



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1978A -

ANNO: 2016

A P P U N T I

STUDENTE: Venezia Angela

MATERIA: Scienza e tecnologia dei materiali - Prof. Ferraris

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

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

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

PROCESSO DI FABBRICAZIONE STRUTTURA PROPRIETÀ PRESTAZIONI

Scienza e tecnologia dei materiali:

OBIETTIVO

Correlare le prestazioni delle proprietà che dipendono dalla struttura e processo di fabbricazione dei materiali.
 Proprietà: manifestazione effettiva dal materiale in termini di tipo e di quantità.

↳ struttura dei materiali: legami chimici, struttura di un materiale in genere, riferimento alla disposizione dei suoi componenti atomici da struttura subatomica (a livello degli atomi e delle loro interazioni).

Materiali di interesse ingegneristico: metalli e leghe, polimeri, compositi, vetri, ceramici

Tabola periodica: elementi + usati nel corso sono H, Mg, Ti, Fe, Si, Al, O, C

Generalità sui metalli e le loro leghe (ognuna può essere una domanda)

- elementi metallici della Tabla periodica (e piccole quantità di non metallici)
 - gli atomi si dispongono in modo ordinato
 - sono buoni conduttori di calore ed elettricità (movolo elettronica, elettroni delocalizzati) Dagei e delocalizzati dipende anche la lucentezza metallica
 - resistenti, duttili, resistenti alla frattura. x kg di
 - proprietà magnetiche
 - vengono preparati per fusione, sono lavorabili meccanicamente
 - mescolate facilmente → bassa viscosità (ci serve nei vetri)
 - solidi a temperatura ambiente
 - danno origine a leghe
 - sono soggetti a corrosione ed ossidazione
 - densità fra 2,7 e 8 g/cm³ (relativamente densi rispetto a ceramici e polimeri)
- ↓ Al ↓ Fe

Generalità sui ceramici resistenza e duttilità → densità

- Sono costituiti dai composti: ossidi, carburi, nitru: Al_2O_3 , SiC, Si₃N₄ (rispettivamente: alluminio o ossido di alluminio, carburo di silicio, nitruo di silicio, silice o biossido di silicio)
- Densità fra 3 e 5 g/cm³
- rigidi e resistenti (comportamento meccanico)
- duri e fragili (difficilmente lavorabili; non duttili)
- non conducono calore ed elettricità (ma muovolo elettroniche, legami forti) sono quindi isolanti
- possono essere trasparenti, traslucidi o opachi
- fondano a temperatura elevata (resistenti alla temperatura)
- alcuni ossidi ceramici (es. Fe₃O₄) mostrano comportamento magnetico
- vengono prodotti per sintesi, ma fusione
- es: mattai, calcestruzzo, piastrelle, porcellane (vetri)

Generalità sui polimeri (senza essere rinforzati)

- Composti organici macromolecolari, naturali o sintetici: alcuni disordinati
- lunghe catene con struttura portante in carbonio
- preparati per sintesi organica
- polietilene (PE), nylon, cloruro di polivinile (PVC), polycarbonato (PC), polistirene (PS)
- bassa densità (1 g/cm³)
- duttili e flessibili. Poco rigidi e poco resistenti
- sono lavorabili meccanicamente
- non conducono elettricità/calore. Sono isolanti e amagnetici
- hanno basse resistenze meccaniche e a temperatura (tendono a rammollire e/o decomporre a temperature non elevate)
- esempi: pneumatici, adesivi, vernici, bitumi, gomme

Strutture dei materiali:

- strutture cristalline: metalli, ceramici (alcuni polimeri)
- strutture amorfe: vetri, polimeri



In un materiale cristallino gli atomi sono disposti in maniera ordinata periodicamente, con un ordine che si mantiene su grandi distanze (atomiche), cioè esiste un ordine a lungo raggio tale che, ad alta temperatura, gli atomi si dispongono periodicamente secondo uno schema tridimensionale ripetitivo, nel quale ciascun atomo è legato agli altri atomi immediatamente vicini.

La T. di fusione cristallina ha una temperatura di fusione, quella amorfa no.

Stato cristallino: a solido o liquido hanno T. di fusione perché hanno tutti i legami uguali. Gli amorfici non hanno T. di fusione, vanno incontro ad un cambiamento dove può essere modellato, diminuiscono con la viscosità.

Alcune proprietà dei solidi dipendono dalla struttura cristallina. Per descrivere le strutture cristalline di atomi (o ioni) sono usate le eccezioni rappresentate da sfere → modello atomico a sfere rigide.

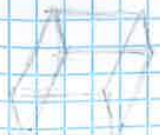
- vetroceramici, polimeri e compositi costituiscono le eccezioni
- possono presentare sia strutture amorfe, sia cristalline, a seconda delle zone
- es. porcellana

Correlazioni strutturali - proprietà dei materiali:

- il ghiaccio fonde perché cristallino
- costituisce l'obiettivo della scienza e tecnologia dei materiali di questi anni
- strutture cristalline: temperatura di fusione ben definita
- strutture amorfe: non hanno T. di fusione ma un rammolimento progressivo all'aumentare di T
- strutture cristalline: temperatura di fusione
- temperatura di passaggio solido/liquido (T. fus)
- è direttamente proporzionale alla forza del legame chimico presente nel materiale
- T_{fus} limita il campo di impiego dei materiali.

Temperature di fusione → sapere l'ordine di grandezza

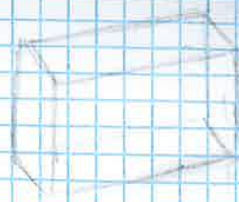
- Ceramici → sopra i 1500 (1330 - 2800)
- Metalli → intervalli vari (232 - 3410)
- La T. fus. dipende dal tipo di legame



tetragonale
 $a = b \neq c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$



esagonale
 $a = b \neq c$
 $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma = 120^\circ$



ortorombica
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

(strutture cristalline dei metalli)

- * Struttura cristallina cubica a facce centrate \rightarrow fcc (Al, Ag, Au)
- * Struttura cristallina cubica a corpo centrate \rightarrow bcc (Fe, V, Cr)
- * Struttura cristallina esagonale compatta \rightarrow hcp (Mg, Ti, Zn)

Piano reticolare: 3 atomi (o ioni o molecole) di una cella, delimitano un piano reticolare

Numero di coordinazione: numero di atomi (o ioni o molecole) ai quali è legato quello preso in esame

Diffrazione ai raggi X: determinazione delle strutture cristalline. Si distingue un materiale cristallino da uno amorfo tramite diffrattogrammi di raggi X (XRD). I raggi X sono una forma di radiazione elettromagnetica ad alta energia e lunghezza d'onda corta. Raggi X dimensionale λ , reticolo di dimensione $A \rightarrow$ i raggi colpiscono piani reticolari.

Legge di Bragg $m\lambda = 2d \sin \theta$
 θ \rightarrow angolo di incidenza
 d \rightarrow distanza tra piani
 m \rightarrow numero intero, ordine di diffrazione

Se la legge è soddisfatta \rightarrow interferenza costruttiva

Un materiale cristallino diffrange secondo picchi di diffrazione, soddisfatta la legge di Bragg \rightarrow picco
 Reticolo lamellare \rightarrow piano reticolare
 C'è invece un alone amorfo se è amorfo (interferenza non costruttiva)

leggere diffrattogrammi di Bragg

Macchina di diffrazione dei raggi X: X-ray diffraction of silicon carbide (SiC)

Raggio X costante, scintilla il campione.

Perché occorre conoscere la struttura cristallina di un materiale?
 • senza il polimorfismo del ferro non esistevano gli acciai

Strutture cristalline: polimorfismo

- Il riscaldamento di un solido cristallino provoca normalmente la fusione
- è possibile che il solido cambi la sua struttura cristallina durante il riscaldamento (polimorfismo) per reazioni allo stato solido + di una struttura cristallina
- esempi di polimorfismo: Ti, Fe, SiO₂
- il polimorfismo provoca variazioni nelle proprietà dei materiali (ρ, α, k, E, d)

PROPRIETÀ MECCANICHE

- se ci sono difetti puntuali (interstiziali sostituzionali)
 - le dislocazioni (difetti lineari) sono bloccate da i difetti puntuali
- dislocazioni di verso uguale → si respingono (incaudimento)
- presenza di bordi di grano → policristalli + bordi di grano → proprietà meccaniche
- superlega senza bordi di grano
la frattura non si affonda perché non ci sono bordi di grano
→ manca il tallamo → non ci sono dislocazioni

Traffamento termico acciaio → avviene perché il ferro da 910 a 1392°C è CFC cambiando cella aggiunge carbonio
 Polimorfismo

Ti	Ti α esagonale	Ti β cubico	Liquido
	820°C	1675°C	

Fe	Fe α CCC	Fe δ CFC	Fe γ CCC	Liquido
	910°C	1395°C	1535°C	

Tridimite Octa cubica
 Cristallite Tebarguale

SiO ₂ (silice)	Quarzo α Trig.	Quarzo β Tetragonal	Liquido
			1730°C

Difetti nei solidi cristallini

- in realtà i materiali mono o policristallini non sono così ordinati come si è detto finora, ma sono ricchi di difetti reticolari: viene meno la perfezione della struttura cristallina
- DIFETTI PUNTUALI (impegno 1 o 2 posizioni atomiche)
- DIFETTI LINEARI (3 monodimensionali)
- DIFETTI DI SUPERFICIE

interstiziale
 - monodimensionali o puntuali - sostituzionale
 vacanze (cresce esponenzialmente con la temperatura)

Questo tipo di difetto prevede o la mancanza di un atomo nel reticolo (vacanza) o un atomo più piccolo in posizione interstiziale (interstiziale) o un atomo diverso che sostituisce un atomo proprio del reticolo (sostituzionale)

- la sostituzione di un atomo con un altro di dimensioni simili è una condizione favorevole per la formazione di leghe metalliche. Per ottenere leghe metalliche, è essenziale la possibilità di avere atomi in posizione interstiziale o sostituzionale.
- la presenza di impurezze sostituzionali: adatte per la pratica realizzazione di leghe metalliche elettriche da semiconduttori
- leghe sostituzionali: atomi aventi dimensioni inferiori (es. 15%) tipo di celle elettrolitiche e volenze simili
- leghe interstiziali: atomi piccoli che possono entrare in una cella metallica fino ad un massimo del 10%. Comporta comunque deformazioni reticolari sugli atomi ospitanti adiacenti

Leghe: atomi di impurezze aggiunti intenzionalmente al metallo base per aumentare la resistenza meccanica e la resistenza alla corrosione.
 Solvente o atomi ospitanti → componente in > quantità
 soluto o atomi ospiti → componente in < quantità

- difetti superficiali → n° di coordinazione
 un atomo superficiale è un difetto poiché gli atomi che ne fanno parte hanno (NC) inferiore agli altri e sono più reattivi (es. fenomeni di ossidazione e corrosione)
 gli atomi superficiali hanno n° coordinazione minore, spesso legami con O₂ - ad esempio → ossigeno

Piani di scorrimento preferenziali per le dislocazioni: metalli a basse densità atomiche, una dislocazione si muove meglio in metalli con alta densità atomica + facile rompere e riformare il reticolo di cristallo (plasticizzazione)
 si manifesta come scorrimento dei piani cristallini, per effetto di tipo tangenziale (?)
 ciò è evidenziato sperimentalmente dal fatto che le superfici di rottura a trazione (almeno nella zona estesa del provino) sono inclinate di circa 45° rispetto alla direzione del carico

Catalisi: è basata sul fatto che sulla superficie ci sono difetti.
 Ossidazione: avviene in superficie (ruggine)

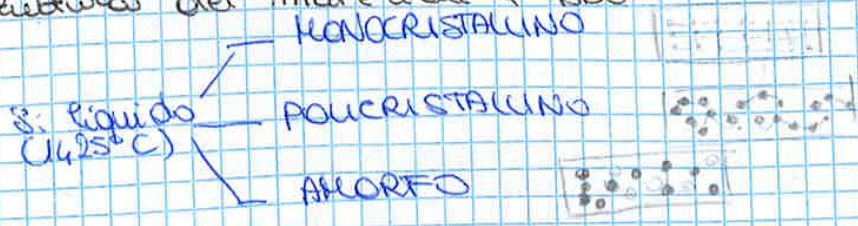
• I bordi di grano sono difetti superficiali
 i materiali cristallini sono orientati secondo una stessa direzione ma solo nella stessa "grana" cioè solo in determinate zone.
 Abbiamo cioè a che fare con policristalli.

"bordo di grano" → i legami sono diversi da quelli che si trovano dentro. Angoli diversi di legame con quelli vicini.
 BORDI DI GRANO (BDG)
 atomi legati con un certo numero di legami orientati in tutti gli angoli del cristallo. In un materiale policristallino, si chiamano bordi di grano.

I bordi di grano non si vedono se non subiscono un attacco (termico, chimico), reagiscono gli atomi solo al bordo del grano perché sono difettivi.
 Assorbendo il rame tutto reagisce con acido nitrico e vedo quindi una striatura in corrispondenza dei bordi di grano e vedo quindi uno scalino.

Ci sono interazioni fra difetti mono, bi, tri dimensionali.
 L'energia interfaciale totale è + bassa nei materiali a grana fine.
 La dislocazione può passare da un grano all'altro ma deve almeno cambiare direzione, consumo di energia. Se ho grani più piccoli è + probabile che la dislocazione trovi un bordo, aumentando le proprietà meccaniche del materiale (affinamento del grano).

effetto delle diverse velocità di raffreddamento sulla struttura dei materiali e BDG



Nucleazione, crescita e formazione di bordi di grano nei materiali policristallini.
 I quadratini sono le celle unitarie si formano piccoli nuclei.

Analisi composizionale: si può vedere di che cosa è fatto il campione. **SEM-EDS**
 Atomo con i vari livelli energetici
 Un e- proveniente dal fascio elettronico del microscopio elettronico. Elettrone estratto viene rimpiazzato da un altro e- con livello superiore emittendo un AE caratteristico e unica per ogni elemento. Questo AE è dello ordine dei raggi X
 Misura delle energie (non confondere con diffrazione)



Con la TEM si può invece fare la **diffrazione** dei raggi X perché con TEM lavoro con fasci molto sottili. Sul film sottile si può lamare in fascio e ottenere diffrazione → solo in una zona piccola

Microscopio a forze atomiche (AFM) (10²)

di atomo con cui termina la leva fa una scansione
 Si respingono le nuvole elettroniche degli atomi facendo alzare la leva
 → laser falsi colori
 → tempo

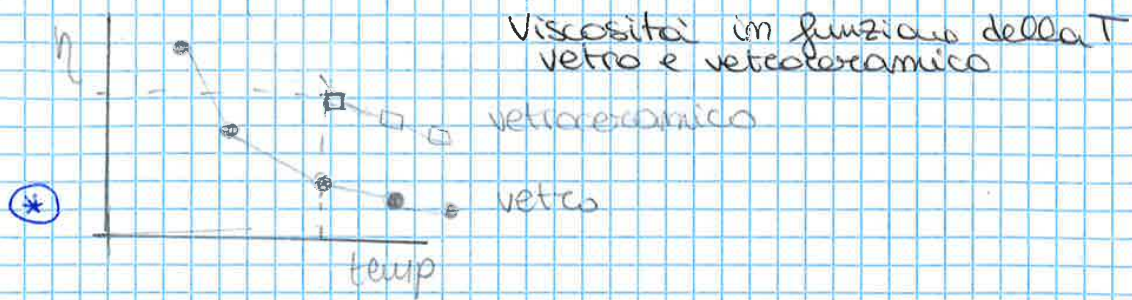
Materiali a struttura amorfa

Si raffredda così velocemente che gli atomi nelle loro posizioni del liquido si parla di liquido sottoraffreddato

- la struttura amorfa è una struttura priva di ordine a lungo raggio e non ha una temperatura di fusione (vetri, polimeri)
- esiste negli amorfici un ordine a corto raggio, cioè qualche Å, questo "ordine" è dato, nel caso dei vetri comuni, dalla struttura tetraedrica nella quale si dispongono gli ioni Si⁴⁺ e O²⁻ struttura che non si ripropone con la periodicità tipica dei cristallini
- Esiste ancora un ordine locale a corto raggio, ma le distanze e gli angoli di legame variano (colpo circa lo nm l'ordine è perso)
- Gli amorfici sono in effetti dei liquidi "congelati" (si ottengono se il "fuso" è raffreddato così velocemente da impedire la cristallizzazione)
- Gli amorfici non sono **termodinamicamente stabili**: i vetri degli Eoz (amorfici) si sta cristallizzando. Tempi lunghi oppure tempi brevi e temperatura elevata



- se si **riscaldi** un amorfico a temperatura e tempi opportuni, esso diventa cristallino. Non si vede attraverso perché i bordi di grano diffraggono
- se si **raffredda** un liquido ad una velocità di raffreddamento molto alta



Per i polimeri è un problema la cristallizzazione involontaria della sua parte amorfa.
 → rottura elastica

(*) Un vetroceramico ha viscosità superiore in confronto al suo amorpho (es. moricchi nella nutella) a suo fase cristalline dove non c'è scorcimento delle catene (vale per VETRI e FALIERI a differenza di un decimo di grandezza)

Uso del passaggio amorpho - cristallino è reversibile e si ottiene in millisecondi con il laser
 Si usa questa associazione per scrivere sulla memoria, cambiando tutte le proprietà passando da amorpho a cristallino

Si può avere un metallo amorpho
 Si parla di vetri metallici
 Reti amorpho che derivano da una organizzazione disordinata di atomi in modo da mantenere una struttura disordinata quando raffredda.
 Bisogna poter il fluido a una viscosità >
 Resistenza > alla corrosione perché non hanno bordi di grano
 Hanno elasticità > degli altri → mazze da golf
 Non sono stabili termicamente

stessa alluminio

- Allumina monocristallina → trasparente
- Allumina monocristallina (no bordi di grano)
- Allumina monocristallina → (luce non diffusa vedo poco attraverso gran (nanometrica))
- Allumina policristallina → non vedo attraverso perché ha bordi di grano

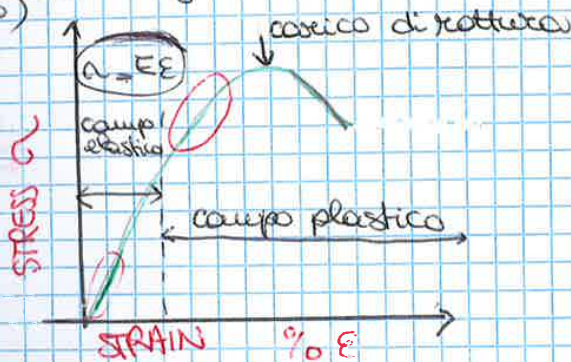
→ continuare la deformazione della trazione nel tratto centrale del provino per ridurre la rottura
Prova di trazione alle estremità

Macchine di prova

- Permettono di esercitare la trazione sulla provetta in modo controllato, misurando:
 1. lo sforzo applicato
 2. e l'allungamento della provetta
 (σ, ϵ oppure carico applicato, allungamento misurato)



- provini di dimensioni unificate vengono sottoposti a una sollecitazione a trazione monoassiale, progressivamente crescente a velocità costante registrandone la deformazione progressiva
- la prova si conclude con la rottura del provino avvenuta in tempi brevi, e ci consente di ricavare un grafico che mette in relazione il carico applicato $F(N)$ (o la tensione, $\sigma (N/mm^2)$) e la deformazione del provino (ϵ) (o il suo allungamento %)



(zone cerchiata: dove si rompe nel campo)

E = modulo elastico o **modulo di Young** (rappresenta la rigidità del materiale)

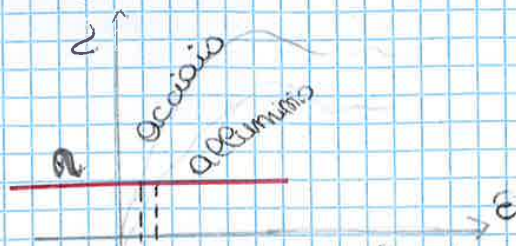
$\sigma = E \epsilon$ vale solo dove c'è una retta, la prevedere le proprietà dei materiali in campo elastico
 ↳ legge di Hooke

Bisogna lavorare in campo elastico per ottenere deformazioni non reversibili. Sollecitazione in campo elastico → non rimane la deformazione finita la sollecitazione reversibile

Molti delle distorsioni sono in campo plastico

Deformazione plastica → spostamento degli atomi dalla loro posizione di equilibrio con allungamento come conseguenza. Dipende dalla forza del legame e il legame è forte + la rottura è spostata verso etasse y

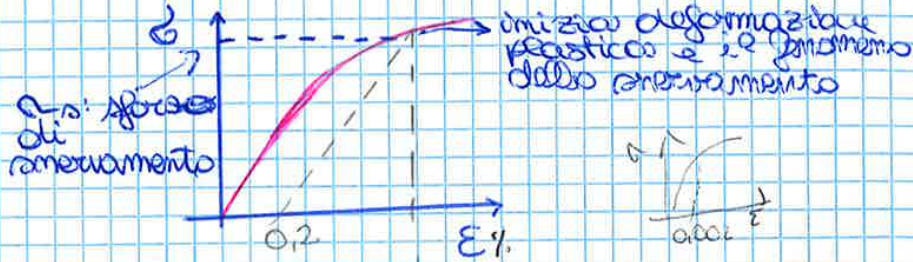
Se applico lo stesso σ all'alluminio si deforma di + (T, p, uscite e)



Solo il tratto lineare elastico di tutti i materiali

Limite del limite elastico alla ~~0,2%~~ di deformazione

Si traccia una // al tratto elastico e dove interseca la curva si ha la separazione dal campo elastico e campo plastico

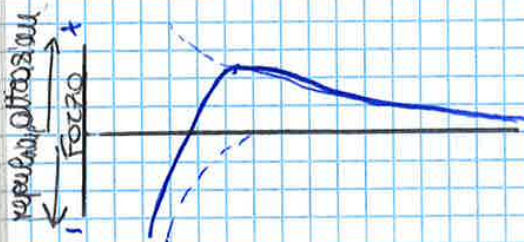


Mecanismo atomico della deformazione elastica

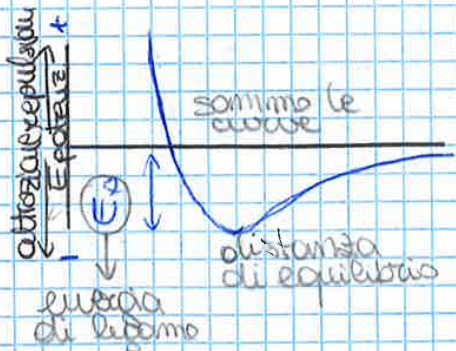
Le deformazioni elastiche macroscopiche derivano dalla variazione delle distanze interatomiche senza che avvenga alcuna frattura dei legami.

Applicando una forza F (es. trazione) si determinano l'allontanamento degli atomi dalla loro posizione di equilibrio. Quando viene rimossa la forza esterna gli atomi ritornano nella loro posizione di equilibrio sotto l'azione delle forze interatomiche.

Curve di Lennard-Jones

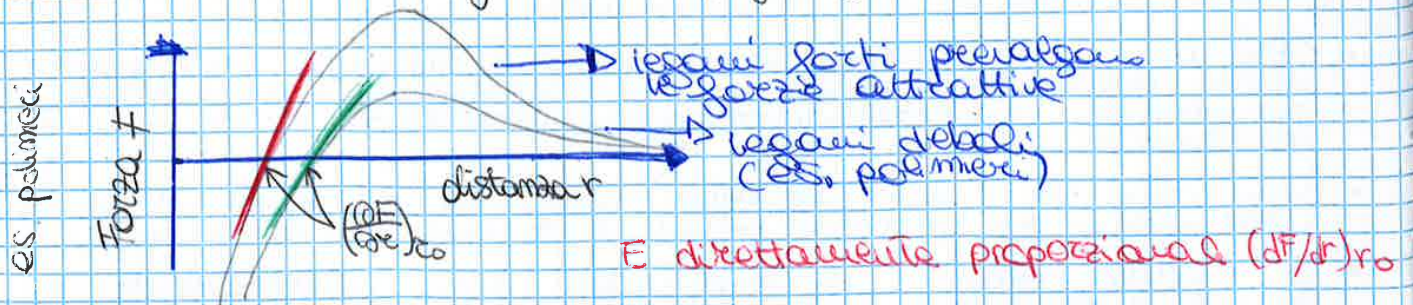


I legami atomici determinano le proprietà dei materiali. Se due atomi isolati vengono fatti avvicinare, intervengono due forze di segno opposto, attrattiva (F_a) e repulsiva (F_r). Si raggiunge l'equilibrio quando le due si eguagliano e ciò avviene alla distanza di legame r_0 .



Integrando la curva delle forze rispetto ad x ($E = \int F dx$) si ottiene il grafico delle energie potenziali repulsive e attrattive. L'energia potenziale in r_0 è l'energia di legame E_0 . Rappresenta l'energia necessaria per separare i due atomi (per esempio fondere).

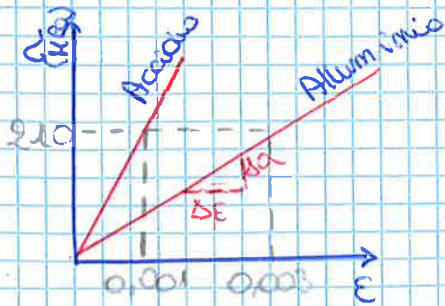
Modulo elastico e forze di legame



Se dico la forza in r_0 ottengo il modulo elastico perché dipende dalla posizione di equilibrio

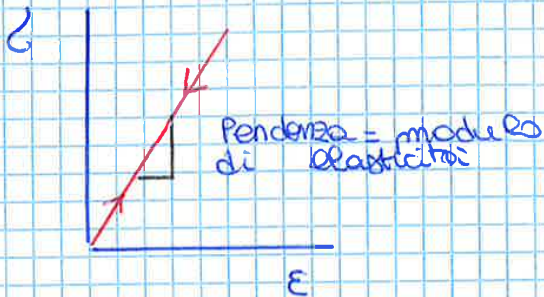
Curva forza - distanza interatomica per materiali con legami deboli e forti. Il valore del modulo elastico è dirett. prop. alla pendenza di

Misura del modulo elastico



$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{210}{0,003} \text{ MPa} = 70 \text{ GPa (Alluminio)}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{210}{0,001} \text{ MPa} = 210 \text{ GPa (Acciaio)}$$



Non centriamo le dislocazioni ma in campo elastico: non c'è abbastanza tensione. Muovono gli atomi dalla loro posizione di equilibrio.

Ci sono tanti metodi per non rompere i provini e misurare il modulo elastico: ad esempio con le onde sonore (ultrasoniche)
 frequenza > E > (piatto in frigio)
 frequenza < E < (piatto appiccato) → vibra di +
 esiste una proporzionalità diretta tra frequenza e modulo elastico
Vibrazioni (= muovono atomi)

Vantaggi:

- non devo fare provini
- non devo romperli nulla

Controllo di qualità su tutti i componenti

• Tramite prove di trazione o compressione o flessione

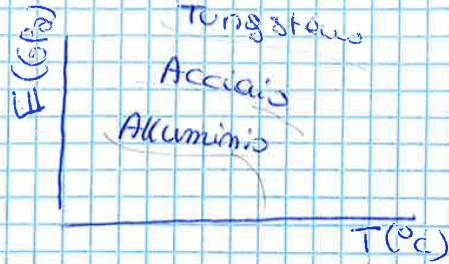
- limiti della prova di trazione:

- * provini sagomati "ad osso"
- * prove distruttive
- * non può essere eseguite su materiali fragili

Modulo elastico in funzione della temperatura

- Il modulo elastico dei materiali è inversamente proporzionale all'aumentare della temperatura

E diminuisce col crescere di T



A parità di ΔT i polimeri sono più cambiati perché hanno legame più debole. se siamo legami forti (metalli, ceramici) fa poca differenza

Formi tubolari che chiudono ad massimo \rightarrow si misura E a T alte

In un grafico ci deve essere T e normativa

Coefficiente di Poisson (proprietà del campo elastico)

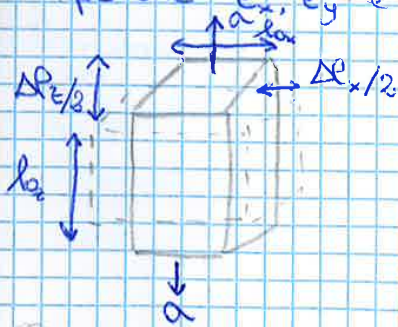
- coefficiente di Poisson (ν). quando un materiale è posto a trazione subisce un allungamento ($\Delta l = l - l_0$) lungo l'asse z e una deformazione

$$\epsilon = (l - l_0) / l_0 = \Delta l / l_0 \text{ segno } \ominus \text{ sul piano } x-y$$

- il coeff. di Poisson è dato dal rapporto:

$$\nu = -\epsilon_x / \epsilon_z = -\epsilon_y / \epsilon_z$$

- il segno \ominus è introdotto per ottenere ν positivo, poiché ϵ_x, ϵ_y e ϵ_z sono di segno opposto



$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z}$$

$$= -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_z} \text{ se il materiale è isotropo}$$

- ① Metalli: circa 0.33
- ② Ceramici: 0.17 - 0.23
- ③ Polimeri: 0.33 - 0.5

} dipende dal legame:
 legame forte $\nu \downarrow$
 legami deboli si restringe e si allunga tanto

Se i materiali non sono isotropi, tutte le loro proprietà dipendono dalle direzioni dei piani cristallini: quindi le costanti (come E) diventano matrici (tensori)

$$\sigma_{xx} = \frac{1}{E} \alpha_{11} \sigma_{11} + \frac{1}{E} \alpha_{12} \sigma_{22}$$

$$\sigma_{yy} = \frac{1}{E} \alpha_{21} \sigma_{11} + \frac{1}{E} \alpha_{22} \sigma_{22}$$

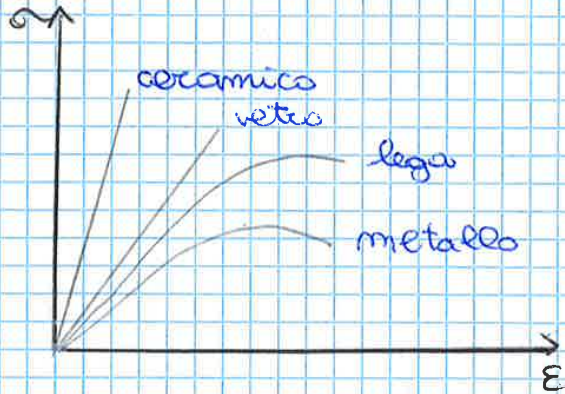
(MPa) σ_y	
250-1400	acciai
900-1600	leghe Ni
900-1300	" Ti
60-950	" Cu
100-650	" Al
80-300	" Mg
30-100	resine
50-90	nylon
6-30	polistirene

Più i legami sono forti, +: σ_y solo elevato, perché serve molta energia per rompere un legame e riformarlo

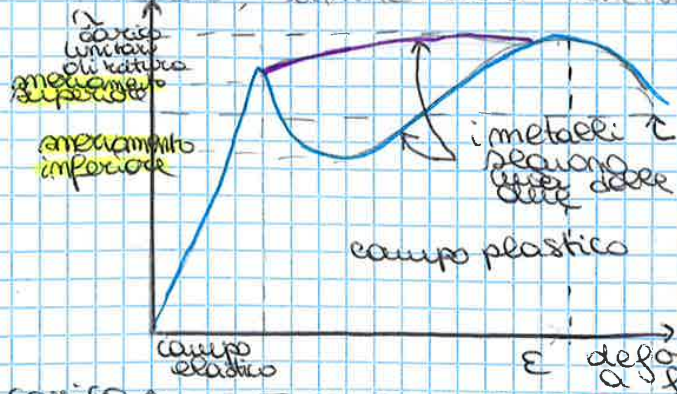
σ_y acciai è così elevato perché dipende da quanto riesce a disturbare le dislocazioni (es. % di C)

solo i metalli e polimeri hanno campo plastico

→ **SNERVAMENTO**: con fine campo elastico/plastico
 spazio di snervamento (σ_s): punto in cui c'è il passaggio ~~corrisponde~~ σ_s
 zona di snervamento

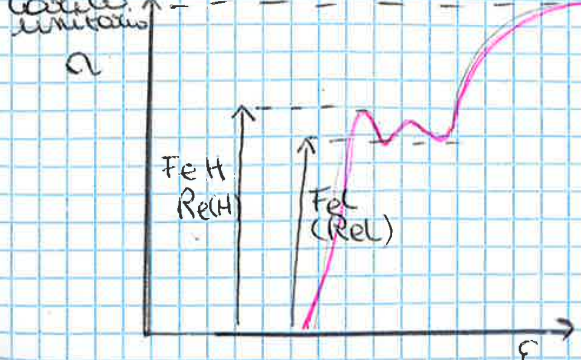


(Saperi ordini di grandezza di E, coeff. di Poisson, limite allo snervamento)



tipica curva σ/ϵ per metalli

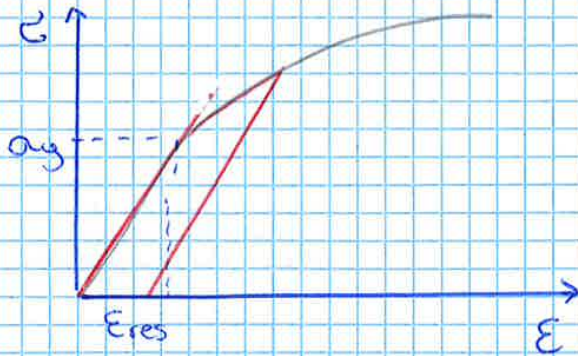
frattura del provino
 snervamento superiore, dove inizia la deformazione plastica
 snervamento inferiore, valore intorno al quale fluttua la deformazione



materiali duttili - caso con snervamento

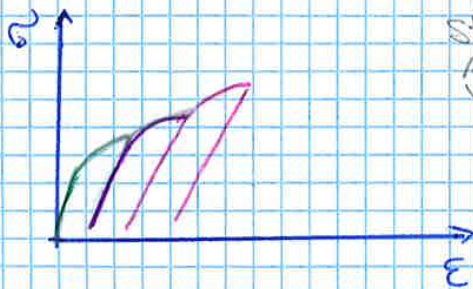
DUTTILITÀ: proprietà meccanica che rappresenta la misura della deformazione plastica che il metallo può subire senza rompersi. Se è scarsa/inesistente la deformazione si parla di materiale fragile

- Il massimo per HCP è 6 (si rompe prima)
- Quindi i metalli FCC (Cu, Al, Ni, Ag, Au) e CCC (Fe) tendono ad essere duttili e presentano deformazioni plastiche, mentre i metalli HCP (Ti, Zn) sono più fragili



Il punto conserva la deformazione permanente

INCROCIAMENTO NELLA MACCHINA



Stesso provino
smezzamento a
valori + elevati

Ogni volta che lo tiro in campo plastico aumento le dislocazioni → incrociamento elastico
Aumento quindi il limite di ingresso in campo elastico

Esempio di scorrimento preferenziale lungo piani di scorrimento durante una deformazione plastica

Lo scorrimento preferenziale su alcuni piani serve a minimizzare le distorsioni di legame causate dal moto delle dislocazioni



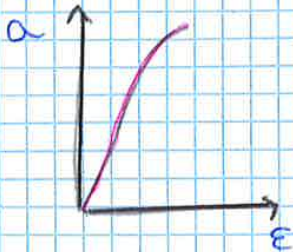
- Quando avviene una deformazione plastica in un metallo le dimensioni dei grani cambiano a causa dei fenomeni di scorrimento
- Per es. l'acciaio laminato ha i grani orientati nella direzione di laminazione
- Alcune proprietà dei laminari (per es. le proprietà magnetiche) possono essere differenti a seconda della direzione

Ceramici

I ceramici sono materiali a comportamento fragile, cioè che si rompono senza deformazione plastica.

Se carico di mesuramento è molto alto e coincide con il carico di rottura; questo perché si tratta di cristalli a legame covalente o ionico in cui il carattere orientato dei legami rende difficile lo spostamento delle dislocazioni ed il riformarsi dei legami.

Ulteriori cause di fragilità dei ceramici: porosità, cricche superficiali e interne.



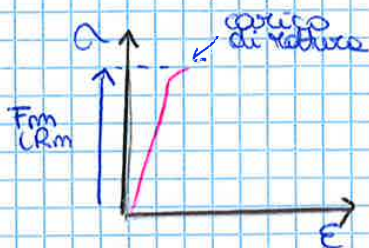
Curve tensile deformazione (ceramici e vetri)
Zona plastica assente ed allungamenti piccolissimi



ad alte temperature c'è deformazione plastica perché fornisco abbastanza energia termica da muovere le dislocazioni

Micropilastri (con TEM) di un ceramico; c'è deformazione plastica, scioglimento a temperatura ambiente a alte tensioni (4,9-7,36k).
Una lastra dello stesso materiale intorno a 400 MPa.
Qui non ci sono cricche, difetti.
Più i ceramici sono piccoli più ho + alte proprietà meccaniche.

Materiali fragili



es. ghiso

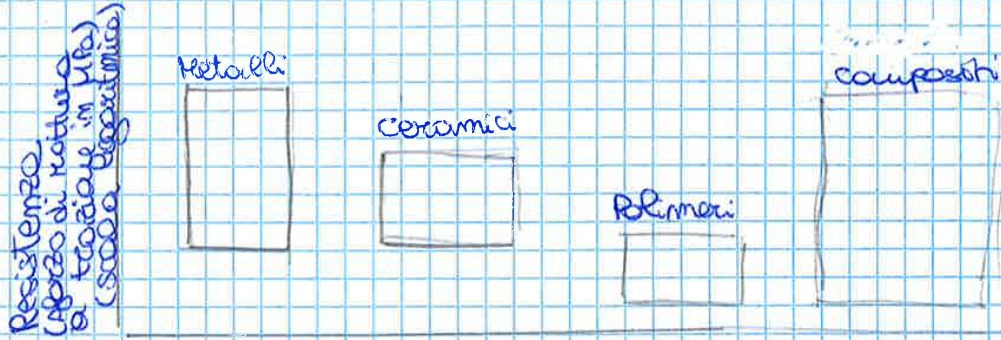
- Tratto elastico
- Plasticizzazione assente o molto limitata, immediata rottura $F_m (R_m)$
- Assenza di strizione

Frattura fragile

- La frattura avviene per lo più senza deformazione plastica
- La superficie di frattura sono piatte e \perp alla tensione applicata (vs. cppo-como frattura duttile)

Da notare:

- le proprietà di resistenza e duttilità sono in generale in antitesi
- passando da materiali a resistenza maggiore il margine tra limite elastico e di rottura si riduce
- per le ghise grigie l'allungamento a rottura è circa quello



Come influire sulle proprietà plastiche dei materiali

Voglio aumentare il limite elastico, il carico di rottura (e carico di ammassamento)

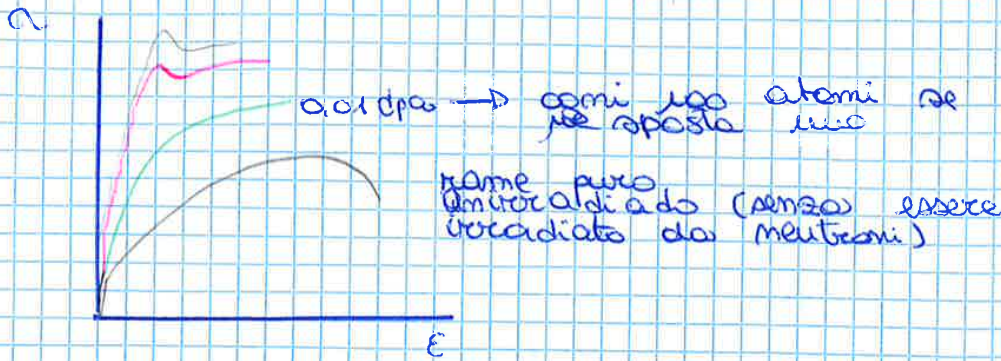
- Ridurre il moto delle dislocazioni significa rendere il materiale più resistente
- Per grani di dimensione moderata, vale la relazione di Hall-Petch, dove d è il diametro medio dei grani, σ_y è la tensione di ammassamento e le altre sono costanti del materiale
- la dimensione dei grani può essere determinata dal raffreddamento o da successivi trattamenti termici

$$\sigma_y = \sigma_0 + k_y d^{-1/2}$$

Trattamento termico \rightarrow bassa T riduco grani

- invecchiamento
- precipitati: prodotti con trattamenti precipitano dai composti
- seconde fasi
carichi di ammassamento e limiti elastici simili agli acciai
Quando la dislocazione incontra bordo di grano ci vuole + energia; qui incontra un tratto cristallino omogeneo + energia
- monocristalli
dobbiamo evitarlo con 3 ordini di grandezza in più perché non ci sono le dislocazioni
- soluzioni solide
Sostituzionali e interstiziali rallentano le dislocazioni perché creano trazione e compressione intorno

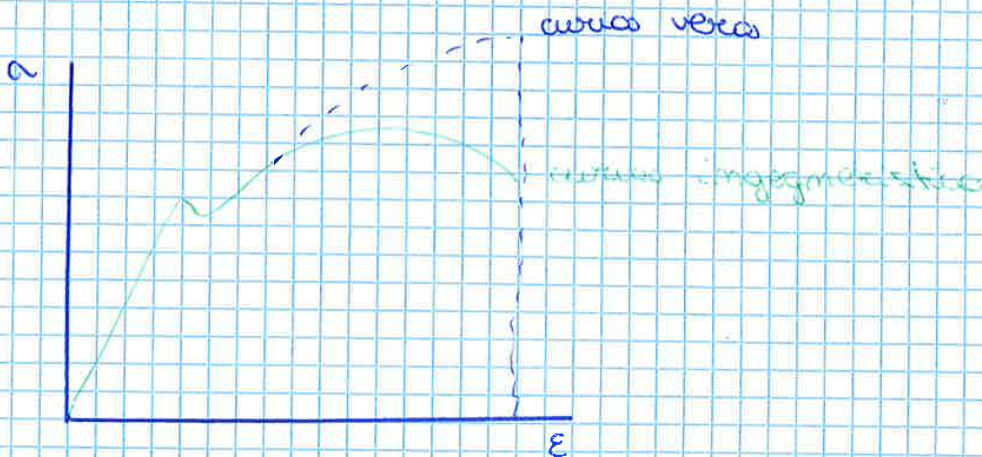
Effetto delle dislocazioni sulle proprietà meccaniche:
 un caso particolare



~~fracturing~~ ~~da~~ ~~irraggiamento~~ → il materiale
 si indebolisce
 i neutroni creano dislocazioni nel materiale

Anche materiali diversi bombardati
 indebolimento diverso

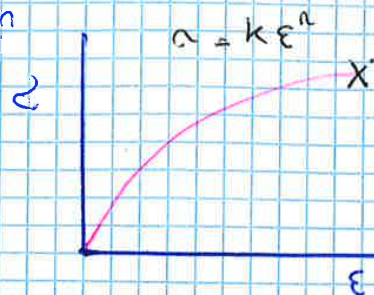
Stensione e curva "vera"

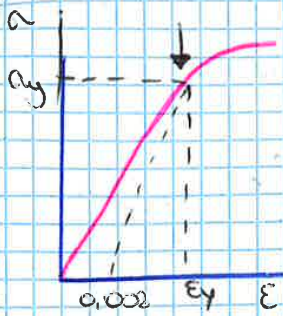


Curva vera e curva ingegneristica

Quando l'area cambia le due curve si discostano
 si calcola punto per punto l'area (costa)
 si mantiene allo stesso punto
 Per essere precisi: dare traccia la "della"
 0,02% → recupero elastico (ha senso per i polimeri
 che cambia molto, non per i metalli)

Progettazione dei materiali in
 campo elastico
 si usa un'altra
 curva

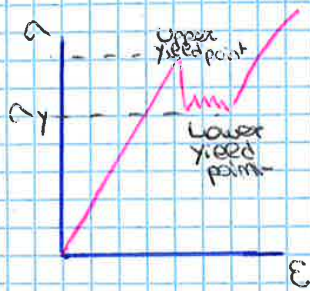




Carico unitario di scostamento dalla proporzionalità ($R_{p0.2}$)

Yield strength (Y_S, S_y)
"Yield strength (offset = 0,2%)

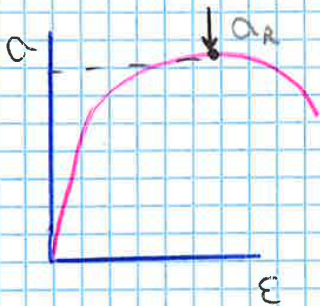
σ_y o σ_s
limite elastico di snervamento



snervamento superiore (σ_s^{sup}) ed inferiore (σ_s^{inf})

Carico unitario di snervamento superiore (R_{eH}) ed inferiore (R_{eL})

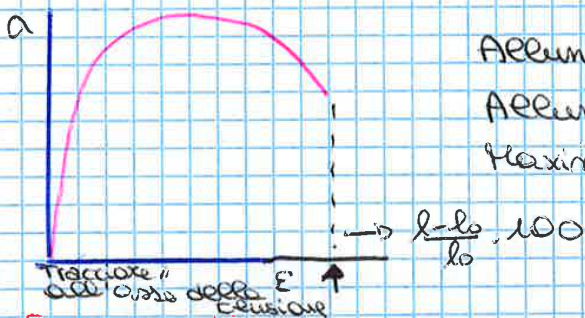
Upper Yield Strength (UYS)
and lower Yield strength (LYS)



Tensione massima a trazione (σ_{max})
Carico di rottura (R, R_m)

Carico unitario di rottura (resistenza a trazione) (R_m)

Tensione strength (TS, UTS, σ_u)



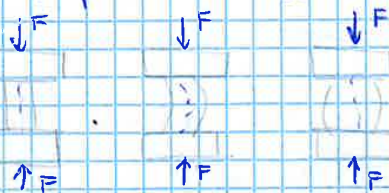
Allungamento %

Allungamento % totale a rottura (A_t)

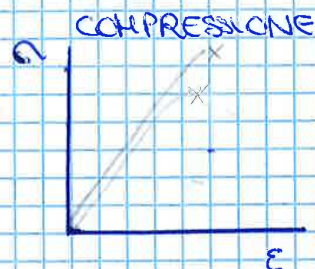
Maximum elongation

Prova di compressione

Utile per i materiali fragili, più idonei a carichi di compressione e non di trazione



Perché ho cricca o porosità e quindi nella trazione ho numeri casuali, nella compressione la cricca non si propaga

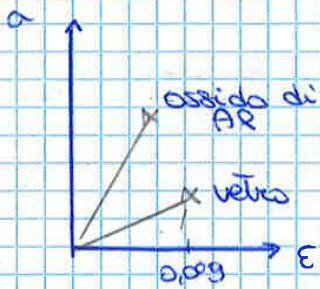


Qui ho solo campo elastico nel tutto, in più perché non è statico

NON VI È UN MAX DELLA CURVA PERCHÉ NON AVVIENE RUOTAZIONE

è silice amorfa. Ha $E >$ del vetro da sinistra perché ha legami più forti - da stesso motivo per la resistenza a flessione

$\% E = 0,009\%$

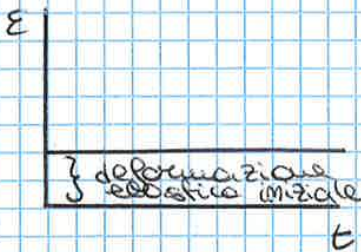


curve tensione/deformazione ottenute con prove di flessione e una deformazione $\Delta L/L_0$ che posso vedere se ho un'asta lunghissima $\frac{L-L_0}{L_0}$

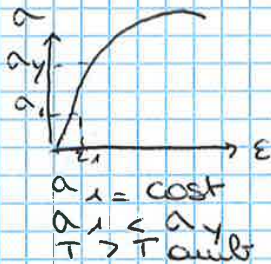
altrimenti non lo vedrai

Esercizio

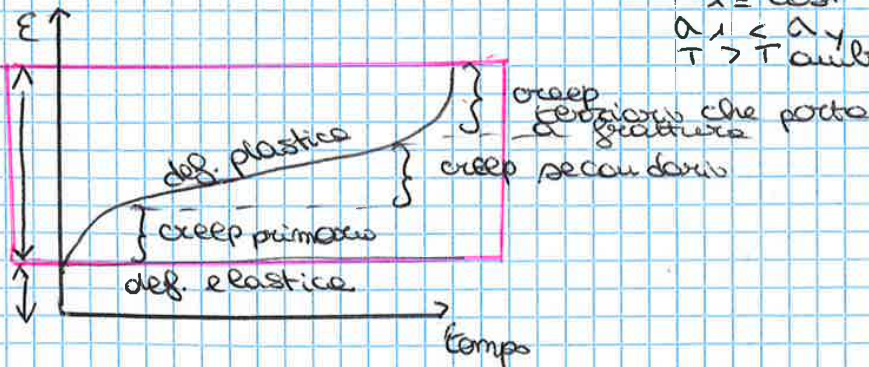
Tracciare una curva ϵ/t per un materiale sollecitato a tensione costante in campo elastico



No!



CREEP



CREEP → ~~resistenza allo scorrimento viscoso~~

Tutti i materiali hanno questo fenomeno. Si osserva più facilmente nei polimeri (tempo: pochi mesi; temperatura elevata). Templi egizi → travi sottoposte a trazione

In qualunque materiale sollecitato in campo elastico per tempi lunghi subisce deformazione plastica (irreversibile)

• A temperatura ambiente (la dislocazione plastica è legata al movimento delle dislocazioni):

- applicando tensione le dislocazioni si spostano fino a incontrare ostacoli (altre dislocazioni, inclusioni, bordi di grano...)
- per vincere gli ostacoli è necessario aumentare la tensione

• A temperature elevate

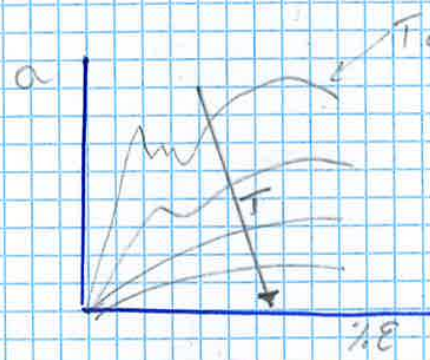
- la temperatura stessa fornisce l'energia per vincere gli ostacoli → E cresce a T costante
- altri fenomeni

• Mecanismi di deformazione in gioco:

- 1) movimento delle dislocazioni all'interno dei grani cristallini
- 2) diffusione delle vacanze di reticolo (sia interno sia bordo di grano)
- 3) slittamento dei bordi

La rottura finale avviene di solito per distacco all'interfaccia dei grani

→ vedi turbina in superlega senza bordi di grano



Riscaldamento da poche decine a centinaia di °C:

- riduzione di E , $R_{p0.2}$, R_{m}
- aumento di A (allungamento dopo rottura) e Z (strizione)

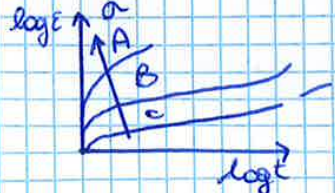
Scorciamento viscoso

Temperature a partire da $\approx 1/3$ di quella di fusione (in K)

• Sotto deformazione costante la deformazione cresce progressivamente nel tempo

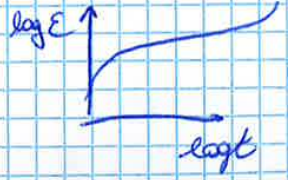
Situazioni possibili:

- A: rottura precoce
- B: rottura a lungo termine
- C: interruzione della prova prima della rottura



• In generale, tre fasi successive di scorrimento:

- primario (vel. decrescente)
- secondario (vel. costante)
- terziario (vel. crescente, rottura)



Meccanica della frattura dal punto di vista della struttura dei materiali

- rotture catastrofiche dovute a cricche
 mare → sistema Schenectady fratturato in due
 acciaio a bassa temperatura, temperatura critica
 difetti macroscopici che hanno in realtà tutti
 i materiali ma non tutti causano rottura

frattura:
 - duttile → perdonamo
 - fragile → non perdonamo

Analizziamo il fenomeno in

- macroscopico
- microscopico → vediamo apice della cricca
- nanoscopico

che differiscono da materiale fragile e duttile



io credo di applicare σ
 in realtà applico un σ in corrispondenza
 della cricca
 (es. foglio di carta, bustina di ketchup con
 taglietto)

All'apice di una cricca c'è una concentrazione
 di sforzo molto più elevata. Si verifica la
 stessa cosa all'apice di un intaglio (deriva da
 una concentrazione meccanica)
 All'apice di una cricca/intaglio ci sono tensioni
 di picco (che chiamiamo nominali)

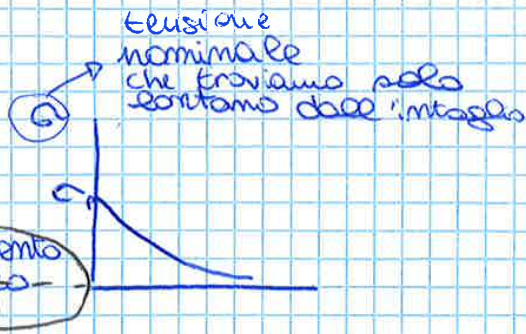
intaglio

- tensione elevata ma finita

Applico σ man mano che
 mi avvicino all'intaglio sento
 σ_p fino a un valore di picco
 Come ricavare σ_p ?

$\sigma_p = k_t \sigma_n$

k_t = fattore di concentrazione



Cricca

con materiale fragile

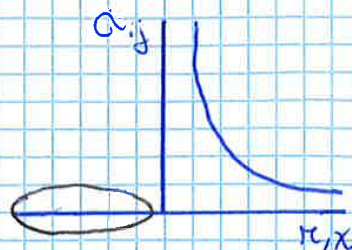
tensione singolare

$\sigma \rightarrow \infty$ all'apice della cricca

fattore di intensità $k_{I,II,III}$
 (I, II, III modo)

$\sigma_{ij} = \frac{k_{I,II,III}}{\sqrt{r}}$

$r \leftrightarrow \sigma_{ij}$



Meccanica della frattura dal punto di vista della struttura del materiale

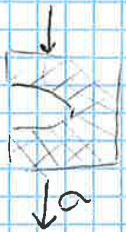
- rotture catastrofiche dovute a cricche
 mare → sistema Schenectady fratturato in due
 acciaio a basse temperature, temperatura critica
 difetti macroscopici che danno in realtà tutti
 i materiali ma NON TUTTI CAUSANO ROTTURA

frattura $\left\{ \begin{array}{l} \text{duttile} \rightarrow \text{perdonamo} \\ \text{fragile} \rightarrow \text{non perdonamo} \end{array} \right.$

Analizziamo il fenomeno in

- macroscala
- microscala → vediamo apice della cricca
- nanoscala

che differiscono da materiale fragile e duttile

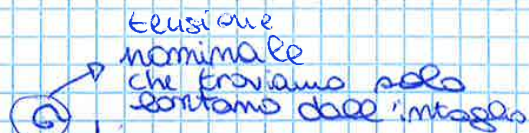


io credo di applicare σ
 in realtà applico un σ in corrispondenza
 della cricca
 (es. foglio di carta, bustina di ketchup con
 taglietto)

All'apice di una cricca c'è una concentrazione
 di sforzo molto più elevata. Si verifica lo
 stesso caso all'apice di un intaglio (deriva da
 una lavorazione meccanica)
 All'apice di una cricca/intaglio ci sono tensioni
 di picco (che cerchiamo nominali)

Intaglio

- tensione elevata ma finita



Approccio a mano mano che
 mi avvicino all'intaglio sento
 $a >$ fino a un valore di picco
 a_p
 Come ricavare a_p ?

$a_p = k_t \sigma_n$

k_t = fattore di concentrazione

Cricca

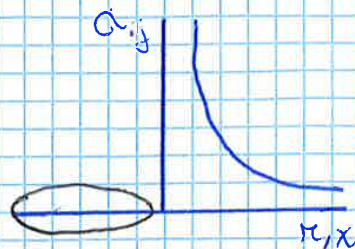
con materiale fragile
 tensione singolare

$a \rightarrow \infty$ all'apice della cricca

fattore di intensità $k_{I,II,III}$
 (I, II, III modo)

$a_{ij} = \frac{k_{I,II,III}}{\sqrt{r}}$

$r \rightarrow a_{ij}$



Le proprietà dei metalli a livello di difetti fa sì che ci sia la stessa probabilità di trovare difetti in una fibra e in una lamina, sono preparati allo stesso modo (fusione) stesso caso per i vetri.

Si trova anche questa approssimazione:

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

Propagazione delle cricche (riassunto)

- Se la cricca è lunga e ha basso raggio di curvatura, la tensione effettiva nell'apice può essere molto più elevata di quella nominale.
 - un materiale che si deforma plasticamente può arrotondare l'apice della cricca e diminuire la tensione effettiva.
 - un materiale che non si deforma plasticamente (es. vetro di silicio) no.
 - Per meccanica delle fratture (es. la teoria di Griffith) trattiamo tutto ciò dal punto di vista formale, matematico, nel caso di cricche e intagli.

Valore di tenacità a frattura

(MPa√m) è di alcune decine per i metalli: posso tollerare un difetto maggiore

es. per non superare $\sigma < \sigma_{lim}$ o applico $\sigma < \sigma_{lim}$ oppure $\sigma > \sigma_{lim}$ con r_t curvatura $>$

K_{Ic} indica le condizioni critiche di dimensioni del difetto e di tensione per cui avviene frattura fragile in qualsiasi materiale.

Da $K_{Ic} = Y\sigma_c(\pi a)^{1/2}$ si ricavano i parametri critici a_c e σ_c non propagazione cricca $K_I < K_{Ic}$

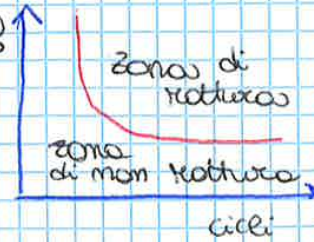
Polimeri $K_{Ic} <$ metalli: perché hanno poca resistenza meccanica anche se alcuni hanno deformazione plastica.
 Ceramici $K_{Ic} <$ non c'è deform. plastica non si può arrotondare

Si può costruire con difetti (intagli) > perché K_{Ic} elevato (es. acciaio da carpenteria) quello forgiato (e come si fosse invecchiato) ha K_{Ic} inferiore

Per evitare fratture catastrofiche si può vedere la propagazione delle cricche. Si mettono dei sensori che dicono quando la cricca si propaga. Se sensor è avvertito e si vede di riparare (ad es. a muovere una struttura)

Curve S-N: ampiezza della tensione (S) vs numero (N) di cicli cui avviene la frattura

$$S = \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$



σ_{max} e σ_{min} sono le tensioni applicate durante la prova di fatica

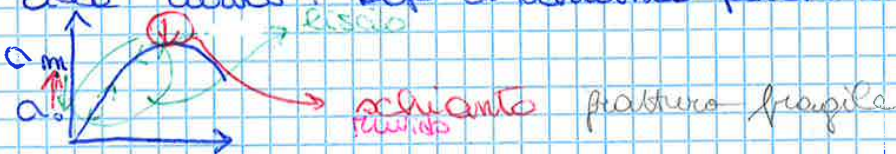
Comportamento a fatica

- Alcuni materiali cedono a fatica a tensioni pari al 35-65% del carico di rottura: al di sotto di questi valori non avviene frattura per fatica (es. F_0, T_1) = limite di fatica
- altri materiali cedono comunque dopo un certo numero di cicli (es. Al)
- resistenza a fatica: tensione alla quale si verifica frattura dopo un tot di cicli
- tempo di vita a fatica: n° di cicli a cui avviene la frattura, ad un dato valore di S

Prove di fatica: superficie di frattura

Sulla superficie ci sono o si possono formare difetti (superficiali, casuali). Da quello si può propagare per schianto. La cricca si immette si propaga su superficie liscia.

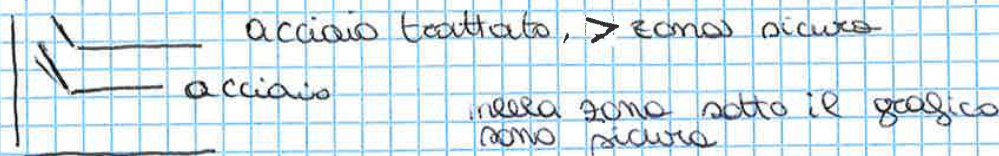
Metallo: la cricca si propaga lentamente si vede con frattura di fatica liscia che corrisponde alle curve. Dopo di schianto perché si avviene o frattura (\downarrow)



se è metallico il vantaggio è che c'è + tempo di propagazione

Come migliorare la resistenza a fatica?

- eliminare difetti (fibre, compositi)
- rinforzare la superficie (le curve S-N si spostano verso l'alto)



Frattura a fatica

- Ogni processo di frattura a fatica comprende la formazione e la propagazione di cricche
 - i materiali duttili (metalli, alcuni polimeri) possono contrastare entro certi limiti la propagazione di una cricca, poi cedono comunque per frattura fragile
 - i materiali fragili non sono in grado e vanno incontro a fratture fragili, catastrofiche (ceramici, vetri)

Prove di durezza

Sono prove di compressione

- quantificano la resistenza di un materiale ad un'alterazione meccanica della superficie

Durezza

Misura la resistenza che il materiale oppone quando soltanto una piccola superficie di esso è sollecitata a compressione (l'indentazione) e l'indentatore sottoposto a carico provoca una localizzata deformazione elastica, seguita da una deformazione plastica che lascia un'impronta. Le misure di durezza sono basate sulla valutazione delle dimensioni dell'impronta lasciata o della profondità di penetrazione della punta.

- Prove di durezza (Vickers, HV) HV = hardness Vickers
esempio di prove di durezza

- Impronta HV di un polimero → quadrata
misura area impronta, si usa la relazione

$$HV = 1,891 \cdot P/L^2$$

- Metodo Brinell (HB → Hardness Brinell)

$$HB = \frac{P}{(\pi D W)} = \frac{\text{carico}}{\text{area impronta}} \quad \text{hardness knoop con impronta a rombo}$$

- Rockwell o Superficial Rockwell

La durezza Rockwell viene misurata come differenza di profondità delle impronte (non impronta!)
↳ Vedi tabella

- es. • 60HR30W = durezza Rockwell superficiale pari ad 60 nella scala 30W
 - 80HRB = durezza Rockwell pari ad 80 nella scala B
- Valori inferiori a 20 o superiori a 100 sono considerati inaffidabili.

Correlazione fra prove di durezza e di trazione

Si possono determinare empiricamente delle correlazioni tra la durezza e la resistenza meccanica, di cui la grandezza che più ci interessa è il carico di rottura.

Questo tipo di correlazione è molto utile in quanto la prova di durezza è molto più semplice da realizzare rispetto a quella di trazione, e può essere di tipo non distruttivo (costo meno). Per questa ragione, nell'industria si fa ampio ricorso alla prova di durezza sia per avere una stima delle caratteristiche di resistenza, sia come semplice metodo di controllo di qualità.

Carico di rottura per acciai: $\text{circa} = 3,15 HB$

Durezza knoop per alcuni ceramici confrontata con un acciaio

H knoop	Ceramica
7000	diamante
6900	nitruro di boro
2000	allumina
2600	SiC
700	acciaio indurito (se non fosse indurito HK ↓)

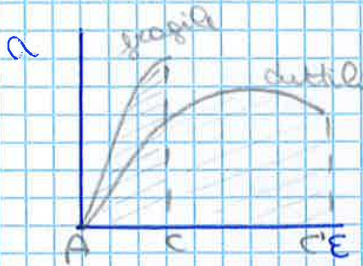
↳ facile movimento piano reticolare

↳ rivestimenti di acciai e ferro in ceramici di pochi micrometri. Gli utensili diamantati sarebbero perfetti. Non si fanno utensili ceramici perché sono fragili e difetti.

Si elimina lo stress meccanico
 ↳ meglio > resilienza che > tenacità
 ↳ si deforma comunque in campo plastico

Tenacità

- Tenacità: capacità di un materiale di assorbire energia fino a frattura data dall'area sottesa alla curva σ/ϵ fino a frattura (J/m^3) ↳ m^3 o m^2 superficie di frattura
- Tenacità a frattura: resistenza a frattura in presenza di cricche o intagli ($MPa \sqrt{m}$) K_{Ic}



→ per i fragili la tenacità e la resilienza coincidono

Tenacità a frattura

Pendolo di Charpy: misura della resilienza ad intaglio tramite test di impatto
 ↳ valuta l'energia associata durante l'impatto (e volte definite tenacità all'intaglio)

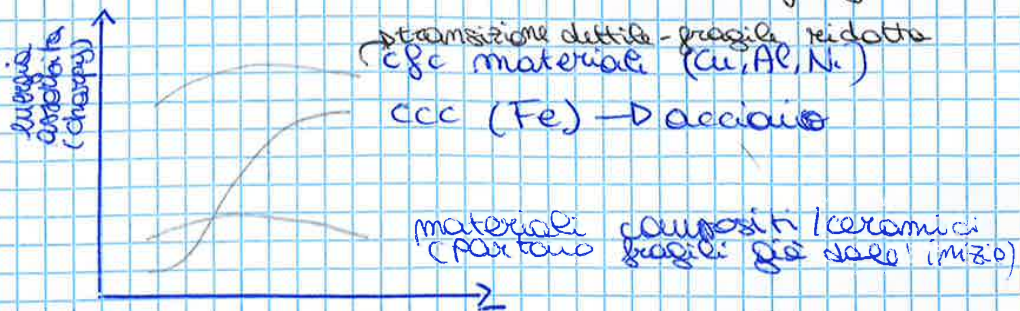
il campione con il taglio colato da un martello assorbe energia fino a rottura (dipende dal materiale)

Transizione duttile-fragile

confronto perimi fatti a T diverse si quantifica l'ingrigimento dovuto a temperatura più basse si rallenta il moto delle dislocazioni e c'è bisogno di meno energia per arrivare a frattura

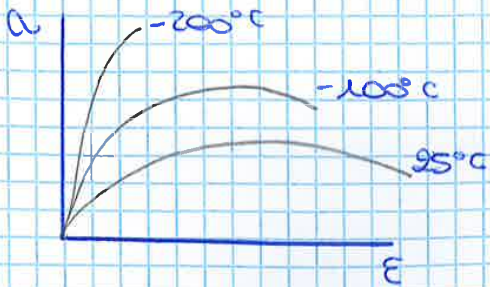
Questo fenomeno si chiama **transizione duttile-fragile** e ce l'hanno tutti i materiali duttili. Hanno quindi una T sotto la quale sono fragili (questa T si misura con il pendolo di Charpy)

Energia di impatto in funzione della temperatura per materiali diversi. Transizione duttile fragile



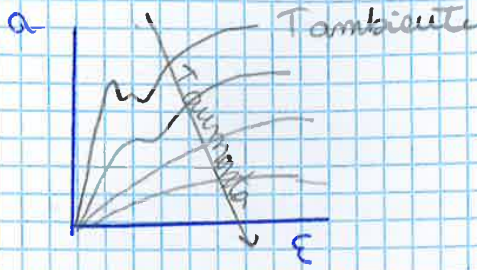
Materiali che risentono meno dell'ingrigimento
 ↳ materiali cubici face centrate hanno > densità di atomi quindi le dislocazioni (piani di scorrimento)

Curve tensione - deformazione in funzione della temperatura



Prova di trazione di un pezzo di ferro a T. diverse

Proprietà meccaniche:
 diminuiscono → dislocazioni
 si muovono in modo + semplice

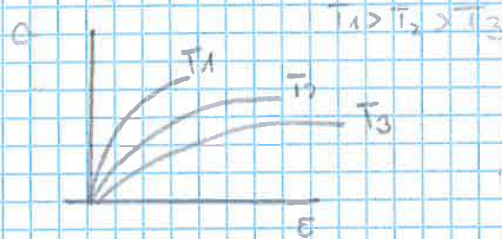
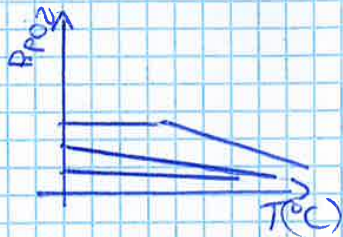


anche lo smorzamento cede all'aumentare di T
 aumento T dislocazioni si muovono + facilmente
 aumento deformazioni a frattura (acciai lubrificati a caldi)

NON si ammorbidiscono con calore

il materiale si muove di + non avviene la frattura

Smorzamento decresce in funzione di T (acciai)



Analisi elementi limiti
 calcolare con area da a ogni singolo cubetto al pc.
 Si uniscono le varie proprietà e esce il grafico con cubetti di vario colore
 colore rosso → $\sigma = \frac{F}{S}$ maggiore al centro

Pezzi stesso materiale con intagli diversi
 → calcolo elementi limiti cubetti + piccoli dai nervi

Sono spesso impiegati come isolanti
Ruolo della porosità → aria isolante

Conducibilità termica: effetto della porosità

Aggiunta di porosità diminuisce ulteriormente k :

- Trasferimento di Q nei pori è lento e inefficace
- dentro i pori c'è aria con $k = 0,02 \text{ W/mK}$
- es. vetro aerumma $k = 0,01 \text{ W/mK}$
aerumma ceramiche

fibre di vetro → non, porosità per la diminuzione della k

pannelli ceramici e polimerici → proteggere giunture

Azoto e ossigeno trasferiscono calore wetando, se c'è il vuoto è meglio dell'aria. no urti

Costruire con il vuoto
Silice fusa 7% il 93% vuoto
↳ fino a T elevate, costruite celle

- es. aerogel di silice, isolante
93% di aria il resto SiO_2
è uno dei solidi a + bassa densità; il calore non passa
più che vale per il caldo vale anche per il freddo
mano su oggetto freddo ci bruciamo → isolanti termici

aerogel: conducibilità termica confrontata con isolanti termici tradizionali
aerogel conduce meno dell'aria
nelle mani porosità non avvertiamo urti (lunghezza medie dei pori 50 nm)
A volte non si può usare la silice
↳ sabbione che sovrappone cubetto

Se vogliamo lavorare qui (non nello spazio) con il vuoto, si possono usare pannelli isolanti dove dentro è stato fatto il vuoto
→ pannelli sottovuoto VIP.

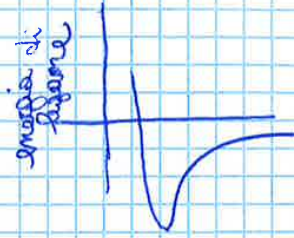
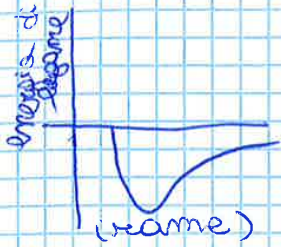
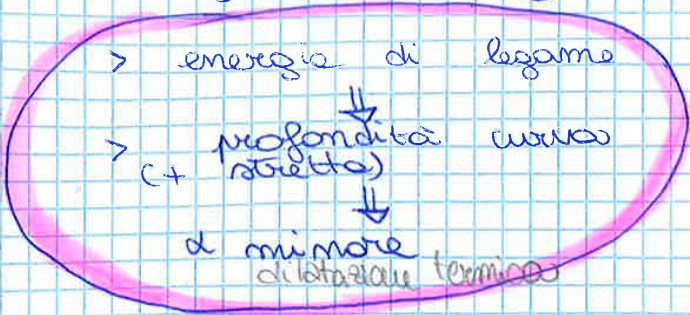
- V.I.P. conducibilità termica da 3 a 10 volte inferiore ai materiali isolanti tradizionali → permettono di ridurre lo spessore delle pareti e aumentare la capacità di stoccaggio (es. frigoriferi)
- V.I.P. sono costituiti da un materiale microporoso ("core"), sottovuoto, avvolto in un involucro multistrato sigillato

Metalli → elevata k
ma se devo usare ceramici?

Ceramici con alta k

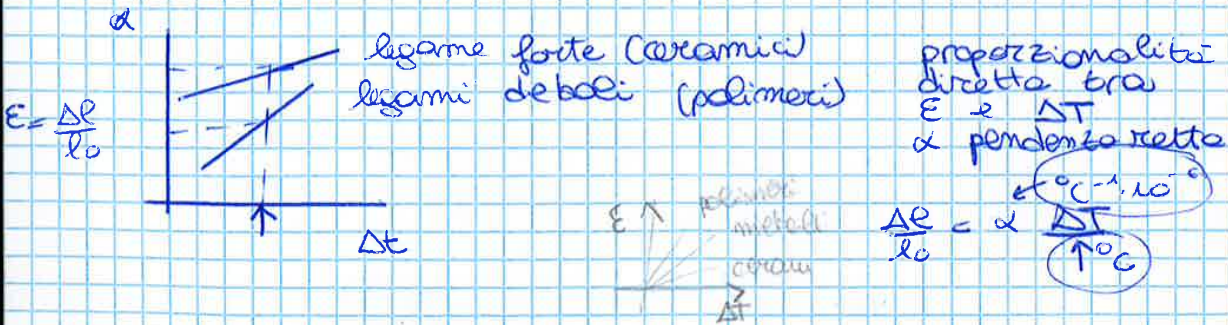
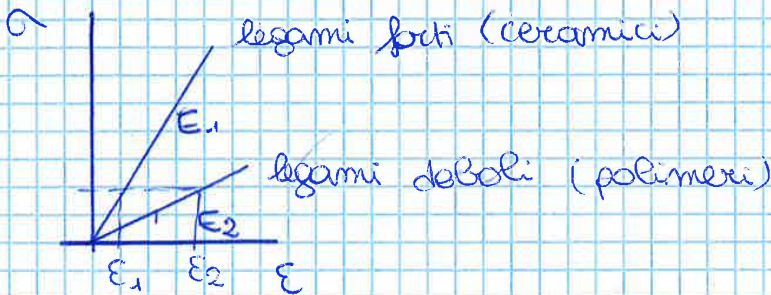
- Fattori: favoriscono un'alta conducibilità termica
- atomi costituenti il reticolo con massa atomica
- famiglia

Lo coefficiente di dilatazione termica è dovuto alla media della forza del legame



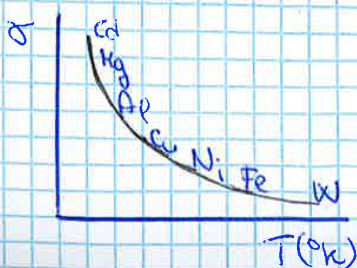
DILATAZIONE TERMICA

legami + forti
(es. alluminio
legame + forte)



α ceramici < α metalli << α polimeri

Se coeff. di dilatazione termica preso in un intervallo di temperatura



> T fus metallo, più
 α è piccolo
 di metallo con alto punto
 di fusione tendono a
 dilatarsi di meno

Vetro di silice $\alpha = 0,6$
 è il + basso valore di α che si conosce

(come metalli)
 Ci sono materiali con $\alpha \approx 0$ sono usati in campi
 dove ci sono grandi balzi termici (es. aerospaziale o
 fare giunzione tra due materiali)

Prevediamo una proprietà termica con una meccanica
 → in campo elastico

$$\frac{(l_t - l_0)}{l_0} = \alpha (T_t - T_0)$$

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

$$\bullet \sigma = E \epsilon = E \frac{\Delta l}{l_0} = E \alpha \Delta T$$

Se applico di ΔT un materiale che non può
 espandersi (se fosse libero si espanderebbe) imprimiamo
 una σ
 Approssimazione che va bene in campo elastico

Se un materiale è applicato di σ (aumentando T)
 e va in campo plastico?

- se ha proprietà plastiche entra in campo plastico (rotazione del treno)
- se non ce la ha si rompe

frattura fragile → si rompe

Riassunto tensioni indotte da variazioni di T

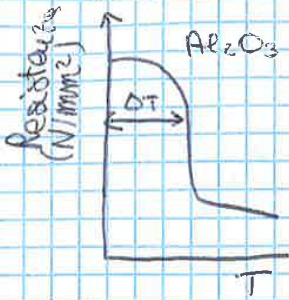
- Tensioni residue possono venire indotte in un materiale da variazioni di temperatura
 → possono anche determinare la frattura o deformazioni plastiche indesiderate
 $\sigma = E \alpha (T_0 - T_g) = E \alpha \Delta T$
- materiali duttili: le tensioni termiche possono essere ridotte dalle deformazioni plastiche
- materiali fragili: in presenza di tensioni termiche, l'assenza di deformazioni plastiche determina un aumento della probabilità di frattura fragile. Un rapido riscaldamento induce tensioni di trazione → effetto peggiore rispetto ad un rapido riscaldamento (tensioni di compressione)

→ barra di ottone ($E = 100 \text{ GPa}$, $\alpha = 20 \cdot 10^{-6} / \text{K}$)
 fissata alle due estremità a 20°C
 Qual è la max T a cui si può scaldare senza che superi uno sforzo di compressione di 192 MPa ?

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

→ risultato 106°C

Shock termici rapidi sbalzi di T introducono nei materiali ceramici sforzi che ne riducono la resistenza e ne aumentano la fragilità. ΔT_c (sbalzo) $>$ quando E e $\alpha <$.
 Nel grafico Al_2O_3 se lo sbalzo di $T > 200^\circ$ la resistenza del materiale si riduce a circa $1/3$.



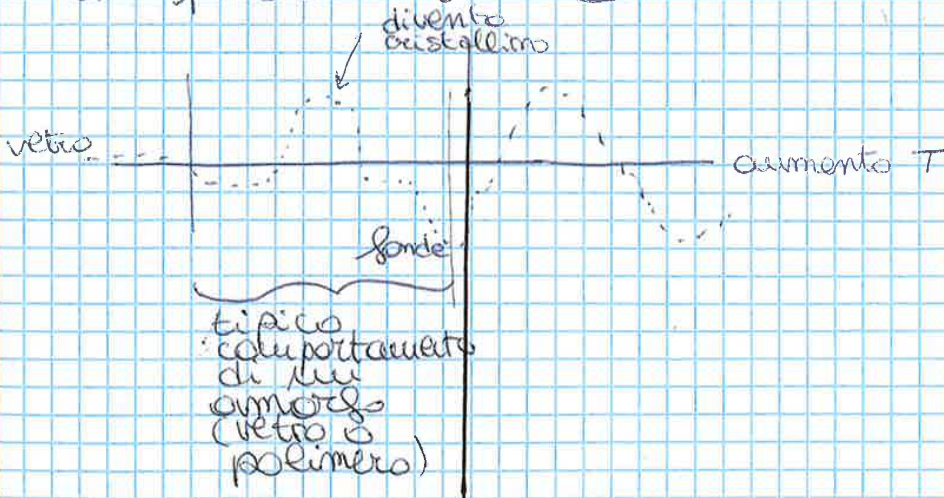
se sollecitato subito (coppo si rompe). Sollecitato e risollecitato lo grafico ΔT è il massimo a cui posso sollecitarlo, dopo quello quello perché si formano macrodifetti (fratture, bucce).

DSC

calorimetria differenziale o scansione misura differenza di capacità termica. I materiali di riferimento e i di cui si vuole conoscere la variazione di calore viene scaldato (ci vede se assorbe o cede).

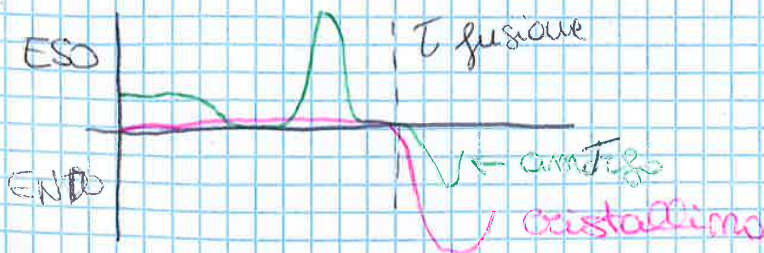
VETRO IN DSC

il vetro è amorfo, non è termodinamicamente stabile. Aumentando T diventa cristallino \rightarrow picco di cristallizzazione ed è esotermico (libera calore) perché + stabile.



con questo metodo determino T_g ma anche la temperatura di cristallizzazione. Anche T di fusione.

Se metto in un DSC un materiale cristallino? Si misura solo T fusione.

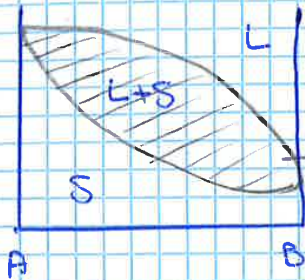


Miscibilità illimitata

argento - oro
(acqua - alcool)
rame - nichel

SOLUBILITÀ
si ha miscibilità illimitata di due componenti quando questi sono completamente solubili l'uno nell'altro sia allo stato liquido che solido

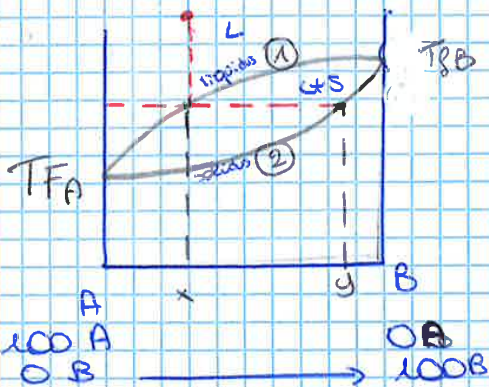
elementi che hanno una (miscibilità) / solubilità completa allo stato solido



elettronegatività simile
valenze uguali

Passo da liquido a solido e solidificazione la soluzione solida di A e B

liquido a T + base di quelle dei singoli elementi perché ho un composto
Non esistono + le proprietà di A puro e B puro



traccia una \perp all'asse delle T, interseca ① composizione del liquido ② composizione del solido

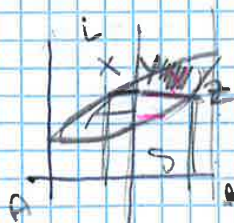
+ raffreddo, il liquido sempre cresce la concentrazione di B nel solido

ovvio di nuovo alla monofasica

La regola dell'orizzontale permette di trovare le composizioni delle due fasi in equilibrio all'interno di una zona bifasica; esse si leggono sull'ascissa di un diagramma di stato. Dopo aver tracciato l'isoterma vengono individuati due punti, uno sulla curva del liquido ed uno sulla curva del solido, tracciando, poi, partendo dai questi due punti, due linee verticali vengono individuati altri due punti sull'asse delle ascisse; i due punti sono l'intersezione nel diagramma delle lettere x ed y, la x rappresenta la composizione del liquido mentre la y rappresenta la composizione del solido

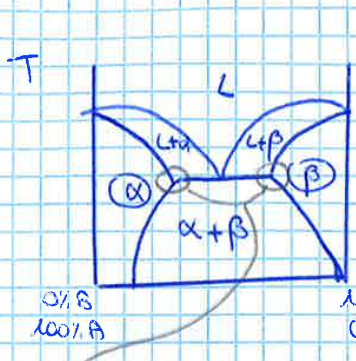
$$\% \text{ Liquido} = \frac{yZ}{xZ}$$

$$\% \text{ Solido} = \frac{xY}{xZ}$$



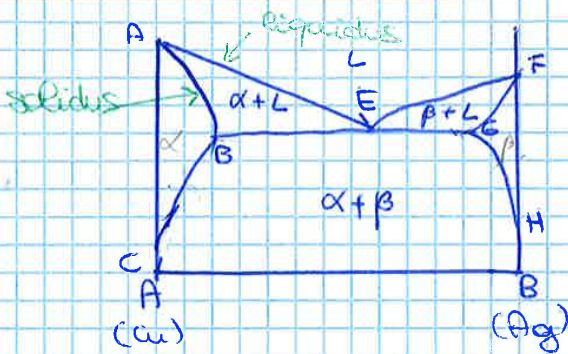
legge della leva: le % in peso delle fasi in una qualsiasi regione bifasica di un diagramma di stato in equilibrio, possono essere calcolate utilizzando la legge della leva

Solubilità limitata allo stato solido e completa o quello liquido
 caso più comune in natura



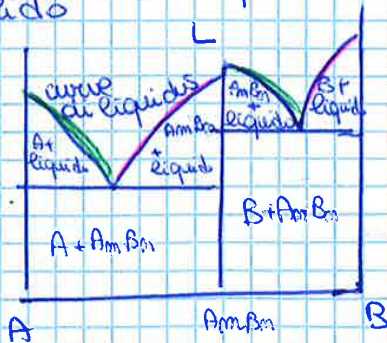
Un sistema il cui punto rappresentativo si trova nella zona L, può costituito dalla sola fase liquida alla concentrazione data; nella zona L+ α si trovano sistemi bifasici costituiti da una fase liquida ed una solida α di composizione data dalla intersezione delle isoterme con le rispettive curve di liquidus e solidus; discorso analogo per la zona L+ β ; nelle zone α e β si trovano sistemi solidi monofasici di struttura rispettivamente α e β ; nella zona $\alpha+\beta$, inoltre, si trovano sistemi bifasici costituiti da A solido B e B solido A

zona di massima solubilità a una data T lettera greco \rightarrow soluzioni solide



Composto a fusione congruente

Miscibilità completa allo stato liquido, nulla allo stato solido

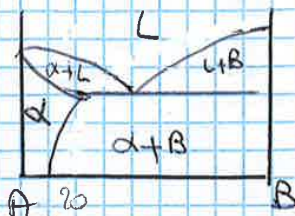


il liquido cambia composizione

il composto è sempre quello ma le composizioni dei liquidi sono diverse

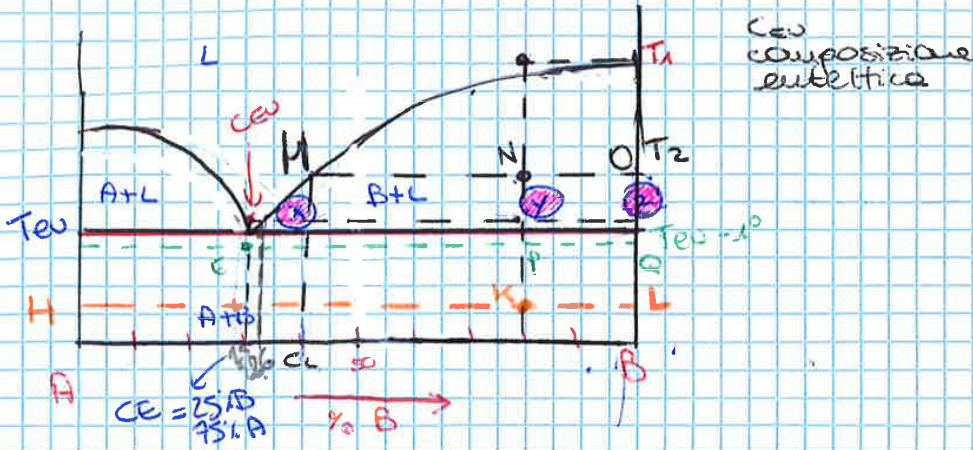
es. diagramma di fase Hg-Pb

Si può avere anche miscibilità parziale da una parte e nulla dall'altra



α % solida c'è solo α non B

A non è solubile in B
 B resta B



T	% FASI	COMP	Diagramma
T_2	L = NO RO	L = 40% B	
	B = MN HO	B = 100% B	
T_{eu-1°	L = YZ XZ	L = 26% B	
	B = XY XZ	B = 100% B	
T_{eu-1°	T FERMI ALL'EUTETTICO $P_{PRIM} = \frac{EP}{EQ}$ Struttura eutettica = $\frac{PQ}{EQ}$	$B_{PRIM} = 100\% B$ STR. EUTET. $\rightarrow 100\% A$ $\rightarrow 100\% B$	 <p>ci sono gli stessi atomi di B, ma il B che c'era prima c'era chiamato B primario la lamella per B eutettica</p>

La composizione del liquido eutettico è al 25%B e al 75% A dove passano al 100% A e al 100% B. Deve avvenire in lamelle. Processi termici che regolano la diffusione. Solidifica in lamelle. Quindi se sono alla temp. eutettica - 1°C ci sono i gram B di prima (B primario) + B eutettico + A eutettico. Struttura eutettica: struttura lamellare A-B-A-B. Lamelle di A \rightarrow 100% A. Lamelle di B \rightarrow 100% B.

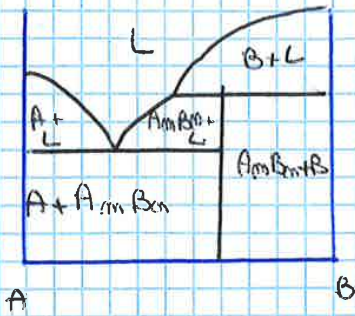
$$B_{TOT} = \frac{HK}{HL} \rightarrow B_{TOT} = \frac{80}{100}$$

BTOT perché c'è primario e nelle lamelle A invece c'è solo nelle lamelle

Composto a fusione incongrua

fonde dopo aver passato ad un altro solido

Miscibilità completa allo stato liquido, nulla allo stato solido



Qua solo composto solido (composizione precisa)

Trasformazione peritettica

si passa da un solido di una composizione γ a un altro solido δ + fase liquida (fase)



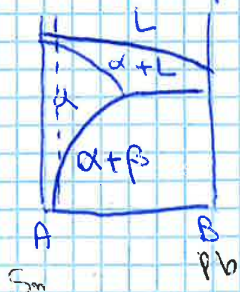
Qua soluzione solida (composizione diversa, dipende da zona)

$$1 + \delta = \gamma$$



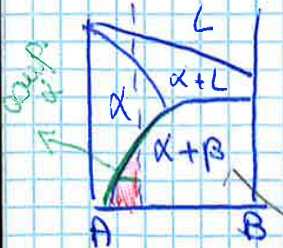
formazione della struttura eutettica

Ho una solidificazione a lamelle solo se ho una composizione eutettica



soluzione solida in cui ho solo atomi α 1% atomi di stagno e il resto Pb

anche qui non passo l'eutettica



Solidifica prima in tutto α e si impoverisce di stagno e in β (ricco di stagno) precipita



La struttura cristallina del ferro

Il ferro presenta 3 fasi solide: α , γ , δ

- α , stabile alle basse temperature (t. ambiente) ha una struttura cubica a corpo centrato, nelle sue celle c'è poco spazio per gli interstiziali di carbonio, quindi la solubilità è molto bassa, raggiunge il max 0,02% a 723°C. Questa fase è dunque ferro quasi puro, duttile quindi adatta alle applicazioni strutturali. Questa fase è detta anche ferrite ed è ferromagnetica ma non ha a che fare con le ferriti magnetiche.



- anche la fase δ ha una struttura ccc e anche in essa il C è quasi insolubile (0,1% a 1492°C) la fase δ è stabile solo a T molto alte, fino alla T fus ferro puro.

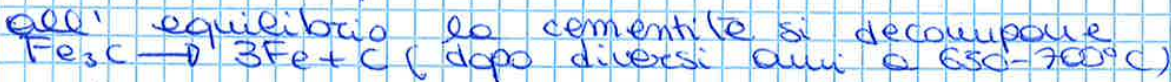
- la fase stabile a T intermedia è la γ , detta austenite, ha struttura cubica a facce centrate, c'è spazio per C interstiziali la solubilità massima a 1130°C è di quasi il 2%.
Zone importanti del diagramma Fe-Fe₃C

- fase α (ccc) soluzione solida di Fe α e C fino ad un massimo di 0,02% C duttile, malleabile
- fase γ (CFC) soluzione solida di Fe γ e C fino ad un massimo di 2,14% C: austenite
- fase δ : (ccc) soluzione solida di Fe δ e C

Negli acciai raffreddamenti veloci C non diventa stabile sotto media cementite. Nelle ghise invece a 1150°C anche il diagramma ferro è proprio intermedio 2-4.

Il diagramma di stato è complesso, ma può essere suddiviso in due semplici:

- diagramma di stato metastabile: ferro-cementite (carburo di ferro, Fe₃C) (C = 6,7%)



il diagramma di stato stabile sarebbe: ferro-graphite (C)

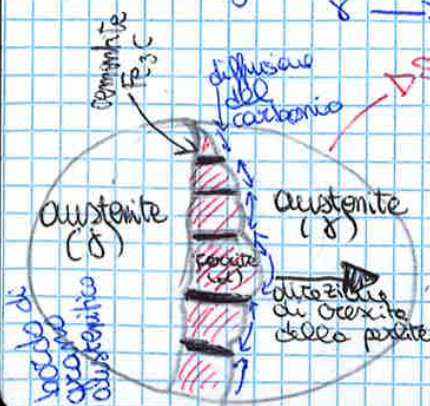
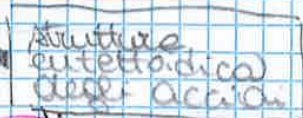
- Transf. **PERITETICA** a 1493°C (C = 0,15%)
 $\delta + liq \leftrightarrow \gamma$
- Transf. **EUTETICA** a 1147°C (C = 4,3%)
 $liq \leftrightarrow \gamma + Fe_3C$
- Transf. **EUTETOIDICA** a 723°C (C = 0,8%)
 $\gamma \leftrightarrow \alpha + Fe_3C$

STRUTTURA METALLOGRAFICA

cellulite e parte metastabile
 Ridistribuzione eutetoidica del carbonio, per diffusione Fe:

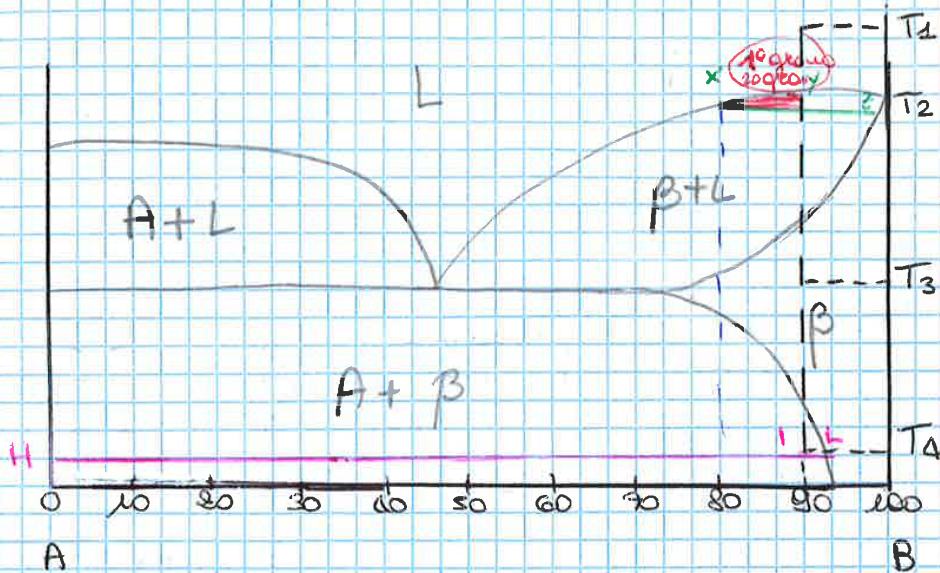
$$\begin{aligned} \gamma &= 0,96\% C \\ \alpha &= 0,022\% C \\ Fe_3C &= 6,7\% C \end{aligned}$$

Formazione per diffusione di strutture a lamella: **FERRITE** (costituita da cementite e ferro α)



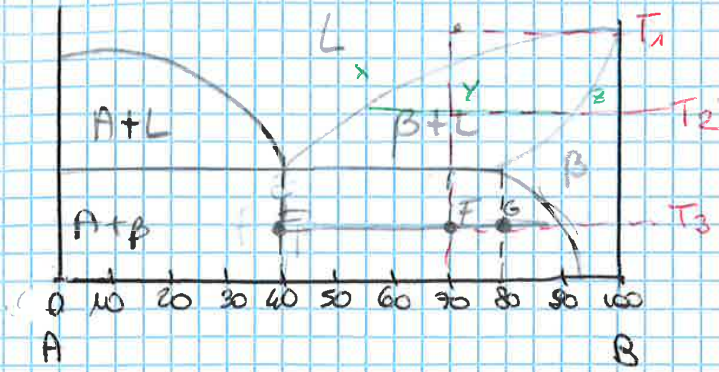
Esercitazione

Disegnare un diagramma di stato ^{bimodico} (con miscibilità completa allo stato liquido e parziale allo stato solido, con formazione di una sola fase solida (A è solubile in B); indicare le fasi presenti in ogni area



→ A solubile in B, B non solubile in A
 A c'è solo
 Non c'è possibilità che β finisca nel reticolo di A
 Non faremmo mai il caso su una curva
 perché non c'è stabilità

T	no fasi	comp. fasi	% fasi	morfologia
T_4	1	90% B	100% L	(L)
T_2	2	L = 80% B β = 98% B	%β = $\frac{xy}{x2}$ %L = $\frac{y2}{x2}$	
T_3	1	90% B	100% β	
T_1	2	A = 100% A β = 95% B	%A = $\frac{IL}{HL}$ %β = $\frac{HI}{HL}$	



T	no fasi	comp. fasi	% fasi	microstruttura
T ₁	1	L = 70% B	L = 100% L	(L)
T ₂	2	β = 50% B L = 55% B	β = x ₁ /x ₂ L = y ₁ /x ₂	(β, L)
T ₃	3	β = 80% B STRUT. = β, 50% B EUT. = A 100% A	% β = (A11 - EF) / EG % STRUT. = FG / EG EUT. = EG	(β, A) → (β, A)

Diagramma pag 13 → Acciaio allo 0,8% di C
 Acciaio da costruzione
 la massima ferrite che si forma $\frac{0,8 - 0,4}{0,8} = 50\%$

Composizione austenite ^{primaria} prima eutettoide 0,8% C
 fa si trasforma in struttura a lamelle ferrite
 per differenza al 50%

Per proprietà perché per composizione ferrite
 e ferrite

Acciaio allo 0,2% C
 $\frac{0,6}{0,8} \rightarrow$ + grammi di ferrite

Più diminuisce C + aumento ferrite - perleite
 aumento C diminuisce perleite ferrite + perlite
 Microstruttura - proprietà

La microstruttura determina:

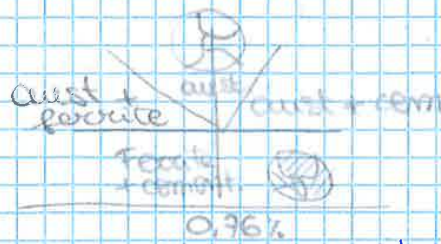
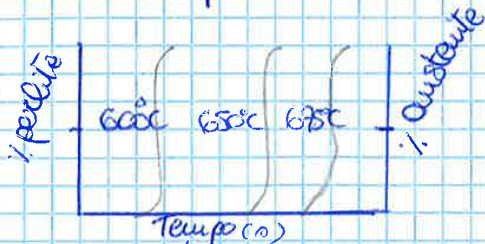
- la durezza del materiale
- la sua resistenza meccanica
- la tenacità e la duttilità
- la deformabilità e la lavorabilità delle macchine utensili
- le caratteristiche elettriche e magnetiche
- la resistenza alla corrosione

Fattori che influenzano la microstruttura
 • composizione del materiale

Treatments termici

Fattore tempo

Non ~~va lento~~ ^{raffreddo} velocemente all'equilibrio se ho un acciaio eutettico e posso velocemente da 800°C a 600°C . Ho un lasso di tempo in cui l'austenite esiste ancora a 600°C . Austenite instabile che col tempo diventa perlite.

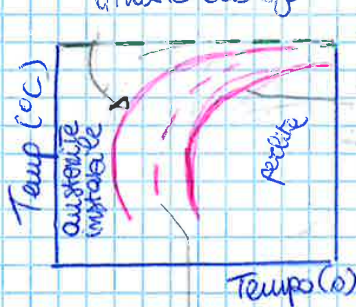


Questa trasformazione non si può vedere nel diagramma di stato

Esistono fasi metallografiche $\left\{ \begin{array}{l} \text{stabile (perlite)} \\ \text{instabile (austenite)} \end{array} \right.$

Serve per i trattamenti termici

inizio trasform



temperatura eutettica
fine trasform.

la velocità di trasformazione cresce con il diminuire di T.

meta austenite
meta perlite

Parto da una zona dove l'austenite è stabile se prendo il grafico le due curve si uniscono tornando al diagramma di stato

Retto in un altro forno, isoterme

A metà posso scegliere la dimensione delle lamelle:

- lamelle fini, perlite fine fino a 540° (non ho dato sull'energia termica)
- lamelle grosse, perlite grossolana a 600° diffonde C e Fe in direzioni opposte, do + tempo al sistema sull'energia termica per formare lamelle + spesse

Lamelle fini aumentano proprietà meccaniche

① composizione eutettica

② la temperatura della lega viene mantenuta costante per tutto lo sviluppo della reazione.

PROPRIETÀ → STRUTTURA → PROC. FABBRIC.

TRATTAMENTI TERMICI

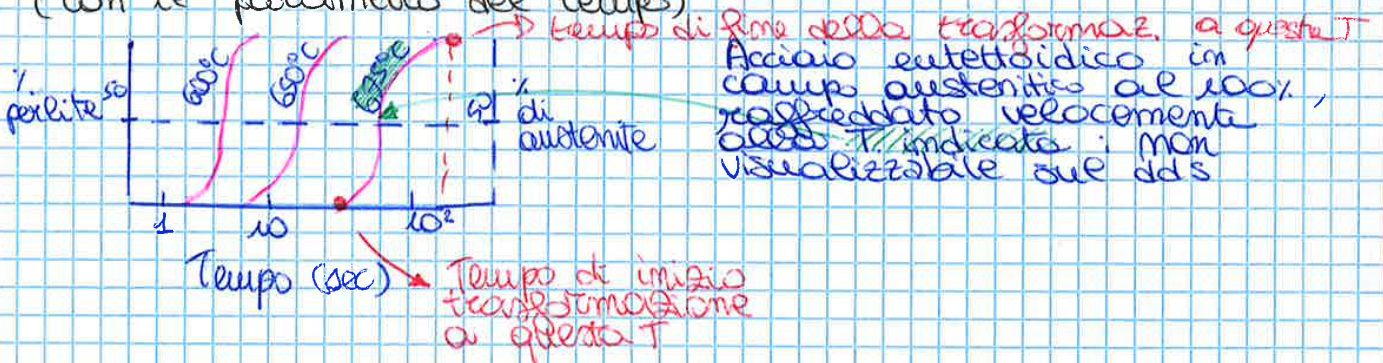
La struttura e le proprietà degli acciai variano a seconda delle velocità di raffreddamento e dei successivi riscaldamento (trattamenti termici)

Procedimenti condotti spesso a temp. elevate con i quali le caratteristiche di metalli o leghe sono modificate per migliorare l'efficienza dei cicli di lavorazione cui saranno sottoposti e per conferire loro determinate proprietà. La microstruttura dei metalli e delle leghe può essere modificata con un riscaldamento controllato ed un successivo raffreddamento.

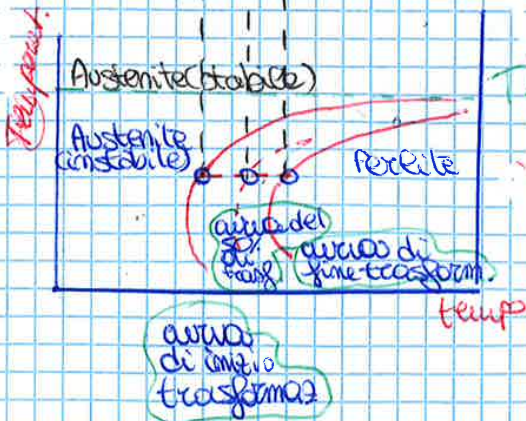
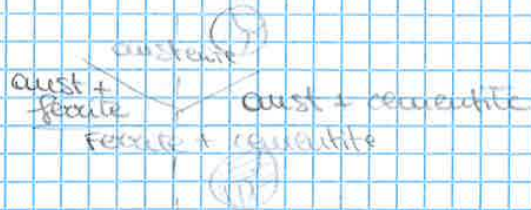
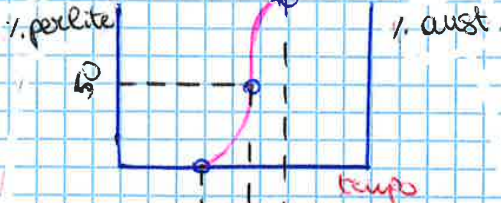
Il principale fattore che influenza la microstruttura ottenibile dai trattamenti termici, e che quindi devono essere ben controllati sono:

- 1) composizione dell'acciaio (Fe-C, elementi in lega...)
- 2) velocità di raffreddamento (e modo)
- 3) velocità di riscaldamento (suff. lenta → ottenere un riscaldamento omogeneo del pezzo)
- 4) temp. di trattamento
- 5) permanenza alla temp. di trattamento (il fenomeno desiderato deve avvenire completamente e uniformemente)

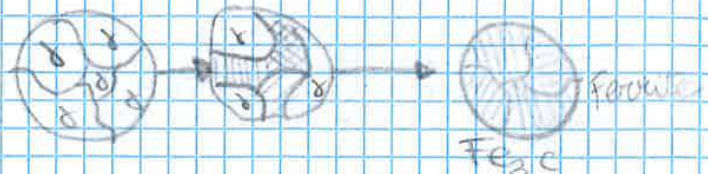
Diagrammi di trasformazioni isoterme (con il parametro del tempo)



Diagrammi di trasformazioni isoterme: austenite-pearlite in un acciaio eutettoidico



T_{eutettoide}



LAMELLE PERLITICHE SPESSIE: T_{elevata} = velocità di diffusione del C elevata
 sottili → T_{bassa}

② Dati

$$\Delta t (\text{sec}) = 2h = 7200 \text{ sec}$$

$$A = 100 \text{ mm}^2 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\Delta x = 3 \text{ mm} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\left. \begin{array}{l} T_1 (^\circ\text{C}) = 100^\circ\text{C} \\ T_2 (^\circ\text{C}) = 25^\circ\text{C} \end{array} \right\} \Delta T = 75^\circ\text{C}$$

$$k = 16 \frac{\text{W}}{\text{mk}} = \frac{16 \cdot 10^3 \text{ W}}{1000 \text{ mm} \cdot \text{K}}$$

$$Q = A t k \frac{\Delta T}{\Delta x} = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 7200 \cdot 16 \cdot \frac{75}{3 \cdot 10^{-3}} = \frac{288000 \text{ J}}{288 \text{ kJ}}$$

③ $\sigma_c = 27 \text{ MPa}$

$$E_c = 103 \text{ GPa} = 103 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\alpha_c = 10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\alpha_H = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

METODO I

$$\left. \begin{array}{l} \sigma = E \epsilon \\ \frac{\Delta L}{L_0} = \epsilon = \alpha \Delta T \end{array} \right\} \sigma = E \alpha \Delta T \quad \alpha' = \alpha_H - \alpha_c = 2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\Delta T = \frac{\sigma}{E \alpha'} = \frac{27}{103 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 131^\circ\text{C}$$

METODO II

$$E_H = 210 \text{ GPa} = 210 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{E_H E_c}{E_H + E_c} (T_b - T_a) (\alpha_H - \alpha_c)$$

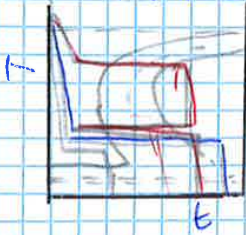
$$\Delta T = \frac{\sigma (E_H + E_c)}{E_H E_c (\alpha_H - \alpha_c)} = \frac{27 (210 + 103) \cdot 10^3}{103 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 145^\circ\text{C}$$

Diagrammi di trasformazione in raffreddamento continuo (CCT)

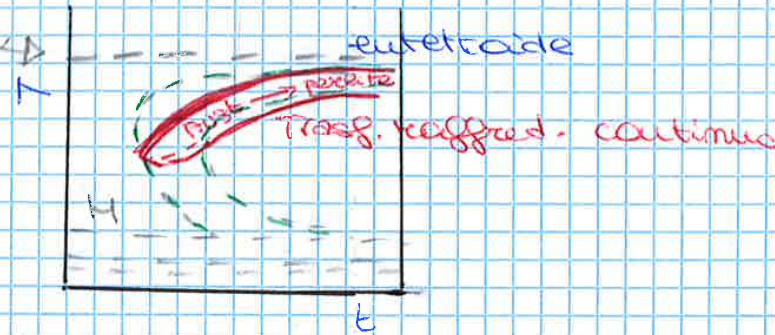
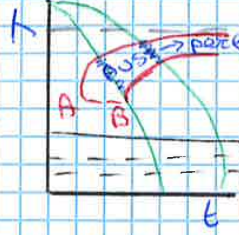
curve di raffreddamento
+ veloce o + lento

In realtà i trattamenti termici sugli acciai non avvengono in condizioni isoterme, ma prevedono il raffreddamento continuo fino a T ambiente. Le curve isoterme vengono traslate a tempi + lunghi e a T basse

CONDIZ. ISOTERME



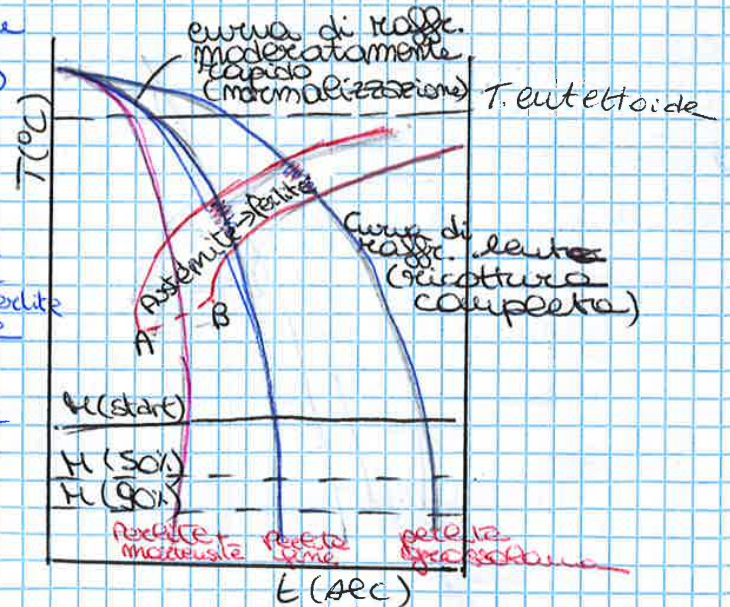
CONDIZ. RAFFR. CONTINUO



Con il raffreddamento continuo fino a T ambiente di un acciaio eutettoide (o di un acciaio comune) non si forma bainite, ma perlite

Se la curva di raffreddamento continuo incrocia AB, la trasformazione austenite-pearlite si ferma all'intersezione con AB e l'austenite residua si trasforma in martensite quando incrocia Hs (H start)

perlite grossolana = lamelle
perlite + spessa

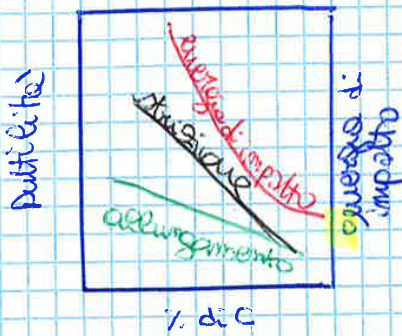


Acciaio ricottura completa: ha avuto un trattamento termico che dà una perlite grossolana
velocità critica minima per avere solo martensite, se ho altri elementi in lega riduco la velocità critica

aumentando ancora la durezza (fragile) diminuiscono la duttilità e la tenacità. La curva della durezza plette nell'ipertettoide cioè dopo lo 0,8% perché si inizia a impagillare.

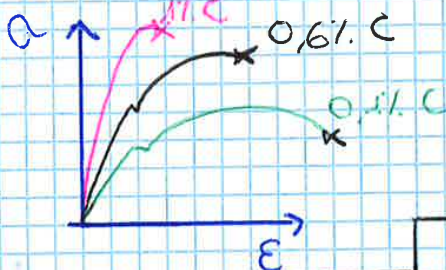
% Fe₃C

aumento cemente → < duttilità e tenacità



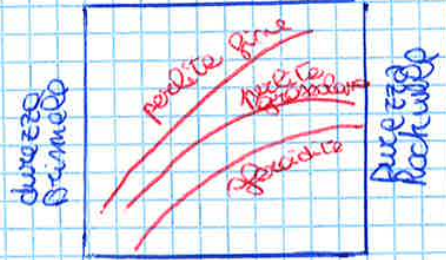
Aumento C diminuisce allungamento energia di impatto (intaglio opposto a due colpi se il pendolo). Se è fragile il pendolo ritorna allo stesso posto, non assorbe energia il campione. Se è duttile il pendolo sale di meno, faccio differenza di altezza e ho l'energia assorbita (ipertettoide fragile, pendolo ritorna).

Si ha una traslazione di proprietà meccaniche, compromesso



due era prima energia assorbita all'impatto quasi zero

% Fe₃C

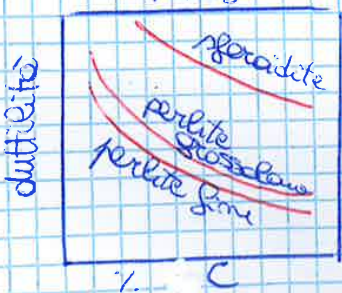


- **PERLITE FINE**, + dura e resistente di quella grossolana perché la cementite cuticola la deformazione di α , in + le lamelle così disposte ostacolano le dislocazioni. La durezza è + bassa però nei tratt. termici che porti ad una lamelle Fe₃C + spesse.
- **PERLITE GROSSOLANA** (lamelle + spesse) + duttile ← **facilmente**

Sferridite

ha tutta la matrice di ferrite (durezza) perché non interrompe la continuità della matrice. → meno dura (viene meno ostacolato il moto delle dislocazioni) duttile e tenace.

% Fe₃C



+ valore alto + area sottile >
Area iniz - area fin / area iniz

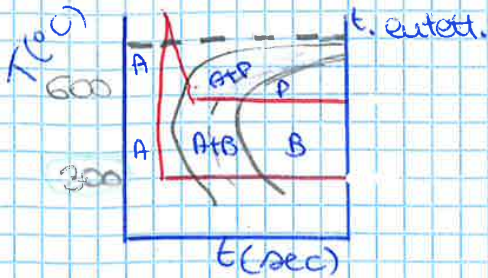
Perlite grossolana lamelle ferrite + spesse → è + duttile di quella fine. Ha una strizione, deformazione elevata. È tenace + tenace, duttile nonostante ha un'alta % di C.

perlite grossolana le lamelle + spesse + duttile

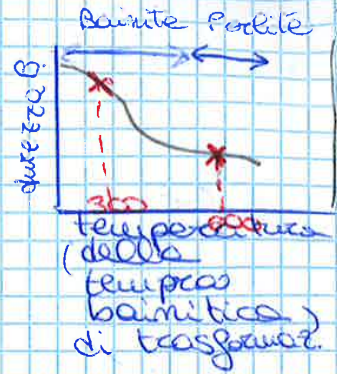
→ di quello fine è - dura perché

lamelle perlitiche → + prop. meccaniche

Microstrutture e proprietà meccaniche degli acciai



Acciaio eutettoideo

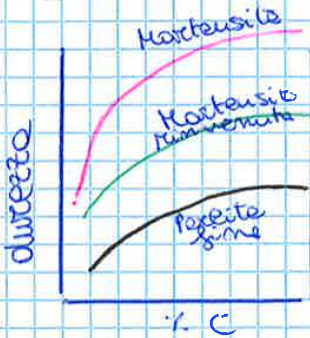


Acciai bainitici: + duri e resistenti degli acciai perlitici, come in acciaio di resistenza e duttilità

Efficacia del trattamento: ha la stessa composizione ma cambia di ordine del MPa le proprietà
 ↳ efficacia della tempera bainitica

cambio composizione

Temperatura Martensitica: aumento durezza acciaio
 Superficie con proprietà > → alte curve di fatica sollecitate per tempi + lunghi o carichi + elevati
 Martensite: la + dura e la + resistente



Reticolo distorto è + duro
 Man mano aumento C Martensite sempre + ricca di carbonio
 Rinforzo per interstiziale Max rinforzamento all'eutettoide (0,8% C)
 Non si fanno tempera sopra 0,8% perché non è + un giusto compromesso scarse numero di scarrimento nelle strutture ecc.

MARTENSITE RINVENUTA → riscaldamento per eliminare tensioni interne
 Qui trattamento termico sulla martensite, metastabile, riforma all'equilibrio ferrite-cementite ma la cementite non è lomenza ma ~~meno~~ sferoidite, ancora + efficace
 Modulare la durezza per determinare la vita a fatica

- la formazione di martensite provoca un aumento di volume: possibile fessurazione per $C > 0,5\%$.
- al diminuire della concentrazione di martensite diminuirà la resistenza a trazione dell'acciaio, ma aumenterà la sua tenacità

Riscaldamento a 150-250°C (distensione): si ottiene la martensite rinvenuta, con tracce della sua struttura circolare

Riscaldamento fra 350-650°C (rinvenimento): si ottiene la martensite rinvenuta, costituita da cementite globulare finemente dispersa in ferrite (ancora + fine della cementite nella sferoidite)

Il rinvenimento a T + alte da cementite globulare + grande, + tenace e meno resistente fino ad ottenere la sferoidite tenera e duttile (700°C, molte ore)



Tempra

Riscaldamento dell'acciaio a mT poco superiore, circa $500^{\circ}C$, a $A_3 \rightarrow$ austenizzazione.

Raffreddamento veloce (in H_2O , soluzioni saline, sali fusi, olio, aria...) (severità di tempra decrescente)

Si ottiene: una struttura con reticolo **distorto** detta **struttura di tempra**. Un esempio è la **martensite**, che si presenta dura e resistente, ma è anche molto fragile.

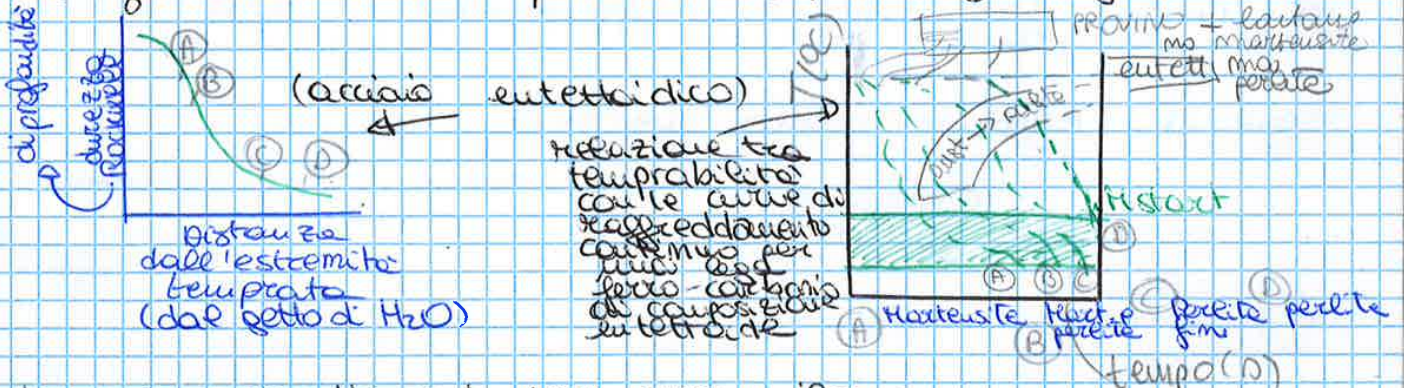
Se la percentuale di C è alta la tempra avviene + facilmente o, e parità di velocità di raffreddamento, si ottengono acciai + **duri e fragili**.

Temprabilità di un acciaio: capacità di un acciaio ad essere indurito mediante formazione di **martensite** dopo un certo trattamento di **tempra**.

Si determina con **la prova di profondità di tempra Jominy**. Forma e dimensione del provino e trattamento termico sono costanti, varia la composizione dell'acciaio.

\rightarrow getto d'acqua: non si usa perché acqua a contatto con metallo metallo che reagisce con H_2O diversa tempra rispetto a quello che reagisce con vapore d'acqua in vece qui si usa.

Diagramma di temprabilità (prova Jominy)



tempra: raffreddamento deve essere uniforme

- in H_2O \rightarrow poco usata perché immerso il pezzo (ad es a $300^{\circ}C$) in $H_2O \rightarrow$ si forma H_2O e vapore che hanno diversa conducibilità e il trattamento risulta essere non omogeneo
- in soluzioni saline \rightarrow proprietà colligative (innalzamento ebullioscopico e abbassamento crioscopico)
- in sale fuso (es. $NaCl$ a $300^{\circ}C$ fonde): non ho il problema delle eterogeneità
- tempra in oli (hanno $T. fus \neq$): restano tali e mantengono costante la temperatura senza causare irregolarità

Tempra di Jominy

velocità raffreddamento \neq completa austenizzazione **tempra veloce**.
 \searrow getto d'acqua

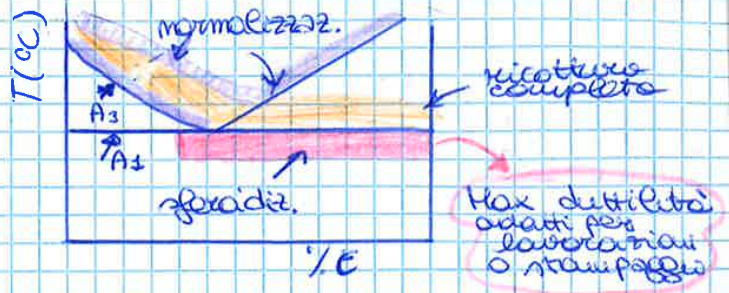
Pseudo un provino in acciaio e lo porto in fase austenitica, tempra poi in H_2O e vedo cosa succede al provino

si lucida tutto la lunghezza \rightarrow osservo al Microscopio e mi fanno varie misure di durezza

\rightarrow serve a determinare la temprabilità degli acciai

Gli acciai sono sottoposti a trattamenti di:

- ricottura (di distensione) da officina, completa)
- normalizzazione
- sferoidizzazione
- tempra
- rinvenimento
- **Bonifica = tempra + rinvenimento**



Riassunto

- Dds Fe-C
- Trattamenti termici
- Variazione della composizione superficiale (C, N)
- Variazione della composizione dell'acciaio (altri elementi oltre a Fe e C)

Superficie → ipereutettoidico → **struttura dura**
 cementazione (cementite) aggiungo C solo in superficie
 Interno → ipoeutettoidico → **struttura a cuore**

Trattamenti di indurimento superficiale

Per particolari organi meccanici sottoposti ad usura o quando si desidera migliorare le proprietà di resistenza al fatica e la resistenza alla corrosione, vengono effettuati trattamenti superficiali.

Lo scopo è quello di dare all'acciaio uno strato superficiale ad elevata durezza, conservando al cuore una buona tenacità. Con questo trattamento la composizione dell'acciaio viene modificata per diffusione di un elemento di lega o portatore dalla superficie.

Cementazione

Negli acciai al C:

- elevata durezza ed elevata resistenza all'usura sono proprie di un acciaio temprato ad un alto tenore di C (0,6% - 0,8%)
- tenacità e resistenza agli urti sono proprie di un acciaio a basso tenore di C (< 0,1%) per far coesistere le due proprietà nello stesso acciaio

Si ricorre alla cementazione, mediante la quale si arricchisce lo % di C sulla superficie del pezzo fino a valori attorno all'eutettoido, lasciandola inalterata a cuore.

Permeabilizzazione:

Arricchimento in carbonio delle zone superficiali. L'acciaio viene riscaldato al di sopra dell'intervallo critico e mantenuto in ambiente ricco di carbonio, il quale, a partire dalla superficie del pezzo, entra in soluzione nell'austenite diffondendosi poi verso il cuore.

La profondità di cementazione dipende soprattutto dalla temperatura e dalla durata dell'operazione. Per assicurare tenacità alle parti interne del pezzo, si trattano acciai a basso tenore di C (0,1 - 0,2%).

Nitruazione

Processo di indurimento superficiale ottenuto per diffusione di azoto a temperatura di circa 500°C (molto inferiore alle T di cementazione, non cambio fase, non è necessario farne altre temp. trattamenti)

A differenza della cementazione non necessita di ulteriori trattamenti termici.

Viene in genere effettuato sugli acciai da bonifica con un tenore di carbonio compreso tra 0,2-0,4%

Il processo viene effettuato in ambiente di ammoniaca parzialmente dissociata (preriscaldato a 900°C)



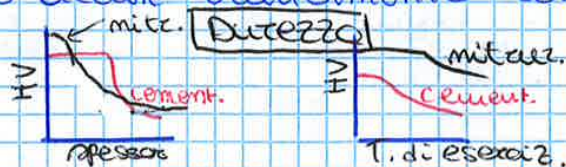
L'azoto forma con il ferro e con gli elementi di lega dei nitrucci su un sottile strato superficiale (pochi decimetri di mm).

Vantaggi nitruazione

- Durezza superiore a quella ottenuta con la cementazione
- Variazione durezza superficiale solo a T > 550°C (Fe₃N inizia a trasformarsi in fasi meno dure). I pezzi cementati diminuiscono la loro durezza già a T > 200°C, per ulteriore trasformazione dello martensite
- Poiché avviene a basse temperature, non si hanno distorsioni e deformazioni presenti invece durante la cementazione
- elevata resistenza alla fatica e alla corrosione
- Non è necessario alcun trattamento termico successivo

Svantaggio:

- processo costoso



Tempra superficiale

Può essere eseguito su tutti gli acciai

È un trattamento puramente termico: riscaldamento a gas azoto di un sottile strato di metallo immediatamente adiacenti alla superficie e successivo brusco raffreddamento

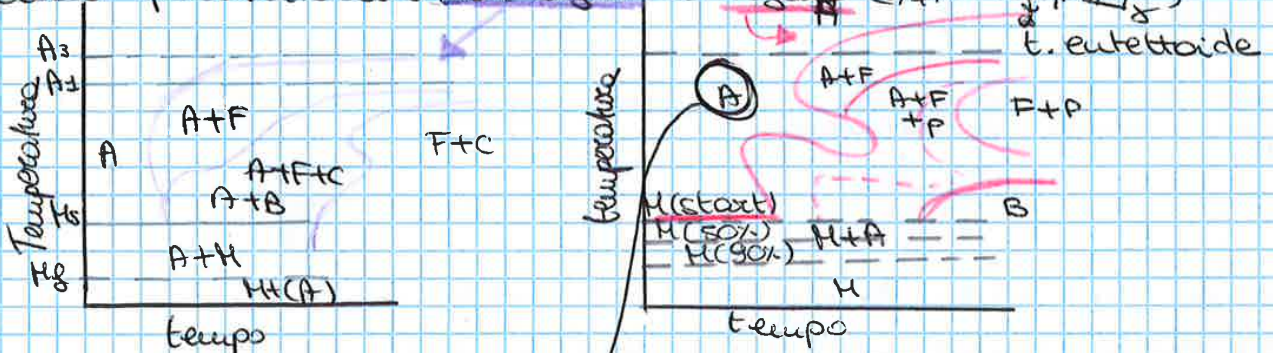
- si utilizza un camello alimentato da miscele di ossigeno e acetilene, e raffreddamento a getto d'acqua
- riscaldamento ad induzione: il riscaldamento è generato per via elettromagnetica: il pezzo viene circondato da solenoidi percorsi da correnti ad alta frequenza, la cui regolazione permette di agire sullo spessore del materiale interessato al passaggio della corrente

→ analisi metallografica: consente di verificare gli spessori di tempra e di individuare eventuali anomalie
 cricca di tempra

Influenza degli allogenici e dei gammogeni

- Innalzano o abbassano la T eutettoidica
- spostano la T eutettoidica, aumentando o diminuendo la solubilità del C, mol Fe ecc
- questi effetti si trovano negli acciai come:
 - in soluzione solida nella ferrite (Ni, Si, Mn, Cr, Mo)
 - come carburi (V, Mo, Cr, Mn) - come elemento (Pb) o composto non metallico (ossidi, solfuri, silicio)
- inossidabili perché l'ossido di Cr forma una specie di barriera
- in soluzione solida nella ferrite (Ni, Si, Mn, Cr, Mo): ne aumentano la resistenza meccanica, ma ne riducono la tenacità
- come carburi (V, Mo, Cr, Mn): aumentano la resistenza meccanica, al creep e all'usura
- composti non metallici (ossidi, solfuri, silicati...): possono ridurre la resistenza a fatica

Variazioni del diagramma di transf. isoterma per un acciaio (eutettoidico non legato e legato (0,4% C + Cr, Ni, Mo))



Aumenta il campo di esistenza dell'austenite

- diagramma CT completo per un acciaio contenente elementi in lega (acciaio legato 0,30-Ni, Cr, Mo, 0,4% C)



- il C e altri elementi spostano a tempi + lunghi i masi della perlite e della bainite (in funzione di tempo + basse, $8,3^\circ\text{C}/\text{sec}$): è uno dei motivi per cui si usano gli acciai legati
- Naso bainitico: qui si può formare bainite anche con raffreddamento continuo
- Non si temperano per formare martensite acciai Fe-C con $C < 0,25\%$ a meno che contengano opportuni elementi in lega

Acciai a basso tenore di C (<0,25%)

