 100$$

$$\% \beta = \frac{bE}{bc} \cdot 100$$

REGOLA DELLA LEVA A T_E

INIZIO $\Rightarrow \% \alpha \cong 0$

$$\% \beta_f \cong 0$$

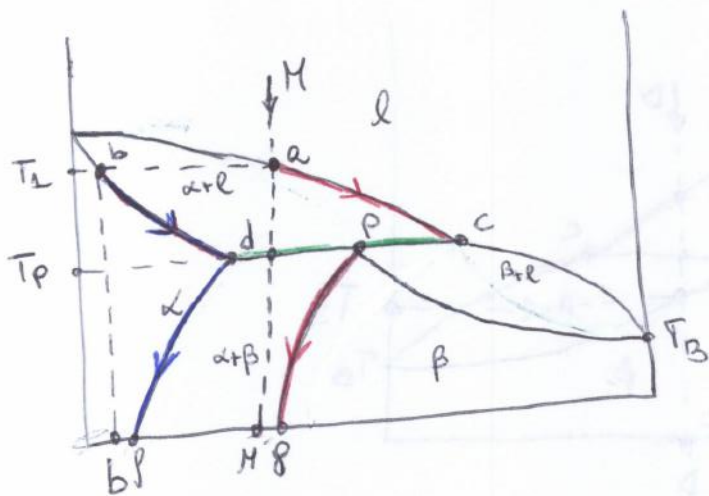
$$\% l_{\text{eut}} \cong 100\%$$

FINE $\Rightarrow \% l_{\text{eut}} \cong 0\%$

$$\% \alpha_d = \frac{E\beta}{d\beta} \cdot 100$$

$$\% \beta_f = \frac{dE}{d\beta} \cdot 100$$

SOLIDIFICAZIONE COMPOSIZIONE IPOPEAITETTICA



- A T_1 si separa il primo cristallo di α di composizione b .
- A T_p ha luogo la transf. peritettica nel corso della quale TUTTO il liquido c reagisce con parte di α (di composizione d) per dare la soluzione β di composizione p . Solo una parte di α reagisce per che ~~rimane~~ la composizione H è IPOPEAITETTICA, infatti quando compare il liquido entro nel campo $\alpha + \beta$.
- Scomparsa l'ultima goccia di liquido, la T continua a scendere e la composizione di α e β variano secondo le linee df e pg .

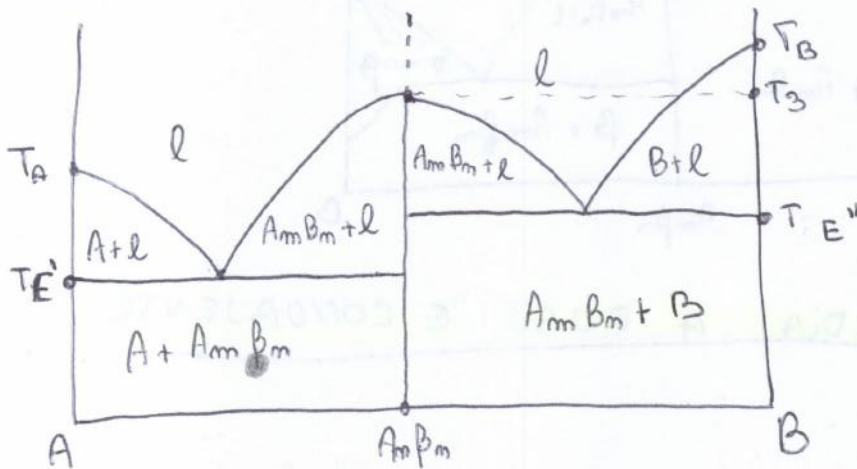
Alla T dell'ascissa:

$$\% \alpha = \frac{M_g}{f_g} \cdot 100 \quad \% \beta = \frac{f \cdot H}{f_g} \cdot 100$$

D.D.S. BINARI

PRESENZA DI UN COMPOSTO A FUSIONE CONGRUENTE

Un composto fonde congruente quando alla T di fusione si trasforma in un liquido che ha la sua stessa composizione. Se l'ascissa compare un composto $A_m B_n$ la cui composizione si indica indicando le % di A e B.



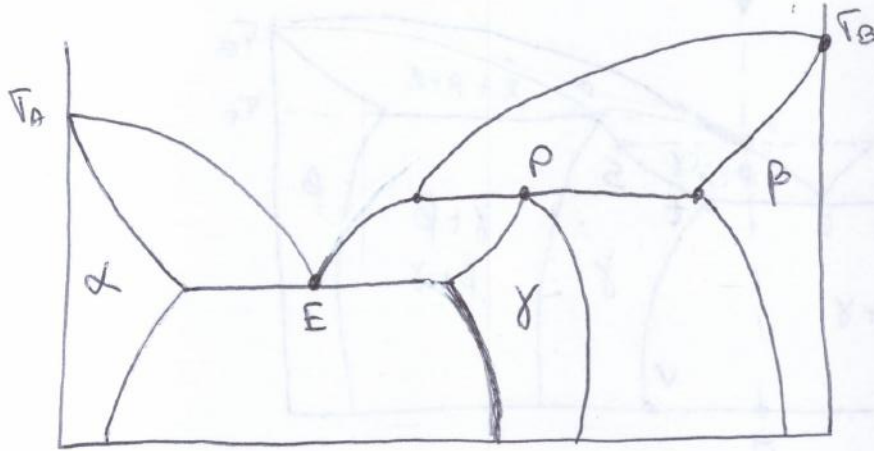
↑
 caso di D.D.S scomponibile in 2 DDS con
 MISCIABILITÀ NULLA ALLO STATO SOLIDO

N.B.

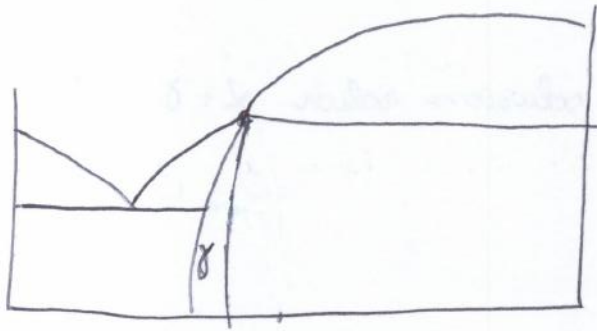
Ci sono due T eutettiche ($T_{E'}$, $T_{E''}$) e le miscele cominciano a fondere alla T_E corrispondenti

FASE A FUSIONE INCONGRUENTE

fase intermedia indicata con lettera δ



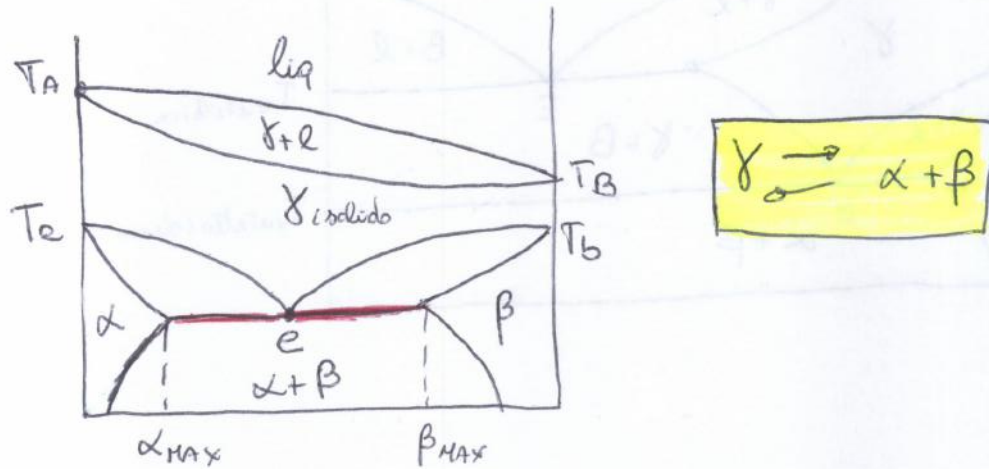
oppure



Alla in questo caso ci sono una trasformazione eutettica e una peritettica.

TRASFORMAZIONE EUTETTOIDICA

Simile ad un eutettica, ma coinvolge 3 fasi solide



T_a e T_b corrispondono a trasformazioni delle strutture cristalline di A e B (polimorfiche o allotropiche)

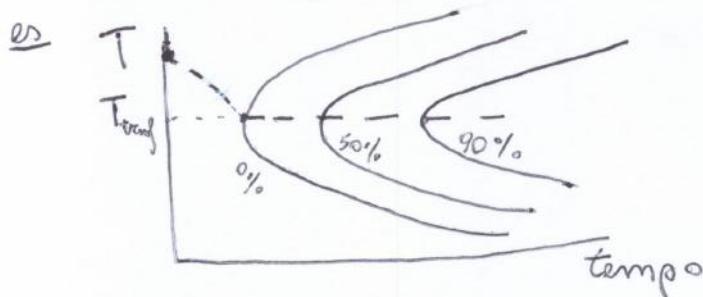
\Rightarrow la transf. eutettoidica comporta la transf. di γ_e in α a max concentrazione di B e β in β a max concentrazione di A.

APPROFONDIMENTO

Dal punto di vista industriale è utile tener conto delle CINETICHE di trasformazione di fase. Ci sono altri 2 tipi di diagrammi:

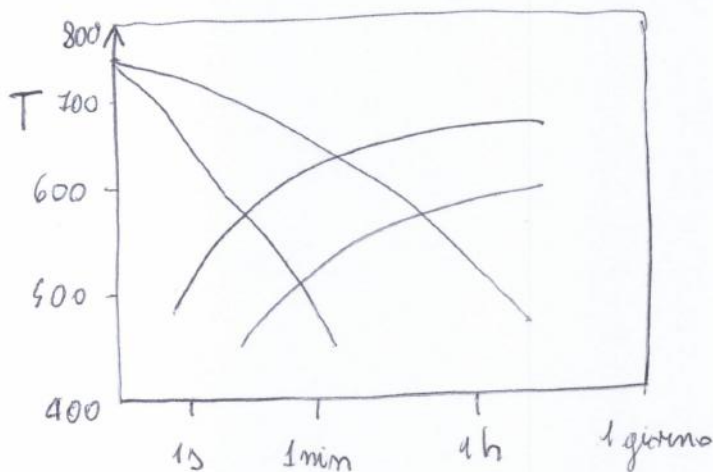
1) T.T.T (Tempo - Temperatura - Trasformazione)

Si raffredda rapidamente il materiale fino alla T di trasformazione e lo si mantiene a quella T misurando la velocità di trasformazione



2) CCT (Continuous cooling transformation)

Si misura il grado di trasformazione in funzione del tempo per T continuamente decrescenti



DEFORMAZIONE

$\epsilon \rightarrow \Delta \epsilon$ (a seguito di trazione)

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

l_0 = lunghezza iniziale

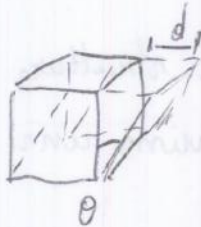
l = lunghezza a seguito della sollecit.

γ (a seguito di taglio)

$$\gamma = \frac{d}{b} = \tan \theta$$

θ = angolo di taglio

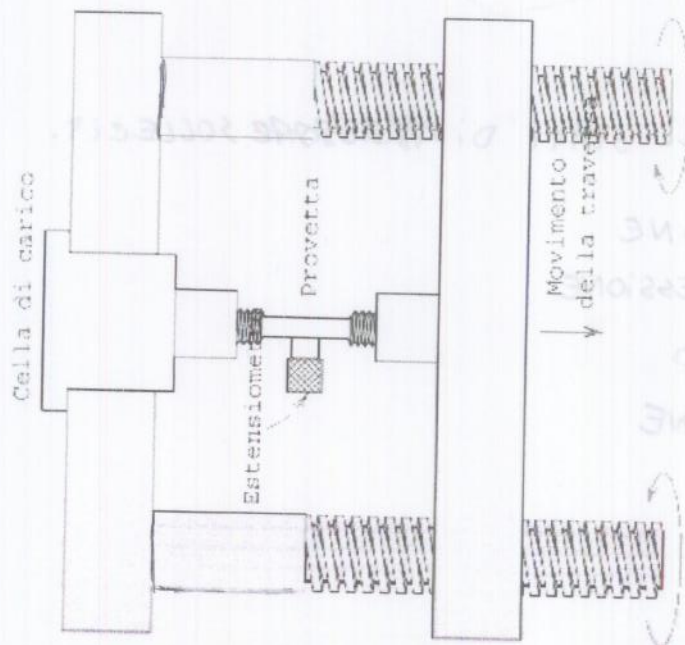
se θ piccolo $\tan \theta \cong \theta$



RESISTENZA A TRAZIONE

Viene determinata con una **PROVA DI TRAZIONE** (in figura)

Il provino si deforma a velocità cost



MODULI ELASTICI

E modulo di YOUNG

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

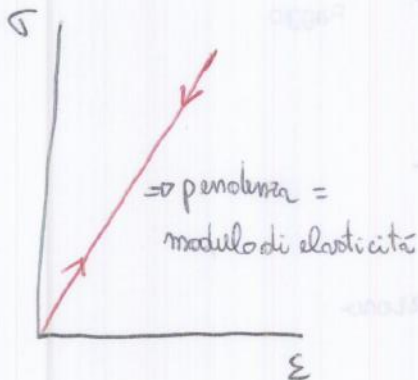
G modulo di Taglio

$$\tau = G \cdot \gamma$$

K modulo di elasticità cubica

$$P = K \cdot \frac{\Delta V}{V_0}$$

DEFORMAZIONE ELASTICA



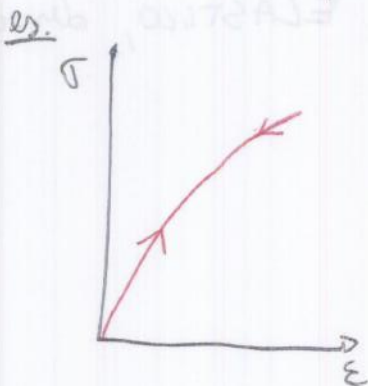
Se in questo tratto il carico viene rimosso, il prouino annulla la deformazione acquisita.

(Deformazione ELASTICA - reversibile)

E = rigidezza (resistenza alla deformazione elastica)

Nei metalli e ceramici la deformazione elastica supera raramente lo 0,5% e la curva è quasi lineare.

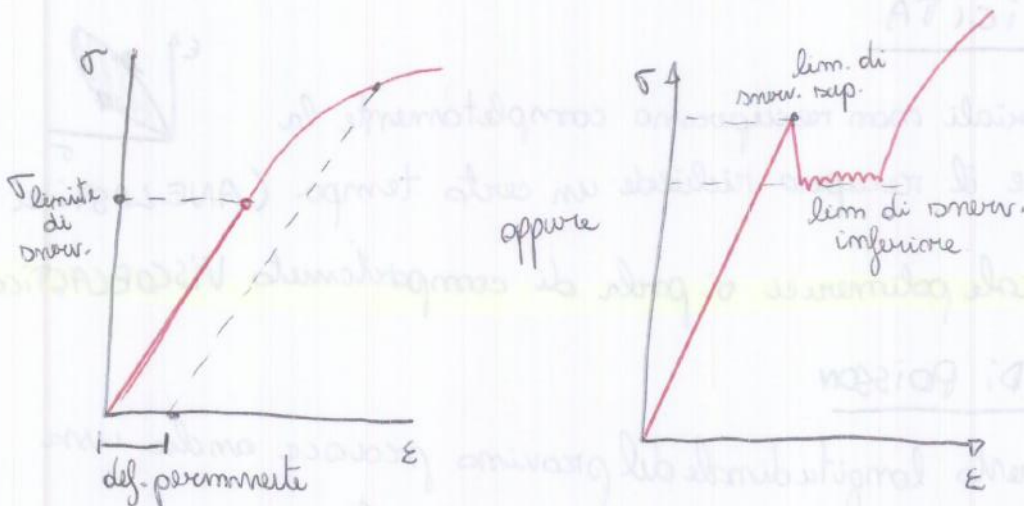
Per alcuni materiali (ghisa grigia, calcestruzzo, molti polimeri...) il tratto elastico non è lineare (Per ricavare E si usano il modulo secante & quello tangente).



COMPORTAMENTO PLASTICO

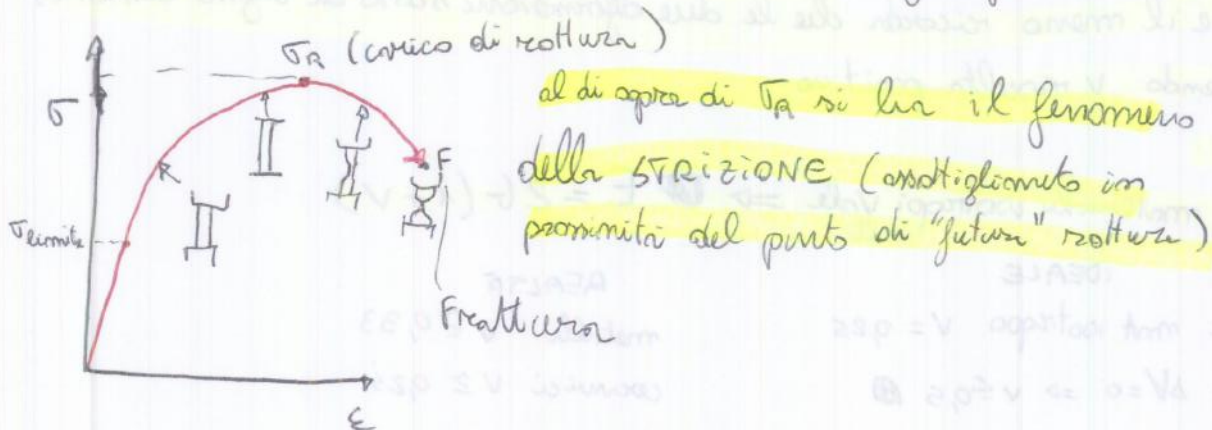
CARICO LIMITE ELASTICO (DI SNEAVAMENTO)

Il comportamento elastico si manifesta fino ad un certo valore di σ .
 Superato il CARICO LIMITE ELASTICO il provino si deforma permanentemente (SNEAVA)



(se levo il carico, la curva ~~ritorna~~ ritorna elasticamente ma presenta una def. permanente)

I materiali sollecitati oltre il limite elastico o arrivano a frattura o subiscono deformazione irreversibile (DEF. PLASTICA) prima di rompersi. La deformazione irreversibile avviene grazie al movimento delle dislocazioni lungo i piani di scorrimento.



MOLTIPLICAZIONE DELLE DISLOCAZIONI

Nel corso della def. PLASTICA il numero delle dislocazioni aumenta moltissimo

Ogni volta che una dislocazione incontra degli ostacoli, può generare altre dislocazioni. (gli ostacoli possono essere altre dislocazioni).

MOTO DELLE DISLOCAZIONI - PIANI DI SCORRIMENTO

Le dislocazioni non si muovono con la stessa facilità in tutti i piani. È più facile che si muovano lungo direzioni ad alta densità atomica

Nei solidi metallici il moto dislocativo avviene facilmente (sono duttili)

I metalli con struttura FCC e CCC hanno un numero alto di sistemi di scorrimento e sono più duttili dei metalli E.C (fragili)

CARICO CRITICO DI TAGLIO

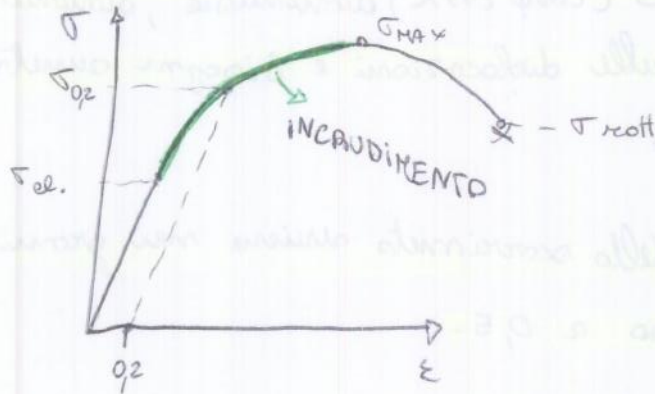
Affinché una dislocazione si possa muovere occorre che il carico applicato abbia una componente di taglio superiore al CARICO CRITICO DI TAGLIO.

La sollecitazione minima necessaria per iniziare lo scorrimento si ha quando ϕ e λ valgono 45°

$$\sigma_s = \frac{\tau_{crit}}{(\cos \phi \cos \lambda)_{MAX}} = 2 \tau_{crit.}$$

SNEAVAMENTO CONVENZIONALE

È quello a cui corrisponde una DEFORMAZIONE PERMANENTE DELLO 0,2% → tale parametro prende il nome di $\sigma_{0,2}$



N.B.

Nelle strutture ingegneristiche è di solito consentita solo la DEFORMAZIONE ELASTICA (occluso al limite elastico). Solo così si possono omettere def. in condizioni di sicurezza

Da $\sigma_{convenuto}$ a σ_{MAX} ⇒ INCRUDIMENTO

INCRUDIMENTO

Il provino si deforma uniformemente e il materiale si rafforza.

STRIZIONE

Superata la σ_{MAX} , la deformazione non è più uniforme, ma è concentrata nella zona centrale del provino. La sezione si restringe gradualmente fino ad arrivare a rottura.



Quando la tensione reale supera il carico massimo di rottura e la sezione resistente si è ridotta troppo, si arriva alla rottura.

FRATTURA

I materiali duttili assorbono energia (in campo plastico) prima di rompersi

I materiali fragili invece ne assorbono poca e si rompono prima.

La rottura avviene in 2 fasi

- Formazione di una cricca
- Propagazione della cricca

MECCANISMI DI RAFFORZAMENTO DEI MATERIALI

Più il materiale è deformabile, tanto più le sue dislocazioni possono muoversi.

Se le dislocazioni sono molto libere di muoversi, il materiale sarà più duttile, ma meno resistente.

Riducendo la mobilità delle dislocazioni, diminuisce la duttilità del materiale, ma diventa più resistente (maggiore carico di rottura)

AFFINAMENTO DEL GRANO

I bordi di grano (BG) sono degli ostacoli al movimento delle dislocazioni. Si controllano le dimensioni del grano

tramite vel. di raffreddamento, affinatori di grano e ricotture.

EQUAZIONE DI
HALL-PETCH

$$\sigma_s = \sigma_0 + k_s d^{-\frac{1}{2}}$$

d = diametro medio grano
 σ_0 e k_s = costanti di un dato materiale

INCAUDIMENTO PER RAFFOZZARE

Le dislocazioni generano altre dislocazioni. Se il carico viene rimosso e poi riapplicato si osserva infatti un aumento del carico di snervamento.

Gli effetti dell'incaudimento possono essere rimossi con un trattamento termico di ricottura.

Durante la def. plastica si modifica la forma del grano.

La struttura originaria si recupera con due processi:

- RECUPERO - rilascio energia di def. attraverso movimento dislocazioni. (diminuiscono in numero).

- RICRISTALLIZZAZIONE - Si crea un nuovo set di grani equiaxiali senza def. residua. La spinta è data dalla differente energia tra il grano deformato e quello non deformato.

⇒ A ricristallizzazione avvenuta, il grano cresce.

CERAMICI COVALENTI

Moto delle dislocazioni è difficile perché il ~~legame~~ legame covalente è forte e fortemente direzionale. Vi è un numero limitato di sistemi di scorrimento.

VERI

Non avviene deformazione per movimento delle dislocazioni (NO STRUTTURA REGOLARE).

I vetri si possono deformare per flusso viscoso (viscosità alta a T ambiente)

Sottoposti a carico, gli atomi scorrono gli uni rispetto agli altri rompendo e riformando legami.

Aumentando la T diminuisce la viscosità (flusso atomi facilitato)

POROSITÀ

E diminuisce all'aumentare della porosità

$$E = E_0 (1 - 1,9P + 0,9P^2)$$

E_0 = modulo elastico ceramico non poroso

P = porosità.

La resistenza a flessione dipende pure dalla porosità

$$\sigma_f = \sigma_0 \exp(-nP)$$

STATISTICA DI WEIBULL

Non si può determinare con precisione il comportamento di materiali fragili, in quanto dipende dai difetti dello stesso. La **PROBABILITÀ** di frattura è legata alla distribuzione dimensionale dei difetti presenti e ~~è legata~~ alla probabilità di trovare cicli di certe dimensioni.

Statisticamente compiamo più grandi osservano a frattura con cicli minori.

FATTORE D'INTENSIFICAZIONE DEGLI SFORSI

$$K = Y \cdot \sigma \cdot (\sigma \cdot \sigma)^{\frac{1}{2}}$$

$$K = \text{TENACITÀ A FRATTURA} = Y \cdot \sigma \cdot (\sigma \cdot \sigma)^{\frac{1}{2}}$$

MATERIALE CERAMICI

Non è possibile definire esattamente la loro resistenza meccanica in quanto dipende dal difetto (cerca) di distribuzione irregolare. Esce dunque da una combinazione di un parametro caratteristico del materiale (tenacità a frattura) e di una variabile (dimensione della carica critica).

ELASTOMERI

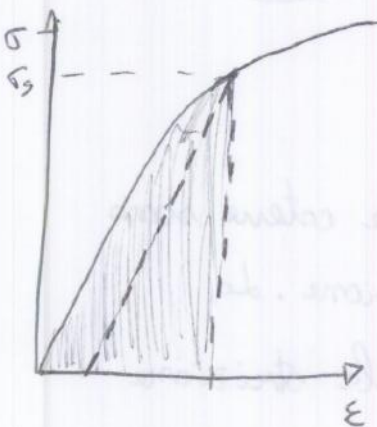
Prima di arrivare a fratture, si allungano del 100% - 800%.
A seconda della mescola però, ~~le~~ le loro proprietà meccaniche sono molto variabili.

Subiscono deformazioni rilevanti SOLO IN CAMPO ELASTICO grazie al cross-link.

Sono amorfi e l'elasticità è entropica. Questi comportamenti naturalmente si osservano sopra la T_g , che però è molto bassa (-50°C ; -90°C)

RESILIENZA

È la capacità del materiale di assorbire energia se sollecitato elasticamente e di restituirla se scaricato



MODULO DI RESILIENZA

$$U = \int_0^{\epsilon_y} \sigma \, d\epsilon = \frac{\sigma_y^2}{2E}$$

TENACITÀ

Capacità di assorbire energia prima della frattura (area sotto la curva σ - ϵ)

INFLUENZA DELLA T

Valutando la resistenza all'urto a diverse T si individua la T (o l'intervallo termico) a cui un materiale passa da duttile a fragile.

N.B.

Bisogna sempre precisare la T di riferimento nella valutazione di duttilità - fragilità.

TRANSIZIONE DUTTILE - FRAGILE

La transizione dipende dalla composizione (tipo di CCA) e dalla microstruttura.

Nei materiali c.c.c. come gli acciai la mobilità delle dislocazioni diminuisce al diminuire della T.

Cio non avviene nei FCC poiché hanno elevate capacità di deformazione plastica a T ambiente che permangono al diminuire della T.

NB

L'affinamento di grano rinforza e abbassa la T di transizione

RESISTENZA A FATICA

Quantifica la risposta di un materiale a sollecitazioni cicliche ripetute fino a provocare la rottura.

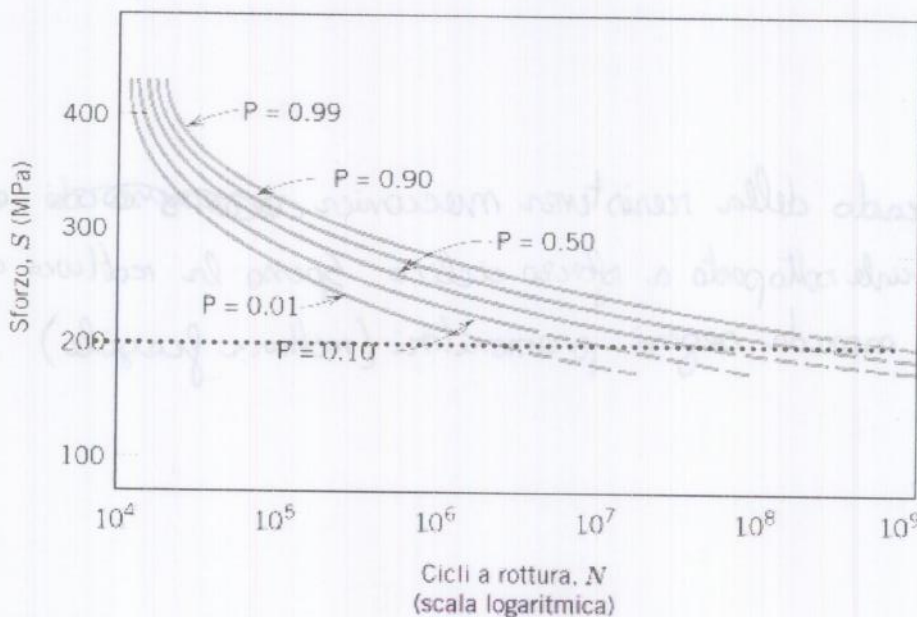
Le sollecitazioni alternate di una prova a fatica possono essere varie. La prova più comune consiste nell'applicare alternativamente una trazione e una compressione. Si valutano il numero di cicli necessari alla rottura del provino in funzione del carico applicato.

Tutto ciò deriva origine a delle curve S-N

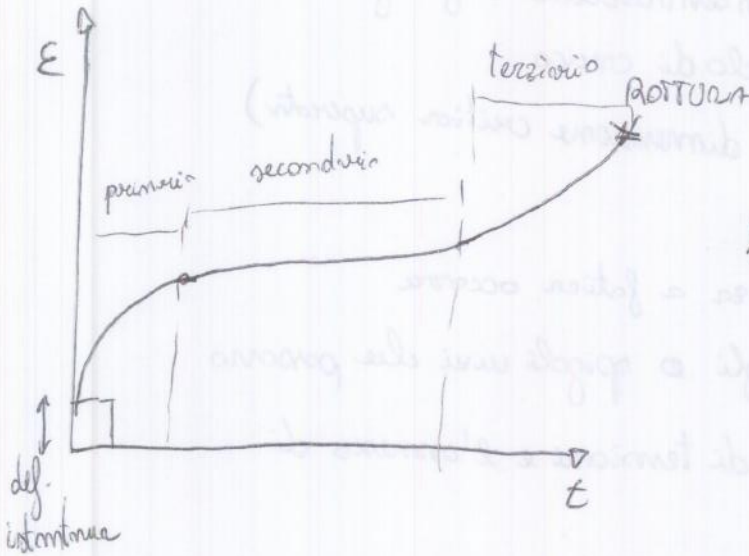
S = ampiezza dello sforzo

N = ~~cicli~~ cicli a rottura (scala logaritmica)

Le curve ottenute sono **PROBABILISTICHE**.



Si ottengono dei grafici $\epsilon - t$ divisi in 4 tratti



1) DEFORMAZIONE ISTANTANEA
si verifica all'atto dell'applicazione del carico.

2) CREEP PRIMARIO = velocità di ~~diffusione~~^{deformazione} decrescente. L'incremento ha una velocità maggiore rispetto al riassetto della struttura.

3) CREEP SECONDARIO = velocità di deformazione costante. velocità di incremento bilanciata con quella di riassetto della struttura. È lo stadio di maggiore interesse ingegneristico.

4) CREEP TERZIARIO = vel. di deformazione crescente, nei B.D.G si formano delle microcavità. Diminuisce dunque la sezione resistente.

I fenomeni di scorrimento viscoso dipendono dalla T .

Resistenza al creep aumenta con E , T_m , dimensioni grana

INFLUENZA DELLA T

La capacità termica, il calore specifico, atomico, molecolare, o unitario, leggermente all'aumentare della T e variano molto in corrispondenza di trasformazioni esotermiche e endotermiche.

DILATAZIONE TERMICA

α = coeff. di dilatazione termica lineare = 10^{-6} K^{-1}

$$\frac{l_t - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T$$

se considero Areae $\Rightarrow \beta = 2\alpha$

se considero volumi $\Rightarrow \gamma = 3\alpha$

La dilatazione termica è dovuta all'aumento della distanza media tra i costituenti del reticolo rispetto alle loro posizioni di equilibrio, e dunque inversamente proporzionale alla forza di legame.

L'espansione termica è dovuta all'ASIMMETRIA della curvatura della depressione del ϕ di potenziale.