



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 839

DATA: 25/02/2014

A P P U N T I

STUDENTE: Chirico

MATERIA: Scienza e Tecnologia dei Materiali + Eserc.

Prof. Biamino

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

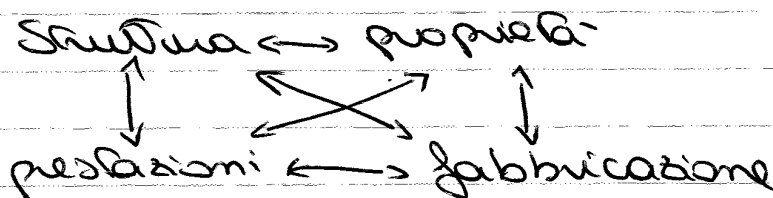
Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica 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.**

Scienza e Tecnologia dei Materiali

Lezione 1: Intro / Legami

Studio relazionale:



Classificazione

- 1) Metalli contengono elementi metallici, atomi sono ordinati, rigidi, duttili, conduttori calore / elettrici, opachi, inossidabili
- 2) Ceramica metallica + non metallica, hanno strutture cristalline che ammorfe, rigidi, fragili, isolanti, resistenti ad alte T e a corrosione
- 3) Polimeri composti con C, possono contenere anche H, O, N, S, Si... duttili, non rigidi, bassa ρ , isolanti, strutture semicristalline o amorfe
- 4) Compositi unione di 2 o + tipi precedenti

Proprietà dei Materiali

- fisiche {
- 1) meccaniche: risposta alle sollecitazioni; resistenza, rigidità, durezza
 - 2) termiche: collegate a trasm. calore; espansione termica, conducibilità
 - 3) elettriche e magnetiche: risposta a campi elettromagnetici, conducibilità
 - 4) ottiche: assorbimento / trasmissione / diffusione luce

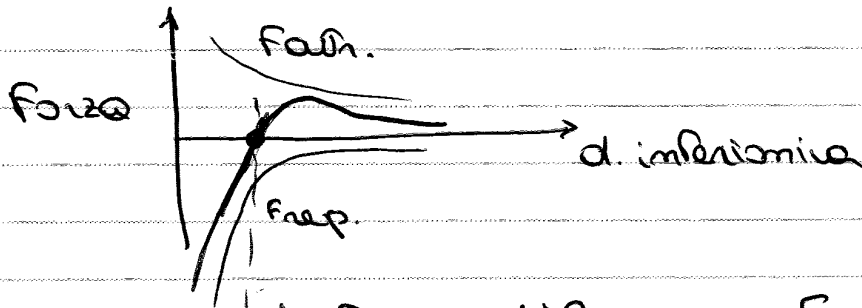
Primari

▶ Ionico Metallo + Non Metallo, grande diff. elettronegatività

$M^+ \quad e x^-$
 con una e^-
 non direzionale
 per attrazione coulombiana
 Ceramici

MgO

→ formazione reticolo cristallino ordinato che dia neutralità elettrica
 forza di legame:



distanza di legame $F_{attr} = F_{repul}$

$$F_{repul}: -\frac{b}{a^m}$$

a: distanza fra ioni

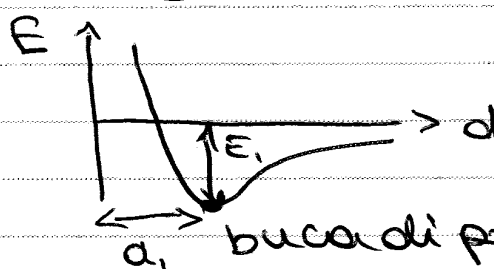
m, b: costante

$$F_{attr}: \frac{z_1 z_2 e^2}{4 \pi \epsilon_0 a^2}$$

forza coulomb.

$z_1, z_2: n^{\circ} e^-$

Energia:



$$E = \int_{\infty}^a F_{attr} da$$

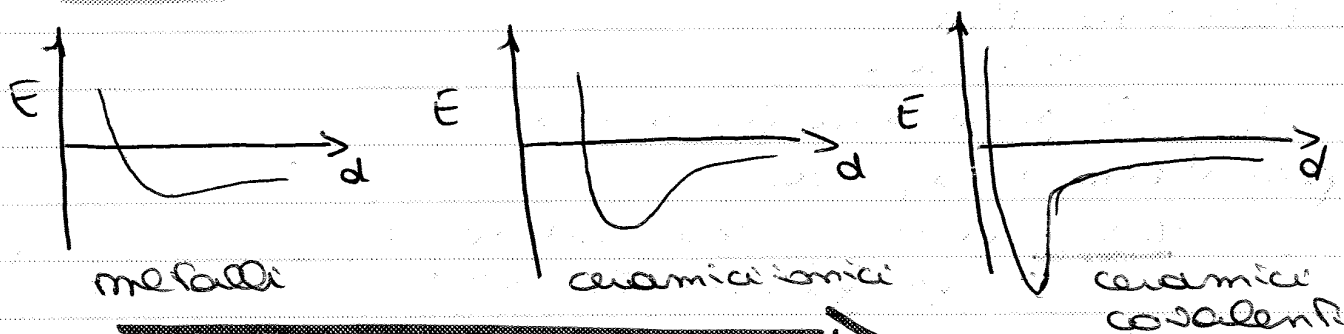
a: dist. legame

E_1 : energia legame

a_1 buca di potenziale

▶ Covalente bassa diff. elettronegatività e condivisi per raggiungere ottetto stabile.

Curve di Condoni-Howe



- * aumento E_{legame} / T_{fus} / rigidità / stabilità chimica
 * diminuzione esp. termica

Metalli

alta resistenza
 rigidi
 duri
 conduttori
 resistenti agli shock termici
 soggetti a corrosione e ossidazione
 facilmente lavorabili

→ elementi singoli

allo stato cristallino

→ di solito solidi a $T_{ambiente}$

→ danno origine a leghe

• Acciaio: C + Fe

• Bronzo: Cu - Zn

• Ottone: Cu - Sn

Ceramiche

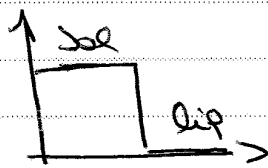
fragili
 difficilmente lavorabili
 duri
 rigidi
 isolanti
 refrattari resistenti alle alte T
 resistenti chimicamente

Lezione 2: cristalli / solidi amorfi

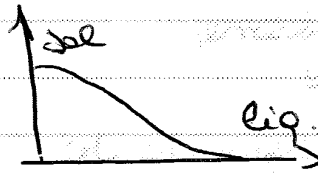
Classificazione materiali

- tipo legame
- struttura → cristallina (ordinata)
↳ amorfa (disordinata)
- proprietà
- applicazioni

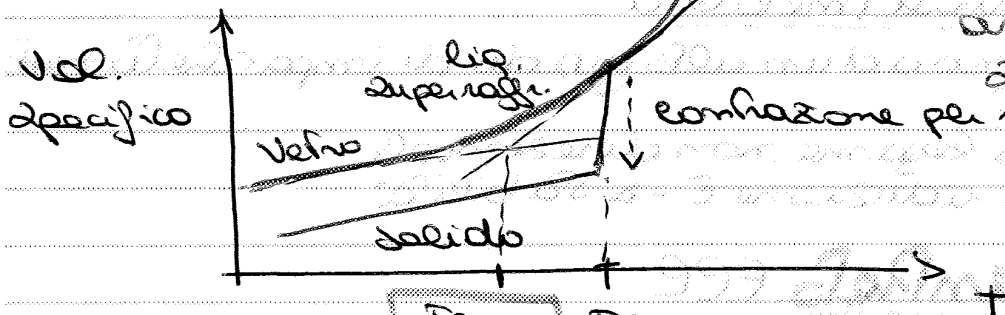
vetroceramiche e polimeri hanno strutture con posizioni disordinate



cristalli
T_{fus. definita}



amorfi
rammollimento progressivo
intervallo di rammollimento

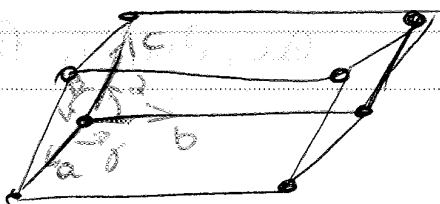


Temp. T_{fusion}
transizione vetrosa

→ per ottenerla faccio intersecare le due tangenti al liquido e al solido, prima e dopo l'intervallo di rammollimento.

materiale cristallino → atomi in posizioni geometriche ben definite

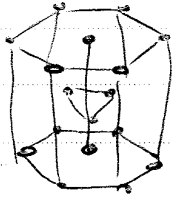
cella unitaria + piccola unità ripetitiva che descrive l'intero reticolo



a, b, c parametri di cella = LA
alpha, beta, gamma angoli di cella
variano con Temp. e applicaz. carichi

Esagonale compatto

EC



6 atom/cella
 $PA = 0,74$
 $n^{\circ} \text{coord} = 12$

Zn, Co, Ti, Mg

Polimorfismo / Allotropie

↳ 1 elemento, + strutture cristalline
 alcuni metalli cambiano struttura cristallina durante riscaldamento

↳ variazione nelle proprietà fisiche

0 ÷ 812 °C	α -Fe	CC	Ferro
812 ÷ 1384 °C	γ -Fe	CFC	
1384 ÷ 1538 °C	δ -Fe	CC	

0 ÷ 883 °C	α -Ti	CC	Titanio
883 ÷ T _{gu}	β -Ti	CC	

↳ uso queste variazioni per fare leghe con \neq proprietà

leghe meno lavorabili, resistenti ad alte T, forte anisotropia
 leghe β duttili, elevate prestazioni meccaniche

- Carbonio**
- ↳ Diamante
 - ↳ grafite
 - ↳ nanotubi
 - ↳ fullereni
 - ↳ grafene

Soliti Monocristallini / Policristallini

1) a singolo cristallo: perfetto ordine, celle con = orientazione

↳ forma geometrica regolare

Densità atomica

lineare: $\rho_e = \frac{n \cdot \text{atm. intersecati}}{\text{lung. linea}}$

planare: $\rho_p = \frac{n \cdot \text{atm. sezionati}}{\text{area}}$

volumetrica: $\rho_v = \frac{n \cdot \text{atm. per cella}}{\text{volume}} = \frac{\rho_{\text{atomico}}}{N_{\text{avog}}} \cdot \frac{\text{massa cell}}{\text{vol.}}$

piani / direzioni a + alta densità: sono + impo per atomi

Anisotropia e isotropia

- ↳ proprietà non varia al variare della direzione
- ↳ proprietà varia al variare della direzione
 polidispersi hanno ≠ orientamenti grandi, quindi abbiamo media proprietà

CC e FCC → piani di scorrimento → + duttili
 BC → piani di scorrimento → fragili

$\rho_{\text{metalli}} > \rho_{\text{ceramici}} > \rho_{\text{polimeri}}$

- ↳ impacchet. compatti + elevat. PA
- ↳ atm. leggeri, impacchet. - densi
- ↳ spazio amofi, elementi leggeri

Distanze fra piani

↳ = indici

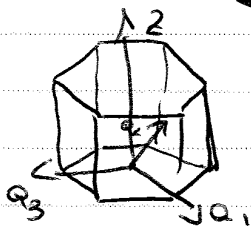
cella cubica

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

a: cost. reticolare

Reticoli esagonali

4000i

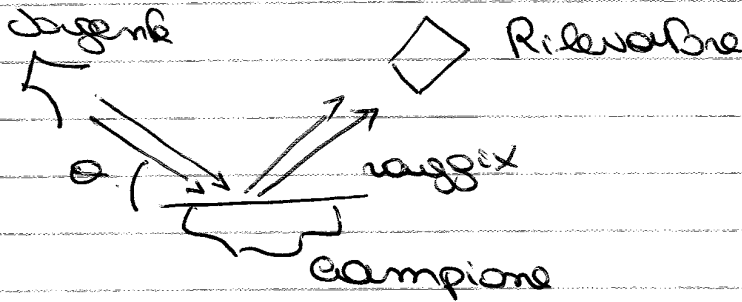


a_1, a_2, a_3 a 120° fra loro

z : \perp al piano a_1, a_2, a_3

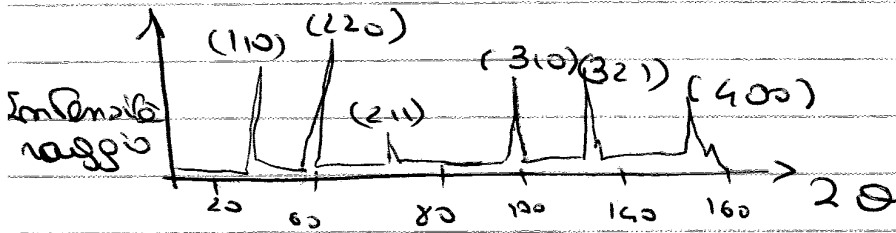
$[u, v, w]$ direz.

(u, v, w) piani



vario θ , nuovo \neq picchi
 \approx piani di risposta

ecc



Lezione 03: Difetti puntuali

difetti influenzano proprietà dei materiali

↳ confrontandoli ho materiali con proprietà nuove e diverse

- proprietà fisiche
- proprietà meccaniche
- proprietà tecnologiche

Difetti puntuali: irregolarità di dimensioni atomiche

- puntuali

- vacanze
- interstiziali
- sostituzionali

soluzioni solide / rafforzamento / diffusione

- lineari

↳ dislocazioni

deformaz. plastica / invecchiamento

- di superficie

↳ grain boundaries

↳ superf. esterne

deformazione

- disordinata: stadiometria variabile
- ordinata: atomi solub occupano posti preferenziali

Precipitato: seconda fase

all'interno soluzione solida c'è una parte com:

- ≠ composizione
- ≠ struttura (includente)

• Soluz. solida interstiziale

atomi riempiono i vuoti interstiziali

basse concentrazioni, < 10%

atomi piccoli: H, C, N, O

Acciai: Fe-C aumenta prop. meccaniche Fe

δ CFC: 2%, max e

α CCC: 0,02%, max e.

} provoca com. que deform.

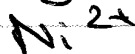
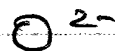
Composizione

W_0 : $\frac{m_a}{m_a + m_b}$
 fraz. massica

Z_a : $\frac{n_a}{n_a + n_b}$
 fraz. atomica

Soluz. solida nei ceramici

MgO + soluz. di Ni



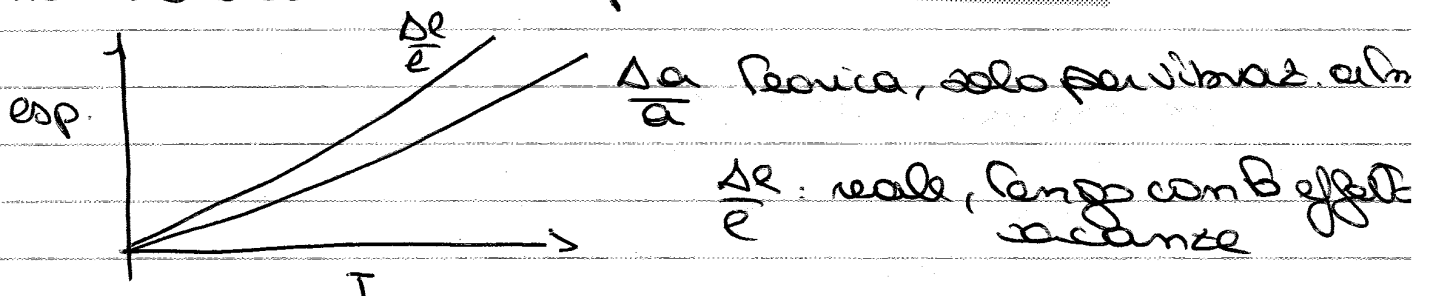
} devo stare attenti alla carica

con Ni^{2+} e Mg^{2+} posso sostituire 1:1, e posso Mg^{2+} e Al^{3+} , ogni 3 Mg^{2+} metto 2 Al^{3+} → vacanze

Vacanze \rightarrow difetti di equilibrio
 per 1 materiale, ad una T c'è un
 numero fisso di vacanze che
 rende minima l'energia del
 reticolo cristallino

$$N_v = N e^{(-Q_v / kT)} \quad Q_v = E_m \text{ per 1 vacanza}$$

hanno ruolo nell'espansione termica



Lezione 04: Diffusione solida

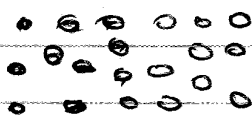
trasporto materia per modo atomi
 solidi \rightarrow per vacanze, migrazione di atomi
 \rightarrow interstiziale / sostituzionale

NB: in assenza di forze

• migrazione

interstiziale: senza forze agenti non avviene
 in direzioni preferenziali (causa diffusione)

gradiente di concentrazione

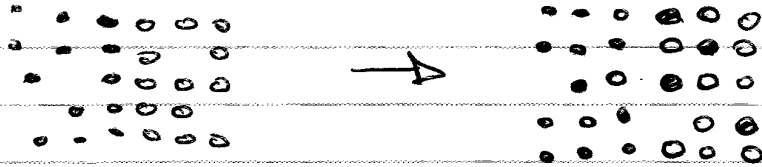


miscelazione deve avvenire
 e l'entropia



ogni step processo ha due attivazioni
 $\propto e^{-E_a / RT}$ formula tipo Arrhenius

• concentrazioni cambiano nel tempo
 flusso monodirezionale, funzione del tempo:



Soluzione 2^a legge dipendente dalle condizioni al contorno

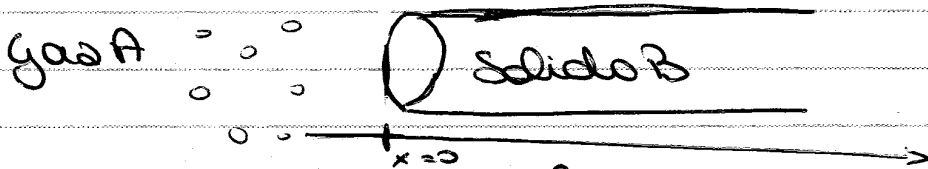
Amb1) $c = c_0$ a $r = r_0$ per $0 < x < \infty$

Amb2) $c = c_s$ a $x = 0$ per $0 < r < \infty$



diagramma specie in diff.

Esempio



- gas diffonde nel solido, mantenendo concentrazione c_s sulla sup.
- Nel solido, a dist. elevata dalla superficie la concentrazione è c_0 e rimane c_0

Ma $x=0$ e $x=\infty$ ci sono \neq concentrazioni che variano nel tempo

2^a legge di Fick data le condiz. al contorno (1) e (2)

$$\frac{c_s - c_x}{c_s - c_0} = \text{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

c_s : conc. alla sup. del gas in diffusione

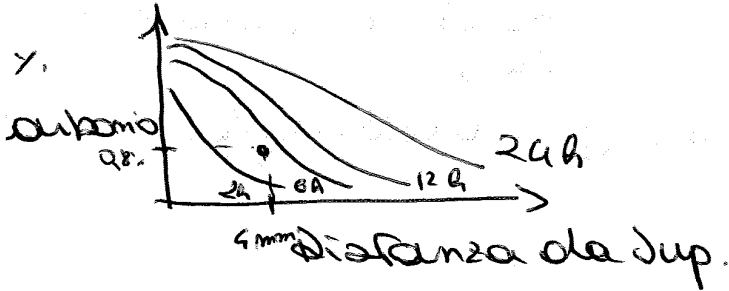
erf = funz. errore

D = diffusività

c_0 : conc. iniziale solido

Applicazioni

- cementazione / nitruazione superfici ingranaggi
 \rightarrow per aumentare la durezza

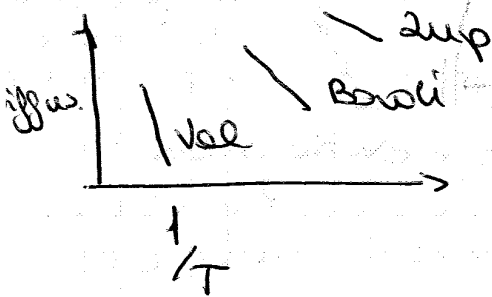


voglio a 4 mm, 0,8% C
 \rightarrow a meno circa 4 ore.

- diffusion bonding

Tipi di diffusione

- massiva nei volumi dei grani
- superficiale su superficie
- ai bordi di grano fra i grani



$$D_{surf} > D_{bordi} > D_{vol}$$

Lezione 05: Difetti superficiali e lineari

Difetti Superficiali

- superfici esterne

atomi che ne fanno parte non hanno max n° legami, sono reattivi

- bordi di grano

punti di separazione di due grani adiacenti

da 2 a 5 diametri atomici

legami disrotti, elevata reattività e diffusività

\rightarrow si può evidenziare con attacchi chimici, scavano preferibilmente bordi di grano

Inclusioni e precipitati influenzano proprietà meccaniche

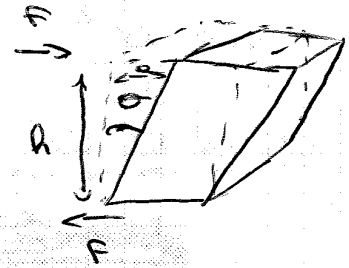
↳ seconda fase

- coerente = struttura cristallina del reticolo ospitante
- incoerente ≠ struttura cristallina, si usa bordi di grano

• pori e cricche:

- ↳ porosità aperta (in contatto con l'esterno)
- ↳ porosità chiusa (non comunicante con l'est.)
- + pori → - conducibilità termica

Lezione 06: Deformazione



forza → stato sollecitazione → deformazione

- σ (tensione) = F/A τ (sforzo) = F/A



trazione o compressione



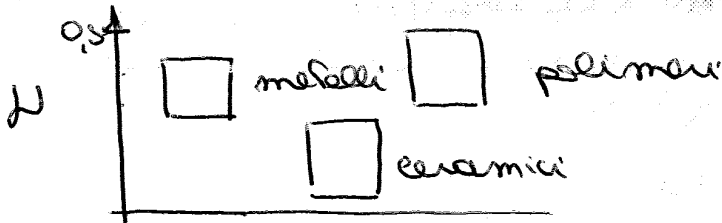
taglio

θ = angolo di taglio

compressione → σ nave
trazione → σ franke

Deformazione

- elastica: al termine dell'applicazione della forza il materiale torna alla forma originale
- plastica: al termine materiale è permanentemente deformato



materiale isotropo:

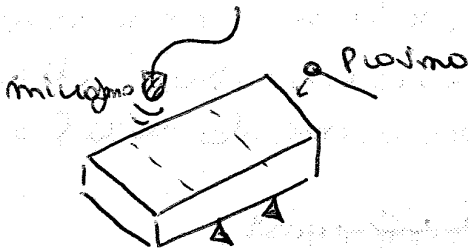
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Misura delle costanti elastiche

- misure dinamiche
- della velocità di propagazione delle onde sonore
 - ↳ Impulse excitation technique

$$v_{\text{suono in solido}} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

caso 1 frazione / compr.



Modulo Young

$$E = 9.8665 \cdot \left(\frac{m \delta^2}{W} \right) \left(\frac{e^3}{t^3} \right)^{-1}$$

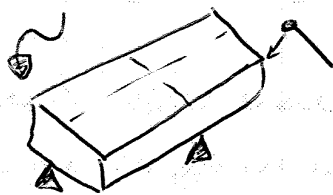
T: costante costruttiva

e: lung.

m: massa

w: larg.

caso 2 taglio



$$G = \frac{4 \delta m \delta^2}{W t} \left[\frac{B}{(1+A)} \right]$$

A, B: costanti costruttive

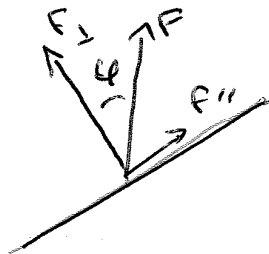
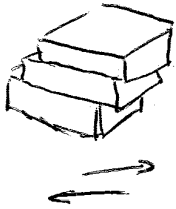
Mecanismo di deformazione plastica

↳ per scorrimento piani

cristallo perfetto: rottura di molti legami forti, ca 1000 / 10000 volte quella di un crist. reale

cristallo reale grazie alle dislocazioni che minor n° di legami da rompere

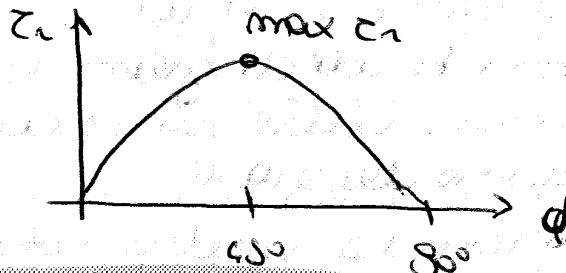
Linee di scorrimento per monocristallo



piano scou.

usando legge Schmid

- $\phi = 0^\circ$ $\cos \lambda = 0$ $F_{\parallel} = 0$ $\tau_c = 0$
- $\phi = 90^\circ$ $\cos \phi = 0$ $\tau_c = 0$ $F_{\parallel} = 0$
- $\phi = 45^\circ$ $\cos \phi \cos \lambda$ max



scorrimenb $\rightarrow \tau_c > \tau_c$ valore critico, immesca scorrimento

\hookrightarrow sforzo critico vs sforzo di aneuramento

sforzo critico τ_c è piccolo se:

- sistema scorrimentb efficiente
- legami chimici deboli
- materiale senza impurezze
- aumentb T \rightarrow τ_c \downarrow

Quanto meno direzionale \rightarrow τ_c \uparrow \rightarrow τ_c \downarrow

nei metalli sono tutti carboni, quindi le posizioni sono equivalenti, in ceramici ci sono carboni e anioni \rightarrow sono compat

\hookrightarrow è legame direzionale

Deformazione nei policristallini

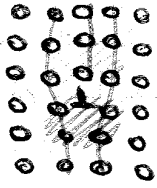
bordi di grano \rightarrow impediscono libero movimento di dislocazioni e scorrimenti piani

\neq grani tendono a deformarsi in direzioni \neq

policristallini sono \rightarrow resistenti alla deformazione; carico aneuramento maggiore

\hookrightarrow per deformare un grano orientato favorvolmente devb deformare anche quelli attorno.

Atmosfera di Cottrell

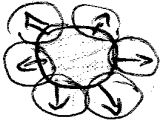


zona di tensione locale
equivalente a:



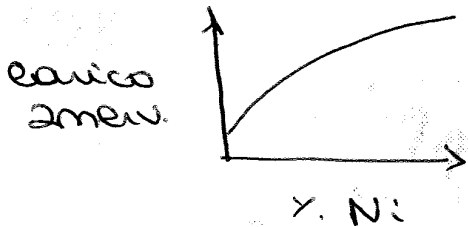
atomo sostituzionale
più piccolo

zona di compressione locale
equivalente a:

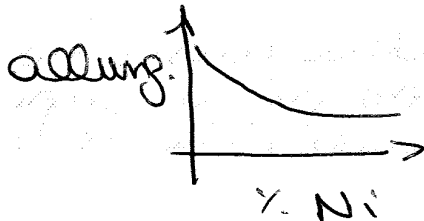


atomo sostituzionale più grande

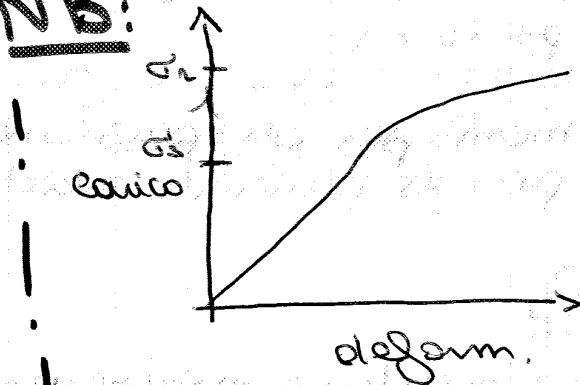
Legge:



$\sigma \propto \epsilon^{1/2}$ e concentrazione

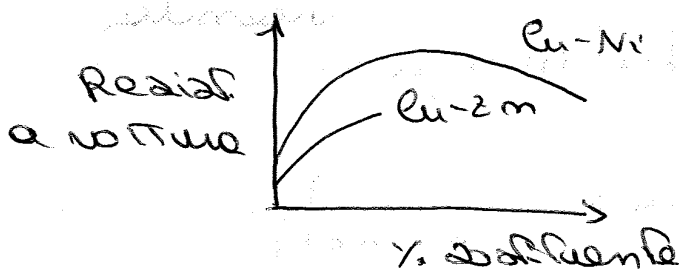


NB:



σ_s : carico amevame
dopo inizia de
formazione
plastica

σ_r : carico di rottura
materiale si romps

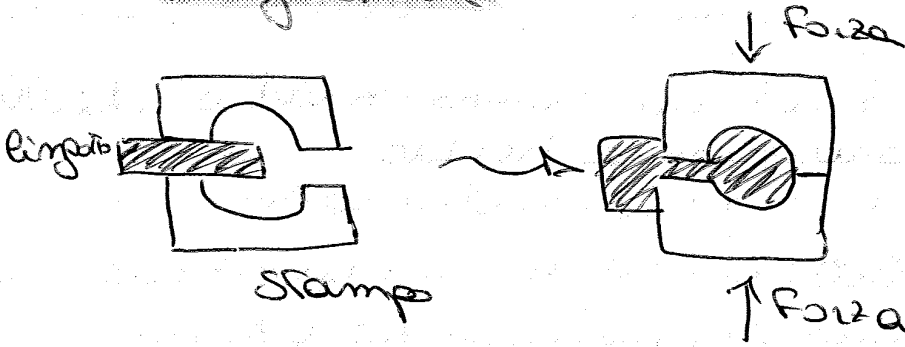


atomi ≠ hanno effat.
≠ sulla resistenza

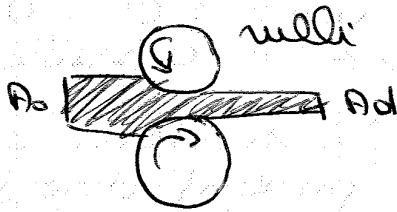
Dipende dalle dimen
sioni, dalle interazioni
chimiche / elettriche.

Lavorazioni a freddo

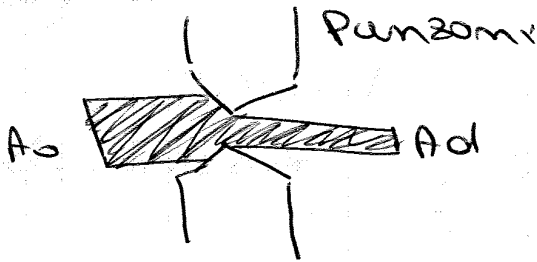
▶ Forgiatura



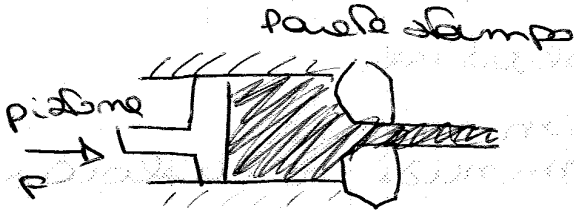
▶ laminazione



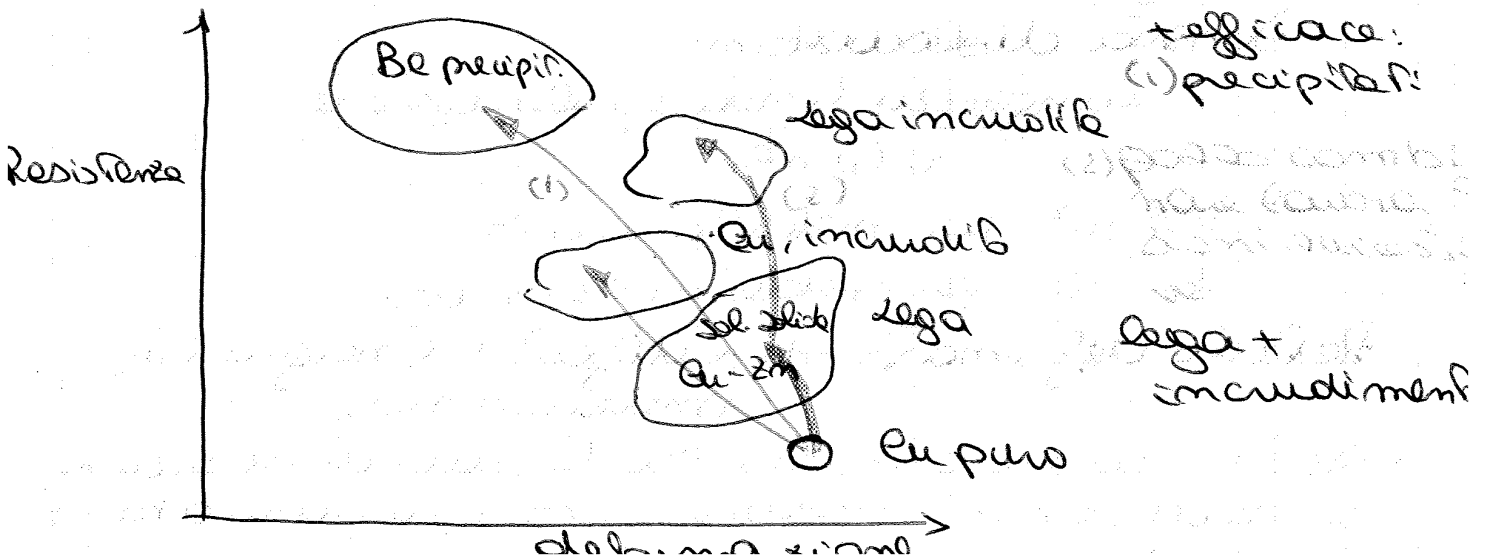
▶ Profilatura



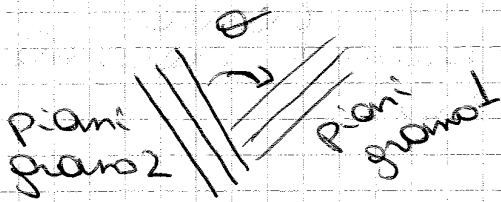
▶ Estrusione



Ranking fenomeni rafforzamento



Bordi di grano \rightarrow basso angolo: + di dislocazioni a spigolo impilato
 \leftarrow all'angolo $\theta > 20^\circ$
 zone con struttura semi amorfa
 2 reticoli molto vicini l'uno rispetto all'altro



bordi a basso angolo si formano dopo trattamento termico di recupero

Ricristallizzazione

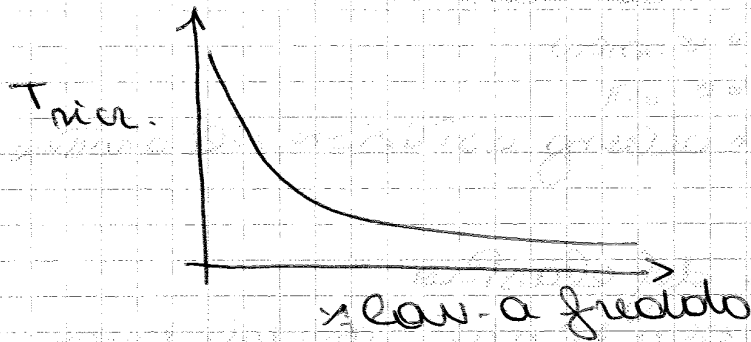
alzo ulteriormente la T

nascono nuovi grani equiaxiali che crescono in dimensioni

- \rightarrow aumento duttilità
- \rightarrow diminuisce resistenza

vicino ai bordi di grano si formano nuovi grani cristallini

NB: alcuni materiali hanno temp. ricristallizzazione $<$ temp. ambiente, si deve stare a T inf alla loro temp. di applicazione

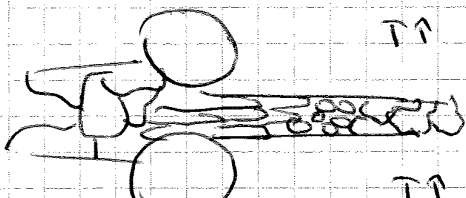


+ è lavorabile a freddo
 - sarà la temp. a cui ricristallizza

se aumento T, \downarrow temp. necessario ricristalliz.

poss. inoltro, recupero o ricristallizzazione adeguando lavorazione a caldo.

- Fragilizzazione
- Estrusione
- Forgiatura
- Laminazione



$T \uparrow$ grani equiaxiali
 \leftarrow grani uniaxiali
 \leftarrow grani equiaxiali
 $T \uparrow$

possibile ricavare E da curve Condor-Morse

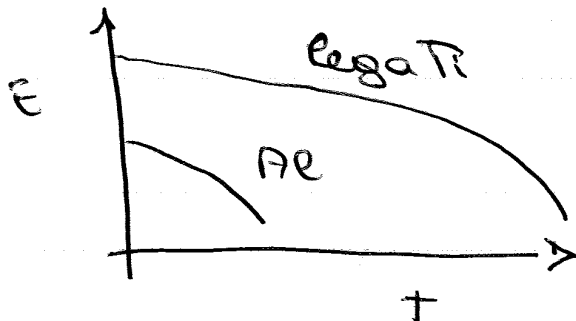
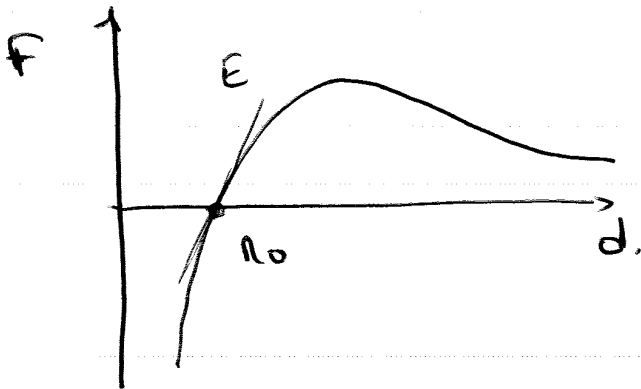
$$E = \rho g \text{ imr}^2$$

NB: E cambia con la T
[G Pascal]

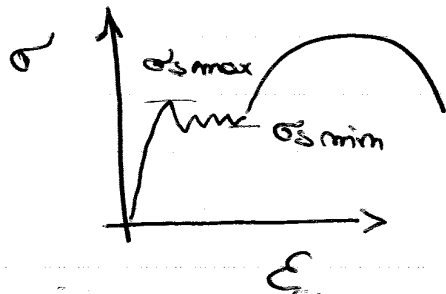
Al_2O_3 : 370 GPa
 T_{fus} 2045 °C

Pb : 14 GPa T_{fus} 327 °C

$$E \propto T_{fus}^2$$

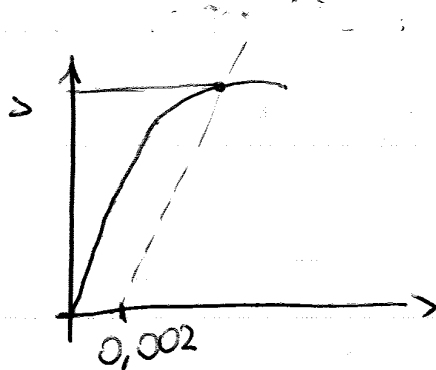


$E \downarrow$ as $T \uparrow$



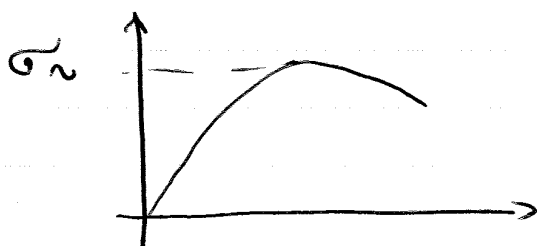
carico incrementale

all'inizio, $\sigma_s \text{ max}$, def. si realizza localmente, poi si propaga con bande di def. (colli stadi)



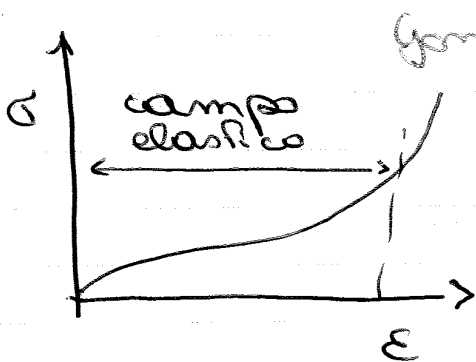
a volte non riesco a vedere bene σ_s ,

lo prendo allo $\sigma_p >$ def. plastica



carico rotture
p0 max curva
ingegneristica

elastomeri



Gomma tenera

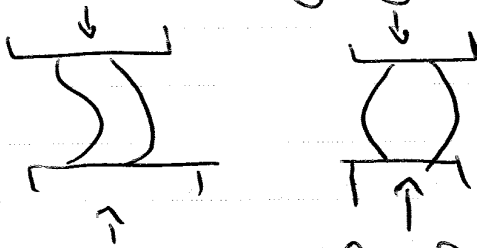
1° stato: catene si stendono, prima erano aggrovigliate, legami v.v. w.

2° stato: interessa legami cov. di v.v. + v. per picoli ε

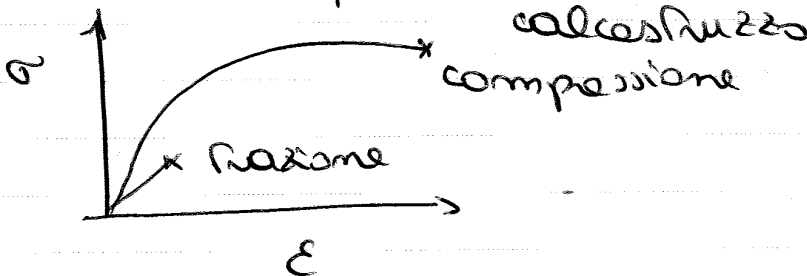
prova trazione sifa con mat. duttili

Prova di compressione

sifa con mat. fragili, causa di rottura provino.

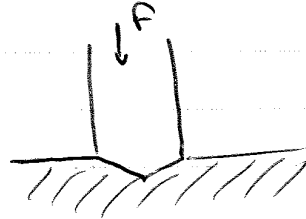
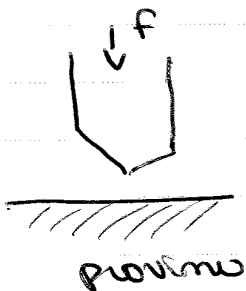


difficile interpretazione



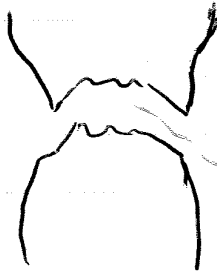
Prova di durezza

capacità del materiale di resistere alla deformazione da parte di un indente che, carico statico



lascia impronta

- si propaga rapidamente.
- duttile
- fibroso e opaco

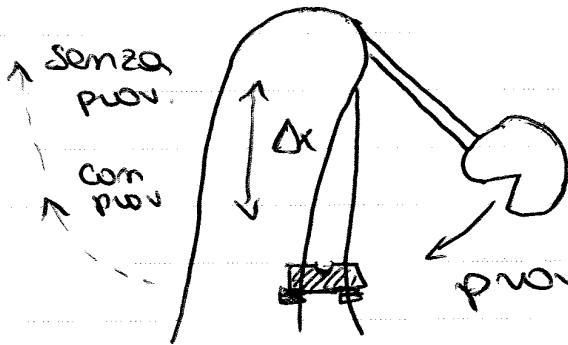


- fratt. cupo-cono
- piano a 45°
- + E di fratt. fragile

Prova di Resilienza

E' che assorbe un materiale prima di rompersi

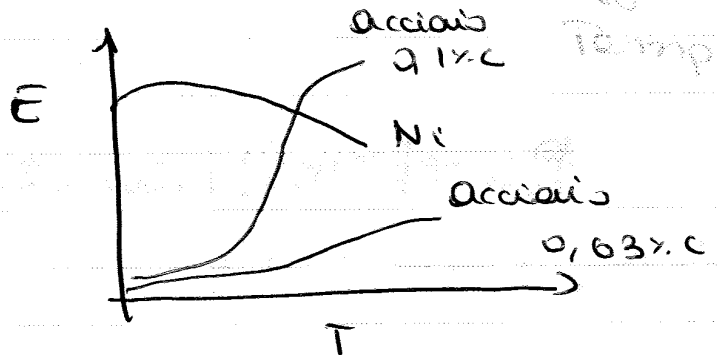
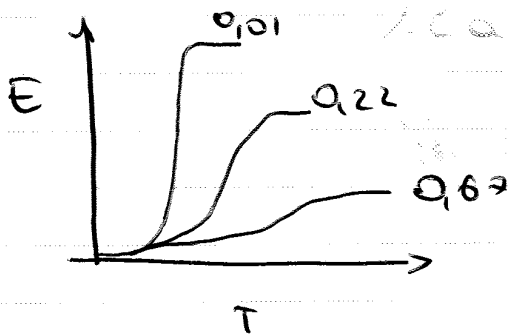
pendolo Charpy



$$E = Mg \Delta x$$

M: massa provino

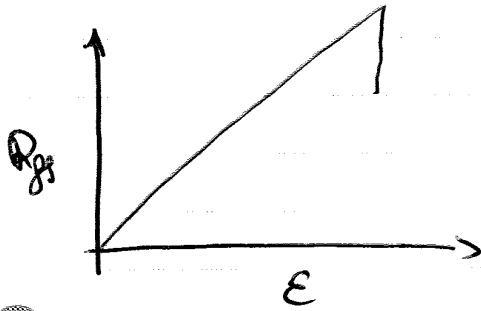
provino già intaccato



c'è una Temp. di trans. fragile-dura

Resistenza al Creep

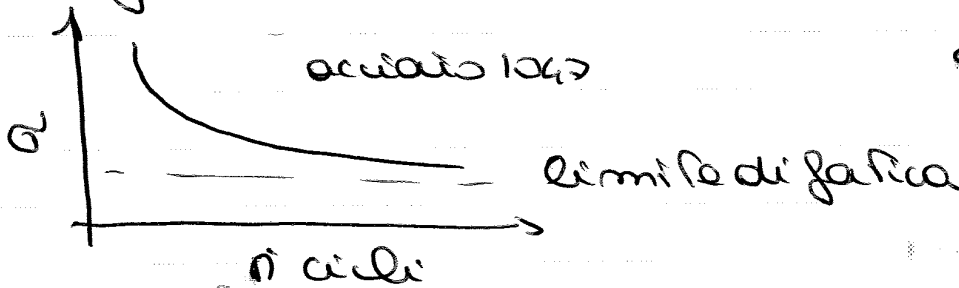
$T \geq 0,4; 0,5 T_{fus}$, def. subita con carico statico < di snottura



Prove di fatica

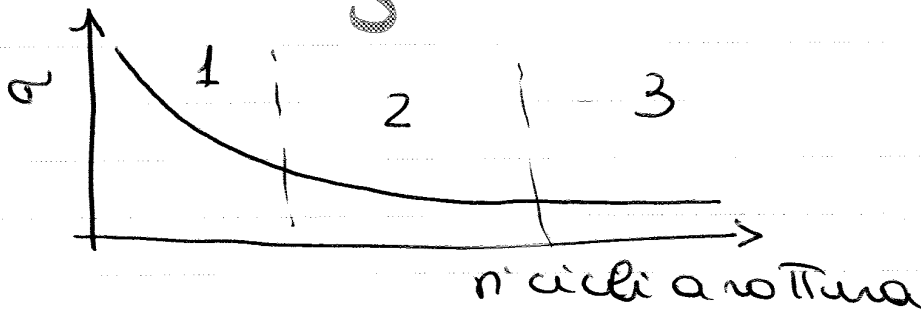
- a trazione alternata
- a flessione rotante

Resistenza agli sforzi ciclici



cedimento inizia con cricca superficiale, poi si propaga con bande di fatica

Resistenza è influenzata da condiz. superficie
diagramma Wohler



1ª regione $0 \div 10^4 \div 10^5$ cicli

materiale oltre limite elastico - si verificano
fatica a basso numero di cicli $\sigma < F$
(oligociclica)

2ª regione $10^{4,5} \div 10^{6,7}$

materiale lavora campo elastico
 $\sigma \ll \sigma_{amm.}$

► Quando embr. diventa nucleo stabile?

- $T < T_g$ solido e' + stab. liquido, formaz. stab. con forma minimuz. E libera ΔG_V
- formaz. superf. separazione richiede w
 δ : tens sup.

Supp. nucleolembri. sferico raggio r .

$$\Delta G_T = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot \Delta G_V + 4 \pi r^2 \gamma$$

< 0 , confab.
formaz. solido + stab. lip.

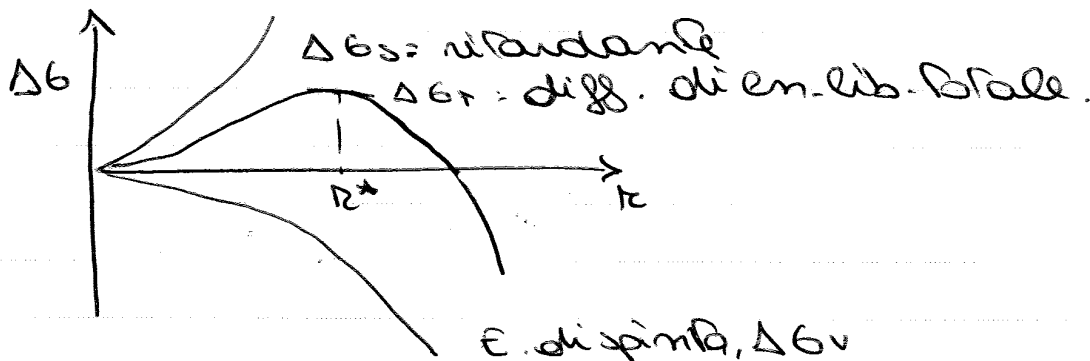
> 0
Tensione sup dovuta a interfaccia e separazione

$\Delta G_T > 0$ embrione

$\Delta G_T < 0$ nucleo

dipende dal tipo di sol., da T e da r .

è nucleo stabile se $r > r^*$ (critico)



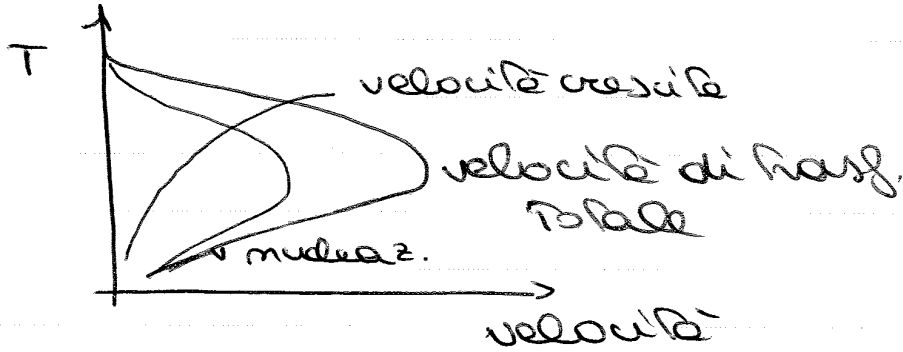
$$\frac{d(\Delta G_T)}{dr} = \frac{d}{dr} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_V + 4 \pi r^2 \gamma \right)$$

$$r^* = - \frac{2 \gamma}{\Delta G_V}$$

$$\Delta G^* = \frac{16}{3} \frac{\pi \gamma^3}{(\Delta G_V)^2}$$

Eq. per la nucleazione

velocità di trasformazione totale:



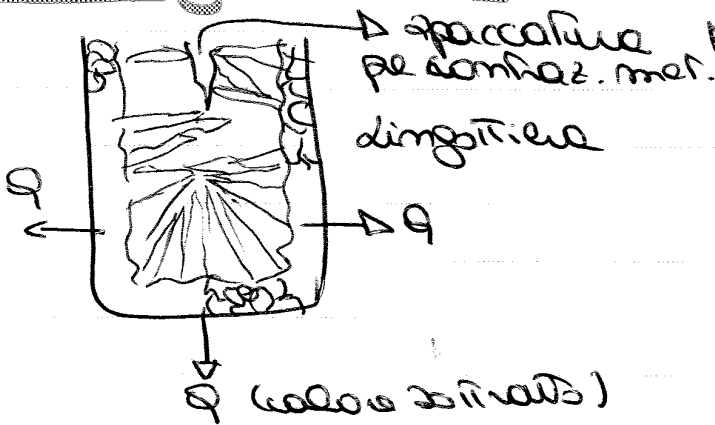
- T alte, cristalli pochi e grandi
- T basse, molti crist. piccoli

Nucleazione Eterogenea

con agenti che diminuiscono T_{ms} sup.

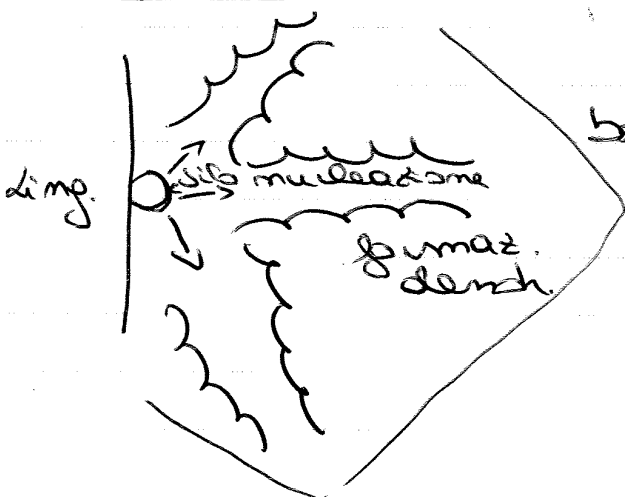
- parti dello stampo
- impurezze solide nel bagno fus
- ↳ germi di solidificazione

Solidificazione



- ▶ vicino a pareti: grani equiaxiali, fini
- ▶ all'interno: grani columnari, si sviluppano in direz. sottraz. calore.

▶ Dendriti ≠ pianilamno ≠ v. accrescimento

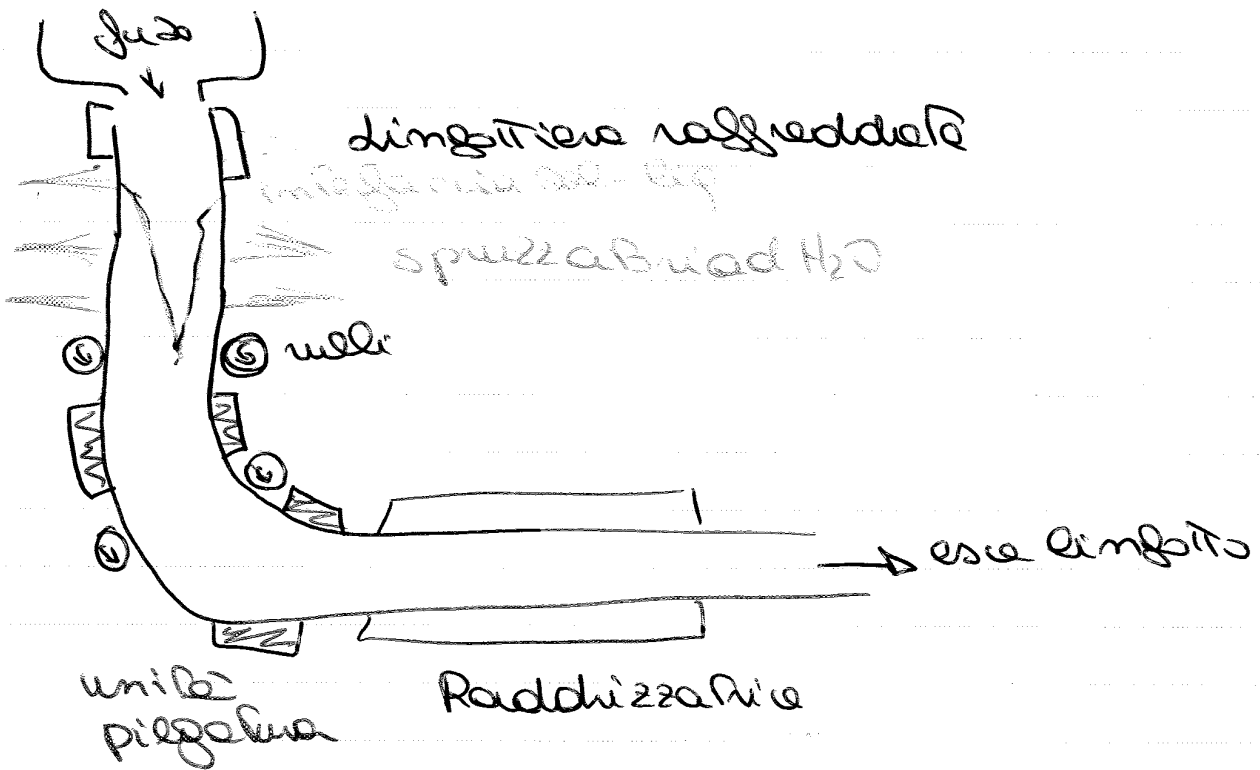


$$SDAS = k \tau_s^m$$

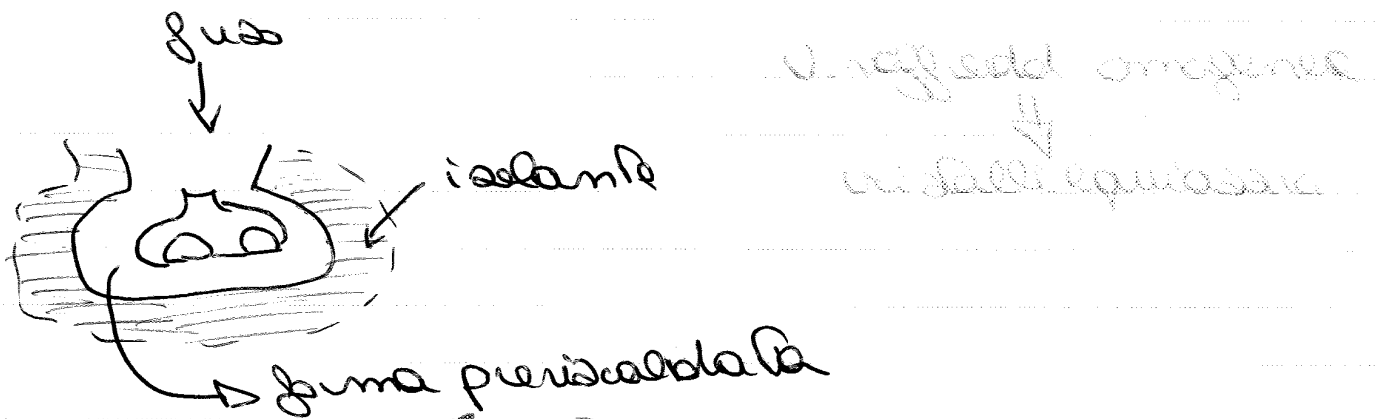
SDAS: secondary dendrite arm spacing

k, m: cost. del met.
 τ_s : tempo solidific.

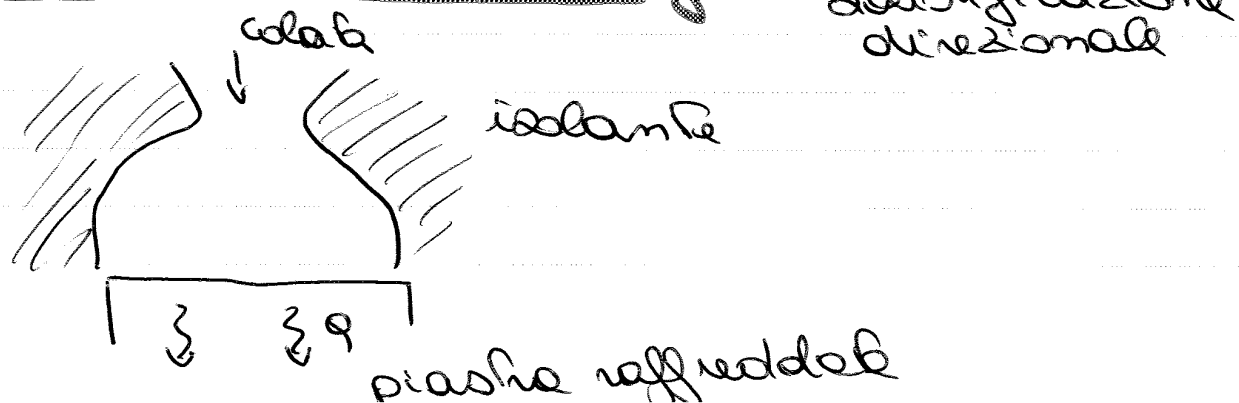
Colata continua



Policristalline Casting



Directional Casting

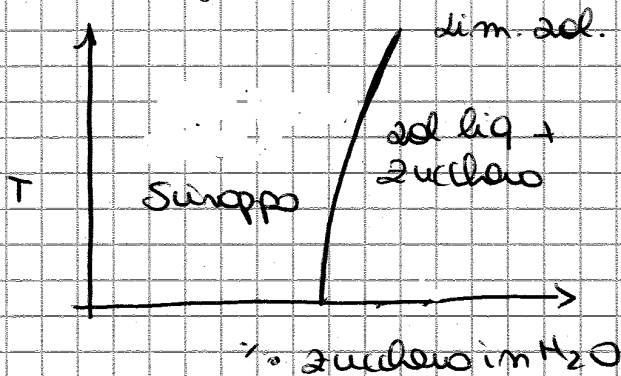


Diagrammi di fase

fase: è una porz. omogenea di un sistema, con caratt. chimico-fisiche uniformi

soluz. solida \rightarrow 1 fase

◦ limite di solubilità:



dopo questo limite abbiamo 2 fasi: 1 sol e 1 liq. che è zucchero monosol.

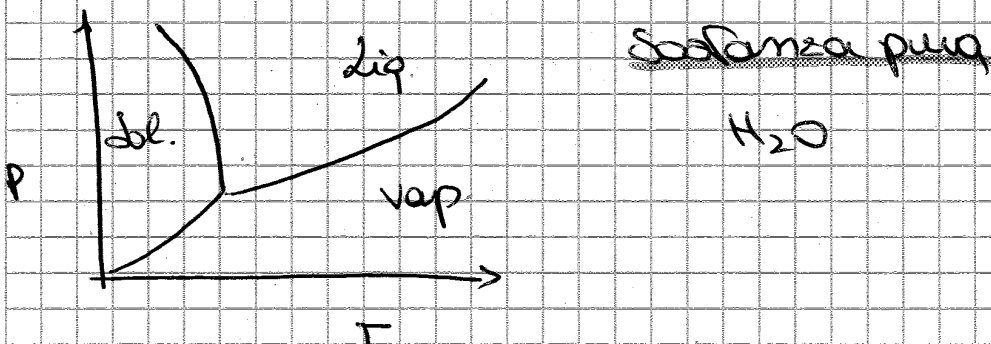
Diagrammi di fase

descrive quanto / quali fasi al variare di $p, T, \text{comp.}$

Sono validi in eq. termod. raggiunti.

posso:

- det. n° e tipo fasi al variare di T e comp.
- $p.$ relative fasi
- conoscere T_{fus} delle fasi



Regola Gibbs:

$$V = E - \phi + F$$

V : varianza, n° gradi libertà

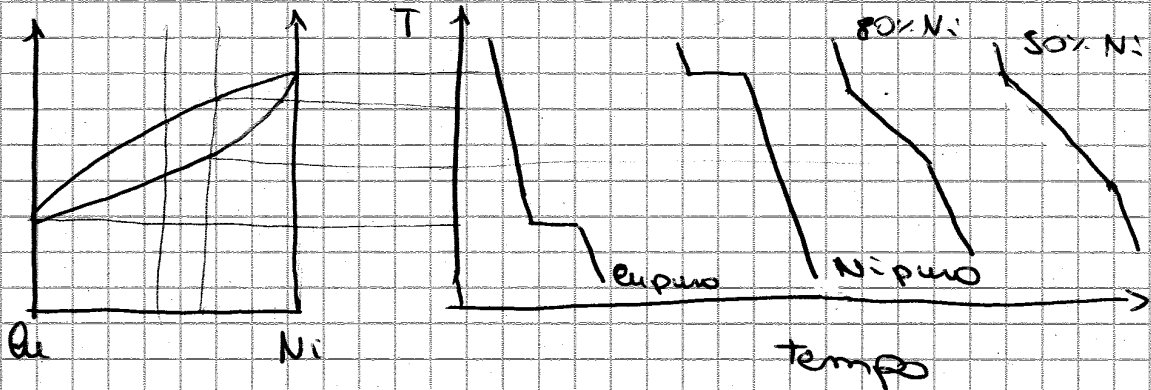
E : n° comp. chim. indep.

ϕ : n° fasi

F : n° fattori fisici ad us.

--	--	--

Curve raffreddamento



curve per una soluzione solida, c'è area di cambio fase in cui T scende

→ ad esempio di composti vicini la legge binaria eomorfica

↳ seguono 4 regole Hume-Rothery

- ≈ raggio
- ≈ valenza
- bassa Δ elettroneg.
- $\frac{r_1 - r_2}{r_2} < 15\%$

→ può generalizzare ai ceramici

Raffreddamento veloce

non c'è tempo per diffusione dal solido

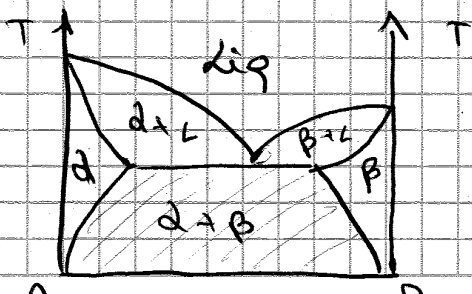
struttura a sfarfalla

↳ deve essere omogeneizzabile

cristallo monomegneo, ≠ composiz. nei ≠ sfar.



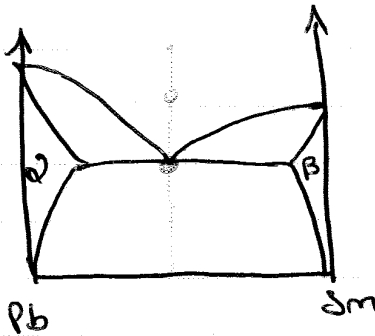
2) Parziale solubilità allo stato solido

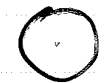



Es: Ag-Cu

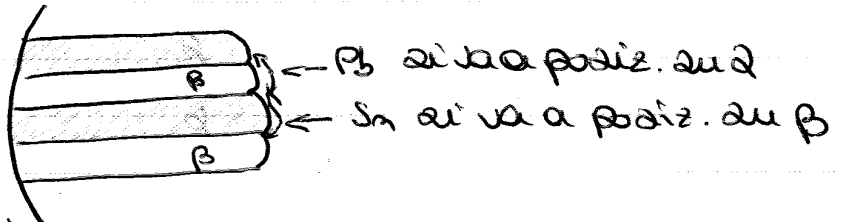
zona bifasica, 2 fasi solide distinte, α e β

Microstruttura eutetica



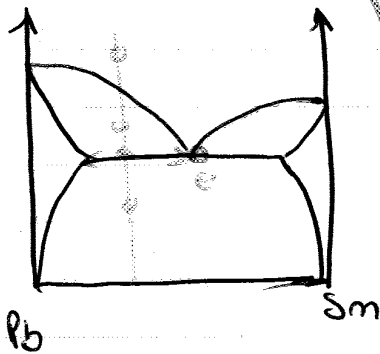
-  liquido
-  struttura eutetica
complet. alternat.





processo di ridistribuzione di Sn e Pb avviene per diffus. nel liq. all'interfaccia sol-liq.



$T < T_{eut}$ → diffusione allo stato solido

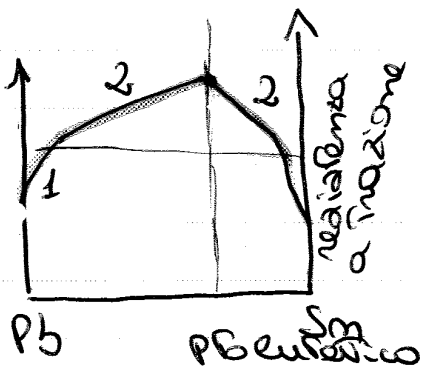
concentrazione ipoeutetica



-  liq
-  liq + crist. α
-  poco prima T_e , concrist. α
-  crist. di α primario + strutt. eutetica

→ struttura a specchio se conc. ipereutetica

→ rafforzamento struttura alternata compend. un rafforzamento, a una linea superf. di interfaccia

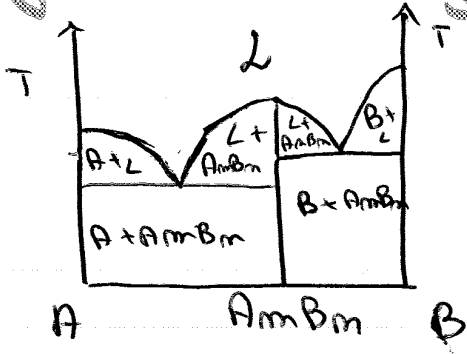


- 1) rafforzamento per soluz. solide
- 2) rafforzamento per dispersione multifase - fragile e bassifondenti

Composti Intermedi

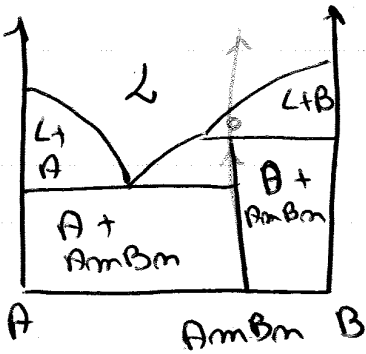
↳ intermetallici tra due elementi metallici.

• fusione congruente

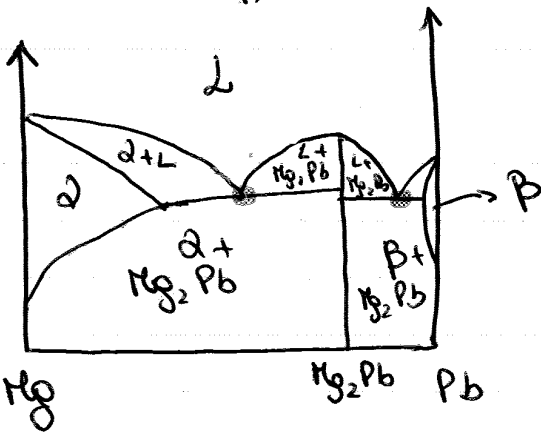


$A_m B_m$ comp. intermedio al riscaldamento origina liq. con \pm composiz.

• fusione incongruente



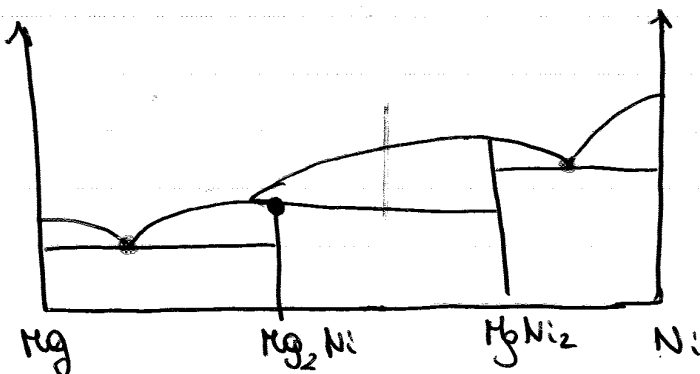
fus. di $A_m B_m$ non origina liquido con \pm composizioni
 ↳ entra in campo bifasico con trasformazione peritettica



Pb molto solubile in Mg
 Mg poco solubile in Pb

Mg₂Pb ha fusione congruente

- pr. eutettici
- $\alpha + Mg_2Pb \rightarrow L$
- $B + Mg_2Pb \rightarrow L$



- pr. eutettici
- MgNi₂ : fus. congruente
- Mg₂Ni : fus. incongruente
- pb peritettico

Cap 11: Mat. metallica

Caratteristiche:

- Duttili
- Resilienti
- Conduttori
- Tgus. variabile.

Produzione:

- ↳ fonderia
- ↳ def. plastica {
 - ↳ forgiatura
 - ↳ laminazione
 - ↳ estrusione
- ↳ Sintetizzazione (metallurgia delle polveri)
- ↳ Apposizione mondo

leghe → ferrose
 ↳ non ferrose.

leghe ferrose

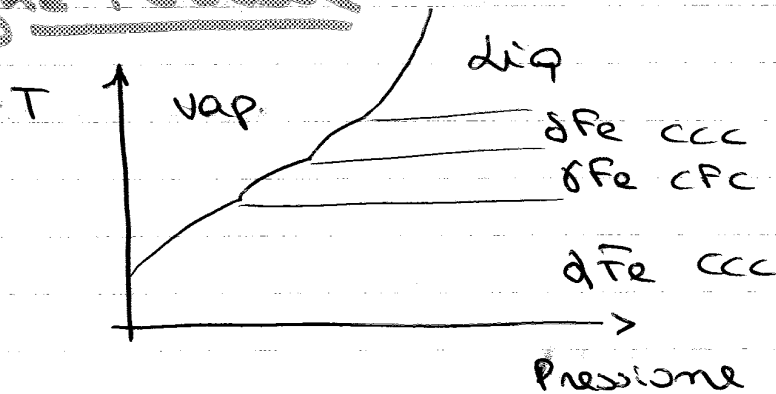
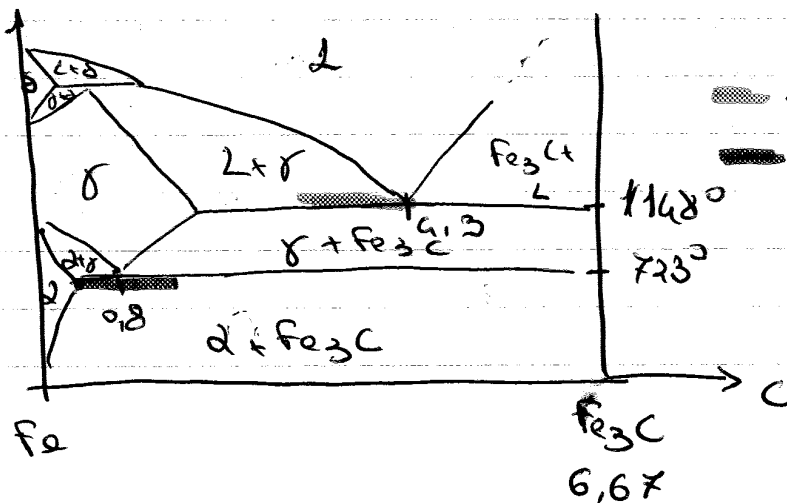
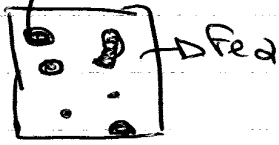


Diagramma di JvF:
 Fe puro



0.03 Fe - Fe₃C
 - : ghisa Fe + 3-4% pC
 - : acciaio al C, Fe + 0,03 - 1,2% pC

• ghisa duttile: $Fe(a) + Fe_3C + Mg \Rightarrow Fe(a) + grafite$
 grafite a forma sferoidale



380-480 MPa - res. a trazione

• valvole, corpi, pompa, alberi

• ghisa vermicolare:

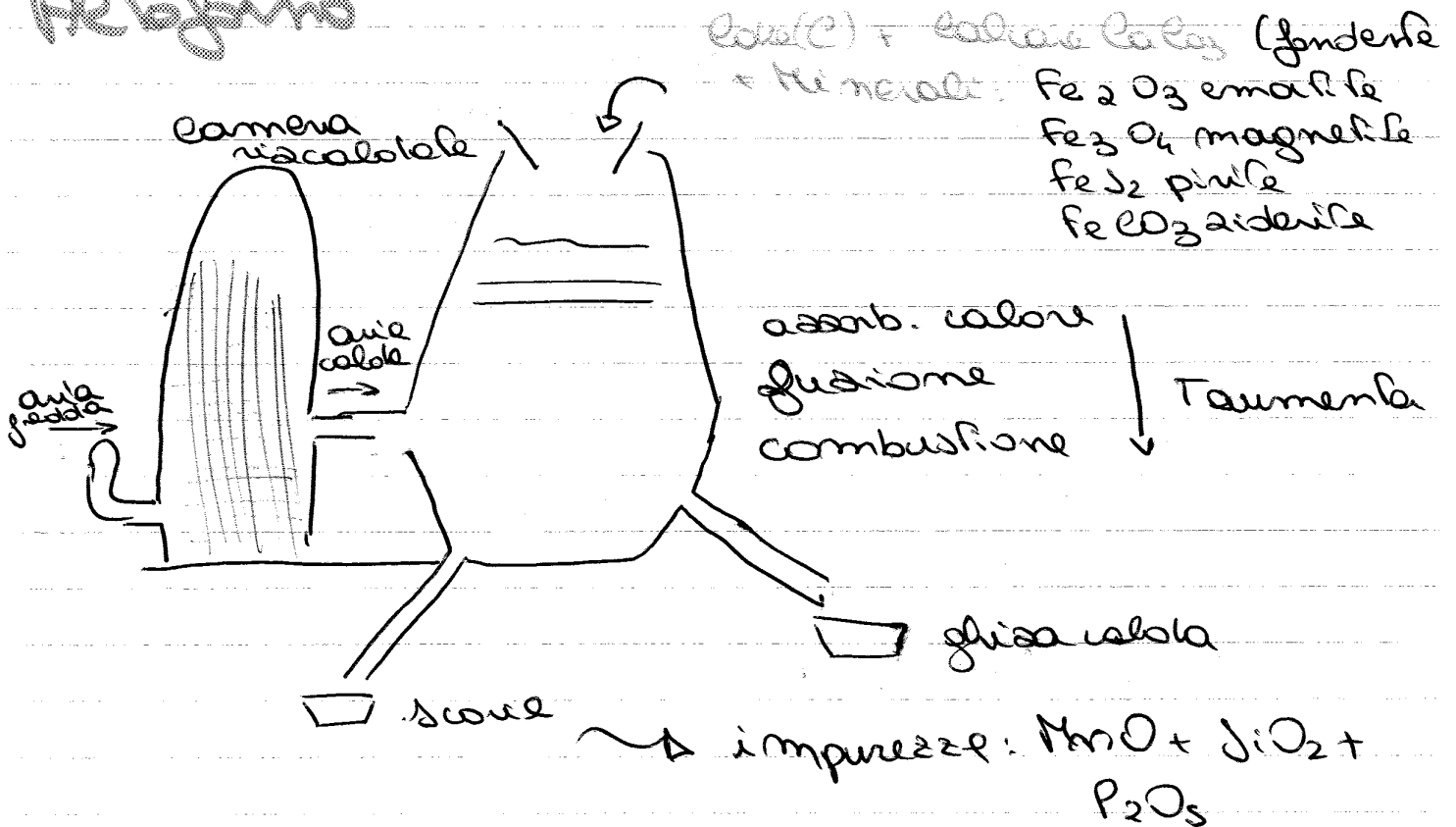


microstrutt. intermedia fra gh. bianca e gh. duttile

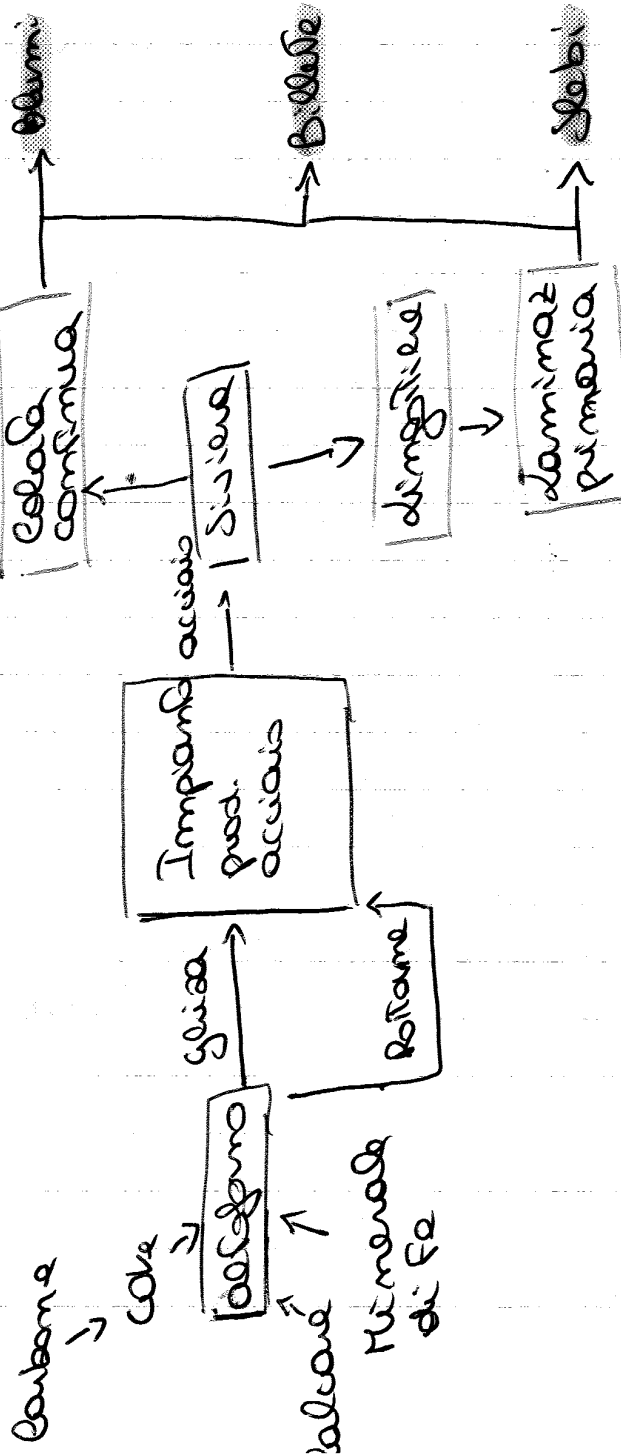
- + conducib. termica
- + resistenza a shock termici
- + resist. a ossidazione
- Res e duttilità = gh. duttile.

• fenti a olisco, mbr. stiel.

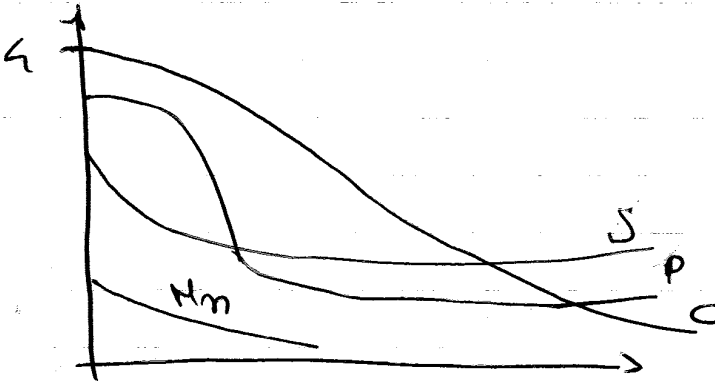
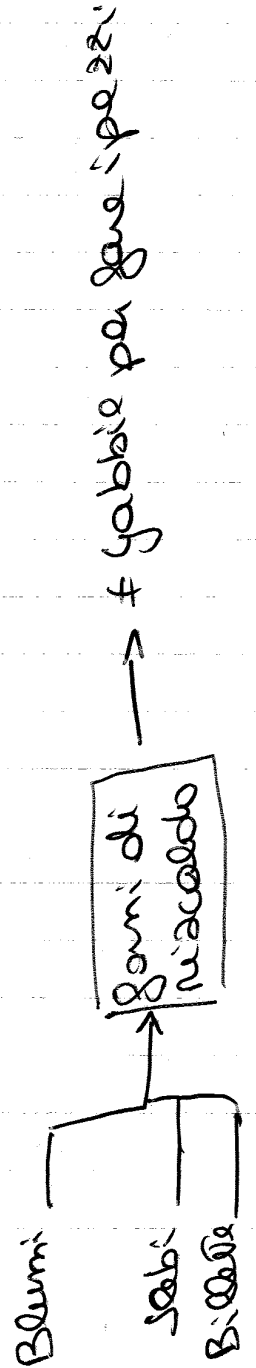
Altoforno



linea produzione ghisa



Dai 3 tipi di ghessa:



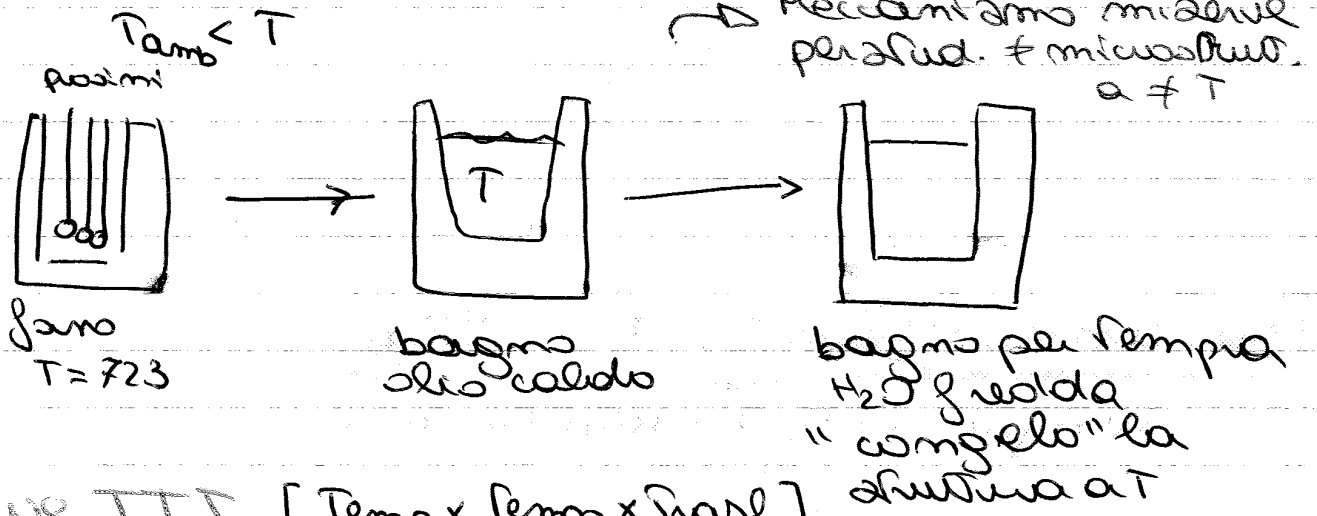
durante affinazione

raffreddamento rapido: Emom ha tempo di diffusione
re via

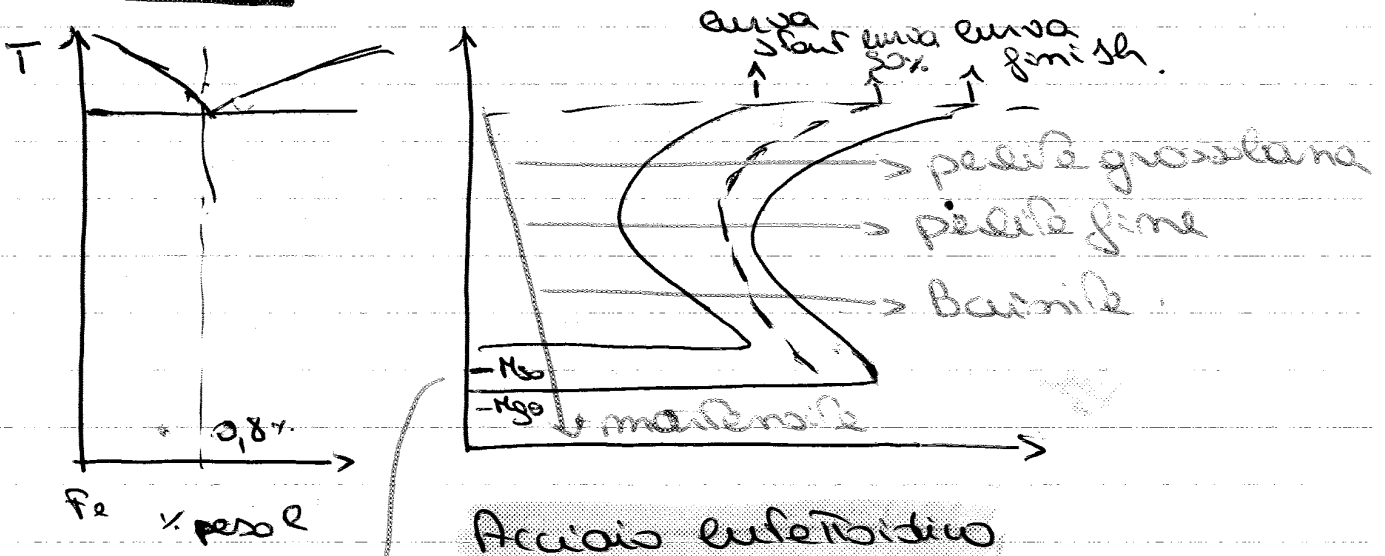
• mantenibile → fase metastabile

soluz. solida interfaz. zona solida.

Tempra in olio caldo



Curve TTT [Temp x tempo x trasf.]

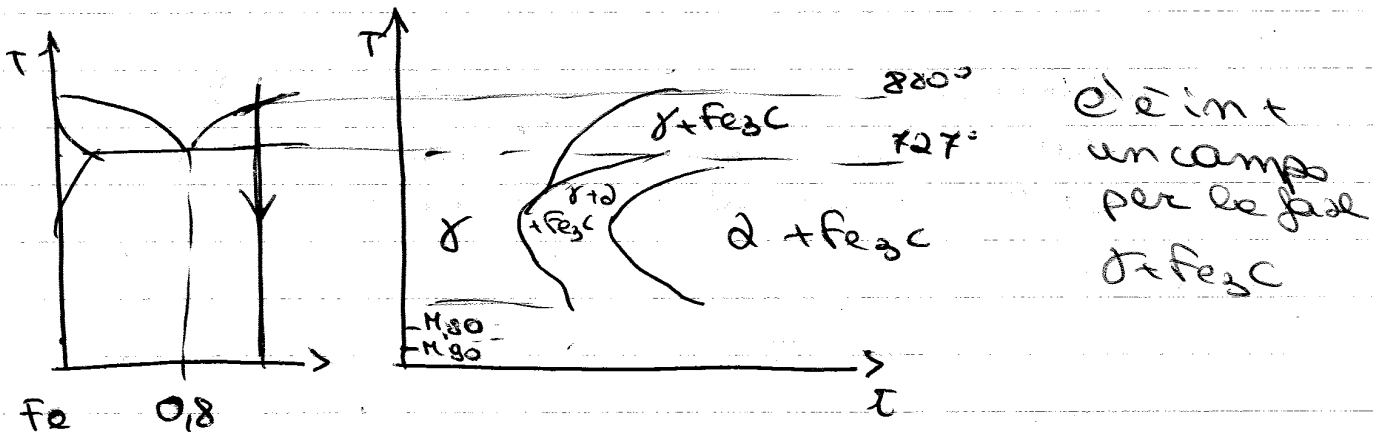


indico la T
a cui abbiamo 50% e 90% mantenibile

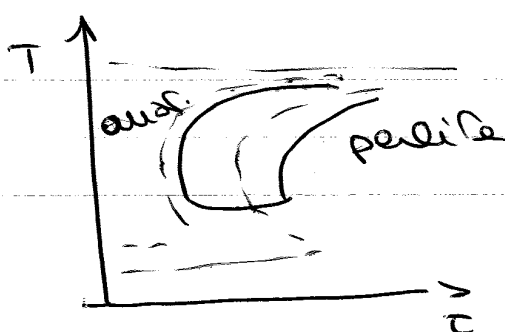
Microstrutture, Riepilogo

- **Sferoidite:** $Fe_2 + Fe_3C$: particelle sferiche relativamente piccole di Fe_3C a parze in Fe_2
flessibile e duttile
- **Perlite grossolana:** $Fe_2 + Fe_3C$ a shape, + dura e resist,
- duttile
- **Perlite fine:** $Fe_2 + Fe_3C$ a shape sottili alternati, + dura
e resist, ancora duttile
- **Bainite:** $Fe_2 + Fe_3C$: particelle Fe_3C molto piccole e
allungate, disperse in matrice Fe_2
- **Martensite univertuale:** $Fe_2 + Fe_3C$: particelle sferiche di Fe_3C
molto piccole disperse in matrice
di Fe_2
- **Martensite:** tetragonale a corpo centrato, grani aguliformi
molto dura e fragile

Acciaio iperuteroide



Curve CCT: Trattamenti termici

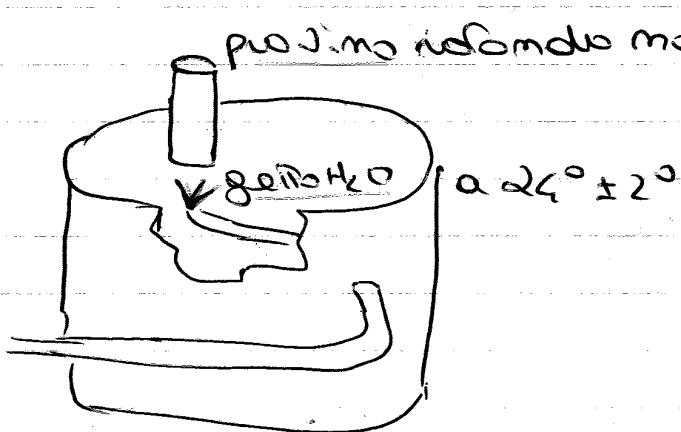


Raffreddamento
continuo dal campo
austenitico fino
 $T_{amb.}$

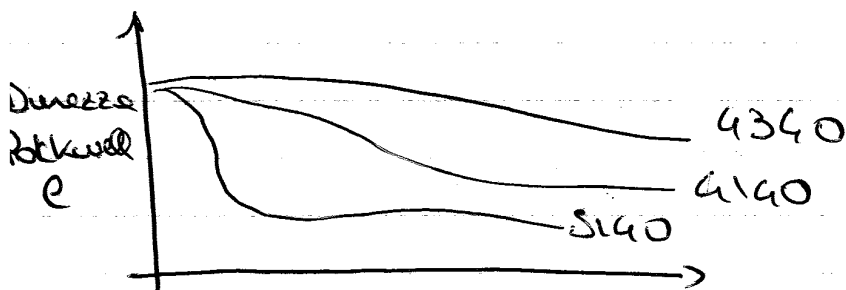
— : curve TTT

- 13xx → Mn, Si, 50xx → Cr, Mo, Si, W, V, Co, B
- elementi leganti: Mn, Ni, Cr, Mo, Si, W, V, Co, B
questi elementi possono
 - ↳ dissolversi nella ferrite
 - ↳ combinarsi nel carburo
 - Ni, Si, Mn → abbassano T_{crit}, stabilizz. austenite
↳ prima si dissolve nella ferrite, poi si combina nel carburo
 - Mo, W, Ti → alzano T_{crit}, stabilizz. ferrite
↳ prima si combinano con il carburo, poi si dissolvono nella ferrite.
- acciai {
 - ↳ legati altri elem + l + resiste a amov. e ha: zone, - duttili, + costosi
 - ↳ non legati solo C

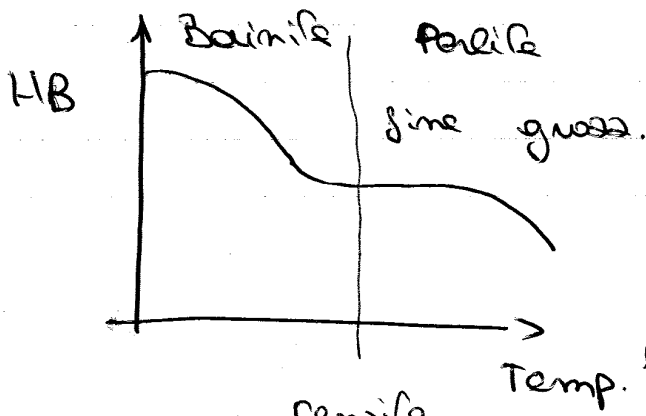
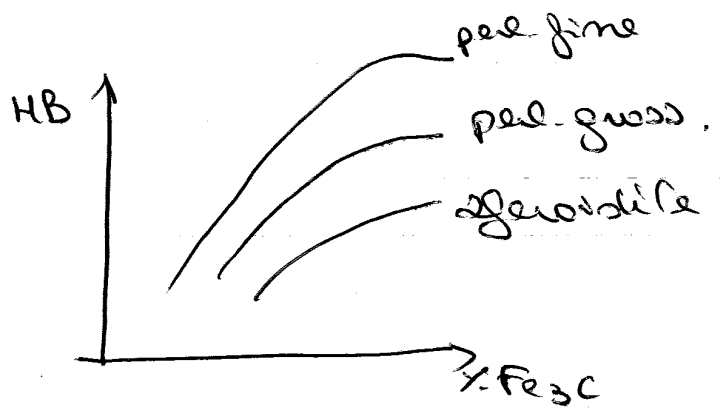
Temperabilità: prova Jomini



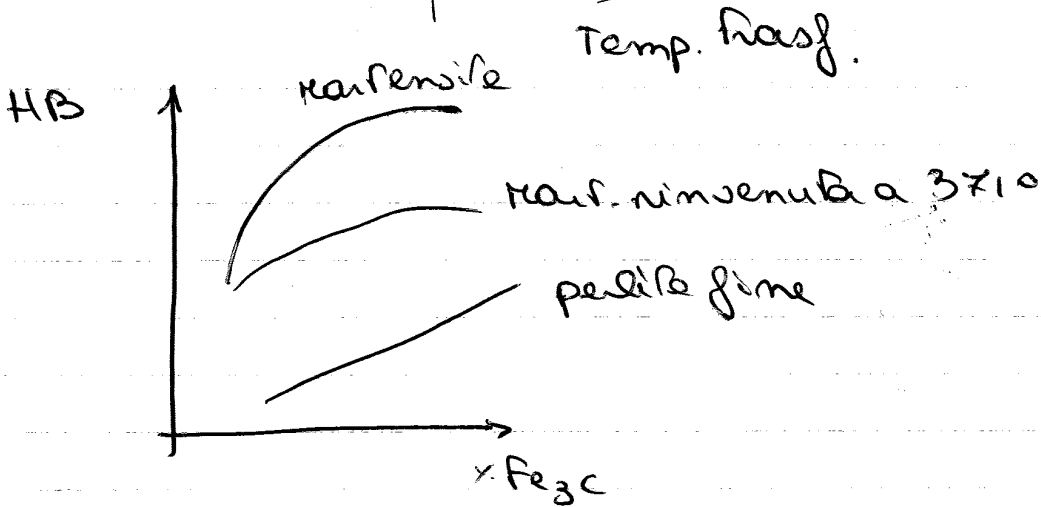
- per diagrammare Temperabilità / durezza rispetto a dist. da estremità con getto



↳ da estremità temperata



Durezza Bainite, effetto microstruttura.



Durezza ↑ ↑ % Fe₃C ↑ tempra martensitica

$$l_0 = 5,65 \sqrt{A_0} \quad \sigma \quad l_0 = 11,3 \sqrt{A_0}$$

prossimi cilindrici: $l_0 = 5d_0$ o $l_0 = 10d_0$

• esecuzione

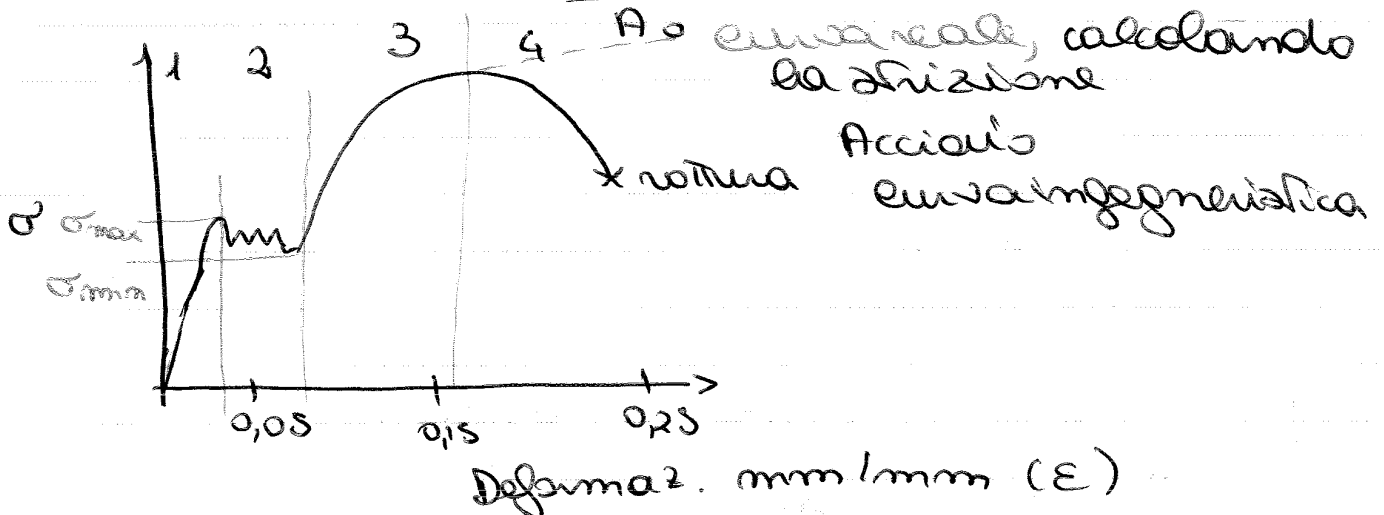
curva sforzo / deformazione

~~allungamento~~ + ~~diminuzione~~ sezione nelle parte centrale

alla fine misuro l_u e A_1

$$\text{allung.} \% = \frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100$$

$$\text{strizione} \% = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \cdot 100$$



- 1) deformazione elastica
- 2) non deve aumentare σ per avere def. plastica
~~invece~~
- 3) aumenti ϵ con bassi aumenti σ (periodo delle grandi deformazioni plastiche)
- 4) pts di max con apparente diminuzione σ , con rapidi aumenti ϵ , in realtà c'è diminuzione sezione, quindi curva reale comp

Def. elastiche

- 1) è una retta. σ_{max} : limite elastico

Smembramento \rightarrow improvviso aumento deformazione a tensione costante

\hookrightarrow a causa di eterogeneità con cui la deformazione si realizza dall'inizio

avviene localmente in punti dove si concentrano tensioni poi si espande con bande deformazione (Bande di Lüder)

- p.l. σ_{max} (limite superiore) di dislocazioni si liberano dall'atmosfera di atomi interstiziali $ES C$, in AL , circonda dislocaz.

\hookrightarrow dopo sesto - sesto

dopo smembramento def. plastica procede in modo regolare

se non facilmente individuabile: Tens. di smem. $0,2 \%$ def. perm.

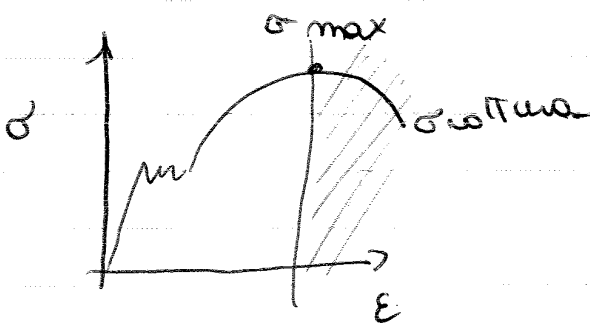
Periodo delle grandi deformazioni

$\uparrow \sigma$, \uparrow progressive deformaz.

subisce def. um. e mano a mano è + difficile da def. a causa i maudimenti

Periodo della strizione

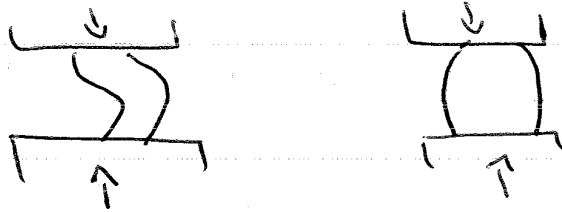
a valle e' è max, σ_{calcol} max rottura $>$ σ_{calcol} reale:



solo fenomeno apparente quello della diminuzione di σ , non si calcola strizione sezione

realtà: devo \uparrow per avere rottura

poco significativa per mal dubbi a causa della def. del campione:

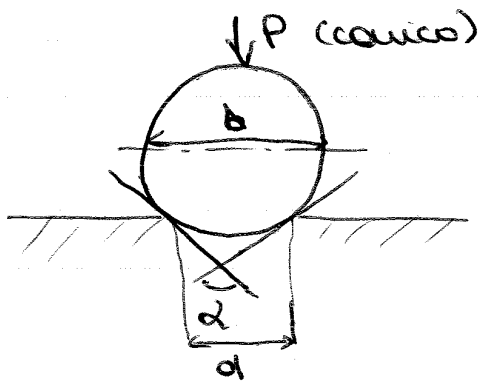


Prova di durezza

metodo diffuso perché economico
 misura grado penetrazione di un materiale
 + duro nel mat. in esame con σ costante
 ↳ sup. di contatto piccola all'inizio, poi, qm il
 penetrazione scende, A appesimento aumenta
 ≠ metodi

Durezza Brinell

penetratore: sfera in acciaio / carburo di W



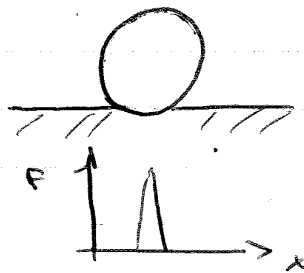
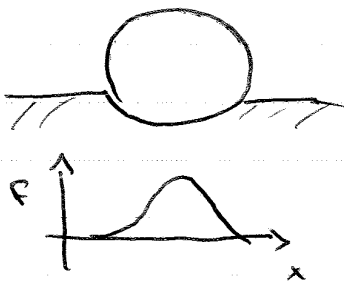
$$HB = \frac{P}{S} \text{ carico}$$

$$S \text{ superficie}$$

$$d: \text{diam. impronta}$$

$$S = \pi \frac{D}{2} (D - \sqrt{D^2 - d^2})$$

superficie dip. da grado penetrazione

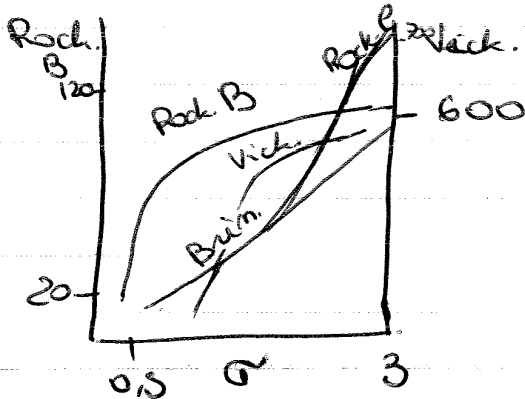


forza si distribuisce a seconda della penetrazione

$$d = D \cos \alpha/2$$

- C: 10kg → 180kg
- B: 20kg → 100kg

per correlare + scale:



Prova Resistenza ad UG: Resilienza

frattura → **fragile**: cricca che si propaga con rapidità, procede su piani di spaccatura fini, aspetto granuloso

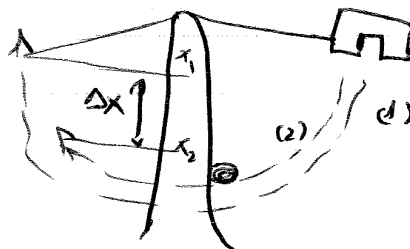
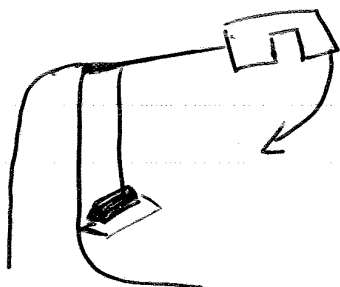
↳ **duttile**: procede lentamente, parte dal centro su piani inclinati a 45°, aspetto a "coppa", sembra fibroso

frattura fragile → - energia di quelle duttile
 T_e impo, a ± T_{un} mal. può avere frattura duttile o fragile

prova di urto misura fragilità:

↳ cubil campione con una mazzetta.

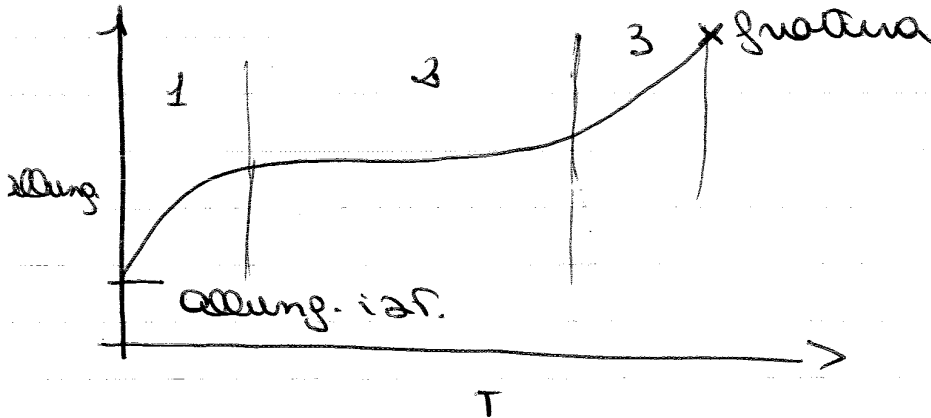
Pendolo di Charpy



- 1: mo provino
- 2: di provino

Scorimenti v a costo:

costo di rottura a prossimo a Tebvala:



1: acc. primario: prime def. e incedimento, v deform. decresce

2: acc. m. secondario (o terziario) v def. ca. cost. effetto di addolcimento per elevat. T (nicist.)

3: acc. m. terziario: rapido aument. v def. fino frattura, per rottura prossima

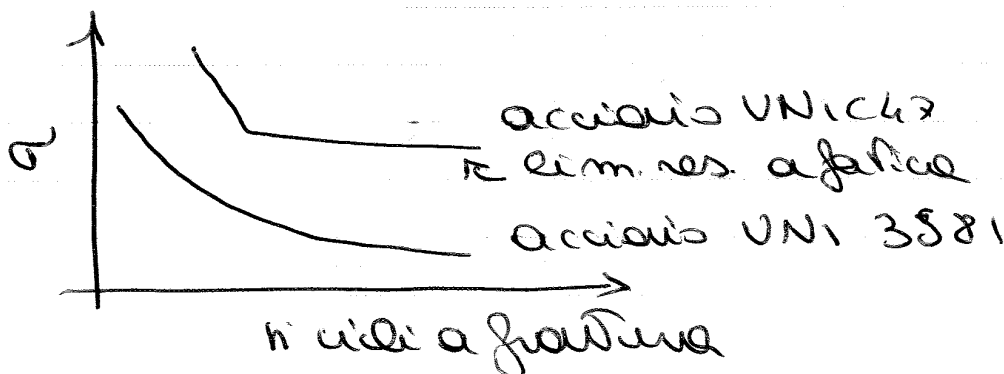
Prove di fatica

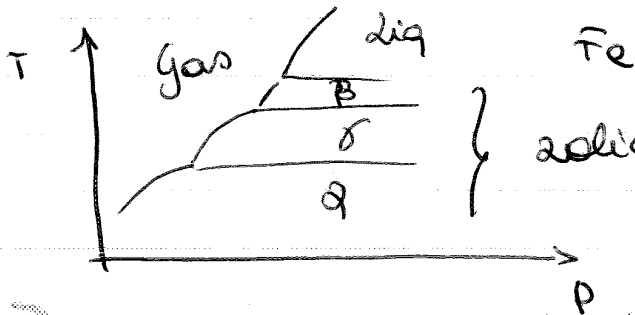
Sollecitazioni cicliche, non eccessive, non al
deve rompere al 1° ciclo!

vario tipo di tensione e temp.

- trazione
- compr.
- flessione

limite resistenza a fatica: $\approx 1/2$ carico rottura a haz
 σ per cui rottura è a n cicli





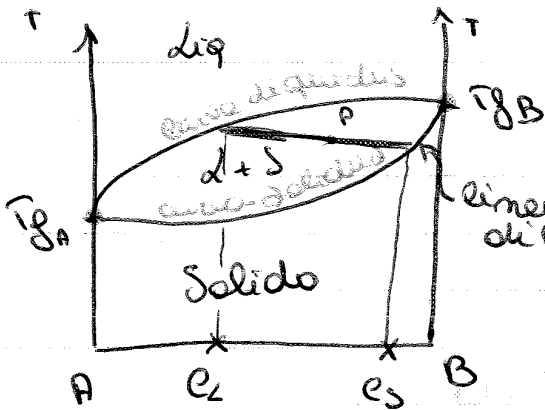
solido con \neq strutture cristalline

Diagramma di fase

↳ rapp. grafica variabili di stato

1) Soluzione solida completa

2 comp. sono ∞ miscibili allo stato solido e allo stato liquido



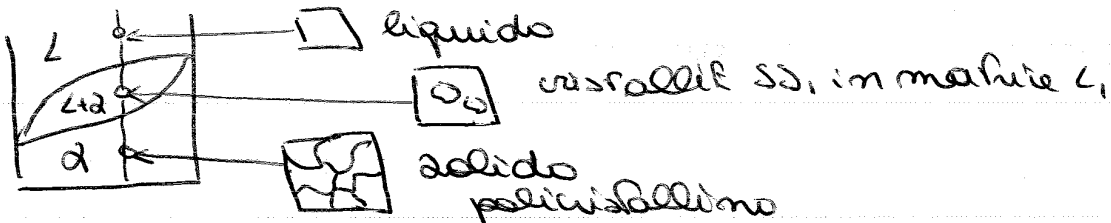
NB \rightarrow leggi Hume-Rothery per vedere solubilità

in $\alpha + \delta$: prendo P, e c'è in eq fase solida e fase liq. con \neq composiz.
 e_L : comp. liq.
 e_S : comp. sol.

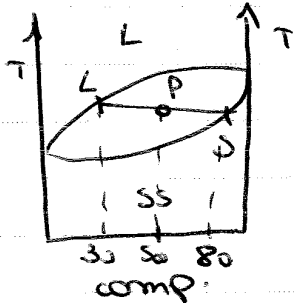
in α : $\nu_{cu} = 2$
 in δ : $\nu_{cu} = 2$

in $L + S$: $\nu_{cu} = L + S$

per invariante $\nu = 0$



Regola della leva



quantità relative delle due fasi:

$$m_L + m_{SS} = 100g$$

$$0,3 m_L + 0,8 m_{SS} = 0,5 \cdot 100g$$

$$\frac{PL}{LS} \cdot 100 = \% \text{ solido}$$

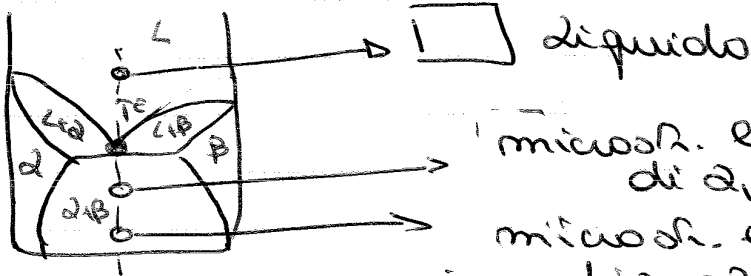
$$\frac{PS}{LS} \cdot 100 = \% \text{ liquido}$$

$$\frac{m_d}{m_d + m_B} = \frac{x_B - x}{x_B - x_d}$$

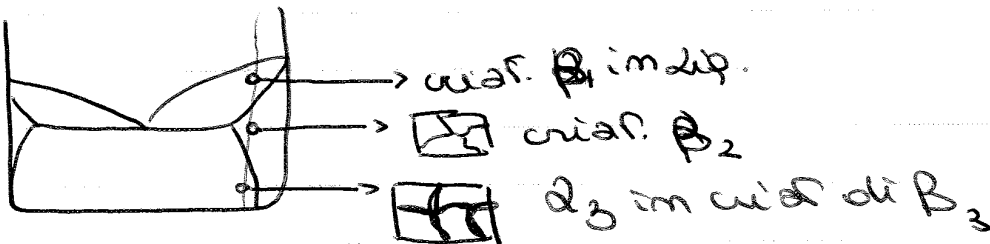
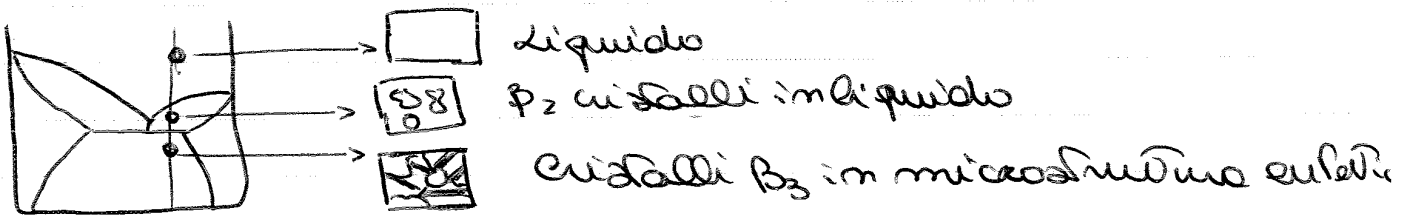
x_i : composiz.

Sviluppo microstrutturale

(raffreddamento lento)



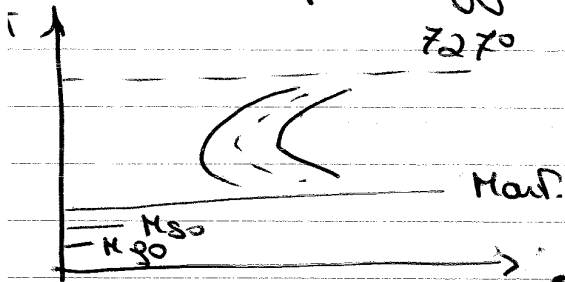
microstr. eutetica con sfere all. di α_1 e β_1
 microstr. eutetica con sfere all. di α_2 e β_2



Trasformazioni non diffusionali

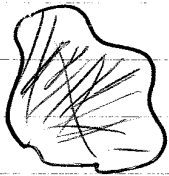
Troppe basse, non c'è tempo per diffusione solida

martensite



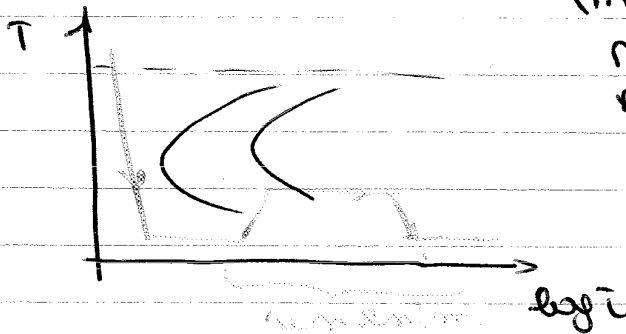
rapido orientamento di atomi da FCC a BCC, ma resta disordinato del C.
↳ tetragonale a coerenza

martensite è un atomo nel sito stab. nel tempo, ma se riscalda diventa α e Fe₃C



struttura aghiforme: dura ma fragile

● Rinvenimento:



mantengo ad una certa T, martensite si trasf. in α e Fe₃C, in parte

↳ + duttile

≠ struttura della pearlite "gocce" o cementite

Cap 8: Materiali Metallici

Fe e due leghe → 80% produzione

Produzione ghisa e acciaio

Fe deriva da minerali di Fe
uso coke per ridurre ossidi di Fe:



Ferrite α : sol. solida in Fe α (ferrite) del C, in reticolo CCC Fe a 723° , solub. max 0,02%.

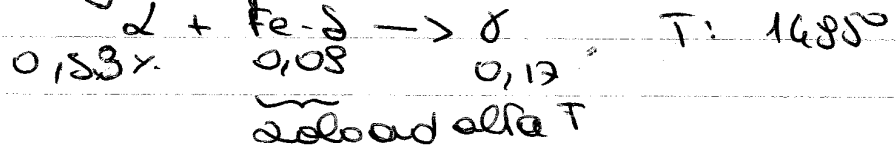
Austenite γ : ss. interst. del C in Fe FCC, 0,8% a 723° , max 2,06% a 1148°

Cementite: Fe_3C composto intermetallico: 6,67% C duro e fragile

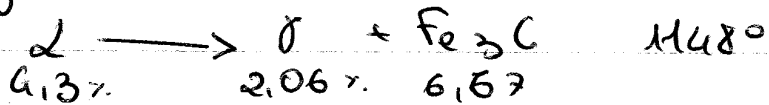
Ferrite δ : ss. int. del C in Fe FCC, cost. reticolare = alta, 0,08% C a 1465°

Reazioni invarianti:

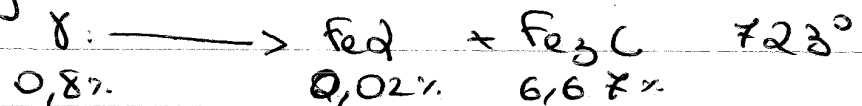
• trasform. peritettica:



• trasf. eutettica:



• trasf. euteroideica



acciai al C

- ↳ euteroideico: 0,8%
- ↳ ipereuteroideico
- ↳ ipoeuteroideico

acciai al C euteroideici:

[0,8%] mantenuto a 750° per un certo t , div. quale
 misc. omogenea (austenizzazione)

• se raffreddato lentamente:



strut. lamellare
 Fe_3C e $Fe\alpha$

perlite

Treatments Termici

formazione di Martensite con tempra
 acciaio σ , si raffredda veloc. con temp. in H_2O ,
 mantenute: fase metastabile, sol. solida interstiziale
 sovrasatura di C in Fe
 Fe tetragonale a corpo centrato
 leggera distorsione della cella CCC

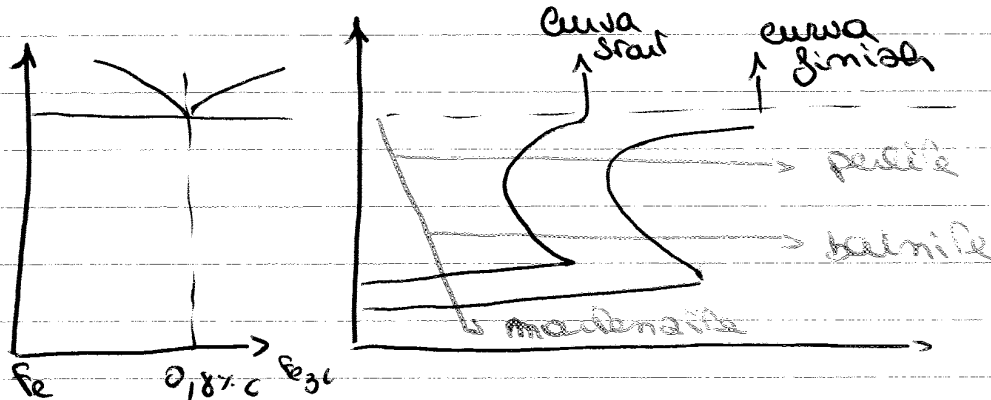
microstruttura:

ragg. per alb. $\leftarrow c < 0,6\%$: a fusi, aciculare, ad "aghi"
 n° distors. $\leftarrow c > 1\%$: a placche, placche di \neq
 ragg. per soluz. solida dim, circondate da austenite
 residua.

traz. martensitica avviene senza diffusione
 \rightarrow a fusi non hanno tempo

se $c < 0,2\%$: diventa Fe- α ,
 non c'è abbastanza C da distorcere reticolo
 $\uparrow c \uparrow$ durezza \uparrow fragilità

Diagramma TTT acciaio eutettico



$500^\circ < T < 723^\circ \rightarrow$ perlite (grossolana e fine)

$250^\circ < T < 500^\circ \rightarrow$ bainite \rightarrow duplexe $T > 350^\circ$
 (inferiore $T < 350^\circ$)
 aghi grandi
 aghi piccoli

Cap 13 | Proprietà Termiche

- T_{fus} .
- $\rho_{ap. Term.}$.
- Dilataz. termica
- Conduttività termica.
- Diffusività
- Resistenza agli shock termici

T_{max.} di esercizio

↳ proprietà scarse a $\neq T$,
 se $T \uparrow$, di solib, proprietà peggiorano,
 di $\neq +$ vicini a T_{fus} , quindi il materiale
 diventa + molle.

→ Vado a definire T_{max} di esercizio.

polimeri → 150° acciaio max → 200°

→ devo verificare la risposta a $\neq T > T_{amb}$:

- fessione
- creep
- fatica
- resist. ossidaz.

Capacità Termica

Calore } $c = q$ calore per $+1^\circ$ di un certo solido.
 cal. specifico → $+1^\circ$ per 1 gr di solido
 cal. atomico/mole → $+1^\circ$ per 1 mole

calore specifico } \rightarrow vol. cost.
 } \rightarrow press. cost.

→ più soliti: c_p ,
 $c_v \neq c_p$, non sono
 comprimibili!

legge Dulong - Petit

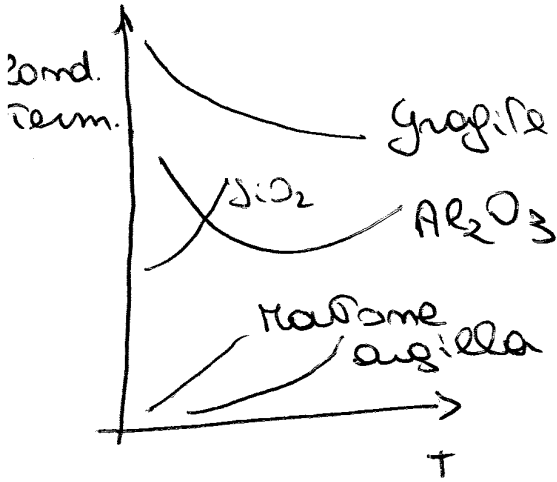
$$q_{atomico} \sim 25 \text{ J/mol} \cdot \text{K} = 3R$$

$T \geq 300 \text{ K}$
 (per atomi)

- ci sono alcune eccezioni il cui $q_{atom.}$ tende a 25 J/mol per $T \gg 300 \text{ K}$

Conduzione del calore

- ↳ vibrazione atomi, in ceramici e polimeri, - effic.
- ↳ e-liberi di conduzione, metalli, + efficienti



- non posso stabilire un unico andamento.
- se mob e. term. avviene con e- è correlato da aumento T
- se mob e. term. avviene con vibraz. atomiche, è favorito da aumento T
- a T elevata si deve tenere conto di trasfer. per irraggiamento

amorf: (vetri, polimeri) < cond. termiche dei cristallini
 ↳ disordine provoca riduzione cond. termica
 leghe < cond. term. < met. puro

• presenza di pori diminuisce la conducib. termica.

Diffusività Termica

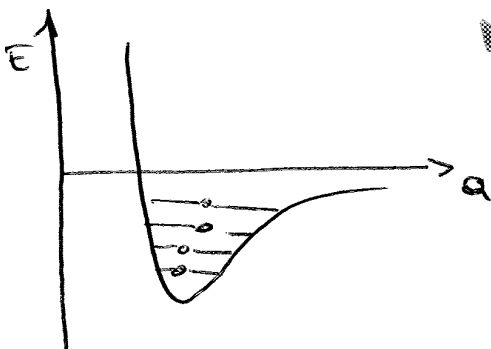
misura relativa trasmissione del calore in un solido

$$a = \lambda / (\rho c_p) \quad [Diff. Term.]$$

$$a: [m^2/s]$$

Espansione Termica

→ materiale si espande de alzo la Temp
 ↳ devo prevedere giunti di dilataz. termica



• posso prevedere dilataz. termica con curve di Condon-Morse

↑ forza legame ↑ T fus. ↓ Espans

Cap 14 Proprietà Elettriche e Dielettriche

$\Delta V = IR$ legge Ohm

$\sigma = \frac{1}{\rho}$

σ : conduttività

ρ : resistività

(ρ dipende dal materiale)

$R = \rho \frac{L}{A}$

$J = \sigma E$ Ohm

$J = IA$ densità corrente

$E = V/l$ gradiente del potenziale

→ Superconduttori

→ Conduttori $\sigma: 7 \cdot 10^7$

→ Semiconduttori $\sigma: 2 \cdot 10^{-4}$

→ Dielettrici / isolanti $\sigma: 10^{-10}$

Corrente = flusso cariche

↳ e⁻ si muovono

↳ ioni si muovono

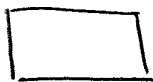
} + ordini di grandezza

conduzione elettronica o ionica

↳ c'è molta differenza tra cond - semicond - isolanti, conducibilità vanno di \neq ordini di grandezza.

Bande di Energia (metalli)

+ orbitali di legame vicini formano "bande"



banda di conduzione vuota
gap. energia



banda piena di valenza



Semiconduttori

isolanti

Metalli

↳ basta radiaz. o calore per far saltare gli e⁻ nella banda di conduzione legami cov.

↳ "energy gap" è + ampio, e⁻ non riescono a "saltare" nella banda di conduzione legami for.

↳ basta l'energia di un campo elettrico. legame + debole