



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1946A -

ANNO: 2016

# **A P P U N T I**

STUDENTE: Stoppelli Federico

MATERIA: Scienze dei Materiali - prof. Ferraris

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

## STRUTTURE CRISTALLINE

I solidi possono essere classificati in funzione della regolarità con cui i suoi atomi o ioni vengono disposti nello spazio. Un materiale **CRISTALLINO** è caratterizzato dalla presenza di configurazioni atomiche **ordinate** a lungo raggio nelle tre direzioni.

In questo caso, in seguito a solidificazione, gli atomi si dispongono a formare un reticolo tridimensionale ordinato e ripetitivo nel quale ciascuno atomo forma dei legami con gli altri atomi.

Molti metalli, ceramici e polimeri dopo solidificazione formano strutture cristalline.

I materiali che, solidificando, non formano una struttura ordinata e cristallina sono detti **AMORFI** o **NON CRISTALLINI**.

Molte proprietà dei cristalli dipendono dalle strutture cristalline. Spesso le strutture vengono anche chiamate **RETICOLI**.

Poiché le strutture cristalline sono composte da parti ripetitive, si prosegue lo studio su queste piccole unità oltre: **CELLE UNITARIE**.

### **CCF (CUBICA A FACCE CENTRATE)**

Gli atomi sono disposti ai vertici di un cubo e al centro di ciascuna faccia (Cu, Al, Ag, Au).

**NUMERO DI COORDINAZIONE:** numero di atomi vicini ad un atomo

**FATTORE DI COMPATTAZIONE ATOMICA (FCA):** frazione di volume occupato dagli atomi rispetto al volume delle celle.

### **CCC (CUBICA A CORPO CENTRATO)**

Gli atomi sono disposti al vertice del cubo ed uno al centro del cubo.

Le proprietà fisiche dei monocristalli di alcune sostanze dipendono dalle direzioni cristallografiche lungo le quali sono misurate. Queste direzionalità delle proprietà è detta **ANISOTROPIA**, ed è associata alle variazioni delle distanze interatomiche o interioniche in relazione alle direzioni cristallografiche.

I materiali per i quali le proprietà misurate non dipendono dalla direzione delle misure sono detti **ISOTROPICI**.

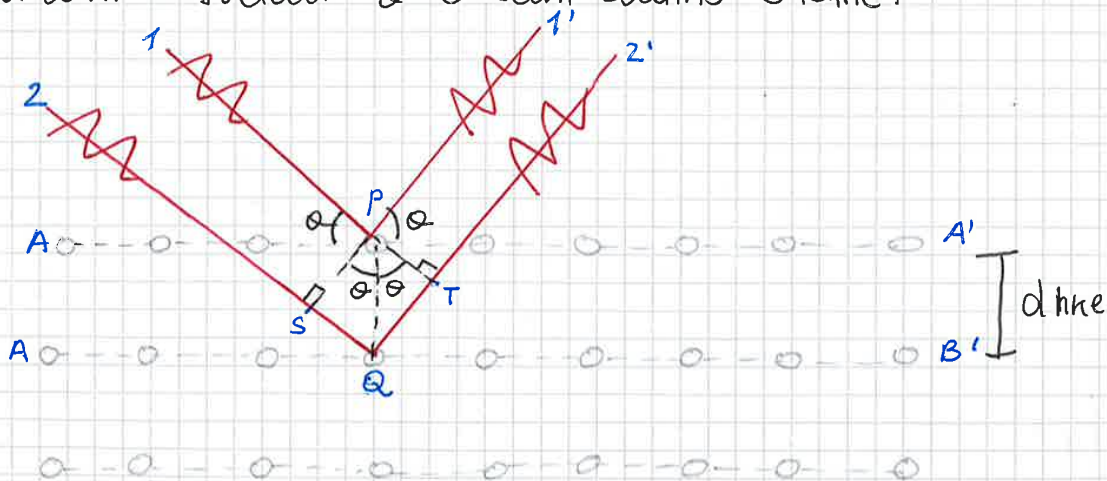
## DETERMINAZIONE DELLE STRUTTURE CRISTALLINE

### DIFFRAZIONE RAGGI X

La diffrazione avviene quando un'onda incontra una serie di ostacoli disposti ad intervalli regolari, che sono in grado ~~sa~~ di diffrangere l'onda e che sono separati da distanze di entità paragonabili alle lunghezze d'onda del raggio incidente.

I raggi X sono una forma di energia elettromagnetica ad alte energie e con corte lunghezze d'onda.

Quando un fascio di questi raggi colpisce un solido una parte di questi raggi viene diffratta in tutte le direzioni dagli elettroni associati a ciascun atomo o ione.



Consideriamo i due piani di atomi A-A' e B-B' che hanno gli stessi indici di Miller e sono separati da  $d_{hkl}$ .

Si ipotizzi ora che un fascio di raggi X, parallelo, monocromatico e coerente, con  $\lambda$ , ~~es~~ sia incidente su questi due piani con angolo  $\theta$ . Due raggi, 1 e 2, vengono diffratti da P e Q.

## IMPERFEZIONI & DIFETTI PUNTUALI

Il più semplice dei difetti è una VACANZA o un sito vuoto del reticolo cioè un posto normalmente occupato mancante di un atomo. Tutti i materiali cristallini ne contengono. Il numero di vacanze cresce col crescere della Temperatura.

Un INTERSTIZIALE è un atomo del cristallo che si trova stipato in un sito interstiziale, piccolo spazio vuoto che non viene occupato normalmente.

Ottenere un materiale puro al 100% è impossibile.

Infatti, si forma una soluzione solida quando, per aggiunta di atomi di soluto nel materiale ospite, viene mantenuta la struttura cristallina. I difetti puntuali che si trovano nei solidi sono di due tipi: INTERSTIZIALE o SOSTITUZIONALE. In quelli di sostituzione, gli atomi di impurezza o di soluto rimpiazzano o sostituiscono gli atomi ospitanti. La sostituzione dipende da:

- 1) Fattore di dimensione atomica
- 2) Strutture cristalline
- 3) Elettro negatività
- 4) Valenza.

Questi fattori devono essere dello stesso tipo o simili e con un valore vicino tra i materiali.

Il rame e il nichel sono completamente solubili:

	Cu	Ni	
1)	12,8 Å	12,5 Å	
2)	CFC	CFC	
3)	1,9	1,9	elettropositivi
4)	+1 (+2)	+2	

# PROPRIETÀ MECCANICHE

## SFORZO E DEFORMAZIONE

Il comportamento meccanico di una struttura può essere accertato mediante una prova **SFORZO-DEFORMAZIONE**, nel caso in cui il carico sia statico o vari in maniera relativamente lenta nel tempo. Questi test sono comunemente condotti sui **metalli** a T ambiente.

Possiamo essere condotte varie prove: trazione, compressione, deformazione e taglio, torsione.

La **PROVA DI TRAZIONE** viene utilizzata per determinare diverse proprietà del materiale. Generalmente il provino viene deformato fino a rottura mediante incremento graduale del carico, il quale viene applicato in maniera uniaxiale lungo l'asse più lungo del provino.

I valori misurati durante la prova di trazione sono: il carico o le forze in funzione dell'allungamento. E si ottengono parametri quali lo **SFORZO NOMINALE** ( $\sigma$ ) detto anche **TENSIONE (STRESS)**:

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

F: carico applicato

$A_0$  = Area iniziale

e **DEFORMAZIONE (STRAIN)**:

$$\epsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

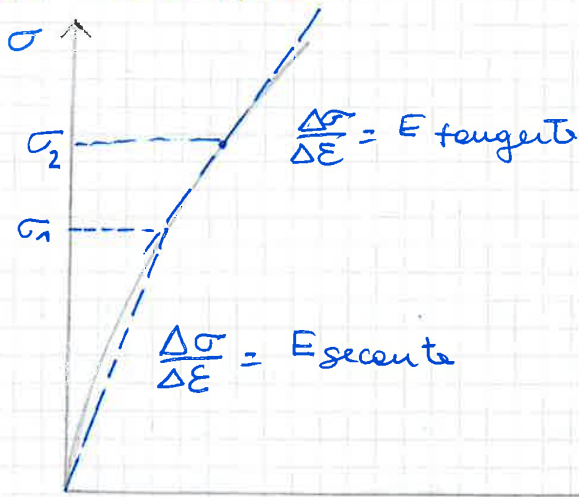
$l_i$ : lunghezza <sup>istantanea</sup> ~~misurata~~

$l_0$ : = iniziale

La **PROVA DI COMPRESSIONE** sono effettuate se le forze sono di compressione e il provino si contrae sull'asse lungo il quale è applicata la forza. Le formule precedenti valgono e F viene presa negativa e anche  $\epsilon$  risulta negativo. La prova di compressione è meno usata in quanto non offre informazioni aggiuntive. Questa viene usata quando si hanno materiali fragili per i quali le prove di trazione è difficoltosa.

La deformazione elastica è una deformazione reversibile, una volta rimosso il carico il pezzo riacquista la forma originale.

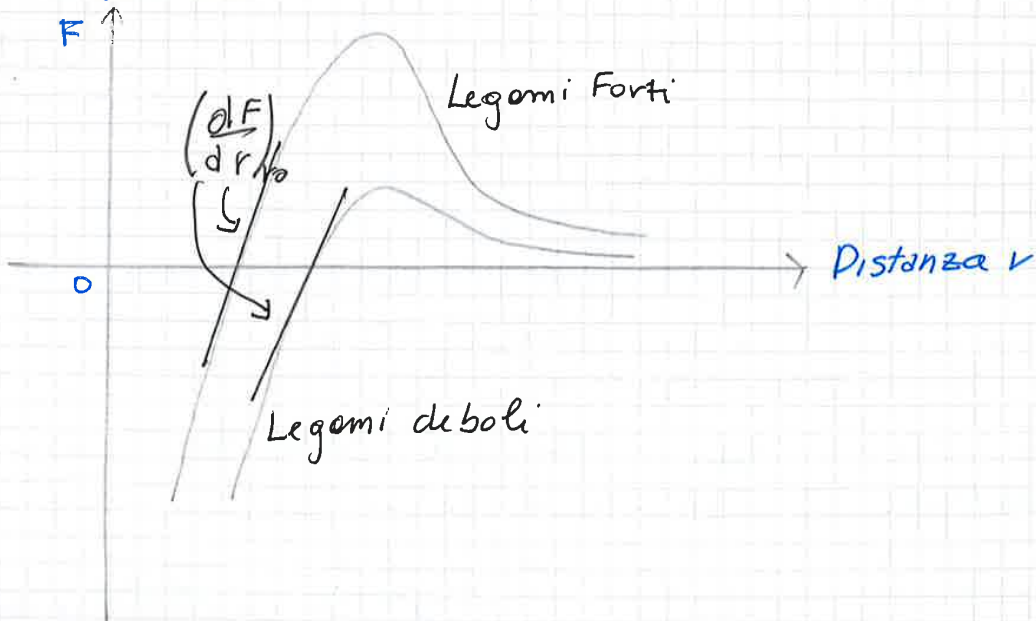
Per alcuni materiali (calcestruzzo, ghise grigie, polimeri), il tratto elastico iniziale non è lineare, pertanto non è possibile determinare il ~~tratto~~ modulo come precedentemente. In questo caso si usano il modulo tangente e secante alla curva



~~A livello atomico, la deformazione elastica secante è la tendenza di una retta secante~~

Il modulo elastico è, inoltre, proporzionale alla pendenza delle curve forza-distanza interatomiche alle distanze di equilibrio:

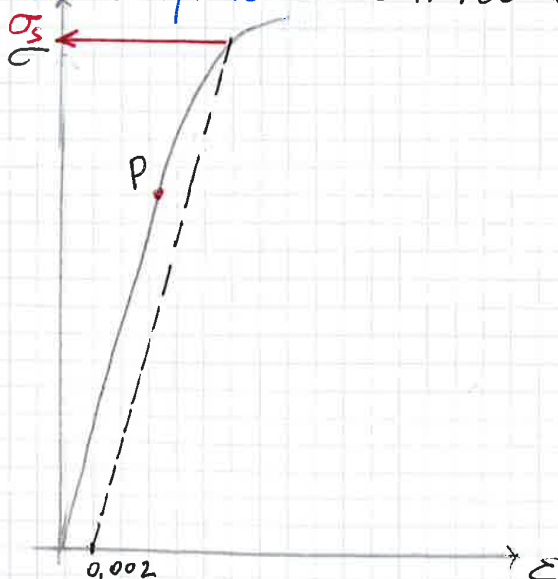
$$E \propto \left(\frac{dF}{dr}\right)_{r_0}$$



vicini, allo scorrimento degli stessi e alle conseguenti formazioni di altri legami. Il meccanismo di deformazione plastica è diverso nel caso di solidi cristallini o amorfi. Per i solidi cristallini, la deformazione avviene per mezzo di un processo chiamato scorrimento, il quale coinvolge il movimento delle dislocazioni. Nei solidi non cristallini avviene per mezzo di un meccanismo di scorrimento viscoso.

## PROPRIETÀ A TRAZIONE

È necessario conoscere il valore dello sforzo oltre il quale inizia la deformazione plastica, ovvero quando inizia lo **SNERVAMENTO**. Per i metalli, il punto di snervamento può essere determinato come il punto oltre il quale la curva sforzo-deformazione non segue più un andamento lineare; questo punto viene chiamato **LIMITE DI PROPORZIONALITÀ** e molto spesso la posizione di questo punto non può essere determinata con assoluta precisione. Per questo motivo, è stata introdotta una convenzione la quale stabilisce che il punto limite può essere determinato tracciando una linea parallela alla linea del tratto elastico e ponendo per una finetta deformazione, in genere pari a 0,002. Lo sforzo corrispondente all'intersezione di queste linee con la curva sforzo-deformazione è definito **CARICO DI SNERVAMENTO**.  $\sigma_s$ .



$P$ : limite di proporzionalità  
 $\sigma_s$ : carico di snervamento.

La RESISTENZA A FRATTURA è lo sforzo rappresentato dal punto di massimo nel grafico ( $\sigma$ ); questo punto corrisponde allo sforzo massimo che può essere sostenuto da una struttura sollecitata a trazione. Pertanto se questo sforzo viene mantenuto si ottiene la rottura del provino.

In corrispondenza del punto massimo si inizia a formare un restringimento della sezione del provino (strizione)

	$\sigma_y$ (MPa)	
acciai	250-1400	
leghe di Ni	200-1600	
leghe di Ti	200-1300	
leghe di Cu	60-950	
leghe di Al	100-650	
leghe di Mg	80-300	
resine epossidiche	30-100	} 6-90 polimeri
nylon	50-90	
poliestere	35-70	
abs	50	
polietilene	6-30	

La DUTTILITÀ è un'altra proprietà meccanica. Essa è una misura delle deformazioni plastiche che il materiale può subire senza rompersi. Un materiale con scarsa capacità di resistere alle deformazioni è detto FRAGILE.

La RESILIENZA è la capacità di un materiale di assorbire energie se sottoposto a deformazione elastica e poi di rilasciarle durante la fase di servizio.

La TENACITÀ indica la capacità di un materiale di assorbire energia fino alla rottura. Un materiale tenace mostra sia elevata resistenza che duttilità; i materiali duttili sono più tenaci di quelli fragili.

Un'altra proprietà meccanica è la DUREZZA che è la misura della resistenza offerta da un materiale alle deformazioni plastiche (ovvero un penetratore o un incisore).

Durante la PROVA ROCKWELL la durezza viene misurata come la differenza di profondità delle impronte generate dall'imposizione di un carico basso e poi di un carico maggiore.

Anche nella PROVA BRINELL, così come nella rockwell, un puntatore sferico viene forzato a penetrare nella superficie del metallo.

Con il metodo VICKERS O KOOP il penetratore è un piccolo diamante a geometria piramidale e l'impronta viene osservata al microscopio ottico.

Sia il carico di rottura che la durezza sono indicatori della resistenza di un metallo alle deformazioni plastiche. Conseguentemente queste grandezze possono essere considerate proporzionali al carico di rottura. Questa relazione può non vale per tutti i metalli.

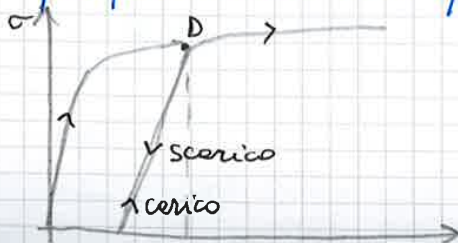
Per la maggior parte degli acciai vale:

$$TS \text{ (MPa)} = 3,45 \times HB$$

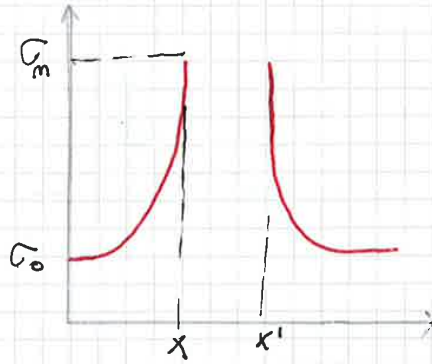
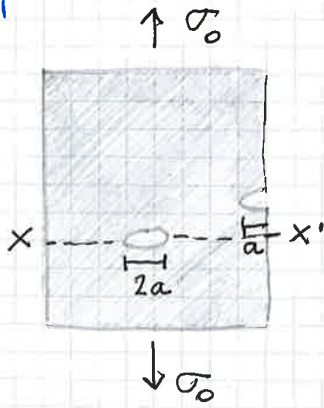
### RECUPERO ELASTICO DURANTE LA DEFORMAZIONE

Durante una prova di trazione, quando il carico viene rimosso, una frazione della deformazione, quella elastica, viene recuperata. Durante il ciclo di carico, la curva di carico è una linea retta dal punto di carico (D) con una pendenza virtualmente pari al modulo elastico.

Se poi il carico viene nuovamente applicato la linea di carico sovrappone perfettamente con quella di scarico in direzione opposta.



senza piccolissimi difetti o cricche.



$$\sigma_m = \sigma_0 \left[ 1 + 2 \left( \frac{a}{r} \right)^{1/2} \right]$$

$\sigma_m$ : Tensione effettiva

$\sigma_0$ : Tensione nominale

$r$  = raggio di curvatura delle cricche.

Per microcricche relativamente lunghe che presentano un piccolo raggio di curvatura può essere molto grande e quindi:

$$\sigma_m = 2 \sigma_0 \left( \frac{a}{r} \right)^{1/2}$$

Durante la propagazione di una cricca avviene il rilascio di quella che è definita come ENERGIA DI DEFORMAZIONE ELASTICA, ovvero quella parte dell'energia che è immagazzinata nel materiale quando questo viene deformato.

Griffith sviluppò un criterio per la propagazione di una cricca ellittica attraverso un bilancio energetico. Egli dimostrò che lo sforzo critico  $\sigma_c$  richiesto perché si abbia propagazione di cricche è:

$$\sigma_c = \left( \frac{2 E \gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2}$$

$E$ : modulo elastico

$\gamma_s$ : energia superficiale specifica

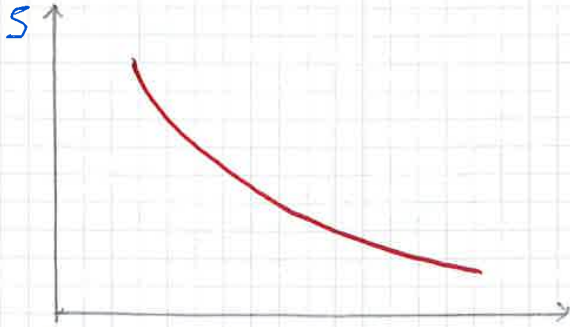
Questa equazione è applicabile solo a materiali fragili, per i quali non si ha deformazione plastica. Per i materiali duttili si usa invece:

$$\sigma_c = \left[ \frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a} \right]^{1/2}$$

$\gamma_p$ : energia di deformazione plastica

Se  $\gamma_p \gg \gamma_s$  (materiali molto duttili)  $\sigma_c = \left[ \frac{2E\gamma_p}{\pi a} \right]^{1/2}$

Molte leghe non ferrose non presentano un limite di fatica, quindi l'andamento della curva S-N prosegue normalmente.



In questo caso si ha RESISTENZA A FATICA che è il livello di sforzo a cui si ha rottura per un numero di cicli definito.

Il processo di rottura a fatica è caratterizzato da tre fasi:  
(1) innescio della cricca, (2) propagazione della cricca, (3) rottura finale.

Questo tipo di diagramma è detto ISOMORFO dovuto alle complete miscibilità dei componenti sia allo stato solido che in quello liquido.

Per determinare le composizioni si deve prima di tutto localizzare il punto in cui si vuole fare la determinazione.

Il caso particolare è nelle zone bifasiche.

- 1) Si sceglie una temperatura e si traccia una linea orizzontale;
- 2) Si segnano i punti di intersezione tra tale linea e le curve;
- 3) Si tracciamo linee verticali a quelle intersezioni sull'asse della composizione.

Si ottengono  $C_{L, Ni} - C_{L, Cu}$  (fase Liquida)

$C_{S, Ni} - C_{S, Cu}$  (fase solida)

Per determinare le quantità delle fasi si usano le regole della leva:

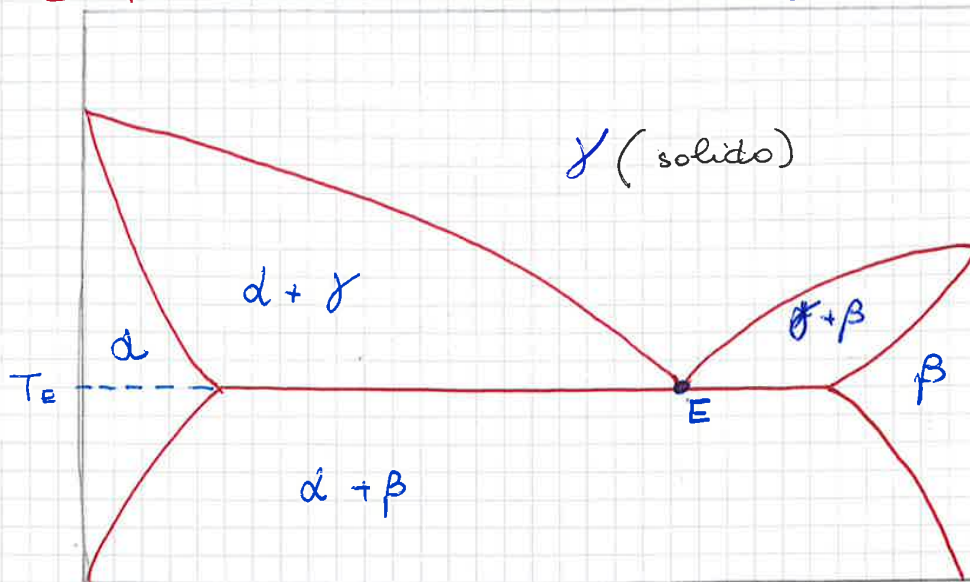
$$W_L = \frac{S}{S+R} = \frac{C_\alpha - C_0}{C_\alpha - C_L} \quad \text{IMPO!}$$

$$W_S = \frac{R}{S+R} = \frac{C_0 - C_L}{C_\alpha - C_L}$$

Per una legge binaria si deve specificare per un solo componente.

1. Consideriamo il punto a: la lega è completamente liquida.
2. Scendendo, una volta incontrata la curva, punto b si inizia a formare il primo solido d.
3. Al proseguire del raffreddamento cambiano le composizioni di d. (punto e)
4. Al punto d il processo di solidificazione è quasi completo.
5. Al punto e si ha la completa solidificazione.

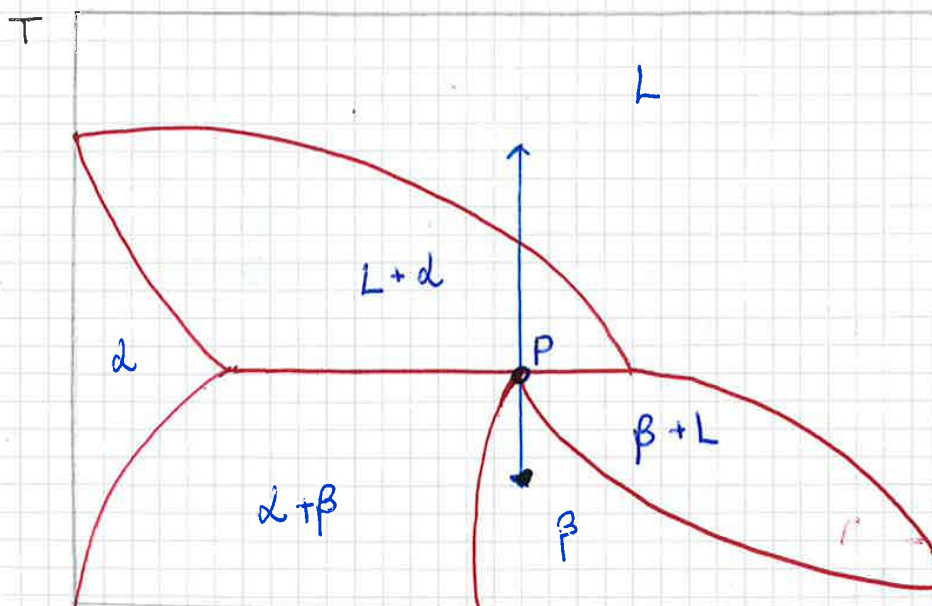
## EUTETTOIDE (solido $\rightarrow$ solido)



La reazione EUTETOIDICA coinvolge tre fasi solide:  $\gamma, \alpha, \beta$ .



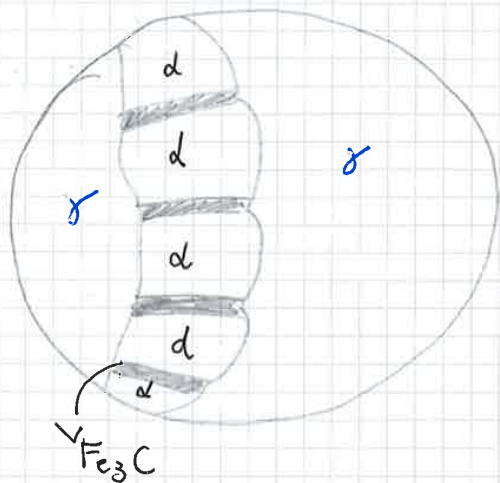
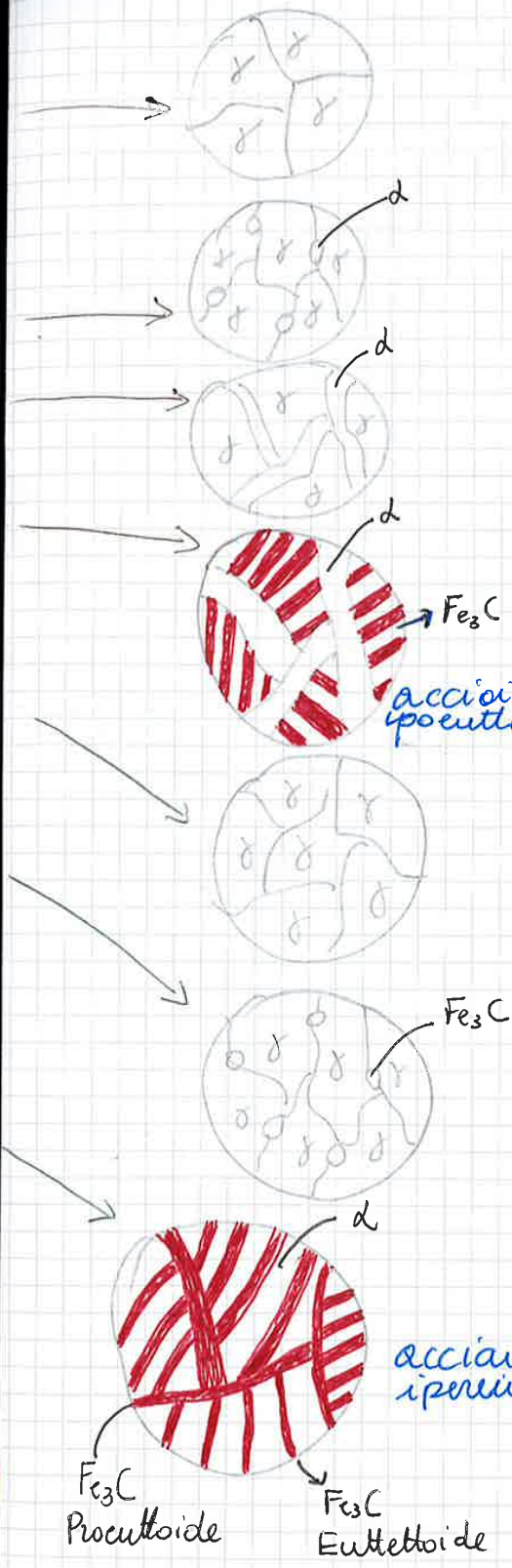
## PERITETTICO (solido $\xrightarrow{T}$ L + solido)



La reazione PERITETTICA ~~coinvolge~~ per riscaldamento trasforma una fase solida in una fase liquida più una solida



PERLITE  $\alpha + Fe_3C$



Dalle reazioni eutetoidiche (3) si ottiene una struttura a lamelle alternate di  $Fe_3C$  e  $\alpha$ .  
 (Aspetto della MADRE-PERLA)  
 acciaio ipoeutetico

$\alpha$ [C = 0,03%]	CCC
$\delta$ [C = 0,1%]	CCC
$\gamma$ [C = 2,0%]	CFC

acciaio ipereutetico  
 $Fe_3C$  Procuttoide  
 $Fe_3C$  Eutettoide

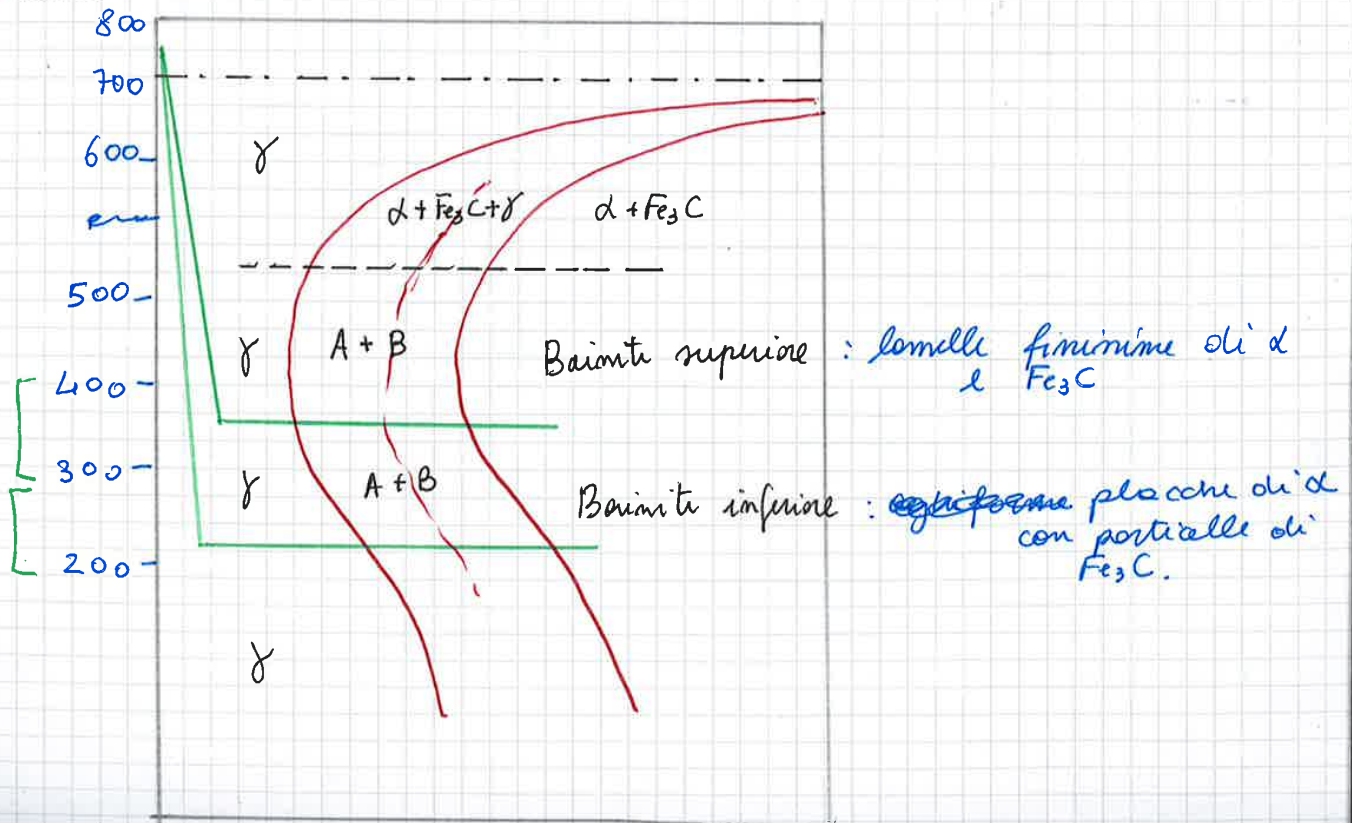
Il tratto verde corrisponde ad un trattamento isotermico.  
 Il tratto AB corrisponde al repentino raffreddamento dell'austenite, fino ad una certa temperatura alla quale poi si lavora costantemente. Inizio, quindi il tratto orizzontale.

La trasformazione da austenite a perlite inizia nel punto C.

Le differenze di spessore delle lamelle di ferrite e di cementite dipendono dalle temperature alle quali si lavora.

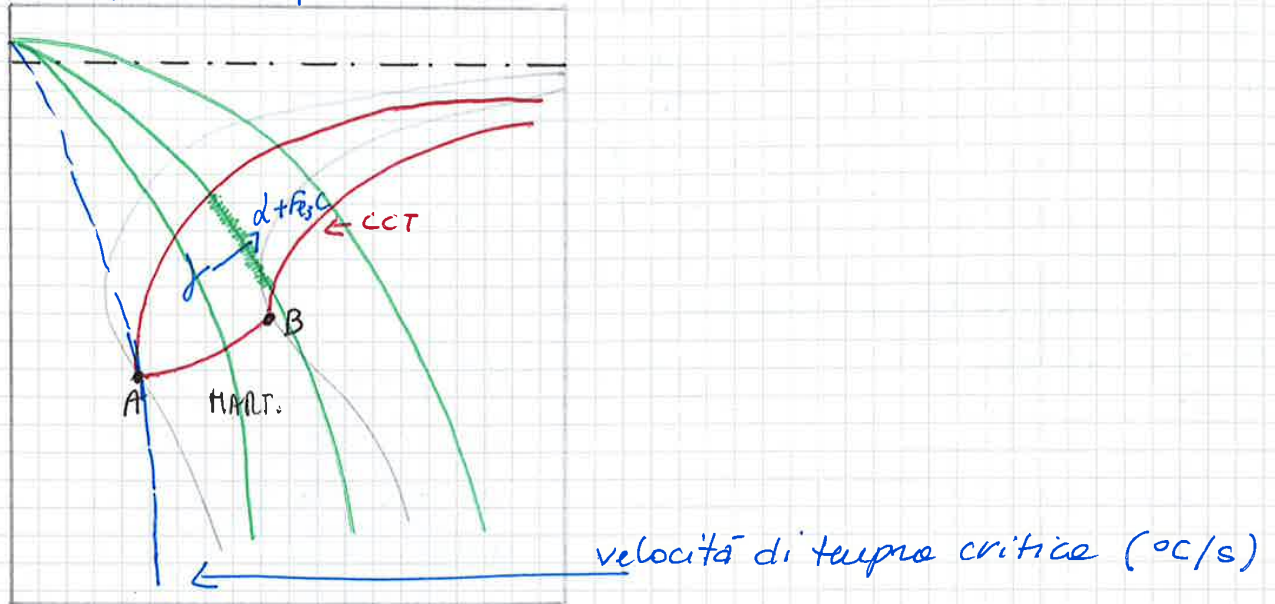
Per una T appena inferiore a  $T_E$  si ottiene perlite grossolana (lamelle spesse). Al diminuire di T, diminuisce la diffusione e le lamelle diventano più sottili: perlite fine.

Dall'austenite vengono prodotti altri costituenti che possono esistere a temperature più basse. La BAINITE può esistere, in base alle temperature, come bainite superiore e bainite inferiore. Per temperature tra 300 e 400 °C la bainite è formata da una serie di listelli paralleli o aghi di ferrite che sono separati da particelle allungate di cementite. Questa è detta SUPERIORE. Tra 200 e 300 °C la fase ferrite si presenta come placche sottili contenenti particelle di cementite. Questa è detta INFERIORE.



## DIAGRAMMI IN RAFFREDDAMENTO CONTINUO (CCT)

La maggior parte dei trattamenti termici degli acciai prevedono il raffreddamento continuo fino a temperatura ambiente. Le curve isotermitiche vengono traslate a tempi più lunghi ed a temperature più basse.

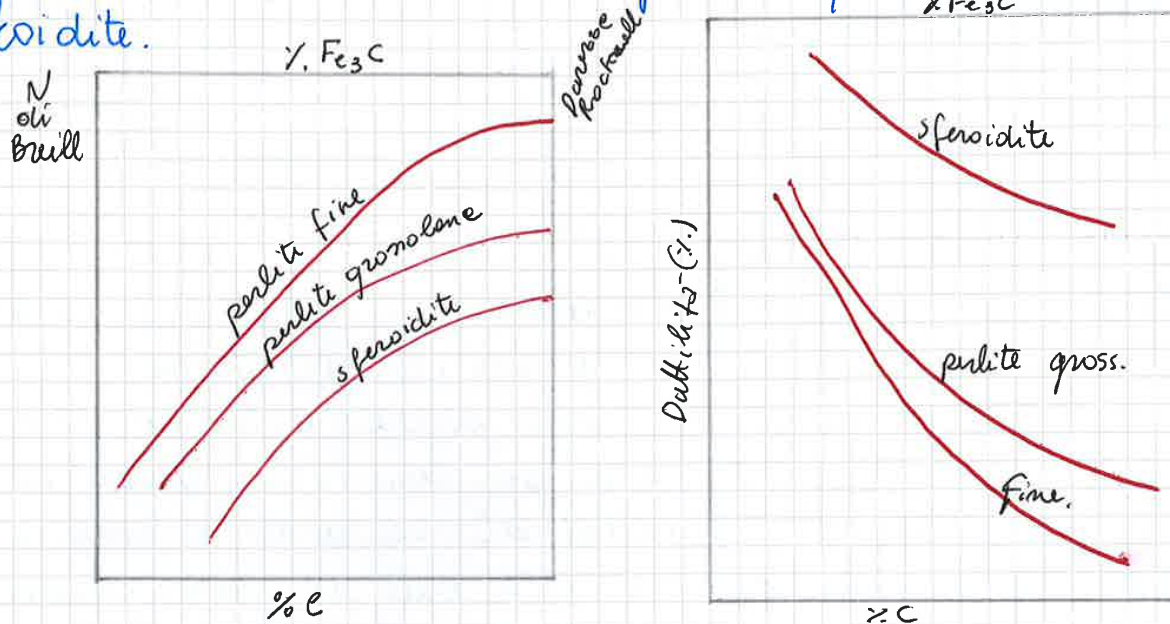


La trasformazione inizia dopo un periodo di tempo corrispondente all'intersezione delle curve di raffreddamento con le curve di inizio reazione. Normalmente non si forma bainite quando una lega di composizione viene raffreddata fino a temperatura ambiente. Questo avviene perché tutte l'austenite si sarà trasformata in perlite. Per curve di raffreddamento che passano attraverso AB la trasformazione si verifica nel punto di intersezione e qui l'austenite residua inizia a trasformarsi in martensite.

Per un raffreddamento continuo di un acciaio si definisce una VELOCITÀ DI TEMPERA CRITICA che rappresenta la minima velocità di raffreddamento necessaria per ottenere una struttura completamente martensitica.

## SFEROIDITE

Altri elementi della microstruttura sono legati alle forme e alla disposizione delle fasi. Le fasi cementite ha disposizioni e forma differenti dalle strutture ferrite e sferoidite. Le leghe a microstruttura perlitica hanno maggiore resistenza e durezza rispetto a quelle a struttura sferoidite.

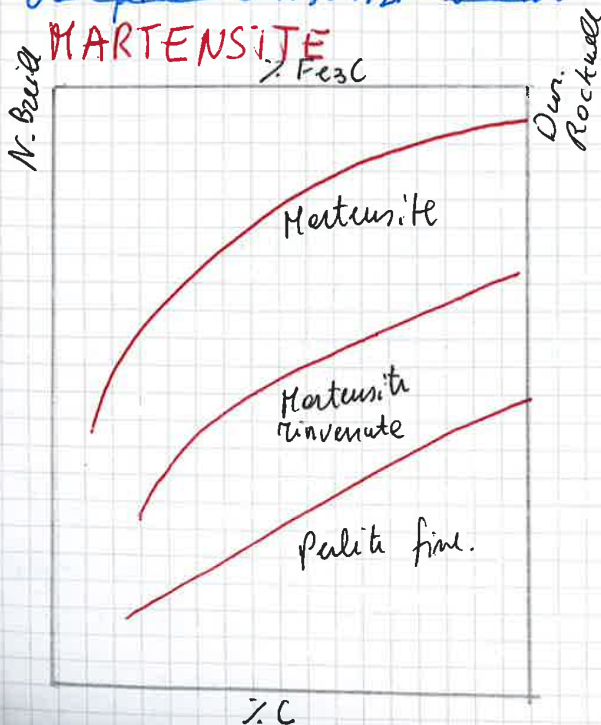


Gli acciai sferoidici sono più duttili e notevolmente tenaci.

## BAINITE

Gli acciai a struttura bainite, avendo una struttura più fine sono generalmente più duri e degli acciai perlitici. ~~sono anche~~ ~~tra i più resistenti e datti.~~

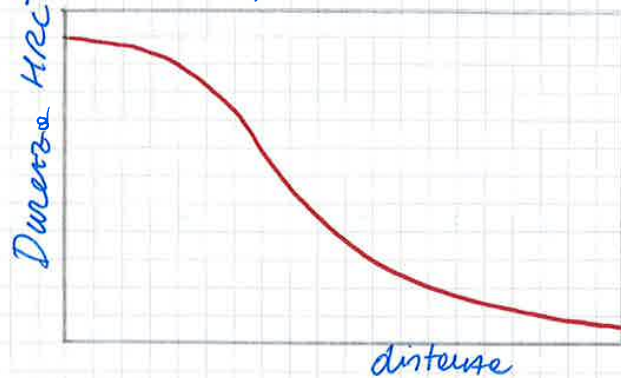
## MARTENSITE



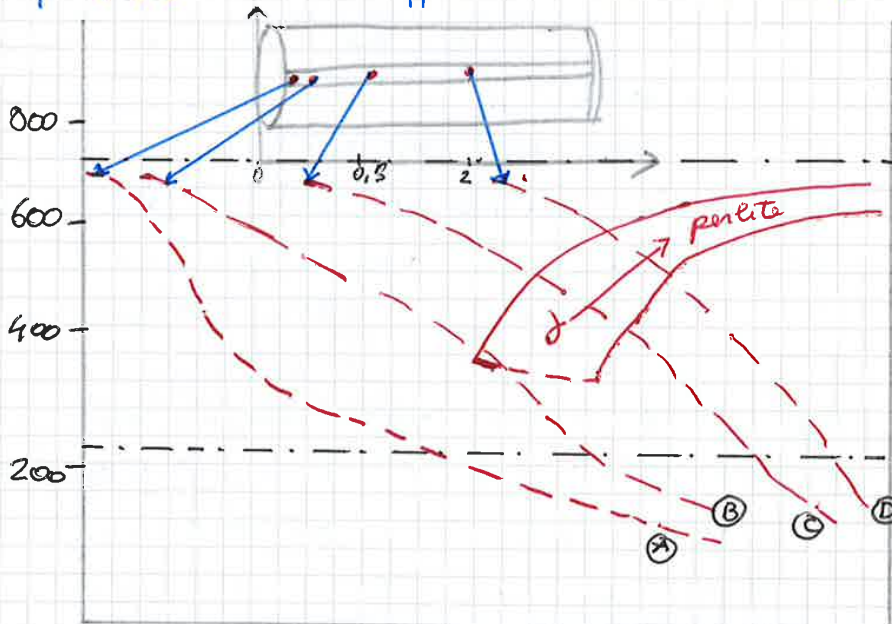
La martensite è la più dura e resistente e anche la più fragile, ha infatti duttilità trascurabile.

Queste proprietà sono dovute agli atomi interstiziali di C che ostacolano il movimento delle dislocazioni.

ricevati per molatura due strisce piane superficiali nelle quali viene misurata la durezza rockwell. Se si riporta su un grafico la ~~lunga~~ durezza in funzione della distanza dalle teste temprate otteniamo il profilo di temprebilità.

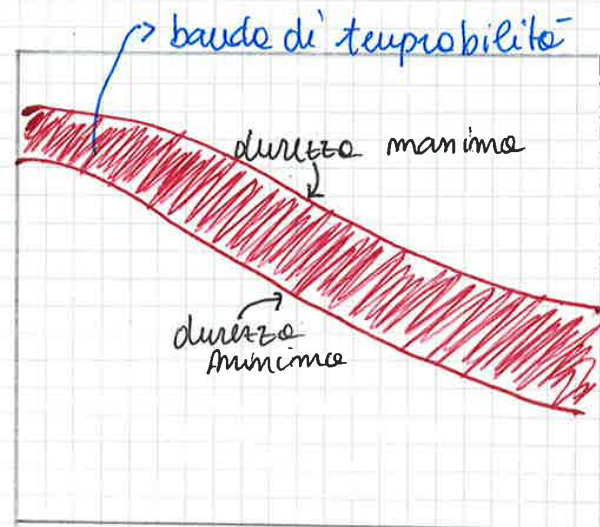
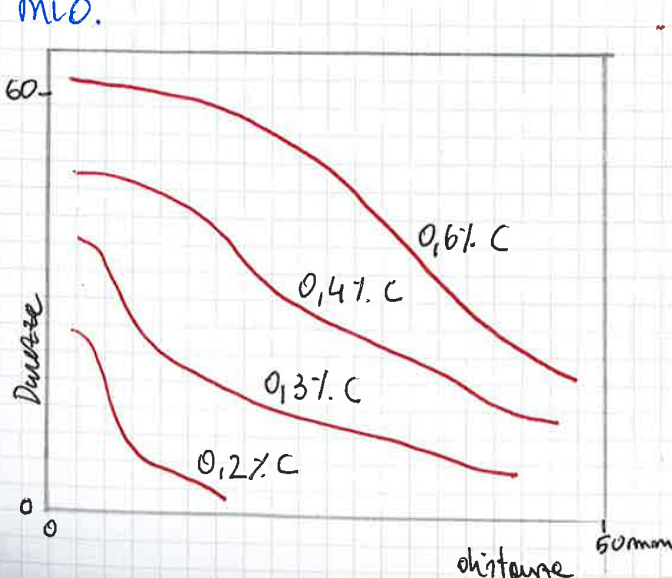


Si può anche correlare la posizione lungo la provetta con la trasformazione in raffreddamento continuo.



- (A) Martensite
- (B) Martensite + perlite
- (C) perlite fine
- (D) perlite

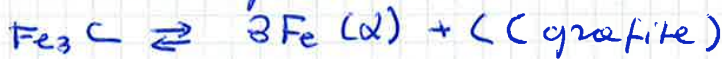
Le curve di temprebilità dipendono anche dal <sup>t(s)</sup> contenuto di carbonio.



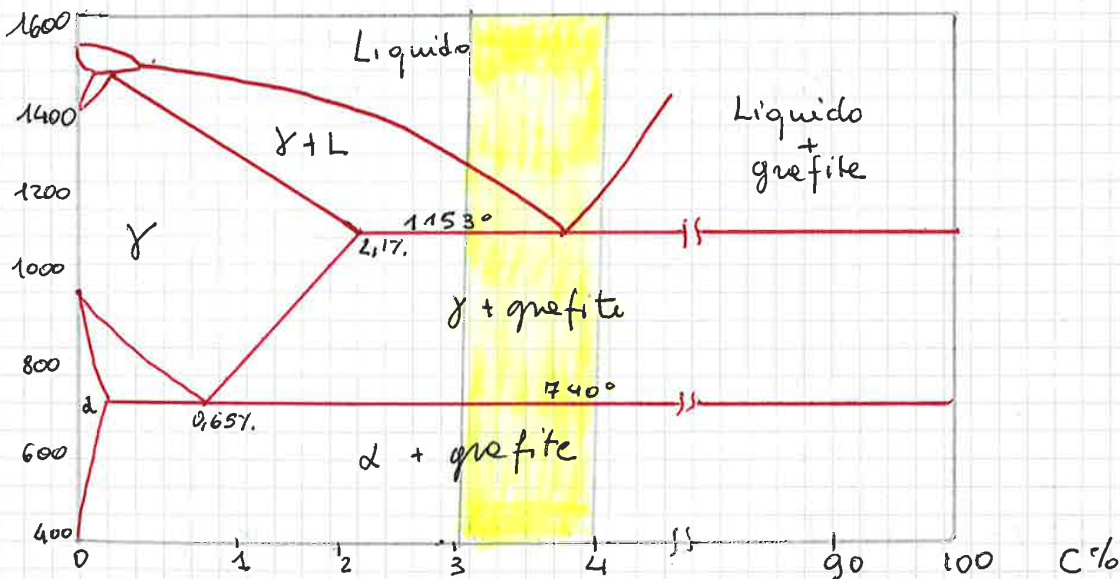
Gli ACCIAI INOSSIDABILI sono altamente resistenti alle corrosione. Il loro elemento di lega principale è il cromo (~ 11% peso di Cr). Può contenere anche nichel e molibdeno (aumento della resistenza alle corrosione).  
 Gli acciai inox si dividono in tre classi in base alla microstruttura predominanti (martensite, austenite, ferrite).

## GHISE

Le ghise hanno una composizione di carbonio superiore allo 2,147. in peso. Però la maggior parte delle ghise in commercio contengono un contenuto variabile tra il 3,0% e il 4,5% in peso di carbonio, con aggiunte di altri elementi. Le ghise sono facilmente liquefabili e lavorabili per fusione. La cementite è un composto meta-stabile e, in alcune circostanze, può dissociarsi come:



Quindi il diagramma risulterà:



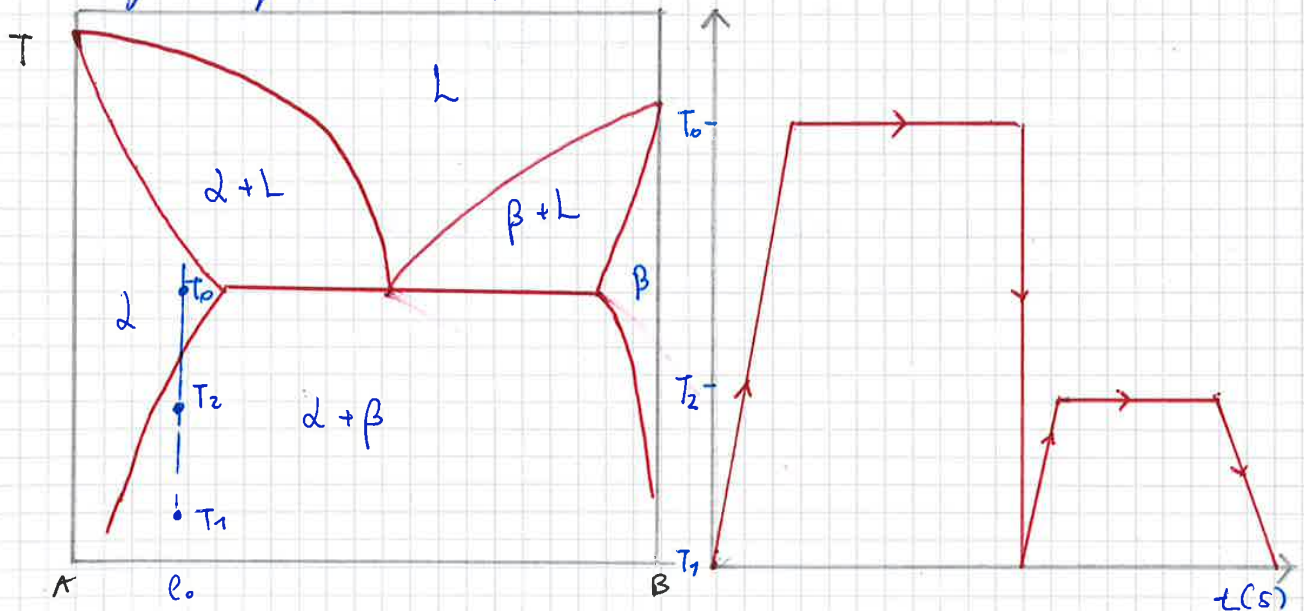
La tendenza a formare grafite è regolata dalla composizione e dalle velocità di raffreddamento. La formazione di grafite è promossa dalle presenze di silice in concentrazioni ~~minori~~ maggiori dell'1%. Velocità di raffreddamento favoriscono la grafittizzazione.

## LEGHE NON FERROSE

### LEGHE DI ALLUMINIO

L'alluminio e le sue leghe sono caratterizzati da una buona densità, conduttività elettrica e termica elevate, resistenza alla corrosione. Sono molto duttili anche a basse temperature grazie alle strutture cfc dell'alluminio. La resistenza meccanica dell'alluminio può essere aumentata con l'aggiunta di elementi di lega. E i principali elementi di lega sono rame, magnesio, nichel, manganese e zinco.

Queste leghe possono essere rafforzate con trattamenti di PRECIPITAZIONE (O INVECCHIMENTO); questo è dovuto alla formazione di particelle di una nuova fase. Per avere un invecchiamento per precipitazione i diagrammi di stato devono presentare: una apprezzabile solubilità di un componente in un altro ed un limite di solubilità. La soluzione solida  $\alpha$  viene riscaldata fino ad una temperatura compresa entro la regione bifasica  $\alpha + \beta$  per favorire la formazione di  $\beta$ . Dopo un certo periodo, la lega è raffreddata alla temperatura ambiente. La resistenza di queste leghe dipende dalle temperature di precipitazione  $T_2$  e dal tempo durante il quale mantengono queste temperature.



## STAMPAGGIO

Nello stampaggio per compressione si mette tra il maschio e la femmina dello stampo l'opportuna quantità di polimero, perfettamente miscelato con opportuni additivi. I pezzi dello stampo sono riscaldati e solo uno di essi è mobile. Si chiude lo stampo e si applica calore e pressione in modo che il materiale plastico diventi viscoso in modo che prenda la forma dello stampo.

Nello stampaggio per iniezione la quantità di polimero scende attraverso una tromoggia di corno ed è poi spinta da un pistone in un cilindro. Il polimero granulare e corno è spinto fino ad una camera di riscaldamento dove il materiale termoplastico viene fuso. Il fluido viene spinto poi fino allo stampo.

Lo stampaggio per soffiatura è utilizzato per produrre bottiglie e la tecnica è simile alla precedente ma con un soffio di vapore che gli fa prendere la forma dello stampo.

## ESTRUSIONE

Il processo di estrusione è semplicemente uno stampaggio per iniezione di un termoplastico viscoso attraverso uno stampo aperto all'estremità.

$$3) \quad E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} = \frac{150 \text{ MPa}}{0,0019} = 79 \text{ GPa}$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 0 & \sigma_2 &= 150 \text{ MPa} \\ \varepsilon_1 &= 0 & \varepsilon_2 &= 0,0019 \end{aligned}$$

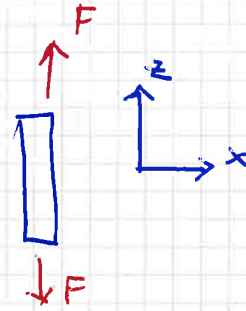
$\sigma_3 = 250 \text{ MPa}$  (allo 0,002) da grafico!

$$4) \quad d = 10 \text{ mm} \quad F = ?$$

$$\Delta d = 2 \text{ }\mu\text{m}$$

$$\nu = 0,34$$

$$E = 70 \text{ GPa}$$



$$\varepsilon_x = \frac{\Delta d}{d} = -\frac{2 \cdot 10^{-3} \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = -2 \cdot 10^{-4}$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} \quad \varepsilon_z = -\frac{\varepsilon_x}{\nu} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,34} = 5,9 \cdot 10^{-4}$$

$$\sigma = \varepsilon_z \cdot E = 5,9 \cdot 10^{-4} \cdot 70 \cdot 10^3 \text{ MPa} = 41,2 \text{ MPa}$$

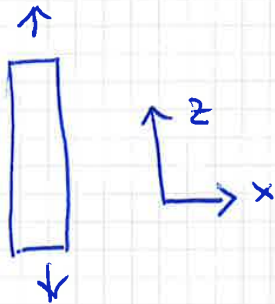
$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$\begin{aligned} F &= \sigma \cdot S = 41,2 \text{ MPa} \cdot (\pi r^2) = \\ &= 41,2 \text{ MPa} \cdot (\pi 25 \text{ mm}^2) = 3236 \text{ N} \end{aligned}$$

*Forza da applicare*

8]  $d = 10 \text{ mm}$   
 $\Delta d = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$

$\sigma = ?$   
 $\nu = 0,34$   
 $E = 97 \text{ GPa}$



$$\epsilon_x = -\frac{\Delta d}{d} = -\frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{10} = -2,5 \cdot 10^{-4}$$

$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z}$   ~~$\epsilon_z = -\frac{\epsilon_x}{\nu} = \frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{0,34} = 7,35 \cdot 10^{-4}$~~

~~$\sigma = \epsilon_z E = 7,35 \cdot 10^{-4} \cdot 97 \text{ GPa} = 71,3 \text{ MPa}$~~

$$\epsilon_z = -\frac{\epsilon_x}{\nu} = \frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{0,34} = 7,35 \cdot 10^{-4}$$

$$\sigma = \epsilon_z E = 7,35 \cdot 10^{-4} \cdot 97 \text{ GPa} = 71,3 \text{ MPa}$$

9] Cu  $l_0 = 305 \text{ mm}$   
 $\sigma = 276 \text{ MPa}$   $\Delta l = ?$   
 $E = 111 \text{ GPa}$

$$\sigma = \epsilon E = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot E$$

$$\Delta l = \frac{\sigma \cdot l_0}{E} = \frac{276 \text{ MPa} \cdot 305 \text{ mm}}{111 \cdot 10^3 \text{ MPa}} = 0,76 \text{ mm}$$

12]

Cu

$$\sigma = 240 \text{ MPa}$$

$$F = 6600 \text{ N}$$

$$l_0 = 380 \text{ mm}$$

$$\Delta l = 0,5 \text{ mm}$$

$$E = 110 \text{ GPa}$$

d = ?

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$S = \frac{F \cdot l_0}{E \cdot \Delta l} = \frac{6600 \text{ N} \cdot 380 \text{ mm}}{110 \cdot 10^3 \text{ MPa} \cdot 0,5 \text{ mm}} = 46 \text{ mm}^2$$

$$S = \pi r^2$$

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{46}{\pi}} = 3,8 \text{ mm}$$

$$d = 7,65 \text{ mm}$$

13]

GRIFFITH

$$\sigma = 40 \text{ MPa}$$

$$\gamma_s = 0,3 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}$$

$$E = 69 \text{ GPa}$$

a = ?

$$\sigma_c = \left( \frac{2 E \gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2}$$

$$\frac{\gamma_s}{a} = \frac{\pi (\sigma_c)^2}{2 E}$$

$$a = \frac{2 E \cdot \gamma_s}{\pi (\sigma_c)^2} = \frac{2 \cdot 69 \cdot 10^3 \text{ MPa} \cdot 0,3 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}}{\pi (40 \text{ MPa})^2} = \frac{8,23 \frac{\text{J}}{\text{m}^2}}{\text{MPa}} = 0,0082 \text{ m}$$

$$\sigma_c = \sigma_c$$

Generalmente tutti i solidi si espandono quando sono riscaldati.  
 Si definisce  $\alpha$  COEFFICIENTE DI DILATAZIONE TERMICA ( $10^{-6} K^{-1}$ )

$$\left(\frac{l_t - l_0}{l_0}\right) = \alpha (T_f - T_0)$$

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T$$

La dilatazione termica è dovuta all'aumento delle distanze medie fra le molecole i costituenti del reticolo rispetto alla posizione di equilibrio.

- 1] OTTONE
- $E = 100 \text{ GPa}$
  - $\alpha = 20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
  - $T = 20^\circ\text{C} = 293$
  - $\sigma = 172 \text{ MPa}$
  - $T_{\text{max}} = T_{\text{finale}} = ?$

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T$$

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

$$\sigma = \epsilon E$$

~~$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{172 \text{ MPa}}{100 \cdot 10^3 \text{ MPa}} = 0,00172$$~~

~~$$\epsilon = \alpha \Delta T = \alpha (T_f - T_i)$$~~

~~$$\frac{172 \text{ MPa}}{100 \cdot 10^3 \text{ MPa}} = \frac{20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1} (T_f - 293 \text{ K})}{1}$$~~

$$\sigma = \alpha \Delta T E = \alpha E (T_f - T_i) = \alpha E T_f - \alpha E T_i$$

$$T_f = \frac{\sigma + \alpha E T_i}{\alpha E} = \frac{172 \text{ MPa} + (20 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K} \cdot 100 \cdot 10^3 \text{ MPa} \cdot 293 \text{ K})}{100 \cdot 10^3 \text{ MPa} \cdot 20 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}} =$$

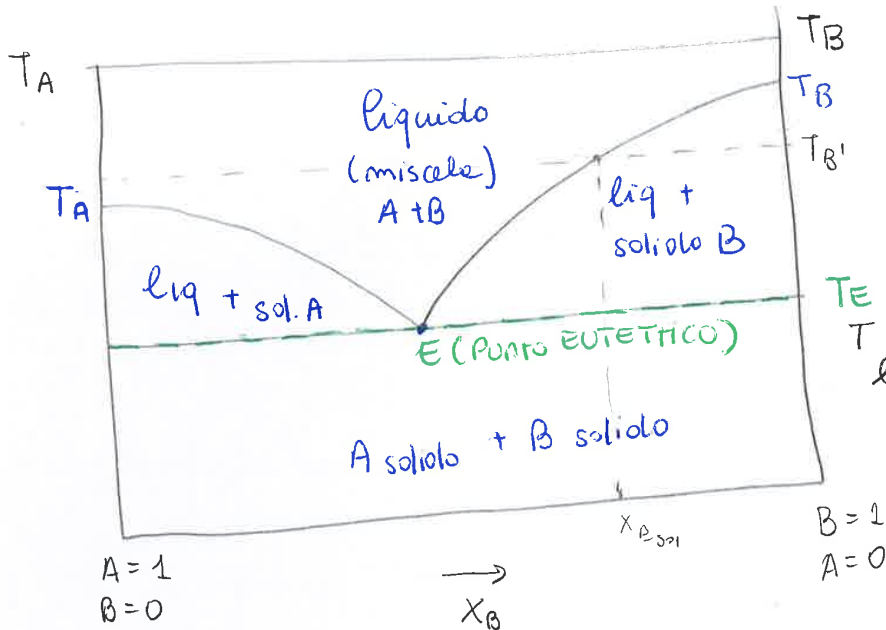
~~$$= 4182 \text{ K} = 3909 \text{ C}$$~~

$$= 379 \text{ K} = 106^\circ\text{C}$$

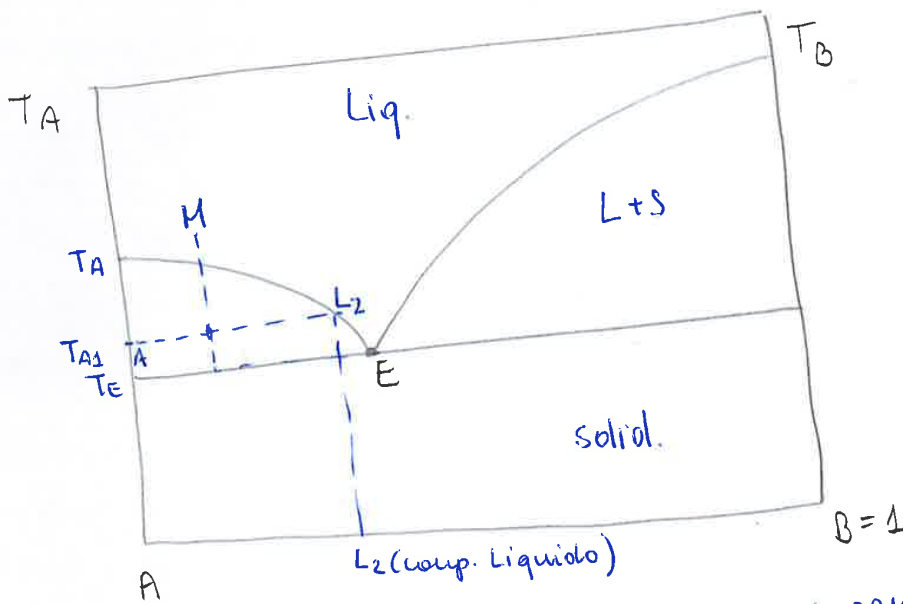
# COMPLETA IMMISCIBILITÀ ALLO STATO SOLIDO

miscela  
 Liquida  $\xrightarrow{-Q}$ 

- /
- solido 1 puro
- \
- solido 2 puro



**TEMPERATURA  
 T<sub>E</sub> : EUTETTICA**  
 T alle quale avviene  
 la completa  
 solidificazione



Miscela di comp. M, si applica T<sub>A1</sub> e si formano i primi cristalli:

$$\% X_{A, \text{puro}}(T_{A1}) = \frac{ML_2}{AL_2} \cdot 100$$

$$\% X_{A, \text{liq}} = \frac{AM}{AL_2} \cdot 100$$

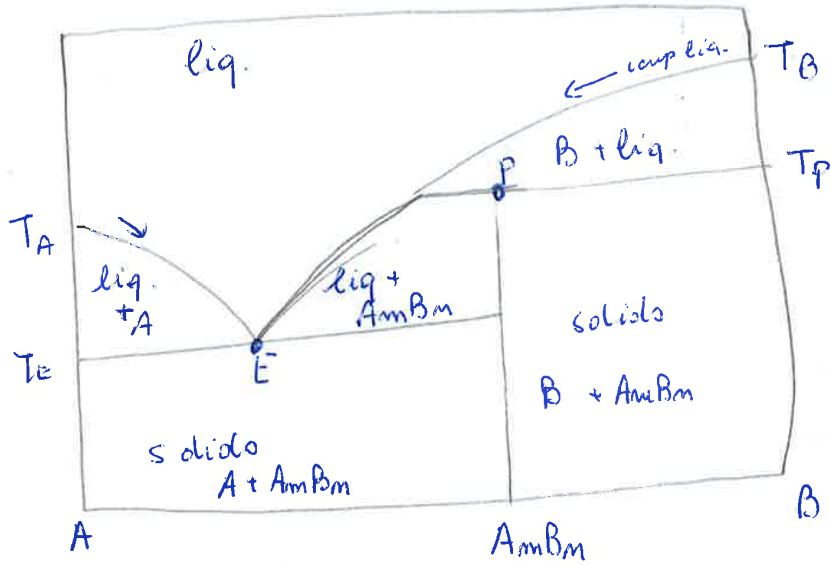
Al punto E:

$$\% X_{\text{liq}} = \frac{AM}{AE} \cdot 100$$

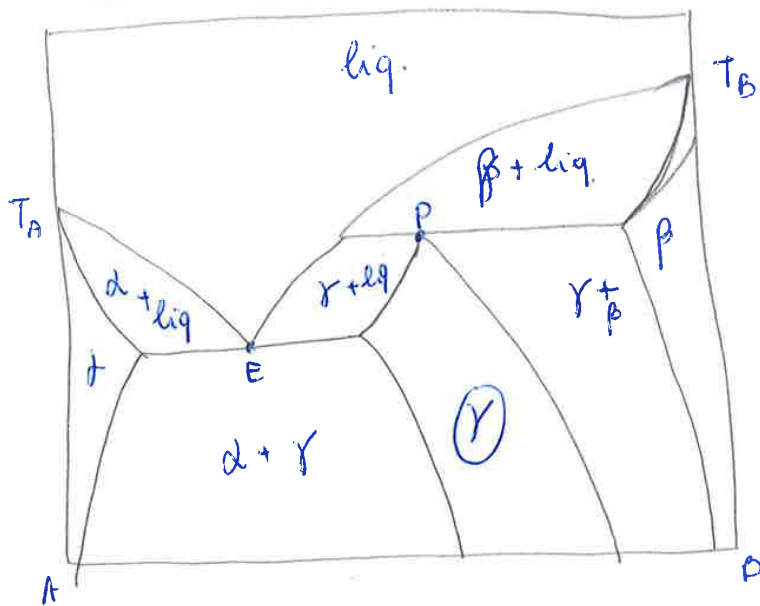
$$\% X_{\text{sol. A}} = \frac{ME}{AE} \cdot 100$$

- COMPOSTO INCONGRUENTE

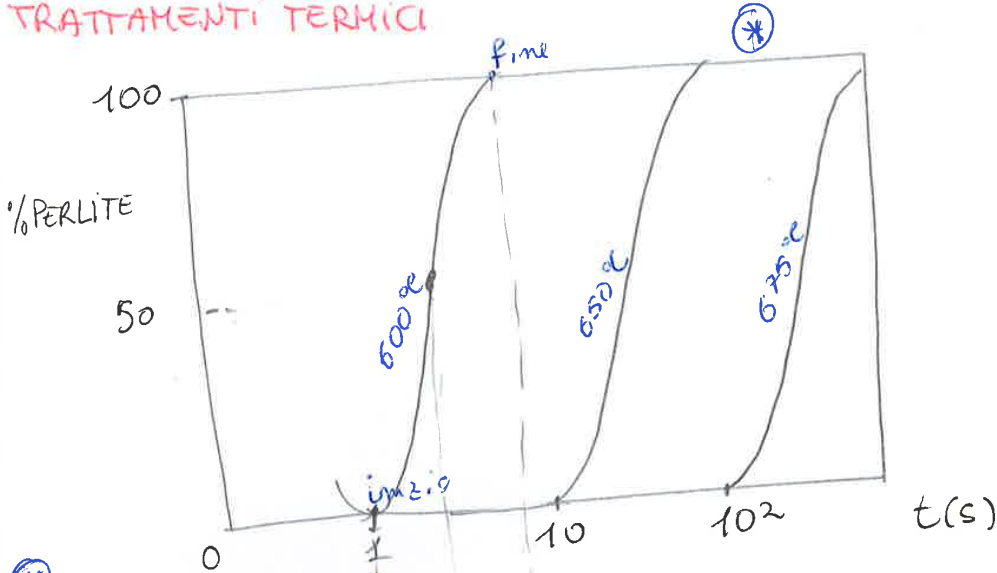
(quando la fusione avviene a  $T$  variabile) e il liquido e il solido hanno composizioni diverse da quelle di partenza.



- INCONGRUENTE IN PRESENZA DI  $\gamma$

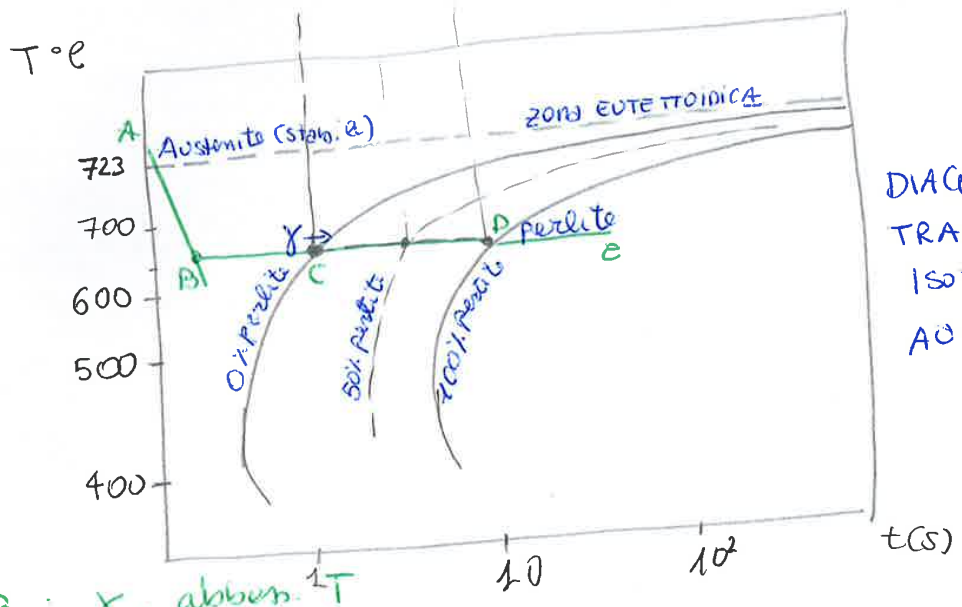


# TRATTAMENTI TERMICI



EUTETTOIDI  
( $C = 0,81\%$ )

⊛ ZONA EUTETTOIDE

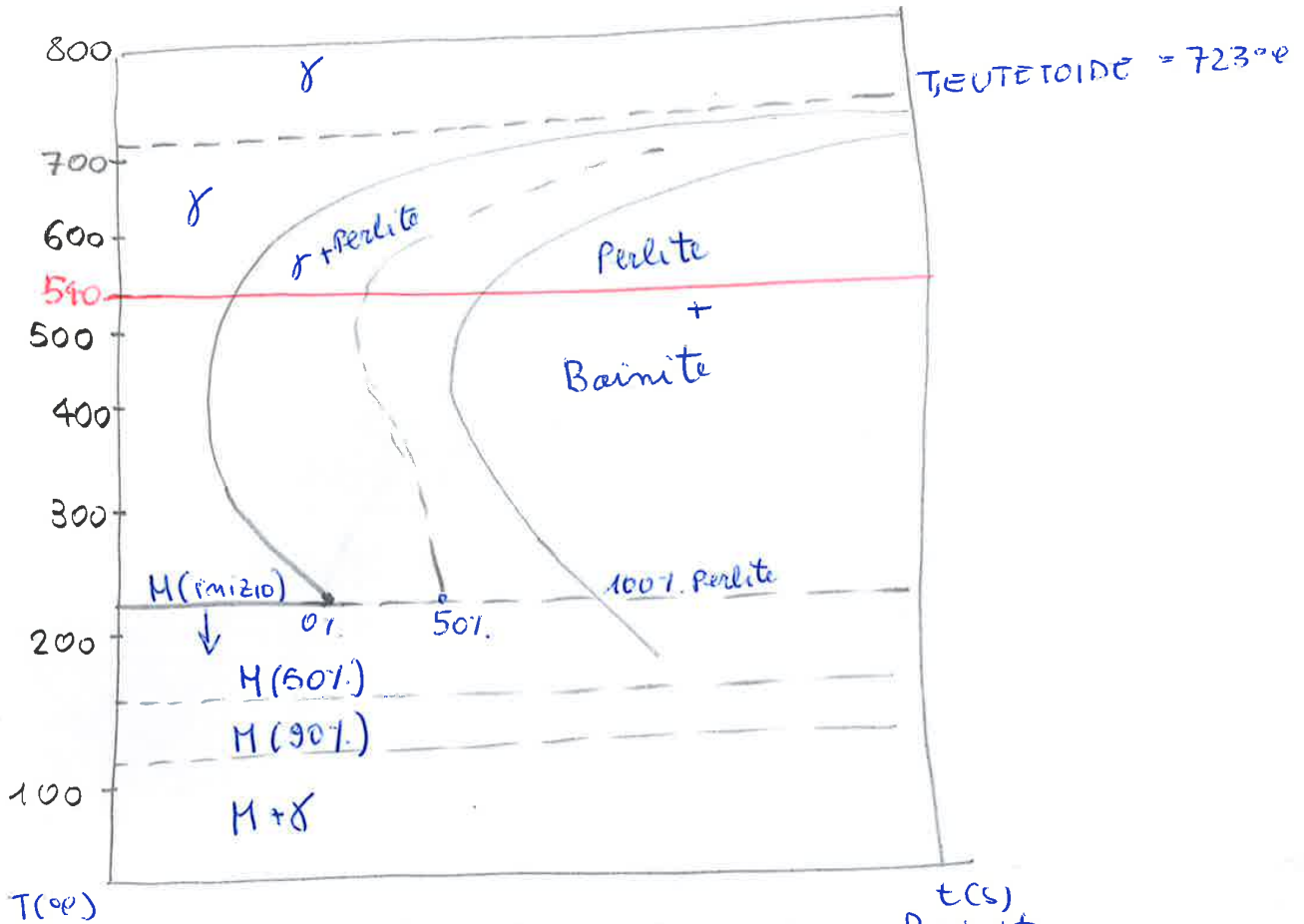


DIAGRAMMI DI TRASFORMAZIONE ISOTERMICHE:  
AUSTENITE ( $\gamma$ ) - PERLITE

- AB :  $\gamma$ , abbass. T
- BC :  $\gamma$ , T cost.
- CD : trasf.  $\gamma \rightarrow$  Pearlite T cost
- DE : Pearlite.

# TRAS. ISOT. PER ACCIAI COMPLETO.

3

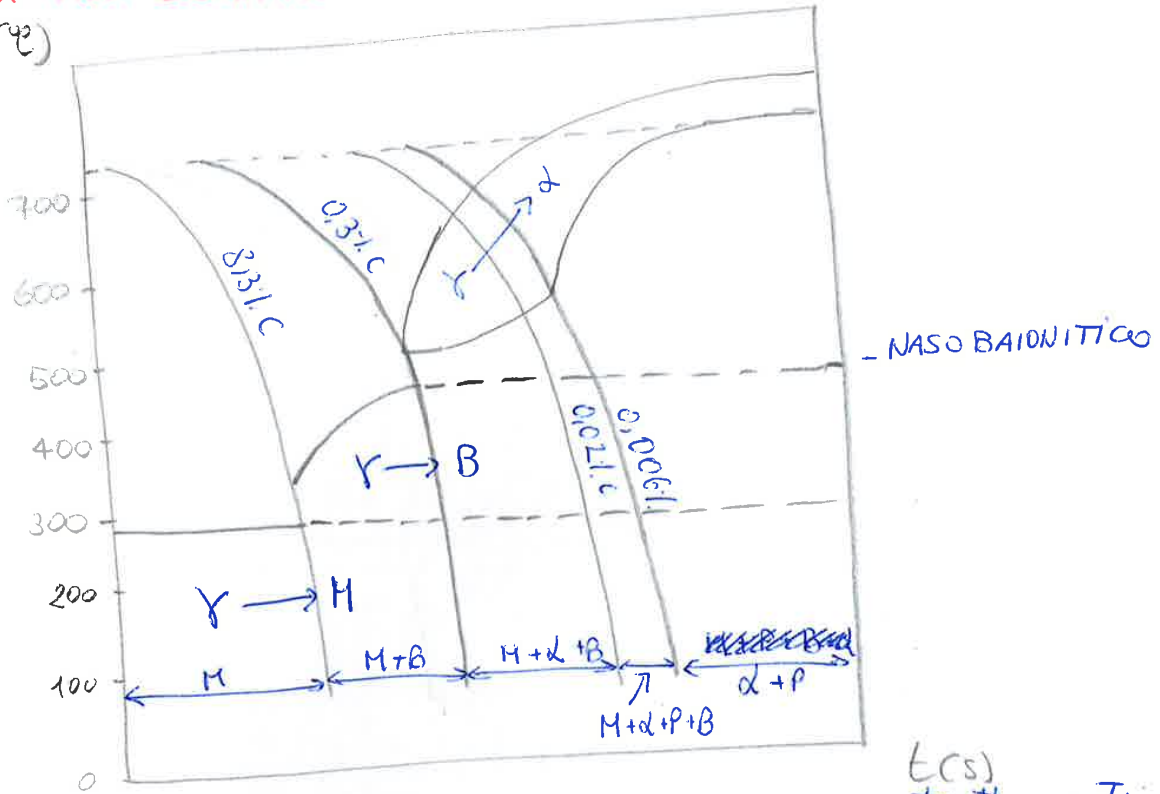


Raffreddando a  $T < 540^\circ\text{e}$   $\Rightarrow$  formazione Bainite  
 a  $T_{\text{AMBIENTE}} (T < 200^\circ\text{e}) \Rightarrow$  MARTENSITE  
 TEMpra

Questi tipi di diagrammi valgono per raffreddamento istantaneo e mantenimento ad una certa T.

DIAG. ACC. LEGATI

T(°C)



Con gli acciai legati si abbassano i tempi dei trattamenti