

# Appunti di Metallurgia e Materiali non Metallici

Mattia Ruffini

Febbraio 2022

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
1.1	Classificazione dei materiali . . . . .	3
1.2	Alcuni cenni storici . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Metallurgia</b>	<b>5</b>
2.1	Fisica dei Metalli . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Reticoli di Bravais</b>	<b>8</b>
3.1	Reticoli compatti . . . . .	9
3.2	Lacune . . . . .	10
3.3	Materiali allotropici . . . . .	11
3.4	I reticoli Ideali . . . . .	11
3.4.1	Difetti di punto . . . . .	12
3.5	Diffusione . . . . .	14
3.6	Difetti di superficie . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Proprietà meccaniche</b>	<b>16</b>
4.1	Deformazione elastica . . . . .	16
4.2	Deformazione plastica . . . . .	18
4.3	Dislocazioni . . . . .	19
4.4	Deformazione . . . . .	21
4.5	Ricottura e Incrudimento . . . . .	24
4.5.1	Ricottura . . . . .	24
4.5.2	Incrudimento . . . . .	25
4.6	Duttilità . . . . .	26
4.7	Meccanismi di rafforzamento . . . . .	26
4.7.1	Rafforzamento da particelle incoerenti . . . . .	27
4.7.2	Rafforzamento da particelle coerenti . . . . .	28
4.7.3	Rafforzamento da particelle semi-coerenti . . . . .	28
4.7.4	Affinamento dei grani . . . . .	28

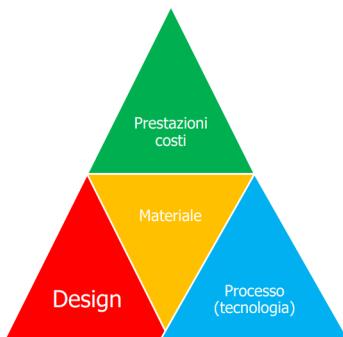
<b>5 Prove Meccaniche</b>	<b>30</b>
5.1 Prova di Trazione Uniassiale . . . . .	30

# Capitolo 1

## Introduzione

Un oggetto viene disegnato, lavorato e progettato a partire da alcune **funktionalità 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.

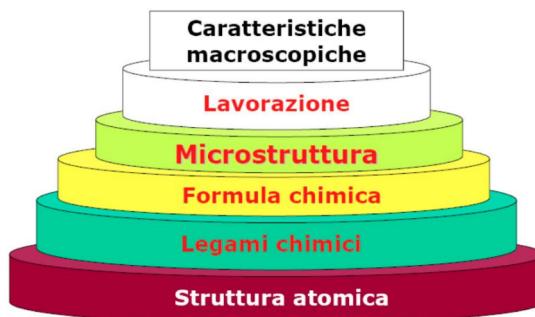
# Capitolo 2

## Metallurgia

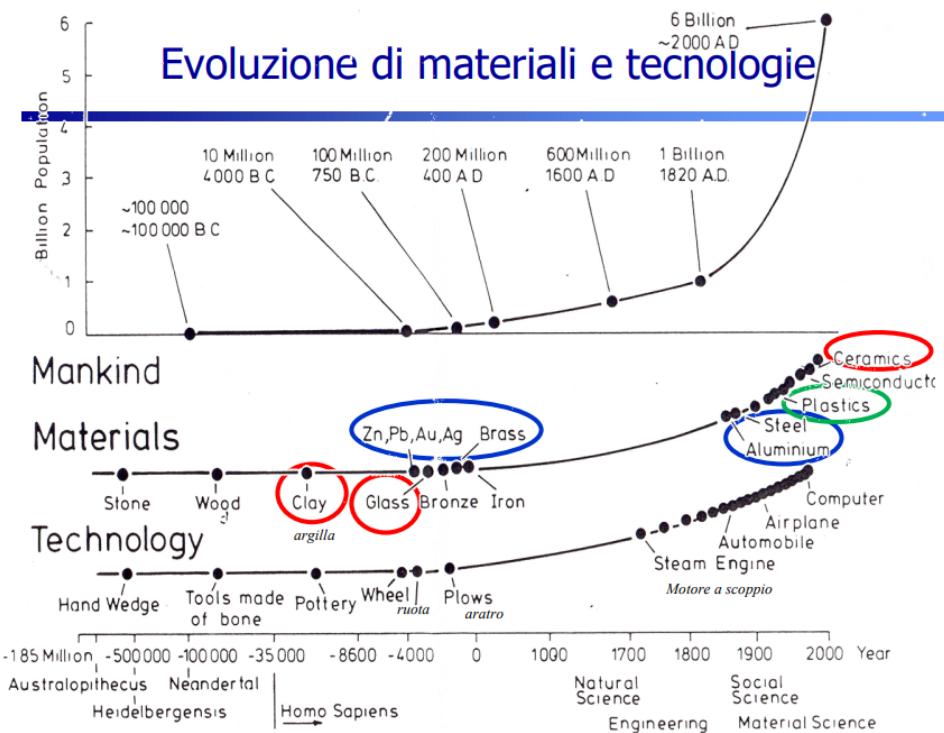
La metallurgia **studia i metalli e le loro caratteristiche/applicazioni.** Esistono tre tipi di metallurgia:

- 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 influenza 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:

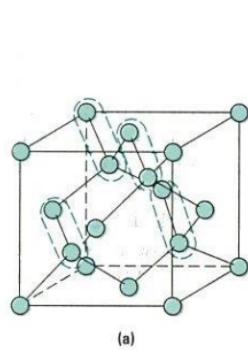
- legame ionico;
- legame covalente;
- legame metallico;

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.

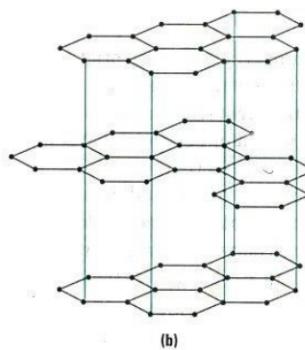
Nel legame ionico invece gli atomi sono cariche elettricamente, e si dispongono in modo da minimizzare l'energia del reticolo ionico: ogni ione è circondato da ioni di carica opposta. Per questo motivo il solido ionico non conduce la corrente elettrica e nemmeno il colore. Tuttavia ha una grande resistenza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



Diamante



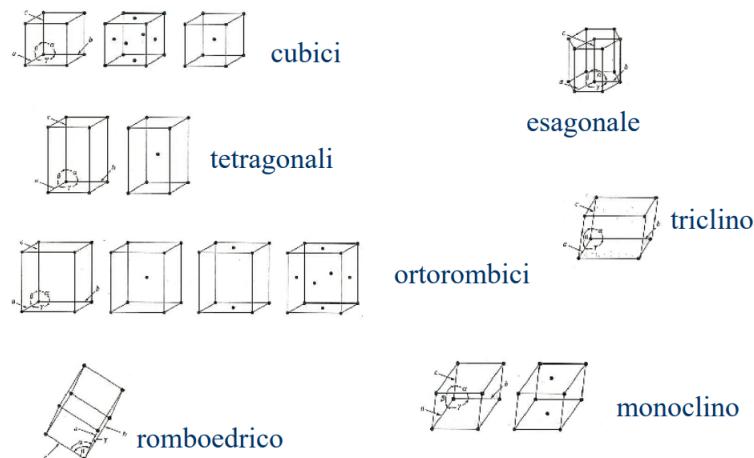
Grafite

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 **monocristallini** 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

I 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:



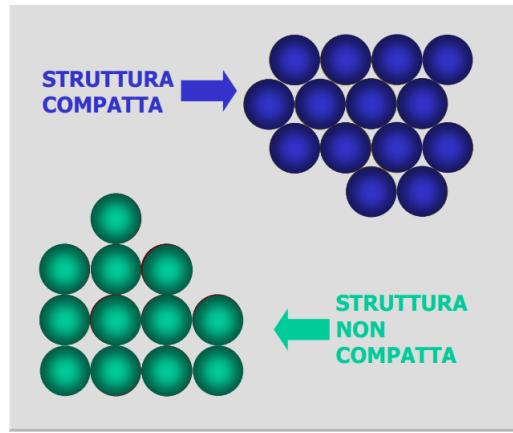
Le geometrie sono solamente 14 perchè gli atomi tendono alla struttura che minimizza l'energia interna del sistema, e l'energia ha un ordine a corto raggio. Ecco la definizione di reticolo ideale: **"in un reticolo l'intorno di ogni punto deve essere identico"**. La struttura di un reticolo quindi è 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);

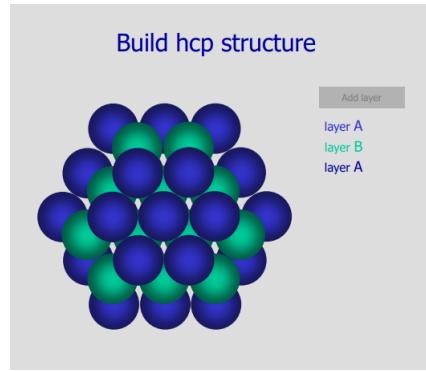
### 3.1 Reticoli compatti

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**.

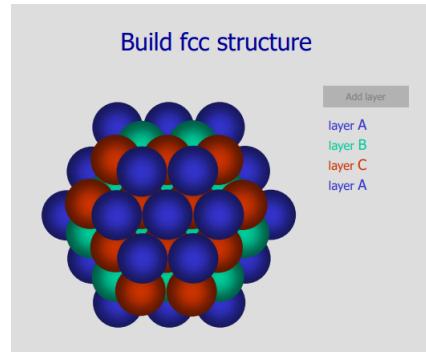


La struttura compatta è la struttura **con il massimo grado di occupazione nello spazio**. Banalmente per decidere quale solido è più compatto basta osservare quante sfere sono a contatto con le altre.

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



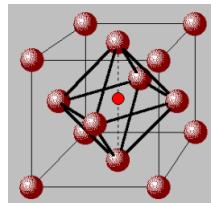
**struttura del cubico a facce centrate** Procediamo nel medesimo modo per quello esagonale compatto.



## 3.2 Lacune

All'interno dei reticolati, 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 droggaggio 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 .

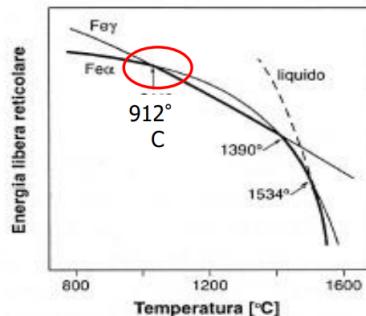
La lacuna più grande si trova nel reticolo con il grado di occupazione più alto, ovvero nel CFC, e in particolare è nel centro del cubo. La lacuna maggiore non è nel CCC perché le lacune sono equi-disposte tra di loro.



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.



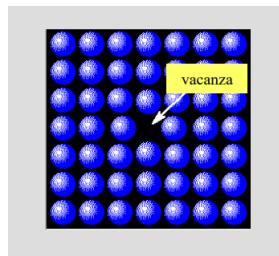
Il ferro dai 912 gradi ha un reticolo CFC, ed è detto Ferro  $\gamma$ , mentre al di spora dei 1290 gradi ha un reticolo CCC ed è chiamato Ferro $\alpha$ . Cambiando il suo reticolo, il ferro **cambia la sua predisposizione ad accettare altri elementi esterni**. Le lacune possono essere misurate a T costante, perché 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

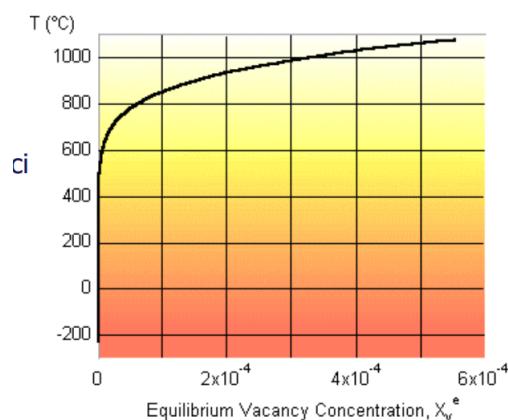
**Vacanze** Per vacanze si intende un posizione reticolare che dovrebbe essere ricoperta da un atomo per rispettare la definizione non è rispettata. Manca un atomo, che genera uno spazio vuoto **più grande delle lacune**. Le vacanze sono i difetti di punto più presenti. All'aumentare della T le vacanze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



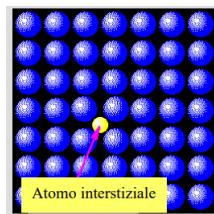
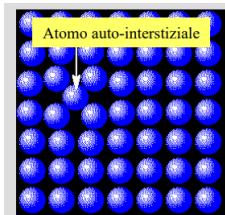
La legge che indica il numero di vacanze in funzione della temperatura è la seguente:

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

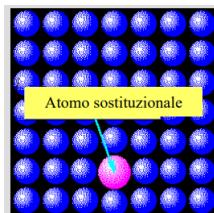
dove  $k$  è la costante di Boltzmann,  $N$  è il numero totale dei siti atomici e  $Q_v$  è l'energia di formazione.



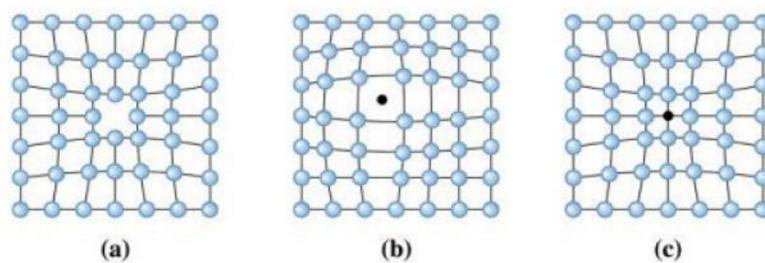
**Atomi auto-interstiziali** Sono atomi che si inseriscono nelle lacune di un reticolo. E' più probabile che le lacune possano essere riempite da atomi di specie diverse da quelle del reticolo (**atomi interstiziali**).



**Atomi sostituzionali** La posizione di un reticolo è occupata da un atomo di specie diversa. Rompe il reticolo ideale perché 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 reticolati di specie diverse. E' uno dei fenomeni che permette di formare le leghe metalliche. Gli atomi in particolare **si insediano in reticolati 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, reticolati 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 reticolati ha dei difetti. Il germe di reticolato 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. Pocichè 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:

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

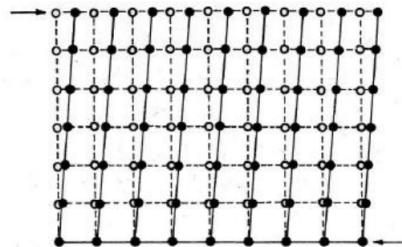
Inoltre la trazione e la compressione sono chiamate con  $\sigma_T, \sigma_P$ , mentre le sollecitazioni non assiali sono denominate con la lettera greca  $\tau$ . Si può calcolare nelle forze di trazione e compressione la deformazione di un solido:

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

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.

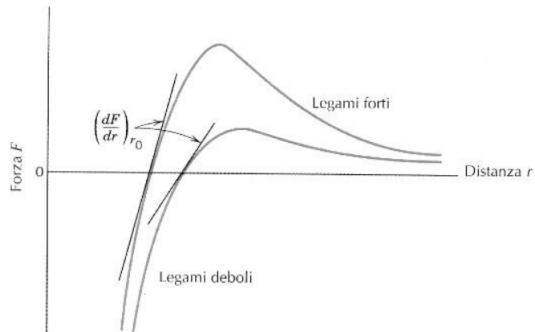
La deformazione  $\epsilon$  di un materiale è legata allo sforzo  $\sigma$  dalla **Legge di Hooke**:

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

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, **maggior è il suo valore, maggiore è la rigidezza 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 :

$$\begin{aligned} E &= \frac{\sigma}{\epsilon} \\ E &= \frac{F/A}{\Delta l/l_0} \\ E &= \frac{l_0}{A} \frac{dF}{dt} = k \frac{dF}{dt} \end{aligned}$$

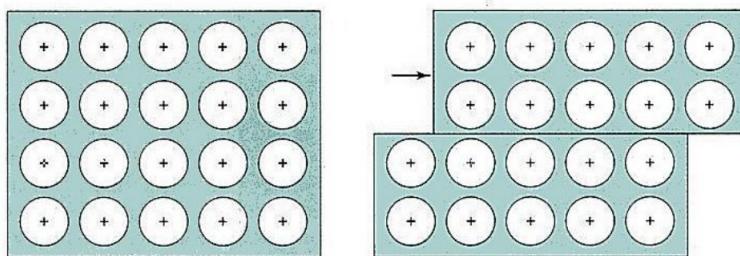
quindi il modulo di Young è il coefficiente angolare della retta tangente alla curva della forza di legame in funzione della distanza:



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

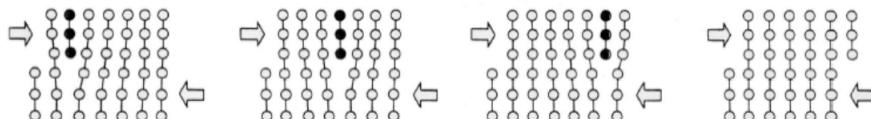
## 4.2 Deformazione plastica

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.



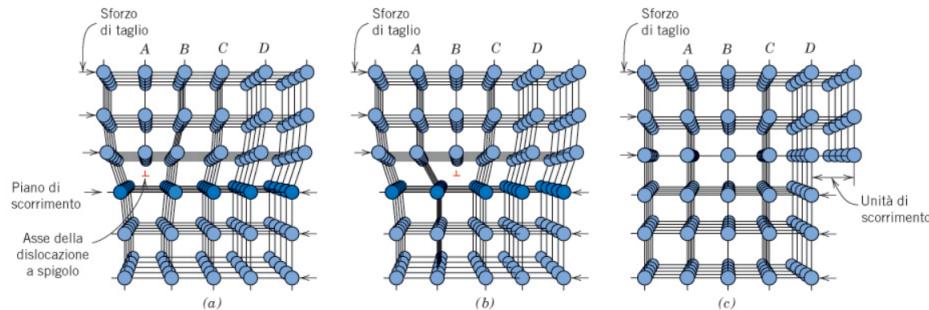
Un materiale metallico **si deforma senza rottura** (cosa che avviene nei materiali ceramici) **perchè l'intorno di ogni punto è identico**. Affinchè si verifichi una deformazione plastica ogni legame ei piani di un reticolo si rompono e successivamente si riformano. Tuttavia sperimentalmente si osserva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



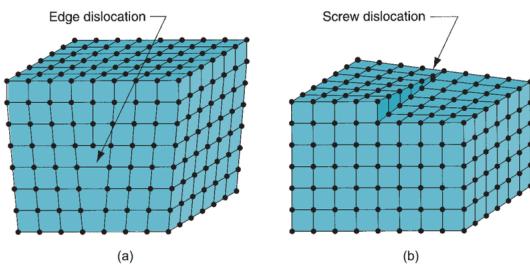
Questi difetti del reticolo che vengono "aggiustati" sono chiamati **difetti lineari**, dove la linea è la proiezione del semipiano "in più". Sono delle **dislocazioni**. Quando il semipiano arriva a bordo cristallo si ha la deformazione del solido, e la rottura dei legami del cristallo avviene in corrispondenza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

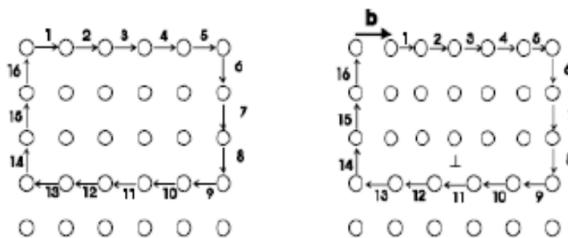


Le dislocazioni possono essere utili durante la lavorazione del materiale, ma anche da evitare quando il pezzo è finito, in quanto possono causare la deformazione del materiale.

Reticolo	Metalli	Piani d'occorrenza	Dirzioni di ocorrerenza	Numero dei sistemi di ocorrerenza	Rappresentazione
C.F.C.	Cu, Al, Ni, Pb, Ag, Au, Ti, ecc.	(111) 4	<110>-3	4 x 3 = 12	
	Fe, Ni, W, Mo, Zirconio, ecc.	(110) 6	<111>-2	6 x 2 = 12	
C.C.C.	Fe-n, Fe-W, Fe-Ni, Na	(112) 12	<111>-1	12 x 1 = 12	
	Fe-n, W	(122) 24	<111>-1	24 x 1 = 24	
Sistema cubico					
Sistema esagonale compatto					

Piani di massima compattazione

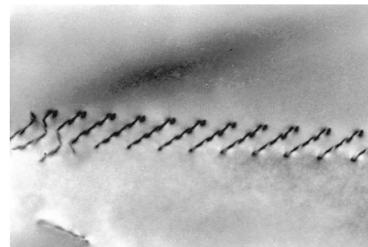
**Vettori di Burgers** Nel modello fisico le dislocazioni sono associate ad un vettore detto **vettore di Burgers**. Questo vettore si trova paragonando il reticolo perfetto con uno con una dislocazione, e disegnando il **circuito di Burgers**.



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 reticolii CCC, si vedono distintamente le linee dei piani di dislocazione (che sono i piani con massima compattazione).

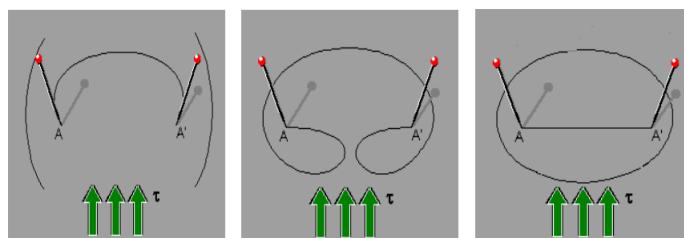
**Sorgenti di Frank e Reed** Quanto misuro il numero di dislocazioni per centimetro quadrato queste sono tra  $10^4$  e  $10^6$ . Per spiegare la facilità della deformazione si ha bisogno di un numero tra  $10^{10}$  e  $10^{11}$  di dislocazioni.



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.

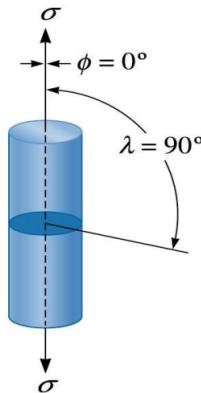
1. La dislocazione inizialmente è rettilinea;
2. La dislocazione è sottoposta ad una sollecitazione ortogonale ad essa, inizia ad incurvarsi in quanto non esiste una posizione di equilibrio stabile per essa;
3. Quando la dislocazione raggiunge il punto critico ha una forma circolare che si espande. Una 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.



## 4.4 Deformazione

La priva di trazione è uno dei parametri fondamentali che influenza la scelta dei materiali. Se consideriamo un cilindro di prova, applico una sollecitazione diretta sull'asse.



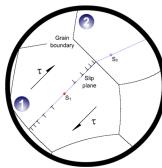
**Materiale monocristallino** Un materiale cristallino si forma quando nel fuso di un metallo è presente un germe solido, e durante il raffreddamento devo controllare che sia solo uno il cristallo che si vada a formare. Il cilindretto è formato in modo che i **piani di massima compattazione siano ortogonali alla sollecitazione applicata**. Una volta superato il campo elastico, nel cilindretto si attiva il meccanismo di deformazione plastica prima di rompersi.

Un concetto fondamentale è il seguente: **il solido si deforma attraverso il movimento delle dislocazioni sul piano di massima compattazione sottoposta ad una sollecitazione di taglio**. Di conseguenza nel cilindretto in figura essendo i piani di massima compattazione ortogonali alla sollecitazione, non può essere applicata una sollecitazione di taglio, dunque le dislocazioni non si muovono e il solido non si deforma: **si ha la rottura del campione**.

Se i piani di massima compattazione **non sono ortogonali** allora c'è una componente di taglio che muove le dislocazioni e il solido si deforma.



**Metalli policristallini** In questi metalli sono presenti più cristalli, ma ciò che succede è analogo. Saranno le dislocazioni dei cristalli **con un'orientazione simile a quella della sollecitazione a muoversi per prime**.



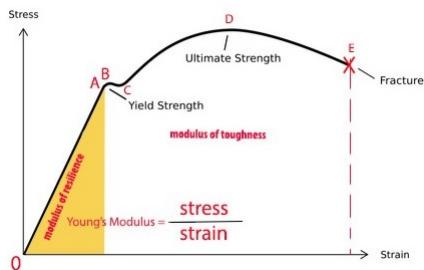
In questo movimento le dislocazioni **si spostano fino ai bordi di grano**. Poichè le dislocazioni dello stesso segno tendono a respingersi, si crea un **campo di sforzo** causato dalle dislocazioni nel bordo di grano. Contemporaneamente potrebbe accadere che quando le dislocazioni di un cristallo si spostano lo sforzo percepito dal cristallo diminuisce e diventa conveniente per un altro cristallo deformarsi.

Alla fine si avrà un solido deformato perchè le dislocazioni si sono spostate tutte ai bordi di grano. Nel campo elastico le dislocazioni rimangono, mentre nella deformazione plastica queste si spostano lungo i piani di massima compattazione se sottoposte ad una sollecitazione di taglio.



E' importante ricordarsi che nel campo elastico poichè le dislocazioni non si muovono, la deformazione è reversibile. Ad un certo punto, superato il campo elastico inizia la deformazione del pezzo, e poichè le dislocazioni si spostano la deformazione è irreversibile. Nell'osservare lo sforzo applicato e la deformazione si ha una massimo, dove **gli sforzi si localizzano ed inizia la strizione** (in qualche punto del provino la sua sezione diminuisce a causa dell'elevata deformazione). Infine si ha la rottura del pezzo: si è formata **una foresta di dislocazioni che non riescono più a muoversi** a causa dell'elevato numero di esse, dunque il provino si rompe.

E' interessante notare come nel grafico il modulo di Young  $E$  rimane costante nel campo elastico (coefficiente angolare della retta) in quanto è una proprietà costante del materiale.



## 4.5 Ricotture e Incrudimento

### 4.5.1 Ricottura

Esistono dei modi per recuperare il materiale e diminuire il numero di dislocazioni. Uno di questi è eseguire una **ricottura**, cioè scaldare il metallo, perchè scaldandolo:

- Aumentano i gradi di libertà;
- I bordi di grano aumentano;
- Saltano le dislocazioni da un piano all'altro e si annullano vicendevolmente;

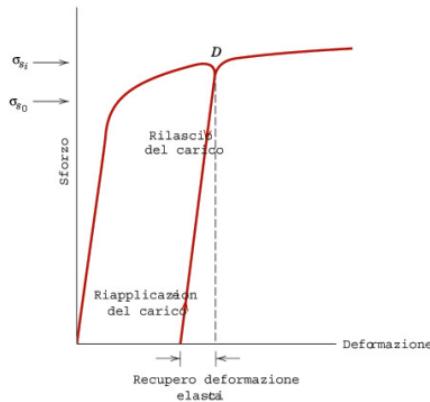
L'operazione di ricottura è abbastanza complessa, ed è suddivisa in tre stadi.

**Recovery** E' la fase iniziale del processo. In questo stadio lo stato policristallino del metallo non cambia, ma le dislocazioni si riorganizzano distribuendosi lungo particolari direzioni, con una riduzione dell'energia interna causata dalle molte dislocazioni presenti ai bordi di grano. Le dislocazioni, quando si riallineano vanno a delimitare regioni del grano prive di difetti, dette **celle o sotto-grani**.

**Ricristallizzazione** In questo processo i sotto-grani diventano dei grani, dunque si ha la crescita di questi a discapito dei grani difettosi, e alla fine si ha la scomparsa di tutti i grani e le dislocazioni in essi. La temperatura alla quale si esegue questo processo è inversamente proporzionale alla deformazione imposta al metallo. Non si ha ancora un monocristallo ma ci sono grani che possono essere più o meno grandi (in base all'esposizione di tale processo)

**Crescita del grano** Con il tempo e ad una certa temperatura le dimensioni dei grani aumentano. Più è lunga l'esposizione a tale processo più si tende ad un monocristallo perfetto.

#### 4.5.2 Incrudimento



Una volta che un materiale è sottoposto a trazione e lo metto a riposo, questo recupera le proprietà elastiche. Quando da riposo lo metto in trazione, il **carico necessario per deformarlo è aumentato**. Questo fenomeno è detto **incrudimento**, ed è causato dal numero di dislocazioni che si sono moltiplicate dalle sorgenti di Frank e Reed. A causa delle molteplici dislocazioni e dal campo di sforzo che generano le une sulle altre (cercano di respingersi) avvicinare le deformazioni al bordo di grano sarà più difficile.

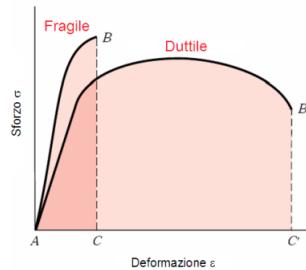
E' un tipo di applicazione utile nei metalli puri o in alcune leghe monofasiche come gli acciai inossidabili austentici.

$$\sigma = k \varepsilon^n$$

Materiale	Trattamento	n	k [MPa]
Acc. 0.5% C	Ricotto	0.26	530
Acc. 0.6% C	Bonif. 540 °C	0.10	1570
Acc. 0.6% C	Bonif. 705 °C	0.19	1230
Rame	Ricotto	0.54	320
Ottone	Ricotto	0.49	900

## 4.6 Duttilità

La duttilità è la capacità del materiale di deformarsi plasticamente. Graficamente equivale all'area sottesa del grafico sforzo/deformazione.



La rottura duttile si forma tramite quando dei micro-vuoti detti **dimple** si accumulano all'interno del reticolo e tendono ad unirsi, ed è possibile vederli sulla superficie. Se il tipo di rottura è fragile, si vedono sulla superficie di rottura i bordi di grano della superficie.

## 4.7 Meccanismi di rafforzamento

I meccanismi di rafforzamento sono necessari perché **riducono la deformabilità** di un metallo, riducendo la mobilità delle dislocazioni attraverso degli ostacoli nella struttura del reticolo e nei grani. Esistono diversi tipi di ostacoli:

- bordi di grano;
- altre dislocazioni;
- atomi sostituzioni;
- particelle deformabili;
- particelle indeformabili;

Durante i processi di produzione dei metalli, capita sovente che rimangano **delle impurezze**, che rimangano all'interno del metallo,. Con l'abbassare delle temperature queste impurezze "precipitano" e formano degli "ostacoli" alle dislocazioni. Questi ostacoli fanno sì che le dislocazioni: o hanno abbastanza energia per fare un salto di piano, o vengono bloccate. Le dislocazioni inoltre creano dei **campi di sforzo**, che comprimono (dove è presente il piano in più) o mettono in trazione (dove manca il piano in più) il reticolo.

Con il processo di deformazione plastica da  $10^6$  si passa a  $10^{11}$  dislocazioni, dunque il campo di sforzo all'interno dei reticolli aumenta. Questo fa sì che sia più difficile "spostare" le dislocazioni, dunque aumenta la resistenza al carico di un metallo, tuttavia diminuiscono le caratteristiche di duttilità, il che rende il metallo "più fragile".

**Aggiunta di un secondo metallo** Quando si aggiunge un altro metallo, si ha **una distorsione del reticolo cristallino**. Affinchè questo sia possibile ci sono dei vincoli geometrici e elettrici. Geometrico perché la **la differenza di dei raggi atomici deve differire di al più 15%**. Elettrici perché gli atomi devono avere la stessa carica. Queste regole prendono il nome di Regole di **Hume-Rothery**.

**Rafforzamento per atomi interstiziali o sostituzionali** Nel caso di soluzioni con soluzioni solide interstiziali gli atomi esterni devono avere un raggio atomico molto più piccolo. La distorsione del reticolo dipende dal raggio dell'atomo. Essendo la sostituzione interstiziale un ostacolo alle dislocazioni, questa conferisce al metallo un carico di snervamento maggiore, ma rende il materiale fragile.

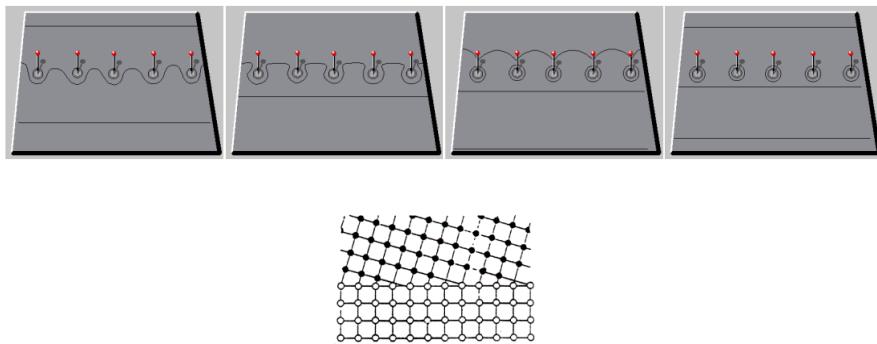
Tra atomo in posizione interstiziale e l'atomo sostituzionale, **sono i primi a rafforzare maggiormente il metallo, in quanto deformato maggiormente il reticolo**.

Inoltre ci sono differenze per quanto riguarda **i reticolli di tali atomi esterni**, in quanto l'interazione con reticolli diverse conferisce diverse proprietà.

**Soluzioni solide** Si parla di soluzioni solide quando un elemento esterno è "solubile" all'interno del reticolo di un metallo. Nei composti **intermetallici** gli atomi si dispongono in modo ordinato e in rapporto stechiometrico.

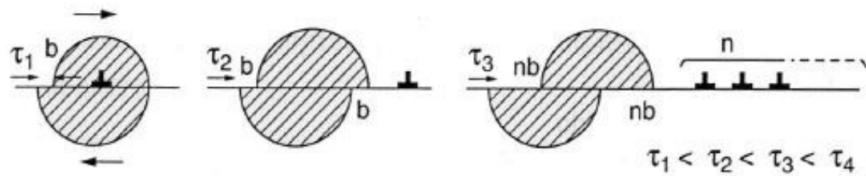
#### 4.7.1 Rafforzamento da particelle incoerenti

Le particelle degli atomi esterni sono dette **incoerenti** quando il loro reticolo è completamente differente da quello del metallo. Quando le dislocazioni del metallo cercano di attraversare le particelle incoerenti, queste non riescono ad attraversarli e sono costrette a formare delle **dislocazioni ad anello** attorno a tali particelle. Il problema sorge quando le dislocazioni ad anello sulle particelle incoerenti diventano troppe, e dunque si ha la rottura del reticolo: il metallo diventa fragile.



#### 4.7.2 Rafforzamento da particelle coerenti

Si chiamano particelle coerenti le particelle il cui reticolo è identico a quello del metallo. Le particelle coerenti **si oppongono al moto** delle dislocazioni, pur lasciandosi attraversare, dunque il metallo nel complesso aumenta il suo carico di snervamento, ma non come per le particelle incoerenti.



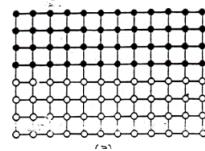
#### 4.7.3 Rafforzamento da particelle semi-coerenti

Le particelle semi-coerenti hanno un solo parametro del reticolo identico a quello della matrice. Quindi queste particelle **rallentano notevolmente** il moto delle dislocazioni pur non fermandolo. Carico di snervamento maggiore per particelle incoerenti, seguono le semi-coerenti e infine si hanno le coerenti.

Un esempio di lega è l'alluminio con il rame, che appena formato ha un carico di rottura molto basso. Tuttavia, essendo il reticolo in movimento il rame si posiziona all'interno dei microvuoti *dimple* che si formano con il movimento delle dislocazioni. Dunque si forma il **duralluminio**, un materiale con un carico di snervamento maggiore ma fragile.

#### 4.7.4 Affinamento dei grani

Tanto più i grani sono piccoli tanto è maggiore l'effetto di ostacolo al movimento delle dislocazioni. La legge di **Hall-Petch** indica quale sforzo neces-



sario per deformare un grano in base al diametro dei grani:

$$\sigma = \sigma_{int} + kd^{\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

dove  $\sigma_{int}$  è la resistenza interna tra i bordi di grano. Un vantaggio dell'affinamento dei bordi di grano è che **aumenta il carico di snervamento senza infragilire**. I bordi di grano possono essere controllati o nel momento di fusione, oppure se il materiale è **allotropico** (come il ferro) i grani possono essere modificati senza portare a fusione il solido.

# Capitolo 5

## Prove Meccaniche

Le prove meccaniche sono prove standardizzate che sono compiute per definire il campo di impiego di un certo materiale. Esistono diversi tipi di prove meccaniche: statiche, impulsive, cicliche e a carico costante. Come primo caso studiamo la prova di trazione. Le prove meccaniche **studiano le proprietà intrinseche del materiale**, cioè indipendenti dalla geometria del pezzo.

### 5.1 Prova di Trazione Uniassiale

E' una delle più importanti prove meccaniche ed è anche una prova **distruttiva**, ovvero alla fine della prova si ha la rottura del pezzo. La prova di trazione uniassiale consiste nell'applicare al provino una forza che tende ad aumentare progressivamente. Sul provino quindi si misura una deformazione  $\Delta L = L - L_0$ .

Un provino è costituito da zone dette **a ferraggi**, che sono le parti che si attaccano al macchinario, e una **sezione utile**, ovvero la sezione su cui si attacca l'**estensimetro** e si misura la deformazione. Le dimensioni del provino seguono delle norme **ISO 6892-1** e **ASMT A370**. I provini con sezioni circolari si dividono in:

- **Provini corti**: tratto utile uguale a 5 volte il diametro della sezione;
- **Provini lunghi**: tratto utile pari a 10 volte il diametro della sezione;

La macchina per le prove di trazione è composta da una **cella di carico che applica la forza, estensimetro**. Una volta arrivati al tratto utile di deformazione l'estensimetro deve essere tolto, perchè il pezzo si rompe e di

conseguenza si romperebbe anche l'estensimetro.

Per eliminare i vincoli geometrici anzichè osservare il grafico forza/spostamento relativo si osserva il grafico **sforzo/deformazione percentuale** ( $\sigma/\epsilon$ ). Esistono diversi tipi di deformazione:

1. **Piccole deformazioni**: reversibili, appartengono al campo elastico;
2. **Grandi deformazioni**: irreversibili, ormai le dislocazioni si sono spostate, sono plastiche;
3. **Strizione**: il fenomeno per cui la sezione del campione inizia a diminuire, e il pezzo sta per rompersi.

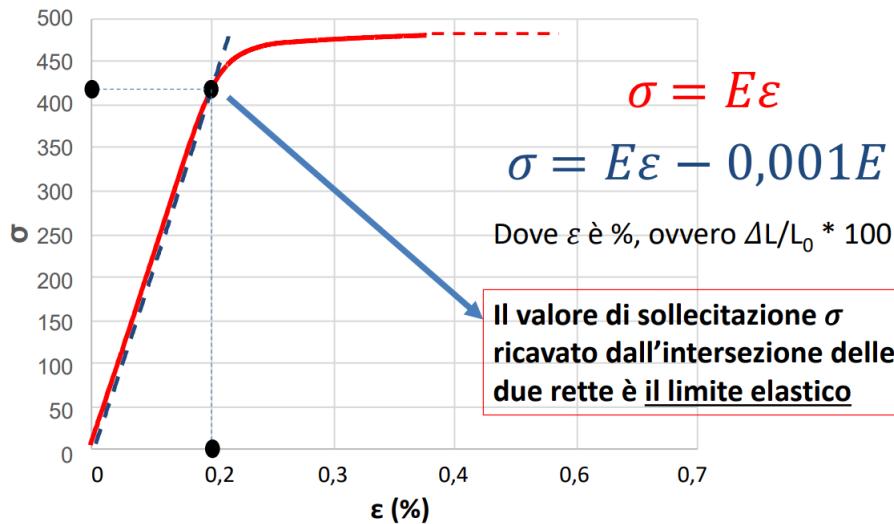
Dal punto di vista pratico bisogna rimanere nelle grandi deformazioni, perchè alla strizione il materiale è come se fosse già rotto.

**Grafico sforzo/deformazione** Nel primo tratto del grafico le deformazioni sono nel campo elastico, quindi vale la legge di Hooke:

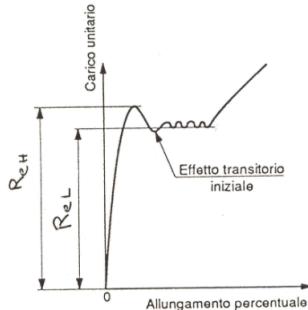
$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (5.1)$$

dove  $E$  è il modulo di Young ed è il coefficiente angolare della retta. Il modulo di Young è legato al reticolo cristallino, decresce con la temperatura, ed è indipendente dall'incrudimento e dai trattamenti termici. Il materiale con  $E$  maggiore è l'acciaio:  $E = 10^{11} Pa$

**Limite Elastico** Definito come il carico massimo per il quale il comportamento del materiale è elastico. Da  $\epsilon = 0.001$  si traccia una retta con pendenza pari a quella del tratto elastico. La sollecitazione all'intersezione della retta con la curva è il limite elastico.



**Snervamento Marcato e Graduale** Scostamento dal comportamento lineare quando il carico viene aumentato oltre un certo limite. È causato dall'inizio del movimento delle dislocazioni nel reticolo cristallino. La causa è la rottura di legami chimici tra atomi adiacenti, con la formazione di nuovi legami.



Si entra nelle grandi deformazioni quando la deformazione residua dopo la rimozione del plastico è dello 0.2%.

**Carico di Rottura** Si ha carico di rottura quando lo sforzo raggiunge il limite massimo. Questo limite non viene più separato perché la sezione subisce la strizione ed è instabile. Quindi dal punto di vista ingegneristico è come se fosse già rotto.

Il fenomeno di **necking** è il sintomo della strizione, cioè da quel punto si ha un'instabilità nel campione. Quando il grafico finisce il campione si è rotto. La curva del grafico è **nominale** ovvero si considera la sezione

iniziale uguale a quella finale. E' un aspetto molto importante perché in realtà non accade così per la strizione, infatti prima del carico di rottura l'approssimazione è accettabile.

Alcuni parametri importanti sono l'**allungamento percentuale** e il **coefficiente di strizione**.

$$A\% = \frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (5.2)$$

$$z\% = \frac{s_0 - s_f}{s_0} \cdot 100 \quad (5.3)$$