

Appunti di Metallurgia e Materiali non Metallici

Mattia Ruffini

Febbraio 2022

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Classificazione dei materiali	3
1.2	Alcuni cenni storici	4
2	Metallurgia	5
2.1	Fisica dei Metalli	6
3	Reticoli di Bravais	8
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
4	Proprietà meccaniche	16
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

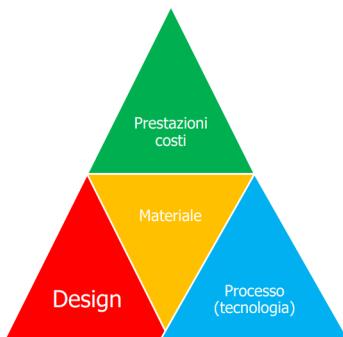
5 Prove Meccaniche	30
5.1 Prova di Trazione Uniassiale	30
5.2 Durezza	33
5.2.1 HB (Brinell)	33
5.2.2 (HV) Prova Vickers	34
5.3 (HR) Prova Rockwell	35
6 Diagrammi di stato	37
6.1 Orizzontale eutettica	40
6.2 Orizzontale peritettica	41
7 Elementi solubili nel ferro	43
7.1 Diagrammi ternari	45
7.2 Composizione per alcuni acciai	46
7.3 Trattamenti termici	47
8 Solidificazione	48
8.1 Microsegregazione, macrosegregazione, omogeneizzazione . . .	50
9 Trasformazioni di fase	51
9.1 Se il solido è lamellare	53
9.2 Martensite	54
10 Curve di Bain	56
10.1 Curve T.T.T. (Trasformazione Temperatura Tempo)	56
10.1.1 Altri tipi di acciai	57
10.1.2 Altri elementi nella lega	57
10.2 Curve anisoterme	58
11 Altre prove meccaniche	61
11.1 Prova di Charpy o di resilienza	61
11.2 Fatica	63

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.

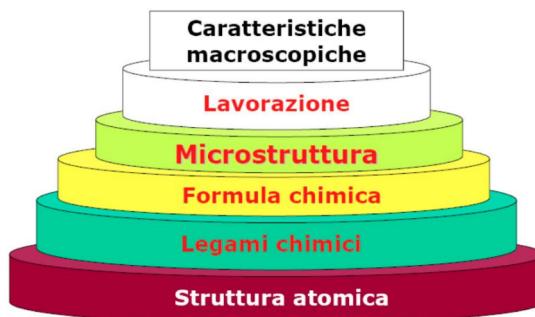
Capitolo 2

Metallurgia

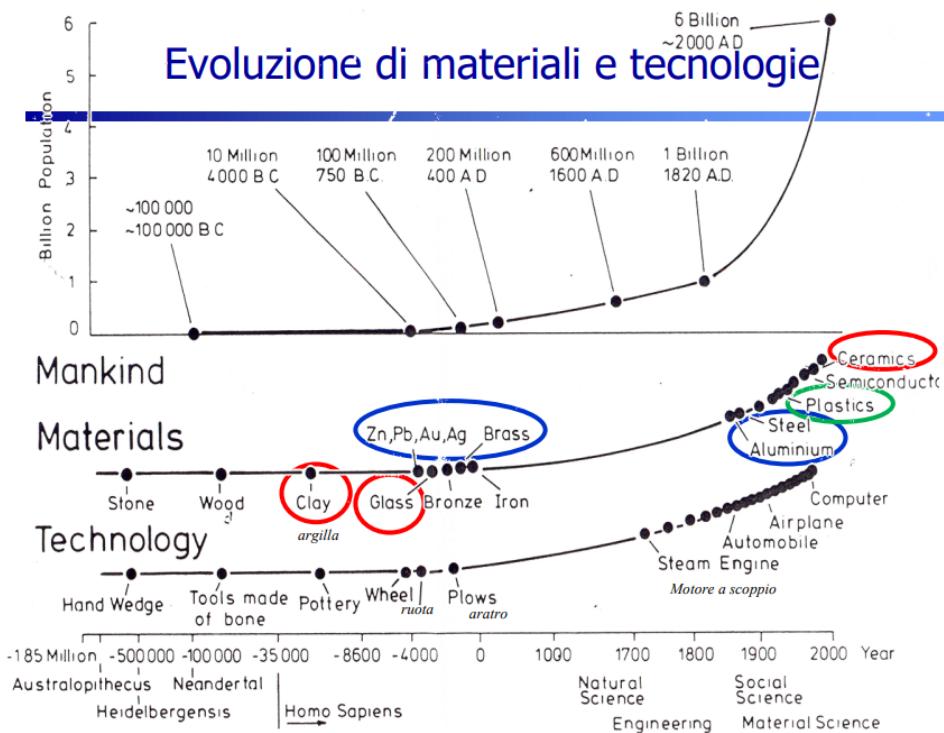
La metallurgia **studia i metalli e le loro caratteristiche/applicazioni.** Esistono tre tipi di metallurgia:

- 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:

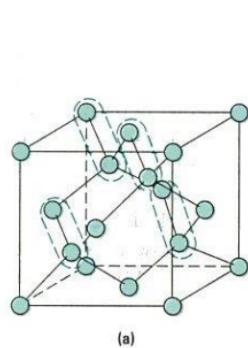
- legame ionico;
- legame covalente;
- legame metallico;

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.

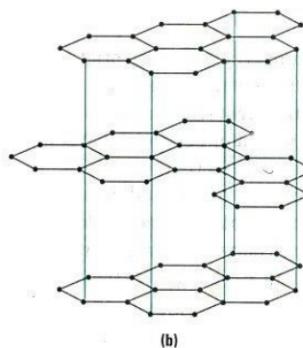
Nel legame ionico invece gli atomi sono cariche elettricamente, e si dispongono in modo da minimizzare l'energia del reticolo ionico: ogni ione è circondato da ioni di carica opposta. Per questo motivo il solido ionico non conduce la corrente elettrica e nemmeno il colore. Tuttavia ha una grande resistenza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



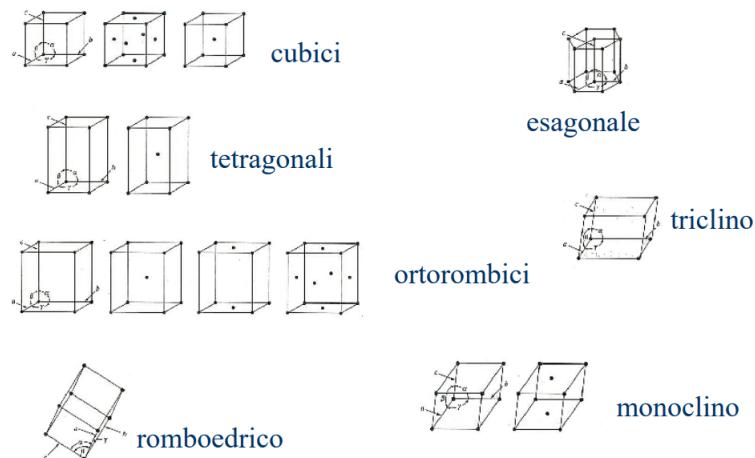
Grafite

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:



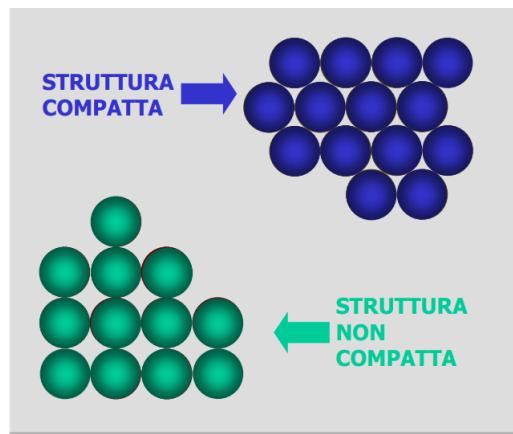
Le geometrie sono solamente 14 perchè gli atomi tendono alla struttura che minimizza l'energia interna del sistema, e l'energia ha un ordine a corto raggio. Ecco la definizione di reticolo ideale: **"in un reticolo l'intorno di ogni punto deve essere identico"**. La struttura di un reticolo quindi è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

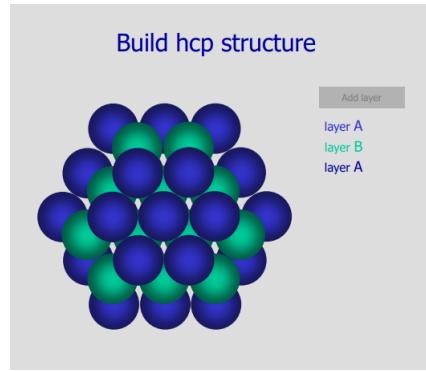
3.1 Reticoli compatti

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**.

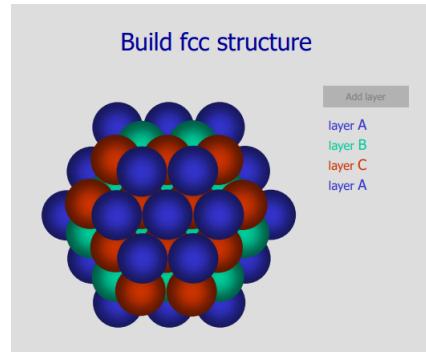


La struttura compatta è la struttura **con il massimo grado di occupazione nello spazio**. Banalmente per decidere quale solido è più compatto basta osservare quante sfere sono a contatto con le altre.

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



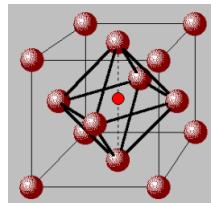
struttura del cubico a facce centrate Procediamo nel medesimo modo per quello esagonale compatto.



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 .

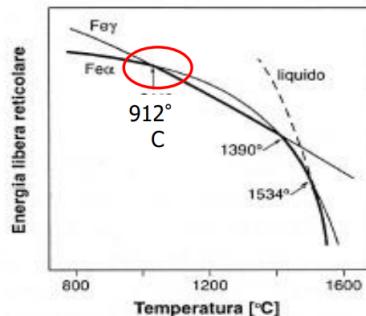
La lacuna più grande si trova nel reticolo con il grado di occupazione più alto, ovvero nel CFC, e in particolare è nel centro del cubo. La lacuna maggiore non è nel CCC perché le lacune sono equi-disposte tra di loro.



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.



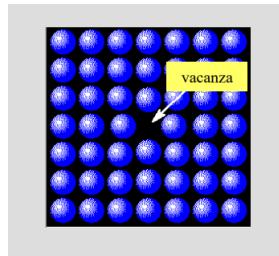
Il ferro dai 912 gradi ha un reticolo CFC, ed è detto Ferro γ , mentre al di spora dei 1290 gradi ha un reticolo CCC ed è chiamato Ferro α . Cambiando il suo reticolo, il ferro **cambia la sua predisposizione ad accettare altri elementi esterni**. Le lacune possono essere misurate a T costante, perché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

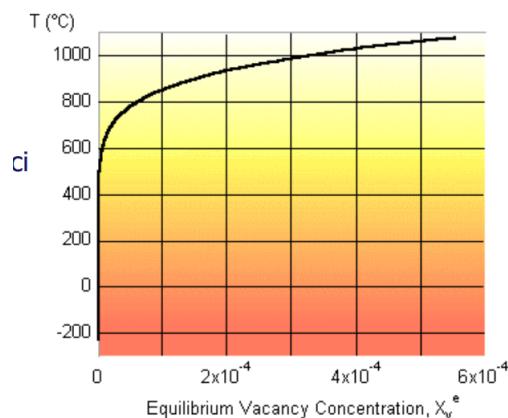
Vacanze Per vacanze si intende un posizione reticolare che dovrebbe essere ricoperta da un atomo per rispettare la definizione non è rispettata. Manca un atomo, che genera uno spazio vuoto **più grande delle lacune**. Le vacanze sono i difetti di punto più presenti. All'aumentare della T le vacanze aumentano,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



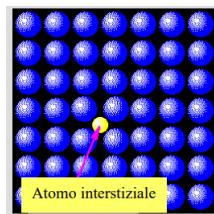
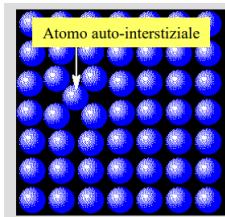
La legge che indica il numero di vacanze in funzione della temperatura è la seguente:

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

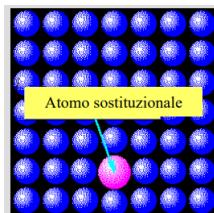
dove k è la costante di Boltzmann, N è il numero totale dei siti atomici e Q_v è l'energia di formazione.



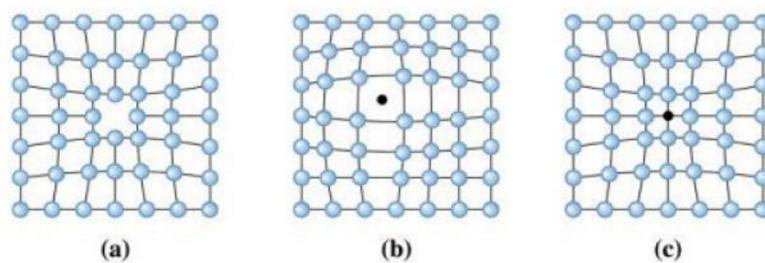
Atomi auto-interstiziali Sono atomi che si inseriscono nelle lacune di un reticolo. E' più probabile che le lacune possano essere riempite da atomi di specie diverse da quelle del reticolo (**atomi interstiziali**).



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:

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

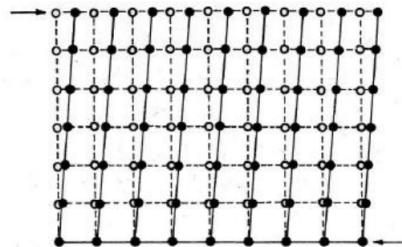
Inoltre la trazione e la compressione sono chiamate con σ_T, σ_P , mentre le sollecitazioni non assiali sono denominate con la lettera greca τ . Si può calcolare nelle forze di trazione e compressione la deformazione di un solido:

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

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.

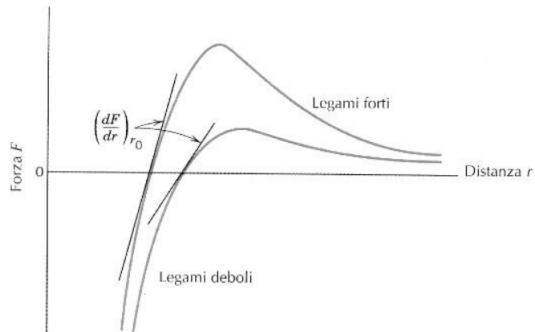
La deformazione ϵ di un materiale è legata allo sforzo σ dalla **Legge di Hooke**:

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

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, **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 :

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

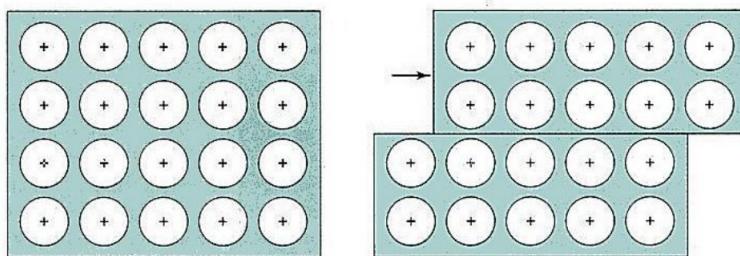
quindi il modulo di Young è il coefficiente angolare della retta tangente alla curva della forza di legame in funzione della distanza:



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

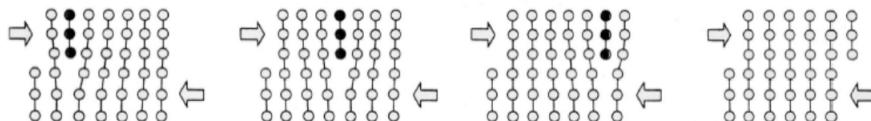
4.2 Deformazione plastica

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.



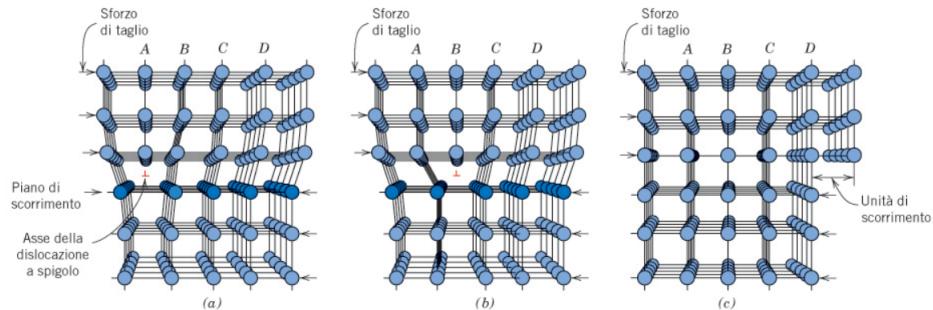
Un materiale metallico **si deforma senza rottura** (cosa che avviene nei materiali ceramici) **perchè l'intorno di ogni punto è identico**. Affinchè si verifichi una deformazione plastica ogni legame ei piani di un reticolo si rompono e successivamente si riformano. Tuttavia sperimentalmente si osserva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



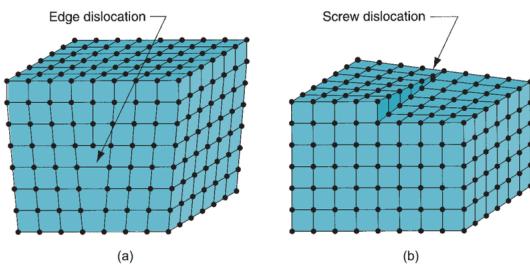
Questi difetti del reticolo che vengono "aggiustati" sono chiamati **difetti lineari**, dove la linea è la proiezione del semipiano "in più". Sono delle **dislocazioni**. Quando il semipiano arriva a bordo cristallo si ha la deformazione del solido, e la rottura dei legami del cristallo avviene in corrispondenza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

4.3 Dislocazioni

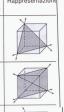
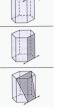


Le dislocazioni sono responsabili della deformazione meccanica. Sono linee di imperfezioni nel cristallo introdotte durante la solidificazione o quando il materiale è deformato permanentemente. Macroscopicamente la deformazione è **omogenea** ma microscopicamente **disomogenea**: banalmente ad occhio 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 ;

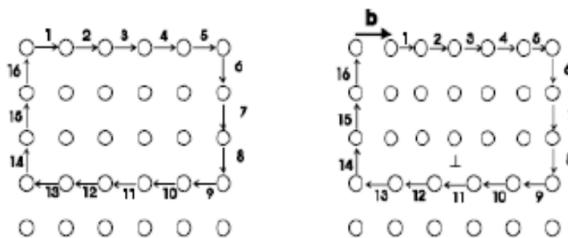


Le dislocazioni possono essere utili durante la lavorazione del materiale, ma anche da evitare quando il pezzo è finito, in quanto possono causare la deformazione del materiale.

Reticolo	Metalli	Piani d'ocombinazione	Dimensioni di ocombinazione	Numero dei sistemi di ocombinazione	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

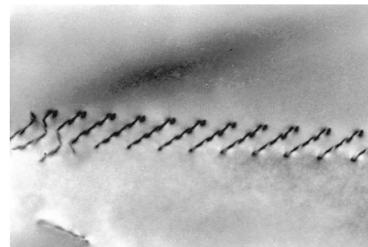
Vettori di Burgers Nel modello fisico le dislocazioni sono associate ad un vettore detto **vettore di Burgers**. Questo vettore si trova paragonando il reticolo perfetto con uno con una dislocazione, e disegnando il **circuito di Burgers**.



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

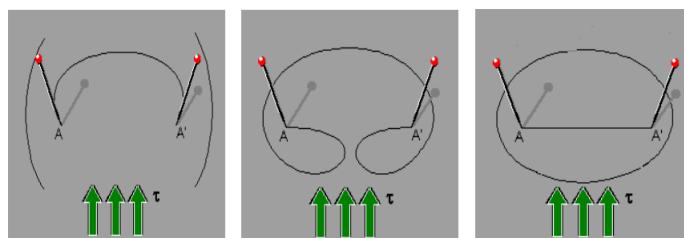
Sorgenti di Frank e Reed Quanto misuro il numero di dislocazioni per centimetro quadrato queste sono tra 10^4 e 10^6 . Per spiegare la facilità della deformazione si ha bisogno di un numero tra 10^{10} e 10^{11} di dislocazioni.



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.

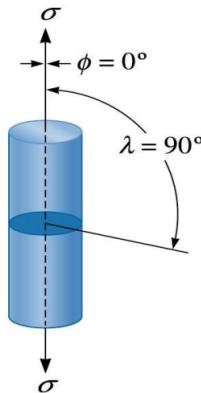
1. La dislocazione inizialmente è rettilinea;
2. La dislocazione è sottoposta ad una sollecitazione ortogonale ad essa, inizia ad incurvarsi in quanto non esiste una posizione di equilibrio stabile per essa;
3. Quando la dislocazione raggiunge il punto critico ha una forma circolare che si espande. Una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



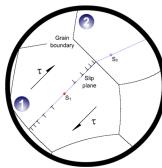
Materiale monocristallino Un materiale cristallino si forma quando nel fuso di un metallo è presente un germe solido, e durante il raffreddamento devo controllare che sia solo uno il cristallo che si vada a formare. Il cilindretto è formato in modo che i **piani di massima compattazione siano ortogonali 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**.



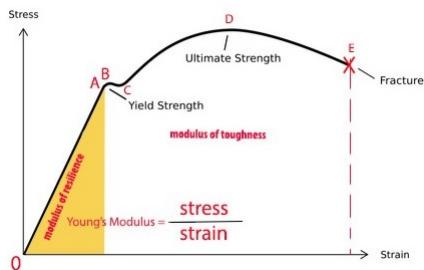
In questo movimento le dislocazioni **si spostano fino ai bordi di grano**. Poichè le dislocazioni dello stesso segno tendono a respingersi, si crea un **campo di sforzo** causato dalle dislocazioni nel bordo di grano. Contemporaneamente potrebbe accadere che quando le dislocazioni di un cristallo si 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;

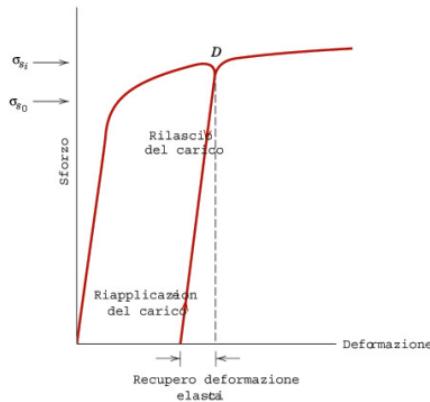
L'operazione di ricottura è abbastanza complessa, ed è suddivisa in tre stadi.

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.

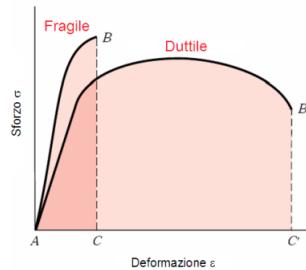
E' un tipo di applicazione utile nei metalli puri o in alcune leghe monofasiche come gli acciai inossidabili austentici.

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

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.

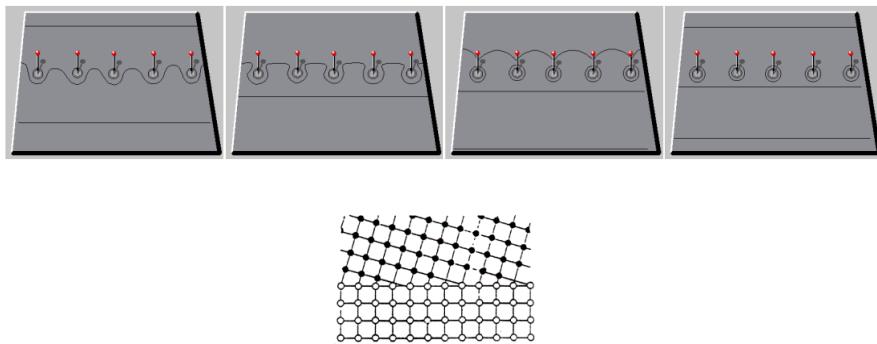
Tra atomo in posizione interstiziale e l'atomo sostituzionale, **sono i primi a rafforzare maggiormente il metallo, in quanto deformato maggiormente il reticolo**.

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.

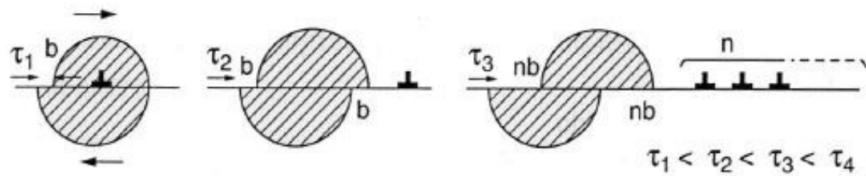
4.7.1 Rafforzamento da particelle incoerenti

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.



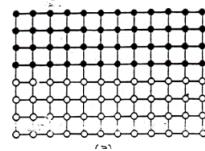
4.7.3 Rafforzamento da particelle semi-coerenti

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 σ_{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** (σ/ϵ). 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.

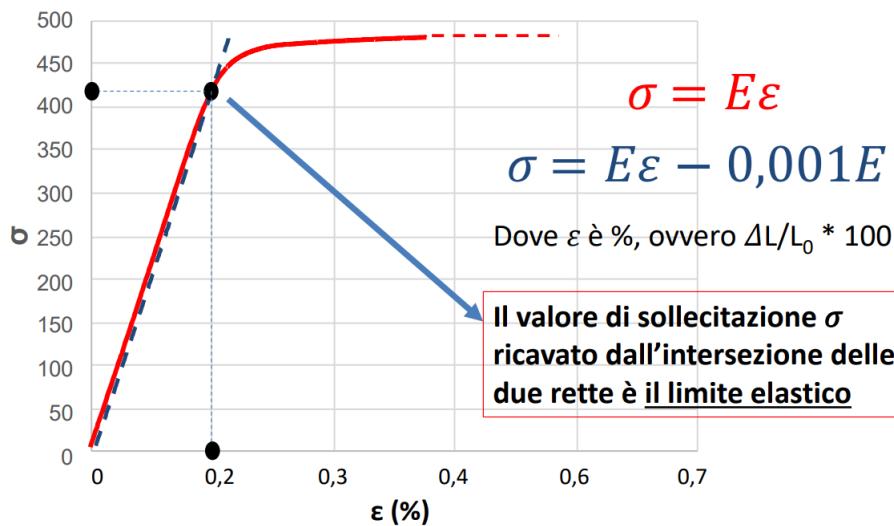
Dal punto di vista pratico bisogna rimanere nelle grandi deformazioni, perchè alla strizione il materiale è come se fosse già rotto.

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

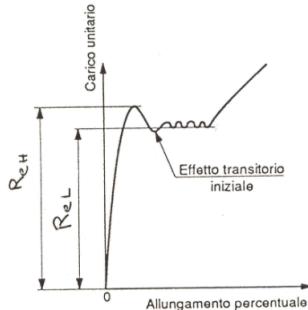
$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (5.1)$$

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**.

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

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

5.2 Durezza

La durezza è una caratteristica fondamentale del materiale. E' interpretabile dall'utilizzatore. La durezza è definita come **la resistenza di un materiale alla penetrazione**. La durezza influenza la resistenza a **incisioni, tagli, corrosione e all'usura**. La durezza maggiore è quella del diamante, la minore quella del talco.

Per trovare la durezza di un materiale esistono di versi tipi di prove come *rimbalzo, taglio, abrasione, erosione, smorzamento ecc*, tuttavia le più importanti sono quelle **statiche**, a causa della loro velocità di impiego e affidabilità. Esistono tre tipi diversi di prove statiche: **Brinell, Vickers, Rockwell**. Sono diverse per il loro tipo di **penetratore**, le **condizioni** e il **tipo di misura**.

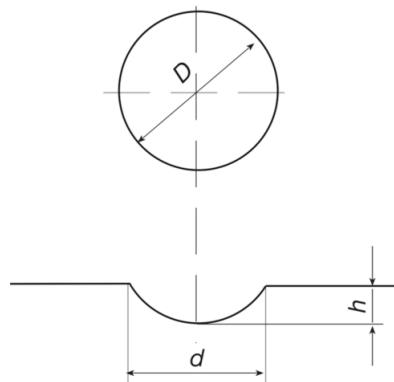
5.2.1 HB (Brinell)

Nella prova Brinell si utilizza un penetratore di tipo **sferico in acciaio indurito o carburo di tungsteno**. La prova HB non è fatta per materiali molto duri, anche a causa della forma del penetratore. Nella prova HB si misura sulla superficie testata il diametro dell'impronta lasciata dal penetratore.

Il diametro del puntatore è solitamente da 1, 2, 5, 10mm. Il carico va dai 300 – 500kg, con un tempo dai dieci/trenta secondi.

In generale si considera una prova ben considerata se

$$0.25D < d0.50D$$



Inoltre il valore della durezza è dato da:

$$HB = \frac{2F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}\right)} \quad (5.4)$$

$$HB = 0.102 \cdot \frac{2F}{\pi D^2 \left(1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{D^2}}\right)} \quad (5.5)$$

dove la prima se F è in kg, la seconda se F è in Newton.

In generale si ha che

$$0.102 \cdot \frac{F}{D^2} = \text{cost} \quad (5.6)$$

questa costante dipende dal materiale. Per esempio 30 per il ferro, 10 per il rame.

Secondo la norma **UNI EN ISO 6506-1** lo spessore del materiale deve essere almeno 8 volte l'altezza dell'impronta lasciata dalla sfera, altrimenti entrano in gioco fenomeni come le dislocazioni che modificano la durezza. Per la durezza HB (**gli acciai**) inoltre vale che:

$$R_m = 3.3H_b \quad (5.7)$$

La prova di Brinell è semplice e affidabile, ma è distruttiva e non c'è una proporzionalità tra penetratori con un diametro diverso. E' necessario un lettore 20x per leggere il diametro dell'impronta.

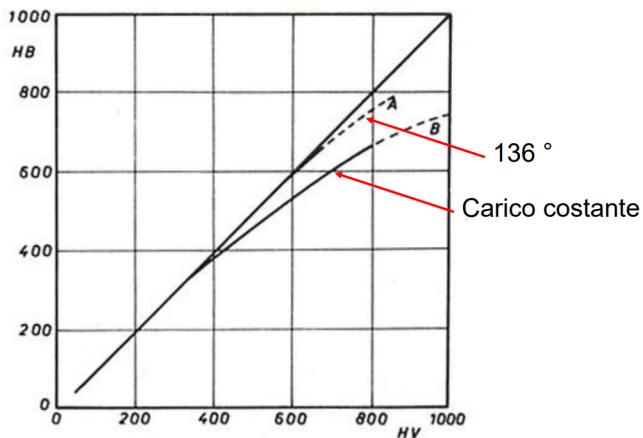
5.2.2 (HV) Prova Vickers

E' utilizzata per materiali più duri rispetto quelli testati dalla prova Brinell. Il penetratore è a **piramide con base quadrata**. L'angolo interno della

piramide deve essere di 136 gradi. Si misura sulla superficie del materiale la distanza:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (5.8)$$

cioè la media delle due diagonali. La prova Vickers può essere utilizzata per misurare la **microdurezza**, ovvero la durezza di materiali che hanno due fasi differenti. E' normata dalla norma **UNI EN ISO 6507-1** che indica in base a quale materiale deve essere lo spessore del campione. Fino a una durezza di 500 HB e 500 HV le due prove si equiparano. Oltre la precisione della HV è maggiore.



E' definita come:

$$HB = 1.854 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (5.9)$$

$$HB = 0.102 \cdot 1.854 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (5.10)$$

La prova Vickers è non distruttiva e molto precisa, ma risente delle eterogeneità nel materiale, ed è necessario un lettore fino a 100x per leggere le diagonali dell'impronta.

5.3 (HR) Prova Rockwell

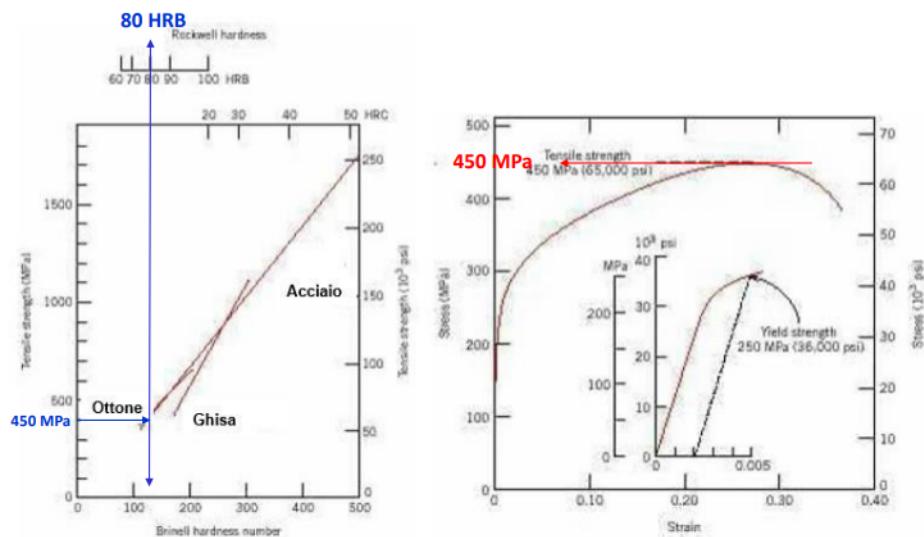
La prova Rockwell misura la penetrazione di una punta, dato un carico. La Rockwell si divide in sotto categorie per quanto riguarda il materiale del penetratore e la sua geometria. Inoltre, per materiali ruvidi, bisogna applicare un **pre-carico**, in modo che il puntatore lavori correttamente, e non scivoli/storti. La *h* che misuriamo è importante perché **tiene conto del**

ritorno elastico del materiale, dunque misura solamente deformazioni plastiche. La Rockwell sebbene sia molto veloce è poco precisa. E' calcolata come:

$$HR = N - \frac{h}{S} \quad (5.11)$$

dove N è una costante definita dalla norma, h è la profondità dell'impronta, S è il ritorno elastico.

E' normata dalla norma **UNI EN ISO 6508-1**, per prove Rockwell ti scala A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T. La Rockwell è una prova non distruttiva.



Esempio di lettura sforzo/deformazione e durezza

Capitolo 6

Diagrammi di stato

Si definisce una **soluzione solida** un metallo con all'interno del reticolo cristallino atomi di un'altra specie. Gli atomi possono essere sostituzionali o interstiziali. I diagrammi di stato lavorano per approssimazioni abbastanza pesanti, che tuttavia funzionano e non discostano troppo dal modello reale.

Un diagramma di stato **rappresenta un sistema chimico come se fosse isolato, e sono la rappresentazione grafica delle fasi di un sistema in equilibrio**. In particolare noi studiamo i diagrammi di metalli con due fasi, cioè **diagrammi di fase binari**. I diagrammi binari permettono una rappresentazione grafica bidimensionale di quello che accade.

Attraverso i diagrammi di stato è possibile:

- Osservare la temperatura di massima solubilità allo stato solido;
- Temperatura di solidificazione;
- Fasi presenti al variare della composizione chimica e della temperatura;

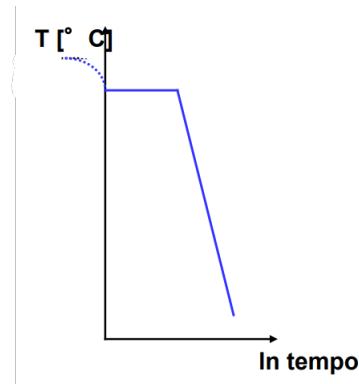
Fase Una fase è una porzione di sistema chimico con **le stesse proprietà meccaniche, composizione e stato di aggregazione**. Inoltre si definisce **varianza del sistema** come i gradi di libertà del sistema disponibili.

Regola della varianza La varianza di un sistema equivale al numero di elementi presenti nel sistema più il numero di fattori fisici efficienti (pressione e temperatura) e stato di aggregazione.

$$V = C_i + m - f \tag{6.1}$$

In questo corso la pressione non è considerata come fattore fisico efficiente, dunque il numero equivale a 1 (solo la temperatura). La varianza indica quanto il sistema si può muovere **rimanendo nella stessa fase**.

per determinare cosa accade se alcuni atomi di B (un ipotetico metallo) sono in A, si vede come cambiano le fasi al variare della temperatura al variare della concentrazione di B in A. Prendiamo in considerazione il seguente grafico della temperatura inf funzione del $\log T$ di un metallo puro.

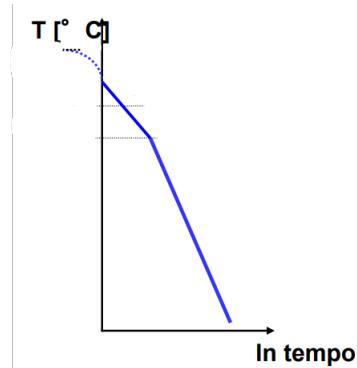


Essendo il metallo puro prima che il solido si solidifichi la temperatura rimane costante per un certo periodo in modo tale che nel metallo ci siano solo cristalli solidi. Dividiamo le tre "spezzate del grafico" da sinistra a destra in *a*, *b*, *c*. Allora si avrà:

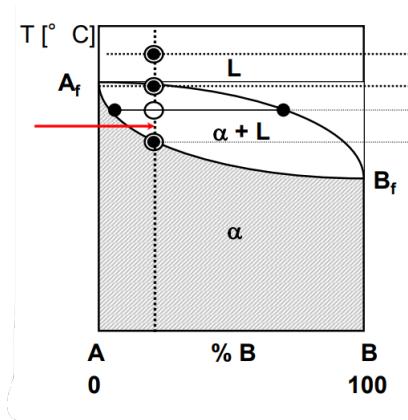
$$\begin{aligned}v_a &= 1 + 1 - 1 = 0 \\V_b &= 1 + 1 - 2 = 0 \\v_c &= 1 + 1 - 1 = 0\end{aligned}$$

Si osserva che nel tratto *b* la varianza è nulla, quindi non posso cambiare la temperatura in quel tratto, il sistema deve essere completamente solido o completamente liquido. Nei tratti *a* e *c* la varianza è 1, cioè il sistema ha un grado di libertà del sistema, cioè cambiando la temperatura il sistema rimane o liquido o solido.

Se cambiamo la concentrazione di B in A, allora



nel tratto *b* si avrebbe una varianza $V_b = 2 + 1 - 1 = 1$ ovvero il sistema ha un grado di libertà. Sperimentalmente si osserva che **più è alta la percentuale di B in A minore sarà la temperatura di fusione e raffreddamento**. Per costruire un diagramma di fase si prendono i punti di inizio e fine fusione o solidificazione e si crea un diagramma della temperatura in funzione della concentrazione.



In questo diagramma la linea superiore è chiamata **liquidus** e quella inferiore **solidus**. In questo caso poiché al di sotto del solidus la soluzione solida esiste per ogni concentrazione o temperatura si ha un diagramma di **completa miscibilità di B in A**.

Si noti che all'interno della regione tra solidus e liquidus si hanno contemporaneamente due fasi: una parte liquida e una parte solida. Per calcolare la quantità si lega in fase liquida e in fase solida si usa la **regola della leva**.

Regola della leva

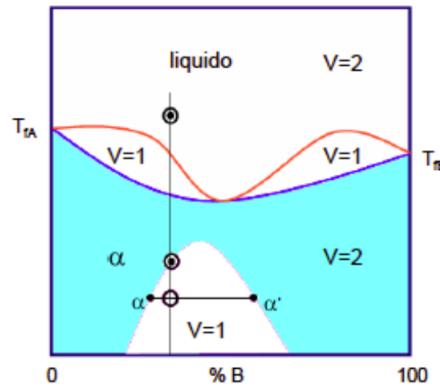
$$\begin{cases} q_s + q_l = 100\% \\ q_l \cdot c_l + q_s \cdot c_s = 100\% \cdot c_m \end{cases} \quad (6.2)$$

con c_m concentrazione media. Infine si avrà:

$$q_s = \frac{c_l - c_m}{c_l - c_s} \quad (6.3)$$

$$q_l = \frac{c_m - c_s}{c_l - c_s} \quad (6.4)$$

Esistono poi casi specifici di **parziale miscibilità**.

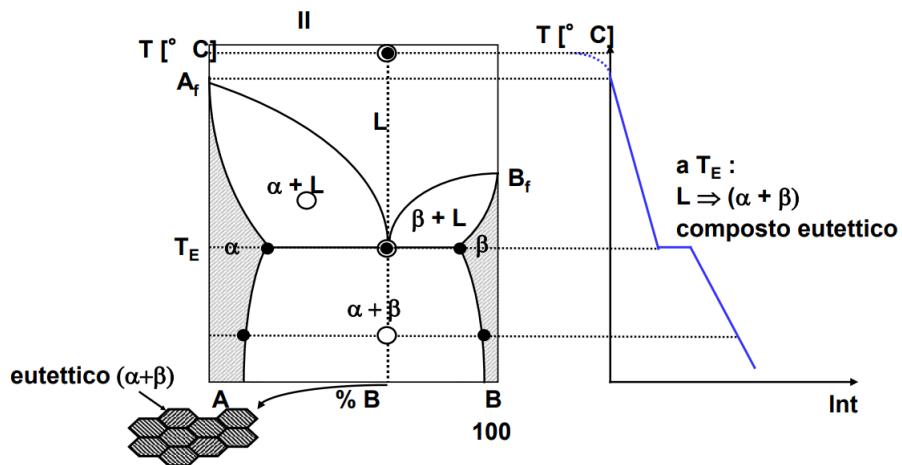


6.1 Orizzontale eutettica

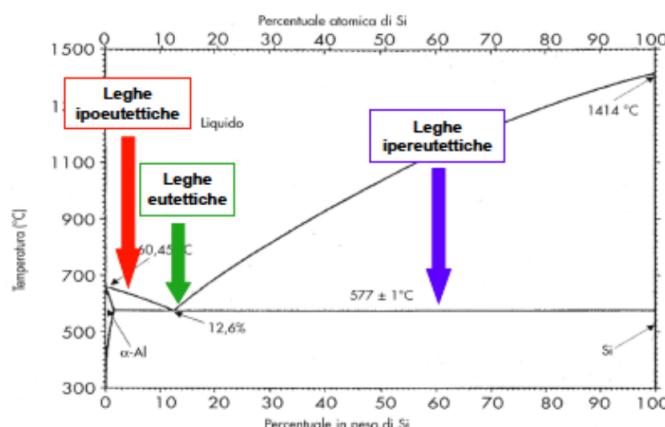
Sull'orizzontale eutettica la varianza è nulla, cioè è un punto di invarianza del sistema. Se scelgo una traiettoria di raffreddamento lungo la linea del punto eutettico si ha la nucleazione di cristalli sia di A che di B, cioè si formano cristalli della fase α che di β . I solidi hanno due fasi diverse che tendono a respingersi, a separarsi. Ma non possono dividersi per lunghe distanze. Dunque si formano delle lamelle di α e di β che compongono il solido.

Si definisce **costituente strutturale** un solido con simile stato di aggregazione, stesse proprietà meccaniche ma non necessariamente omogeneo. Se il solido è omogeneo è una fase.

- Se siamo a sinistra del punto eutettico si avrà la nucleazione di cristalli α ed eutettico;

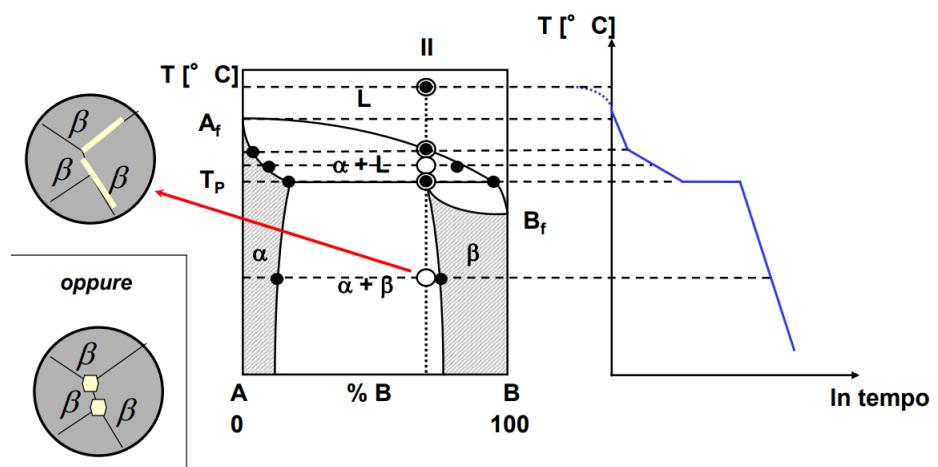


- Se siamo a destra del punto eutettico si avrà la nucleazione di cristalli β ed eutettico;
- Se siamo nel punto eutettico invece si ha un soildo eutettico;



6.2 Orizzontale peritettica

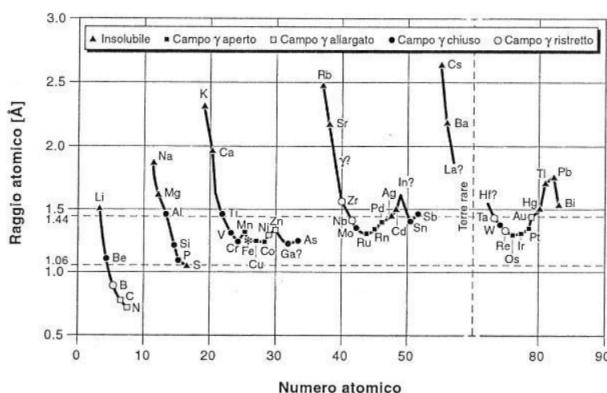
Nei diagrammi peritettici si ha all'inizio la formazione di un solo cristallo, poi l'altro inizia a precipitare. I cristalli della seconda fase non possono nucleare, ma si posizionano come precipitato attorno ai grani. Queste regioni si chiamano di smiscelamento.



Capitolo 7

Elementi solubili nel ferro

Non tutti gli elementi sono solubili nel ferro allo stesso modo, in particolare per ogni elemento cambiano le quantità di soluzioni solide che sono possibili, dando campi più o meno estesi di soluzioni solide per sostituzione con il ferro. In particolare il ferro ha di media un raggio atomico medio di 1.25 \AA , e il range di accettabilità è entro il $\pm 15\%$.



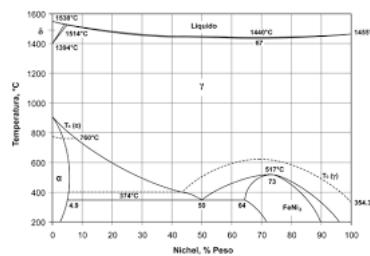
come si vede dal grafico tutti gli atomi che rientrano nella fascia danno luogo a campi estesi per sostituzione, mentre gli altri o sono insolubili, o come carbonio e azoto formano soluzioni solide interstiziali. In genere vale la regola per cui atomi con un reticolo CCC (Ferro α) o con un reticolo CFC (Ferro γ) con il ferro permettono la formazioni di estesi campi di soluzioni solide.

Punti critici dei diagrammi di stato

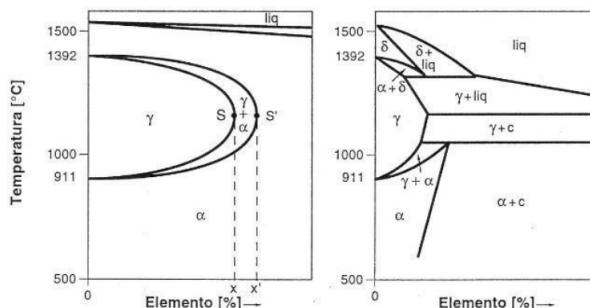
- A_3 , corrisponde al punto critico con $T = 912^\circ\text{C}$. Fino al punto A_3 è stabile il ferro α ;

- A_4 , corrisponde al punto critico con $T = 1394^\circ C$. Tra il punto A_3 e A_4 è presente il ferro γ ;

Elementi che allargano il campo γ In questo caso, quando questo tipo di elementi è nella soluzione si ha un innalzamento di A_4 e un abbassamento di A_3 . Aumenta la distanza tra i punti critici e dunque la percentuale di ferro γ nella soluzione. Si dice che il campo γ è **aperto** se il campo si allarga in **modo illimitato**. Altrimenti se aumenta ma in modo limitato si dice solamente **allargato**.

Campo γ aperto

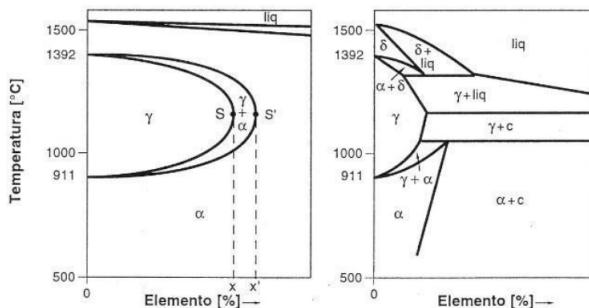
Questo avviene quando gli elementi sono Ni, Mn, Co, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt. Sono tutti elementi **con un fattore geometrico favorevole**. Invece il campo γ è allargato per elementi tra questi: C, N, Cu, Zn, Au.

A sinistra un campo γ aperto, a destra allargato

Elementi che restringono il campo γ Sono elementi che abbassano il punto A_4 e innalzano il punto critico A_3 . Questi elementi fanno sì che il campo γ si riduca fino a chiudersi. Esistono elementi che rendono il campo γ un campo **ristretto quando questo è racchiuso da campi a equilibrio eterogeneo**. Gli elementi che in soluzione causano questa modifica sono

pochi: B, S, Zr, Nb, Ce, O, Ta.

Quando il campo γ è **chiuso** da una linea di equilibrio con un campo di cristalli omogenei. Gli elementi di questo tipo di soluzioni sono: Be, Al, Si, P, Ti, V, Cr, As, Mo, Sn, Sb, W.



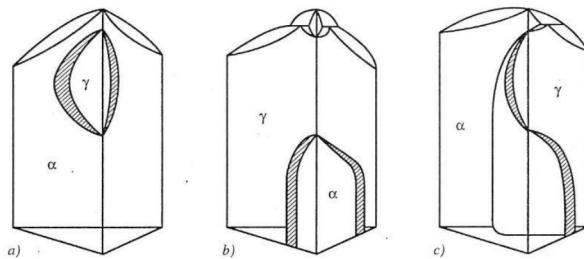
A sinistra un campo γ chiuso, a destra ristretto

7.1 Diagrammi ternari

In modo analogo ai casi precedenti con un elemento aggiunto, quando se ne aggiungono tre allora si possono avere i seguenti casi:

1. Entrambi gli elementi allargano il campo di γ , quindi il campo di α è limitato allo spigolo del ferro, per basse temperature;
2. Entrambi gli elementi restringono γ , che è limitato nella parte alta dello spigolo del ferro;
3. Uno degli elementi produce un effetto e l'altro l'opposto. Si ha un andamento complesso formato dalla combinazione dei due diagrammi binari;

I diagrammi di stato ternari sono utili in alcuni casi per comprendere alcuni trattamenti termici degli acciai, ovvero quando al ferro sono aggiunti cromo e nichel.



7.2 Composizione per alcuni acciai

C	0,2 %
Si	0,3 %
Mn	0,6 %
S	0,025 %
P	0,030 %
Cr	-
Ni	-
Mo	-
Cu	0,3 %
Al	0,003 %
N	80 ppm
O	30 ppm
H	3 ppm

In questa tabella sono presenti le percentuali di alcuni elementi in un possibile acciaio. Si noti che gli elementi evidenziati sono in percentuale molto bassa, perchè durante i processi di solidificazione possono causare dei problemi.

Gli elementi N, O, H devono avere una percentuale così bassa (parti per milioni) perchè sono dei gas, che causano una "bolla" nella soluzione.

Invece zolfo e fosforo hanno una percentuale bassa perchè per alte percentuali di questi elementi hanno una trasformazione eutettica a temperature relativamente basse, per esempio nel diagramma Fe-S questa trasformazione è a $T = 988^{\circ}\text{C}$. Questo è importante perchè significa che ad elevate temperature la soluzione fonde, cosa da evitare. Questo avviene quando lo zolfo è al 31%. Questo fenomeno comporta della formazione di solfuri (non metalli) negli acciai, causa di fragilità (si dice anche "*fragilità al rosso*").

Una cosa simile accade anche con il fosforo, la temperatura di trasformazione eutettica è a $1050^{\circ}C$ al 10.2% di P.

7.3 Trattamenti termici

I trattamenti termici sono processi che vengono sottoposti alle leghe metalliche al fine di variare la microstruttura di tali metalli. I processi più comuni sono riscaldamento, raffreddamento o mantenimento ad una certa temperatura, e possono variare la velocità. Tramite i trattamenti termici è possibile variare la durezza, o il carico di snervamento di un materiale. Uno dei trattamenti termici più diffusi è la cristallizzazione, ovvero il fuso di una lega viene raffreddato fino a quando si formano i cristalli nuovi: si formano tramite nucleazione dei germi solidi e successivo accrescimento. Nel processo di cristallizzazione la temperatura alla quale questo avviene è fondamentale, come si vedrà per la formazione della banite e martensite.

Capitolo 8

Solidificazione

Esistono diversi modi in cui avviene la solidificazione. I **getti** sono ottenuti mettendo il fuso in appositi stampi, in questo modo il fuso ottiene la forma desiderata. Con i getti si forma una *microstruttura di solidificazione* che determina le caratteristiche finali del solido.

Un altro processo di solidificazione è quello dei lingotti o bilette, semplicemente lavorati per deformazione plastica.

La solidificazione è un fenomeno **esotermico** che mette in gioco il calore latente di un corpo e lo trasferisce all'ambiente esterno. È influenzata da fenomeni di trasporto di massa ed energia. Durante la solidificazione si ha una riduzione di volume, e inoltre **non si verifica mai alla condizione di equilibrio**, ma a una temperatura inferiore detta di **sottoraffreddamento**. Questo accade a causa della tensione superficiale del fuso.

Affinchè la solidificazione avvenga, cioè da un disordine generale la struttura diventi ordinata, devono formarsi delle interfacce con la soluzione liquida. Queste interfacce si formano per:

1. **Nucleazione**, cioè alcune molecole si dispongono in modo ordinato casualmente. Se il raggio di questi germi è abbastanza grande allora si può procedere con il passo successivo;
2. **Accrescimento**, ovvero il germe nucleato inizialmente accresce fino a che tutta la soluzione diventi solida.

Ad ogni nucleo è associata un'energia libera superficiale e un'energia libera

di volume.

$$G_s = 4\pi r^2 \gamma \quad (8.1)$$

$$G_{vol} = \frac{4}{3}\pi r^3 G_v \quad (8.2)$$

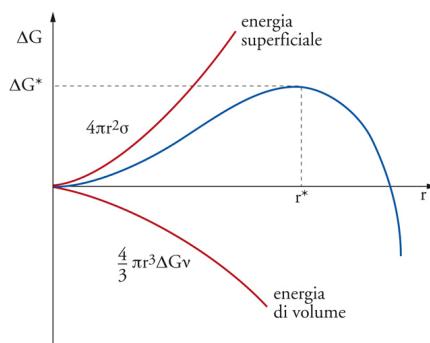
$$\rightarrow \Delta G = 4\pi r^2 \gamma + \frac{4}{3}\pi r^3 G_v < 0 \quad (8.3)$$

affinchè la solidificazione avvenga la variazione di energia libera deve essere negativa (processo esotermico). Dunque il cambio di segno dipende solamente dal termine G_v , che è così definito:

$$G_v = \frac{L\Delta T_n}{T_f} \quad (8.4)$$

dove ΔT_n è la differenza tra la temperatura a cui ci troviamo e quella di fusione, mentre $T - F$ è la temperatura di fusione. L invece è il calore latente di fusione. Inoltre γ è un termine associato alla tensione superficiale. Si hanno dunque tre casi:

1. $T > T_f$ in cui l'energia di volume e superficie aumentano all'aumentare del raggio;
2. $T = T_f$ in cui G_s cresce e $G_{vol} = 0$;
3. $T < T_f$ in cui G_v diventa negativa mentre il comportamento di G_s è il medesimo. Ad un certo punto l'energia libera complessiva sarà minore di zero, dunque l'accrescimento può avvenire;



Andamento di G_s e G_{vol} per tutte le $T < T_f$

Ad un certo punto si arriva a un valore in cui $\Delta G < 0$ che corrisponde al raggio minimo per cui inizia l'accrescimento.

una volta che il nucleo è formato, il processo è termicamente attivato. Si possono dunque avere grani **grossi** formati da una temperatura di sottoraffreddamento bassa, oppure grani fini e in numero maggiore per una ΔT maggiore.

8.1 Microsegregazione, macrosegregazione, omogeneizzazione

Microsegregazione Nei diagrammi di equilibrio si suppone che ci sia la possibilità per gli atomi di diffondere in modo da rendere omogenea la composizione. Ipotesi più difficile da riscontrare nel solido, quindi l'accrescimento avviene per strati continui senza ridistribuzione del soluto, dunque si avranno delle differenze di concentrazione in percentuale tra bordo grano e il centro. I grani saranno eterogenei.

Macrosegregazione Quando una lega solidifica in condizioni di non equilibrio, dato che gli elementi alliganti sono più solubili nel liquido che nel solido, si ha un arricchimento degli elementi di lega nella parte che solidifica per ultima. Si ha una differenza di concentrazione percentuale di soluto rispetto il centro del lingotto e la parte esterna.

Omogeneizzazione Questo processo richiede molto tempo e molta energia, affinchè tutto il solido abbia le stesse caratteristiche di concentrazione degli elementi che compongono la lega, in modo che i cristalli si spostino.

Capitolo 9

Trasformazioni di fase

Come già visto con la ricristallizzazione le trasformazioni di fase possono alterare la struttura del solido. Anche con la micro o macro segregazione: se non lascio sufficiente tempo al solido di raffreddarsi cambia la densità locale all'interno del mio solido. Esistono diversi tipi di trasformazione di fase:

1. Trasformazione da fenomeni diffusivi, senza variazione del numero e della composizione delle fasi, ma solo della struttura;
2. Trasformazioni per fenomeni diffusivi, con variazione del numero e composizione di fasi;
3. Trasformazioni **adiffusive**, con fasi metastabili;

Come già visto la solidificazione e la cristallizzazione hanno curve sigmoidi. In particolare queste curve sono descritte dalla **Legge di Avrami**:

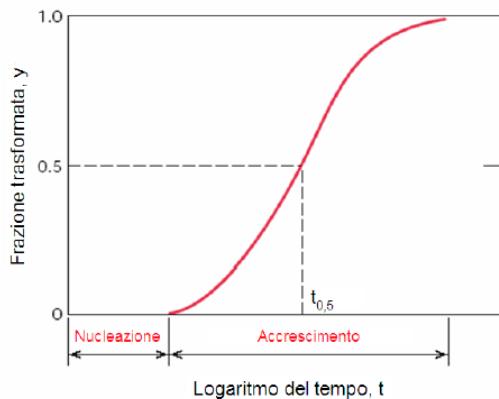
$$y = 1 - e^{-kt^n} \quad (9.1)$$

dove y è la frazione di materiale trasformata in funzione del tempo (considerando la temperatura di trasformazione costante).

Poichè i fenomeni diffusivi dipendono da meccanismi come nucleazione ed accrescimento, dal grafico si vede in che periodo agisce la nucleazione e in quale l'accrescimento. Il tempo di nucleazione in particolare dipende dalla temperatura si sotto raffreddamento, maggiore è il ΔT , minore sarà il tempo di nucleazione.

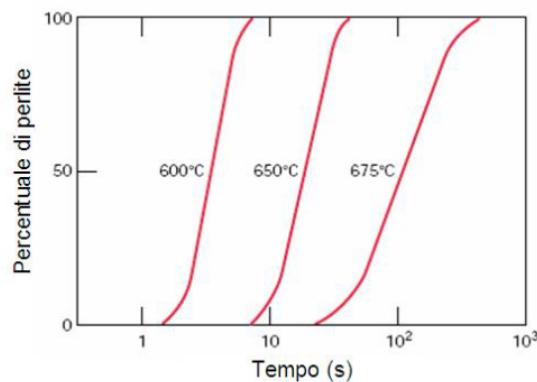
La temperatura ha un'importanza non trascurabile sulla velocità delle trasformazioni.

$$r = Ae^{-\frac{Q}{RT}} \quad (9.2)$$



è la legge che indica la percentuale di ricristallizzazione, dove R ed A sono costanti, T è la temperatura in K e Q è l'energia di attivazione per la reazione di trasformazione.

Esempio per gli acciai Consideriamo un acciaio (ipo, iper o eutettoidico). Allora ad un attemperatura di $727^{\circ}C$, la trasformazione non avverrà mai, in quanto la temperatura di sotto raffreddamento è nulla. All'aumentare di ΔT la trasformazione del ferro diventa sempre più veloce.



Facendo una micrografia dell'acciaio ad una temperatura al di sotto di quella di equilibrio osserverò **un accrescimento favorito**, ovvero la trasformazione sarà più lunga ma i grani saranno più grossi. Invece, quando la temperatura di sotto raffreddamento è distante dalla temperatura di equilibrio è **favorita la nucleazione**, ovvero ci saranno grani più piccoli ma in maggiore quantità.

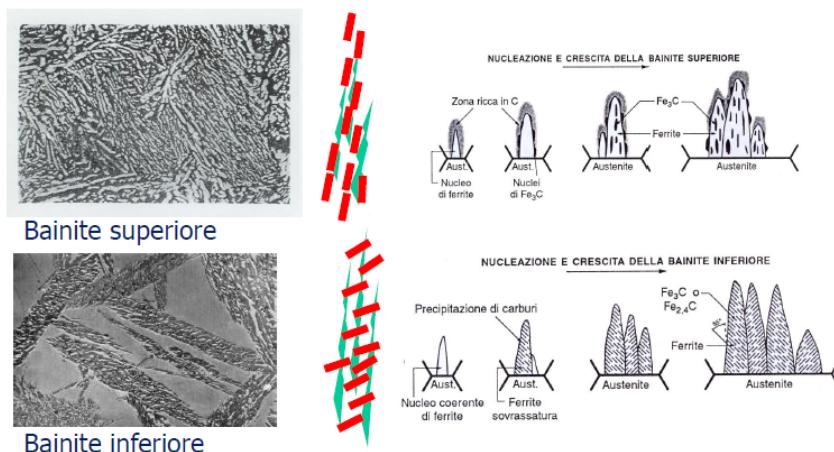
9.1 Se il solido è lamellare

Per un acciaio ipo-eutettoidico, per esempio dal ferro γ si passa a ferro α più perlite. Per il ferro *alpha* valgono la nucleazione e accrescimento osservato adesso, con le caratteristiche dei nuovi grani, e velocità di trasformazione, che dipendono dalla temperatura di sotto raffreddamento. Tuttavia bisogna considerare anche la perlite che viene a formarsi nel solido.

Nel caso in cui la trasformazione avviene appena al di sotto del punto di equilibrio, le lamelle che si formano sono ben definite e spaziate, perchè ci vuole molto tempo e molta energia affinchè si formino. D'altro canto, se la trasformazione avviene lontana dall'equilibrio, non c'è abbastanza tempo per formare lamelle spaziate, dunque diventano più fini. Più la temperatura di sotto raffreddamento è bassa più le lamelle saranno fini. Si forma la **perlite fine**. Una caratteristica di acciai con lamelle fini è che aumentano i meccanismi di rafforzamento, dunque aumenta il carico di snervamento. Se le temperature sono molto basse si formano nuovi costituenti strutturali:

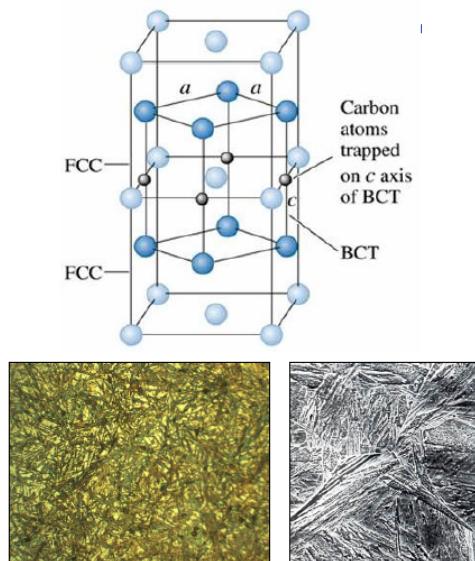
- **Banite superiore:** non c'è tempo sufficiente per formare lamelle di carburo di ferro e ferrite. Si forma un'unica placchetta di ferrite con all'interno micro-placchette di cementite.
- **Banite inferiore:** si forma per temperature ancora più basse. Le micro placchette di cementite si posizionano a 45° .

Sono dei costituenti strutturali di **non-equilibrio**, e sono anche classificati come **costituenti strutturali bifasici $\alpha + Fe_3C$** (è compresa la perlite fine). Tra questi composti la banite inferiore ha il carico di snervamento più alto, ed è il materiale più fragile.



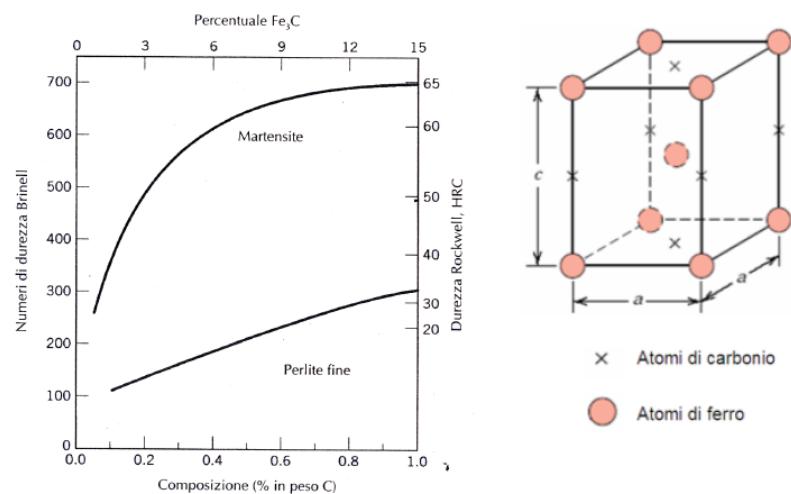
9.2 Martensite

Se il raffreddamento dell'acciaio è ancora più veloce, esiste un nuovo costituente strutturale che si chiama **martensite**. La sua formazione non dipende dal tempo, ma dalla bassa temperatura di sotto raffreddamento. La martensite si forma per una trasformazione **adifussiva**. Nella martensite il carburo di ferro non ha il tempo di nucleare ed accrescere nella perlite, dunque non compare e rimane "intrappolato" nel reticolo di ferrite. Di conseguenza il reticolo della martensite è distorto. Il reticolo della martensite è detto tetragonale distorto, in quanto la martensite cerca di diventare CFC ma è CCC.



Struttura ad "aghi"

Per quanto riguarda la durezza, si osserva che la martensite ha una durezza superiore rispetto a quella della perlite fine, che aumenta con l'aumentare del carburo di ferro in percentuale. Maggiore è la quantità di carburo di ferro, più il reticolo sarà distorto e di conseguenza più ostacoli per le dislocazioni.



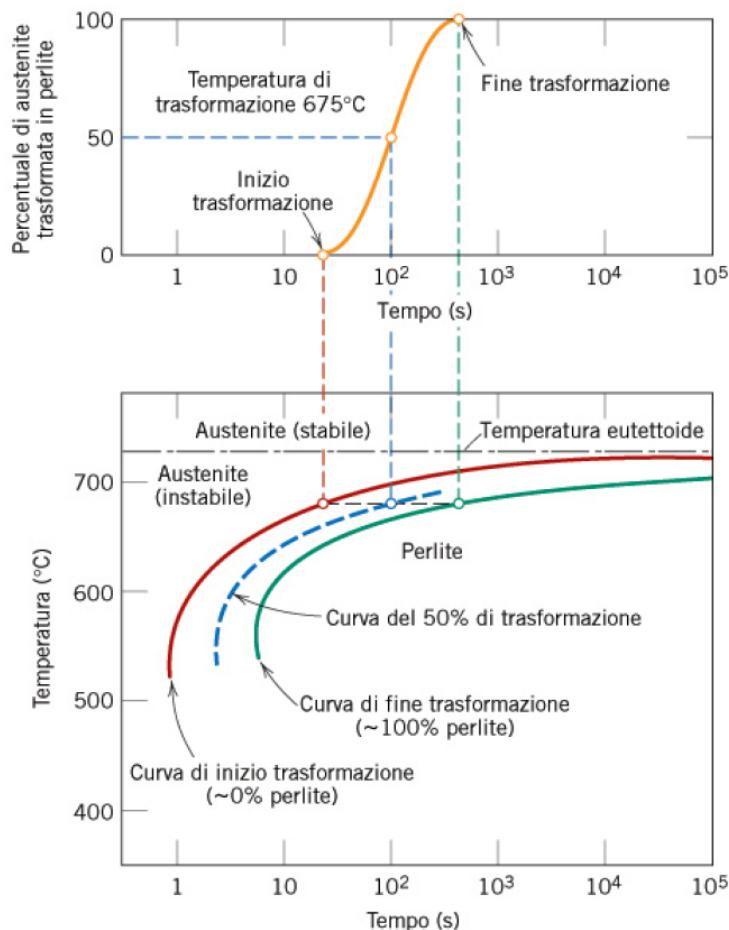
Capitolo 10

Curve di Bain

10.1 Curve T.T.T. (Trasformazione Temperatura Tempo)

Bain ha portato avanti degli studi in cui preso un campione di un qualsiasi metallo, lo ha portato ad una temperatura costante e ha osservato come la struttura cristallina del metallo si modifica nel tempo. Bain ha osservato la natura dei metalli attraverso esperienza **isoterme**.

Ha identificato due curve: una che corrisponde all'inizio della trasformazione e una alla fine. Nella regione più a sinistra per acciai eutettoidi si ha il campo dell'austenite instabile, segue il campo delle trasformazioni, composto da austenite e da perlite. A sinistra si ha il campo delle trasformazioni avvenute, e il solido è diventato perlite. Se la temperatura è molto bassa l'austenite diventa bainite (inferiore o superiore). Se la temperatura è ancora più bassa la linea di trasformazione attraversa il campo della martensite, delineato dalla sigla lettera M_s (martensite start) e M_f (martensite finish). Se la trasformazione non supera la linea M_f , significa che una parte di cristallo del solido sarà composta da cristalli di austenite instabili nel reticolo.



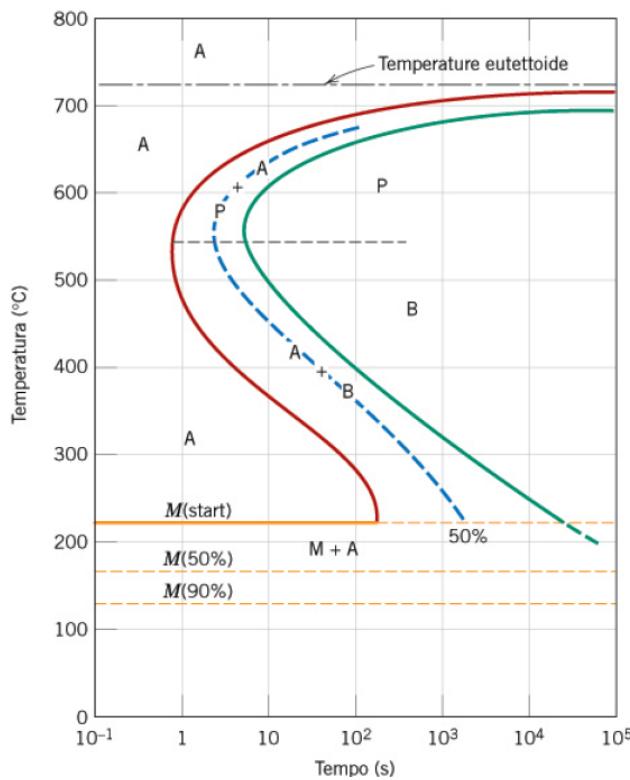
10.1.1 Altri tipi di acciai

Nell'esempio precedente è rappresentata la curva isoterma per un acciaio eutettoide, si riconosce perché $A_3 = A_1$.

- Acciaio ipo-eutettoide
- ACCiaio iper-eutettoide

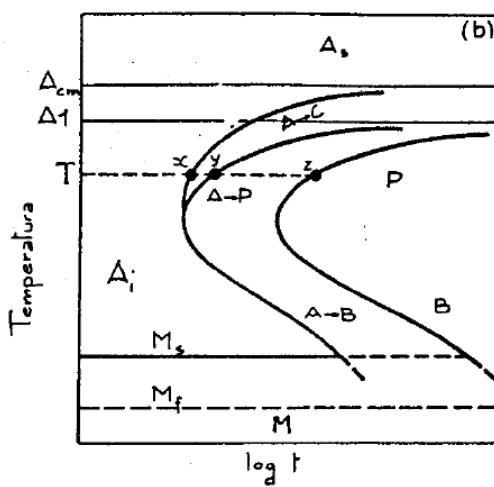
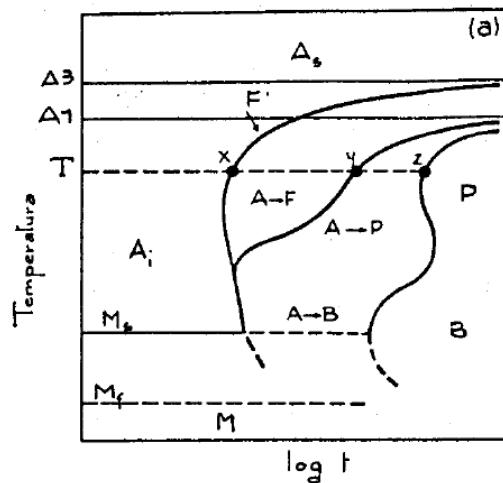
10.1.2 Altri elementi nella lega

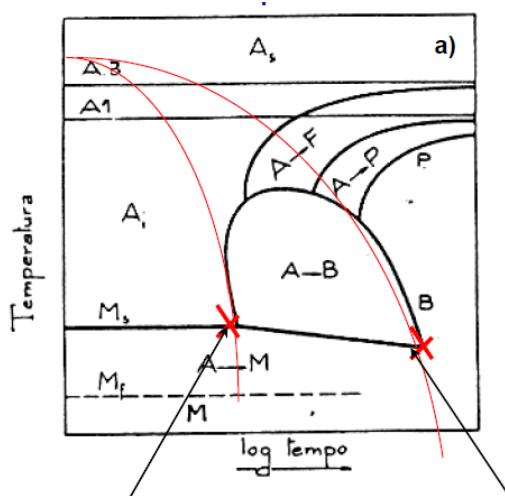
L'unione di elementi al di fuori del carbonio nella lega modificano lo spostamento verso destra (in generale) della curva e la modifica della forma.



10.2 Curve anisoterme

Le curve sono chiamate anisoterme quando il raffreddamento è continuo, e non si segue un intervallo di temperatura costante. Il raffreddamento è discontinuo. Nel diagramma C.C.T. i campi di esistenza rimangono gli stessi per i diagrammi T.T.T. ma cambia la loro geometria nel diagramma. Nei sistemi anisotermi, poiché il solido perde energia più velocemente (arriva prima ad una temperatura inferiore) i tempi di trasformazione si allungano, spostando le linee dei campi di trasformazione e gli altri verso il basso e verso destra. In alcuni può capitare che l'energia interna sia talmente bassa che la trasformazione non avviene: è un caso limite. La velocità critica è la velocità minima al di sopra della quale si trova solamente martensite. La velocità critica inferiore è la velocità minima al di sotto della quale non ha martensite.





Capitolo 11

Altre prove meccaniche

Oltre alla prova di trazione e durezza per gli acciai esistono altre prove che indicano caratteristiche del metallo alternative. Una di queste è la resistenza agli urti.

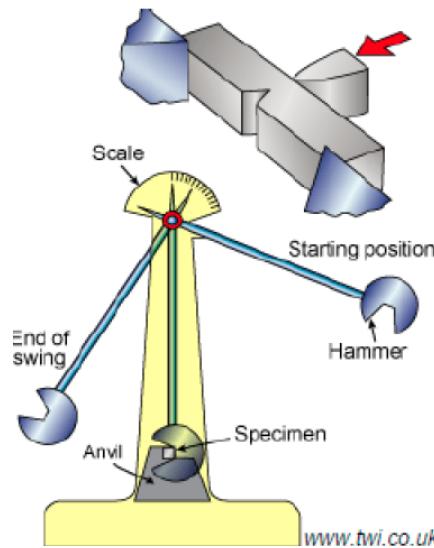
11.1 Prova di Charpy o di resilienza

La prova di resilienza è una prova che misura la resistenza di un metallo all'urto. E' standardizzata: il provino è un parallelepipedo, e la "mazza" che dà l'urto deve essere calibrata in modo che nel momento di contatto abbia $300J$ di energia cinetica. La prova è valida quando il provino si rompe in due, affinchè questo si verifichi con "facilità" dalla parte opposta colpita dalla mazza è presente un intaglio. Per calcolare l'energia che il provino assorbe, la mazza dopo aver rotto il provino compie una parte di circonferenza (come se fosse un pendolo). Si misura l'altezza finale e si calcola l'energia assorbita dal metallo.

La prova di resilienza è differente da quella di trazione perchè varia il tempo in cui il carico viene applicato:

- Prova di trazione: il carico viene distribuito in un intervallo di tempo relativamente lungo, le dislocazioni nel reticolo hanno tempo di muoversi;
- Prova di resilienza: il carico, sebbene minore, è applicato in un intervallo molto breve di tempo; le dislocazioni non hanno il tempo di muoversi a sufficienza e il pezzo si rompe;

In genere il carico di snervamento è maggiore del carico di resilienza per lo stesso metallo. Un parametro che può variare inoltre è la temperatura:



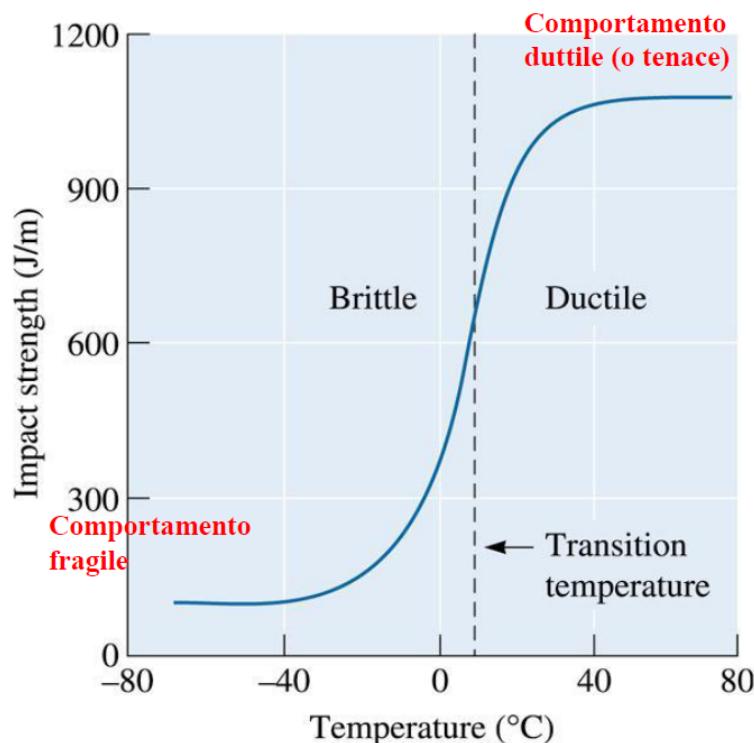
maggior è la temperatura maggiore meglio le dislocazioni riescono a muoversi: si può misurare come varia la resistenza in funzione della temperatura e osservare a quali temperature un metallo è fragile o duttile.

nel punto di flesso è presente una **temperatura di transizione**. In realtà non esiste un punto di transizione, ma un range in cui non si sa se il solido è duttile o fragile, a causa delle impurità presenti nel reticolo.

però è sicuro che oltre una certa T il materiale è sempre duttile.

In generale i metalli con reticolo CCC hanno la temperatura di transizione, i metalli CFC invece no, ma hanno un progressivo diminuire/aumentare della resilienza.

per esempio a basse temperature sarà prediletto un acciaio austentitico, perché sebbene abbia una resilienza minore è meno probabile che dia una rottura fragile a basse temperature come la ferrite. Le rotture fragili sono evidenti per i piani di clivaggio nella micrografia del provino. Invece sono presenti i dimple nelle fratture duttili.



11.2 Fatica

La maggior parte delle rotture sono dovute dalla fatica, ovvero rotture che avvengono ad un carico più basso di quello di snervamento ma ripetuto nel tempo. Le vibrazioni ne sono un esempio. La parte del pezzo più fragile è quando la sezione diminuisce, o dove si concentrano le vibrazioni.

