

Appunti di Metallurgia e Materiali non Metallici

Mattia Ruffini

Febbraio 2022

Indice

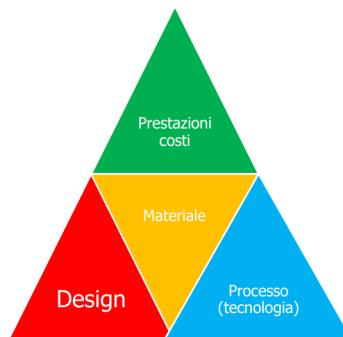
1	Introduzione	2
1.1	Classificazione dei materiali	2
1.2	Alcuni cenni storici	3
2	Metallurgia	4
2.1	Fisica dei Metalli	5
3	Reticoli di Bravais	7
3.1	Reticoli compatti	8
3.2	Lacune	9
3.3	Materiali allotropici	10
3.4	I reticoli Ideali	10
3.4.1	Difetti di punto	11
3.5	Diffusione	13
3.6	Difetti di superficie	13
4	Proprietà meccaniche	15
4.1	Deformazione elastica	15
4.2	Deformazione plastica	17
4.3	Dislocazioni	18

Capitolo 1

Introduzione

Un oggetto viene disegnato, lavorato e progettato a partire da alcune **funzionalità necessarie al nostro obiettivo**. DI conseguenza il materiale di un oggetto dice bene poco, perchè la scelta del materiale **deve essere accompagnata dalla funzione finale dell'oggetto**.

Nota che nasce da questi tempi è che **la scelta del materiale influenza l'impatto ambientale**.



1.1 Classificazione dei materiali

Esistono diversi tipi di materiali esistenti:

1. Metalli e leghe
2. Materiali polimerici
3. Materiali ceramici

4. Materiali compositi
5. Semiconduttori
6. Biomateriali
7. Trattamenti e rivestimenti superficiali

Tra tutte le caratteristiche che un materiale può avere quella principale è sicuramente la **densità**. Queste perchè da un punto di vista energetico costa di meno lavorare e trasportare un materiale con densità minore rispetto a quello con densità maggiore, si pensi al ferro con densità di 8 g/cc o l'alluminio (con un costo nettamente inferiore) con densità 2.7 g/cc .

1.2 Alcuni cenni storici

1903 Viene inventato il primo Aereo dai fratelli Wright costruito con un telaio in abete ed acciaio, le ali erano in tessuto/pelle. Innovazione molto importante dell'epoca era nella scelta del materiale del blocco motore, anziché essere costruito in ghisa era costruito in alluminio, dunque con un peso molto ridotto.

1915 Primo aereo completamente in metallo, con lamiera e tubi cavi.

1936 Introduzione delle materie plastiche, bassa densità, resistenza meccanica minore ma comunque rafforzabile, e trasparenza.

1950-1953 Utilizzo di leghe in Titanio, hanno una bassa densità ed elevate caratteristiche meccaniche.

1969 Nascono i primi compositi in carbonio.

1981 Utilizzo dei materiali ceramici in alcune applicazioni tecnologiche a causa delle loro proprietà meccaniche e dalla capacità di resistere ad alte temperature.

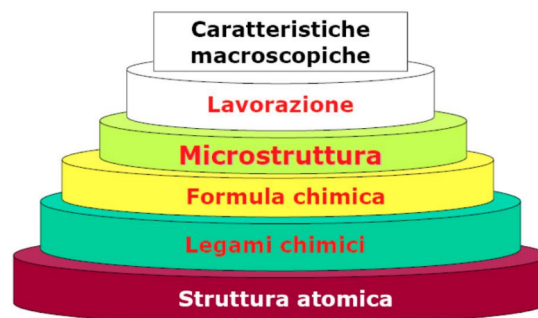
Capitolo 2

Metallurgia

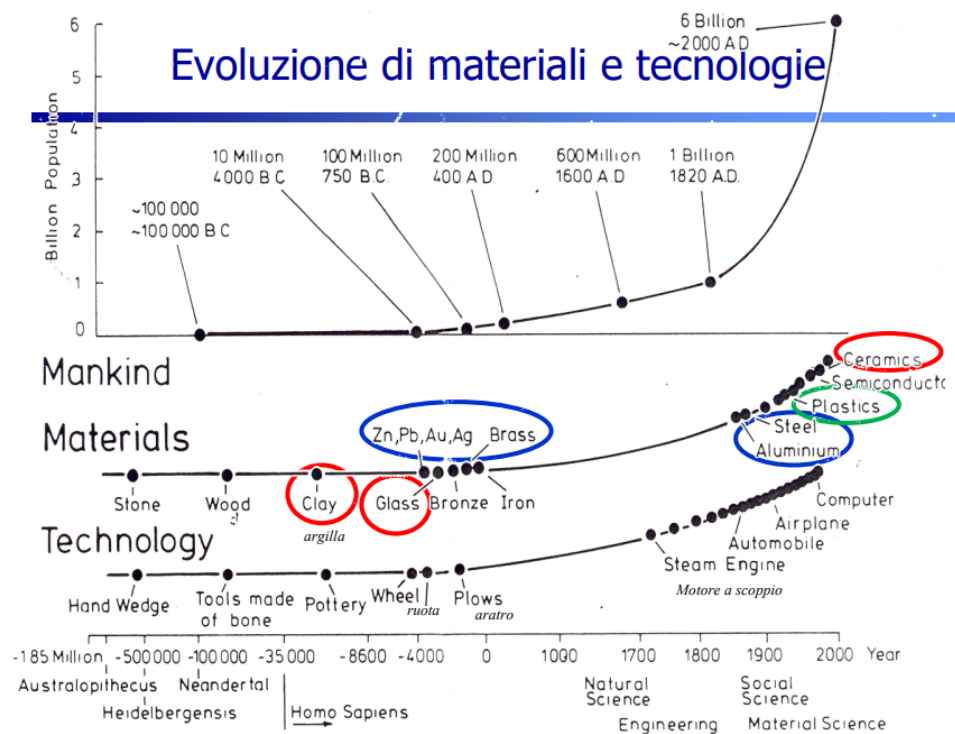
La metallurgia **studia i metalli e le loro caratteristiche/applicazioni**. Esistono tre tipi di metallurgia:

- Metallurgia chimica: studio e produzione dei metalli dalle materie prime;
- Metallurgia fisica: studia la struttura dei materiali metallici;
- Metallurgia meccanica: studia il comportamento dei materiali metallici se sottoposti a sforzo;

Le proprietà dei metalli sono date dalla loro struttura atomica, che ne influisce i legami chimici, la microstruttura, e lavorazione e produzione del metallo.



Evoluzione dei materiali e delle tecnologie Nell'antichità i primi materiali ad essere scoperti ed utilizzati nella lavorazione sono state le ceramiche come l'argilla. Dal grafico si può osservare come negli ultimi anni i materiali più innovativi sono state le ceramiche.



2.1 Fisica dei Metalli

La fisica dei metalli studia a livello atomico e microscopico le strutture di questi metalli, da cui derivano le proprietà macroscopiche. In particolare è **fondamentale il modo in cui gli atomi si legano tra di loro, e la loro disposizione nello spazio**. In chimica esistono tre tipi di legami:

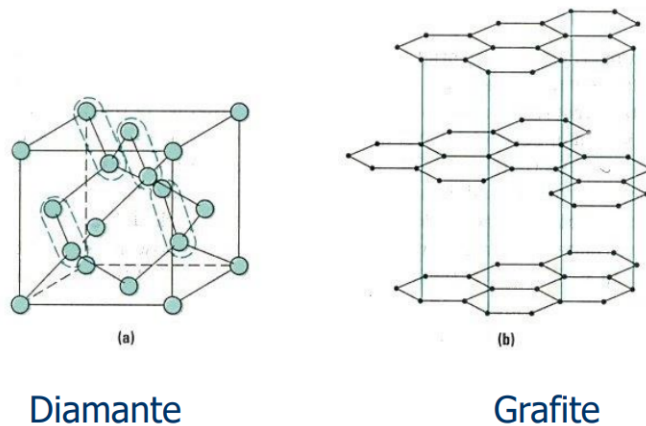
- legame ionico;
- legame covalente;
- legame metallico;

I primi due sono presenti nei **materiali ceramici**. Il legame covalente mette in condivisione gli elettroni tra gli atomi affinché i due atomi raggiungano lo stato più stabile, ovvero con energia interna minore. Il legame covalente è **direzionale**, ovvero fissa gli atomi che non sono mobili. Quindi il materiale costituito da legami covalenti **non avrà conducibilità termica ed elettrica**. Il legame covalente è un legame molto forte da rompere, quindi la temperatura per raggiungere il fuso è alta.

Nel legame ionico invece gli atomi sono cariche elettricamente, e si dispongono in modo da minimizzare l'energia del reticolo ionico: ogni ione è circondato da ioni di carica opposta. Per questo motivo il solido ionico non conduce la corrente elettrica e nemmeno il calore. Tuttavia ha una grande resistenza meccanica, perchè è difficile spostare gli ioni, perchè avendo la stessa carica si respingono. Per rompere il legame serve molta energia.

Il legame metallico invece è definito come cationi in un mare di elettroni. Gli **elettroni sono delocalizzati**, e questo produce conducibilità termica e elettrica. Il legame metallico non è direzionale, quindi il metallo può essere deformato e lavorato.

Oltre alle proprietà conferite dai legami è molto importante come un atomo si lega all'altro. Per esempio consideriamo il diamante e la grafite, che entrambi sono formati da atomi di carbonio ma legati in maniera differente.

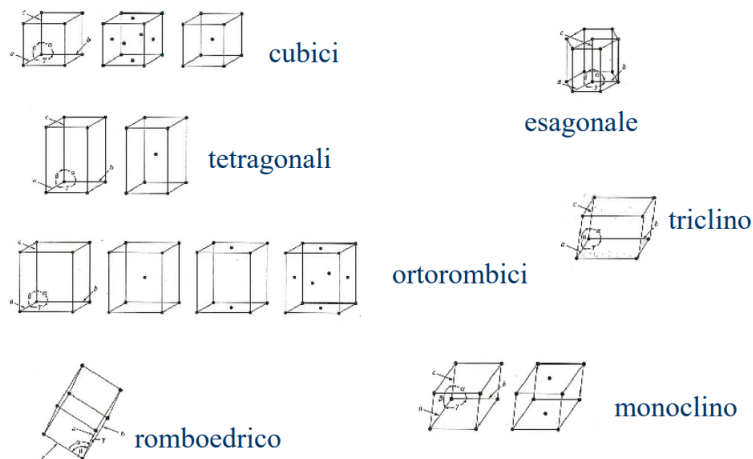


Per quanto riguarda i materiali metallici o ceramici questi acquisiscono la loro struttura durante il passaggio da liquido a solido. Questo perchè i materiali ceramici e i polimeri sono **monocristalli** o sono formati da più cristalli, in questo caso sono detti **policristallini**. Nei policristallini i germi in fase solida sono distribuiti casualmente nel fuso, e i cristalli che si formano hanno dimensione e direzione casuali. Solitamente un cristallo nasce nell'ordine del micron (10^{-6}) mentre gli atomi sono nell'ordine dell'Angstrom ($A = 10^{-10}$).

Capitolo 3

Reticoli di Bravais

In alcuni solidi gli atomi si organizzano nello spazio attraverso strutture ben definite dal punto di vista geometrico. Questi pattern ripetitivi sono detti **Reticoli di Bravais**. In natura esistono solamente 14 tipi di reticoli:



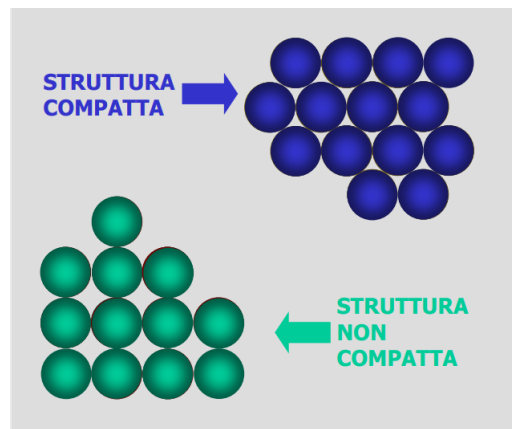
Le geometrie sono solamente 14 perchè gli atomi tendono alla struttura che minimizza l'energia interna del sistema, e l'energia ha un ordine a corto raggio. Ecco la definizione di reticolo ideale: **"in un reticolo l'intorno di ogni punto deve essere identico"**. La struttura di un reticolo quindi è limitata da condizioni molto stringenti dal punto di vista geometrico ma anche energetico, per questo se ne trovano solo 14. Ai fini di questo corso studieremo i reticoli:

- **Cubico corpo centrato (CCC);**
- **Cubico a facce centrate (CFC);**

- Esagonale compatto (HCP);

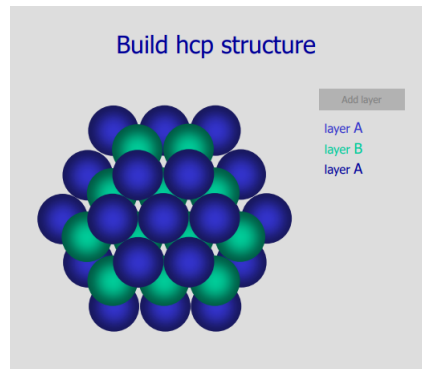
3.1 Reticoli compatti

Per minimizzare l'energia interna del sistema gli atomi tendono ad occupare uno spazio molto ridotto. Esistono due tipi di struttura: **compatta** o **non compatta**.

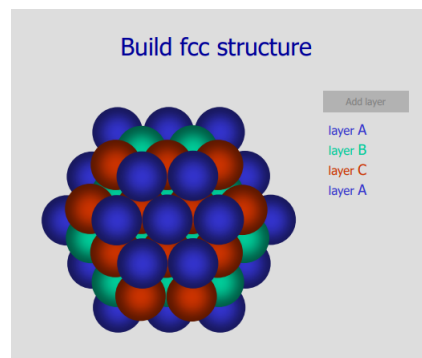


La struttura compatta è la struttura **con il massimo grado di occupazione nello spazio**. Banalmente per decidere quale solido è più compatto basta osservare quante sfere sono a contatto con le altre.

Struttura dell'esagonale compatto Per formare un solido con reticolo esagonale compatto possiamo immaginare di sovrapporre diversi layer, ognuno composto da atomi.



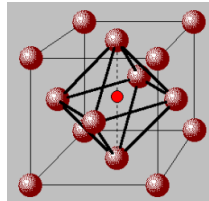
struttura del cubico a facce centrate Procediamo nel medesimo modo per quello esagonale compatto.



3.2 Lacune

All'interno dei reticoli, tra un atomo e l'altro ci sono degli spazi vuoti. Questi spazi sono detti **lacune**. Sono molto utili questi spazi perchè permettono l'avvelenamento nel caso di impurezze del solido oppure drogaggio se l'impurezza è inserita volontariamente. Ogni reticolo ha un diverso grado di occupazione, cioè il rapporto tra spazio occupato e volume della geometria: CCC 0.68 , CFC 0.74 , HCP 0.74 .

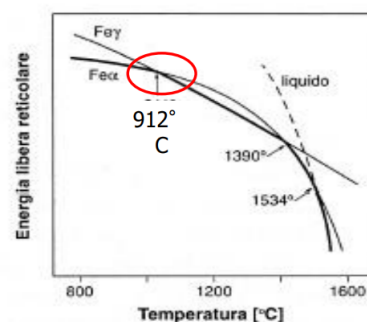
La lacuna più grande si trova nel reticolo con il grado di occupazione più alto, ovvero nel CFC, e in particolare è nel centro del cubo. La lacuna maggiore non è nel CCC perchè le lacune sono equi-disposte tra di loro.



Le lacune, come detto precedentemente, **possono essere riempite, per esempio, da materiali che non hanno una struttura cristallina.**

3.3 Materiali allotropici

Un materiale Allotropico è definito come un materiale che hanno forme equivalenti al variare della temperatura, ovvero la loro struttura cristallina non è fissa, ma può cambiare. Uno di questi materiali è il ferro.



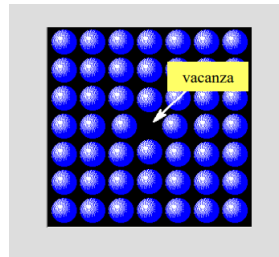
Il ferro dai 912 gradi ha un reticolo CFC, ed è detto Ferro γ , mentre al di sopra dei 1290 gradi ha un reticolo CCC ed è chiamato Ferro α . Cambiando il suo reticolo, il ferro **cambia la sua predisposizione ad accettare altri elementi esterni**. Le lacune possono essere misurate a T costante, perchè più la temperatura aumenta più il solido si dilata e le molecole vibrano maggiormente.

3.4 I reticoli Ideali

I reticoli non sono perfetti, ma hanno diverse imperfezioni. questi difetti si classificano in **difetti di punto, difetti di linea e difetti di superficie.**

3.4.1 Difetti di punto

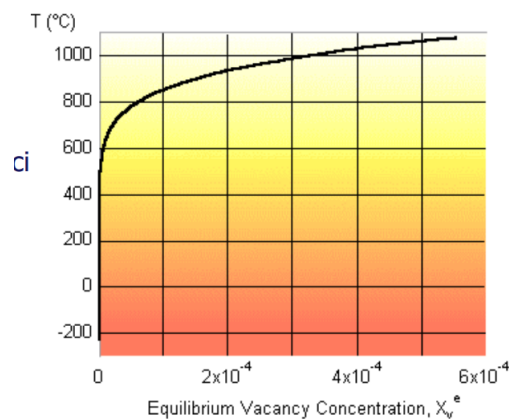
Vacanze Per vacanze si intende un posizione reticolare che dovrebbe essere ricoperta da un atomo per rispettare la definizione non è rispettata. Manca un atomo, che genera uno spazio vuoto **più grande delle lacune**. Le vacanze sono i difetti di punto più presenti. All'aumentare della T le vacanze aumentano, perchè aumentano i gradi di libertà degli atomi.



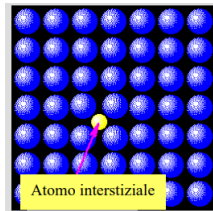
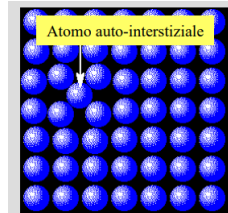
La legge che indica il numero di vacanze in funzione della temperatura è la seguente:

$$N_v = N e^{\frac{-Q_v}{kT}} \quad (3.1)$$

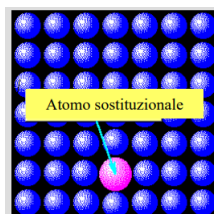
dove k è la costante di Boltzmann, N è il numero totale dei siti atomici e Q_v è l'energia di formazione.



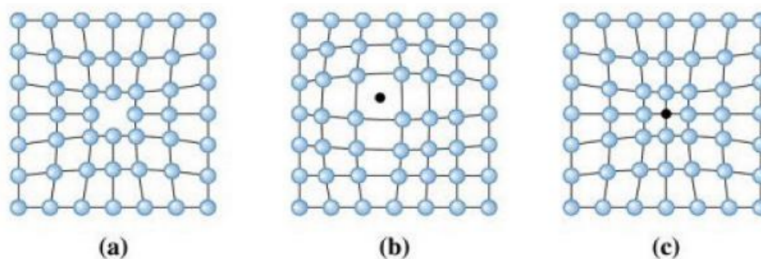
Atomi auto-interstiziali Sono atomi che si inseriscono nelle lacune di un reticolo. E' più probabile che le lacune possano essere riempite da atomi di specie diverse da quelle del reticolo (**atomi interstiziali**).



Atomi sostituzionali La posizione di un reticolo è occupata da un atomo di specie diversa. Rompe il reticolo ideale perchè rompe il legame chimico.



Questi difetti causano la distorsione del reticolo fino ad un certo punto, oltre il quale il reticolo potrebbe rompersi.



3.5 Diffusione

La **diffusione** è un meccanismo che permette ad atomi di una specie ad entrare nei reticoli di specie diverse. E' uno dei fenomeni che permette di formare le leghe metalliche. Gli atomi in particolare **si insediano in reticoli che presentano dei difetti**, in particolare vacanze e lacune interstiziali. Il sistema tende ad un minimo di energia, quindi cerca di riempire tutti gli spazi vuoti. La diffusione dipende da molti fattori: per quanto tempo i materiali stanno a contatto, quanti atomi possono entrare nel reticolo, dipende dalla temperatura...

Uno degli ostacoli della diffusione è **l'energia che deve essere immessa al sistema in modo che inizi la diffusione**. In particolare per materiali con molte vacanze l'energia di attivazione è maggiore, in quanto hanno dimensione maggiore (per esempio rispetto i siti interstiziali) e dunque sono più difficili da spostare.

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (3.2)$$

è l'equazione che indica il coefficiente di un materiale. **Più è alta la T più è alto il coefficiente di diffusione**. Lo si vede nel ferro che fino a 912 deg ha un reticolo CCC, quando cambia a CFC il coefficiente di diffusione scende rapidamente. Questo perchè nei CFC ha un fattore di compattazione atomica di 0.74 contro lo 0.68 del CCC e **meno denso è il reticolo più è presente diffusione**. Per questo motivo un reticolo CFC (meno denso del CCC) ha una diffusione minore. Anche **il meccanismo di diffusione** è fondamentale nella velocità della diffusione: più veloce con siti interstiziali mentre più lento con vacanze.

La diffusione dipende anche da fattori come i legami, il tipo di solido ecc. In generale si ha **diffusione rapida quando** si ha: solido amorfo, reticoli con FCA basso, legami deboli, atomi diffondenti di piccole dimensioni e molti siti interstiziali. Invece si ha **diffusione lenta quando**: legami forti, alto FCA.

3.6 Difetti di superficie

La superficie di un solido formato da reticoli ha dei difetti. Il germe di reticolo che si espande e forma il solido può avere diverse inclinazioni e direzioni all'interno del solido: quando i solidi formati da due germi cristallini con

diversa direzione si incontrano si ha un **bordo di grano**: la zona tra i grani di un solido reticolare. Poichè il sistema tende alla minima energia, per minimizzare l'energia i due grani cercano di unirsi tra di loro.

Per esempio se mettiamo un solido a circa $0.75T_{fus}$ i bordi di grano cercano di sparire, e tende a prevalere il grano con una maggiore importanza, mentre gli altri spariscono. Esistono diversi tipi di grani, come i **grani grossolani**, che sono grani molto grossi ma che hanno proprietà meccaniche peggiori. La formazione di un grano dipende da come vengono orientati i flussi termici.

Capitolo 4

Proprietà meccaniche

In metallurgia si studiano le proprietà dei solidi sottoposte ad una sollecitazione meccanica. Le **caratteristiche meccaniche** dei metalli sono: **resistenza, durezza, rigidità, duttilità**. Poichè l'effetto finale del pezzo è dato dal materiale assieme alla sua forma e lavorazione, spesso la forma è a stretto contatto con le proprietà meccaniche, però in questo momento ci concentriamo sul materiale.

Le **condizioni di carico** sono: **trazione, compressione, taglio, torsione, flessione**. Queste sono forze semplici, ma che se composte assieme formano forze complesse a cui i pezzi possono essere sottoposti. In particolare si misurano le forze che agiscono su aree:

$$Sforzo = \frac{Forza}{Area} = \frac{[N]}{[mm^2]} = [MPa] \quad (4.1)$$

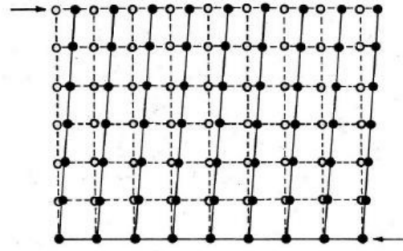
Inoltre la trazione e la compressione sono chiamate con σ_T, σ_P , mentre le sollecitazioni non assiali sono denominate con la lettera greca τ . Si può calcolare nelle forze di trazione e compressione la deformazione di un solido:

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (4.2)$$

Se la deformazione è temporanea è detta **elastica**, altrimenti se è permanente è detta **plastica**.

4.1 Deformazione elastica

La deformazione elastica avviene spostando "leggermente" i piani dei reticoli uno rispetto all'altro senza che i legami degli atomi si rompano, anzi sono



questi che permettono che fino ad una certa sollecitazione limite la deformazione sia elastica. Finita la sollecitazione gli atomi tornano nella posizione iniziale.

La deformazione ϵ di un materiale è legata allo sforzo σ dalla **Legge di Hooke**:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (4.3)$$

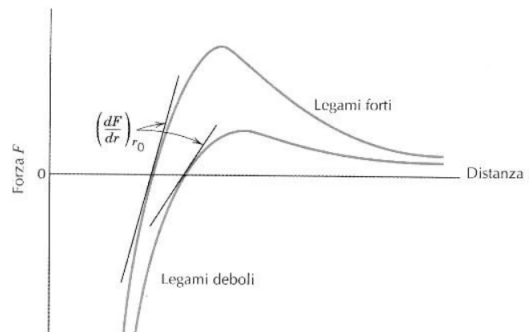
dove E è il modulo elastico, o **modulo di Young** ed è una caratteristica del metallo che si misura in Giga Pascal. Il modulo di Young è una caratteristica del fondamentale, **maggiore è il suo valore, maggiore è la rigidità del materiale**. Il modulo di Young è proporzionale a $\frac{\Delta F}{\Delta r}$. Infatti sono vere le seguenti uguaglianze ricordando l'equazione 4.2 :

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$E = \frac{F/A}{\Delta l/l_0}$$

$$E = \frac{l_0}{A} \frac{dF}{dt} = k \frac{dF}{dt}$$

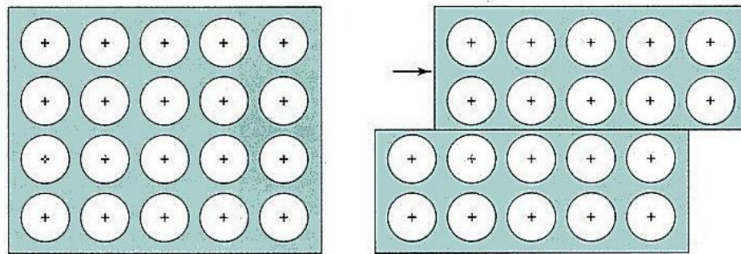
quindi il modulo di Young è il coefficiente angolare della retta tangente alla curva della forza di legame in funzione della distanza:



La deformazione che avviene prima della rottura dei legami avviene in un **campo elastico limitato**.

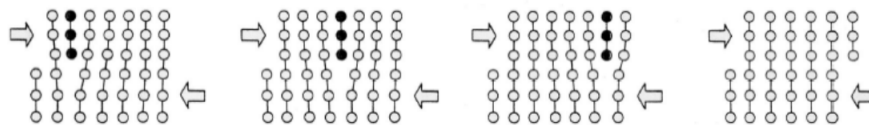
4.2 Deformazione plastica

Anche nelle deformazioni plastiche accade circa lo stesso: un piano del reticolo scorre rispetto all'altro, ma finita la sollecitazione gli atomi non ritornano nella posizione iniziale.



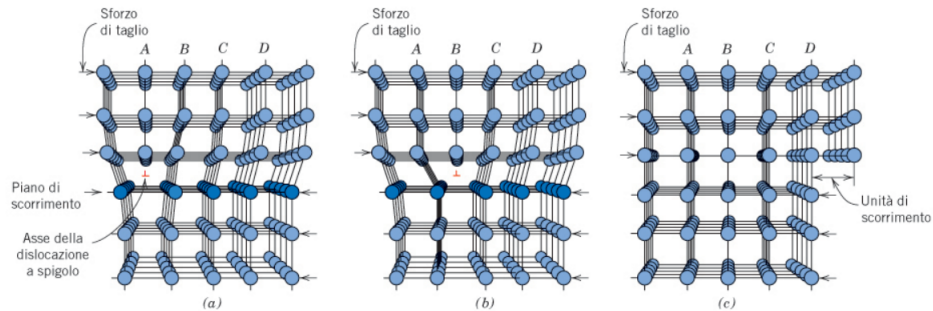
Un materiale metallico **si deforma senza rottura** (cosa che avviene nei materiali ceramici) **perchè l'intorno di ogni punto è identico**. Affinchè si verifichi una deformazione plastica ogni legame ei piani di un reticolo si rompono e successivamente si riformano. Tuttavia sperimentalmente si osserva **che l'energia necessaria per deformare un materiale è in realtà di tre ordini di grandezza minore**.

A causa dei difetti presenti nel reticolo cristallino, non si rompono tutti legami di un reticolo per poi riformarsi, ma il reticolo progressivamente alla deformazione riempie i difetti.



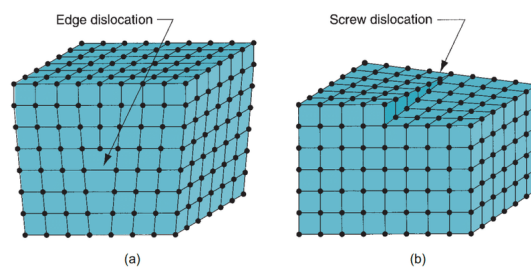
Questi difetti del reticolo che vengono "aggiustati" sono chiamati **difetti lineari**, dove la linea è la proiezione del semipiano "in più". Sono delle **dislocazioni**. Quando il semipiano arriva a bordo cristallo si ha la deformazione del solido, e la rottura dei legami del cristallo avviene in corrispondenza delle dislocazioni.

4.3 Dislocazioni



Le dislocazioni sono responsabili della deformazione meccanica. Sono linee di imperfezioni nel cristallo introdotte durante la solidificazione o quando il materiale è deformato permanentemente. Macroscopicamente la deformazione è **omogenea** ma microscopicamente **disomogenea**: banalmente ad occhio nudo non vediamo i "gradini" causati dalla deformazione di un reticolo. Le dislocazioni si muovono per piani di **massima compattazione**. Esistono poi diversi tipi di dislocazioni:

1. Dislocazioni a spigolo ;
2. Dislocazioni a vite ;
3. Dislocazioni miste ;
4. Dislocazioni ad anello ;



Le dislocazioni possono essere utili durante la lavorazione del materiale, ma anche da evitare quando il pezzo è finito, in quanto possono causare la deformazione del materiale.

Reticolo	Metalli	Piani di scorrimento	Direzioni di scorrimento	Numero dei sistemi di scorrimento	Rappresentazione
C.F.C.	Cu, Al, Ni, Pb, Ag, Au, Fe- γ , ecc.	{111}	$\langle 110 \rangle$	$4 \times 3 = 12$	
	Fe- α , Ni, Mo, ottone- β , ecc.	{110}	$\langle 111 \rangle$	$6 \times 2 = 12$	
	Fe- α , Ni, Mo, Al	{112}	$\langle 111 \rangle$	$12 \times 1 = 12$	
C.C.C.	Fe- α , W	{122}	$\langle 111 \rangle$	$24 \times 1 = 24$	

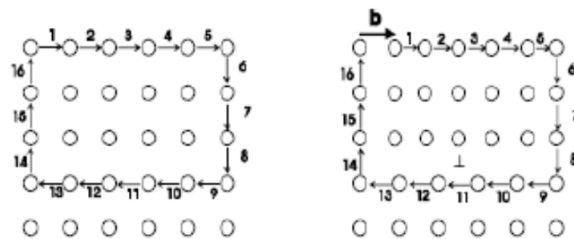
Cat.	Metalli	Piani di scorrimento	Direzioni di scorrimento	Numero dei sistemi di scorrimento	Rappresentazione
E.C.	Ti, Zr, Mg, Ta, Bi, ecc.	{0001}	$\langle 1120 \rangle$	$1 \times 3 = 3$	
	Ti, Mg	{10-10}	$\langle 1120 \rangle$	$3 \times 1 = 3$	
	Ti, Mg	{11-21}	$\langle 1120 \rangle$	$6 \times 1 = 6$	

Sistema esagonale compatto

Sistema cubico

Piani di massima compattazione

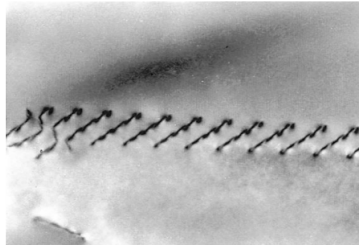
Vettori di Burgers Nel modello fisico le dislocazioni sono associate ad un vettore detto **vettore di Burgers**. Questo vettore si trova paragonando il reticolo perfetto con uno con una dislocazione, e disegnando il **circuito di Burgers**.



Due dislocazioni con verso opposto che si incontrano annullano il difetto (formano in quel punto un reticolo perfetto), se invece hanno lo stesso segno **si respingono**.

Le dislocazioni a spigolo si muovono per moto di vacanze, quelle a vite invece per moto di interstiziali. Le dislocazioni inoltre **non possono terminare in mezzo al cristallo** ma terminano sulla superficie, su altre dislocazioni e **su se stesse**. Quando le dislocazioni a spigolo trovano una vacanza, queste **saltano di piano**, generando una deformazione obliqua. Le dislocazioni a vite formano una deformazione ortogonale a quella di spigolo: quando una dislocazione a vite e una a spigolo si incontrano queste si annullano vicendevolmente. Come si vede dall'immagine ?? con un microscopio elettronico osservano un solido con reticoli CCC, si vedono distintamente le linee dei piani di dislocazione (che sono i piani con massima compattazione).

Sorgenti di Frank e Reed Quanto misuro il numero di dislocazioni per centimetro quadrato queste sono tra 10^4 e 10^6 . Per spiegare la facilità della deformazione si ha bisogno di un numero tra 10^{10} e 10^{11} di dislocazioni.



Questo si spiega perchè mentre si deforma un solido metallico **aumenta il numero di dislocazioni**. Sono chiamate **sorgenti di Frank e Reed** i punti in cui da una dislocazione sottoposta ad una sollecitazione ne vengono generate altre.

1. La dislocazione inizialmente è rettilinea;
2. La dislocazione è sottoposta ad una sollecitazione ortogonale ad essa, inizia ad incurvarsi in quanto non esiste una posizione di equilibrio stabile per essa;
3. Quando la dislocazione raggiunge il punto critico ha una forma circolare che si espande. Una parte della dislocazione originaria invece riforma la dislocazione iniziale, quindi questo processo può essere ripetuto;

E' lo stesso principio per cui piegando più volte un filo di ferro questo si rompe, senza utilizzare una pinza.

