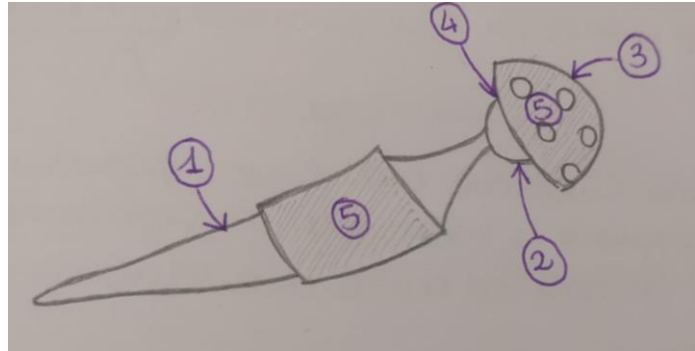


## I metalli

Perché studiamo i metalli? Innanzitutto, costituiscono la strumentazione con cui l'ingegnere ha a che fare. Cominciamo a trattare materiali con cui avremo a che fare.

### Protesi d'anca 1

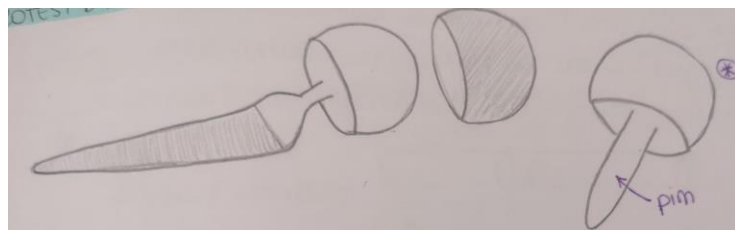
1. Corpo in titanio monolitico/stelo
2. Testa di rotazione
3. Coppa acetabolare
4. La parte interna della coppa, quella a contatto con la testa di rotazione, è in materiale polimerico
5. Coating ceramico: la coppa acetabolare e la parte del corpo più vicina alla testa di rotazione (zona prossimale), sono rivestite da materiale ceramico poiché devono favorire l'osteointegrazione. Parliamo quindi di ceramiche che sono osteo-induttive e osteo-connettive, per cui si dicono osteo-connettive. Il coating ceramico è una delle maggiori conquiste degli ultimi anni.



### Protesi d'anca 2

Quello che si vede in figura è una protesi in lega di titanio con testa di rotazione in materiale uguale. La testa di rotazione si avvicina alla coppa entro la quale dovrà ruotare. Questa è una protesi di connessione detta metallo-metallo: sia la testa, sia la coppa sono di metallo, questo comporta dei severi problemi di attrito: ci sono problemi di interconnessione tra una protesi e l'altra che porterà, inevitabilmente, ad un consumo, per quanto lieve, ma non nullo, delle superfici metalliche. Il punto di interesse è il possibile inquinamento del paziente -> la nostra attenzione deve essere diversa da quella di tipo meccanico: la nostra attenzione deve essere focalizzata alla reazione biologica -> il manufatto funziona se permette il recupero della funzione al paziente, ma evita al massimo gli inevitabili effetti collaterali. La protesi sicura al 100% non esiste. Quindi prima attenzione -> **attenzione in campo biologico** (il coating sullo stelo è efficace per connettere la protesi? L'interconnessione tra la coppa e la testa di rotazione produrrà un eccessivo particolato metallico?)

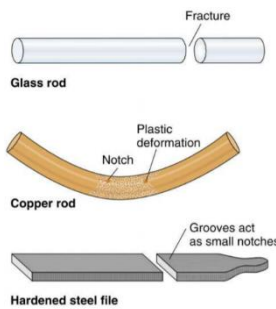
\*) Semi protesi che viene posta laddove non è necessaria una protesi più invasiva (ad esempio, se ci fosse solo un problema di rotazione tra testa del femore e anca, ma senza la compromissione del femore).



In figura vediamo una protesi 'vecchia', di venti/trenta anni fa. Vediamo una protesi che si è rotta con una frattura fragile che è stata facilitata da fenomeni corrosivi. Le protesi moderne ci servono per ragionare su quello che viene impiantato ora; la conoscenza delle

protesi vecchie serve nel caso in cui dovessimo ragionare in questioni legali, perché si rompono adesso le protesi impiantate venti/trenta anni fa. Si possono vedere dei chiari segni di corrosione all'interno della protesi, quindi la prima cosa da fare è fare un'analisi delle problematiche che la protesi mostra. La frattura fragile si distingue perché è una frattura netta, non c'è alcun tipo di movimento duttile, questo significa che il materiale non si è deformato.

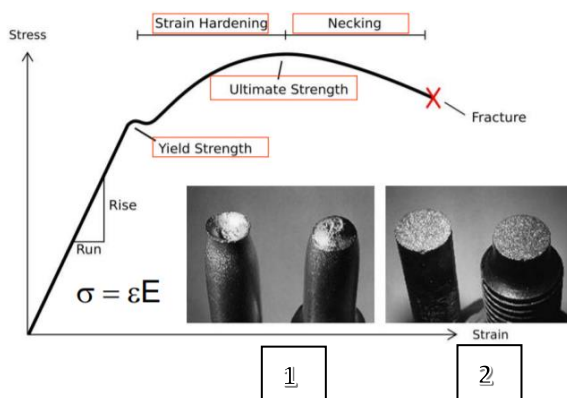
Cerchiamo di capire quali sono le problematiche riguardo l'utilizzo di un certo materiale.



**Frattura fragile:** la frattura fragile è tipica del vetro. Avviene di netto con un comportamento quasi cristallino dove chiaramente il materiale non ha subito alcuna deformazione, possiamo quindi affermare che una frattura di questo tipo si verifica a causa dell'utilizzo di materiali *non duttili*. Non abbiamo bisogno di materiali di questo tipo poiché non in grado di resistere alla sollecitazione, cerchiamo invece un materiale in grado di avvertire la rottura e in grado di resistere fino al nostro intervento, che abbia deformazione plastica (concetto di affidabilità). Quello che bisogna fare è quindi analizzare il materiale per verificare la sua capacità di

deformarsi plasticamente.

### Diagramma sforzo-deformazione



È un diagramma funzionale (un diagramma che si fa in laboratorio), non di stato: essendoci una strain viene computato il tempo-> valutiamo una deformazione che si evolve nel tempo in funzione di uno stress imposto. Il termine 'punto di snervamento' lo si utilizza solo parlando i metalli.

Il punto di snervamento è il punto di maggior interesse nel diagramma, ed è il punto in cui

il materiale metallico passa dalla deformazione elastica (reversibile) alla fase di deformazione plastica (non reversibile).

Il diagramma  $\sigma$ - $\epsilon$  (stress-strain->tensione-deformazione) è un diagramma che computa cosa succede all'interno di un provino quando viene caricata una tensione che comporta una deformazione.

$$\sigma = \epsilon E$$

- Con E: modulo di Young (caratteristica che descrive la rigidità di un materiale, modulo di elasticità)
- Con  $\epsilon$ : deformazione
- Con  $\sigma$ : tensione

Quando si passa da elastico a plastico le proprietà di un materiale cambiano irreversibilmente, diventano irreversibilmente plastiche. Dopo il punto di snervamento (Yield Strength) troviamo lo Strain Hardening (incrudimento del materiale): la struttura interna del materiale cambia in funzione

della deformazione. Arriviamo in Necking quando abbiamo un materiale estremamente duttile. Infine, si ha la rottura (fracture). L'Ultimate Strength è il livello più alto dello stress che viene toccato dal materiale. Lo Strain Hardening è quello che troviamo nella foto numero 1: il provino ha una lieve deformazione conica. Nella linea curva dopo lo Yield Strength vediamo che serve molto poco stress per una deformazione grande -> il sistema sta cambiando la sua sezione (incrudimento).

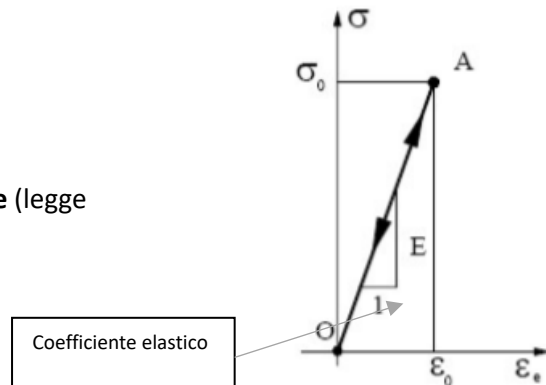
Definiamo forza: la forza è un qualcosa che ha un modulo, una direzione e un verso; è quindi un vettore. Ci interessiamo sul concetto di vettore, abbiamo tante forze che si compongono. Applichiamo le forze ad una sezione che indica un campione. Noi dobbiamo passare dalle forze alle tensioni:

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

dove A è l'area della sezione.

Sigma nel campo elastico compone la **Legge di Hooke** (legge dell'elasticità lineare):  $\sigma = \varepsilon E$

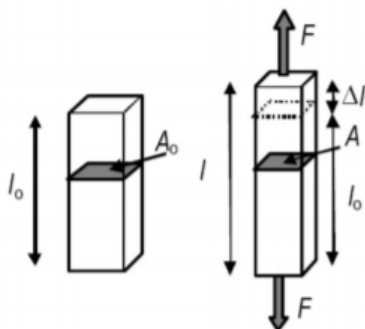
Diagramma della deformazione elastica: stresso un materiale e ritorno alle condizioni iniziali



E è il valore che mi dà la rigidità del materiale. Vediamo alcuni valori di E:

- Metalli: 70-230 GPa
- Ceramiche (molto rigidi)
  - Tradizionali: 10-100 GPa
  - Avanzati: fino a 400 GPa
  - Diamante: 1000 GPa
- Polimeri: 2-8 GPa

Torniamo alla prima protesi vista: lo stelo è in titanio (E=100 GPa), la coppa acetabolare è in polimero (E=2-8 GPa), la sovra coppa è in ceramica (E=400 GPa). Ecco così che si configurano le problematiche: abbiamo tre materiali completamente diversi che lavorano insieme. I materiali sono differenti anche dal punto di vista di struttura interna; in più il metallo è conduttivo a livello elettrico e termico, gli altri due no. Questi materiali, però, devono avere delle reazioni accoppiate talmente precise da mantenere il loro allineamento funzionale almeno per vent'anni. Inoltre, stiamo ragionando su materiali che hanno diagrammi di elasticità completamente diversi.



$$sforzo = \frac{forza}{sezione\ iniziale}$$

$$A_0 = sezione\ iniziale \neq A$$

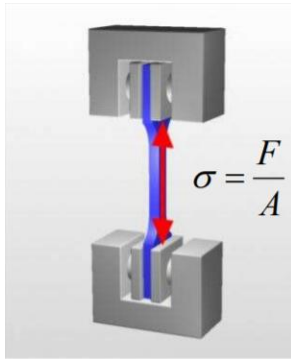
Se l'oggetto è completamente plastico e se ad esso vengono applicate delle forze, esso si sezionerà senza alcuna variazione di sezione (frattura fragile); se invece si deforma in funzione dello stress applicato allora la sezione si modifica, i parametri cambiano durante la prova e varia anche la lunghezza.

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

$\epsilon$  indica quanto si è allungato il provino in funzione della dimensione originale.  $\epsilon$  è adimensionale.

Abbiamo una valutazione che, se non abbiamo altre valutazioni, non tiene conto della variazione sezionale.

### Prova di trazione

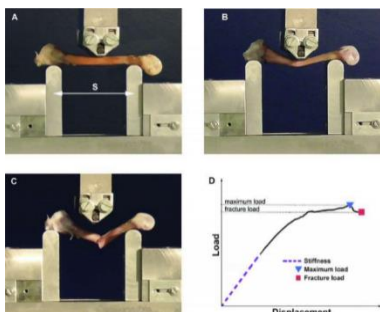
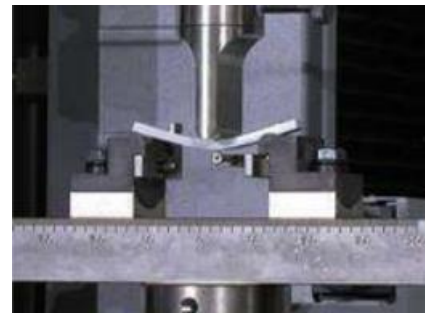


La frattura per essere accettata deve avvenire nel terzo centrale del provino, ovvero al centro; se venisse in uno dei due punti d'attacco la prova non sarebbe valida: significherebbe che il campione è stato montato male, e che quindi lo stress non è allineato alla direzione del campione. Problema: normalmente la variazione di sezione non viene presa in esame, questo andrebbe bene per i materiali rigidi, ma per i materiali di interesse biomedico che sono tutt'altro che rigidi questo diventa un problema.

### Prova tre punti

La rigidità flessionale può essere misurata mediante la prova tre punti: due punti di supporto e uno di carico della sollecitazione.

La sollecitazione è funzione della sezione: se avessi un punzone di tipo puntiforme, la tensione locale al di sotto del punzone tenderebbe ad un valore altissimo -> le sezioni devono essere normate.



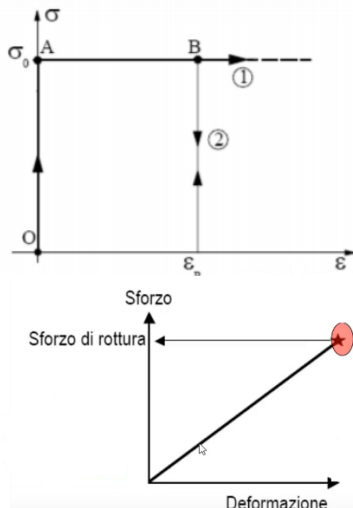
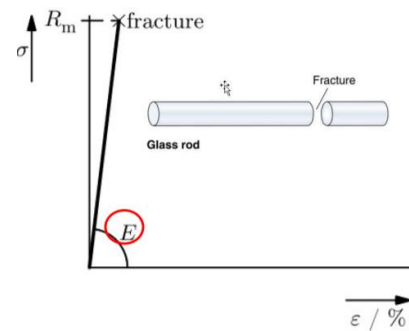
Noi utilizziamo queste prove per valutare materiali naturali. Un'altra problematica per la bioingegneria è la seguente: non sempre i nostri campioni possono rientrare nelle normative assolutamente definite per la classica ingegneria meccanica, occorrono delle normative differenziate per ragionare su queste prove.

Torniamo alla frattura di tipo fragile:

- non c'è punto di snervamento (vetro)
- non c'è deformazione
- non c'è variazione di sezione

Il materiale non ha alcun tipo di deformazione plastica

Quanto più la pendenza della linea è vicino all'asse dello stress, quanto più è alto il modulo di Young, quanto più è rigido il materiale; i materiali fragili non vanno bene nel nostro campo perché non assorbono energia, non sono in grado di dissipare l'energia di uno stress, ovvero non sono in grado di dissipare all'interno di loro stessi le sollecitazioni che vengono da fuori, e l'unica risposta possibile che possono dare è rompersi. Tutti i materiali hanno una loro fase elastica e per tutte queste fasi vale la legge di Hooke, quando si passa in fase plastica ogni materiale si comporta diversamente.



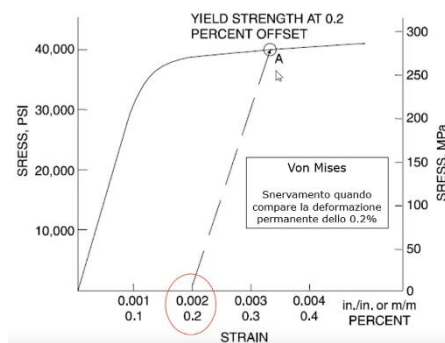
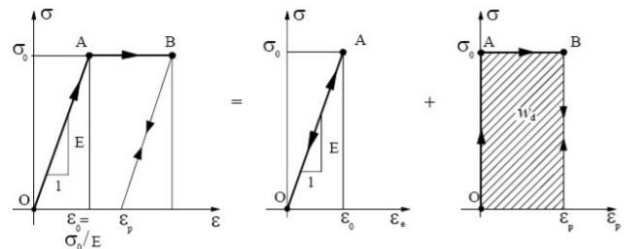
Modello ideale perfettamente plastico:

È in grado di sopportare un elevato stress senza una minima deformazione fino un certo punto (A) e successivamente ha una deformazione enorme senza alcuno stress applicato. Quindi ha una deformazione elastica nulla è una deformazione plastica elevata senza che sia sottoposto a stress. Per passare da A a B questo materiale ha bisogno di un  $\Delta\sigma$  nullo. Questo materiale è ovviamente ideale, si tratterebbe di un materiale che resiste benissimo fino al punto A e poi dai punti A in poi non ha assolutamente resistenza.

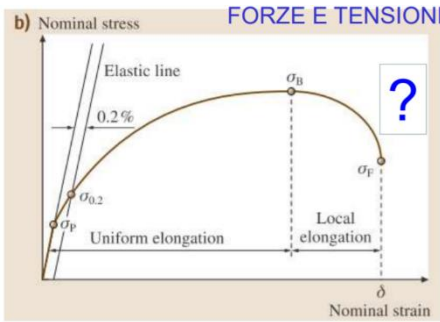
Nella figura più in basso vediamo il diagramma di un materiale elastico reale: la linea è angolata e l'angolazione dà l'informazione sulla rigidità del materiale -> legge di Hooke.

Modello ideale elasto-plasto:

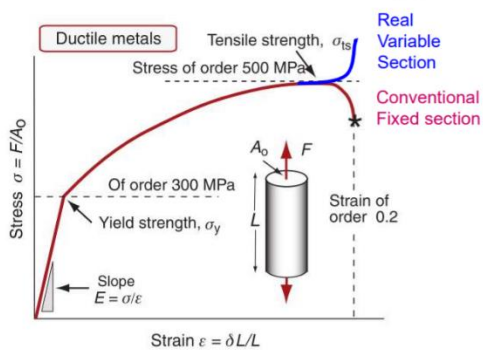
Mettiamo insieme le cose: il diagramma A è il diagramma dell'elasticità perfetta, il diagramma B è quello della plasticità perfetta, mettendo insieme A+B troviamo un diagramma che descrive in forma perfetta un comportamento di tipo elastico seguito da un comportamento di tipo plastico; non abbiamo comunque ottenuto un comportamento di tipo reale.



Nella realtà la deformazione plastica cresce, lentamente, ma cresce, perché è necessario un  $\Delta\sigma$  per ottenere una deformazione -> la linea della deformazione plastica non è orizzontale. L'ultimate strength e il breaking strength non sempre coincidono.

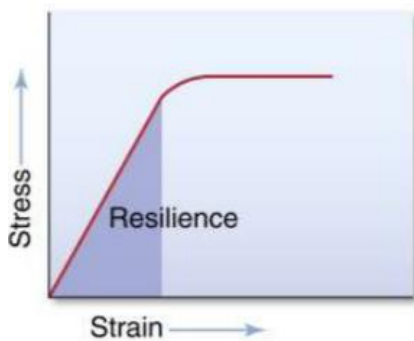


Perché il materiale passa indenne a  $\sigma_B$  e si frattura a  $\sigma_F$  che è una tensione più bassa? Partiamo dal presupposto che la tensione è funzione della sezione ( $\sigma = F/A$ ). Nel grafico non è presa in considerazione la variazione di sezione del provino: bisogna passare dalla sezione convenzionale fissa alla sezione variabile. Sicuramente il materiale si è fratturato ad una tensione più bassa di quella massima applicata a causa di una variazione di sezione, il primo grafico, però, non prende in

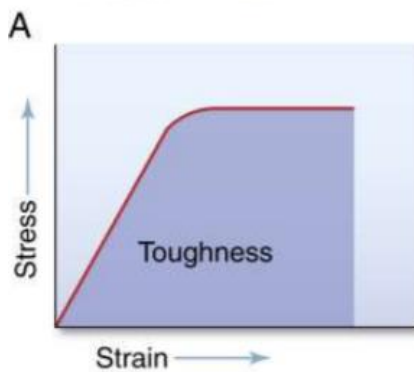


considerazione la variazione di sezione -> è più preciso il secondo grafico. Dobbiamo considerare il fatto che in quasi tutti i materiali, questi, prima di fratturarsi, cambiano la loro sezione, e quindi, di conseguenza, il carico tensionale aumenta a dismisura -> questo giustifica la linea blu che sale nel secondo grafico. Diminuisce la sezione -> aumenta la tensione. Tanto più diminuisce la sezione, quanto più cresce la tensione a parità di forza applicata.

### Resilienza e durezza

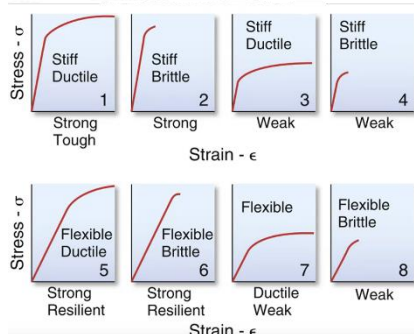


**Resilienza:** espressione della capacità di lavoro elastico -> livello energetico a livello di deformazione elastica.



**Durezza:** resistenza alla frattura del materiale, comprende anche il lavoro di tipo plastico.

In base ai diagrammi che otteniamo dalle prove possiamo categorizzare un materiale: duttile, rigido, rigido ma con comportamento plastico, rigido ma senza alcun tipo di comportamento plastico, ecc...



Bisogna ragionare sulle caratteristiche dell'ambiente circostante: il modulo di Young è affetto dalle caratteristiche micro e nano strutturali del materiale, quindi misurare il modulo di Young significa calcolare la sommatoria dei nano-effetti dei legami atomici.

Le condizioni dei legami atomici, le condizioni di energia del materiale (calore) e la presenza di impurità all'interno della lega cambiano il modulo di Young -> dobbiamo avere le condizioni in cui è stato misurato il modulo di Young, altrimenti questo non ha alcun significato per un ingegnere.

La deformazione elastica dal punto di vista nanometrico è una sollecitazione generale alla quale l'insieme dei legami atomici riesce a far fronte -> i singoli atomi non cambiano posizione relativa tra di loro.

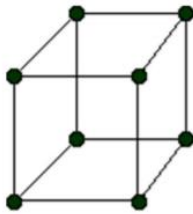




Diverso è il caso di deformazione plastica -> in deformazione plastica gli atomi cambiano la loro posizione relativa agli altri atomi.

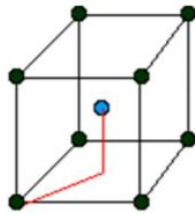
Esistono molti tipi di reticoli atomici. Noi siamo interessati a quelli **cubici** ed **esagonali**. Il reticolo cubico è utile per l'acciaio, mentre quello esagonale per il titanio.

**CUBICO:**  $8(1/8) = 1$



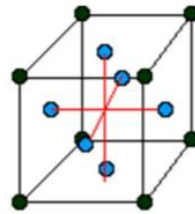
simple cubic

**CCC:**  $8(1/8) + 1 = 2$   
Cubico a Corpo Centrato



body centered cubic (bcc)

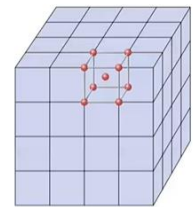
**FCC:**  $8(1/8) + 6(1/2) = 4$   
Cubico a Facce Centrate



face centered cubic (fcc)

Ci interessa sapere come è la distribuzione degli atomi all'interno della struttura. Quanti atomi sono proprietari della singola cella?

1. 1 atomo proprietario
2. 2 atomi proprietari: un atomo al centro, poi ciascun atomo ai bordi è condiviso con le altre celle, quindi per ogni cella ogni atomo contribuisce per 1/8.
3. 4 atomi proprietari: gli atomi sono sulle facce e sono per metà appartenenti a un reticolo e per l'altra metà appartenenti ad un altro reticolo.



Questo è importante perché quando facciamo trasformazioni allotropiche prendiamo un metallo e lo scaldiamo (modifichiamo la sua energia), si passa da una struttura all'altra molto velocemente ristabilendo equilibrio energetico. A livello nanometrico c'è un cambio di configurazione totale.

- Cubica a corpo centrato
  - lunghezza del lato:  $\frac{4R}{\sqrt{3}}$
  - fattore di compattazione: 0,68
  - numero di coordinazione: 8
  - atomi per cella unitaria: 2
  - materiali di interesse: cromo, molibdeno, ferro, tungsteno
- Cubico a facce centrate
  - lunghezza del lato:  $\frac{4R}{\sqrt{2}}$
  - fattore di compattazione: 0,74
  - numero di coordinazione: 12
  - atomi per cella unitaria: 4
  - materiali di interesse: rame, alluminio, argento, oro.
- esagonale compatto
  - lunghezza del lato:  $\frac{c}{1,6333}$
  - fattore di compattazione: 0,74
  - numero di coordinazione: 12
  - atomi per cella unitaria: 6
  - materiali di interesse: cadmio, magnesio, titanio, zinco.

Le proprietà funzionali dei materiali possono o non possono essere dipendenti dalla struttura:

- temperatura di fusione
- massa volumica
- calore specifico
- coefficiente di dilatazione (CTE): come risponde in termini di dilatazione termica un materiale

Meno sensibili alle condizioni della struttura.

- tensione di snervamento
- resistenza alla rottura
- resistenza allo scorrimento a caldo
- duttilità
- conducibilità elettrica

Più sensibili alle condizioni della struttura: le proprietà meccaniche e le proprietà elettriche generalmente richiedono materiali diversi.



Vediamo un'immagine metallografica della microstruttura.

Ciò che si vede sono i grani: i grani di un materiale sono il risultato della solidificazione.

Il materiale metallico viene realizzato attraverso varie tecnologie, ma in ogni caso si parte dalla fusione del materiale e dalla sua colata. La realizzazione della protesi ovviamente non avviene per colatura, ma avviene per lavorazione meccanica di un semi-elaborato che arriva dalla fonderia. Bisogna, quindi, curare la nano e microstruttura del materiale, non si può fare tagliando ogni pezzo direttamente, ma occorre organizzare la produzione in termini di qualità, qualità del prodotto finale. Bisogna avere il controllo di tutti gli aspetti e di tutti i passaggi che portano all'oggetto finale: esistono delle norme per la progettazione che forniscono uno standard riconosciuto, al quale il produttore fa fede. Non fanno riferimento alle norme i ricercatori o chi fa modelli, un ingegnere sì, perché se non lo fa progetta un oggetto non normabile e quindi non accettato dal mercato. Bisogna, inoltre, accertarsi che il materiale sia di prima qualità: come detto bisogna analizzare ogni step ed ogni aspetto della produzione.



#### Come si ottiene un metallo?

Il metallo giunge sotto forma di ossido o carbonato, e quindi sottoforma di un minerale, lo si porta in altoforno dove deve essere riscaldato in modo da ottenere materiale metallico, eliminare la scoria.

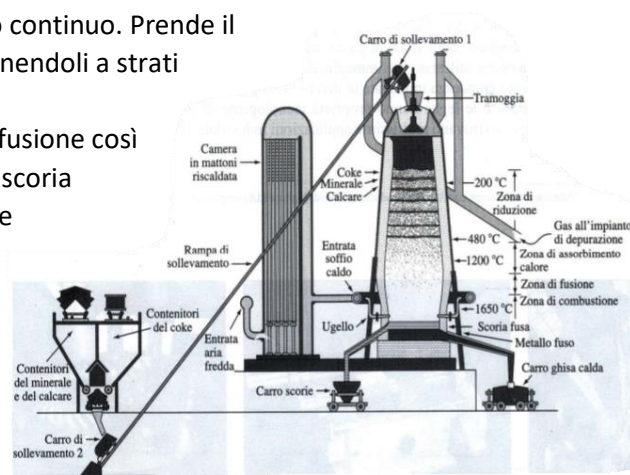
La generica relazione è del tipo:  $MeO + CO = Me + CO_2$

La conoscenza della provenienza del materiale è indispensabile: noi possiamo prendere un materiale valido, farci un'ottima protesi, ma se il prodotto è stato fuso male o è stato inquinato da qualche altro riciclo di materiale che è stato messo in altoforno, la qualità del prodotto è persa in partenza. Dalla materia prima si arriva al materiale desiderato attraverso una serie di step di metallurgia e trattamenti di raffinazione che trasformano il materiale grezzo in materiale raffinato. Ci sono quindi molti passaggi nei quali un possibile inquinamento potrebbe inficiare la qualità del materiale. Bisogna SEMPRE controllare la qualità del materiale.

#### Come funziona un altoforno?

Un altoforno è una macchina a funzionamento continuo. Prende il minerale, lo carica insieme a calcare e coke ponendoli a strati alternati, in questo modo il sistema si scalda automaticamente e si arriva a temperatura di fusione così da separare il materiale fuso da una parte e la scoria dall'altra; ciò che si ottiene è la ghisa (è sempre presente nel metallo di base una parte di carbonio, ad esempio nell'inox).

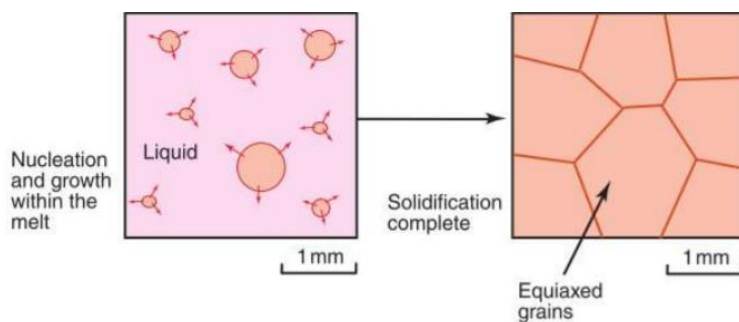
Un altoforno, una volta acceso, lo si tiene acceso finché non si smonta perché al suo interno la gradiente termico (tra i 200°C e i 1600 °C) è talmente elevata da provocare dilatazioni le quali, col raffreddamento, provocherebbero crepe e di conseguenza un'ipotetica seconda accensione del macchinario implicherebbe la sua implosione.



Il materiale appena colato è un materiale impuro e da qui parte un processo di raffinazione: processo molto importante perché l'inquinamento del materiale è qualcosa che viene da lontano; è un processo molto importante anche perché dopo la prima colata il materiale subirà una serie di raffreddamenti e riscaldamenti, ciascuno dei quali applicherà una serie di auto-tensioni al materiale (il materiale porta con sé la storia della tecnologia che lo ha prodotto).

Il primo passaggio della qualità è andare a vedere come è avvenuta la colata e come è avvenuto il raffreddamento.

È possibile riuscire a eliminare quasi completamente ogni tensione, se non vediamo niente vuol dire che il materiale è stato sottoposto a un trattamento di "ricottura" tale da annullare ogni tensione. Tramite il raffreddamento si ha il passaggio dal parte fluida di un materiale metallico alla parte solida. In questo processo avvengono delle trasformazioni termiche della struttura tali per cui se noi non controlliamo questo passaggio otteniamo una microstruttura (cioè quello che abbiamo visto nella sezione della protesi) con dei grani ingestibili. Quindi, il primo passo della qualità è andare a vedere come è stato colato e raffreddato il materiale. La qualità ha un prezzo, quindi bisogna stare attenti a prendere un oggetto che costa meno perché potrebbe avere una qualità minore.



Processo di raffreddamento: il raffreddamento di una lega metallica avviene per discontinuità di energia, si dice per nucleazione: quando il metallo fuso tocca la superficie dello stampo avviene uno scambio energetico (lo stampo viene portato in temperatura precedentemente, non c'è uno

shock, ma c'è comunque una discontinuità energetica) e il metallo passa dallo stato liquido allo stato solido creando una microstruttura di granuli. La forma dei grani ci dice come è stato raffreddato il materiale.

Se il materiale non ha subito shock termici, e quindi è stato raffreddato correttamente, i grani sono simmetrici e regolari: il materiale ha avuto tempo di disperdere energia.

Può accadere di avere una crescita colonnare: il  $\Delta$  energetico tra la superficie dello stampo e il materiale è elevato, quindi quando il liquido tocca il solido, immediatamente viene asportata energia al materiale fuso che ha quindi subito un raffreddamento a gradiente del movimento di energia (raffreddamento veloce).

Perciò la microstruttura dei metalli è a grani perché la nucleazione del raffreddamento produce isole che si espandono progressivamente fino a creare dei domini -> questo è il motivo per cui il materiale metallico è detto policristallino: ha molti domini interni (non c'è un singolo cristallo).

Dalla nucleazione abbiamo un progressivo sviluppo di grani in accrescimento, i quali, ad un certo punto, si toccheranno gli uni con gli altri e si creeranno quindi delle zone di confine dette "bordo di grani": costituisce il bordo dei grani.

