



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1561A -

ANNO: 2015

A P P U N T I

STUDENTE: Bobba

MATERIA: 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.**

SCIENZA e TECNOLOGIA DEI MATERIALI

1

GENERALITÀ

elementi significativi:	H	1e ⁻	+1
	Mg	2e ⁻	+2
	Ti	4e ⁻	+4
	Fe	8e ⁻	+2+3
	Al	3e ⁻	+3
	C	4e ⁻	+4 ±2
	Si	4e ⁻	+4
	O	6e ⁻	-1 -2

• metalli e leghe

- costituiti da elementi → atomi
- conduttori corrente ed elettricità
- lucentezza
- preparati per fusione
- lavorabili meccanicamente
- solidi a t. amb.
- originano leghe
- soggetti corrosione - ossidazione
- densità 2,7/8 g/cm³

• ceramiche

- costituiti da composti (ossidi, carburi, nitruuri) → ioni
- duri e fragili
- difficile lavorazione
- non conducono
- fondono alte temp.
- preparati per sinterizzazione (mattoni, calcestruzzo, piastrelle, ...)
- densità 3,5/5 g/cm³

E = 300/600 GPa

↓
polveri fuse

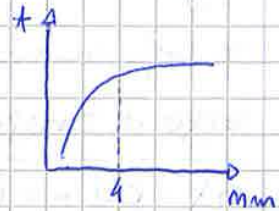
$\sigma_{T, Fe} = 280 \text{ MPa}$
 $\sigma_{40,21, Fe} = 140 \text{ MPa}$
 $E_{Fe} = 200 \text{ GPa}$
 $E_{Al} = 65/80 \text{ GPa}$
 $E_{acciaio} = 185/210 \text{ GPa}$
 $\sigma_{40,21, acciaio} = 250/1100 \text{ MPa}$
 $\sigma_{40,21, leghe Al} = 100/650 \text{ MPa}$
 $\sigma_{T, acciaio} = 400/650 \text{ MPa}$
 $\sigma_{T, Al} = 300/770 \text{ MPa}$

Temp. Fusione \times cristallini
 dipende da forza dei legami chimici

rammollimento \times amorfi
 progressivo con aumento temp.
 fino a viscosità del liquido

es. melting point temperature dell'oro

se raggio nanoparticella $< 4 \text{ nm}$, temp. minore
 se raggio $> 4 \text{ nm}$ ca., temperatura costante



STRUTTURA CRISTALLINA

= atomi o ioni o molecole ordinati in posizioni geometriche mantenute in posizione dai legami

tra atomi esercitate f. attrattive-repulsive t.c. mantengono atomi in distanze d'equilibrio = distanze di legame

la struttura è costituita dal ripetersi della **cella cristallina**

(metalli) (ceramici) (polimeri)
 atomi - ioni - molecole disposti nella cella secondo:

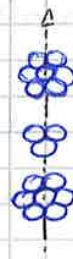
- modificabili con T
- parametri di cella a, b, c (0,1/0,26 nm a T ambiente, ma forse esterne) modificabili da temp o da tensioni/compressioni
- angoli di cella α, β, γ

- ↓
- cella cubica
 - tetragonale
 - ortorombica
 - romboedrica
 - esagonale
 - monoclinica
 - triclinica

↓

a $T=0 \text{ K}$ atomi fermi nella pos. equilibrio
 se aumento T vibrano sempre di +
 \Rightarrow dilatazione termica

- che può essere
- a corpo centrato (Fe W Cr)
 - a facce centrate (Cu Al Ag Au)
 - esagonale compatta (Mg Ti Zn)



Si silicio SiO₂ silice

polimorfismo ⇒ cambio struttura ⇒ cambio proprietà
 (Volume, d. di brta. termica, k, conducibilità, E mod elastici, ...)

es. Ti α esagonale - 800°C - T_β cubica - 1675°
 Fe α cubico cc - 910°C - Fe γ cubico FC - Fe δ cubico cc → serve x acciaio
 quarzo α hep. - quarzo β tetrag. - tridimite ortorombica - cristobalite tetrag. → SiO₂

difetti nei soli di cristallini.

= qud viene meno la periodicità della strutt. crist.

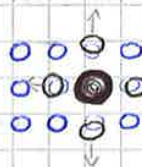
1. difetti puntuali:

atomo in posizione interstiziale = in un buco lasciato libero da altri



difetti interstiziali e di sostituzione aumentano resistenza meccanica soluzioni solide:

• sostituzionale = 1 atomo + grande o + piccolo al posto di uno standard

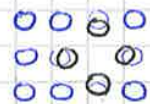


→ usati per semiconduttori

- LEGHE SOSTITUZIONALI introdotti max 15% atomi sostituzionali

atomi del metallo e atomi sostituz. devono avere:

• vacanza = manca 1 atomo



- stex strutt. cristall.
- raggio simile
- stex elettronegatività
- stex valenza

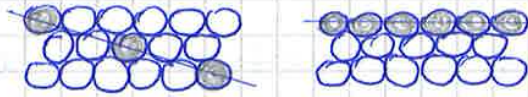
es. Cu-Ni

- LEGHE INTERSTIZIALI

atomo interstiziale max 10% dim della atomo metallo

es. C in Fe, max 2% di C rispetto Fe

dislocazioni si muovono lungo piani reticolari
 preferibilmente su piani + densi xk meno distanza tra atomi
 => + facile rompere e riformare legami



3. difetti superficiali

la superf. è "un difetto" xk atomi che la formano hanno un Numero di Coordinat. minore (oma sono legati con meno atomi) rispetto atomi interni

quindi atomi in superficie + reattivi (ossidazione, corrosione, ...)

es. sfera di Au di $r \leq 4 \text{ nm}$ fonde a T minore
 xk rapporto superficie/volume aumenta

=> + superficie rispetto volume => + atomi + reattivi rispetto atomi interni - reattivi
 => serve meno T per rompere legami

bordi di grano m difetti superfic.

= superfici di atomi con legami distorti in zone di confine (= grani) di materiali policristallini!

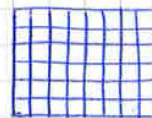
effetto delle velocità di raffreddamento sulla struttura e sui BSG:

Si 1475°C o SiO_2 1730°C fuse in contenitore ceramico

- STRUTTURA MONOCRISTALLINA

= tutt. celle cristalline ordinate, orientate tt nella stes. direzione
 raffreddamento molto lento, ma impurità

NO BSG



NO dislocazioni -> + proprietà meccaniche (10^6 anziché 10^3 dei policrist.)

distinguo poliacristalli \rightarrow riflettono luce grazie ai BDG
 mentre monocristalli e amorfi \rightarrow non riflettono, vedo attraverso
 (alluminio cristallino) (vetro) di un ci su BDG

propagazione fratture - intergranulare = tra grani
 sfrutta legami di fezioni
 - intragranulare = all'interno del grano

? difetti cristallini, cui influenzano prop. meccaniche, esempi?

MICROSCOPIA

1. ottica = Light Optical Microscopy (2000x)

vedo in base a luce riflessa non di + se $\lambda < 400\text{nm}$ (visibile)
 di usare campioni con superficie lucidata
 vedo solo colori \rightarrow NO profondità di campo
 NO analisi composizionale

2. elettronica a scansione = Scansion Electronic Microscopy ($10^4 \times$)

uso fascio elettronico (= di e^-) \rightarrow NO problemi di λ
 rivelatore di e^- dalla stessa parte del trasmettitore (difrazione)

si analizza composizionale =

- e^- del fascio colpisce e sostituisce e^- dell'atomo
- e^- dell'atomo estratto emette energia con λ dei raggi X
- ogni λ $= h\nu$ \rightarrow λ caratteristico di 1 elemento

- colpisce quali elementi ci sono \rightarrow SEM-EDS Energy Dispersion Spectroscopy

ha profondità di campo, non serve superf. lucidato

3. elettronica a trasmissione = Transmission Electronic Microscopy ($10^6 \times$)

fascio di e^- attraversa il campione
 rivelatore di e^- dalla parte opposta del trasmettitore

viscosità η resistenza allo scivolo laminare in risposta ad una sollecitazione meccanica applicata parallelam. alla superf.

↓
 dovuta alla resistenza di attrito tra le catene strutturali che devono scivolare una sull'altra

$$\eta = 1 \text{ [Pa][sec]} = 10 \text{ [Poise]}$$

es. $\eta_{H_2O} = 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

$\eta_{SiO_2} = 10^6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ → viscosità consente filatura per fibre ottiche: vetro esterno + vetro interno con indice di rifrazione diverso × trattenere luce

negli amorfici: aumento T ⇒ diminuisce viscosità

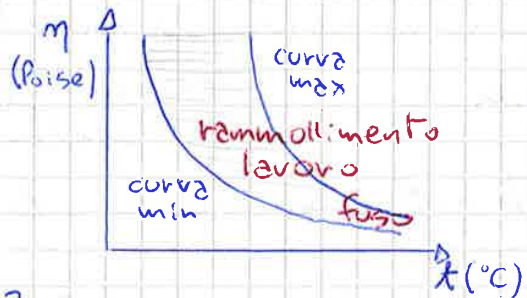
nei cristallini: solido ⇒ aumento T ⇒ liquido



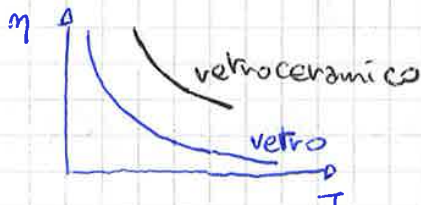
per ogni tipo di amorfico stabilite temperature caratteristiche (di rilassamento termofica) × "definire liquido", × lavorazione

$$\eta \leq 10^2 \text{ Poise}$$

curve caratteristiche × riassumere η di un tipo di materiale



? se vetroceramico è lavorabile a T_{max}?

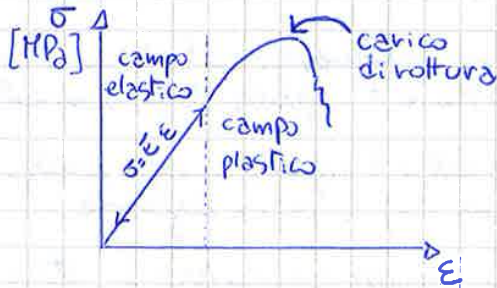


alla stessa T il vetroceramico è + viscoso × è parzialmente cristallino ⇒ le catene dei cristalli offrono + resistenza da scaldare di + × diminuire η = × poterlo lavorare

? se i vetrometalli amorfici hanno + resistenza a corrosione?

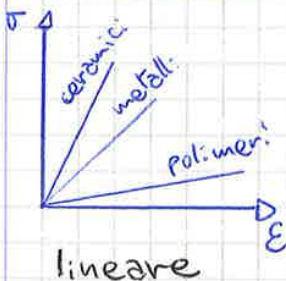
× le amorfici ⇒ no strutt. crist ⇒ no difetti ⇒ no bordi di grano che sono molto + reattivi e alla superficie aumentano capacità di reazione

carico di rottura carico massimo applico + forza, si rompono legami



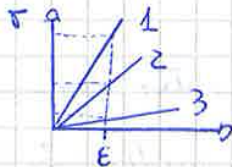
(modulo di Young)
MODULO ELASTICO

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = [MPa] \text{ o } [GPa]$$



legami + forti \Rightarrow E maggiore \Rightarrow retta + pendenza
 $E_{ceramici} > E_{metalli} > E_{polimeri}$
 legami + forti \Rightarrow Temp. fusione maggiore \Rightarrow E maggiore.

? se ϵ è la max deformazione tollerabile, quale materiale uso?



① se raggiunge ϵ_{max} con la σ maggiore quindi per applicare una F maggiore.

snervamento il max carico con deformazione elastica che può sopportare il materiale

E stabilisce prop. diretta tra σ ed $\epsilon \rightarrow \sigma = E \epsilon$

E dipende da quai sono forti i legami atomici

↓ (NON da dislocazioni, influiscono nel c. plastico)

applico F, atomi si spostano dalla distanza di legame = dist. di equilibrio ma cessata la F, ritornano in ϵ_0

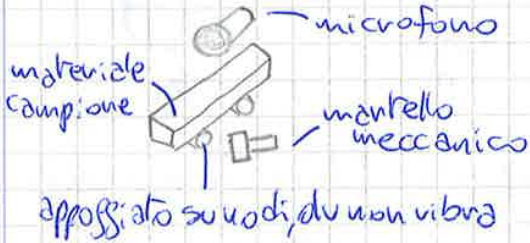
↳

- Con prova acustica

materiale colpito (deformaz. meccanica) → vibra → si propaga onda acustica
 legami forti ⇒ frequenza di vibrazione alta (kHz) ⇒ E alto
 quindi frequenza di E

uso prova acustica anche x controllo di fette strutturali:

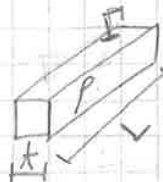
controllo offsite con TAC x verificare che un'altra difetti
 prova acustica dell'off → catibolo frequenza campione
 controllo con prova acustica altri off → se freq. diversa da quella campione ⇒ difetto



la frequenza emessa dipende non solo dal tipo di materiale ma anche da dimensioni e forma:

$$E = \frac{1}{L^3} \nu^2 L^4 \frac{\rho}{t^2}$$

Fattore di forma | frequenza | densità | spessore



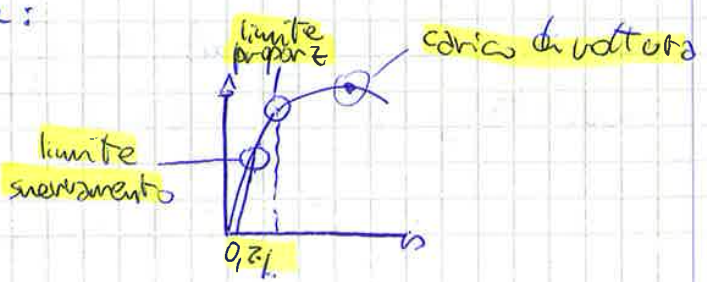
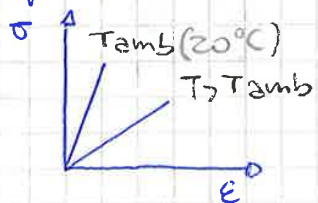
per i materiali composti per ottenere E desiderati grazie a regola della miscela:

$$E_{comp} = \%V_{matrice} \cdot E_{matrice} + \%V_{fase} \cdot E_{fase}$$

E è inversam. prop. a T → T ∝ 1/E

xk se aumenta T, atomi vibrano di +, si allungano, legami diventano + deboli, diminuisce E

impatti per lo stress materiale:

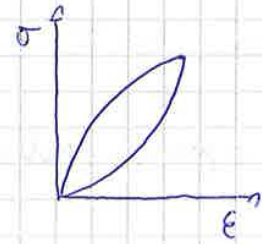


comportamento **ANELASTICO**

(alcuni polimeri)

serve tempo x deformarsi e recuperare deformaz.

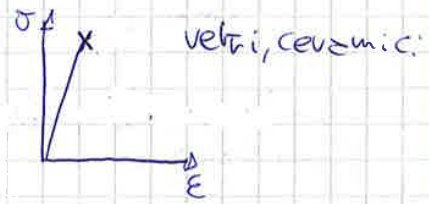
non hanno c. elastico



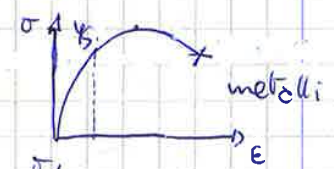
CARICO PLASTICO

$$\sigma = k \epsilon^n$$

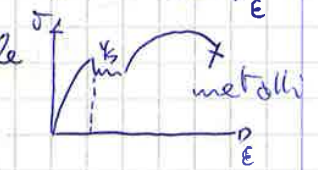
materiali che non possono essere lavorati con c. elastico



materiali con deformaz. plastica: oltre il c. elastico non vale più legge di Hooke legami si rompono e si riformano diversamente

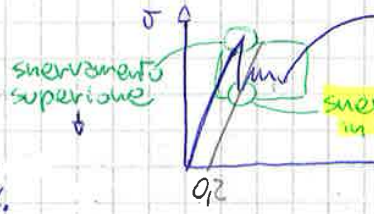
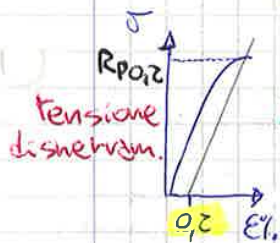


se rimane tensione: deformaz. elastica recuperata
deformaz. plastica irreversibile



per determinare confine c. elastico - c. plastico:
parallela al grafico, passante da $\epsilon = 0,2\% = 0,002$
interseco grafico
trovo σ corrispondente al **limite di proporzionalità** (= **Yello strength**)

"carico unitario di scartamento dalla proporzionalità diretta $\sigma \propto \epsilon$ "



snervamento inferiore \equiv limite di proporzionalità

per lavori in c. elastico

alcuni polimeri hanno c. plastico molto ampio

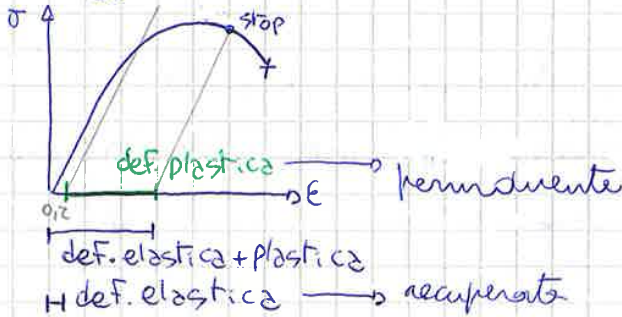


nei materiali con c. plastico i legami si riformano grazie alle dislocazioni (metalli)

favoriscono rottura - riformazione di legami

quantificazione deformaz. plastica:

- traccia parallela $\sigma = \bar{\epsilon} \epsilon$ passante per il punto in cui interrotta trazione
- sottraggio il tratto di ϵ staccato dalla // al 0,2% \rightarrow def. elastica



in c. plastico curva descritta da $\sigma = k \epsilon^m$

durante la deformazione plastica cambiano dimensioni dei grani
 se grani si deformano anisotropamente

cambiano dimensioni grani \Rightarrow cambiano proprietà:

grani + piccoli, dislocas. + ostacolate, + c. elastico, - c. plastico

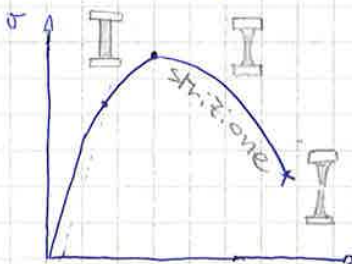
nel campo plastico carico di rottura (Tensile Strength)
 = max della curva $\sigma \epsilon$

oltre la curva no significato fisico

curva decresce se sezione del provino diminuisce
 ma $\sigma = \frac{F}{A}$ con A sempre la stex

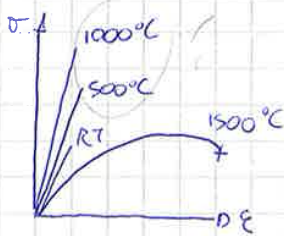
(per avere curva crescente occorrerebbe affinare A punto per punto)

A inizia a diminuire dopo carico di rottura
 = strizione
 finché si rompe nel punto di frattura



ceramico a T maggiore

legami si rompono e possono riformarsi \Rightarrow meno c. elastico, ma + plastico
da fragile \rightarrow a duttile



ceramic hanno frattura fragile

piatta, T di direzione di trazione

- la propagazione della cricca avviene per rottura di legami
- lungo un piano reticolare se monocristallo \rightarrow cleavage
- lungo bordi di grano a partire da cricca nei poli cristalli

quindi si distinguono:

FRATTURA DUTTILE: ampia def. plastica che rallenta propagazione della cricca
vantaggioso se anche se c'è cricca si propaga molto lentamente

FRATTURA FRAGILE (CATASTROFICA): rapida propagazione della cricca

a livello microscopico (μm):

- substrati di ceramico a temp. ambiente sottotensione, slittamento lungo piani reticolari + densi \rightarrow favorire dislocazioni
- hanno limite di movimento molto maggiore: 5/7 GPa se talmente piccoli che non ci sono difetti

quindi vantaggi delle dislocazioni
+ vantaggi per assenza di difetti

se Allungamento (ultimo punto di ϵ sul grafico)

< 5% fragile

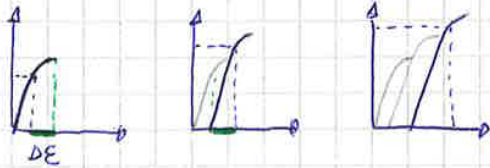
(5/10% transizione)

75% duttile

incrudimento a freddo

metallo in macchina di trazione, deformato plasticamente
recupero elastico ma non plastico

aumenta il limite proporzionale, funzione del wt% in carboni inseriti
finché limite prop. = carico max = punto di rottura



$\Delta \epsilon$ è deformazione plastica non recuperata
nella trazione successiva
parte fissa da $\Delta \epsilon$

le dislocazioni introdotte in ostacolo a vicenda
ma rimmovibili con rottura

es. $E_{\text{acciaio}} = 193 \text{ GPa}$, $E_{\text{bronzo}} = 100 \text{ GPa}$, $E_{\text{polimero}} = 0,17 \text{ GPa}$

calcola Δl in c. elastico!

di un filo $l = 10 \text{ m}$, sezione $A = 1 \text{ mm}^2$ sottoposto a $F = 10 \text{ N}$ (1kg)

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

$$\text{con } \sigma = \frac{F}{A} = \frac{10 \text{ N}}{1 \text{ mm}^2} = 10 \text{ MPa}$$

$$l = 10000 \text{ mm} = \frac{10 \text{ MPa} \cdot 10000 \text{ mm}}{E}$$

\downarrow
193000 MPa / 100000 MPa / 170 MPa

es. cavo Ni con $d = 3,8 \text{ mm}$, applicato $F = 3780 \text{ N}$

nota tensione di snervamento = 310 MPa

carico di rottura = 380 MPa

si deforma plasticamente? subisce strizione?

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

$$\text{con } A = \left(\frac{3,8}{2}\right)^2 \pi = 11,34 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{3780 \text{ N}}{11,34 \text{ mm}^2} = 333 \text{ MPa} \Rightarrow R_p \text{ c } 310 \text{ MPa} \text{ c } TS \text{ c } 380$$

si def. plastica, NO strizione

σ_{MAX} = tensione massima a trazione = carico di rottura

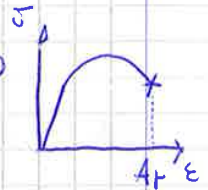
$\sigma_R = R$ carico di rottura / resistenza a trazione (R_{m} se ho solo c. elastico)

σ_{SA} = Tensile Strength = Upper Tensile Strength (TS/UTS)

A_T = deformazione dopo rottura = $\frac{L_f - L_0}{L_0} \cdot 100$

ϵ_T = allungamento % totale dopo rottura = $\frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100$

σ_{SA} = maximum elongation (E_{lmax})



ϵ = strizione % = $\frac{S_u - S_0}{S_0} \cdot 100$

σ_{SA} = necking

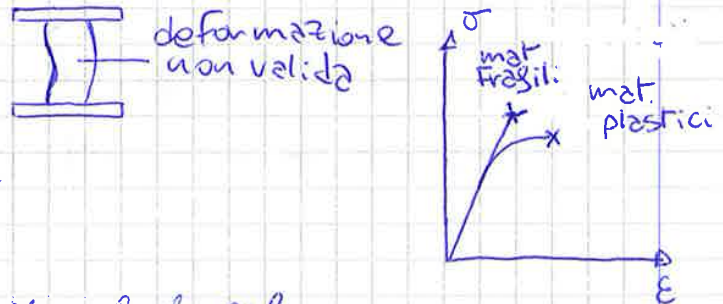
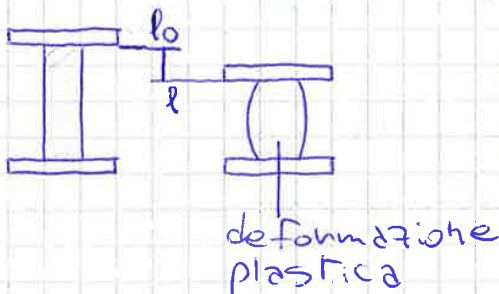
PROVA COMPRESSIONE

effico tensione -> deformazione di compressione $\epsilon_c = \frac{l_0 - l}{l_0}$

x avere ϵ positiva

prova si interrompe - qnd si rompe
 - qnd si rompe proprio
 * la trp repulsione tra cariche di atomi troppo vicini

inconvenienti: deformazione non valida se il massimo si piega male
 sovraestima della resistenza effettiva se sottoposti a + forze nella realtà



note: per usare con materiali fragili
 xh anche se ci son piccole o difetti macroscopici
 comprimendo si offusciano -> non si propagano

materiali fragili ok se compressi

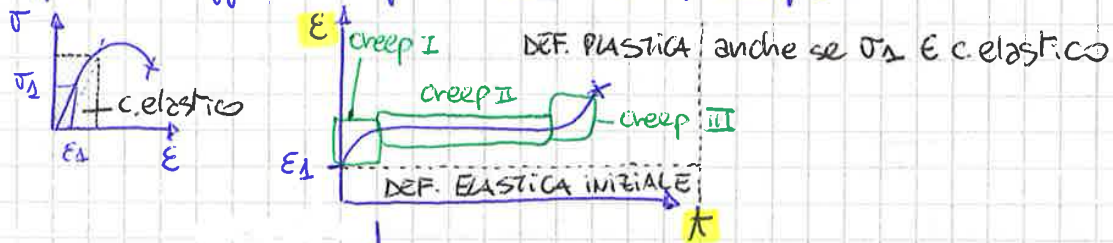
PROVA DI CREEP

σ = resistenza allo scorrimento viscoso

Qualsiasi materiale sollecitato con pressione costante in c. elastico dopo molto tempo, subisce def. plastica, fino a rottura

a causa dei bordi di grano che scorrono tra loro
= EFFETTO CREEP

represento effetto creep in curva E /tempo:



l'applicazione di un carico costante può provocare una deformazione progressiva, permanente

creep attivati termicamente:

- materiali metallici: $T > 0,3 - 0,4 T_{fusione} (K)$
- ceramici: $T > 0,6 - 0,7 T_{fusione} (K)$ → x le legami + forti
- polimeri, vetri: $T > T_{transizione\ viscosa}$

prova di creep:

applicato tensione costante, misuro allungamento dopo tempo "lungo"
x velocizzare aumento T e σ e riadatto i risultati alle T e σ in cui verrebbe utilizzato il mat.

CREEP PRIMARIO addolcimento per temperatura ma + incrudimento x trazione velocità deformazione crescente (annullamento tra dispersioni di verso opposto)

CREEP SECONDARIO addolcimento = incrudimento vel deformaz. costante (lavoro in creep II)

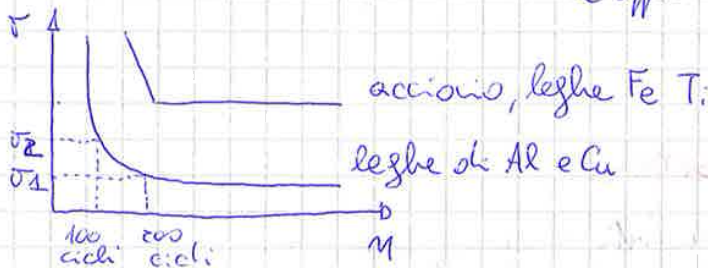
PROVA A FATICA

materiale soggetto a trazione in c. elastico x molte volte
ogni volta inscit un incoadimento → + dislocazioni
anche se sempre in c. elastico → si rompe

prove a fatica:

provino in flessione in rotazione → si alternano trazione - compressione
come se subisse tutt trazioni

traccia curva σ / \log di cicli: ogni punto indica a quati cicli si rompe
se applicato una certa tensione



con leghe Ti Fe legumi + forti

limite intrinseco di fatica = al di sotto di una certa σ
"non" si verifica frattura a fatica



$$S = \frac{(\text{Sollecitaz. compress}) - (-\text{Sollecitaz. trazione})}{2}$$

$$\sigma = \frac{\sigma_{\text{compress}} - \sigma_{\text{traz}}}{2}$$

superficie di frattura a fatica.

frattura si innesca dalla superficie e si propaga
o partire da cricca già presente o formata

frattura catastrofica per tt materiali (duttile e fragili)

(se in fragile si stacca in fretta, duttile rallenta "probona")
propagata (superf. lucida)

- trattamenti in superficie
- evitare concentraz. forni
- per no propagazione cicliche



→ se cricca lunga e raggio piccolo $\sigma_m = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$ x qualche mias x qd/16
 Fattore concentraz. sforzi $K = \frac{\sigma_m}{\sigma_0}$ tensione effe $\sigma_{eff} = \text{tens. no miniale}$

KIC indica le condizioni critiche di dimensione difetto - tensione applicata

$$K_{IC} = Y \sigma_c \sqrt{\pi a}$$

per cui avviene frattura (fragile) in θ materiale

$$K_{IC} = (\text{tensione}) \cdot (\text{ampiezza}) = [MPa \cdot \sqrt{m}]$$

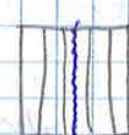
è grandezza propria di ogni materiale

KIC \propto resistenza \rightarrow non permettermi difetti + grandi o tensione maggiore

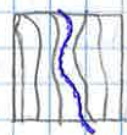
nei ceramici KIC basso ma risolve problema usando fibre di ceramici (piccole diam)

per non far propagare la cricca \rightarrow carico meno della KIC

propagazione della cricca in materiale monolitico



in materiale composito se le fibre ostacolano la propagazione



qualunque materiale può dare frattura duttile o fragile dipende da capacità di rallentare espansione cricca

es. metallo: frattura cup cone - duttile se sottoposto a trazione

frattura catastrofica = fragile se frattura per espansione cricca

migliorare resistenza a fatica

1. trattamenti su superficie (per ottenere un certa durezza per uno spessore)

tempra, cementazione niturazione

sebbiatura \rightarrow sabbia o alluminio sparata in aria compressa in collisione col la superficie la superf perde del plastica ma + elastica mentre l'interno è sempre plastico uguale

metodo **Rockwell HR** valutato in differenza di profondità
 indentatore cono diamante, o sfera acciaio
 diverso x minore profondità **incaudito** di impronta

con prova durezza HB: $\sigma = \frac{F}{A}$
 conosco F applicato } riamo
 misura A impronta

relazione empirica tra resistenza meccanica di durezza
 sfruttato x un fine test trazione: + duro => meno impronta =>
 (min 5 provini x misura, 6000) meno def plastica => + elastica

es. per i metalli res. meccanica $\approx 3,5 HB$

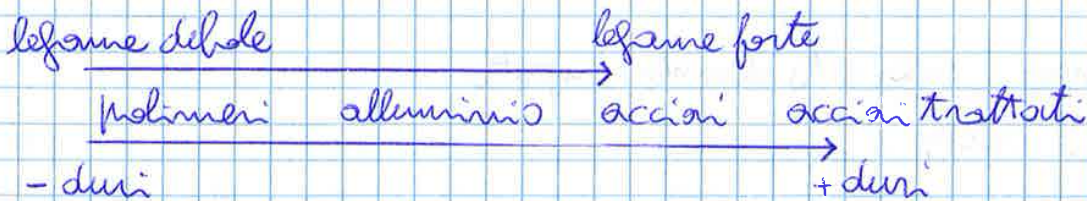
nell'indicore varie di durezza
 si scrive il metodo e il cono usato

es. 60 HR30W = Hardness Rockwell pari a 60 nella scala 30 (kg) W
 80 HRB = Hardness Rockwell pari a 80 nella scala B (100 kg)

ceramici mi + duri (infatti usati per rivestimenti)

es. diamante	Hk 7000
nitruro di carbonio cubico	6900
diboro di titanio	3300
carburo di boro	...
carburo di silice	...
nitruro di silice	7600
alluminio	2000

la durezza dipende solo dai legami + o - forti:



per raggiungere il tip di legami forti
 x aumentare durezza pox solo trattare superficie

PROFLO DI DUREZZA

= prova di durezza fatta in una sezione
 serve x materiale con superf. inalterata ->

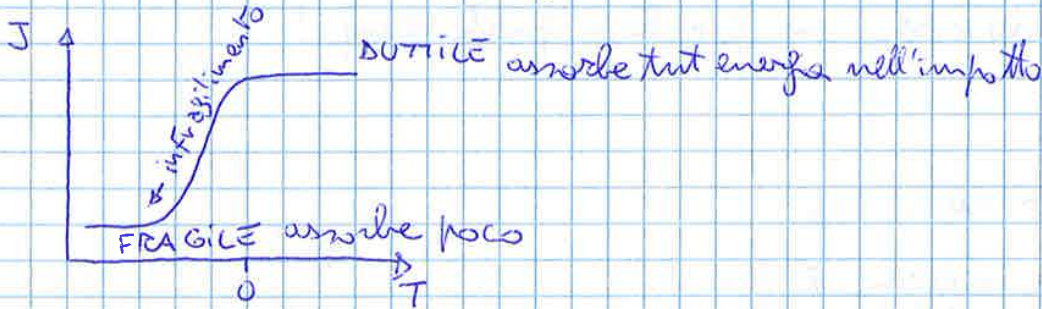
con prova Charpy possono frattura duttile
 ma se abbasso temp \rightarrow frattura fragile

CRIOGENIA

Transizione duttile-Fragile

riguarda tutti i materiali duttili
 diminuendo temp, diventano fragili
 \Rightarrow temperatura di transiz. duttile-fragile

(E anche transiz. fragile duttile, scaldando)

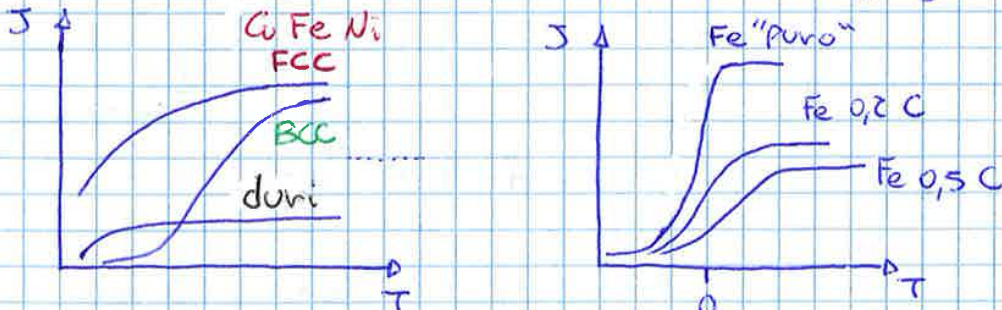


per conoscere a T basse uso materiali ordinati a criogenia:

- materiali FCC hanno densità più alta, reticoli più morbidi
 dislocano in se spostano bene
 anche se hanno meno energia a disposizione
 a causa della diminuzione di temp.
- materiali BCC già c'è meno energia per diminuis. ΔT
 inoltre più densi
 dislocano ancora + fatica per muoversi

- materiali con interstizioni (leghe con C interstiziale) l'interstizio ne ostacola il movimento delle dislocazioni:

da un lato assorbe meno plasticamente a T amb.
 ma ha transiz. duttile-fragile + lenta

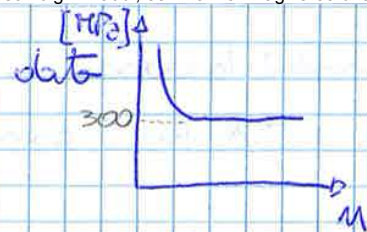


FCC \rightarrow disordato, ma meno disordato del CCC
 x_c + densa disloc. riesce a muoversi anche se poca energia

CCC \rightarrow disordato, x_c già meno denso, inoltre disloc. poca energia

Acciaio con C \rightarrow già poco plastico a T amb.
 continua a rimanere poco plastico

es. $F = 22 \text{ kN}$ da non per un avere rottura? con fattore di sicurezza z ?



$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{22000 \text{ N}}{A} = 300 \text{ MPa}$$

$$A = \frac{22000 \text{ N}}{300 \text{ N/mm}^2} = 73,33 \text{ mm}^2 = \pi r^2$$

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{73,33}{\pi}} \rightarrow d = 2r = 9,6 \text{ mm}$$

con fattore sicurezza z divido limite intrinseco per z

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{22000 \text{ N}}{A} = \frac{300 \text{ MPa}}{z}$$

$$A = \frac{22000}{150} = 146 \text{ mm}^2$$

$$d = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 13,6 \text{ mm}$$

PROPRIETÀ TERMICHE

calore si propaga tramite onde vibrazionali = **FONONI**

Def CONDUCEBILITÀ TERMICA

proprietà termica dei materiali che definisce attitudine a trasferire in termica da un sistema ad alta temp a uno a bassa

coeff di conducibilità termica $k = \frac{Q \cdot x}{A \cdot T}$

= quantità di calore (J) che in 1 sec attraversa una sezione di 1 m^2 perpendicolare alla direzione del moto del calore in materiale spesso 1 m con diff. temperatura di 1°K

$$k = \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right] = \left[\frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{K}} \right] \quad +k \Rightarrow + \text{conduce}$$

conduc. termica in base alla facilità di propagazione dei fononi + materiali cristallini \Rightarrow + vibra bene

k metalli $>$ k ceramici \gg k polimeri

- metalli hanno $k >$ della k delle loro leghe
 x nelle leghe ci sono interstizionali e sostituzionali che ostacolano i fononi.

- Ceramici in ordinati ma ftioni diversi, dimensioni diverse ostacolano vibrazione fononi

• Vacuum Insulation Panels
 = (pannelli isolanti sottovuoto)

Capacità termica 3/10 volte meglio degli isolanti tradizionali
 meno spessi \Rightarrow meno ingombro

\downarrow
 schiuma di silice in cui fatto il vuoto
 tra pellicole metalliche

es. diamante $k = 2000 \text{ W/mK}$

grafite $k = 400 / 3,5$

\rightarrow atomi ordinati, tt \Rightarrow alta massa
 legame forte \Rightarrow alta
 strutt. cristallina semplice,
 simmetrica, pochi difetti

\downarrow
 che dipende dalla direzione
 (materiale anisotropo)

\downarrow
 conduce bene lungo il piano (a,b)
 isolante tra piani (a,c)



\downarrow
 affinità grafite (monstrato di grafite) o polimeri
 per condurre di + quel serve buona densità

es. sonda di calore: tubi di SiC lunghi e sottili

\downarrow
 avere minor prob. di trovare difetti

dissipatore di calore (in microelettronica)
 ceramico (AlN)

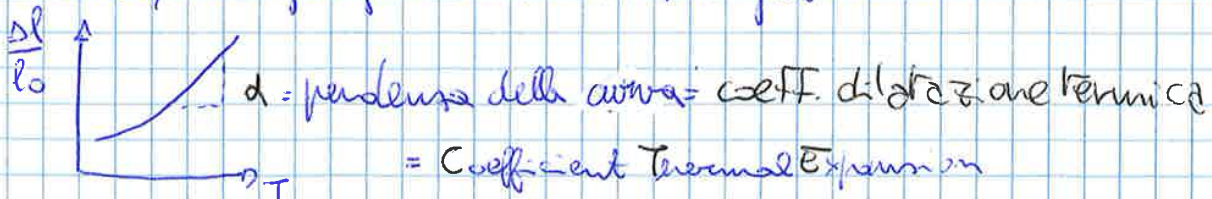
cap. termica varia in funz. temp:

$k \propto \frac{1}{T}$ ossia + caldo e meno conduce
 che + caldo, + vibraz. il reticolo, + dispersione
 fononi + ostacoli a propagazione

leghe di Cu-W e Cu-TiO conducono bene ma in molt. densità
 allora uso AlN

DILATAZIONE TERMICA Coefficient T

+ caldo, + allungo legami \rightarrow vol. lo si ingrandisce

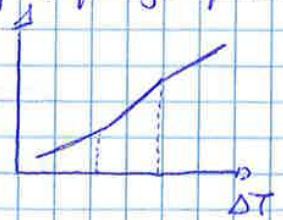


PROVA DI LATAZIONE TERMICA

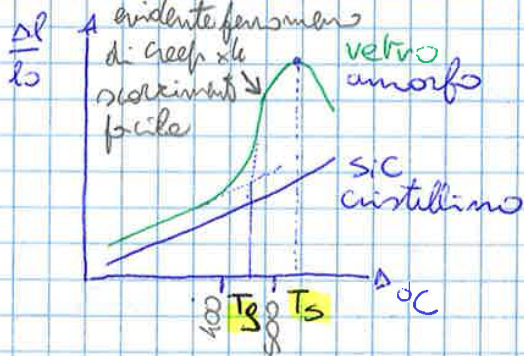
dilatometro: fono in cui inserito provino a bloccato da una parte
pistone dall'altra

misura in funa della temp, in istante, di qua spinge il pistone

traccio curve sperimentale → pendenza cambia
in base al ΔT



dilatazione materiali cristallini vs amorfi



l'amorfo si dilata prima un cristallino
qua sopra la Tg si dilata di +
di catene se sono meglio

anche polimeri comportament amorphi
ma a temp <<

Tg lass = temp. transizione vetrosa amorfo si comporta un liquido
inizia a rammollire

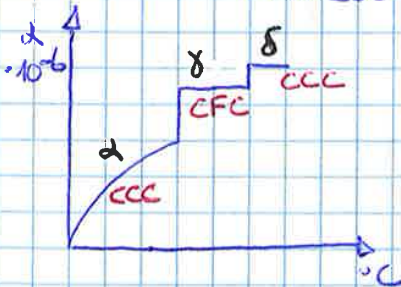
Ts offrening = temp. rammollimento amorfo inizia a fondere

prova interotta a Ts, se no vetro fuso si espande,
nonna strumento

uso $T > Tg$ x lavorare vetri e polimeri
 $T > Tg$ per colare x mult effetto creep

dilatazione del ferro

Fe cambia cella cristallina al variare della temp.
in modo da essere + stabile in qll temp.



salto x cambio di cella
ovviene a temp. molto precisa
(spuntati x trovare termometri)

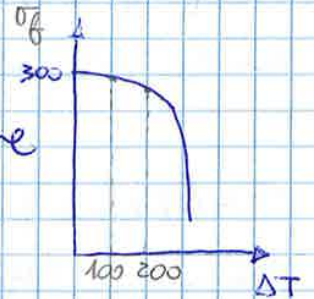
resistenza a shock termico per:

- metalli **OK**: σ_f basso, k alto
 E alta ma in un ceramico, α_f alta ma in un polimeri
 - ceramica **NO**: σ_f basso, k basso
 E molto alto
 - polimeri **+o-**: σ_f basso, k basso
 E molto basso, α_f molto alto
 - vetro **+o-** (caso particolare): σ_f basso, k basso
 E abbastanza grande, α_f molto basso
 (es. SiO_2 amorfo)
- zero dur ha α_f minimo
 ha TSC + alto di α_f

120
36
30
15
201

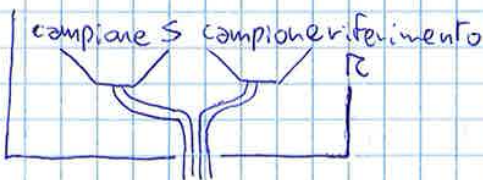
PROVA DI TSC

prova a flessione in massimo a t . amb
 scald massimo, butto H_2O , prova a flessione
 scald con ΔT maggiore, raffreddo, prova flessione
 + scald, flessione minore



TECNICHE DI ANALISI TERMICA

DSC = Calorimetria e Scansione Differenziale

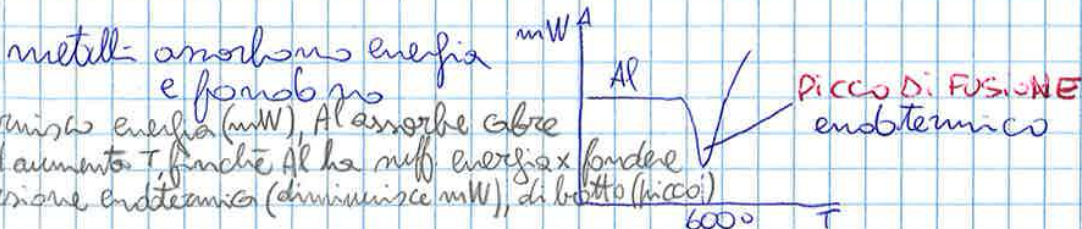


in forno scald campioni R e S
 calcoli mW necessari a mantenere costante temp.

se qud S fonde assorbe energia

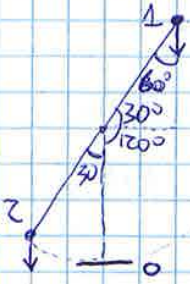
per verifica consistenza della misura traccia linea di base:

minimo $S=R$
 minimo R puro di allumina Al_2O_3
 (fina a $2000^\circ C$ nulla, non fonde) } linea piatta



es. massa del pendolo di Chocoy $m = 102 \text{ kg}$, braccio $0,75 \text{ m}$,
 all'angolo $120^\circ \rightarrow$ dopo l'urto 30° rispetto la verticale: energia assoluta
 nell'impatto?

23



$$h_1 = b + b \cos 60^\circ = 1,125 \text{ m}$$

$$U_1 = mgh_1$$

$$h_2 = b \cos 30^\circ = 0,6495 \text{ m}$$

$$U_2 = mgh_2$$

$$\Delta U = mg(h_1 - h_2) = 102,46 \text{ J} = \text{energia assoluta,}$$

urto x comprese pirovino

es. coeff. di dilata. termica $220 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, allungamento di una lancia
 lungo 50 cm , con ΔT da 25 e $50 \text{ } ^\circ\text{C}$

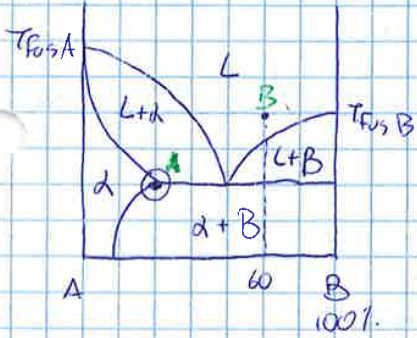
$$\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T; \Delta l = 50 \text{ cm} \cdot 220 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 25 \text{ } ^\circ\text{C} = 0,275 \text{ mm}$$

? esempi di frattura fragile e duttile:
 spiegare da p. di vista della struttura del materiale + grafici

fragile: cerami e
 sh mot disloc. orientati a cause di imi grandezza diverse

retro
 sh mot disloc. orientati da imi diversi, disorientati

duttile: metalli
 sh mot disloc. sfondati da atomi uguali, orientati

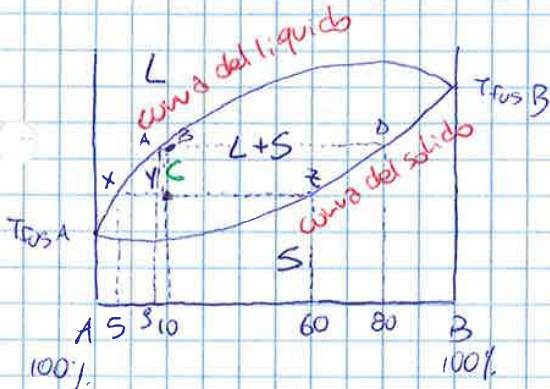


$d =$ soluzione solida di B in A
 quasi tutta A, con poco B come soluto
 è diagramma d-B, ma leggiamo concentrazioni di A e B

A e B sono miscibili da solidi solo per certe % nella fase di d

A max solubilità di B in d
 aumentando la % B diventa d+B insolubili

B in zona monofasica leggiamo % di composizione eq. B 60%
 A 100-60=40%



ogni punto del diagramma dice
 - cosa c'è
 - in quale %
 - in quale stato
 termodinamicamente stabile
 a quella temperatura

C zona bifasica: leggiamo % di composizione del solido sulla curva del solido
 S composto da 60% B
 40% A

leggiamo % di composizione del liquido sulla curva del liquido
 L composto da 5% B
 95% A

complesivamente in C c'è 10% B e 90% A

calcolo percentuale delle fasi presenti in C con legge della leva

$$\% \text{ fase solida} = \frac{xy}{xz} = \frac{10-5}{60-5} =$$

$$\% \text{ fase liquida} = \frac{yz}{xz} = \frac{60-10}{60-5} =$$

combinando la temperatura, cambia la % delle fasi di liquida e solida

$$\% S = \frac{AB}{AD} = \frac{10-9}{80-9}$$

$$\% L = \frac{BD}{AD} = \frac{80-10}{80-9}$$

▷ raffreddando attraverso l'eutettica
 => solidifica con la **STEX COMPOSITA** che ha poca prima della eutettica
 quando composta di β e L prima della eutettica, in $L+\beta$

$L = 60\% B$
 $40\% A$

quantità $L = \frac{30-70}{30-60} \%$

diventa struttura eutettica
 di d e β a lamelle
 nella stex quantità,
 con la stex composta!

$\beta = 30\% B$
 $10\% A$

quantità $\beta = \frac{70-60}{30-60} \%$

diventa **β PRIMARIO**, nella stex quantità
 con la stex composta.



PUNTO EUTETICO = basso fondente (uso x robotture)
 = avviene fusione immediata di $d+\beta$ a temp. < temperature di d e β singoli
 quindi $d+\beta$ + stabili in fase liquida hanno legami + deboli

re combinati in soluzione con composizione eutettoidica

composita. $d \%$: $20\% B$
 $80\% A$

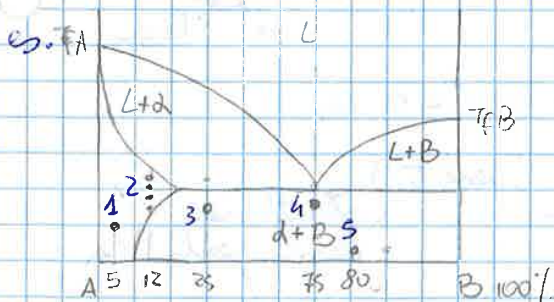
quantità $d = \frac{EY - 30-60}{XY - 30-20}$

composita. $\beta \%$: $30\% B$
 $10\% A$

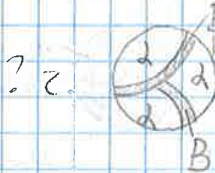
quantità $\beta = \frac{EX - 60-20}{XY - 30-20}$



Struttura eutettica è a lamelle di d e β **NON** a grani!!!
 se il passaggio da liquido a solido con diffusione
 (d e β non possono balzare da una parte o dall'altra per d. vicini in grani)



d 100%
 B 5%, A 95%



A 100-12%
 B 12% distribuita tra d e β primario



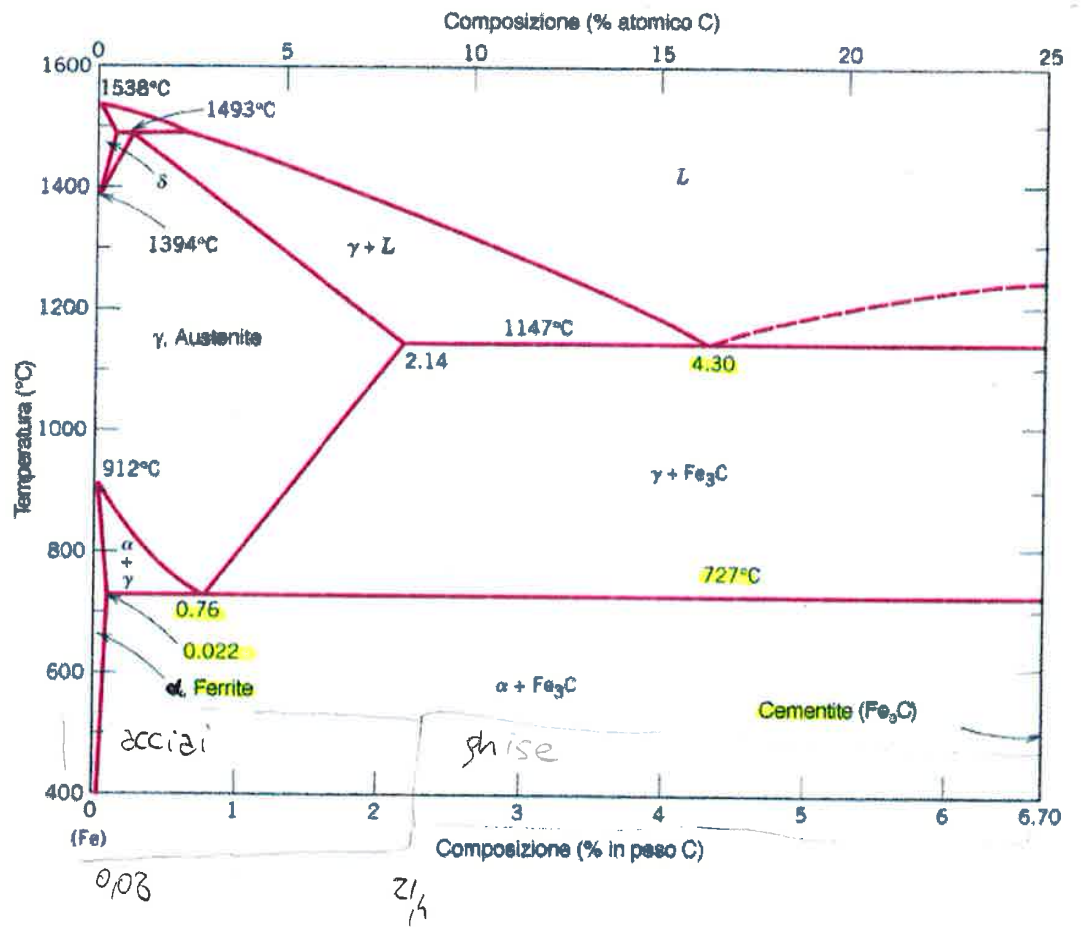
B 25%
 A 75% distribuita tra d primario e β eutettica



B 80%
 A 20%



B 75% distribuita tra d e lamelle
 A 25%



se linea di raffreddamento non attraversa la eutettoidica (passa a sx) non si forma la struttura perlitica: ho solo grani di $\alpha + Fe_3C$ primario ai bordi



26

• segue la linea di raffreddamento a sx dell'eutettoidica:

A 500°C monofasico 100% $\gamma \rightarrow C 0,4\%$



B 300°C bifasico $\alpha = \frac{0,5 - 0,04}{0,5 - 0,015} \% \rightarrow 0,015\% C$

$$\gamma = \frac{0,4 - 0,015}{0,5 - 0,04} \% \rightarrow 0,5\% C$$

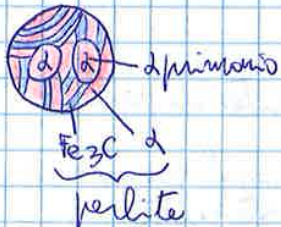
attraverso eutettoidica, solidifica con steq composiz. percentuale da temp $< 723^\circ C$ acciaio $C 40 = 0,4\% C$ (per costruzioni)

prende compo. A che ha poco prima dell'eutettoidica:

$$\gamma = \frac{0,4 - 0,02}{0,8 - 0,02} \approx 50\% (0,78\% C)$$

$$\alpha = \frac{0,8 - 0,4}{0,8 - 0,02} \approx 50\% (0,02\% C)$$

sotto l'eutettoidica α diventa \rightarrow α primario 50% (0,78% C)
 γ diventa \rightarrow struttura perlitica $\alpha + Fe_3C$ 50% (0,02% C)



$$\left[\begin{array}{l} Fe_3C = \frac{0,4 - 0}{6,7 - 0} \text{ diviso tra } \alpha \text{ primario, } \alpha \text{ perlitico e } Fe_3C \text{ perlitico} \\ \alpha = \frac{6,7 - 0,4}{6,7 - 0} \text{ diviso tra } \alpha \text{ primario e } \alpha \text{ perlitico} \end{array} \right]$$

• segue linea raffreddamento a dx dell'eutettoidica (acciaio da utensile)

A 500°C 100% $\gamma (1,2\% C)$

B 800°C $\gamma = \frac{6,7 - 1,2}{6,7 - 1} \% (1\% C)$



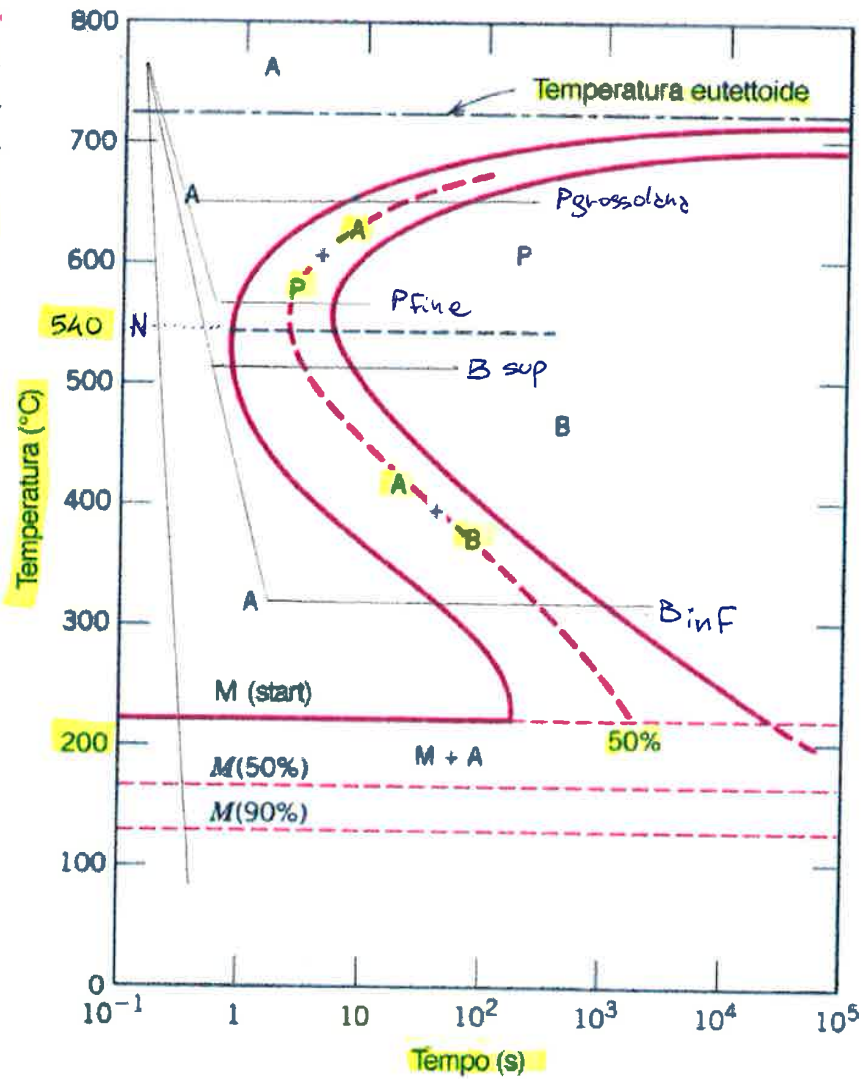
$$Fe_3C = \frac{1,2 - 1}{6,7 - 1} \% (6,7\% C)$$

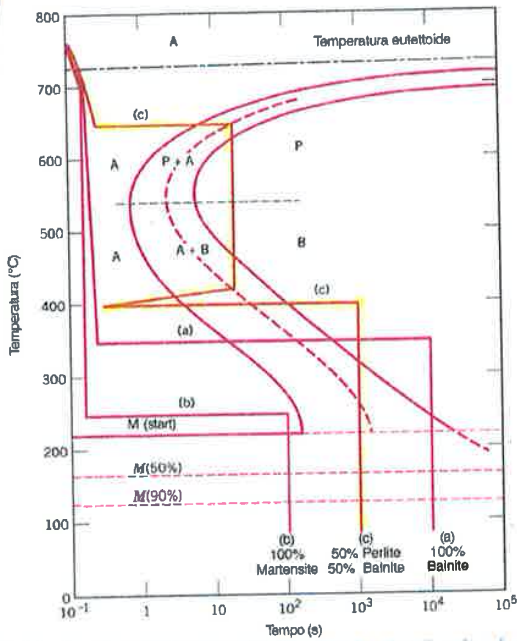
poco prima dell'eutettoidica: $\gamma = \frac{6,7 - 1,2}{6,7 - 0,8} \approx 95\% (0,81\% C) \rightarrow$ perlite temp $< 723^\circ C$



$$Fe_3C = \frac{1,2 - 0,8}{6,7 - 0,8} \approx 5\% (6,7\% C) \rightarrow Fe_3C \text{ primario}$$

FIGURA 10.14
 Diagramma completo di trasformazione isoterma per una lega ferro-carbonio di composizione eutettoide; A, austenite; B, bainite; M, martensite; P, perlite.





per combinare velocità di raffreddamento:

- aspetto che in forni γ a 700°C
- raffreddato per avere 50% perlite + 50% γ
- a 400°C il 50% di γ rimasto si trasforma in bainite

ottengo 50% perlite + 50% bainite

TRATTAMENTO DI SFEROIDIZZAZIONE

Prendo perlite o bainite, scaldo per tempi lunghi a T_C eutettoide gli agili spariscono, ottengo sferette di cementite = sferoidite

tutta resistenza elastica di Fe_3C molto distribuiti ostacola dislocaz. ma è mantenuta continuità della matrice ferritica \Rightarrow ampio campo plastico tut area sotto σ_f σ_E

acciaio sferoiditico ha resistenza elastica e plastica come se fosse un composito di metallo e ceramico α Fe_3C

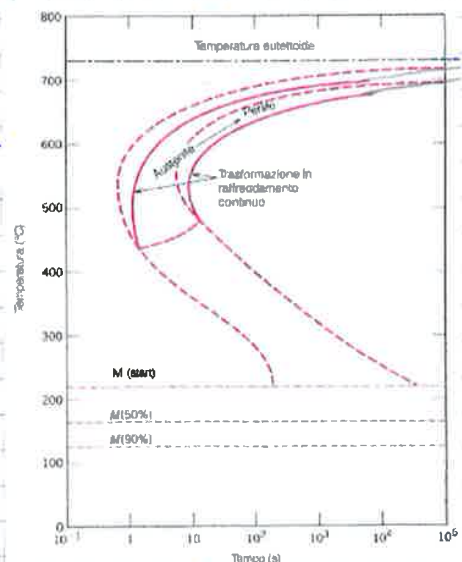
diagrammi CCT (trasformaz. raffreddam. continuo)

trattamenti in acciai non avvengono in forno con isoterme ma con raffreddam. continuo fino a T_{amb} .

ricottura = raffreddam. continuo

i diagrammi CCT in simili ai TTT, un poco traslati

E se raffreddo molto lentamente non ho + zona di coesistenza ma solo strutt eutettoide di α



per gli acciai legati (Fe + C + altri metall.) = leghe

ho 4 zone di coesistenza:

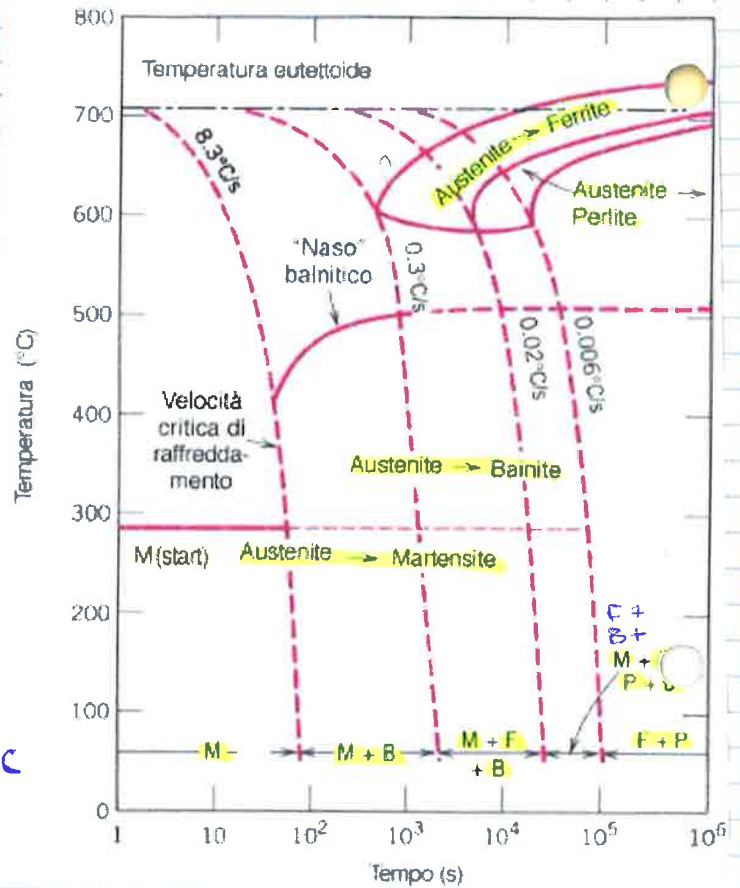
a velocità $< 0.006^\circ\text{C}/\text{sec}$ austenite:
 $\gamma \rightarrow \alpha$, $\gamma \rightarrow$ perlite

velocità maggiore:
 $\gamma \rightarrow \alpha$ ($\gamma \rightarrow$ perlite)
 $\gamma \rightarrow$ bainite

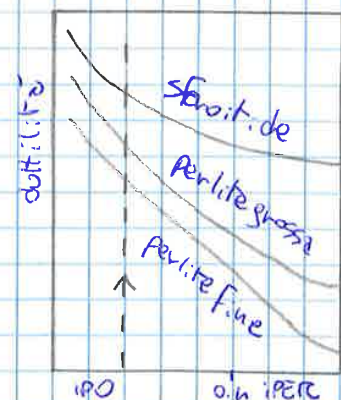
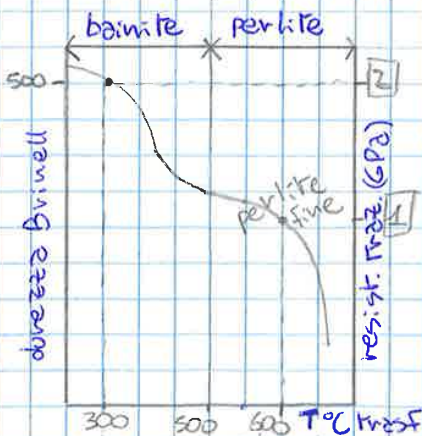
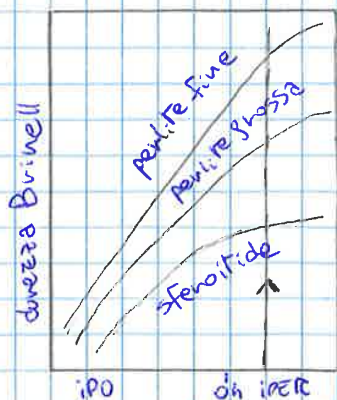
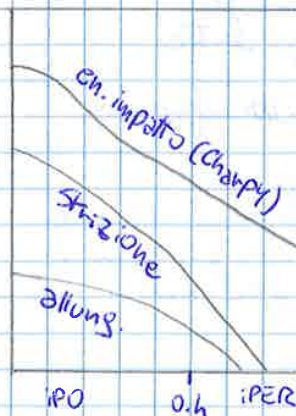
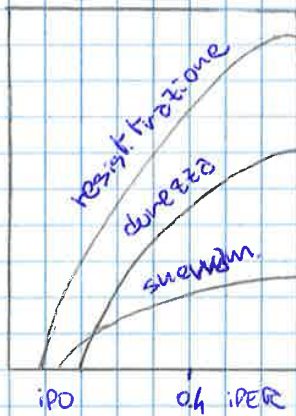
se velocità $> 0.3^\circ\text{C}/\text{sec}$
 ottengo anche:
 $\gamma \rightarrow$ martensite

a $v > 8.3^\circ\text{C}/\text{sec}$
 solo
 $\gamma \rightarrow$ martensite

per ottenere martensite è
 raffreddamento molto + facile
 rispetto ai 140°C del acciaio Fe-C
 xqst si usano le leghe



microstruttura e prop. meccaniche



NORMALIZZAZIONE

riscaldamento acciaio IPentell. a temp. $A_3 + 50^\circ C$
 RAFFREDDAMENTO VELOCE in aria calma

↓
 struttura mix ferrite + perlite fine

↓
 ma lamielle + piccole di ql ottenute da ricottura

↓
 rispetto alla ricottura: + resistenza, + elasticità
 rispetto la tempra: - fragile

TEMPRA

riscaldamento a temp. $A_3 + 50^\circ C$

RAFFREDDAMENTO MOLTO VELOCE in

H_2O , soluz. saline, sali fusi, olio, aria compressa
 severità di tempra decrescente

→
 = velocità decrescente

non si usa H_2O x le bolle, vapore H_2O non permette contatto completo
 tra acciaio e H_2O , tempra non uniforme
 uso soluz. saline (aumentano T_{eboll}),
 sali fusi, olio con T_{eb} → H_2O

ottenso reticoli distorti "strutture di tempra", dure resistenti
 ma fragili (es martensite)

se tempra non corretta, si formano cricche di tempra

temperabilità dell'acciaio

= capacità di essere induriti mediante forma di resistenza
 con un trattamento di tempra
 dipende da geometria, distanza, mezzo temperante

prova di profondità di tempra di Jominy

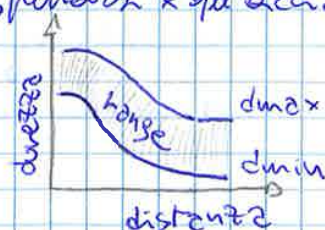
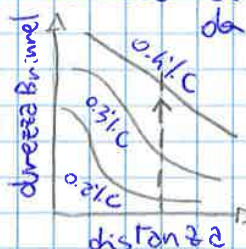
probino cilindrico riscaldato per essere H_x
 raffreddato una base del cilindro con getto H_2O a $24^\circ C$

ma con lato x averlo piatto → faccio profilo di durezza Brinell



poiché durezza cambia molto in funz. $\% C$
 (aumento molto se aumento $\% C$)
 non si dà "curva di temperabilità"
 ma una banda di temperabilità

↓
 indicata la durezza max e min da aspettarsi x ql acciaio



CEMENTAZIONE = "tratto un termo chimico"

= affinità di C solo alla SUPERFICIE x aumentare resistenza come solo alla SUPERFICIE
 in forma martensite per diffusione

cementi acciai IPO con plastica dentro, elastico fuori

per fare cementazione con mezzo cementante:

- liquido (acque, tonici, non +)
- gassosa → - costosa, + uniforme, velocità penetrazione maggiore,
- solida - tempo diretta, rimossa cementante solida

cementazione + profondità: + tempo
 ETH + temperatura

vantaggi: martensite iperrettoidica solo in superf

svantaggi: $\bar{\epsilon}$ suff. temp. 180°C x rinvenire martensite (limite tecnico)



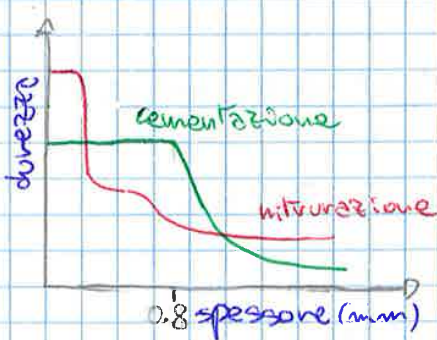
NITRURAZIONE

in NH₃ surriscaldato → N + $\frac{3}{2}$ H₂

in forma γ x diffusione nitruro di Fe
 + stabili alle alte temperature rispetto carburi di Fe

vantaggi: eseq. nitros. a temp. minore
 nitruro + stabili ad alta T della martensite
 per meno distorti

faccio nitros. in acciai da bonifica
 x aumentare resistenza a fess. e
 (costi se già temprati, rinvenuti, nitrosati)



TERMA SUPERFICIALE

= tratto un termico eseguibile su \forall acciai, solo sulla superf
 scald. superf (cannello O₂ - acetilene o ossido di acilene) e raffredd. (H₂O)

ACCIAI LEGATI

- composti di Fe - C da carbonio o altri elementi
 in quantità considerevoli
 aggiunti appositamente (unde se c'è un impurezza)

elementi leganti:

alfaogeni = α stabilizzatori che stabilizzano la ferrite

in solubilità a due imp \Rightarrow favoriscono presenza di ferrite

Si, Cr, V, Nb, W, Al hanno reticoli CCC \Rightarrow entrano bene in α
 (contiene C + ...)

gammaogeni = γ stabilizzatori = austenitizzanti Mn, Ni, Co, Cu

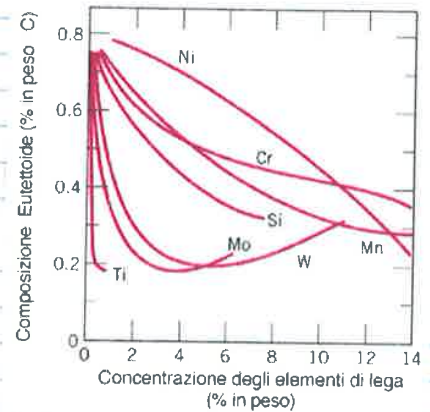
soluzioni solide con γ , che cristallizzano FCC, entrano bene in γ

acciaio continua ad essere formato da ferrite e austenite
 (che contengono altri elem. leg.)
 e altri carburi (non + cementite)

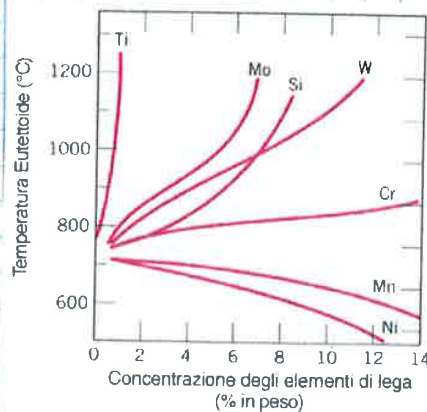
l'aggiunta di elem. leganti provoca:

- aumento di solubilità di C in Fe CCC
 (o diminuzione)

\Downarrow
 cambia composiz. dell'eutettoico

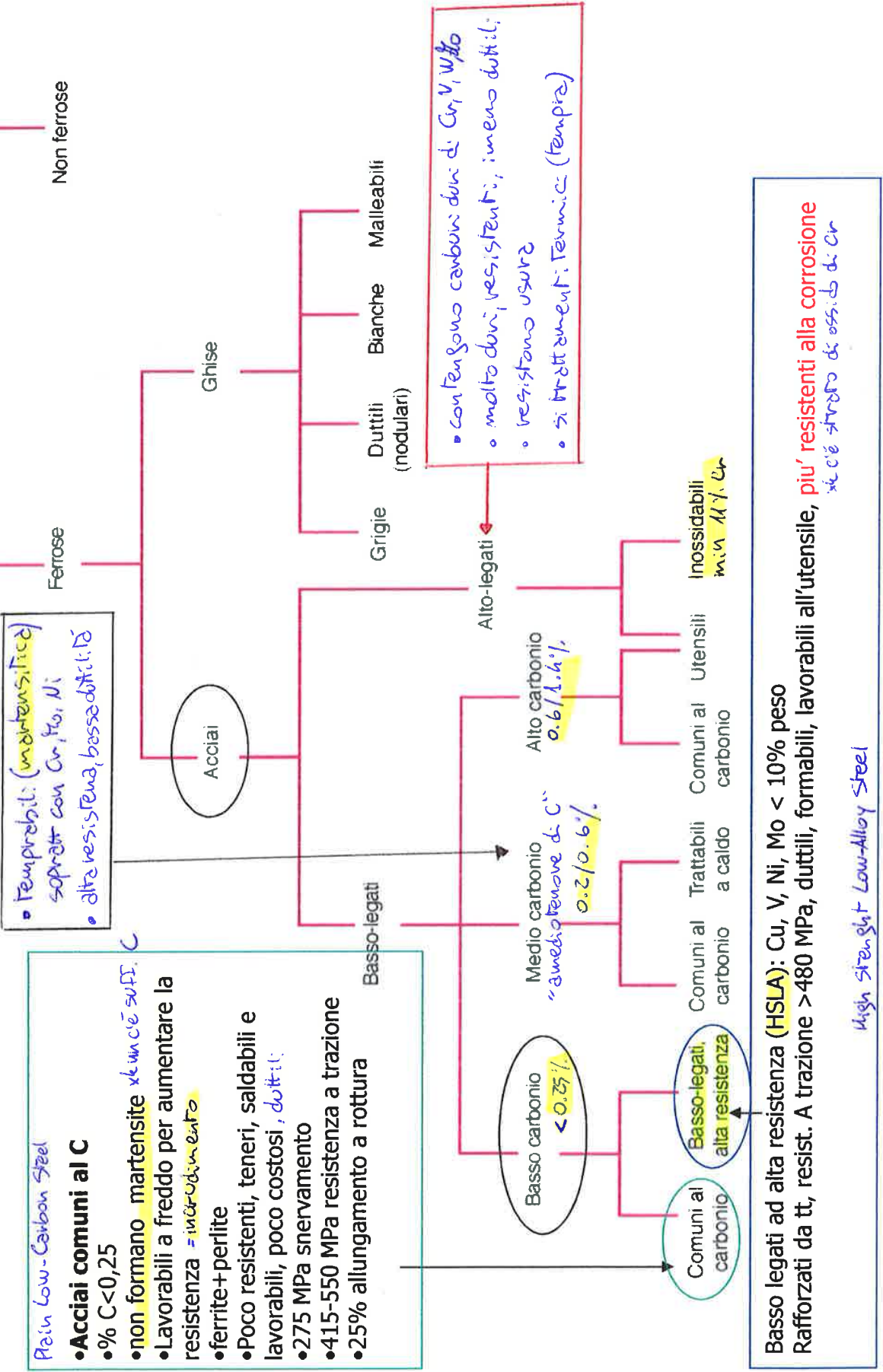


- aumento o diminuisce
 temperatura dell'eutettoico



- Ni, Si, Mn, Cu, Mo \Rightarrow + resistenza meccanica
 - tenacità
 (in soluzione solida)
 nella ferrite

Acciai a basso tenore di C (<0.25%)



GHISE = "cast iron"

leghe Fe-C con C 72.14% peso

C come cementite (Fe_3C) o come grafite (C)
 in base a composizione e velocità raffreddamento

perciò segue dati Fe- Fe_3C e Fe-C

poiché tant C, m fragili e dure, non lavorabili plasticamente
 ma con fusione

favorito dal basso p fusione rispetto agli acciai

aggiunto di elementi leganti: **Si** **Mg** **Ce** **S** **P**

elementi: grafitizzanti → favoriscono formaz. C grafite
 elem. anti-grafitizzanti → " " " C cementite
 (Cr, Mn, B)

modificano composiz. eutettica

se raffreddamento VELOCE ⇒ Fe- Fe_3C

LENTO ⇒ Fe-C (fino all'eutetticoide)

classificaz. ghise secondo: colore superficie di frattura → grigie, bianche
 microstruttura → lamine, fiocchi, noduli, rosette,
 lavorabilità → malleabile, duttile

uso ghisa per preparare acciaio:

1. minerale in altiforno → ghisa
2. ghisa in convertitore con O₂ → brucia CO₂ - ecceso di C → acciaio
3. colata e solidifica dell'acciaio
4. acciai lavorati per deformaz. plastica a caldo

DIAGRAMMA Cu-AL

- leghe di Al usate α - bassa densità (2.7 g/cm^3)
- duttili, malleabili (A% = 55)
- resistenza corrosione (strato naturale Al_2O_3)

Al: struttura FCC

$E = 66 \text{ GPa}$
 $\sigma_y = 20/50 \text{ MPa}$
 $T_S = 55/90 \text{ MPa}$

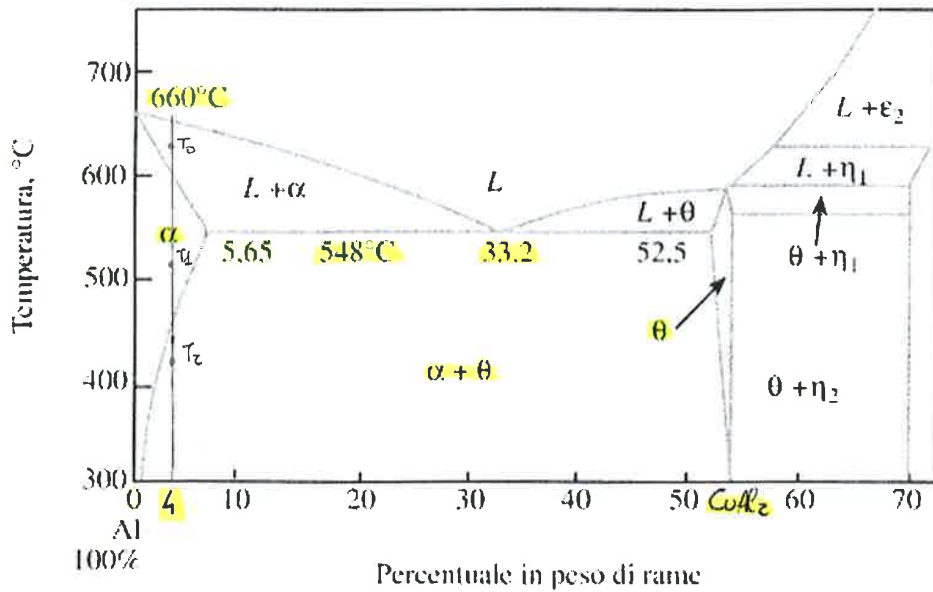
leghe Al-Cu alta resistenza meccanica \rightarrow uso in aeronautica onde ad alte temp.

INVECCIAMENTO

= rafforzamento per precipitazione

con trattamento termico si crea seconda fase di piccole particelle (precipitati) uniformemente dispersi nella matrice

es. Al-Cu, Cu-Sn = bronzo, Mg-Al



1. C = 4 dutalluminio

a T_0 coesistenza di liquido;

a T_2 α stabile

ma a T_2 si formano sempre + grandi θ che precipitano ai BCG di α

\downarrow
 NO buone prop. meccaniche

\downarrow
 è necessario che θ sia "finemente dispersa" \Rightarrow invecchiamento

POLIMERI

in strutture organiche formate da molecole di grandi dimensioni, alti PM

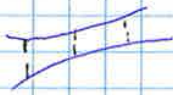
↓
 qui macromolecola è ripetizione di piccole unità = monomeri

tra le catene si creano legami secondari elettrostatici

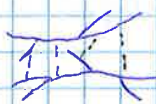
2 ordini di grandezza meno forti dei legami CH nella macromolecola

↓ dei legami nei metalli
 proprietà dei polimeri in caratterizzate dai legami secondari e dalla struttura della catena

catena lineare



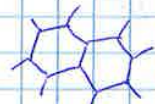
ramificata



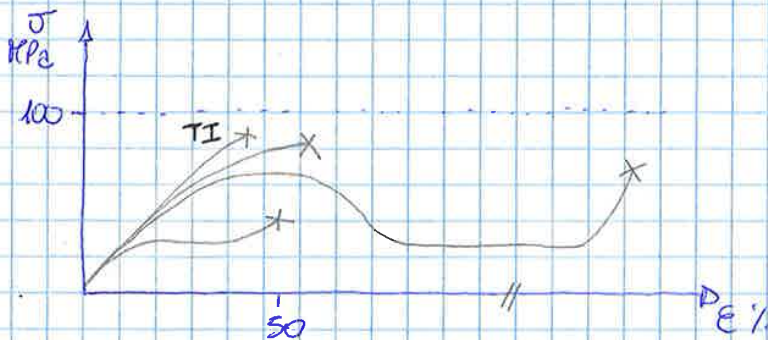
legami incrociati



tridimensionale



⊖ resistenza meccanica ⊕



polimeri possono essere

termoindurenti = "thermo sets"

TI

tra le catene si formano legami forti primari (C-C, C-N) a caldo o con comp. chimico

reticolano a caldo

+ resistenti
 non riciclabili - se scaldati bruciano

↓
 termorassottiti, o sbriciolati e inglobati in termoplastici

termoplastici

tra le catene solo legami secondari
 loro solibili a temp. minore dei TI, - resistenti
 riciclabili, se scaldati si sciolgono

Polimeri termoindurenti (thermoset)

- Due categorie: gli **elastomeri (gomme)** e i **termoindurenti** ad alto grado di reticolazione (rigidi fragili e resistenti alla temperatura).
- Legami primari, covalenti anche **fra le** catene
- sono lavorabili a caldo solo una volta, prima della reticolazione
- a successivi riscaldamenti si decompongono
- hanno resistenza meccanica superiore a quella dei termoplastici

Polimeri termoplastici

- costituiti da macromolecole di grandezza limitata, lineari o ramificate, con legami secondari fra le catene.
- Rammolliscono con il calore e solidificano per raffreddamento in modo reversibile, senza alterazioni della struttura. (es: polietilene)
- esistono allo stato solido in forma amorfa (vetro organico) oppure in forma semicristallina, che conferisce loro maggiore resistenza alla temperatura e agli agenti chimici.
- Si lavorano per stampaggio, a temperature più basse rispetto ad altri polimeri, con ritmi di produzione estremamente elevati.

Elastomeri (elastici, gomme)

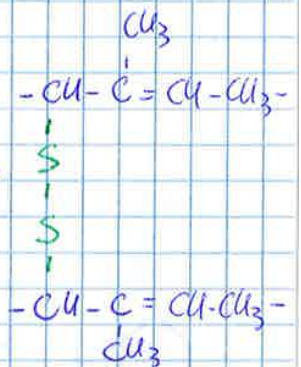
Termoindurenti lineari

perché dotati di crosslinks = legami tra catene forti, con ponti 7 off

si introducono ponti solo dopo stampaggio mediante vulcanizzazione

+ affluenza, + aumento resistenza meccanica

non hanno C. plastico, dopo la reticolazione non si deforma +



sintesi dei polimeri:

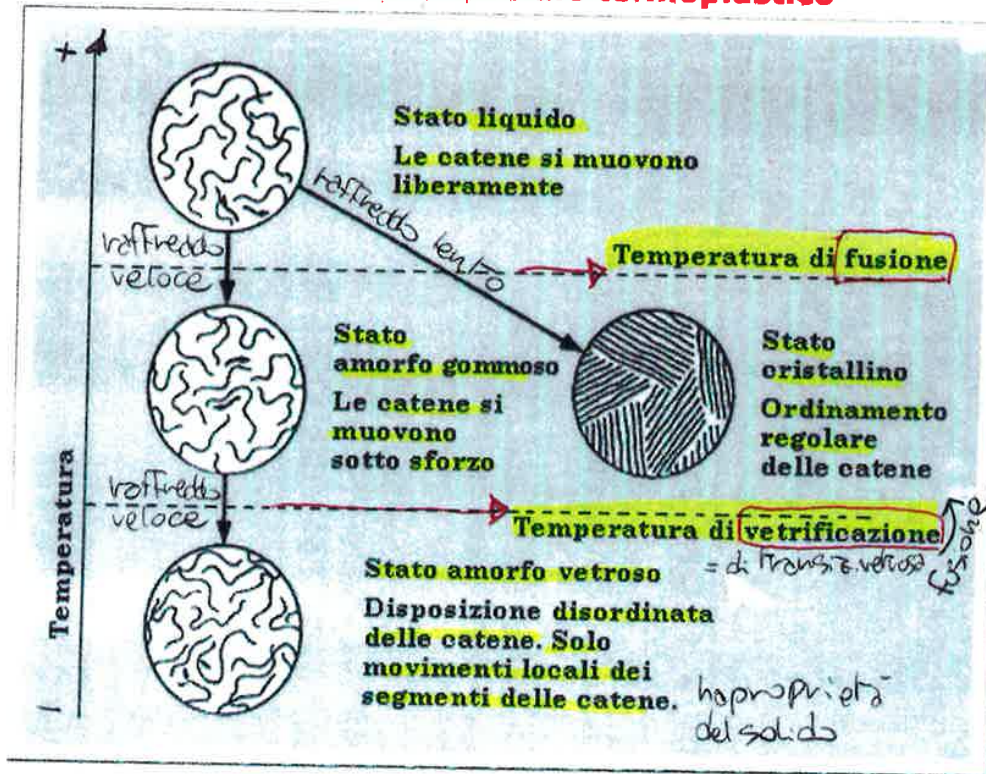
con reazione di addizione sui legami doppi/tripli
 con legami semplici a energia minore

mediante assorbimento di energia, fornito come luce, calore
 o con catalizzatore

policondensazione

- monomeri con gruppi reattivi terminali vengono uniti, con dissociazione di prodotti secondari volatili (H_2O , NH_3)
- deve avvenire un'alta efficienza per interfacciare due gruppi funzionali
- monomeri con 2 gruppi \rightarrow lunghe molecole lineari \Rightarrow termoplastici
 con + 2 gruppi \rightarrow macromolecole reticolate \Rightarrow termoindurenti

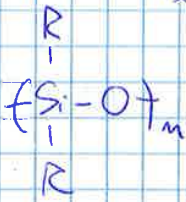
**I quattro stati principali
in cui può trovarsi un materiale termoplastico**



Materiali per l'Ingegneria
M.Ferraris

Siliconi analogo polimerico dei vetri

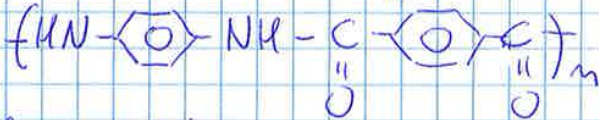
si ha struttura tetraedrica con Si al centro
 considerati, isolanti, riflettenti



ARAMIDICI

se con aromatico + ammidico

es **Kevlar** usat come fibra

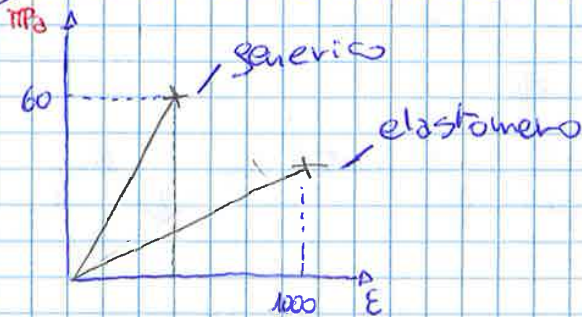


ha proprietà meccaniche molto alte.

resistenza
 specifica
 $\left[\frac{\text{MPa}}{\text{kg}} \right]$

- $E \in \text{GPa}$ si struttura allineata, resiste bene a trazione
- resistenza a trazione > acciaio comune
- deforma e rottura poco < acciaio, quindi si def. plastica

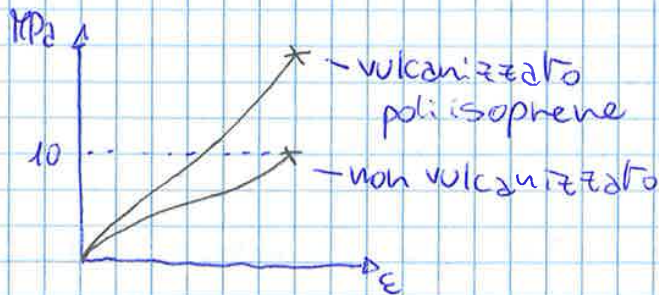
grafico $\sigma \epsilon$ dei termoindurenti:



sob campo elastico → comportamento fragile

elastomeri: allungamento 100% - 800%
 tensione a rottura 7/20 MPa

prop. meccaniche variano in base a:
 vulcanizzazione, mescole, additivi

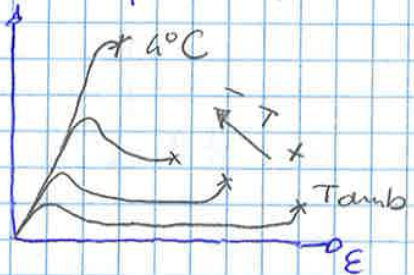


se miscela + monomeri → copolimero (con prop. di tutti)

ABS = Acrilonitrile Butadiene Stirene
 ↓ ↓ ↓
 resistenza resistenza rigidità
 termico, chimica meccanica agli urti

anche per polimeri prop. cambiano in base alla temperatura:

termoplastico $-T$ → infiorisce ($40^{\circ}C$)
 termosinducibile $+T$ → comp. plastico



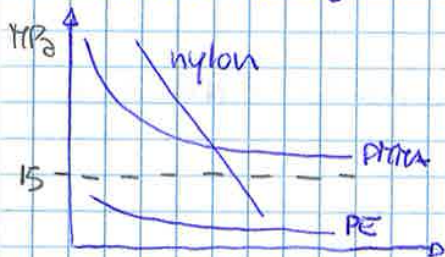
variazione di densità

per avere densità maggiore → + cristallino

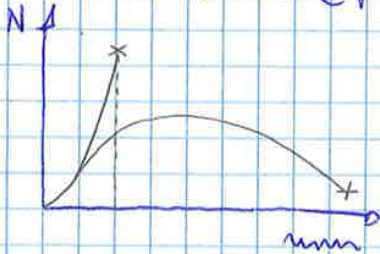
densità varia di poco (1 cifra decimale) → cambia molte prop. meccaniche

High Density, Low Density
 Low Low Density

curva a fatica



curva σ E colle polimeriche



CALANDRATURA

Comprimere cilindri di polimero de ruggino riscaldati → lamme di vario spessore

SOFFIATURA

polimero caldo, aria compressa, aderisce al contenitore

ESTRUSIONE

trasformaz. in continuo

STAMPAGGIO AD INIEZIONE

per termoindurenti → polimero tenuto caldo finché non è nel contenitore per farlo reticolare non può essere nel contenitore

ESTRUSIONE CON OGGETTO

per ottenere fibre filatura

VERI

come polimeri, con temperature e prop. + 1 ordine di grandezza

liquido $\xrightarrow{\text{raffreddo}}$ alcuni nuclei di cristalli \rightarrow attorno crescono altri \rightarrow grani \rightarrow bordi di grani

SE RAFFREDDO VELOCE \rightarrow NO BDG \rightarrow AMORFO \rightarrow vetro, ordine a cort raggio + disordine \Rightarrow + volume

$V_{\text{raffreddo}} > V_{\text{cristalliz.}}$

produzione:

polveri di ossidi \rightarrow scaldato in cuogio di ceramico (allumina) \rightarrow fuso

\rightarrow raffreddato fuso nel support ceramico \rightarrow chiamo il residuo "liquido sottoraffreddato" \rightarrow su "morsa di stegno"

termodinamicamente instabile: con temperatura alta o tempi lunghi cristallizza

vetro "fuso" = "liquido vetroso" alla temperatura di transiz. vetrose T_g miscon T_g molto alta

chiamo "vetro" se ho molta SiO_2 ma poi inserire altri elementi:

vetri multi-componente silicio based glass \rightarrow per cambiare prop. (tecniche) del vetro, \times lamorizzazione

- ossidi formanti: SiO_2 dà struttura
- modificatori: cambiano reticolo
- intermedi: in mezzo al reticolo

→ K^+ ha $x >$ di Na^+
in area compressa in superficie

tempo chimica + resistenza della termica

seno tempore vetro x ricchezza: rompo vetro temprato -> piccoli pezzi
rompo vetro non trattato -> pezzi grandi e taglienti

vetro di sicurezza



assorbire bene gli urti