

Scienza e Tecnologia dei Materiali

(Prof. CARASSITI)

AVVERTENZA

Voglio chiarire in modo esplicito che questi appunti sono liberi e tutti possono usufruirne GRATUITAMENTE, non mi rendo responsabile dell'uso che ne farete, né della loro correttezza. Sono solo uno studente che condivide il proprio lavoro e quindi questi appunti sono passibili di errori!!!

Chiunque usi questi appunti come fonte di profitto o in modo illecito è interamente responsabile delle sue azioni, voglio sottolineare ancora che tutti potete ottenere gratuitamente questi appunti sul sito:

<http://raid996.altervista.org>

So' che alcune fotocopisterie della zona dell'Università vendono copie dei miei appunti, voglio sottolineare che il costo di tali copie è dovuto esclusivamente al costo di stampa/fotocopiatura poiché non esercito in alcun modo i diritti di copyright!!

Che Dio vi benedica!

Elaborato da:

Renato Campus Giraldo

Supporto didattico:

Materiale del sito del professore

Lucidi proiettati dal professore a lezione

Appunti presi a lezione

SOMMARIO

Cap. 1 : La scelta dei materiali nell'ingegneria	03
1. Introduzione	03
2. Le classificazioni dei materiali	03
3. La scelta dei materiali	04
4. Le caratteristiche meccaniche dei materiali	08
5. Legge di Hooke	09
6. Curva sforzo-deformazione	10
Cap. 2 : Generalità sull'atomo e sui legami atomici	11
1. Cenni storici	11
2. Elettronegatività	11
3. Legami	11
4. Forze ed energia di legame	14
Cap. 3 : Struttura ed organizzazione dei solidi	15
1. Sistemazioni atomiche	15
2. Struttura cristallina	15
3. Strutture amorfe	16
4. Struttura compatta dei materiali	17
5. Struttura compatta dei materiali metallici	18
6. Spazi interstiziali	18
7. Cristalli ionici	19
8. Strutture dei solidi a legami covalenti	19
Cap. 4 : I difetti della struttura cristallina	20
1. Vacanze ed atomi estranei	20
2. Difetti di linea o dislocazioni	20
3. Difetti di superficie: bordo di grano	23
4. Esempi e analogie	23
Cap. 5 : Il cedimento per frattura	26
1. La frattura duttile	26
2. La frattura fragile	26
Cap. 6 : Il cedimento per fatica	30
1. Il carico ciclico	30
2. Progettazione di un componente a fatica	31
3. Approccio micromeccanico	33
Cap. 7 : Scorrimento viscoso a caldo o "Creep"	37
Cap. 8 : I materiali polimerici	38
1. Introduzione	38
2. Materiali polimerici a struttura semplice	40
Cap. 9 : L'eutettico	41
1. Definizione e concetti di base	41
2. Diagramma di fase di equilibrio	42
3. Sistemi eutettici binari	43

Cap. 1 : La scelta dei materiali nell'ingegneria

1. Introduzione

In generale nella scienza dei materiali si può dire che le proprietà dei materiali dipendono dalla microstruttura, che deriva dalla composizione (grani o microparticelle) e dai processi di lavorazione. Il comportamento di un materiale è caratterizzato dalla sua reazione ad una sollecitazione. Si definisce proprietà il comportamento del materiale in una prova. Si possono distinguere in:

- **Proprietà meccaniche** (che riflettono il comportamento dei materiali sottoposti ad un sistema di forze);
- **Proprietà fisiche** (che misurano il comportamento dei materiali sotto l'azione della temperatura, dei campi elettrici o magnetici, o della luce);
- **Proprietà chimiche** (che caratterizzano il comportamento dei materiali in un ambiente più o meno aggressivo).

Le proprietà sono l'interfaccia tra i requisiti dell'utilizzo e la scelta del materiale. Un semplice esempio può essere utile a capire quanto è complesso il processo di selezione, si prenda in esame la scelta di materiali per un recipiente che deve contenere un liquido: vetro, ceramiche, metalli, legno, carta, termoplastica, ecc.

La scelta di un materiale dipende da diversi fattori :

- costo;
- durata ;
- resistenza ;
- aspetto esteriore.

Si consiglia di leggere i lucidi del Professore in merito ai parametri caratterizzanti le tecnologie dei materiali.

2. La classificazione dei materiali

E' conveniente classificare i materiali in vaste categorie per studiare proprietà e caratteristiche. La maggior parte delle caratteristiche comuni dei materiali di una categoria deriva dalla struttura e dalla natura dei legami tra gli atomi. Convenzionalmente i materiali vengono classificati in sei ampie classi mostrate in figura: metalli, polimeri e elastomeri, ceramici e vetri e compositi.

I materiali inclusi in una particolare classe presentano caratteristiche comuni quali: simili proprietà, simili schemi di processo e, spesso, simili applicazioni.

I **metalli** hanno un relativamente alto modulo di Young. Possono essere resi più resistenti legandoli, attraverso trattamenti a caldo o trattamenti meccanici pur mantenendo comunque una certa duttilità. A causa in parte della loro duttilità hanno scarsa resistenza alla fatica e rispetto alle altre classi di materiali sono i meno resistenti alla corrosione.

I **ceramici e i vetri** hanno anch'essi un elevato modulo di Young e a differenza dei metalli sono fragili.

Sono particolarmente fragili se sottoposti a sforzi in tensione mentre in compressione presentano un carico a rottura circa 15 volte superiore.

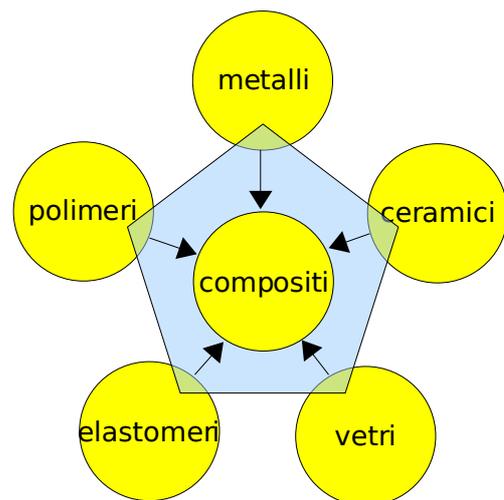
A causa del fatto che non sono duttili sono molto sensibili agli sforzi concentrati e agli sforzi superficiali. Mentre i materiali duttili riescono a distribuire gli sforzi attraverso la deformazione i ceramici e i vetri non presentano questa capacità. Ciò nonostante presentano caratteristiche interessanti. Sono rigidi, duri, resistenti all'abrasione e alla corrosione e conservano le loro caratteristiche alle alte temperature. Sono da considerarsi un'importante classe di materiali per l'ingegneria.

I **polimeri e gli elastomeri** hanno un basso modulo di Young orientativamente 50 volte inferiore a quello dei metalli ma possono comunque essere resistenti quasi come i metalli. Una conseguenza di questa capacità è che le deformazioni elastiche sono elevate e se sottoposti a carico possono nel tempo assumere un assetto permanente.

Le loro proprietà dipendono molto dalla temperatura tanto che un polimero tenace e flessibile a 20°C può divenire fragile alla temperatura di 4°C o deformarsi rapidamente in acqua bollente a 100°C.

Ciò rende le applicazioni con questa classe di materiali limitate sotto i 200°C. Ciò nonostante trovano un largo utilizzo e questo grazie alle loro molteplici proprietà. Hanno un'importante resistenza per unità di peso comparabile con quella dei metalli, sono facili da modellare in forme più o meno complicate e facilmente assemblabili grazie alla loro elasticità e se vengono accuratamente fabbricati non necessitano particolari processi di finitura. Sono resistenti alla corrosione e presentano un basso coefficiente d'attrito.

I **compositi** combinano le proprietà più interessanti delle altre classi di materiali pur comunque mantenendo degli svantaggi.



Fondamentalmente sono duri, resistenti e tenaci. La maggior parte dei compositi utilizzati nell'ingegneria sono di matrice polimerica, epossidica o poliestere normalmente rinforzati con fibre di vetro, carbonio o Kevlar. Non possono essere utilizzati oltre i 250°C a causa dell'ammorbimento della matrice polimerica anche se a temperatura ambiente hanno delle eccellenti prestazioni. In generale sono materiali costosi e che presentano una difficile predisposizione ad essere formati e saldati.

Quindi nonostante le loro interessanti proprietà in generale vengono utilizzati solo quando l'aumento delle prestazioni dovuto al loro utilizzo giustifica i costi aggiuntivi che ne derivano.

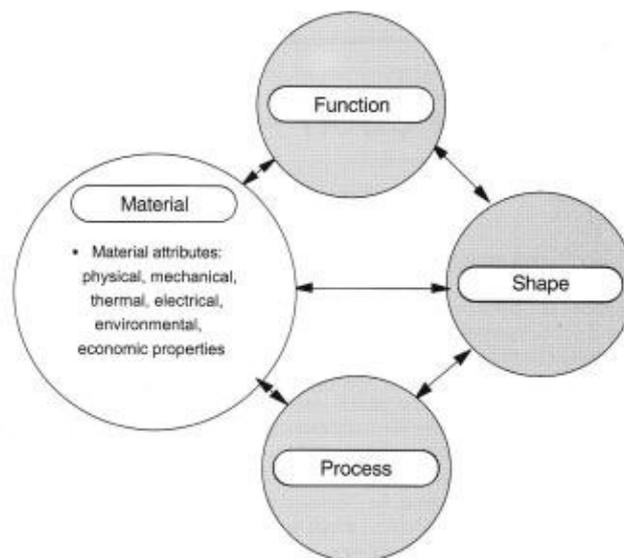
3. La scelta dei materiali

Vediamo una suddivisione grafica dei materiali di diverso tipo da quella vista in precedenza. Caratteristiche meccaniche, termiche, elettriche, chimiche, caratteristiche di processo, disponibilità e costo del materiale, ripercussioni ambientali derivanti dal loro utilizzo etc.

Questo elenco di attributi viene comunemente chiamato *profilo delle proprietà* e il processo di selezione è volto alla ricerca del miglior abbinamento fra questo profilo delle proprietà e le esigenze di progetto.

Questo processo ha origine da due principali fasi: *una selezione e classifica, e un'informazione di supporto*.

Una scelta non affetta da errori presuppone che nessun materiale sia trascurato fino a quando non si dimostra la sua inutilità. Il processo di selezione (screening) serve ad operare una prima scrematura eliminando quei materiali che presentano delle caratteristiche che risiedono fuori dai limiti di progetto.



Una analisi delle proprietà comunque non ci aiuta ad ordinare i materiali rimasti, per fare ciò occorre servirsi di un criterio di ottimizzazione. Ci vengono in aiuto degli indici, sviluppati di seguito, che ci permettono di stabilire quanto un materiale che rispetta i limiti per quanto riguarda le caratteristiche è in grado di svolgere correttamente una funzione.

Un classico indice che si utilizza è la rigidità specifica $\frac{E}{\rho}$ e il carico specifico $\frac{\sigma_f}{\rho}$ con σ_f il carico a rottura, come questo ce ne sono altri che ci aiutano a destinare un tipo di materiale ad una certa funzione.

Il risultato della selezione è una lista di materiali che soddisfano i requisiti di progetto, per continuare a procedere ci servirà un profilo dettagliato di ciascuno ossia *le informazioni di supporto*.

Queste informazioni differiscono molto dalle informazioni utilizzate durante lo screening, normalmente sono informazioni di tipo descrittivo, grafico, diagrammi che trattano precedenti casi di studio riguardo ad esempio approfondimenti sul comportamento a corrosione in un particolare ambiente, informazioni sulla disponibilità commerciale, prezzo, impatto ambientale etc.

Queste informazioni possono essere fornite dai manuali, fornitori, dati informatici, internet e riducono drasticamente il numero delle possibili scelte portando alla scelta finale.

Spesso può accadere che la scelta del materiale finale dipenda dalle condizioni locali in particolar modo da perizie o apparecchiature disponibili al momento, dai fornitori locali e così via. Per approfondire il metodo di ricerca occorre ora specificare meglio quali sono le *funzioni, gli obiettivi e i vincoli* che interessano il materiale in questione.

Un qualsiasi componente è chiamato a eseguire una qualsiasi funzione quale: resistere ai carichi, alla pressione, trasmettere il calore e così via. Il progettista ha invece la necessità di raggiungere un obiettivo come: ridurre i costi al minimo, ridurre il peso, massimizzare la sicurezza o una combinazione di questi. Tutte queste necessità devono però rientrare all'interno del dominio imposto dai vincoli come ingombro, intervallo di temperature, condizioni dell'ambiente di lavoro etc.

La tabella seguente ci aiuta ad individuare le funzioni, gli obiettivi e i vincoli che costituiscono le condizioni al contorno della scelta.

FUNZIONE	Cosa deve fare il componente?
OBIETTIVO	Cosa deve essere massimizzato o minimizzato?
VINCOLI	Quali condizioni devono essere soddisfatte?

Alcuni vincoli si trasformano direttamente in *limiti delle proprietà del materiale* come ad esempio il problema dell'intervallo di temperatura: se questo supera la temperatura di servizio del materiale quest'ultimo verrà automaticamente scartato, altri vincoli invece, come rigidità e resistenza vengono trattati diversamente. A questi non corrisponde un unico metodo per soddisfarli, la rigidità desiderata infatti può dipendere dalla proprietà intrinseca del materiale come il modulo di Young ma altresì dalla forma e configurazione dell'oggetto costruito con quel materiale, si potrà infatti aumentare la rigidità aumentando la sezione o conferendo una forma opportuna (cubica, cilindrica, tubolare).

La combinazione delle proprietà che caratterizzano le prestazioni di un materiale viene riassunta attraverso l'*indice dei materiali*. In generale si distinguono: gli *elementi strutturali*, componenti che ricoprono una funzione fisica, capaci quindi di sopportare i carichi, trasmettere calore, accumulare energia e così via.

Il progetto di elementi strutturali si suddivide in tre concetti: i requisiti funzionali, la geometria e le proprietà dei materiali di cui sono costituiti. La prestazione dell'elemento in questione è caratterizzato dalla seguente relazione:

$$p = f [(\text{requisiti funzionali}); (\text{parametri geometrici}); (\text{proprietà materiali})] .$$

Dove p descrive qualche aspetto delle prestazioni del componente: massa, volume, costo, vita ed f significa "funzione di". L'ottimo si basa sulla scelta di materiali e geometrie che massimizzano o minimizzano p . I tre gruppi di variabili possono dirsi separabili quando l'equazione può essere scritta come:

$$p = f_1(F) f_2(G) f_3(M)$$

con f_1 , f_2 , f_3 funzioni indipendenti.

Quando è possibile separarle la scelta del materiale diviene indipendente dai dettagli del progetto, in questo modo la combinazione ottimale dei materiali può essere identificata senza risolvere interamente i problemi di progetto. Ciò comporta un'enorme semplificazione: le prestazioni di tutte le F e le G sono massimizzate massimizzando $f_3(M)$ che viene chiamato il *coefficiente d'efficienza del materiale* o brevemente *indice del materiale*. $f_1(F)$ e $f_2(G)$ si riferiscono invece all'*efficienza strutturale* o all'*indice d'efficienza*.

Gli indici dei materiali

Ogni combinazione di funzioni, obiettivi e vincoli porta all'indice di materiale in quanto quest'indice è caratteristico di una particolare combinazione. Vediamo un riassunto dei parametri primari e secondari e come vengono usati per trovare indici caratteristici dei materiali.

Parametri di Base

- **Densità (Mg m⁻³) :**
 - Proprietà Intrinseca del materiale
 - Dipende principalmente dal peso atomico e dalla struttura cristallina
- **Rigidità (Modulo di Young, Modulo di Taglio) (GPa) :**
 - Resistenza alla deformazione elastica
 - Proprietà Intrinseca del materiale:
 - Dipende dalla forza del legame atomico
- **Resistenza (Resistenza allo snervamento, Resistenza a rottura) (MPa o GPa) :**
 - Resistenza allo scorrimento plastico
 - Proprietà Estrinseca del materiale
 - Dipende molto fortemente dalla microstruttura del materiale (movimento delle dislocazioni) .
- **Tenacità (Tenacità a frattura: MPa m^{1/2}, allungamento a frattura: %, energia a frattura: J, Jm⁻²) :**
 - Resistenza alla frattura
 - Proprietà Estrinseca del materiale:
 - Dipende molto fortemente dalla microstruttura del materiale (comportamento all'apice delle cricche)

Parametri secondari:

- **Proprietà a Temperatura (Creep, ossidazione)**
 - Punto di fusione
 - Resistenza a ossidazione
 - Stabilità microstrutturale
 - Composti intermetallici
- **Resistenza a Fatica (Iniziazione e crescita delle cricche nelle sollecitazioni cicliche)**
 - Durezza
 - Struttura cristallina/meccanismi di indurimento
 - Propagazione delle cricche nelle microstrutture
- **Resistenza alla Corrosione**
 - Elettrochimica dei materiali di base, proprietà dei film ossidici
 - Microstruttura di regioni locali di differente composizione chimica
- **Formabilità**
 - Fondibilità
 - Punto di fusione, fluidità
 - Forgiabilità
 - Scorrimento a pressione e a temperatura
 - Saldabilità
 - Lavorabilità
 - Modifiche di microstruttura
- **Costi**
 - Ciclo di vita globale
- **Strategicità**
 - Unicità del materiale per le funzioni desiderate
 - Disponibilità del materiale

Nelle tabelle seguenti si riassumono la procedura per ricavare gli indici del materiale e quelli più comuni.

Step	Action
1	Define the design requirements: (a) Function: what does the component do? (b) Objective: what is to be maximized or minimized? (c) Constraints: essential requirements which must be met: stiffness, strength, corrosion resistance, forming characteristics. . .
2	Develop an equation for the objective in terms of the functional requirements, the geometry and the material properties (the objective function).
3	Identify the free (unspecified) variables.
4	Develop equations for the constraints (no yield; no fracture; no buckling, etc.).
5	Substitute for the free variables from the constraint equations into the objective function.
6	Group the variables into three groups: functional requirements, F , geometry, G , and material properties, M , thus Performance characteristic $\leq f_1(F)f_2(G)f_3(M)$ or Performance characteristic $\geq f_1(F)f_2(G)f_3(M)$
7	Read off the material index, expressed as a quantity M , which optimizes the performance characteristic.

Function, Objective and Constraint	Index
Tie, minimum weight, stiffness prescribed	$\frac{E}{\rho}$
Beam, minimum weight, stiffness prescribed	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$
Beam, minimum weight, strength prescribed	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$
Beam, minimum cost, stiffness prescribed	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
Beam, minimum cost, strength prescribed	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{C_m \rho}$
Column, minimum cost, buckling load prescribed	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
Spring, minimum weight for given energy storage	$\frac{\sigma_y^2}{E \rho}$
Thermal insulation, minimum cost, heat flux prescribed	$\frac{1}{\lambda C_m \rho}$
Electromagnet, maximum field, temperature rise prescribed	$\frac{1}{\kappa C_p \rho}$

(ρ = density; E = Young's modulus; σ_y = elastic limit; C_m = cost/kg; λ = thermal conductivity; κ = electrical conductivity; C_p = specific heat)

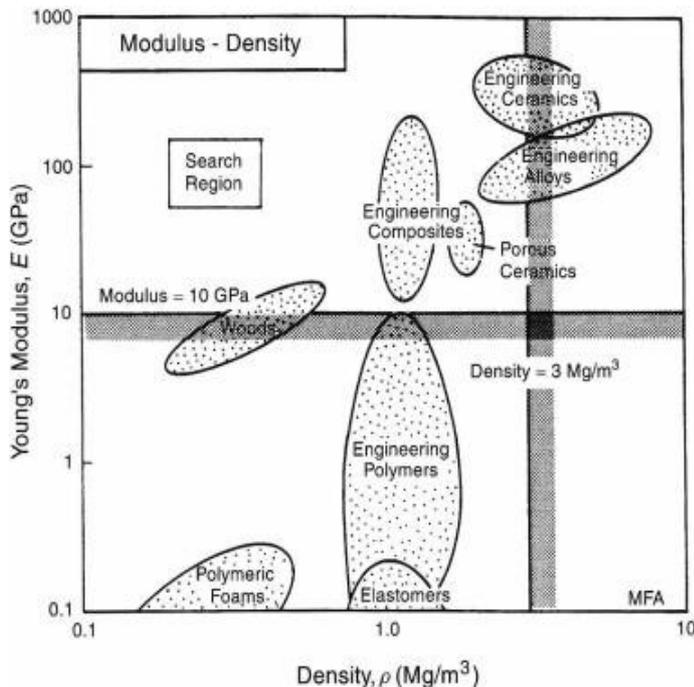
Ad esempio considerando la relazione che descrive il comportamento della colonna di diametro $2r$ sottoposta a compressione:

$$E = \frac{4 \cdot F \cdot l^2}{n \cdot \pi^3 \cdot r^4}$$

si può porre in evidenza come la restrizione per il raggio r impone un limite inferiore al modulo E e l'imposizione di un limite alla densità impone che $\rho < \rho^*$.

Una modo per applicare questi limiti è illustrato dalla figura a fianco dove viene illustrata sul piano E - ρ . Il risultato del processo di ottimizzazione sarà limitato quindi dalla finestra data dall'intersezione delle linee limite.

Proprietà meno quantificabili come resistenza a corrosione, ad usura possono tutti appartenere alla classe dei limiti primari e prendono la seguente forma: $P > P^*$, $P < P^*$,



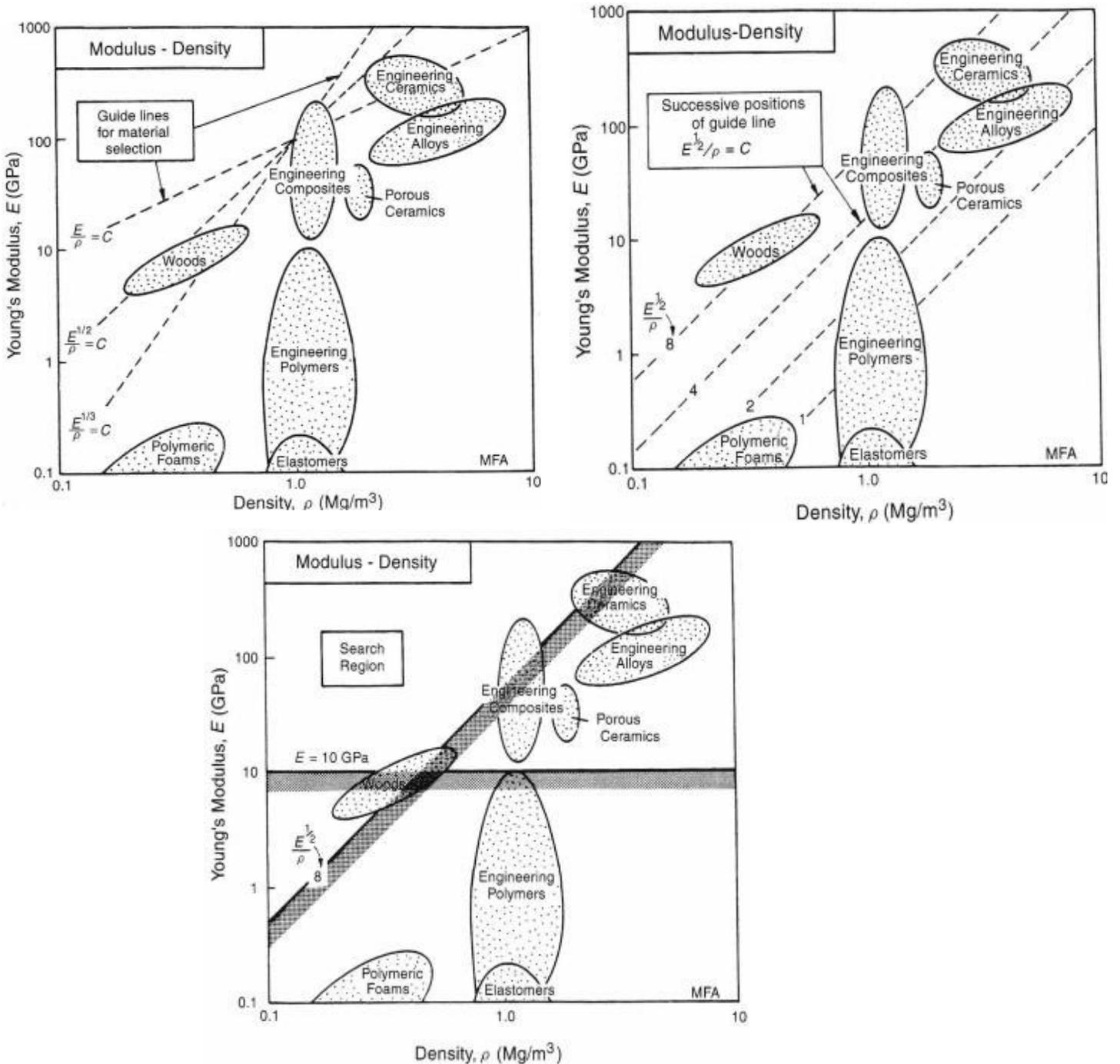
dove P è la proprietà e P^* è il valore critico stabilito dal progetto, tuttavia non è necessario applicare questi limiti in modo troppo precipitoso, spesso infatti possiamo operare oltre i limiti ricorrendo ad opportuni metodi di protezione.

Vediamo qualche esempio, la prima figura a sinistra di cui sotto mostra la relazione fra il modulo E e la densità ρ in scala logaritmica, gli indici di materiale E/ρ ed E^{1/3}/ρ possono essere rappresentati come rette. La condizione:

$$E/\rho = C \text{ o in forma logaritmica } \log E = \log \rho + \log C$$

è una famiglia di rette parallele ad ognuna delle quali corrisponde un valore di C e possono essere chiamate linee guida nel senso che danno l'inclinazione alla famiglia di rette parallele in funzione dell'indice considerato. In questo modo è più facile individuare quel gruppo di materiali che ottimizza le prestazioni per ogni geometria di carico: ogni materiale che giace ad esempio sopra la linea E^{1/2}/ρ è compatibile per applicazioni dove si necessita leggerezza e rigidità (vedere esercitazioni per il procedimento dettagliato nelle varie condizioni).

La figura a destra mostra una serie di linee che corrispondono all'indice M=E^{1/2}/ρ con valori da 1 a 8 con unità GPa^{1/2} [Mg m⁻³]. Valori di M crescenti corrispondono a pesi decrescenti dell'asta considerata. Il gruppo di materiali che soddisfano la nostra ricerca può essere isolato individuando l'intersezione fra la retta dell'indice di materiale e la retta che esprime limiti di proprietà come ad esempio E>10Gpa (ultima figura in basso).



4. Le caratteristiche meccaniche dei materiali

Vediamo la reazione di un provino sottoposto a trazione, si ha una situazione come in figura. Se l'oggetto fosse perfettamente rigido non potrebbe deformarsi ma non è ovviamente il caso, si ha che le assunzioni di continuità nella fisica del materiale si discosta notevolmente dalla realtà.



Definiamo la TENSIONE NORMALE:

$$\sigma_r = \frac{F}{A}$$

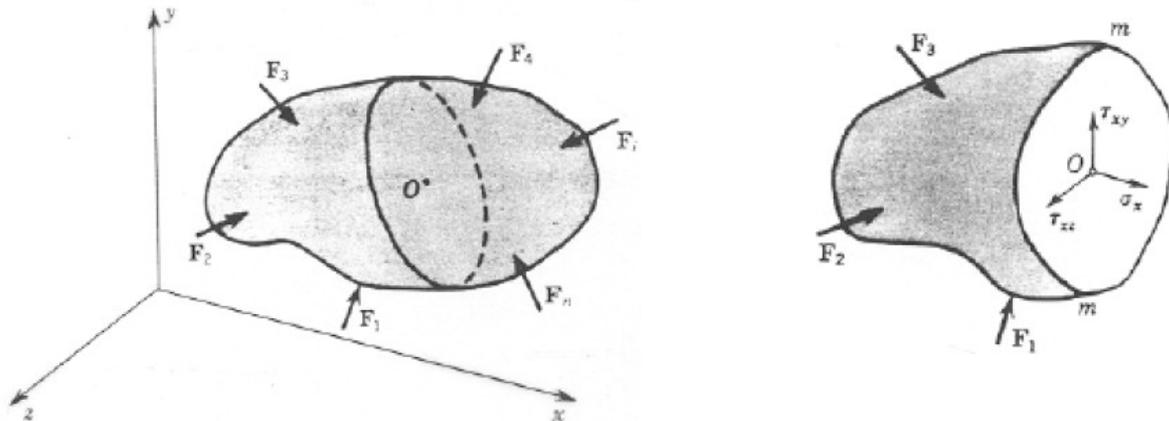
questa definizione non considera che il materiale può non occupare tutta l'area A considerata (l'acciaio è uno dei materiali che più rispetta il concetto di omogeneità e continuità della fisica). Lo sforzo non è misurabile e si ottiene attraverso la misura della forza applicata divisa per l'area di applicazione, si ha che la dimensione dello sforzo è in [N/m²] oppure in [Pa]. Infine poiché i materiali si deformano si ha una certa difficoltà a conoscere lo sforzo perché cambia anche la direzione, si definisce quindi lo SFORZO NOMINALE (*engineering stress*):

$$\sigma_N = \frac{F}{A_0}$$

da cui la relazione tra sforzo e sforzo nominale:

$$\sigma_N = \sigma_r \cdot \frac{A}{A_0}$$

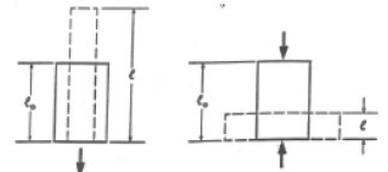
Se consideriamo un corpo continuo soggetto ad un sistema di forze, corpo di cui consideriamo una sezione:



in un punto O qualsiasi di questa sezione si possono decomporre le forze in 2 componenti giacenti nel piano di sezione e 1 normale ad esso, si definiscono così le componenti dello sforzo: { $\sigma_x; \sigma_y; \sigma_z; \tau_{xy}; \tau_{xz}; \tau_{yz}$ }.

Considerata una barra di lunghezza l_0 sottoposta ad allungamento $\Delta l = l - l_0$ si definisce allungamento nominale (*engineering strain*):

$$\epsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0}$$



Il coefficiente di Poisson

Si fornisce per ogni direzione indipendente ed'è la relazione tra sforzo e allungamento, in tutto risultano 21 costanti elastiche indipendenti che diminuiscono se ci sono simmetrie di qualche tipo:

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = -\frac{\epsilon_z}{\epsilon_x}$$

La variazione relativa di volume Δ in una sbarra sottoposta a trazione:

$$\Delta = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{(V - V_0)}{V_0}$$

Tenendo conto delle definizioni di deformazioni relative e di coefficiente di Poisson, si ha:

$$\begin{aligned} \Delta &= \frac{[(x_0 + \Delta x)(y_0 + \Delta y)(z_0 + \Delta z) - x_0 y_0 z_0]}{(x_0 y_0 z_0)} = \\ &= \frac{[(x_0 + x_0 \epsilon_x)(y_0 + y_0 \epsilon_y)(z_0 + z_0 \epsilon_z) - x_0 y_0 z_0]}{(x_0 y_0 z_0)} = \\ &= (1 + \epsilon_x)(1 + \epsilon_y)(1 + \epsilon_z) - 1 = (1 + \epsilon_x)(1 - \nu \epsilon_x)(1 - \nu \epsilon_x) - 1 \end{aligned}$$

Limitandosi alle piccole deformazioni, si possono trascurare i termini infinitesimi di secondo ordine e superiore. Si ha quindi:

$$\Delta = \epsilon_x (1 - 2\nu)$$

5. La legge di Hooke

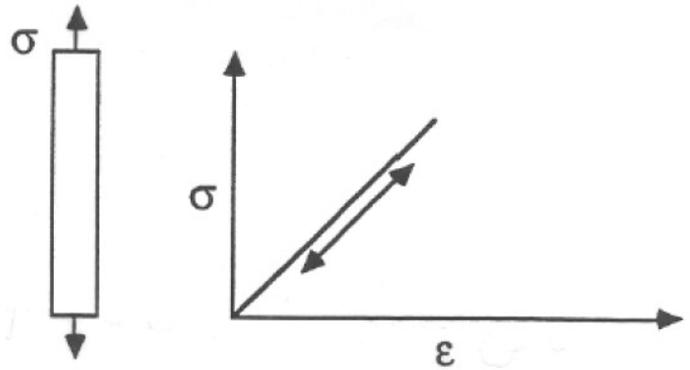
Tensione uniassiale

La legge di Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

con E il modulo di Young.

Questa espressione della legge di Hooke è quella più usata e riguarda materiali isotropi per i quali consideriamo uno stato di tensione esterna e uniassiale. Se consideriamo in vece le tensioni interne al materiale possiamo scrivere la forma generalizzata della legge di Hooke che vale per i materiali anisotropi:



$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= C_{11}\epsilon_{xx} + C_{12}\epsilon_{yy} + C_{13}\epsilon_{zz} + C_{14}\gamma_{xy} + C_{15}\gamma_{xz} + C_{16}\gamma_{yz} \\ \sigma_{yy} &= C_{21}\epsilon_{xx} + C_{22}\epsilon_{yy} + C_{23}\epsilon_{zz} + C_{24}\gamma_{xy} + C_{25}\gamma_{xz} + C_{26}\gamma_{yz} \\ \sigma_{zz} &= C_{31}\epsilon_{xx} + C_{32}\epsilon_{yy} + C_{33}\epsilon_{zz} + C_{34}\gamma_{xy} + C_{35}\gamma_{xz} + C_{36}\gamma_{yz} \\ \tau_{yz} &= C_{41}\epsilon_{xx} + C_{42}\epsilon_{yy} + C_{43}\epsilon_{zz} + C_{44}\gamma_{xy} + C_{45}\gamma_{xz} + C_{46}\gamma_{yz} \\ \tau_{xz} &= C_{51}\epsilon_{xx} + C_{52}\epsilon_{yy} + C_{53}\epsilon_{zz} + C_{54}\gamma_{xy} + C_{55}\gamma_{xz} + C_{56}\gamma_{yz} \\ \tau_{xy} &= C_{61}\epsilon_{xx} + C_{62}\epsilon_{yy} + C_{63}\epsilon_{zz} + C_{64}\gamma_{xy} + C_{65}\gamma_{xz} + C_{66}\gamma_{yz} \end{aligned}$$

Taglio semplice

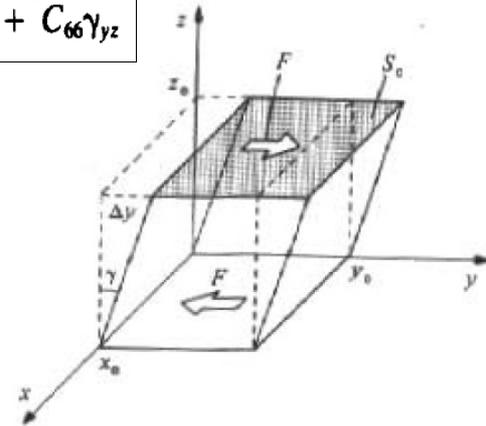
Consideriamo una barra attaccata sulla superficie inferiore al piano fisso e su cui applichiamo sulla superficie superiore una forza di taglio semplice:

$$\tau = \frac{F}{S_0}$$

Questo produce una deformazione definita dall'angolo di taglio γ , si ha:

$$\text{tg } \gamma = \frac{\Delta y}{z_0} \Rightarrow \gamma = \frac{\Delta y}{z_0}$$

applicando la legge di Hooke si ha che: $\tau = G \cdot \text{tg } \gamma \approx G \cdot \gamma$.



Compressione uniforme

Il terzo tipo di deformazione semplice, in base alla legge di Hooke si ha che la variazione di volume ΔV è proporzionale, entro i limiti di linearità, alla pressione: $p = -K \cdot \frac{\Delta V}{V}$.

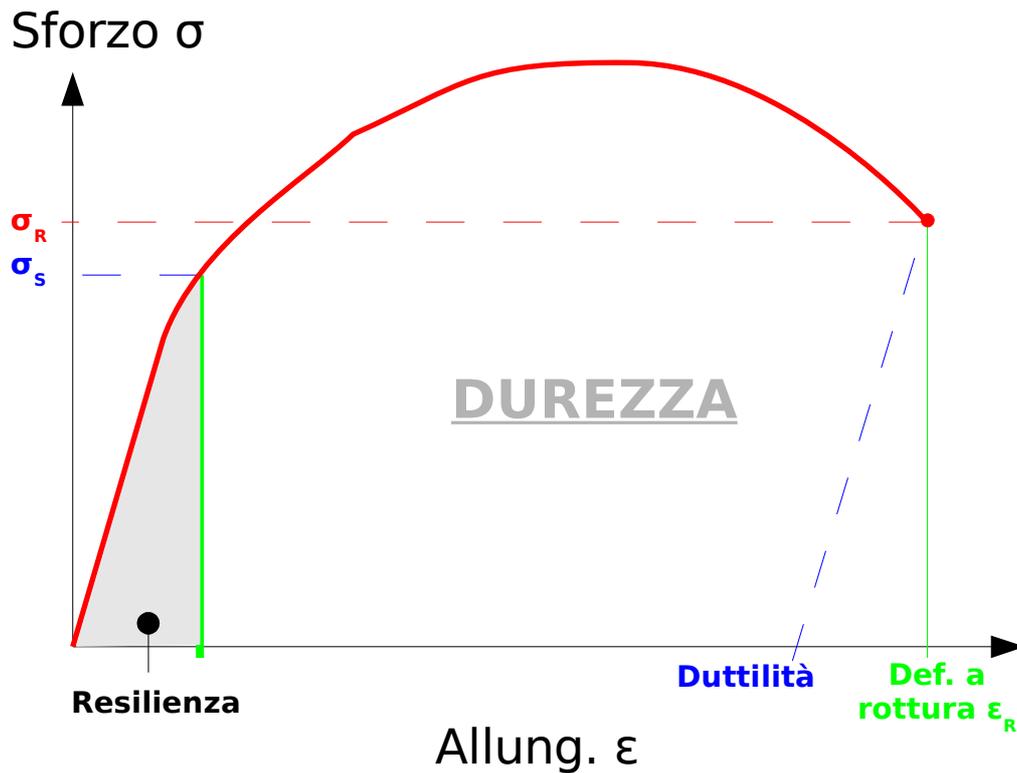
Legame tra le costanti

Sono state definite le tre costanti E, G e K a cui si aggiunge anche il coefficiente di Poisson, ma di queste 4 solo 2 sono indipendenti, le altre infatti sono legate dalle relazioni:

$$E = 3K \cdot (1 - 2\nu) \quad ; \quad E = 2G \cdot (1 + \nu)$$

Nel caso di corpi anisotropi le costanti elastiche sono 21.

6. La curva sforzo-deformazione



Definiamo:

- **modulo di Young**, o modulo di elasticità: $E = \frac{d\sigma_n}{d\varepsilon_n}$ con $\varepsilon_0 = 0$, questi valori devono essere considerati nel tratto lineare ed è una caratteristica intrinseca del materiale;
- **carico di snervamento** σ_S che fornisce il valore del carico nominale teorico a partire del quale il materiale si inizia a deformare plasticamente, siccome è difficile stabilire un valore preciso per tale grandezza si assume un carico di snervamento convenzionale che corrisponde ad un allungamento permanente dello 0,2% della lunghezza totale;
- **carico di rottura** σ_R che fornisce il carico massimo sopportabile dal provino un istante prima della rottura;
- **l'allungamento a rottura** ε_R che è fondamentale nel definire la duttilità del materiale;
- **la durezza**, data dal valore numerico dell'area sottesa dalla curva;
- **la resilienza**, rappresentata dall'area sottesa della parte lineare della curva e che fornisce una misura della resistenza a rottura per flessione dinamica.

Cap. 2 : Generalità sull'atomo e sui legami atomici.

1. Cenni storici sul modello atomico

Il primo modello planetario dinamico introdotto fu quello di Rutherford, a cui poi venne ad aggiungersi il modello quantistico di Bohr, questo era caratterizzato da stati stazionari, dalla quantizzazione del momento angolare dell'elettrone, dei raggi delle orbite, dell'energia dell'elettrone.

Sommerfeld introdusse poi un altro modello basato su orbite ellittiche degli atomi e dell'introduzione dei numeri quantici m ed ms . Infine il modello ondulatorio considera gli elettroni delocalizzati su orbitali che possono immaginarsi come nubi di elettricità.

Sia nel modello quantistico che in quello ondulatorio, ciascun elettrone dell'atomo è caratterizzato da quattro numeri quantici, che rappresentano i gradi di libertà dell'elettrone. Per capire come gli elettroni si dispongono negli orbitali, si possono considerare le seguenti regole:

- In ogni orbitale non vi possono essere più di due elettroni (principio di Pauli)
- Se in un orbitale vi sono due elettroni, essi devono avere spin opposto
- L'elettrone occupa l'orbitale che ha la minore energia, se questo non è completo di due elettroni
- Avendo a disposizione due orbitali con la stessa energia, uno con un elettrone e l'altro vuoto, l'elettrone va in quello vuoto con spin parallelo a quello dell'altro elettrone (regola di Hund).

2. Elettonegatività

La scala delle elettonegatività e l'elenco degli elementi ordinati secondo la crescente capacità di ciascuno di essi di attrarre a sé gli elettroni che condivide in un legame con un atomo campione, che nella scala Pauling è l'atomo di idrogeno. Sull'elettonegatività di un atomo influiscono la carica nucleare ed il raggio atomico: essa cresce all'aumentare della prima e al diminuire del secondo.

3. Legami

La formazione del legame chimico è dovuta alla tendenza spontanea di due o più atomi uguali o diversi a legarsi ridistribuendo i propri elettroni periferici in strati o livelli il più possibile completi.

Questa formazione avviene inoltre con liberazione di energia ovvero, gli aggregati formati hanno energia più bassa di quella degli atomi separati. Esistono diversi tipi di legame caratterizzati da:

- Distribuzione degli elettroni soprattutto periferici attorno ai nuclei degli atomi che partecipano al legame
- Forza del legame, rivelata dalla temperatura necessaria per fondere il materiale e rompere i legami (energia liberata al momento della formazione del legame è, infatti, uguale a quella necessaria per romperlo)

Quando due o più atomi formano legami si hanno:

- Forze coulombiane attrattive tra il nucleo di ciascun atomo (positivo) e l'atmosfera elettronica dell'altro atomo (negativa);
- Forze coulombiane repulsive fra i nuclei dei due atomi (entrambi positivi) oltre fra le loro atmosfere elettroniche (ambidue negative).

I tipi di legami che saranno discussi a seguito sono: il legame ionico, covalente, metallico e di Van Der Waals.

Legame ionico.

Il legame ionico è un legame essenzialmente di natura elettrostatica, quando due atomi diversi si legano a formare una molecola, in generale i loro valori di elettonegatività sono diversi. È chiaro quindi che la nube elettronica risulterà più densa sull'atomo più elettonegativo e meno densa sull'altro. Nasce una attrazione elettrostatica tra i due centri di carica che si può pensare essere la parte elettrostatica del legame.

In questo modo risulta chiaro che il legame ionico consiste in un passaggio di un elettrone da un atomo a basso valore di elettonegatività ad uno con un alto valore di elettonegatività che tende a strapparglielo.

La formazione di un composto ionico è però possibile soltanto se è accompagnata dalla formazione di un cristallo. Questo tipo di interazioni è caratterizzato dalla cosiddetta **energia reticolare**.

Il campo elettrostatico dovuto ad una particella carica è a simmetria sferica, perciò la natura del legame ionico è adirezionale. Per questo motivo gli atomi di un cristallo ionico si sistemano in modo da disporre accanto ad ogni ione negativo, quanto più ioni positivi sia possibile.

I cristalli ionici sono cattivi conduttori di elettricità, in quanto non hanno elettroni liberi di muoversi che consentano il trasporto di cariche elettriche e non sono lavorabili attraverso deformazione plastica poiché non consentono lo spostamento di piani reticolari. Infatti se due piani del cristallo di cloruro di sodio (NaCl) vengono spostati tra loro si trovano sovrapposti ioni dello stesso segno che si respingono in maniera molto forte e provocano la rottura del cristallo.

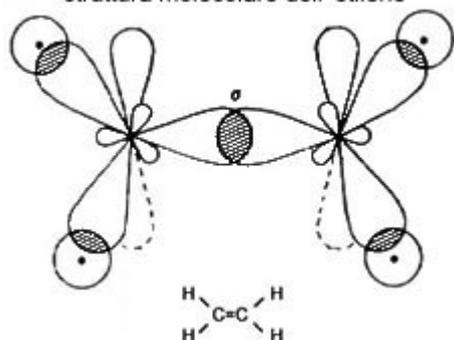
Legame covalente

Il legame covalente è un **legame ad elevata energia** che unisce tra loro atomi uguali o diversi, i quali condividono una o più coppie di elettroni di valenza provenienti pariteticamente dai due atomi. Gli orbitali originari degli elettroni condivisi si sovrappongono formando uno solo; è dunque evidente che in ciascuna coppia condivisa, gli elettroni dovranno avere spin opposto per collocarsi sullo stesso orbitale; inoltre gli orbitali atomici dei due atomi, ricoprendosi, creano un addensamento di carica negativa e tra i due nuclei positivi, che costituisce legame tra i due atomi (si generano, infatti, all'avvicinarsi dei due atomi forze attrattive tra la nube elettronica dell'uno ed il nucleo dell'altro, che ad una determinata distanza, detta distanza di legame, vincono le forze repulsive tra nucleo e nucleo).

Si distinguono due tipi di legame covalente:

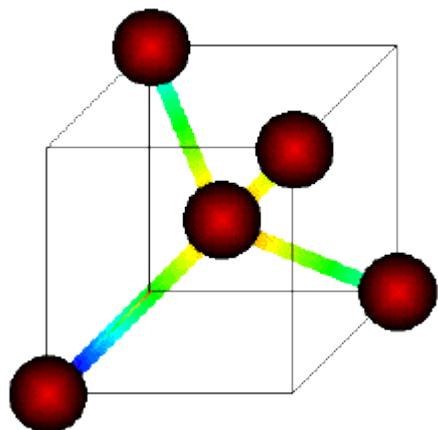
- Tipo σ : la zona di ricopertura degli orbitali che danno luogo legame si trova sulla retta che congiunge i 2 nuclei
- Tipo π : la zona di ricopertura dei due orbitali si trova al di fuori della congiungente dei due nuclei.

struttura molecolare dell' etilene



Nel caso in cui i due atomi mettano in comune 2 o 3 elettroni ciascuno si hanno rispettivamente legami doppi e tripli. Se un atomo è interessato da più legami covalenti, le nubi elettroniche degli elettroni condivisi si respingono e tendono a porsi alla massima distanza reciproca possibile; per esempio, nel caso di un atomo legato ad altri 4 da legami covalenti, si ha che gli orbitali di legame si dispongono nello spazio a formare un tetraedro con un atomo centrale.

Struttura tetraedrica



Se in una molecola esiste un legame σ ed uno o due legami π (cioè un doppio o triplo legame) la ricopertura degli orbitali σ risulta sempre minore di quella degli orbitali π e dunque il legame σ è più forte di quello π .

Da quanto detto si può facilmente capire che il legame covalente è un legame fortemente direzionale, che si manifesta cioè solo in determinate regioni dello spazio.

Se gli atomi che si legano con legame covalente sono diversi (e hanno quindi diversi valori di elettronegatività) la molecola che si forma non è più elettricamente simmetrica e si verifica un addensamento di carica elettrica sull'atomo più elettronegativo, con formazione di un polo elettrico. Di conseguenza i due atomi sono legati, oltre che dagli elettroni condivisi, anche dalla attrazione elettrostatica fra la parte positiva e quella negativa della molecola. Il legame covalente non è quindi un legame puro come l'omeopolare, ma è un legame misto: in parte di tipo atomico (elettroni in comune), in parte elettrostatico.

Il legame covalente è frequentissimo nei composti organici in molti materiali solidi (detti appunto solidi covalenti che di parentesi e da esso dipendono alcune caratteristiche di questi materiali).

Legame metallico

I metalli rappresentano i tre quarti degli elementi, hanno proprietà caratteristiche che li differenziano dalle altre sostanze e di conseguenza si ipotizza un nuovo tipo di legame: il legame metallico.

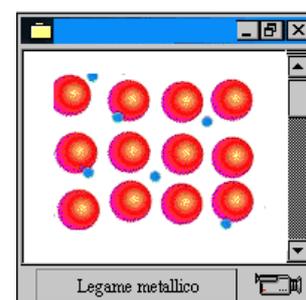
Si ricordano alcune caratteristiche dei metalli, che verranno più accuratamente approfondite nel resto del corso:

- Alta conducibilità elettrica
- Grande conducibilità termica
- Lucentezza
- Caratteristiche meccaniche come la duttilità e la deformabilità
- Caratteristiche strutturali date dagli atomi disposti in maniera molto compatta: struttura cubica a corpo centrato, a facce centrate ed esagonale compatta.

Queste strutture tipiche dei metalli sono spiegabili solo se si introduce un nuovo tipo di legami. Il legame covalente non è infatti ammissibile in quanto nei metalli ogni atomo si trova ad avere 8 o 12 atomi vicini a causa della struttura compatta. Il legame ionico non è compatibile con le proprietà dei metalli diverse da quelle dei cristalli ionici.

Quello di tipo Van Der Waals è caratterizzato da basso valore di energia, non è in accordo con le proprietà fisiche dei metalli.

Il legame metallico si forma tra atomi che hanno un basso valore di elettronegatività e che facilmente cedono gli elettroni dei livelli esterni (di valenza) distribuendosi su nuovi orbitali. Si ottiene così un pezzo di metallo costituito dalla struttura reticolare molto regolare di ioni metallici, positivi, immersi in un gas costituito dagli elettroni di valenza.



Sono proprio questi elettroni, non legati ad alcun atomo particolare e liberi di muoversi che assicurano il legame tra gli ioni positivi. Il legame metallico è non direzionale (agisce ugualmente in tutte le direzioni) ed è un legame forte, che richiede, per essere rotto, un'energia solo leggermente minore rispetto ai legami covalenti e ionici. È inoltre favorito dalla bassa affinità e da una bassa energia di ionizzazione cioè da quella energia necessaria per togliere un determinato elettrone ad un atomo e per portarlo a distanza infinita. E quindi, l'energia di ionizzazione che determina il carattere metallico di un elemento.

Legame di Van Der Waals

Il legame ionico non è l'unico legame elettrostatico esistente; un altro tipo di legame elettrostatico è proprio quello di Van Der Waals. La differenza tra i due è determinata dal fatto che il primo viene a formarsi unicamente per l'interazione di due ioni, mentre il secondo è dovuto ad altri tipi di interazione, di seguito elencati:

1. Ione-dipolo
2. Ione-dipolo indotto
3. Dipolo-dipolo
4. Dipolo-dipolo indotto
5. Dipolo indotto-dipolo indotto

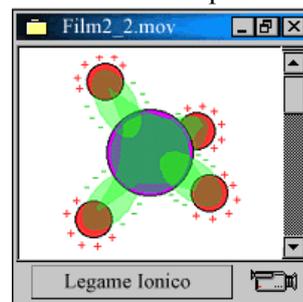
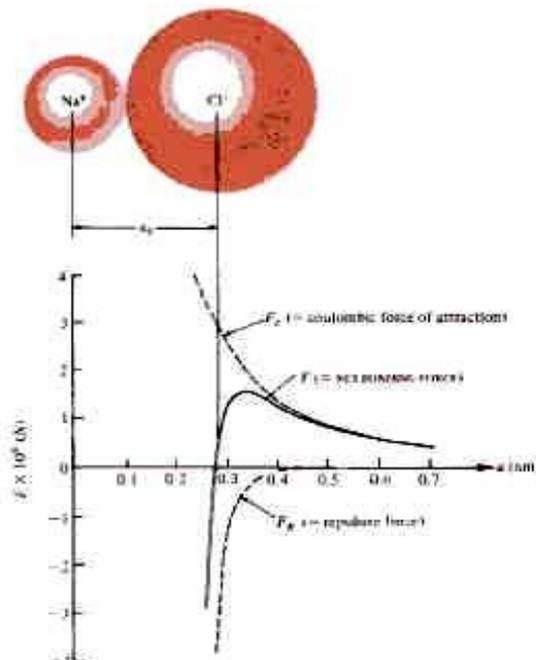
Nell'elenco precedente il significato delle interazioni tra ioni e molecole dipolari o tra molecole dipolari è intuitivo (il campo elettrico dello ione o del dipolo esercita una forza sull'altra molecola); ciò che invece necessita di un chiarimento è il come possa avvenire un'interazione elettrostatica tra uno ione (o un dipolo) ed una molecola apolare. Quello che accade è che la presenza di un corpo carico elettricamente nello spazio in cui si trova la molecola apolare, dà luogo ad uno spostamento della nuvola elettronica; a questo punto i centri delle cariche positive e negative non coincidono più e si ha la creazione del cosiddetto dipolo indotto.

Resta infine da descrivere l'interazione dipolo indotto-dipolo indotto; questa interazione ha origine dal fatto una molecola apolare può diventare, per qualche istante, un dipolo carico elettricamente.

Dal momento, infatti, che gli elettroni presenti in una molecola sono dotati di una notevole mobilità, essi possono trovarsi spostati più verso un nucleo che verso l'altro; questa situazione determina un'asimmetria di carica nella molecola, e si forma così un dipolo istantaneo. La presenza di un tale dipolo in una molecola prima non polare determina polarità nelle molecole vicine; e deformazioni delle nuvole elettroniche di tali molecole seguono necessariamente la disposizione asimmetrica che si è venuta a creare casualmente nel primo dipolo. Verso la parte positiva di un dipolo si orienta la parte negativa di altri dipoli.

Il legame di Van Der Waals è un legame debole, infatti la sua energia di legame dell'ordine delle decine di kcal/mol. Sebbene il legame di Van Der Waals sia debole, esso è molto importante in molti materiali; molte plastiche, ad esempio, devono la loro resistenza e deformabilità al largo numero di legami deboli tra le loro molecole.

Un esempio particolare di legame di Van Der Waals il legame idrogeno, il quale si realizza quando nella molecola sono presenti atomi di idrogeno legati ad atomi fortemente elettronegativi, quali ad esempio il fluoro, l'ossigeno, l'azoto.



4. Forze ed energia di legame

Forza di legame

Si definisce forza di legame la risultante delle forze attrattive e repulsive che ciascun atomo esercita su quella cui è legato, avvicinando progressivamente due atomi inizialmente a distanza infinita fra loro, fra essi si generano:

- Forze coulombiane attrattive fra il nucleo di ciascun atomo (positivo) e l'atmosfera elettronica dell'altro (negativa)
- Forze coulombiane repulsive fra i due nuclei, ambedue positivi, e fra le due atmosfere elettroniche, ambedue negative
- Forze quantistiche di scambio

Queste ultime sono forze quantistiche che intervengono, come quelle repulsive, al momento della compenetrazione dei gusci atomici. La presenza di tale forza è giustificata dalla teoria quantistica che sostiene che ogni elettrone di valenza di ogni atomo che partecipa ad un legame viene condiviso con tutti gli altri atomi partecipanti al legame e dunque interagisce con tutti i nuclei indifferentemente contribuendo alla generazione dell'energia di legame. Per quanto riguarda le forze di legame si ha che esse dipendono dalla distanza che separa i due atomi, ogni modifica della distanza interatomica rispetto a quella iniziale produce una forza di ritrazione che tende a riavvicinare gli atomi; per piccoli spostamenti, questa forza è direttamente proporzionale allo spostamento, si può quindi rappresentare le differenti forze interatomiche come delle molle la cui costante elastica è un indice della resistenza del materiale.

Queste considerazioni sono direttamente collegate al modulo elastico del materiale; per comprenderle più a fondo si consideri il grafico in figura che rappresenta l'andamento della forza risultante fra due atomi.

Energia di legame

La curva dell'energia di legame rispetto alla distanza interatomica definita dalla funzione integrale della curva descritta dalla risultante delle forze coulombiane di legame in funzione della stessa distanza interatomica.

$$\frac{dE}{dr} = F(r)$$

A) curva delle forze di attrazione-repulsione in funzione della distanza interatomica

B) curva dell'energia di legame in funzione della distanza interatomica

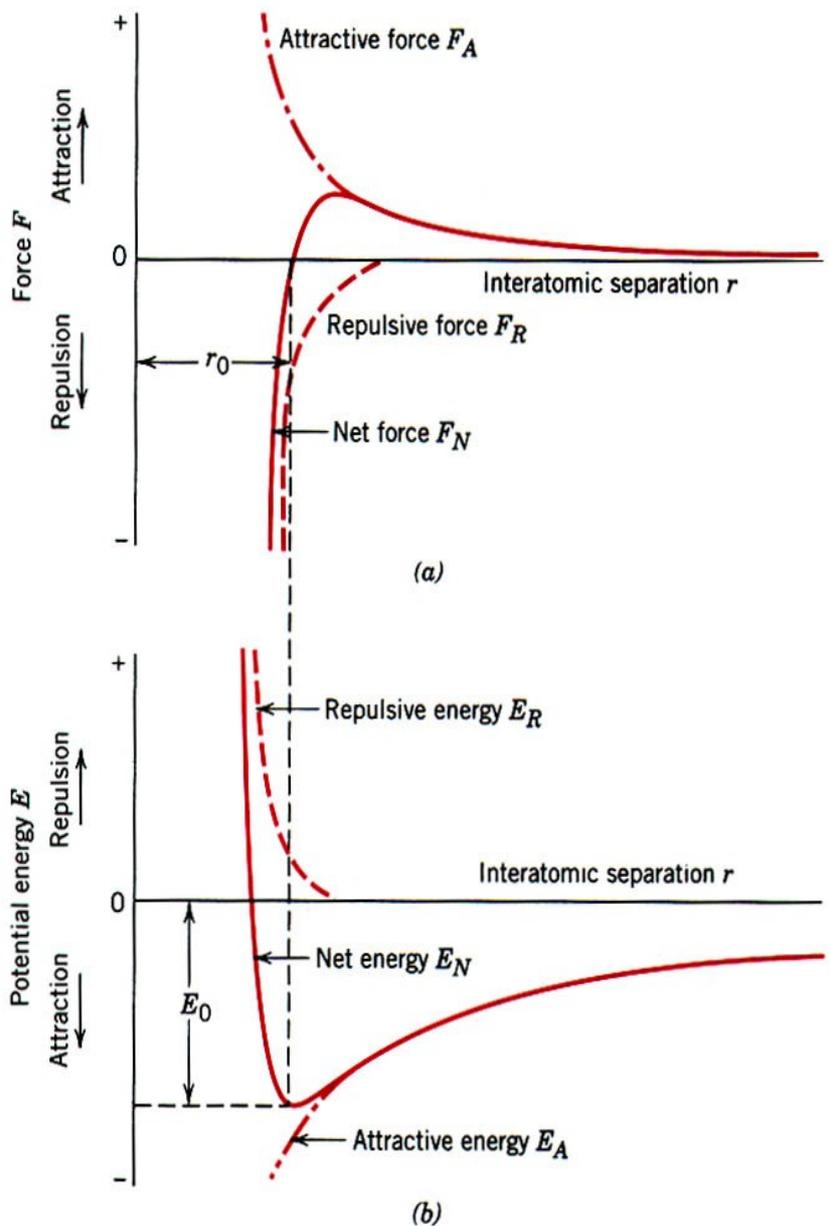
Al minimo della funzione integrale corrisponde quindi il punto di equilibrio, che, come si è detto, lo zero della funzione integranda.

L'energia E_0 corrispondente alla distanza r_0 rappresenta l'energia di legame, ed è quindi anche l'energia necessaria per spostare un atomo dalla sua posizione di equilibrio (energia di estrazione). Più è grande questa energia più se ne deve fornire per la rottura del legame, e dunque più alta è la temperatura di fusione.

Poiché la forza repulsiva cresce col diminuire della distanza, più velocemente della forza attrattiva, il grafico dell'energia di legame è asimmetrico.

Se fornissimo energia dall'esterno, al nuovo valore che andremmo a trovare sulle ordinate, corrisponderebbero sulle ascisse due valori distinti della funzione. Questi valori possono essere interpretati come le nuove distanze medie assunte, al dato valore di energia, dalla maggior parte degli atomi costituenti materiale. La distanza media complessiva sarà data allora dal punto medio tra i due nuovi valori letti sul grafico e, a causa della suddetta asimmetria della curva, individuerà un punto sull'asse delle ascisse a destra del punto di equilibrio.

Per questo motivo la maggior parte dei materiali si espande quando viene riscaldata. Dallo studio di questo fenomeno si può inoltre dedurre che quanto più profonda è la buca di un potenziale tanta più energia occorre per spostare definitivamente gli atomi dalla loro posizione di equilibrio, tanto minore sarà l'espansione termica, a parità di calore fornito dall'esterno.



Cap. 3 : Struttura e organizzazione dei solidi.

1. Sistemazioni atomiche

L'evoluzione delle tecniche e dei processi di fabbricazione, di trasformazione e di lavorazione dei materiali, si basa essenzialmente sulla necessità di studiare (e dunque di conoscere) le proprietà della materia attraverso le leggi fondamentali che ne regolano il comportamento, per poi stabilire delle relazioni tra composizione e organizzazione atomica o molecolare, e microstruttura dei materiali.

In generale i materiali possono essere classificati secondo la loro composizione, microstruttura e proprietà. Il comportamento di un materiale è infatti caratterizzato dalla sua reazione a una sollecitazione, da cui scaturiscono importanti proprietà meccaniche, fisiche e chimiche, dipendenti essenzialmente dalla microstruttura dei materiali stessi. Con la microstruttura dunque, è possibile effettuare una prima classificazione in quanto questa descrive l'insieme dei grani e soprattutto i diversi legami che uniscono le particelle nelle diverse strutture. Gli stati di organizzazione della materia possono variare dal disordine più completo degli atomi o delle molecole, nel caso di un gas a debole pressione, fino all'ordine quasi perfetto degli atomi in un monocristallo, nel caso dei solidi.

La maggior parte dei materiali a temperatura ambiente si presenta allo stato solido, ossia una porzione di materia, oltre a possedere forma propria e ad essere incompressibile, possiede anche una struttura cristallina. In tale condizioni, infatti, gli atomi sono disposti in modo regolare, ovvero disposti in una struttura ordinata e ripetitiva chiamata **reticolo cristallino**. Mediante la spettrografia con raggi X si osserva come il reticolo cristallino di un solido risulti dalla ripetizione nelle tre dimensioni dello spazio di una **cella elementare** (o primitiva), che costituisce la porzione più piccola del reticolo stesso. All'interno di questa struttura le particelle, pur non essendo libere di muoversi, sono comunque animate da un moto vibratorio attorno ad un punto, detto **nodo reticolare**, assunto come rappresentativo della posizione media delle particelle nel reticolo.

I legami che uniscono i vari atomi (legame ionico, covalente, metallico, eccetera...), determinano le forme di tali strutture. Materiali che sono incompressibili e rigidi, ma possiedono una struttura irregolare (non cristallina) sono detti **amorfi**. Per materiale amorfo intendiamo quindi una sostanza priva di struttura cristallina in cui è assente l'ordine a lunga distanza che è tipico dei materiali cristallini.

2. Struttura cristallina

Tutti i metalli hanno una struttura cristallina, gli elettroni vanno a piazzarsi in modo da dar luogo al minimo dell'energia interna. Gli elettroni inoltre si comportano per poter occupare meno spazio possibile. Si ottengono così delle posizioni periodiche nelle quali si impacchettano gli elettroni. Questo dà luogo a delle configurazioni del reticolo cristallino dette:

- Cubico a corpo centrato
- Cubico a facce centrate
- Esagonale compatto

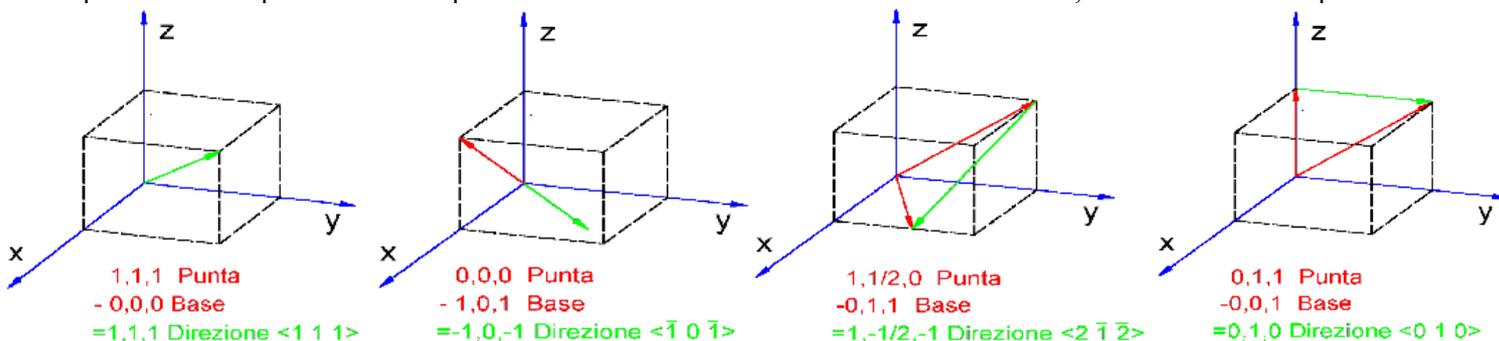
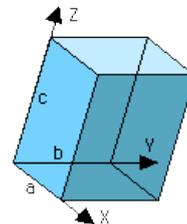
La differenza principale tra queste configurazioni consiste nel numero di atomo contenuto in ogni cella elementare; le configurazioni CFC e CCC permettono di calcolare il lato del cubo dalla dimensione della molecola. Inoltre permettono di calcolare la densità della cella elementare dal tipo di molecola.

Direzioni cristallografiche.

Sia a la distanza fissa tra gli elementi del reticolo cristallino; essendo il reticolo cubico tutte le distanze interatomiche saranno uguali ad a .

Assimilando la dimensione della cella elementare uguale ad 1, si possono definire le coordinate cartesiane assumendo gli assi (x, y, z) a coincidenti con gli spigoli della stessa cella in modo tale che l'origine del sistema di riferimento si trovi in corrispondenza di un nodo.

In questo modo si possono dare le posizioni dei vari atomi con una terna di valori interi, eccone alcuni esempi:



Piani e densità planare

Per individuare la giacitura di un piano si utilizzano generalmente gli indici di Miller (h, k, l) mentre nel caso di reticoli a cella esagonale per designare i piani si usano gli indici di Miller-Bravais.

Gli indici di Miller sono tre numeri interi, scritti tra parentesi tonda, che possono essere determinati tracciando le intersezioni del piano considerato con gli assi (x, y, z) (traslando l'origine se necessario modo che non appartenga al piano). I valori delle intersezioni vanno invertiti e moltiplicati per il più piccolo intero n che li renda interi (se un piano è parallelo ad un asse le sue intersezioni con esso sono infinite, l'inverso è quindi uguale a 0).

I piani possono incontrare uno degli assi nella sua parte negativa in questo caso l'indice di Miller corrispondente è negativo. La densità planare è pari al rapporto tra il numero di atomi cui centri sono tagliati dall'area in esame l'aria selezionata. La simmetria della cella cubica fa sì che ci siano famiglie di piani con la stessa disposizione degli atomi e la stessa densità. Le famiglie di piani si indicano con gli indici di Miller o di Miller-Bravais scritti tra parentesi graffe.

Si noti che gli indici di Miller sono identici per una famiglia di piani paralleli, dato che in una struttura infinita non avrebbe senso distinguere un piano in particolare. Di conseguenza le sei facce di una cella cubica, due a due, hanno gli stessi indici.

Le deformazioni plastiche dei metalli sono dovute al movimento delle dislocazioni che avviene preferibilmente lungo i piani e le direzioni a più elevata densità.

La duttilità è la resistenza dei materiali con strutture CCC, CFC, EC e dipende dal numero e dalla densità dei piani che contengono il maggior numero di atomi, più precisamente si definisce duttilità la capacità di un materiale di deformarsi plasticamente. La duttilità ha un ruolo molto importante nella lavorazione dei metalli ed è anche essenziale nel caso di strutture metalliche che devono assorbire l'energia di un impatto, come ad esempio, la carrozzeria di un'automobile. La capacità di deformarsi plasticamente aumenta in modo sostanziale ad alte temperature dove per temperatura elevata si intende la temperatura alla quale per un determinato materiale, la diffusione avviene rapidamente. I metalli a struttura cristallina cubica possiedono 12 sistemi di scorrimento ad alta densità di atomi:

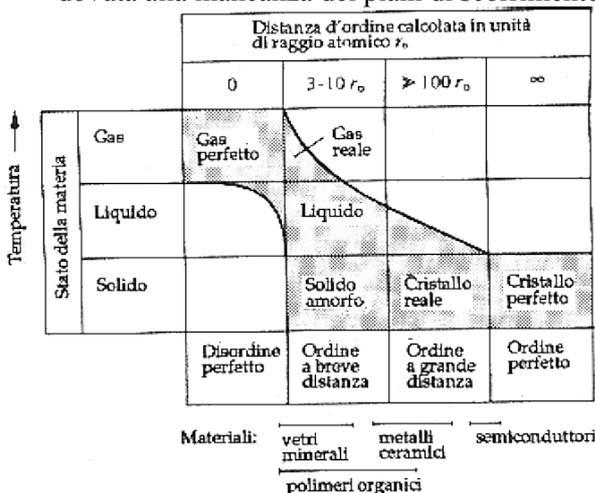
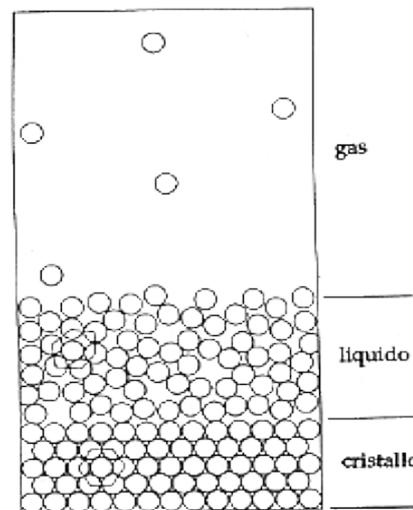
- Nei cristalli CFC vi sono quattro piani diversi del tipo {1,1,1} con tre direzioni indipendenti <1 1 0> ogni piano
- I cristalli CCC si deformano di solito secondo sei piani di tipo {1,1,0} e secondo due direzioni <1 1 1>
- I metalli a struttura esagonale (titanio, zinco, magnesio) hanno solo tre sistemi di scorrimento.

Alla luce di quanto detto si evince che i metalli a struttura cubica hanno maggiore capacità di deformazione (duttilità) dei metalli a struttura esagonale.

3. Strutture amorfe

Per materiale amorfo intendiamo quindi una sostanza priva di struttura cristallina in cui perciò è assente l'ordine a lunga distanza che è tipico dei materiali cristallini. La condizione di solido amorfo si ha quando un materiale, come ad esempio il vetro, soggetto a raffreddamento, raggiunge una temperatura inferiore a quella di solidificazione troppo velocemente per permettere alla struttura cristallina di formarsi. Questo procedimento effettivamente blocca l'arrangiamento nel liquido degli atomi che in questo modo non sono più in grado di scorrere l'uno dietro l'altro.

Ogni atomo è circondato da tanti atomi quanti sarebbero presenti nella struttura regolare, ed alla stessa distanza. La differenza sta che non esiste, come nel caso dei liquidi, ordine a lungo raggio. Per questo motivo le strutture amorfe sono strutture fondamentalmente instabili, pronte a trasformarsi in cristallo nel momento in cui le condizioni termodinamiche e cinetiche lo permettano. Una caratteristica fondamentale dei materiali amorfi è la loro anisotropia (assenza di direzionalità nelle loro proprietà meccaniche), dovuta alla mancanza dei piani di scorrimento.



Solitamente si parla di solidi amorfi e di liquidi mettendone in risalto la disposizione degli atomi che per entrambi è a corto raggio si tende quindi spesso a confonderli (strutturalmente parlando) per semplificarne la descrizione.

È importante però tenere sempre presente la differenza di temperatura che li caratterizza, parametro (energia termica) che è fondamentale per la determinazione di uno stato fisico, insieme all'energia di coesione. C'è infatti da tenere presente che legami che caratterizzano i solidi amorfi non si rompono tutti alla stessa temperatura questo comporta il fatto che non ci sia una precisa temperatura di fusione: così il solido amorfo, all'aumentare della temperatura, prima rammollisce e poi fonde.

La differenza fondamentale tra un solido amorfo ed un liquido sta principalmente nella distanza tra gli atomi: i liquidi hanno gli atomi più distanti e la struttura è più vuota rispetto a quella dei solidi amorfi.

4. La struttura compatta dei materiali

Reticolo di Bravais e celle elementari

Il fenomeno della cristallizzazione è un processo spontaneo poiché comporta la diminuzione dell'energia libera del sistema considerato ed il reticolo cristallino che si forma è un sistema in equilibrio, rappresenta la struttura cui corrisponde il contenuto minimo di energia compatibilmente ai componenti che lo costituiscono e alle condizioni di temperatura e pressione.

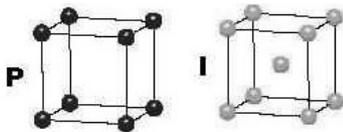
Si è detto come un cristallo risulti dalla ripetizione, nelle tre dimensioni dello spazio, della sua cella primitiva, che ne rappresenta la simmetria geometrica. La cristallografia descrive la struttura di questi cristalli e le leggi geometriche che ne determinano la posizione.

È stato Bravais a definire le 7 forme geometriche a cui corrispondono i 7 sistemi cristallini: cubico, tetragonale, ortorombico, monoclinico, triclino, trigonale ed esagonale, differenti tra loro per gli elementi di simmetria. Gli altri 7 sistemi cristallini che si ottengono dalle stesse 7 forme geometriche variano per numero di particelle contenute nella cella elementare, per un totale di 14 reticoli di Bravais.

CUBIC

$$a = b = c$$

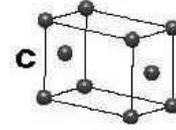
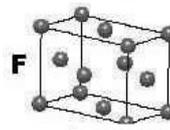
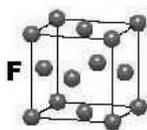
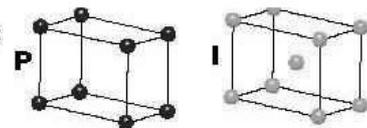
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



ORTHORHOMBIC

$$a \neq b \neq c$$

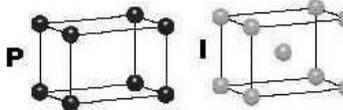
$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$



TETRAGONAL

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$$

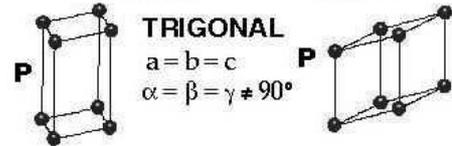


HEXAGONAL

$$a = b \neq c$$

$$\alpha = \beta = 90^\circ$$

$$\gamma = 120^\circ$$

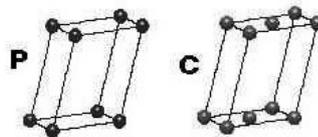


MONOCLINIC

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha = \gamma = 90^\circ$$

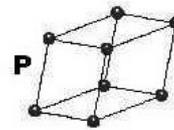
$$\beta \neq 120^\circ$$



TRICLINIC

$$a \neq b \neq c$$

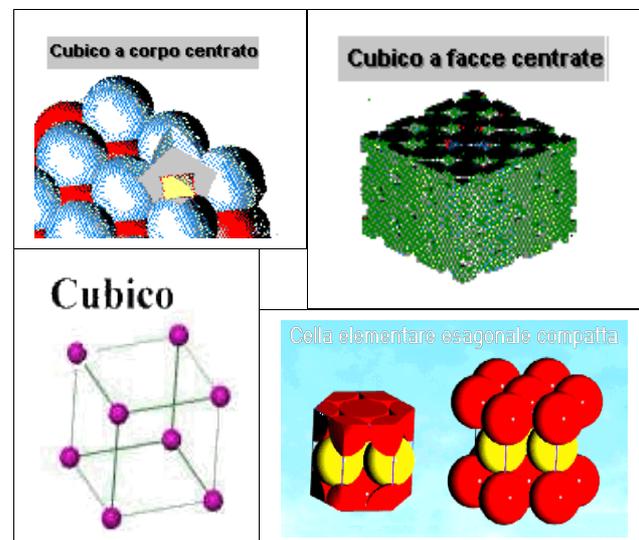
$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$



Cella elementare cubica ed esagonale compatta

Tra le diverse configurazioni, quelle più compatte e con addensamento massimo di atomi sono la struttura cubica a facce centrate, e quella esagonale compatta. Inoltre si osserva che, in base alla distribuzione degli atomi nei cubi elementari, si possono trovare tre diversi tipi di celle cubiche:

- **Cubica semplice:** È una struttura molto semplice nella quale i nodi sono localizzati sui vertici del cubo.
- **Cubica a facce centrate (CFC):** La struttura cubica a facce centrate corrisponde ad una configurazione molto compatta la cui diagonale (111) è perpendicolare ai piani compatti (111). la maglia contiene quattro atomi con numero di coordinazione $NC=12$
- **Cubica a corpo centrato (CCC):** La struttura cubica corpo centrato è meno compatta delle altre, comunque nella cristallizzazione dei solidi; possiede un atomo al centro, che a contatto con ciascun atomo del cubo. La maglia elementare contiene due atomi ed il numero di coordinazione è $NC=8$.
Si osserva facilmente che questo tipo di struttura è quella che presenta la maggiore simmetria e ciò ne facilita i calcoli. A causa della sua elevata simmetria e quindi stabilità, la maggior parte dei metalli cristallizza nei sistemi CCC e CFC: nel primo cristallizzano quelli con media durezza e media plasticità; nel secondo, invece, cristallizzano quelli con più bassa durezza ed alta malleabilità.
- **Esagonale compatta (EC):** Un'altra comune configurazione è l'esagonale compatta (EC), essa è, come la struttura cubica, ad alta simmetria, ma presenta una maggiore anisotropia reticolare. Questa è caratterizzata da addensamento massimo di atomi che occupano i nodi di reticoli esagonali. Solitamente materiale struttura esagonale compatta sono lavorati tramite trafilatura e laminazione.

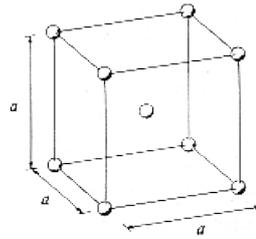
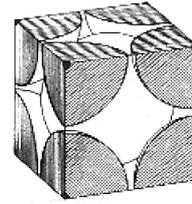


5. Gli indici caratteristici dei materiali metallici

Vediamo i parametri caratteristici delle strutture cristalline.

a. Numero di atomi per cella: Si può vedere come per la CCC vi sia un atomo al centro e otto atomi situati sui vertici del cubo, ciascuno di questi ultimi è in comune con altre 8 celle elementari; ne consegue in totale vi saranno 2 atomi per cella ovvero:

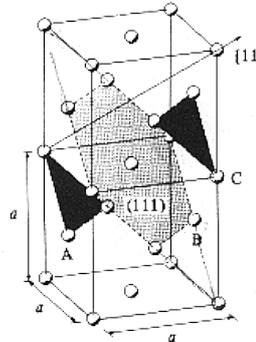
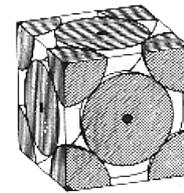
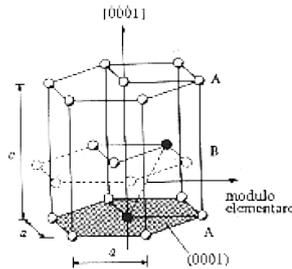
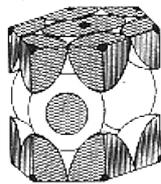
$$1 + \frac{1}{8} \cdot 8 = 2$$



Nella CFC si può notare che al centro di ogni faccia è posto un atomo, ciascuno dei quali dovrà essere condiviso con la cella adiacente; sommando i contributi degli atomi disposti in corrispondenza degli 8 vertici del cubo, avremo in totale 4 atomi per cella ovvero:

$$\frac{1}{2} \cdot 6 + \frac{1}{8} \cdot 8 = 4$$

Per la cella EC si può verificare facilmente che essa contiene 6 atomi:



b. Numero di coordinazione: è il numero di atomi primari vicini ad un atomo considerato; risulta essere pari ad 8 per la CCC e pari a 12 per la CFC e EC.

c. Fattore di compattazione: è il rapporto tra il volume occupato dagli atomi in una cella ed il volume della cella stessa;

$$\text{fattore di compattazione} = \frac{N_{\text{atomi}} \cdot V_{\text{atomico}}}{V_{\text{cella unitaria}}}$$

d. Densità del materiale: è il rapporto tra la massa degli atomi che occupano una cella ed il volume della cella stessa:

$$\frac{\sum N_{\text{atomi}} \cdot \text{peso atomico}}{V_{\text{cella unitaria}} \cdot N_{\text{AVOGADRO}}}$$

Trasformazioni allotropiche

Le strutture cristalline di molti materiali, di interesse ingegneristico, variano al variare della temperatura (ovvero la struttura dipende dalla temperatura). Questo tipo di trasformazioni prende il nome di trasformazioni allotropiche o polimorfiche. Il polimorfismo è la proprietà di una sostanza di dare origine a differenti reticoli cristallini.

Ad esempio l'acciaio ha una struttura CFC per temperatura al di sopra dei 910°C ed assume una struttura CCC a più basse temperature; questo accade in quanto, con l'aumentare della temperatura la debole forza secondaria tra gli atomi, che genera il sistema CCC, viene vinta dalla crescente energia termica, che favorisce la tendenza degli atomi ad addensarsi lungo linee di massimo impilaggio con numero di coordinazione pari a 12 (che è appunto caratteristico del CFC).

6. Spazi interstiziali

Sono i vuoti che si vanno a formare tra gli atomi del reticolo cristallino; essi possono servire alla locazione di altri atomi di diametro inferiore, come avviene in diverse leghe. Gli spazi interstiziali possono essere di due diversi tipi:

- **Tetraedrici:** vuoti formati dall'addensamento di tre sfere, l'una accanto all'altra, su uno stesso piano ed una quarta poggiata sulle precedenti; così si ottiene un vuoto in grado di ospitare una sfera avente il diametro pari a:

$$d=0.225 D$$

essendo D il diametro degli atomi che compongono il reticolo.

- **Ottaedrici:** per ottenere tale sito è sufficiente sovrapporre due terne triangolari di sfere sfalsate tra loro di 60 gradi; in questo caso il vuoto maggiore di quello tetraedrico, infatti esso è in grado di ospitare una sfera avente diametro pari a:

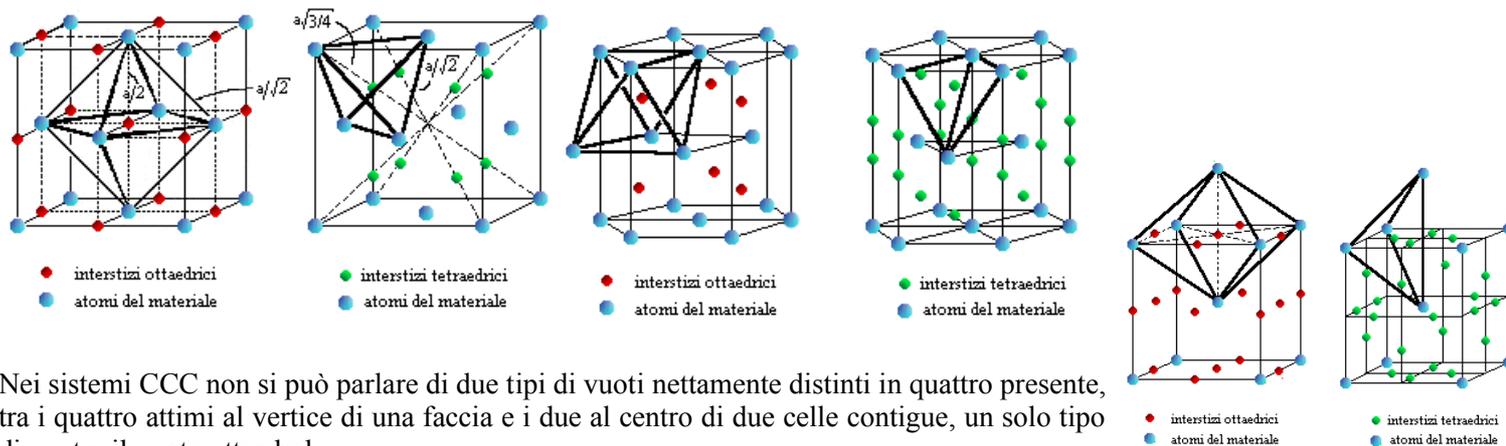
$$d=0.414 D$$

in riferimento a queste due formule deve essere precisato che ha comunque possibile inserire negli spazi interstiziali anche atomi con diametro maggiore di quello ammissibile; questo per il fatto, che possiamo immaginare i legami atomici come delle molle che vanno a unire gli atomi e che quindi sono in grado di sopportare e trasmettere le sollecitazioni.

Comunque un limite dettato dalla legge sperimentale di Hagg con la quale possibile calcolare il diametro massimo di un atomo che può trovarsi in posizione interstiziale :

$$d=0.59 D \text{ (legge di Hagg)}$$

Questo diametro è stato calcolato considerando l'influenza delle sollecitazioni quando vengono allontanati gli atomi che compongono il reticolo. I sistemi di massimo impilaggio e (CFC, EC) la sovrapposizione dei piani sfalsati tra loro determina, attorno ad un atomo preso come riferimento e appartenente allo stesso piano, l'esistenza di tre vuoti tetraedrici e di sei vuoti ottaedrici.



Nei sistemi CCC non si può parlare di due tipi di vuoti nettamente distinti in quanto presente, tra i quattro attimi al vertice di una faccia e i due al centro di due celle contigue, un solo tipo di vuoto: il vuoto ottaedrale.

7. I cristalli ionici

Nel legame ionico non si considerano singole coppie ioniche, ma cristalli ionici costituiti da molti ioni legati da forze Coulombiane formanti un reticolo cristallino. Quindi mentre i legami covalenti portano alla formazione di molecole per quelli ionici si può parlare solo di cristalli. I cristalli ionici hanno temperature di fusione abbastanza elevate a causa degli elevati valori dell'energia reticolare.

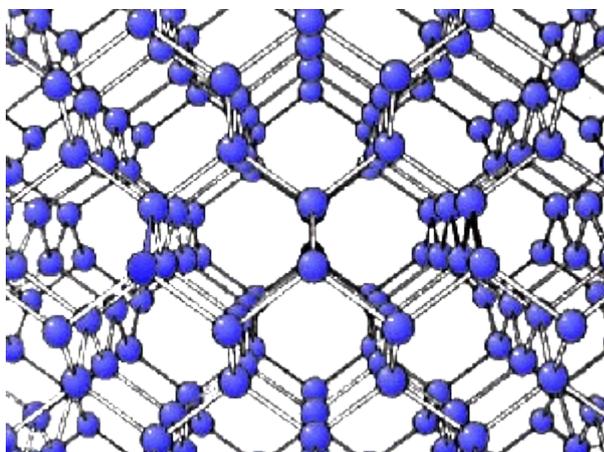
8. Strutture dei solidi a legami covalenti

In materiali a legame covalente generalmente hanno numeri di coordinazione e densità molto più bassi di quelli ionici perché i legami si respingono uno con l'altro e sono fortemente direzionali.

Nel caso dei solidi prevalentemente covalenti, la struttura determinata in primo luogo dalla geometria degli orbitali e successivamente dall'ingombro degli atomi. Si ha perciò a che fare con materiali che hanno leggerezza e resistenza elevata. I valori delle energie dei legami covalenti sono di norma assai elevati perciò le sostanze di questa classe hanno elevatissime temperature di fusione e basse o bassissime proprietà conduttrici sia termiche che elettriche.

In questi cristalli gli elettroni, tutti impegnati nei legami covalenti tra atomi, non sono mobili. Ogni cristallo covalente può essere considerato una molecola gigante.

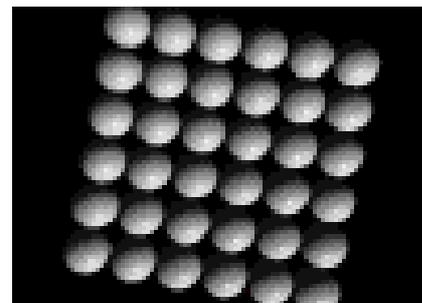
Questi cristalli covalenti sono in genere tridimensionali, ma ci sono casi di cristalli covalenti bidimensionali uniti fra loro da forze di Van Der Waals; ad esempio la grafite, nella quale il reticolo è planare con forma esagonale; i piani sono debolmente legati tra di loro dalle forze di Van Der Waals. Lo scorrimento di un piano sull'altro rende la grafite adatta a fare le mine per le matite.



Cap. 4 : I difetti della struttura cristallina

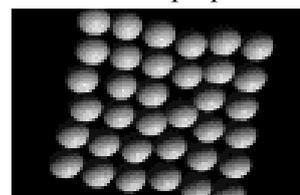
1. Vacanze ed atomi estranei

Un cristallo perfetto è costituito dalla regolare ripetizione nello spazio di una stessa cella fondamentale. Nei cristalli reali invece, per quanto si tenti di ricreare le condizioni ideali di cristallizzazione, esistono sempre imperfezioni localizzate in un nodo ben determinato del reticolo; tali imperfezioni prendono il nome di difetti puntiformi. Tale denominazione non deve trarre in inganno; l'intera regione limitrofa risulta infatti perturbata per distanze dell'ordine di un centinaio di raggi atomici.



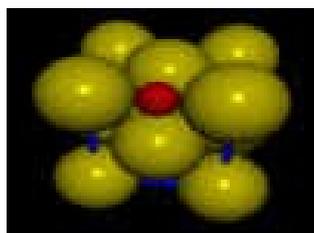
Anche nei casi in cui tali difetti siano in numero trascurabile, la loro presenza ha notevoli ripercussioni sulle proprietà del cristallo; perciò selezionando opportunamente le imperfezioni reticolari si possono conferire materiali proprietà che essi non possedevano originariamente.

A seconda delle loro caratteristiche difetti sono divisi in:

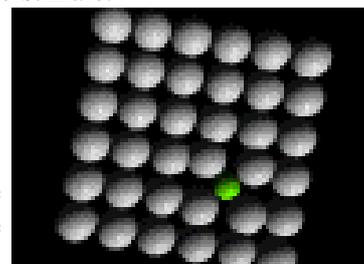


- Vacanze: un nodo del reticolo non è occupato da alcun atomo e rimane vuoto. La presenza di una vacanza permette il movimento degli atomi del cristallo da un nodo reticolare ad un altro; questo fenomeno prende il nome di diffusione. In generale, concentrazione delle vacanze varia in funzione della temperatura.
- Atomi interstiziali: un atomo che, invece di occupare regolarmente un nodo, occupa uno degli spazi interstiziali del reticolo. Questi difetti normalmente non si generano in modo naturale, ma possono essere introdotti a seguito di irradiazione. L'atomo può essere costitutivo del cristallo, e quindi si ha un auto-interstiziale, oppure di elementi estranei; questo fenomeno viene sfruttato ad esempio per aumentare le proprietà meccaniche del ferro, attraverso l'introduzione nel reticolo di atomi di carbonio che si dispongono in posizione interstiziale.

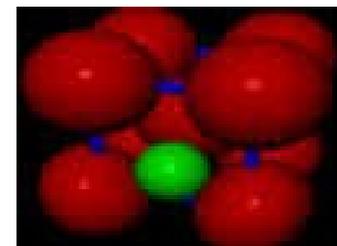
Essendo gli atomi di carbonio molto piccoli essi possono andare ad occupare gli spazi interstiziali presenti nel reticolo cristallino del metallo. Il carbonio interstiziale di importanza fondamentale nel ciclo di incrudimento dell'acciaio (lega di ferro e carbonio) e la presenza di questo è controllabile tramite il trattamento termico del metallo.



Sopra i 910 ° C la struttura è CFC. Lo spazio maggiore tra gli atomi di ferro ha un raggio di 0,052 nm che è leggermente più piccolo dell'atomo di carbonio.



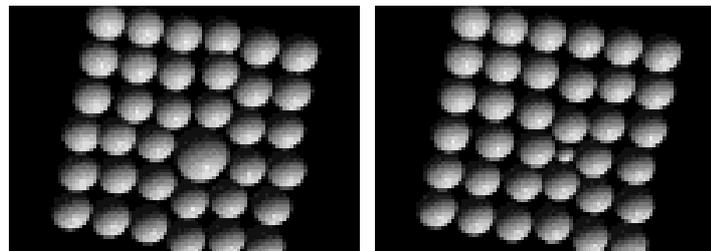
A questa temperatura nel ferro CFC si può sciogliere fino ad un massimo di circa il 2,1% in peso di carbonio, quantità limitata dalla deformazione del reticolo dovuta alla presenza di atomi interstiziali.



Sotto i 910 °C la struttura del ferro cambia in CCC ed anche se questa struttura è meno compatta dell'altra, lo spazio interstiziale disponibile è inferiore, non superiore a 0,026 nm. A causa della maggiore deformazione del reticolo, una quantità minore di carbonio (circa lo 0,02%) può essere sciolta nel ferro CCC.

Un trattamento termico dell'acciaio è la tempra; essa consiste nel riscaldare la lega in modo tale che si trasformi in CFC, sciogliendo la quantità richiesta di carbonio, quindi si raffredda la lega stessa in modo che gli atomi di carbonio rimangano intrappolati in una struttura CCC (causando una deformazione del reticolo), vengano spinti a formare carburi di ferro.

- Atomi sostituzionali: un atomo di un elemento estraneo al cristallo occupa uno dei nodi del reticolo. Tale atomo può avere raggio atomico maggiore o minore degli atomi che compongono il reticolo



2. Difetti di linea o dislocazioni

La dislocazione, o difetto di linea, è un difetto del cristallo dovuto alla deformazione della struttura cristallina, deformazione incentrata intorno ad una linea (detta linea di dislocazione).

Le dislocazioni si creano durante la solidificazione di solidi cristallini ma si possono anche formare dalla deformazione plastica di questi solidi, possono essere anche dovute all'addensamento di vacanze e dal disadattamento atomico nelle soluzioni solide.

Consideriamo, ora un cristallo a reticolo cubico ideale e immaginiamo di tagliarlo secondo un piano ABCD (come in figura), spostando la parte superiore di una distanza interatomica. Per permettere il riformarsi dei legami tra gli atomi necessario che lo spostamento si effettui lungo il piano di taglio. Sul piano di taglio ABCD esistono un'infinità di direzioni di spostamento possibili, di cui due sono particolari.

Quando lo spostamento degli atomi avviene in una direzione perpendicolare alla linea di dislocazione, si comprime una parte del cristallo e si osserva la formazione di un semipiano reticolare che termina proprio lungo la linea di dislocazione; questo tipo di difetto prende il nome di dislocazione a spigolo. In genere si indica una dislocazione a spigolo positiva con una T rovesciata e una dislocazione a spigolo negativo con una T normale.

Consideriamo una dislocazione a spigolo positiva: sopra la linea di dislocazione gli atomi sono compressi e il cristallo si trova in compressione, mentre al di sotto gli atomi sono dilatati e il cristallo si trova in trazione. All'esterno del cristallo si osserva la formazione di un gradino la cui grandezza, dell'ordine delle distanze interatomiche, caratterizza lo spostamento degli atomi lungo il piano di taglio.

Quando gli atomi si spostano la direzione parallela alla linea di dislocazione si ha una dislocazione a vite. Questa produce una torsione liquidare del cristallo avente come asse la linea di dislocazione.

Bisogna comunque notare che la maggior parte delle dislocazioni sono combinazioni di componenti a spigolo e a vite e vengono dette dislocazioni miste. Qualsiasi tipo di dislocazione può essere visualizzata con un microscopio elettronico a trasmissione, condizione della sezione del campione in esame sia opportunamente assottigliata (non superiore ai 100 nm).

Deformazioni

Un materiale in esercizio è sottoposto in campo elastico a sollecitazioni (stress) la cui natura può essere più complessa rispetto alle semplici sollecitazioni normali (trazione e compressione) o di taglio, le quali tuttavia ne rappresentano le componenti.

Applicando una sollecitazione su un campione si può causare una dislocazione; se si va ad analizzare la superficie sollecitata si possono osservare delle deformazioni a gradino chiamate bande di scorrimento dovute allo scorrimento degli atomi del metallo lungo specifici piani cristallografici chiamati piani di scorrimento. Il movimento delle dislocazioni, detto appunto scorrimento, è alla base della deformazione plastica dei metalli e delle loro leghe. La deformazione (strain), intesa come risposta dei materiali ad una sollecitazione, dipende da vari fattori:

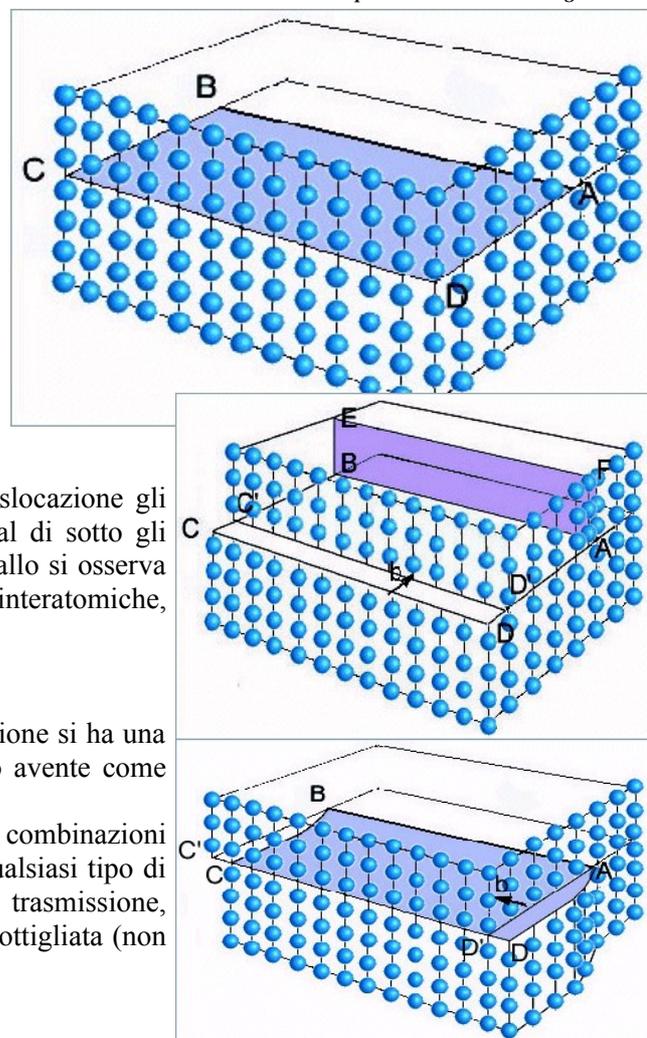
- dalla loro resistenza meccanica (strength): cioè dalla struttura reticolare (solido-ceramico, metallico, polimerico, composito, eccetera...);
- dalla forza dei legami interatomici (curve di Condon-Morse);
- dal numero di legami interatomici per unità di volume;
- dalla direzione di applicazione del carico.

Se la deformazione si annulla istantaneamente allorché viene tolta la sollecitazione, nel caso quindi di deformazione puramente elastica, ciò può avvenire secondo la legge di proporzionalità tra sforzo-deformazione; se invece si continua a sollecitare il materiale oltre il limite elastico si entra nel campo della deformazione plastica e ci si scosta in maniera sempre più accentuata dalla legge di proporzionalità sforzo-deformazione.

A livello microscopico il comportamento deformativo dei metalli, delle leghe, dei ceramici e dei polimerici può essere spiegato a partire dalle fasi di produzione e lavorazione effettuata con dei processi complessi costituiti da molti passi. Ogni passo introduce difetti puntuali, difetti lineari e difetti di superficie, caratteristici ed il comportamento finale avrà delle proprietà dipendenti dalla somma dei difetti introdotti lungo tutto il processo. Alcune volte nemmeno la conoscenza della popolazione dei difetti introdotti dal processo non garantisce la prevedibilità del comportamento e della deformabilità di questi materiali (ad esempio una nuova popolazione di difetti può nascere a causa di improvvise variazioni di temperatura detti shock termici).

I difetti influiscono su diverse proprietà del materiale:

- la resistenza meccanica dipende dal difetto più grande in prossimità della superficie sottoposta a trazione;
- le proprietà elastiche dipendono invece dalla intera popolazione dei pori contenuti nei materiali;
- la conducibilità e la diffusività termica diminuiscono all'aumentare del contenuto di impurezze presenti nel reticolo cristallino e del contenuto di difetti cristallini;
- la dilatazione termica è meno sensibile alla porosità ed ai difetti, ma dipende dalla omogeneità del potenziale atomico del reticolo cristallino.



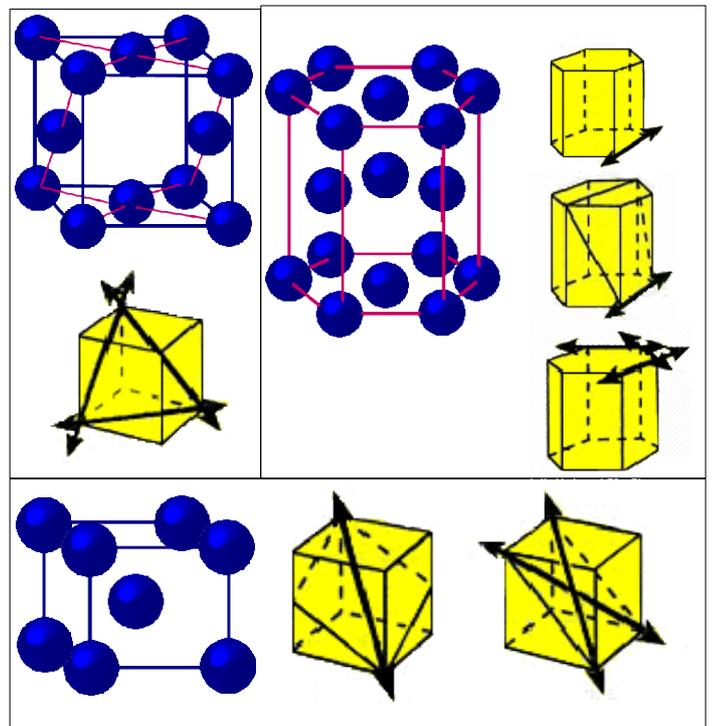
Scorrimento

Lo scorrimento, definito come processo in cui gli atomi hanno la possibilità di scorrere gli uni rispetto agli altri, implica necessariamente la rottura simultanea dei legami molecolari preesistenti nella struttura cristallina. La rottura di questi legami avviene grazie alla applicazione di forze esterne definite come sforzi di taglio, la cui intensità è inversamente proporzionale al numero di dislocazioni esistenti nel materiale stesso.

Le dislocazioni possono muoversi con facilità attraverso il cristallo perché sono pochi gli atomi coinvolti nel processo di scorrimento e sono quindi pochi legami che si devono rompere. La facilità di scorrimento varia a seconda della struttura della cella del cristallo poiché si ha un diverso numero di piani di scorrimento.

L'insieme di un piano e di una direzione di scorrimento è chiamato sistema di scorrimento, questo nelle strutture metalliche avviene lungo una serie di sistemi caratteristici di ogni struttura cristallina.

Tutto ciò comporta ovviamente che anche uno stesso materiale in condizioni diverse e con una diversa struttura cristallina, abbia caratteristiche meccaniche differenti.



In particolare possiamo affermare che:

- I cristalli metallici hanno piani di scorrimento con densità atomica elevata; la velocità di scorrimento dipende dallo sforzo applicato (può essere prossima a quella del suono)
- I cristalli ionici hanno il movimento delle dislocazioni meno facilitato, poiché il sistema di scorrimento effettivo non dipende unicamente dalla struttura cristallina; inoltre sono favoriti scorrimenti che non mettono a contatto ioni dello stesso segno.
- I cristalli covalenti hanno i legami orientati, quindi gli spostamenti delle dislocazioni risultano difficili ed altrettanto la deformazione plastica, ciò vuol dire questi materiali hanno un comportamento fragile.
- I polimeri hanno il movimento delle dislocazioni difficile per la presenza di catene; anche essi sono materiali fragili.

Ostacoli delle dislocazioni

Si può rafforzare un materiale ponendo degli ostacoli al movimento delle dislocazioni, ad esempio, facendo precipitare una particella del reticolo, questa o arresta completamente la dislocazione o la costringe a spostarsi su un piano diverso; ciò richiede però molta energia. Questo fenomeno accade assai facilmente ad alte temperature ed è il motivo per il quale un materiale in tali condizioni si deforma permanentemente sotto un carico momentaneo.

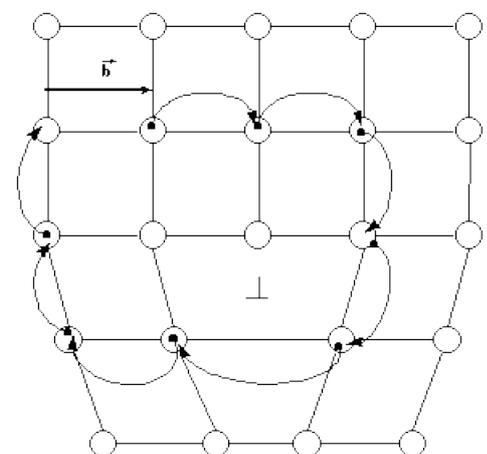


Vettore di Burgers

Il vettore di Burgers è la distanza di scostamento degli atomi attorno alla dislocazione; caratterizza l'ampiezza, la direzione e il verso delle dislocazioni. Si calcola nelle dislocazioni a spigolo e in quelle a vite per mezzo del circuito di Burgers eseguito in senso orario.

Partendo da un atomo qualunque del piano reticolare ed effettuando uno stesso numero di scatti in tutte le direzioni si torna nel caso di cristalli perfetti all'atomo di partenza: il vettore risulta nullo. Diversamente se il circuito si muove su una dislocazione a spigolo (come figura) o a vite non si torna all'atomo di partenza e il tratto di chiusura è proprio il vettore di Burgers.

Nelle dislocazioni a spigolo il vettore è perpendicolare alla linea di dislocazione, mentre nelle dislocazioni a vite il vettore di Burgers e la linea di dislocazione sono paralleli, per cui il piano di scorrimento non è definito in modo univoco e ogni piano reticolare di grande densità che contenga la linea di dislocazione è un possibile piano di scorrimento. Per questo motivo la dislocazione a vite ha maggiori possibilità di spostamento.



Dislocazione a vite

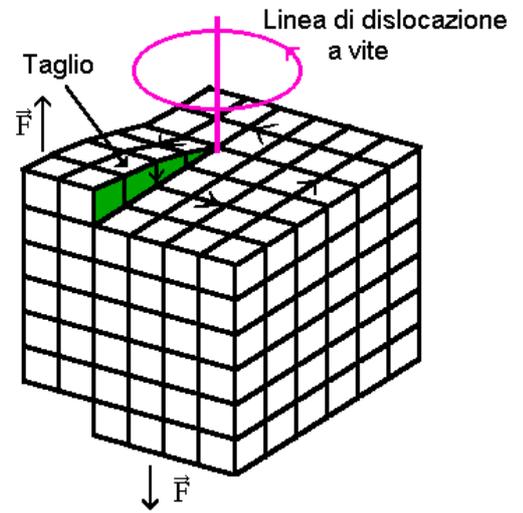
Si ha quando gli atomi si spostano in una direzione parallela alla linea di dislocazione. Questo produce una torsione liquidare del cristallo avente come asse la linea di dislocazione e si formano due scalini: i segni esteriori dello scorrimento degli atomi gli uni sugli altri sono i gradini ADD' BCC'. lo spostamento degli atomi è dato dal vettore di Burgers.

Dall'immagine si può osservare come il vettore di Burgers sia parallelo alla linea di dislocazione AB.

La dislocazione a vite si può formare in un cristallo perfetto che sia stato tagliato da un piano di sezione e al quale sia stato applicato rispetto al piano di sezione da una parte e dall'altra una coppia di sforzi di taglio.

Questi sforzi di taglio introducono una regione di reticolo cristallino distorto con forma di una rampa a spirale di atomi distorti, da cui il nome di dislocazione a vite. La regione di cristallo distorto non è ben definita ed interessa comunque un diametro pari a molti atomi. Attorno a questo tipo di dislocazione si crea una regione di sforzi di taglio, nella quale viene immagazzinata energia.

Inoltre la dislocazione non contiene piani supplementari: i piani reticolari perpendicolari alla linea dislocazione sono leggermente deformati e si avvolgono a spirale lungo la linea di dislocazione presa come asse con andamento destrorso o sinistrorso.

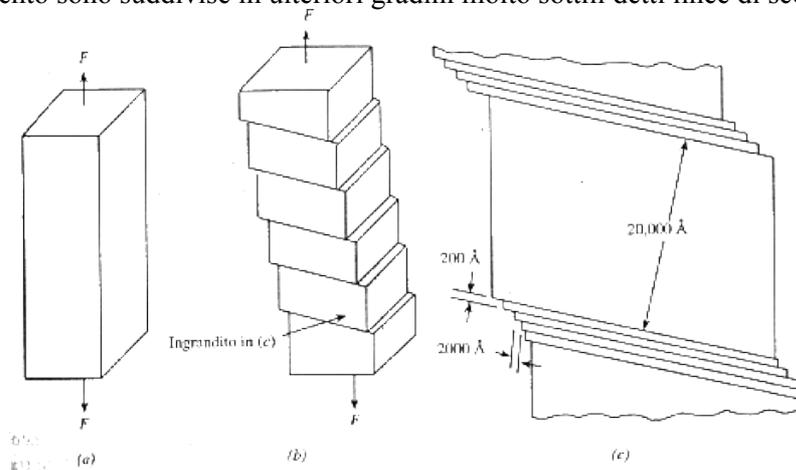


Bande di scorrimento

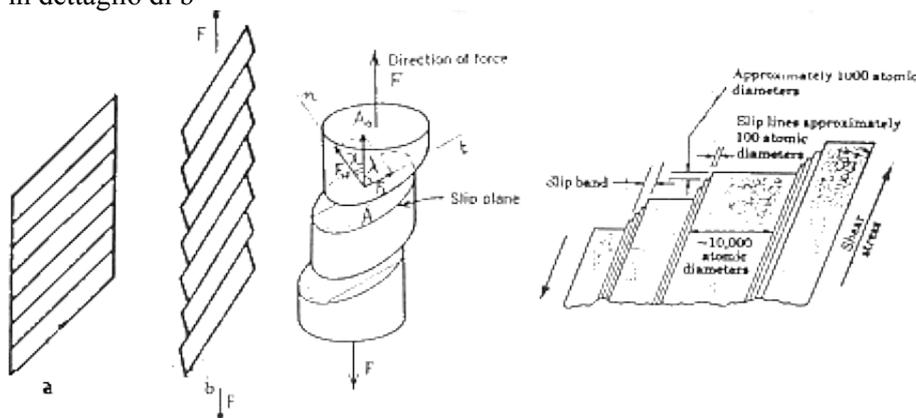
Lo scorrimento (termine inglese creep) è il processo mediante il quale i piani cristallini si muovono uno sull'altro in conseguenza dello sforzo applicato.

- Formazione di bande di scorrimento durante la deformazione plastica: (a) rappresenta un cristallo sottoposto a trazione, quando lo sforzo applicato supera il carico di snervamento (b) compaiono le bande di scorrimento e le varie parti del cristallo scorrono le une sulle altre. In (c) è ingrandita la zona evidenziata in (b): lo scorrimento avviene su un gran numero di piani paralleli.

Tale meccanismo consiste nello scivolamento di alcuni piani cristallini su altri piani sotto l'azione di sforzi di taglio; osservando un provino che ha subito questo processo, si nota che sulla superficie sono comparse delle deformazioni a gradino, dette bande di scorrimento, causate dallo scorrimento dei piani cristallini. In realtà le bande di scorrimento sono suddivise in ulteriori gradini molto sottili detti linee di scorrimento.



- Formazione di bande di scorrimento durante la deformazione plastica: (a) monocristallo sottoposto ad una forza di trazione, (b) bande di scorrimento per uno sforzo applicato superiore al carico di snervamento, (c) ingrandimento in dettaglio di b

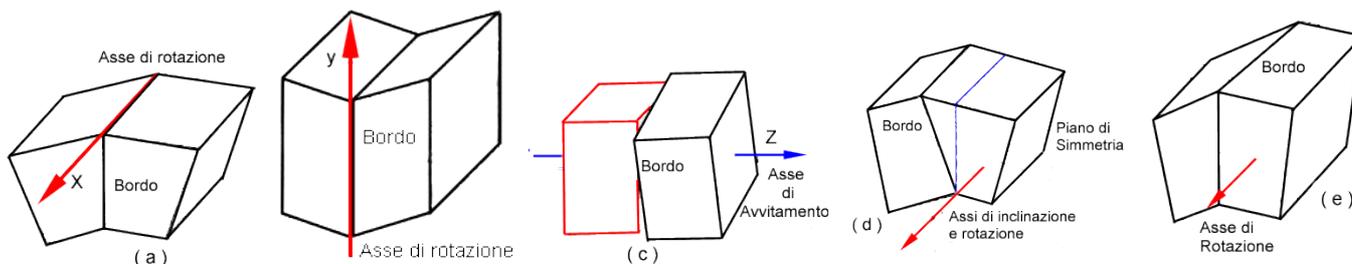
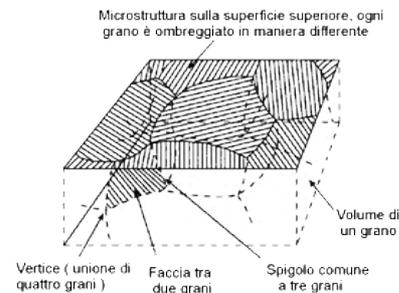


3. Difetti di superficie: difetti di bordo di grano

Ogni grano è costituito da un reticolo cristallino con orientamento differente da quelli adiacenti. Questi microcristalli sono divisi tra loro da zone chiamate bordi di grano. I grani hanno origine durante la solidificazione del metallo, ovvero dalla formazione di nuclei di solidificazione casualmente orientati che poi si accrescono fino alla conclusione del processo ostacolandosi l'un l'altro.

Le dimensioni, l'orientamento e la struttura dei grani determinano alcune proprietà meccaniche quali ad esempio la resistenza a carichi elevati al variare della temperatura. D'altra parte la disposizione degli atomi lungo i bordi di grano influenza le proprietà chimiche ed elettriche.

Se si considerano due grani distinti e contigui, tutte le possibili reciproche orientazioni possono essere semplificate come rotazioni degli stessi a intorno ad uno dei tre assi coordinati di una opportuna terna di riferimento.



Nelle figure a e b si ha un esempio di bordi di flessione (tilt) i quali contengono un asse di rotazione dei grani; nella figura c si ha un bordo di torsione (twist), in cui l'asse di rotazione è ad esso perpendicolare. Inoltre il bordo di grano può non essere simmetrico rispetto ai due cristalli ma ruotare a sua volta intorno agli assi x e y (figure d ed e). In un materiale policristallino ogni bordo di grano ha quindi cinque gradi di libertà e sono necessari cinque parametri per individuarlo.

I bordi di grano non sono altro che regioni dello spazio dello spessore di poche distanze interatomiche, dove due grani adiacenti si adattano l'un l'altro, se l'angolo che i due cristalli formano tra loro è minore di dieci gradi si parlerà di bordi di grano a piccolo angolo. In questo caso il bordo di grano può essere descritto in termini di impilamento regolare di dislocazione e gli atomi ad esso adiacenti appartengono con piccole distorsioni ad entrambi i cristalli.

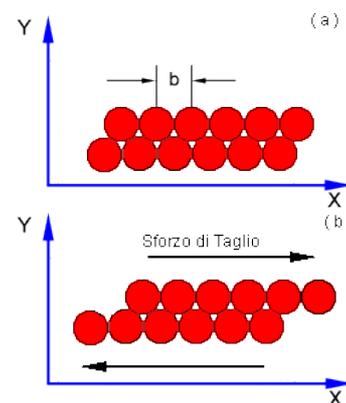
Quando l'angolo supera i dieci gradi si hanno bordi di grano a grande angolo e non è più possibile distinguere le singole dislocazioni a causa del disordine atomico nella regione di contatto.

In ogni caso potrebbe sembrare che questi bordi indeboliscono il materiale, in realtà accade il contrario. In caso di tempra il materiale formato da grani piccoli presenta numerosi bordi in grado di ostacolare le dislocazioni e di ridurre il numero di vacanze in prossimità degli stessi. Al contrario, ad alta temperatura è opportuno aumentare le dimensioni dei grani (cosa che avviene anche naturalmente) poiché una eventuale frattura si propagherebbe lungo le loro superfici di separazione.

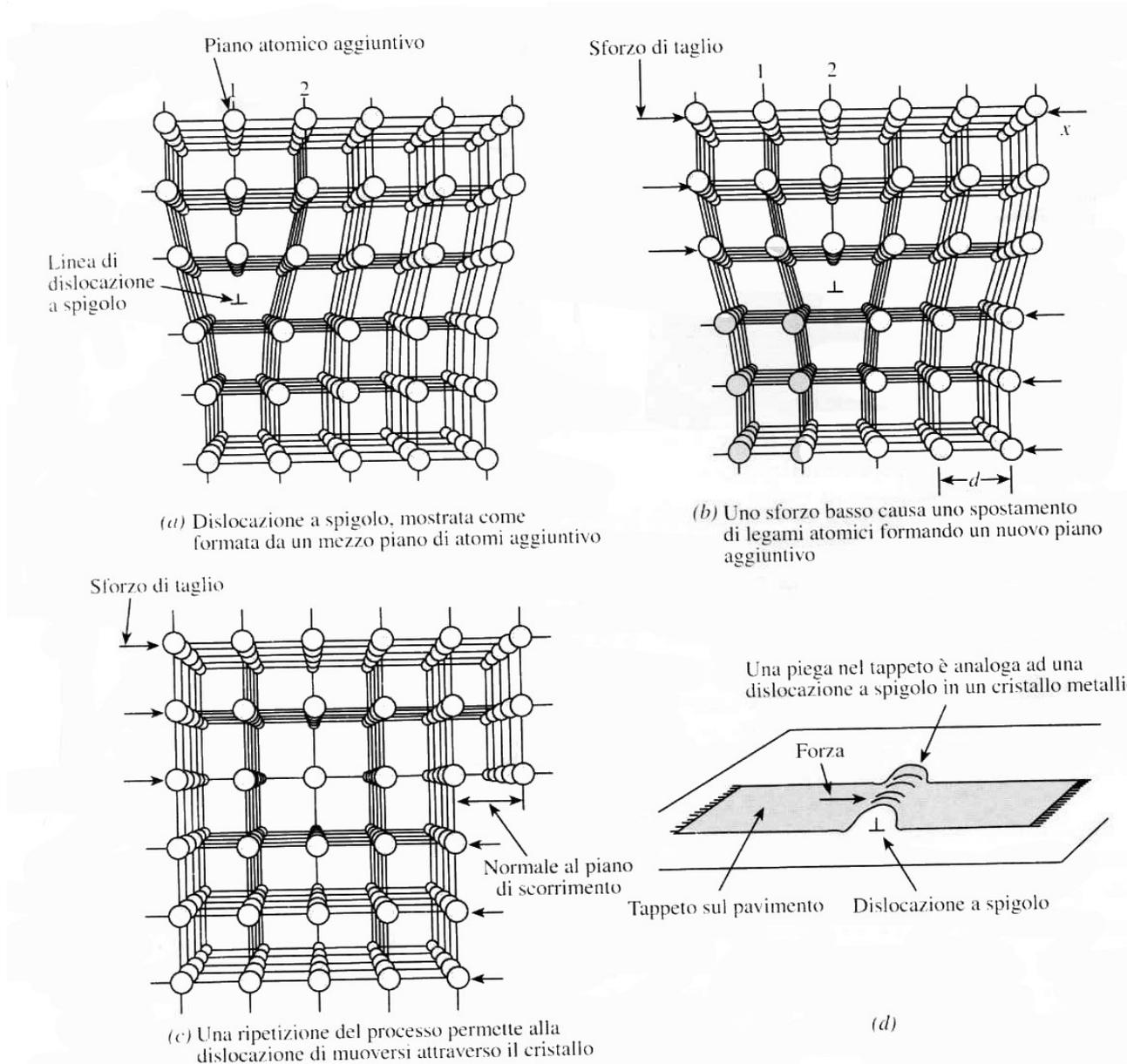
Parlando quindi di bordi di grano non dobbiamo mai scordare la duplice funzione di sorgente di difetti ed al tempo stesso di ostacolo al loro movimento.

4. Esempi e analogie

Le figure seguenti mostrano lo scorrimento di un blocco di atomi su un altro in un cristallo metallico perfetto per un possibile modello atomico. I calcoli fatti basandosi su questo modello mostrano che la resistenza di tali cristalli dovrebbe essere circa da 1000 a 10000 volte più grande della resistenza allo scorrimento realmente osservata. Nel caso di scorrimento atomico di grossi cristalli metallici, durante la deformazione plastica non si ha scorrimento contemporaneo di grandi quantità di atomi, poiché richiederebbe troppa energia; ha invece luogo un processo a più bassa energia che implica lo scorrimento di un piccolo numero di atomi per volta.



La deformazione di grossi cristalli metallici per bassi valori di sollecitazione può avvenire solo nel caso di un elevato numero di dislocazioni presenti, queste si formano in grande numero già durante la solidificazione, ma durante la deformazione se ne formano ancora di più. In questo modo un cristallo che ha subito un'alta deformazione può contenere fino a 10^{12} cm/cm³. Le figure mostrano schematicamente come una dislocazione a spigolo può produrre uno scorrimento



unitario in presenza di bassi sforzi di taglio. Questo meccanismo di scorrimento richiede uno sforzo relativamente basso, poiché ad ogni istante solo un piccolo numero di atomi scorre sugli altri.

Cap. 5 : Il cedimento per frattura

È indispensabile poter prevedere accuratamente le sollecitazioni che provocano il cedimento di un materiale e le modalità con cui tale cedimento può avvenire, in dipendenza delle condizioni ambientali, delle velocità di applicazione delle sollecitazioni, della conformazione del materiale secondo diverse geometrie.

Si definisce la frattura come la divisione in due parti di un corpo dovuta all'applicazione di una forza a temperatura inferiore a quella di fusione del materiale. Ci sono varie tipologie di cedimento:

- **frattura duttile**: è caratterizzata da una deformazione plastica apprezzabile e alto assorbimento di energia;
- **frattura fragile**: ha una deformazione plastica poco e per niente apprezzabile e ha un basso assorbimento di energia;
- **frattura a fatica**: la più insidiosa perché avviene per sollecitazioni bassissime e non dà preavviso;
- **frattura dovuta a creep**.

Si preferisce solitamente la frattura duttile perché i materiali che seguono questo profilo di solito sono più tenaci e ci sono evidenti segnali quando il materiale si avvicina alle condizioni di cedimento.

1. La frattura duttile

Il lavoro necessario per portare un materiale a frattura duttile è abbastanza elevato perché oltre ai fenomeni dissipativi c'è anche una modifica della distorsione e un riallineamento che avvengono a spese del lavoro. Tutte le prove di trazione sono simili fino alla strizione (per provini uguali), i valori si addensano intorno al loro valore medio ma non sono mai uguali, in ogni caso la definizione teorica dell'allungamento non si verifica mai: $\epsilon_0 = \Delta l / l_0$.

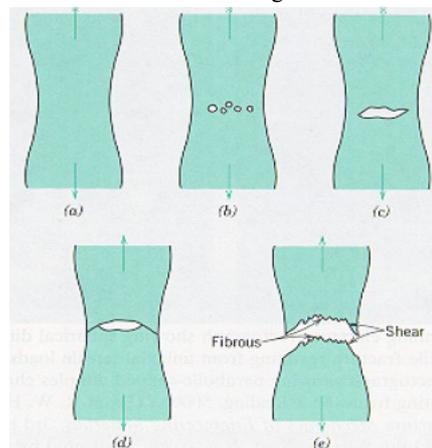
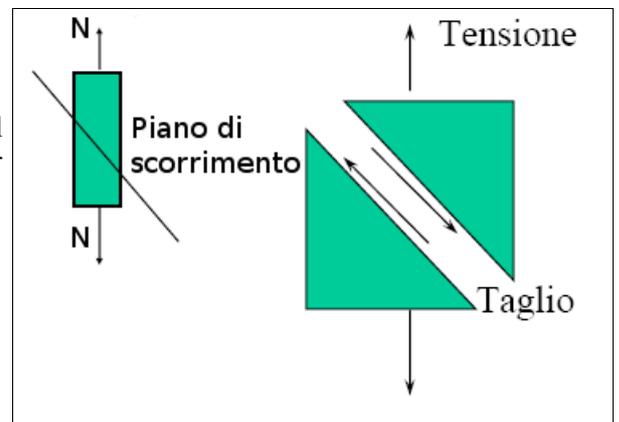
Nelle prove di trazione uniassiale si ha che:

- la superficie finale di frattura è a 45° rispetto all'asse del provino;
- il valore massimo del taglio è a 45°;

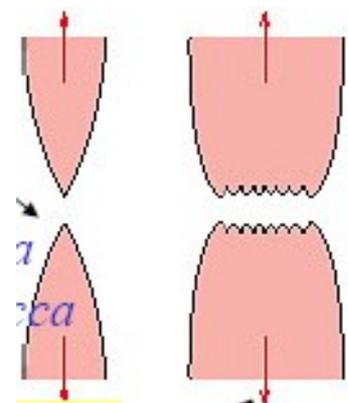
inoltre tagliando il provino a 45° si vede che già all'interno del materiale le dislocazioni si muovono per sforzo di taglio e non per sforzo di trazione.

Vediamo il processo di frattura:

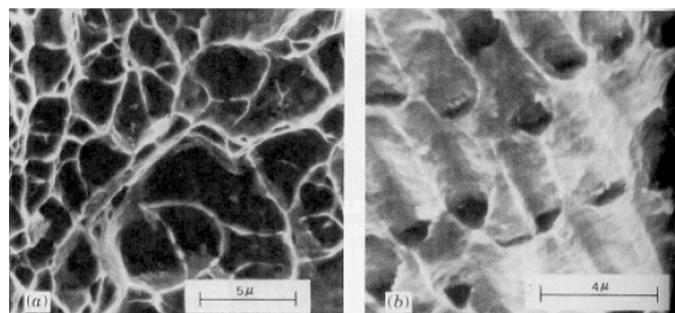
- formazione di strizione iniziale;
- formazione di piccole cavità;
- coalescenza delle cavità a formare una cricca;
- propagazione della cricca;
- rottura finale a taglio a 45°.



Si hanno fratture di profilo caratteristico, nella fotografia si ha il profilo detto a "tazza e cono", sotto invece si hanno rispettivamente due provini: uno altamente duttile e uno moderatamente duttile.



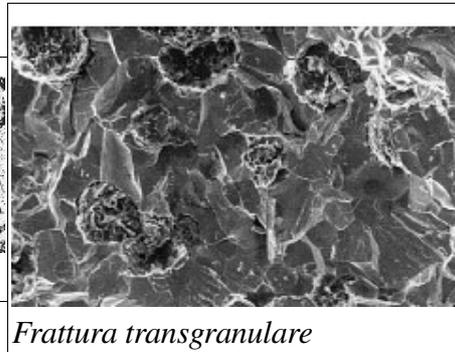
Infine vediamo due immagini SEM di frattura fragile, nel primo caso si hanno rappresentate delle fossette sferiche tipiche di frattura duttile per trazione uniassiale, invece del secondo caso si hanno fossette paraboliche che si ottengono nel caso di sollecitazione di taglio.



2. La frattura fragile

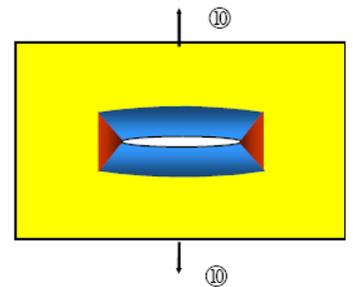
In questo caso, come abbiamo già visto, non si ha una deformazione plastica apprezzabile:

- le **cricche** si propagano lungo piani cristallografici di clivaggio separando gli atomi (si parla di **frattura transgranulare**), i piani di clivaggio sono quelli con indici di Miller più bassi possibili, ovvero laddove non ci sono sporgenze di atomi di altri piani (è anche una zona di energia di legame bassa);
- i materiali meno duri e a grani grossi tendono a mostrare i **“chevrons”** o una disposizione **“fan-like”** (sono come linee di flusso) che si estendono dal punto di inizio della frattura;
- materiali duri o a grana fine non hanno pattern riconoscibili;
- materiale amorfi (come il vetro) hanno superficie di frattura lucenti e smussate;
- i cristalli perfetti subiscono una frattura fragile per uno sforzo $N = E/10$, invece i materiali a struttura cristallina normale hanno resistenza a frattura $N = E/10 \div E/1000$.



Teoria di Griffith

In quest'ottica Griffith propose l'idea che delle microscopiche cricche nel volume del materiale provocassero un innalzamento degli sforzi in zone particolari del materiale e offrirono quindi dei luoghi dove la propagazione delle cricche è facilitata riducendo così la resistenza a frattura del materiale intero.



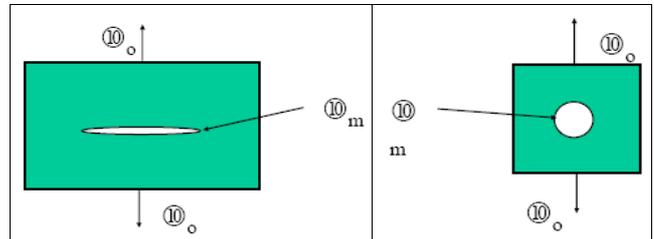
Si ha il coefficiente di concentrazione degli sforzi:

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_0}$$

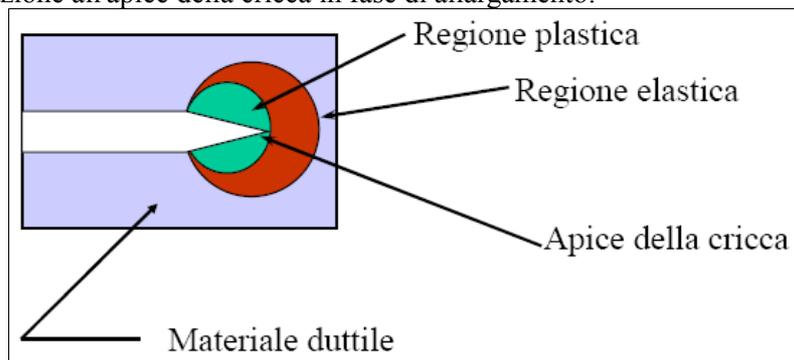
se:

- $\sigma_m >$ resistenza a frattura allora si ha cedimento;
- $\sigma_m <$ resistenza a frattura allora NON si ha cedimento;

il valore σ_m è calcolato per una sezione considerata priva di cricche o anomalie, poi viene inserito un coefficiente di sicurezza ponderato in base all'esperienza.



Vediamo anche la deformazione all'apice della cricca in fase di allargamento:



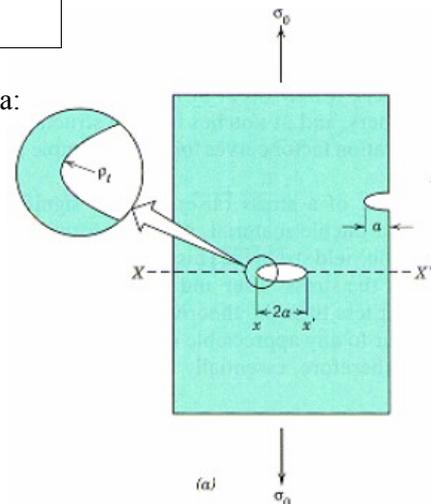
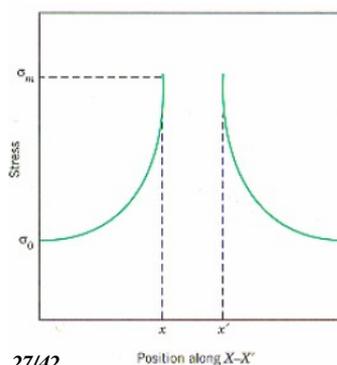
Vediamo la formula di Griffith, consideriamo il provino in figura di spessore unitario, si ha:

- **energia elastica rilasciata**

$$E_E = -2 \pi l^2 \cdot 1 \cdot \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} \Rightarrow E_E = \frac{\pi l^2 \sigma^2}{E}$$

- **energia di superficie per due facce**

$$E_S = [2 \cdot 1 \cdot \gamma] \times 2 \Rightarrow E_S = 4 l \gamma$$



Si ha: $\frac{\partial}{\partial l}(E_e + E_s) = \frac{\partial}{\partial l} \left(\frac{-\pi l^2 \sigma^2}{E} + 4ly \right) = \frac{-2\pi l \sigma^2}{E} + 4y = 0$ da cui $\frac{2\pi \sigma^2}{E} \cdot l = 4y$ e quindi $\pi l \sigma^2 = 2yE$
 $\Rightarrow \sigma \sqrt{\pi l} = \sqrt{2yE}$ con:

$$K_{IC} = \sqrt{2yE} \text{ detto FATTORE CRITICO DI SFORZO,}$$

serve a determinare le situazioni di frattura fragile, in tali casi infatti non si può determinare una lunghezza o uno sforzo di rottura, ma il loro prodotto dà un'indicazione utile alla progettazione.

Si trova lo sforzo critico definendo il fattore di intensità dello sforzo come:

$$Y \cdot \sigma \cdot \sqrt{l} = K_{IC}$$

vediamo che è funzione della geometria, dello sforzo e della lunghezza della cricca. Se il comportamento è duttile allora si deve inserire in K l'apporto energetico ma c'è in più la complicazione che riguarda la forma della cricca che tende ad arrotondarsi, nel caso in cui non ci fosse stata la cricca si avrebbe avuto la sola σ . Si ottiene dalla precedente le espressioni della tensione critica o della lunghezza di cricca critica a seconda che siano note $\{K_{IC}; l\}$ o $\{K_{IC}; \sigma\}$:

$$\sigma_c = \frac{K_{IC}}{Y \cdot \sqrt{l}} \quad ; \quad l_c = \frac{K_{IC}^2}{Y^2 \cdot \sigma^2}$$

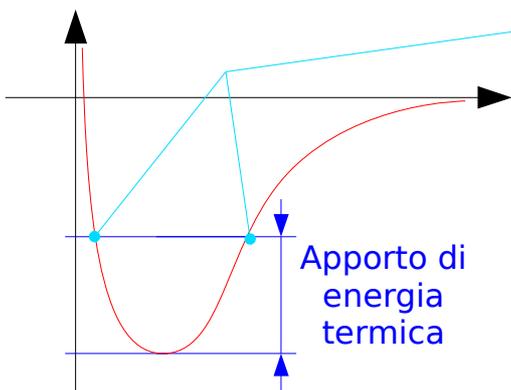
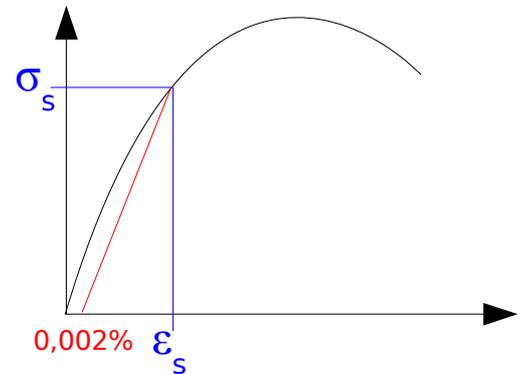
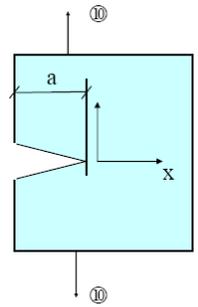
Quando si ha che:

$$\frac{\partial}{\partial l}(E_e + E_s) = \text{TENACITA A FRATTURA}$$

allora si ha che tutta l'energia viene convogliata nella cricca che si propaga per tutta la sezione del provino provocando la FRATTURA CATASTROFICA.

Consideriamo ora il meccanismo di formazione della cricca, valutiamo il diagramma sforzo-deformazione, la cricca che provoca la rottura non c'è al momento della creazione del provino ma si viene a creare al momento della strizione. Il meccanismo che porta a cricca nel caso della teoria di Griffith è identico e causato dal fenomeno delle dislocazioni, quindi questo diagramma rappresenta un riassunto del comportamento del materiale.

Si ha che la prova è definita lenta quando all'interno del materiale c'è tempo per gli assestamenti, i fenomeni diffusivi che hanno luogo nel materiale impediscono questa omogeneità e portano a una prova non lenta, questa redistribuzione energetica mancante è quella che permette la variazione di dimensioni del materiale.



Si ha che l'energia di legame oscilla tra questi due punti di minimo e massimo dopo l'apporto di energia termica dovuto all'applicazione delle tensioni. Ciò che noi osserviamo a livello macroscopico non è altro che la media dei fenomeni microscopici.

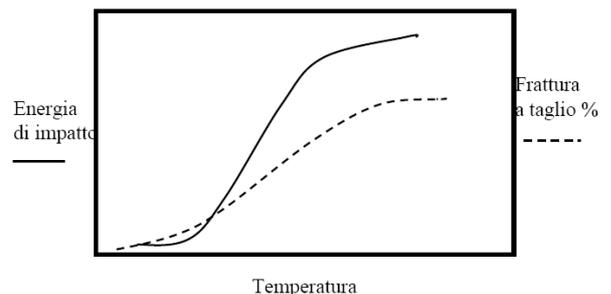
Transizione duttile-fragile

Molti metalli mostrano un cambiamento del proprio comportamento da duttile a fragile con l'abbassarsi della temperatura oltre un valore limite.

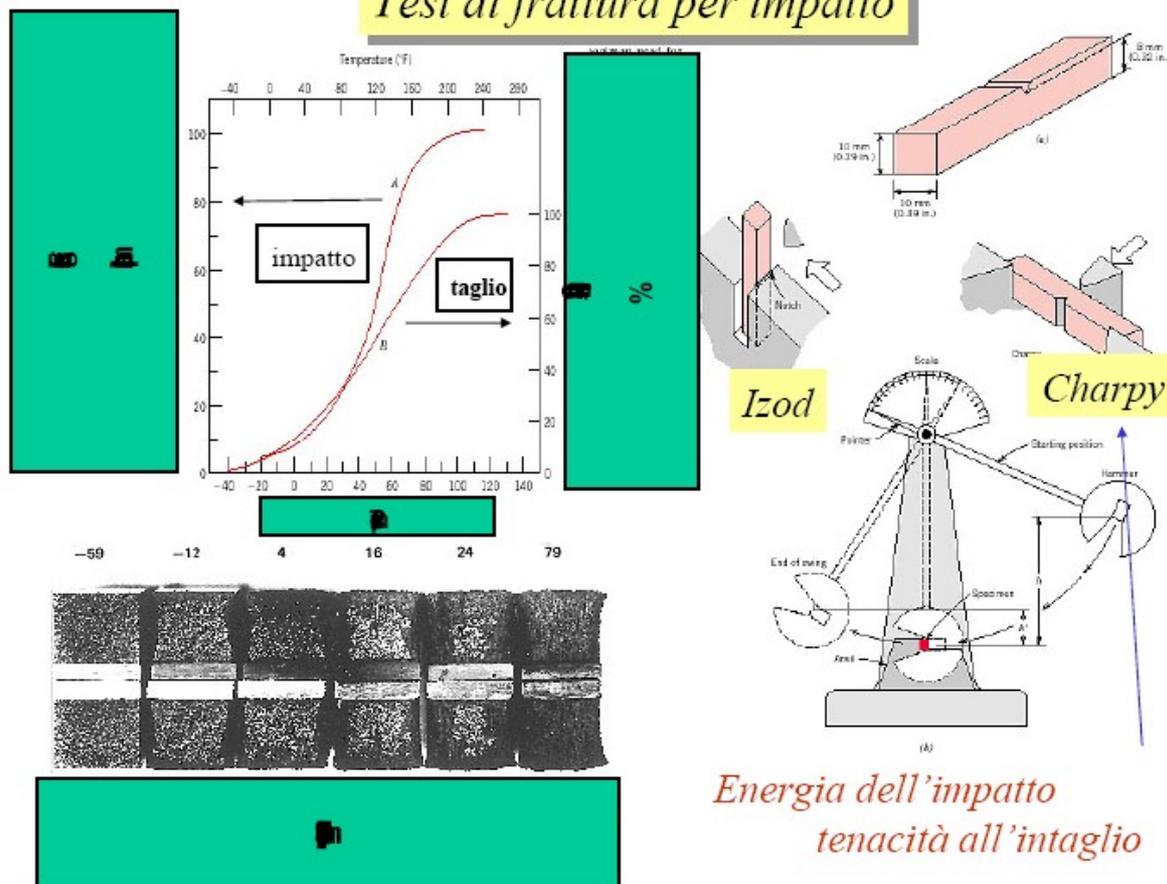
Si sfrutta il fenomeno dell'impatto per trovare a quale temperatura la frattura avviene in modo fragile, ricordiamo il modulo di tenacità:

$$\int_0^{\epsilon_R} \sigma d\epsilon$$

Si avrà che il valore della frattura per urto sarà diversa dal modulo di tenacità trovato in prova uniassiale, perché la prova d'urto avviene grazie al pendolo di Charpy che è approssimato da una deformazione plastica ma la componente di frattura duttile può essere ignorata per via dell'intaglio che si fa al provino.



Test di frattura per impatto



Quindi per materiali che devono contenere materie fredde si devono scegliere materiali criogenici che non hanno transizione duttile-fragile col freddo, ad'es. i metalli FCC. Questo è stato il motivo di affondamento del TITANIC.

Frattura dei Materiali

Duttile

Fragile



Metalli

Polimeri

Ceramici

FCC BCC HCP

Termoindurenti Termoplastici

Le temperature di transizione Duttile-Fragile per i ceramici sono molto alte.

Le temperature di transizione Duttile-Fragile per gli acciai dipendono dal contenuto in carbonio.

I polimeri sono estremamente sensibili agli intagli.

Cap. 6 : Il cedimento per fatica

1. Il carico ciclico

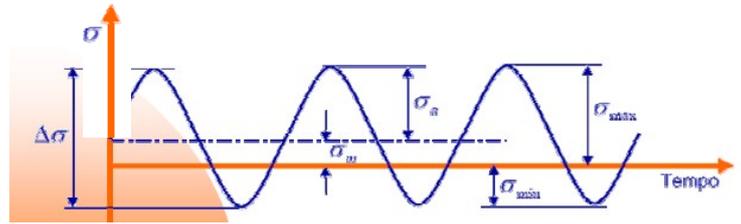
Sottoponiamo un barra a sezione circolare piena ad un carico assiale ciclico di trazione/compressione, si ha:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A} \text{ e } \sigma_{min} = \frac{F_{min}}{A} \text{ quindi } \Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

date $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$ e $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$ si

definiscono:

- rapporto di sollecitazione $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$;
- rapporto di ampiezza $A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R}$.

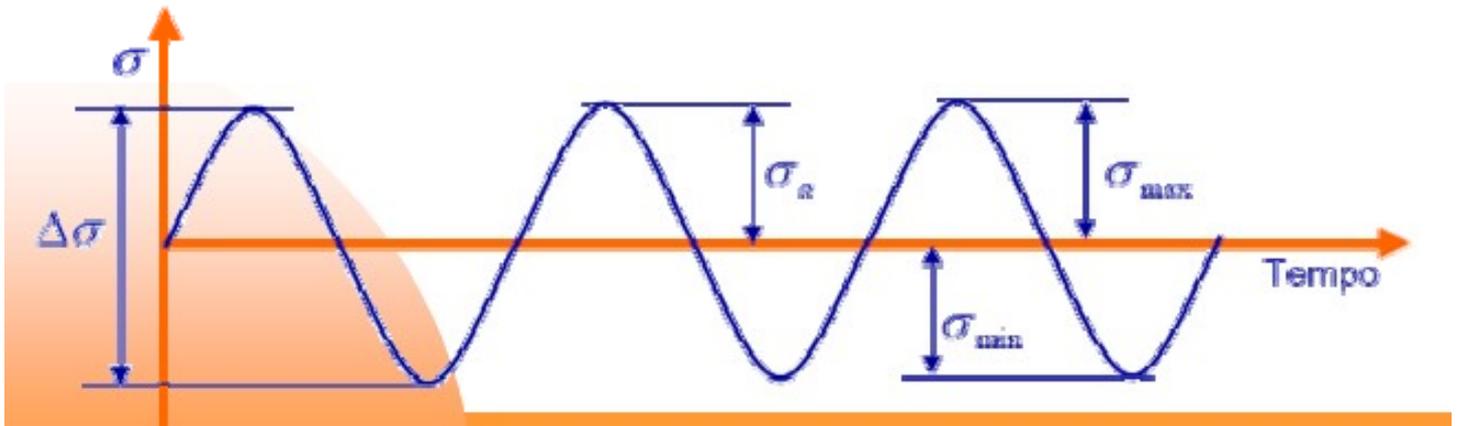


Ciclo alterno simmetrico

Se $F_{min} = -F_{max}$ allora si ha un ciclo a valore medio nullo: $\sigma_m = 0$ da cui $\sigma_{min} = -\sigma_{max}$ e per le altre grandezze:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = -1 \text{ ; } A = \frac{1-R}{1+R} = \infty \text{ e } \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} = \sigma_{max}$$

questo tipo di ciclo è anche detto "alterno simmetrico" ed'è caratterizzato da $R = -1$ e $A = \infty$.

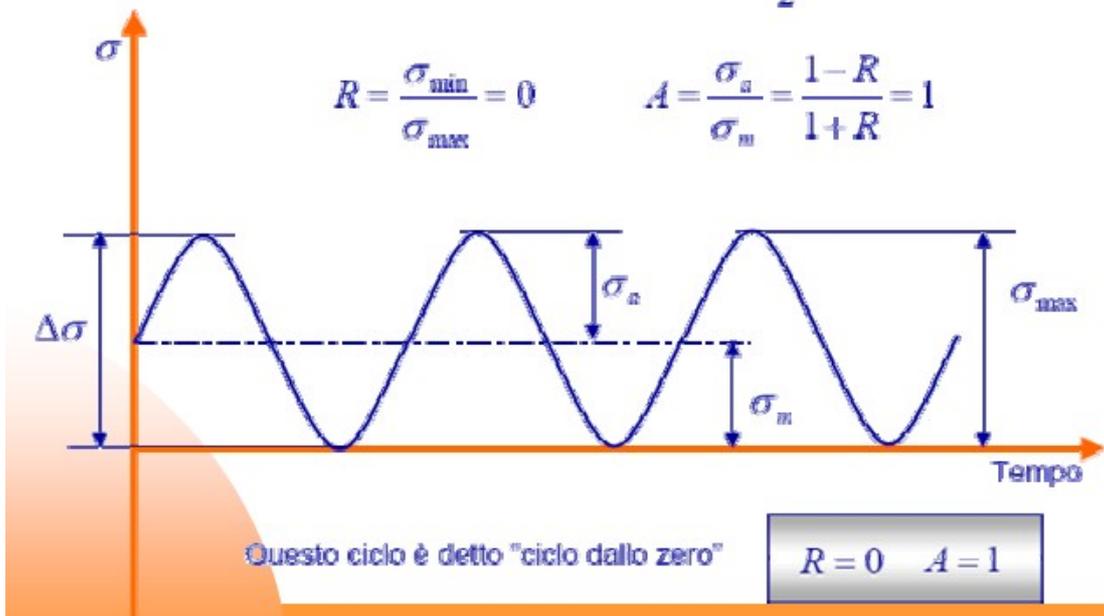


Ciclo dallo zero

Se $F_{min} = 0$ allora si ha: $\sigma_{min} = 0$ $\sigma_m = \sigma_a$

ed inoltre: $\sigma_{max} = \Delta\sigma \rightarrow \sigma_a = \frac{\sigma_{max}}{2}$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0 \quad A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \frac{1-R}{1+R} = 1$$



Definiamo altri parametri influenti:

- **Frequenza [Hz]** : cicli al secondo, in generale influenza la fatica solo se sono anche presenti effetti ambientali come l'umidità o temperature elevate;
- **Forma d'onda** : ci sono molteplici forme d'onda (sinusoidale, quadrata, triangolare, e altre) e influenza la fatica solo se sono presenti anche altri effetti ambientali.

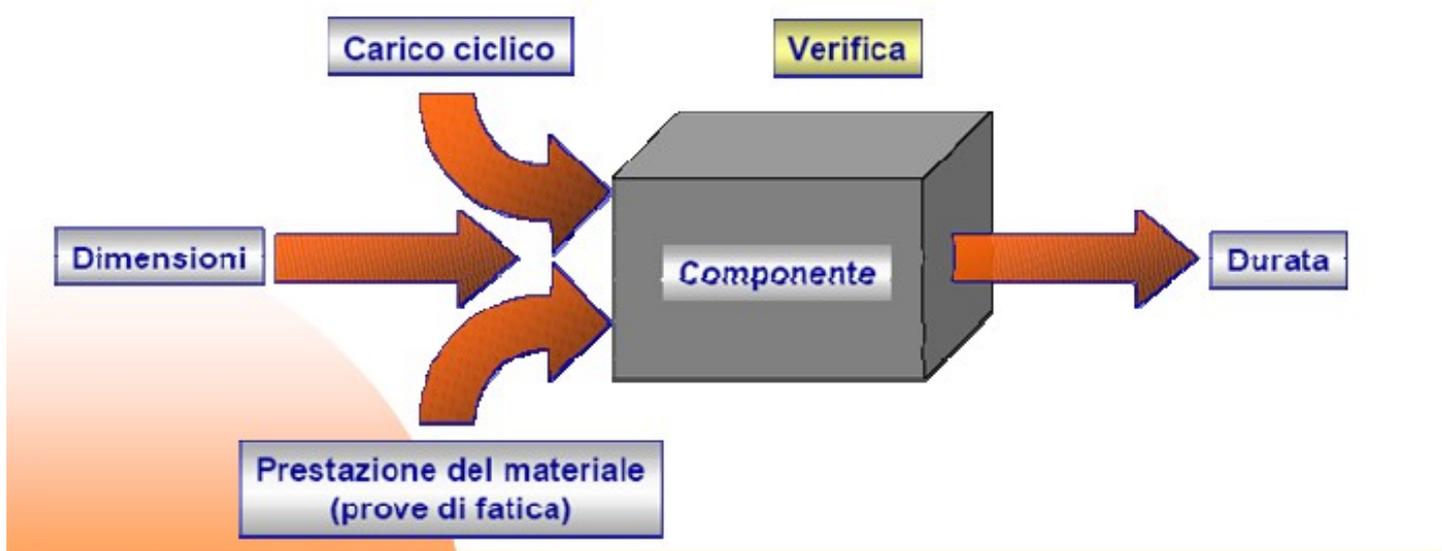
2. Progettazione di un componente a fatica

Si può procedere in due modi diversi:

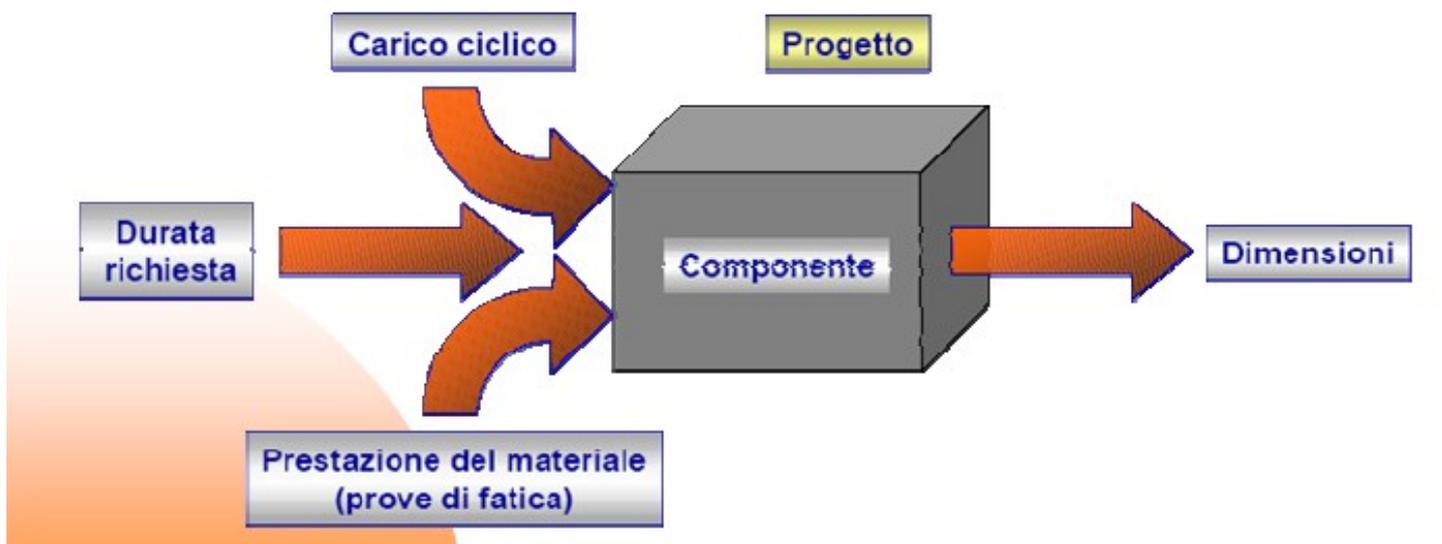
- il primo modo, quello più classico, consiste nel mettere in relazione la durata del componente (numeri di cicli) prima di giungere alla rottura con lo stato di sollecitazione agente sul componente e basandoci sul confronto con dati sperimentali;
- il secondo, un approccio più locale, concentra l'attenzione sul difetto e sulle condizioni al contorno che determinano l'accrescimento fino alle dimensioni critiche, mettendole in relazione con i carichi agenti e le caratteristiche di resistenza a frattura del materiale.

"Metodologia basata sulla curva di Wöhler"

Questa procedura considera il componente una sorta di "scatola nera" nella quale si inseriscono informazioni ed escono previsioni sulla vita a fatica, basandosi sul paragone con ciò che si osserva sperimentalmente in casi analoghi, senza che siano noti i meccanismi che agiscono all'interno della scatola.

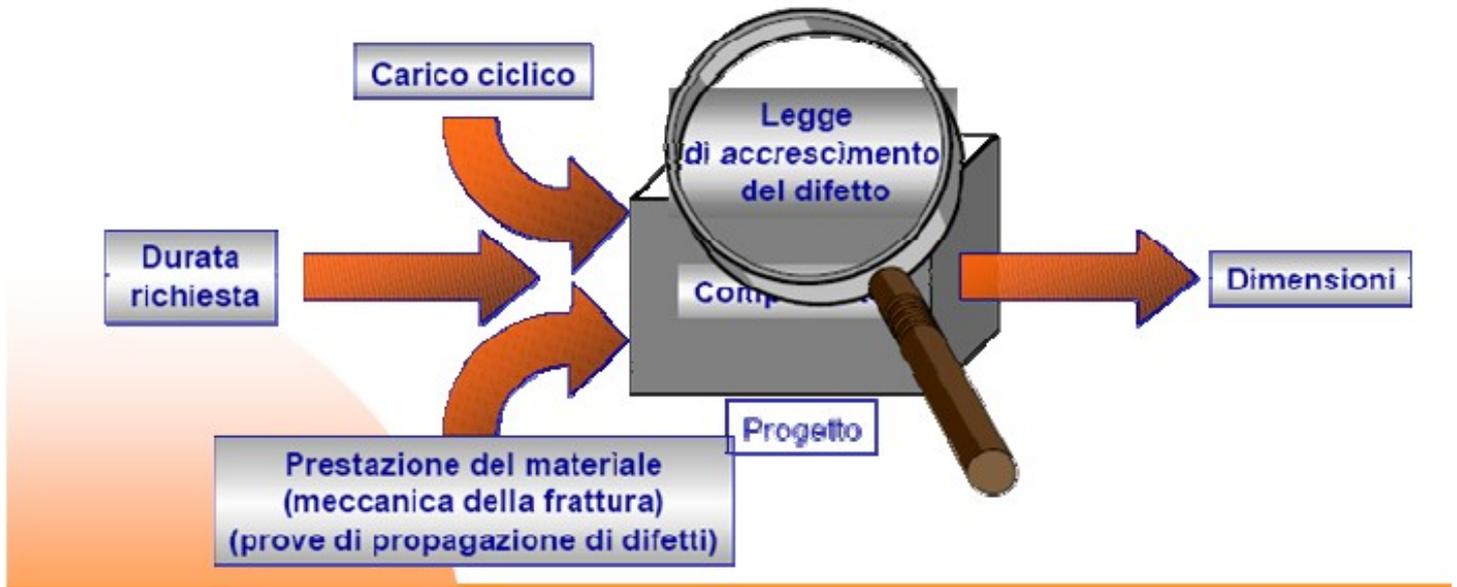


Questa procedura considera il componente una sorta di "scatola nera" nella quale si inseriscono informazioni ed escono previsioni sulla vita a fatica, basandosi sul paragone con ciò che si osserva sperimentalmente in casi analoghi, senza che siano noti i meccanismi che agiscono all'interno della scatola.



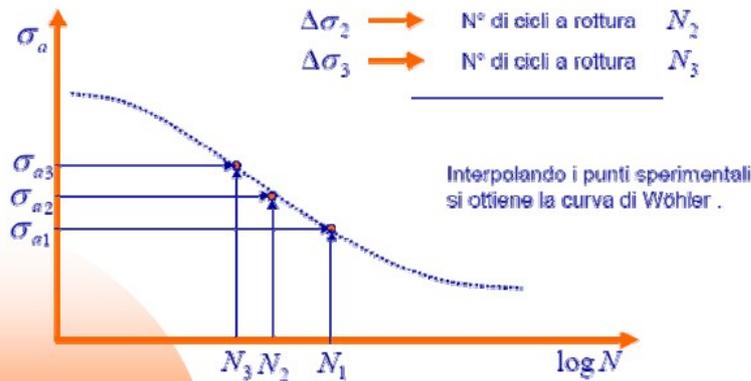
"Approccio locale - Meccanica della frattura"

Questa procedura prevede la vita a fatica del componente tramite una legge di accrescimento di un difetto, preesistente nel componente, del quale si ipotizza posizione, forma e dimensione. In altri termini è come mettere in luce il meccanismo interno di danneggiamento del componente.

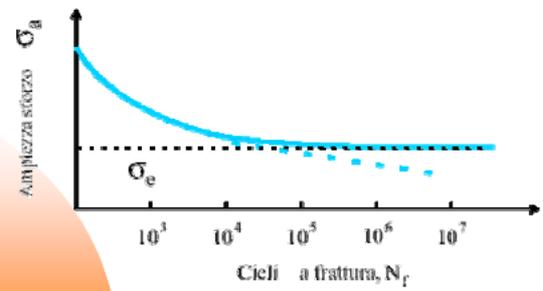


Curve Sforzo-Vita del componente

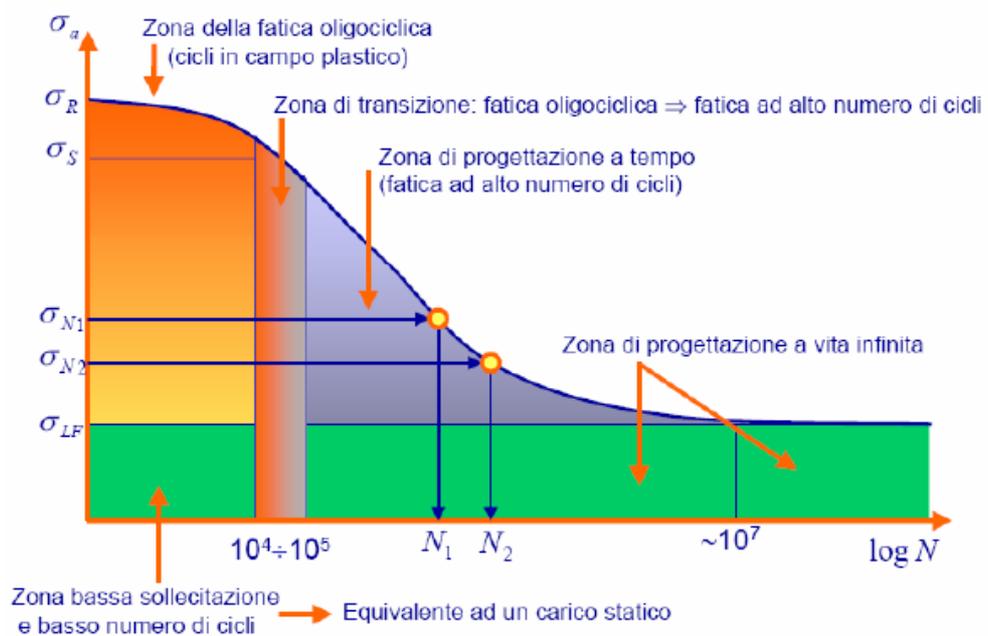
- $\Delta\sigma_1$ → N° di cicli a rottura N_1
- $\Delta\sigma_2$ → N° di cicli a rottura N_2
- $\Delta\sigma_3$ → N° di cicli a rottura N_3



Se si grafica il numero di cicli a frattura in funzione dell'ampiezza dello sforzo applicato si ha l'andamento riportato in figura:



La curva del Wohler rappresenta un fenomeno complesso ed individua diverse aree, nel piano $\sigma_a - \log N$, alle quali sono associate altrettante procedure di progetto a fatica.



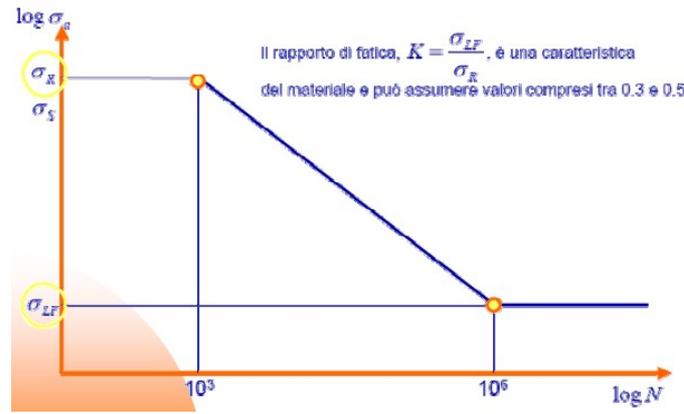
Progettazione a “stress-life”

Se proviamo a rappresentare la legge $\log(\sigma_a)$ in funzione di $\log(2N_f)$ dove $(2N_f)$ rappresenta il numero di inversioni (due per ogni ciclo) si otterrà una relazione lineare tipo:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = \sigma_a = \sigma'_f \cdot (2N_f)^b$$

dove:

- σ'_f rappresenta il coefficiente di resistenza a fatica (per la maggioranza dei metalli è più o meno la metà della σ_f reale a fatica);
- $b = -0,05 \div -0,12$ è l'esponente della relazione di Basquin;

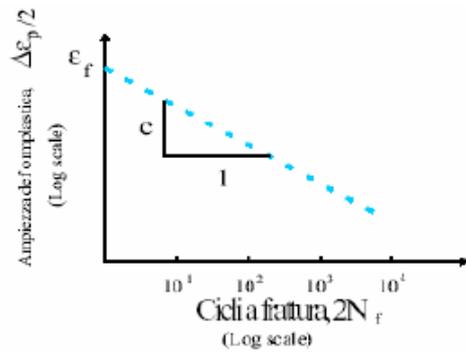


Progettazione a “strain-life”

L'approccio a “stress-life” è applicabile a situazioni che coinvolgono essenzialmente solo deformazione nel campo elastico. Ci si aspetta comunque una lunga vita a fatica e per situazione con altri sforzi, temperature e concentrazioni degli sforzi (ad es. in caso di presenza di intagli) dove si possono localmente verificare deformazioni plastiche questo approccio non è consigliato.

In questi casi più che all'ampiezza degli sforzi σ_a conviene concentrarsi all'ampiezza delle deformazioni plastiche $\frac{\Delta\epsilon_p}{2}$. Tracciando un grafico di

$\log(\frac{\Delta\epsilon_p}{2})$ verso $\log(2N_f)$ si ha un andamento lineare.



Per rappresentare questo andamento si ha la relazione di Coffin-Manson: $\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f \cdot (2N_f)^c$, dove:

- $\epsilon'_f/2$ è l'ampiezza della deformazione plastica;
- ϵ'_f è il coefficiente di duttilità a fatica (= duttilità a rottura per la maggior parte dei metalli);
- C è l'esponente della duttilità a fatica, per molti metalli si ha $C = -0,5 \div -0,7$.

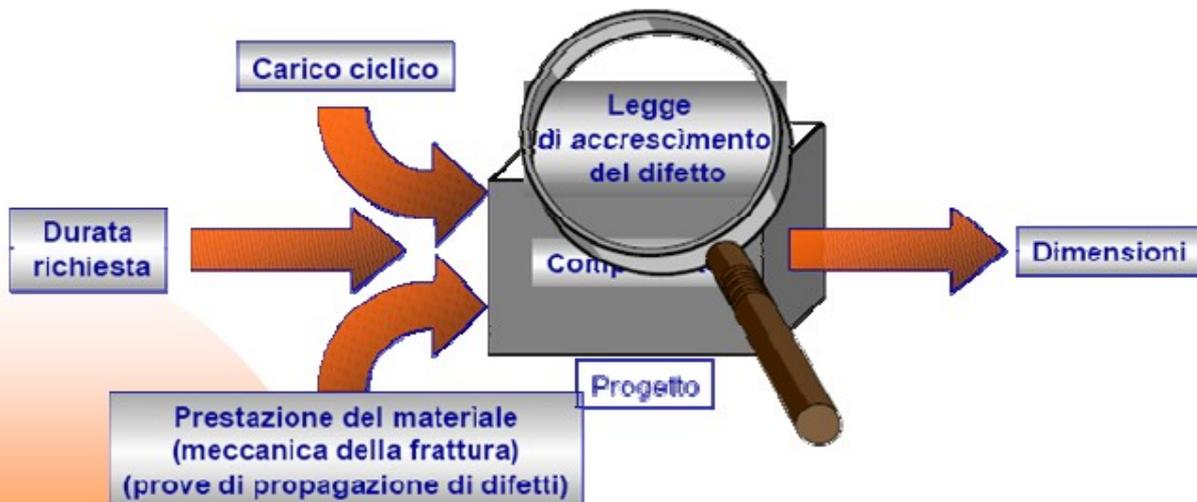
3. Approccio micromeccanico della rottura a fatica (LEGGE DI PARIS)

La differenza fondamentale tra sollecitazione statica e sollecitazione ciclica è che nella prima, finché il fattore di intensità degli sforzi K non raggiunge un valore critico K_c le cricche presenti nel materiale non possono aumentare di dimensioni, invece nel caso di sollecitazione ciclica il K applicato può essere ben al di sotto di K_c ma con il passare dei cicli le cricche aumentano comunque di dimensione.

La progettazione può quindi essere sicura per carichi statici e diventare pericolosa nel caso di sollecitazione a fatica, ecco perché qualunque fluttuazione del carico va presa in considerazione, anzitutto dalla progettazione:

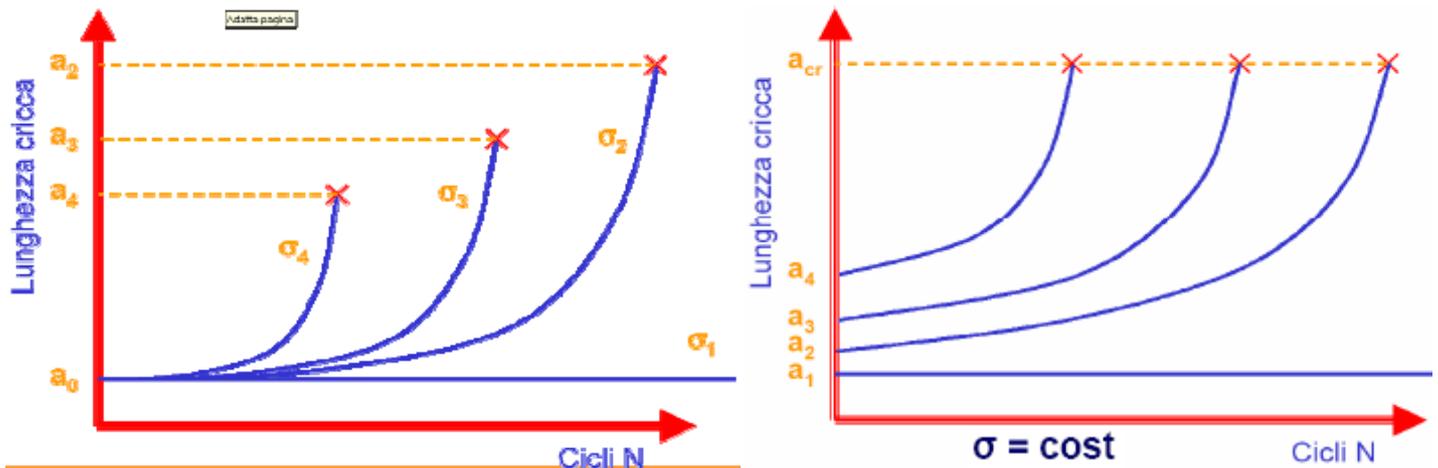
“Approccio locale - Meccanica della frattura”

Questa procedura prevede la vita a fatica del componente tramite una legge di accrescimento di un difetto, preesistente nel componente, del quale si ipotizza posizione, forma e dimensioni. In altri termini è come mettere in luce il meccanismo interno di danneggiamento del componente.



A questo punto ci si pone un problema ovvio: cosa succede quando un difetto è sollecitato da un carico variabile nel tempo? e quale relazione c'è tra la fatica e la meccanica della frattura?

Si possono raccogliere in un grafico dei dati sperimentali, trovati imponendo una serie di carichi via via crescendo $\sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$ e con dimensioni del difetto anch'esse variabili $a_4 > a_3 > a_2 > a_1$.



Vediamo che la velocità di propagazione della cricca $\frac{da}{dN}$ dipende dallo stato di tensione all'apice del difetto che dipende solo dal modo di apertura e dal fattore di intensità delle tensioni K: $\frac{da}{dN} = f(\Delta\sigma, a, Y) = f(\Delta K)$ detta LEGGE DI PARIS, si ha:

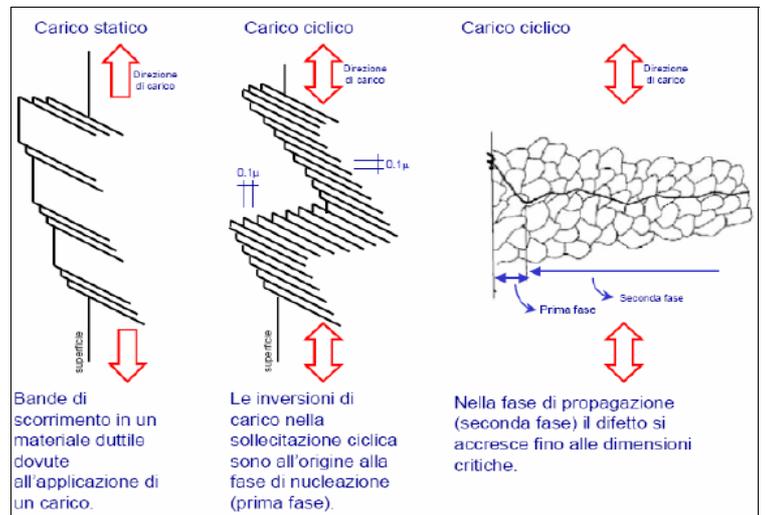
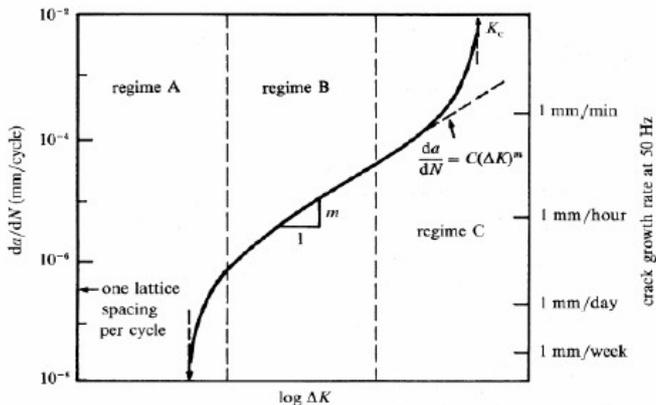
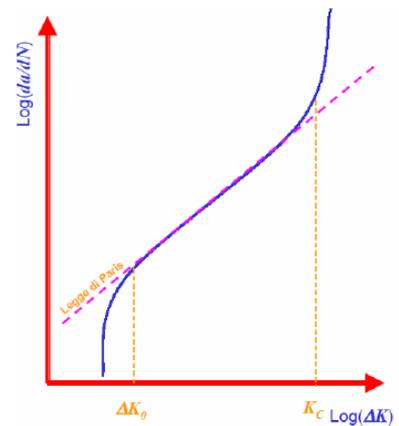
$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^n \quad \text{con} \quad \Delta K = Y \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

In questo modo il grafico dovrebbe essere una retta con pendenza m, l'andamento reale invece ha 3 regioni {A, B, C}. Definiamo per una sollecitazione ciclica:

$$\Delta K = K_{max} - K_{min}$$

che deriva da $\Delta\sigma$ e dalla geometria della cricca, sia Δa l'aumento delle dimensioni della cricca dopo N cicli, si ha la relazione:

$$\frac{\Delta a}{\Delta N} \rightarrow \frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m$$



Innesco e propagazione della cricca

834 Schematic representation showing stages I and II of fatigue crack propagation in polycrystalline metal. (Copyright ASTM. Reprinted with permission.)

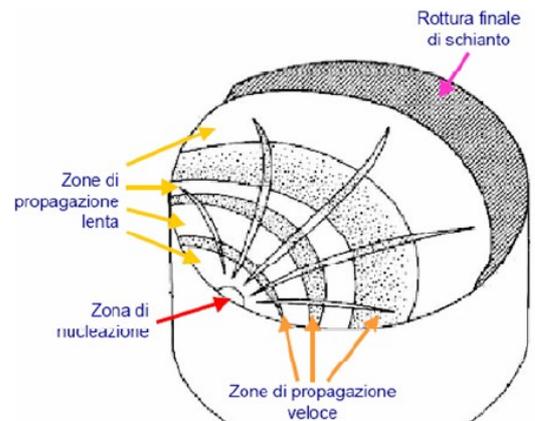
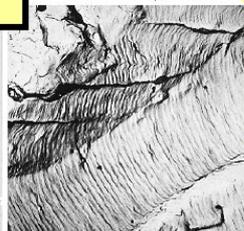
$$N_f = N_i + N_p$$

Propagazione della cricca a fatica: stadio I e II

Stadio II: striature a guscio di conchiglia

Striature

Striature in Alluminio Immagine Al TEM



A questo punto definiamo il concetto di fattore di intensità dello sforzo “soglia” che chiamiamo ΔK_{th} , quando ΔK è inferiore o uguale a ΔK_{th} la velocità di crescita delle cricche è così bassa che si può supporre che le cricche rimangano dormienti per un tempo indefinito. Sul piano pratico si assume come definizione operativa di ΔK_{th} quel ΔK a cui corrisponde una velocità di crescita inferiore a 10^{-8} mm/ciclo.

Abbiamo visto che $\Delta K = Y \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$ con Y dipendente dalla geometria e che può quindi essere considerata costante

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (Y \cdot \Delta \sigma \cdot \sqrt{\pi a})^m \Rightarrow \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{a^{m/2}} = C \cdot Y^m \cdot (\Delta \sigma)^m \cdot \pi^{m/2} \cdot \int_0^{N_f} dN$$

- per $m > 2$:
$$N_f = \frac{2}{(m-2) \cdot C Y^m \cdot (\Delta \sigma)^m \cdot \pi^{m/2}} \cdot \left[\frac{1}{a_0^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_f^{(m-2)/2}} \right] ;$$
- per $m = 2$:
$$N_f = \frac{1}{C Y^2 \cdot (\Delta \sigma)^2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{a_f}{a_0} .$$

Le costanti c e m sono parametri che dipendono dal materiale considerati e devono essere determinati sperimentalmente (valori tipici sono $m = 2 \div 4$ per i metalli e $m = 4 \div 100$ per i ceramici e polimeri). Nel caso in cui Y non fosse costante la soluzione dell'equazione di Paris deve essere effettuata con metodi numerici.

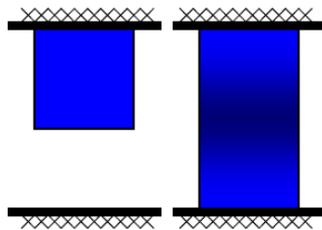
Altra nota importante è che nel regime di Paris la velocità di crescita delle cricche è poco sensibile al rapporto di sollecitazione R, il parametro chiave che governa il fenomeno è ΔK .

Cap. 7 : Scorrimento viscoso a caldo o "Creep"

Ci sono due modi per deformare il materiale:

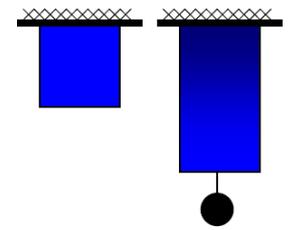
Deformazione costante

$$E_r(t) = \frac{\sigma(t)}{\epsilon_0}$$

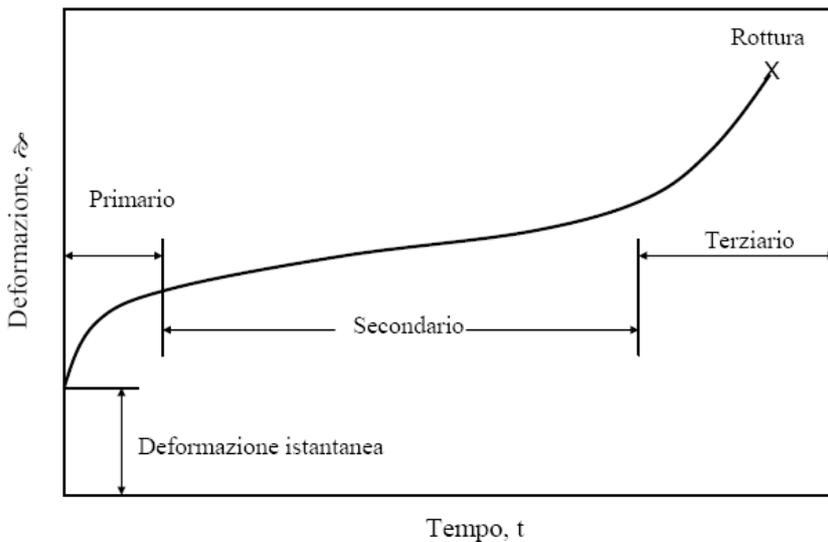
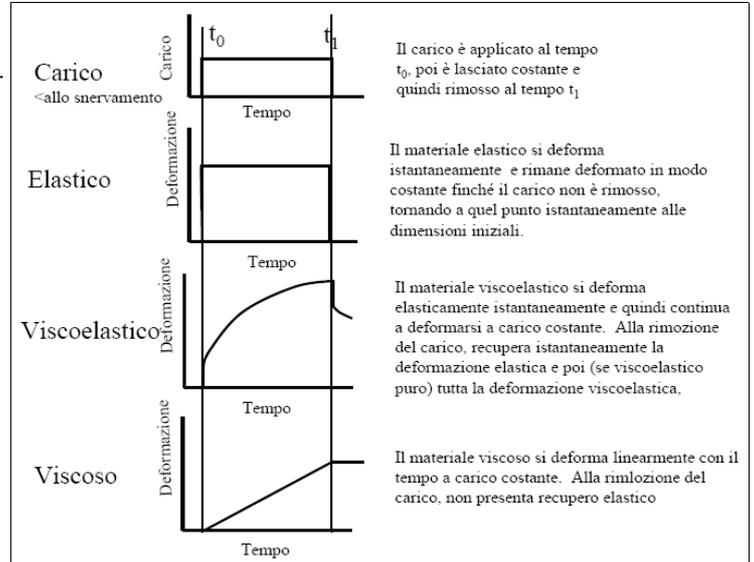
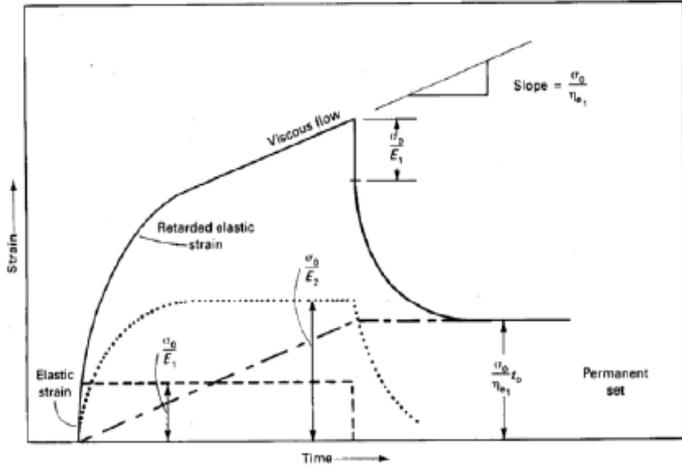


Sforzo costante

$$E_c(t) = \frac{\sigma_0}{\epsilon(t)}$$

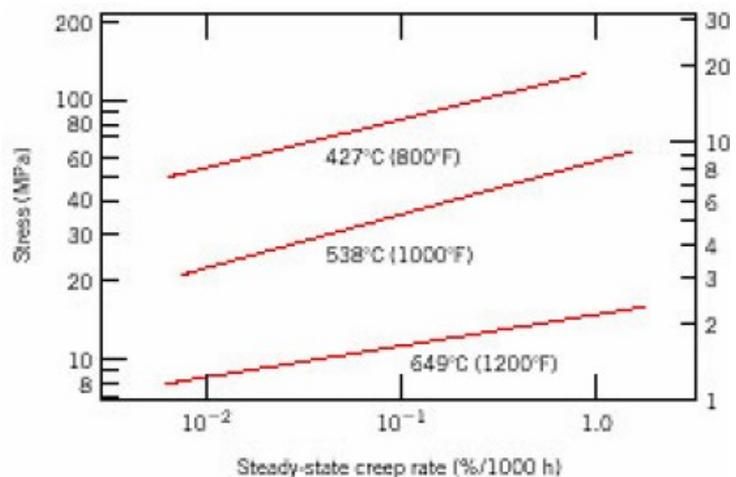
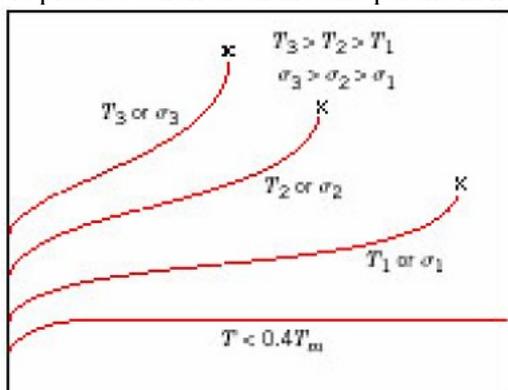


Il comportamento dei diversi tipi di materiali (elastico, viscoelastico e viscoso) cambia a parità di carico applicato.



Al crescere della temperatura il materiale passa da essere elastico a essere viscoso, lo scorrimento viscoso a caldo è un fenomeno che porta il materiale a deformazione e serve per caratterizzare il comportamento viscoelastico. Consiste nell'applicare, ad alte temperature, uno sforzo costante e osservare l'evoluzione della deformazione. Durante lo scorrimento iniziale (**primario**) c'è scorrimento delle dislocazioni seguito dall'allungamento del materiale e dalla creazione di nuove dislocazioni. A questo punto il materiale incrudisce o ha resistenza inferiore a prima. Nel **secondario** il calore non smaltito provoca la ricottura del materiale permettendogli di recuperare e dislocazione, invece nel **terziario** il materiale non ha più questa capacità e si avvia al livello di incrudimento massimo e infine alla rottura.

Vediamo ora l'influenza dello stress e della temperatura sul creep. Il tratto iniziale delle curve ci fa capire che si tratta di un materiale plastico e non di un metallo perché non ci sarebbe il tempo di transizione nei metalli.



Si ha l'espressione della velocità di deformazione:

$$\dot{\epsilon}_s = K_1 \cdot \sigma^n \quad ; \quad \dot{\epsilon}_s = K_2 \cdot \sigma^n \cdot e^{\frac{-Q_c}{R_T}}$$

Cap. 8 : Materiali polimerici

1. Introduzione

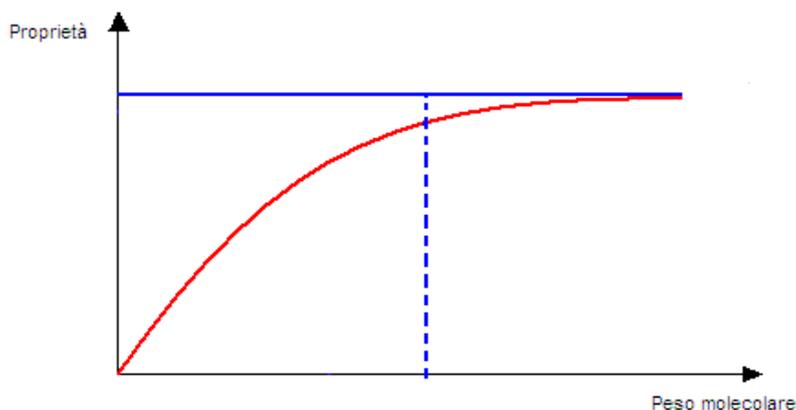
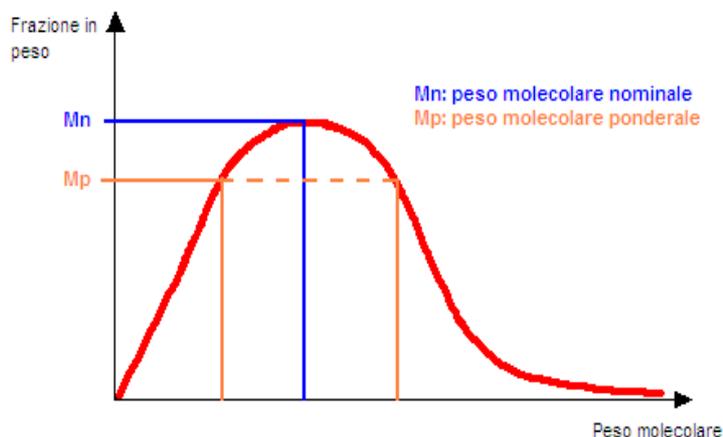
Non si ha un vero e proprio materiale a livello di monomero, esso deve essere sintetizzato diversamente dai metalli che si trovano già in natura. I monomeri devono essere aggregati in lunghe catene per dare consistenza all'insieme e creare così un materiale usufruibile allo scopo della meccanica. Una catena polimerica può essere formata da più monomeri, in questo caso si parla di copolimero.

Addizione

Quando si sintetizzano i polimeri si ha che, diversamente da altre sostanze le cui molecole non cambiano, nei polimeri (dovendo essere così sintetizzati) l'effettiva lunghezza delle macromolecole sarà casuale.

Si considera il peso medio macromolecolare per dare una idea del risultato della addizione; ovviamente più lunghe e meglio distribuite saranno le catene (con una curva di distribuzione più stretta) più si avrà un miglior risultato per l'uso industriale e tecnologico.

Considerato il grafico sottostante in cui le proprietà sono strettamente legate in modo crescente al peso molecolare del polimero, si ha che oltre un certo valore si ha una zona di plateau dove le proprietà variano pochissimo con un ulteriore aumento del peso molecolare.



Polimerizzazione

La costruzione di una struttura polimerica non è possibile che con elementi aventi una valenza uguale o superiore a due: i tre principali elementi alla base delle strutture polimeriche sono l'ossigeno (bivalente), il carbonio ed il silicio (tetraivalenti). I meccanismi di formazione dei polimeri sono:

- **Policondensazione** : Nella policondensazione diversi monomeri o prodotti intermedi vengono uniti fra di loro mediante gruppi terminali reattivi con dissociazione di prodotti secondari volatili (acqua, ammoniaca). La grandezza molecolare dei policondensati viene regolata dal rapporto di massa dei prodotti di partenza e dalle altre condizioni di reazione. Monomeri del medesimo tipo vengono uniti assieme nei punti delle molecole, dapprima occupati da idrogeno, in modo tale che l'ossigeno, mediante ossidazione si separi sotto forma di acqua. Se si uniscono monomeri con ognuno dei due gruppi reattivi, in modo da formare lunghe molecole a struttura lineare, allora si formano materiali termoplastici: poliammidi, poliestere lineare, eccetera. La policondensazione a stadi di materiali con più di due punti reattivi porta a macromolecole reticolate tridimensionalmente, cioè a materiali termoindurenti (ad'es. i fenoplasti e gli amminoplasti).
- **Poliaddizione** : Nella poliaddizione le macromolecole vengono costruite mediante l'unione reciproca di gruppi reattivi, con raggruppamento strutturale interno, senza la dissociazione di sostanze volatili. Al creare i monomeri da polimerizzare tramite poliaddizione, caratteristicamente a basso peso molecolare, le reazioni di dissociazione per la formazione di gruppi terminali che poi andranno a legarsi, anticipano le cosiddette reazioni di condensazione macromolecolare. Questa tecnologia è adatta principalmente per la reticolazione senza pressione durante la lavorazione delle materie plastiche. Le resine epossidiche e i poliuretani risultano tipici prodotti di poliaddizione.

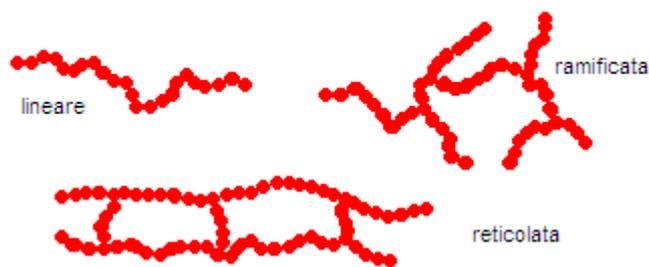
La reazione di polimerizzazione, in generale, è notevolmente esotermica poiché ogni legame doppio, viene sostituito con due legami semplici con energia di formazione più bassa. Questo tipo di processo è maggiormente usato per la sintesi di materiali termoplastici. I monomeri prodotti da sostanze gassose o liquide, si accatano in seguito alla dissociazione di doppi legami insaturi fino a formare molecole a struttura lineare, senza separazione di prodotti secondari.

Le reazioni di polimerizzazione vengono avviate mediante attivazioni dei monomeri reattivi o mediante assorbimento di energia (luce, calore, irradiazione) oppure mediante catalizzatori (per esempio perossidi che in piccole quantità si decompongono in radicali molto reattivi funzionanti da efficaci agenti iniziatori).

L'interruzione della catena ad un grado di polimerizzazione desiderato viene effettuata mediante la saturazione laterale di catene crescenti oppure mediante inibitori radicali aggiunti alla miscela di reazione come sostanze di regolazione. Il radicale trattato può far originare una nuova catena.

Se si dispone di una catena finita, allora si origina una ramificazione della catena. Per ottenere particolari caratteristiche si producono polimerizzati a segmenti oppure copolimeri a blocchi, nei quali le sezioni più lunghe di catene di monomero, polimerizzano alternativamente con altre, oppure polimerizzati ad innesto, dove in determinati punti attivi delle molecole a struttura lineare (polimero matrice) si fanno polimerizzare catene laterali di altri monomeri. La tecnologia della polimerizzazione ad innesto rende possibili molteplici combinazioni di polimeri altrimenti non compatibili e materie plastiche con questo tipo di proprietà. Vediamo i vari tipi di catene polimeriche e di copolimeri che possono formarsi:

Vari tipi di catene polimeriche possibili



Vari tipi di copolimeri possibili

Copolimero alternato con sequenza casuale BABBBAAABBAABBAABABABBBBA...	Copolimero a blocchi AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA... B B B B B B B B B B B B
Copolimero alternato regolarmente alternato ABABABABABABABABABABABABAB...	
Copolimero a segmenti a blocchi AAAABBBBAAAABBBBAAAABBBB....	

La robustezza dei polimeri è strettamente legata a catene e grovigli. In un polimero lineare i legami tra le catene (o tra differenti parti della stessa catena) sono i deboli legami di Van Der Waals che non riescono ad impedire alle molecole di scorrere l'una sull'altra causando la deformazione plastica. E soltanto la presenza dei grovigli che garantisce la robustezza. L'energia termica fa sì che le catene si sgroviglino e slittino più rapidamente.

Lo scorrimento dei polimeri (deformazione sotto un carico inferiore alla forza di legame) è un fenomeno importante. Quando le catene sono parallele tra di loro la disposizione degli atomi permette un maggior numero di legami e questo incrementa la robustezza. Anche il più regolare polimero può essere semicristallino ma soltanto se il materiale in fase liquida è lentamente raffreddato, si possono formare sferuliti nei quali il ripiegamento delle catene molto regolare e contribuisce ad un ordine a grande distanza con un'ampia cella unitaria.

Cristallinità

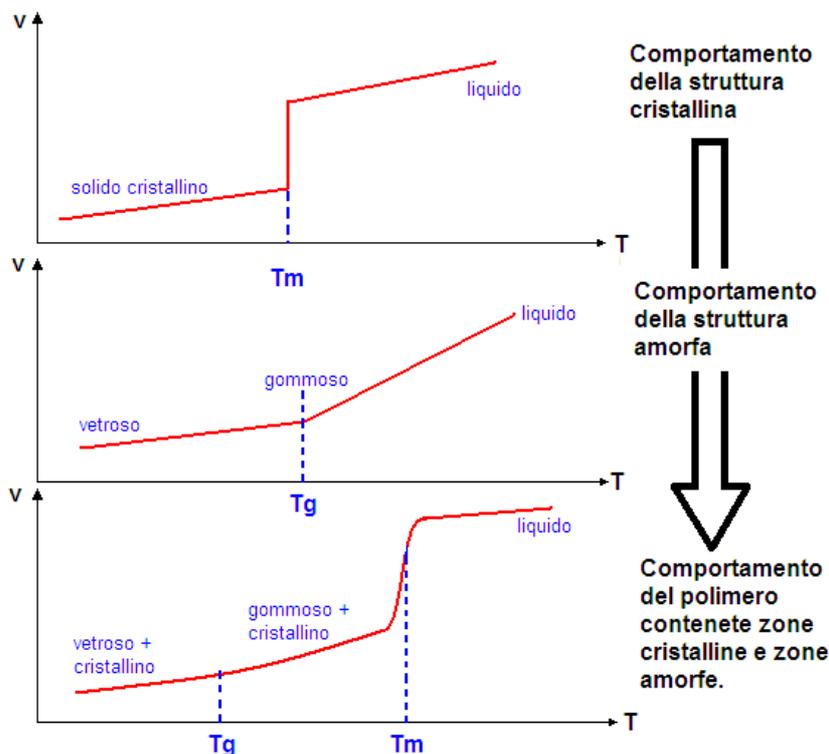
All'interno della macromolecola c'è il legame chimico atomico primario molto rigido, questo rende la macromolecola rigida e difficile da deformare, ma tra le macromolecole c'è un legame elettrostatico che non è rigidissimo, e permette il movimento seppur limitato (a meno che non ci sia un ponte di legame).

Un'altra differenza tra i polimeri e gli altri solidi è che al momento della solidificazione, il materiale polimerico non ha una riorganizzazione della sua struttura cristallina che viene semplicemente fissata nello stato in cui si trova.

I polimeri quindi non hanno una temperatura di fusione ma una temperatura dove le catene si fissano senza organizzarsi senza una libera mobilità tra di loro, vediamo quindi che livello microstrutturale i polimeri sono amorfi (questa è una regola che si applica alla maggioranza dei casi ma non è sempre così; dipende dal materiale e dalle tecnologie usate per sintetizzare e per riorganizzare micro strutturalmente il materiale).

Alcune parti però del materiale polimerico che sono già organizzate tendono ad avvicinarsi e a fissarsi, questo porta alla creazione di zone cristalline.

Si definisce T_g la temperatura di transizione vetrosa, sotto questa temperatura la struttura amorfa ha comunque delle caratteristiche meccaniche, studiando le velocità di scorrimento delle catene polimeriche l'una sull'altra in base alla temperatura in cui si trovano si ottengono i grafici di cui sopra.



2. Materiali polimeri a struttura semplice

I polimeri sono generalmente classificati rispetto alla loro struttura, alle proprietà e all'uso che ne viene fatto come:

- **Polimeri termoplastici:** costituiti da macromolecole di grandezza limitata, lineari o ramificate e fusibili a temperature relativamente elevate; rammolliscono ripetutamente con il calore solidificano per raffreddamento. In seguito ad un processo di trasformazione essi assumono cambiamenti di stato reversibili.
- **Polimeri termoindurenti:** e a struttura tridimensionale, formati da una sola macromolecola infinitamente grande; non fondono ma si decompongono a temperatura elevata.
- **Elastomeri:** consistono in catene polimeriche lineari leggermente incrociate. Allungare un elastomero causa una deformazione parziale di tali catene, ma tale effetto non è permanente (come per i termoplastici).

Polimeri termoplastici

per la loro struttura chimica, i polimeri termoplastici esistono allo stato solido in forma amorfa (vetro organico) oppure in forma semicristallina. L'attitudine dei polimeri a cristallizzare è in stretta relazione con la loro struttura molecolare, e perché ciò avvenga è necessario che la loro catena abbia una struttura molto regolare, fissata al momento della sintesi. Non si assiste quasi mai alla formazione di monocristalli, in genere i polimeri sono caratterizzati da zone cristalline disperse in una fase amorfa. A causa della differenza dell'indice di rifrazione tra zone amorse e zone cristalline, questi tipi di polimeri non sono generalmente trasparenti bensì traslucidi. La struttura semicristallina conferisce loro maggiore resistenza alla temperatura agli agenti chimici. Un aspetto molto importante dei termoplastici che all'aumentare della temperatura passano allo stato fuso e possono essere modellati per colata ripetutamente, cioè il processo di fusione e di solidificazione può essere effettuato un gran numero di volte senza alterare la struttura molecolare del polimero. E forze di legame dei termoplastici sono forze di valenza secondaria che permettono il passaggio allo stato fuso e dunque il loro stampaggio a temperature più basse rispetto ad altri materiali, con ritmi di produzione estremamente elevati.

Polimeri termoindurenti

Nei polimeri termoindurenti il tasso di reticolazione è più elevato rispetto agli elastomeri con un'energia di coesione molto più elevata tra le catene, che permette di raggiungere una resistenza meccanica e soprattutto termica superiore ai termoplastici.

La lavorazione dei termoindurenti molto meno rapida e facile dei termoplastici, poiché lo stampaggio di questo polimero deve avvenire prima della formazione dei legami tridimensionali che li rende insolubili e non più fondibili, quindi difficilmente riciclabili.

I segmenti di catena compresi tra i legami a ponte sono legati fra loro dalle forze di Van Der Waals .

Elastomeri

Gli elastomeri sono pratica dei liquidi molto viscosi caratterizzati da legami secondari molto deboli, sono ottenuti da polimeri lineari.

Per essere utilizzati come sostanze gommosi, è necessario introdurre nelle catene un certo numero di legame a ponte che conferiscono al materiale una struttura tridimensionale e assicurano proprietà di elasticità molto elevate. Questi legami covalenti o ionocovalenti sono introdotti dopo lo stampaggio del materiale, mediante una reazione chimica chiamata vulcanizzazione. Una caratteristica molto importante delle gomme è la loro grande deformabilità pari 6-7 volte la lunghezza iniziale. La densità di reticolazione negli elastomeri, ossia il numero di legame a ponte, è molto bassa per la struttura stessa del materiale polimero. I segmenti di catena compresi 3 legami a ponte sono pure qui collegati fra loro dalle forze di Van Der Waals .

Tutte le proprietà e classificazioni sopraelencate possono essere assunte in un unico diagramma riassuntivo:



Cap. 9 : L'eutettico

1. Definizioni e concetti di base

La conoscenza dei diagrammi di fase per le leghe è estremamente importante perché c'è una forte relazione tra la microstruttura e le proprietà meccaniche di una lega. Inoltre i diagrammi di fase ci forniscono preziose informazioni sulla fusione, solidificazione, cristallizzazione e altri fenomeni.

Vediamo qualche definizione:

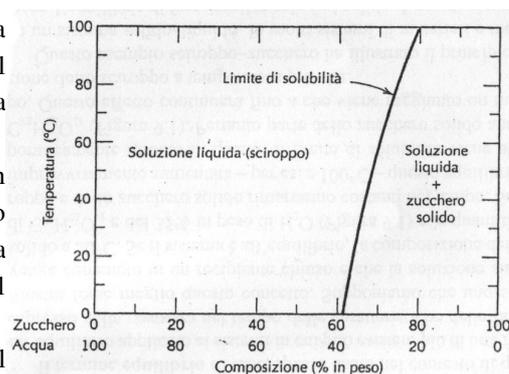
- **componente:** sono i metalli puri e/o i composti di cui è formata la lega;
- **sistema:** corpo specifico del materiale considerato o serie di leghe possibili che hanno uno stesso componente;
- **soluzione solida:** formata da atomi di almeno due tipi, si ha che gli atomi del soluto occupano posizioni interstiziali o di sostituzione nel reticolo cristallino del solvente.

Limite di solubilità

Per determinati sistemi di leghe a una certa temperatura esiste una concentrazione massima di atomi di soluto che possono essere sciolti nel solvente per formar una soluzione solida, questa concentrazione massima è detta limite di solubilità.

Oltre questo limite si ha formazione di un'altra soluzione solida o di un composto che presenta una composizione molto diversa, si consideri l'esempio della soluzione acqua-zucchero: lo zucchero si scioglie nell'acqua fino ad una concentrazione massima oltre la quale non si scioglie e si va a depositare sul fondo del recipiente.

Il limite di solubilità (l_{ds}) dipende dalla temperatura alla quale si trova il solvente, nel caso precedente acqua-zucchero si può tracciare un diagramma come quello a fianco.



Fasi

Una fase è definita come una porzione omogenea di un sistema che ha caratteristiche chimiche e fisiche uniformi. Ogni materiale puro viene considerato come un'unica fase, così anche ogni solido, liquido e le soluzioni di gas. Ad esempio la soluzione acqua-zucchero che abbiamo considerato prima è una fase e lo zucchero solido non sciolto è un'altra fase.

Se in un sistema ci sono più fasi, ognuna avrà le sue proprietà fisiche e ci sarà una superficie di separazione tra fasi attraverso le quali c'è un discontinuo e brusco cambiamento delle caratteristiche fisiche e/o chimiche, non deve per forza trattarsi di sostanze diverse, anche la sola presenza di ghiaccio e acqua è sufficiente a definire un sistema bifasico.

Microstruttura

Spesso le proprietà fisiche dipendono dalle microstrutture delle sostanze, queste si possono osservare direttamente al microscopio. Nelle leghe metalliche la microstruttura è caratterizzata dal numero di fasi presenti, dalla quantità e da come sono disposte.

Equilibri di fase

Altro concetto importante è quello dell'equilibrio, può essere descritto molto bene in termini dell'energia libera: una funzione dell'energia interna e dell'entropia di un sistema. In determinate condizioni di temperatura, pressione e composizione un sistema è in equilibrio se la sua energia libera è al minimo, questo significa che le caratteristiche del sistema non cambiano col tempo ma si mantengono per un tempo indefinito, il sistema è considerato STABILE.

Un cambiamento forzato di condizioni del sistema porta ad un aumento dell'energia libera ed un possibile cambiamento progressivo fino ad uno stato dove l'energia libera è di nuovo minima.

Si definisce equilibrio di fase la costanza nel tempo delle caratteristiche di fase di un sistema, se riprendiamo l'esempio acqua-zucchero e consideriamo una soluzione oltre il l_{ds} a 20° C si ha una soluzione di equilibrio, all'innalzare la temperatura fino a 80° C si ha che il l_{ds} aumenta permettendo ad una maggiore quantità di zucchero di venire sciolta nell'acqua.

Lo studio dell'energia libera e l'uso dei diagrammi ci permette di studiare un composto bifasico, ma non ci dà indicazioni sul tempo necessario al conseguimento di un nuovo stato di equilibrio. Si hanno casi, soprattutto nei sistemi solidi, in cui uno stato di equilibrio non viene mai raggiunto perché la velocità di avvicinamento all'equilibrio è estremamente bassa, un tale sistema è definito come di **non equilibrio** o **metastabile**. Questo stato può mantenersi indefinitamente con variazioni estremamente basse nel tempo.

Vediamo quindi che non è solo importante capire lo stato di equilibrio di un sistema ma anche la velocità con cui si stabilisce uno stato di equilibrio ed i fattori che influiscono sulla velocità.

2. Diagrammi di fase di equilibrio

Si riassumono le informazioni sulla microstruttura e sulle fasi nel diagramma di fase che descrivono le relazioni fra temperatura e il numero delle fasi all'equilibrio, si possono così prevedere le trasformazioni di fase che influenzano a loro volta la microstruttura.

Considereremo per il seguito soltanto leghe binarie, ovvero con due componenti, infatti all'averne più di due il diagramma di fase diventa estremamente complicato e di difficile rappresentazione. È comunque possibile esporre il concetto di controllo della microstruttura con un sistema binario anche se la maggior parte delle leghe contiene più di due componenti.

Anche se la pressione esterna è un parametro che influisce sulla struttura delle fasi, in pratica rimane virtualmente invariata e quindi i diagrammi di fase saranno rappresentati alla pressione costante di 1 atm.

Sistemi binari isomorfi

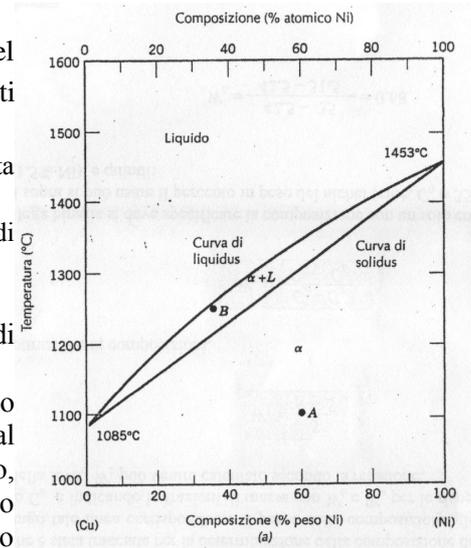
Il tipo più semplice di diagramma di fase binario da comprendere è quello del sistema rame-nichel, sul diagramma compaiono tre diverse regioni di fase (detti anche campi):

- un campo alfa α dove la fase α è una soluzione solida di sostituzione formata sia da atomi di nichel che di rame con una struttura cfc;
- un campo liquido L dove il liquido L è una soluzione liquida omogenea di rame e nichel;
- un campo a due fasi α + L;

ogni regione è definita dalla/e fase/i che esistono entro un intervallo di temperatura e composizione delimitato dalle curve di confine delle fasi.

Vediamo che sotto i 1080 °C rame e nichel sono mutuamente solubili l'uno nell'altro allo stato solido per tutte le composizioni, questo è spiegato dal fatto che entrambi i composti hanno struttura cristallina (cfc), raggio atomico, valenza ed elettronegatività quasi uguali. Il sistema rame-nichel viene definito isomorfo a motivo della completa solubilità dei due componenti sia sotto forma liquida che solida.

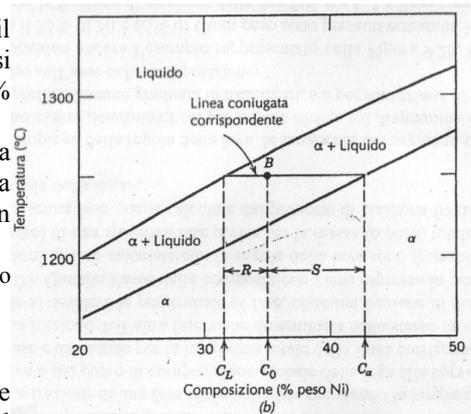
Le curve di *solidus* e *liquidus* si intercettano alle due estremità della composizione, questi punti corrispondono alla temperatura di fusione dei componenti puri.



Interpretazione dei diagrammi di fase

Per un sistema binario di composizione nota e temperatura all'equilibrio, sono disponibili tre tipi di informazioni rilevanti per lo studio del sistema:

- Le fasi presenti: stabilire le fasi presenti è relativamente facile. Si localizza il punto temperatura-composizione sul diagramma e si osservano le fasi corrispondenti (ad'esempio nella figura di prima si ha il punto A con [60% Ni - 40% Cu] a 1100 °C e il punto B con [35% Ni - 65% Cu] a 1250 °C).
- La loro composizione: localizzato il punto concentrazione-temperatura si ha che se è presente una sola fase allora la composizione della fase è la composizione del sistema. Per una regione bifasica invece si procede in questo modo:
 - si traccia una retta isoterma (o linea corrispondente) in corrispondenza del punto considerato;
 - si trovano le intersezioni di questa isoterma con la linea di liquidus e solidus;
 - tracciate le verticali di questi punti si trovano le composizioni di α e di L.
- La loro quantità in percentuale o frazione: tralasciamo la situazione monofasica per cui la quantità è semplicemente la stessa del sistema, nel caso bifasico invece si usa la regola della leva:
 - si traccia la linea corrispondente alla temperatura considerata attraverso la regione bifasica;
 - la frazione di una fase si trova come la lunghezza della linea corrispondente dal punto considerato (ad'esempio il punto B nella figura sopra) al limite della fase considerata divisa per la lunghezza totale, quindi considerando l'esempio di prima si ha la frazione di fase L nella regione bifasica:



$$W_L = \frac{S}{R+S}$$

oppure si può ottenere la frazione per sottrazione delle composizioni:

$$W_L = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L}$$

- Per le leghe multifasiche è spesso più conveniente specificare le quantità relative delle fasi come frazioni volumetriche piuttosto che di massa perché le prime possono essere determinate dall'esame della microstruttura. Definiamo quindi la frazione volumetrica della fase α come:

$$V_\alpha = v \frac{\alpha}{v_\alpha - v_\beta}$$

dove v_α e v_β indicano i volumi delle fasi nella lega, e si ha che per una lega formata dalle sole due fasi:

$$V_\alpha + V_\beta = 1$$

infine diamo la relazione tra frazione volumetrica e frazione massica: $v_\alpha = W_\alpha / \rho_\alpha$.

3. Sistemi eutettici binari

Un altro tipo comune di diagramma di fase per le leghe binarie è il diagramma di fase eutettico, si hanno nel diagramma del sistema rame-argento tre regioni monofasiche:

- α soluzione ricca in rame, ha l'argento come componente soluto ed una struttura cristallina cfc;
- β ha una struttura cfc, ma il soluto è il rame;
- L fase liquida.

Studiando il grafico vediamo alcuni punti di interesse:

- Il rame e l'argento puro vengono considerati rispettivamente come fasi α e β , quindi la solubilità in queste fasi è molto bassa e ad ogni temperatura inferiore alle rette BEG solo una limitata concentrazione di rame si scioglie nell'argento e viceversa.
- Il segmento BEG posto fra i punti di massima solubilità può essere considerato una curva di solidus perché rappresenta in ogni lega in equilibrio del sistema la temperatura più bassa a cui può esistere la fase liquida.
- Nelle regioni bifasiche evidenziate sul grafico si possono calcolare le composizioni e le quantità relative per ogni fase applicando la regola della leva.
- Man mano che l'argento viene aggiunto al rame diminuisce lungo la curva di solidus la temperatura in cui la lega è completamente liquida quindi possiamo dire che la temperatura di fusione del rame viene abbassato per l'aggiunta dell'argento e viceversa. Queste due curve di liquidus (AE e FE) si incontrano nel punto E attraverso cui passa la retta isoterma BEG, il punto E viene detto punto invariante e viene individuato dalla composizione C_E e dalla temperatura T_E . Per una lega di composizione C_E si verifica nel corso del raffreddamento una reazione quando si raggiunge la T_E :



quindi per raffreddamento alla temperatura T_E una fase liquida viene trasformata in due fasi solide α e β , questa è definita reazione eutettica (cioè di facile fusione) e $C_{\alpha E}$ e $C_{\beta E}$ rappresentano le composizioni delle fasi alla T_E .

- Il segmento orizzontale BEG viene chiamato isoterma eutettica.
- La reazione eutettica, al raffreddamento, è simile a quella della solidificazione per i componenti puri in cui la reazione procede fino alla solidificazione completa ma il solido prodotto dalla solidificazione eutettica è sempre costituito da due fasi diversamente dal caso di componente puro.
- Nella costruzione di diagrammi di fase binari è importante sapere che entro un campo di fase possono essere in equilibrio massimo due fasi, invece nel caso di diagramma di fase eutettico si possono avere anche 3 fasi in equilibrio ma solo nei punti lungo l'isoterma eutettica. È comunque vero che le regioni monofasiche sono divise da una regione bifasica comprendente le due fasi che separa.

Altro sistema eutettico molto comune è quello del sistema piombo-stagno, ha un aspetto simile a quello rame-argento ma in tal caso:

- α soluzione solida di stagno in piombo;
- β soluzione solida di piombo in stagno.

