



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 660

DATA: 07/10/2013

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

STUDENTE: Bertone

MATERIA: Tecnologia dei Materiali da Costruzione

Prof. Smeacetto\_Matteis

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.**

# TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

## RIASSUNTI:

- VETRO
- MATERIALI CERAMICI
- POLIMERI
- ALLUMINIO
- RAHE
- CORROSIONE
- FABBRICAZIONE ACCIAI
- TRASFORMAZIONE DI FASE ALLO STATO SOLIDO NEGLI ACCIAI
- DIAGRAMMI TTT e CCT
- FRATTURA DUTILE o FRAGILE
- PROVA TRAZIONE
- DUREZZA
- METODI RAFFORZAMENTO
- TECNOLOGIE DI SALDATURA
- PROCESSO TEMPCORE
- STRUTTURA CRISTALLINA METALLI

F. SMEACETTO

MATTEIS

## DOMANDE DI ESAME

- X CERAMICI:
- come si ottengono, quali processi, quali sono materie prime
  - specie che esistono pasta compatta e pressa differenziale
  - materiali refrattari, quali sono, che tipi ci sono e cosa servono
  - quali
  - materiali isolamento termico (lana di vetro e vetro cellulare)

- X POLIMERI:
- proprietà meccaniche
  - tipi polimeri e confronto prop. meccaniche (amfio e semi cristallini)
  - come si producono (add. e cond.)
  - elastomeri, vulcanizzazione
  - copolimeri
  - così è materiale composito, FRP

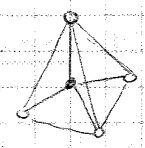
1B. Relazione da Griffith della KIC

$$\sigma_c = K_{IC} / Y(\pi c)^{1/2}$$

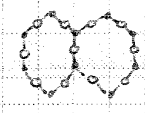
Trasformazione KIC da sopra

Il Tetraedro è l'unità fondamentale di silice, il silicio coordina la combinazione di 4 Ossigeni  $4 \cdot \frac{1}{2} O^{2-} \rightarrow SiO_2$

cationi di silice, anioni di ossigeno



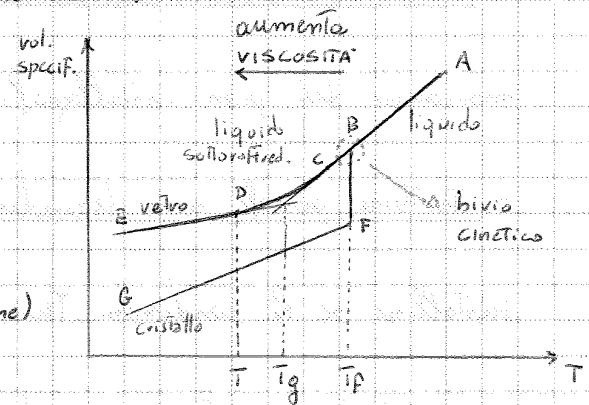
La cella unitaria è costituita da un insieme di Tetraedri con angoli di legame uguali (ha regolarità della struttura)  $\rightarrow$  QUARZO/CRISTOBALITE



Il retto di silice dal punto di vista Tridimensionale data la regolarità degli angoli di legame ha struttura meno densa.

Volume specifico = inverso densità

Se da A Tolgo calore arrivo a B in cui ho raggiunto  $T_g$  (Temp. solidificazione o fusione)



riduzione volume specifico e di temperatura con

aumento viscosità. Passaggio da B a F ha solidificazione completa se continuo

e sottoraffred. calore diminuisce volume fino ad arrivare a  $T_{amb}$  con materiale cristallino. Pendenza retta GF dovuta al fatto che liquido dilata molto di più di un solido nelle Tre dimensioni spaziali.

Alle alte temperature ho elevate energie cinetiche quindi struttura disordinata, in B ho aggregazione strutturale con elevate viscosità, posso identificare bivio cinetico. Da C a D acquisto viscosità, la struttura è detta CONGELATA ed è elevato attrito.

sua velocità di cristallizzazione.

Se la velocità di raffreddamento eguaglia la velocità di variazione configurazionale allora ho raggiunto il punto in cui la struttura, essendo elevata quanto necessario, si congela.

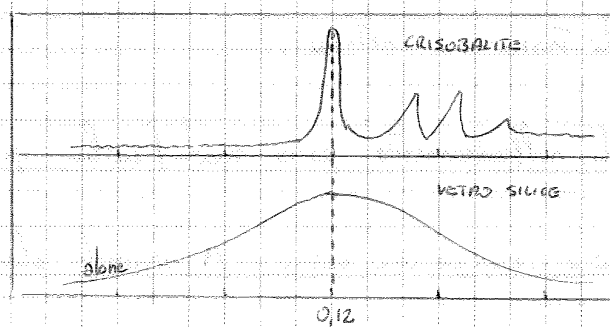
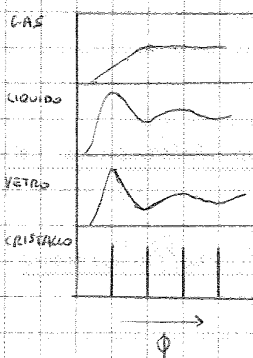
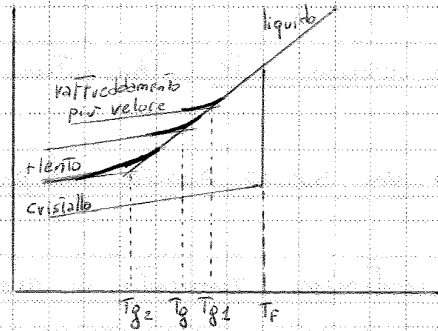
da strutture lo ottengo usando la

diffusione di raggi X, invece il cristallo

di raggi X e ottengo un PATTERN di diffrazione.

d'ordine di un reticolo cristallino se si che in un vetro il diffrattogramma

non presenta picchi, ma un alone dovuto all'ordine a lungo raggio



la funzione  $\phi$  indica densità atomica a partire da un determinato atomo probabilità di trovare un altro nel suo intorno.

l'alone amaro ha un picco centrato nella posizione del picco della cristobalite poiché esiste un ordine a piccolo raggio dovuto alle strutture del Tetraedro.

LIQUIDI VETROGENI possono dare luogo a vetri in condizioni normali di

raffreddamento grazie alla loro elevata viscosità in prossimità della temperatura

**STRUTTURA DEI VETRI**

I - Retrificanti o formatori di reticolo: sostanze che possono assumere strutture retrose (rettificanti), costituiscono il reticolo amorfo (formatori)  
 $SiO_2$ ,  $B_2O_3$ ,  $P_2O_5$ ,  $TeO_2$ ,  $GeO_2$

II - Fondenti o modificatori di reticolo: di per sé non sono in grado di rettificare, hanno la funzione di abbassare la temperatura di "fusione" del rettificante (fondenti), provocano un'interruzione del reticolo amorfo del formatore, sono debolmente legati ad esso e sono relativamente liberi di diffondere (modificatori).

Metalli alcalini:  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $Li_2O$  - alcalino-Terrosi:  $HgO$ ,  $CaO$  e  $ZnO$

I modificatori di reticolo deprimiscono il reticolo, i ponti  $Si-O-Si$  vengono spezzati  $\rightarrow$  diminuisce viscosità  $\rightarrow$  diminuiscono le temperature caratteristiche del vetro (per mantenere l'elettroneutralità della struttura

l'ossigeno portante assume carica negativa e il modificatore si posiziona vicino agli  $O^-$ )



○ ossigeno non portante  
 ○ ossigeno portante

III - Intermedi: non sono in grado di rettificare, ma in quantità limitata possono entrare a far parte del reticolo di un altro ossido formatore

$Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$  funzione formatore se si è in alcalino  
 " modificatore se si è in acido

la viscosità segue una legge di Tipo Arrhenius (esponenziale)

$$\eta = \eta_0 e^{\frac{Q}{RT}}$$

$\frac{Q}{R}$  = energia all'azione flusso viscoso

la viscosità degli amorfici decrea esponenzialmente con il risere della

T, secondo una curva continua, ed contorno dei cristallini.

Viscosità e temperatura in diversi ritmi:

da lavorazione del retro viene effettuata

nell'intervallo Tra le temperature di lavorazione

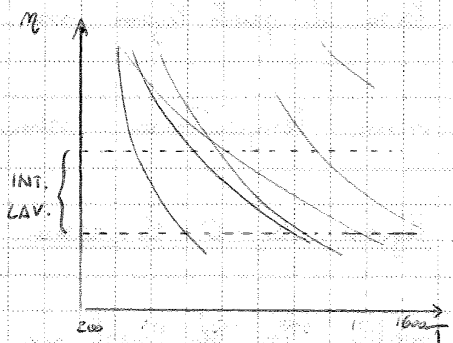
e di ramollimento: i ritmi più lunghi

intervallo è ampio sono detti LUNGI, quelli più

breve sono detti CORTI. Un ritmo corto sarà indicato nella lavorazione

meccanica, mentre uno lungo è preferibile nella più lenta lavorazione

manuale.



**PROPRIETÀ FISICHE**

**1- VISCOSITÀ E TEMPERATURA**

Aumentata viscosità ( $\eta$ )

Punto di fusione ( $\eta = 10^0 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ): retro può considerarsi liquido

Punto di lavorazione ( $\eta = 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ): fortemente deformabile

Punto ramollimento ( $\eta = 10^6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ): max T alle quale si può maneggiare retro senza deformarlo (Punto LITTLETON)

Punto di ricottura ( $\eta = 10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ): la diffusione atomica è sufficiente e diminuire T tensioni residue

Punto di deformazione ( $\eta = 3 \cdot 10^8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ): a T inferiori si ha frattura fragile prima di def. plastica

$$T_{RICOTTURA} > T_g > T_{DEFORMAZIONE}$$



ESERCIZIO

In ottiene un chilo di vetro quanti grammi di quarzo, carbonato di potassio e carbonato di calcio ho bisogno?

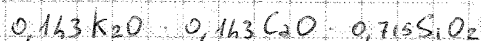


Dal punto di vista delle formule chimiche sono presentati così i reattivi:

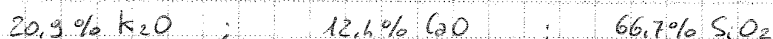


1 mole di  $\text{K}_2\text{O}$  e di  $\text{CaO}$  e 5 moli di  $\text{SiO}_2$

► Porzione molare ha 7 moli Totali, quindi:  $\left( \frac{\text{moli elemento}}{\text{moli Totali}} \right)$



► masse atomiche (% wt = peso)  $\text{K} = 39 \text{ g/mol}$   $\text{Ca} = 40 \text{ g/mol}$   $\text{O} = 16 \text{ g/mol}$   $\text{Si} = 28 \text{ g/mol}$



► Trovo le moli avendo la massa

**VERRO SODICO - CALCICO** ( $\text{SiO}_2 = 72\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ )

- Vetro più comune, basso costo e facile fabbricazione e lavorazione
- Poco resistente al calore (poiché ha  $T_{\text{TRANS.}}$  retroso di circa  $550^\circ\text{C} = T_g$ ) e agli

acidi Thermis

- migliore durabilità con aggiunta di  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- Buona resistenza a desertiificazione (compete il raggiungimento di maggior
- libbia più stabile rispetto al comportamento meta-stabile del vetro) e stabilità
- all'acqua (vetro ha normale meccanismo di solubilità in acqua secondo la
- reazione  $\text{SiO}^{(4-)} \text{Na}^{(1+)} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Si}(\text{OH}) + \text{NaOH}$ , dal punto di vista dello scambio

ionico ha diminuzione superficie silanizzata  $\begin{matrix} \text{OH} & \text{OH} & \text{OH} \\ | & | & | \\ \text{Si} & \text{Si} & \text{Si} \end{matrix}$  coinvolge la

mobilità degli ioni alcalini, dal punto di vista della dissoluzione ha

legame silossanico  $\text{Si}-\text{O}-\text{Si} + \text{OH}^- \rightarrow \text{Si}-\text{OH} + \text{Si}-\text{O}$

precipita in  $\text{Si}(\text{OH})_4$  e la soluzione si ossida in quanto non stabile

**VERRO CON PIOMBO**

Buona temperatura di lavorazione

Alto indice di rifrazione che conferisce brillantezza

Vetri Flint per lenti

Ghiami per radiazioni

Densità elevata

de l'ostre sono prodotte mediante:

- Tinture orizzontale

- Tintore verticale :
- 1- Foucault che sfrutta capillarità della morsa di vetro, la morsa di vetro raggiunge i rulli con una sistema meccanica già abbozzata e levata da poter essere tintore.
  - 2- Pilkington simile a quello precedente ma produce una non planarità della superficie dovuta a formazione di irregolarità poiché si tirano morsa fluida.

- Vetro "FLOAT" : processo Pilkington <sup>dopo laminazione</sup> il vetro fuso viene fatto scendere (galleggiare) su un bagno di stagno fuso (che non interagisce con il vetro poiché è più denso) in una camera contenente gas inerte (per evitare ossidazione dello stagno si mono azoto e idrogeno). Il movimento delle lamine viene controllato e regolato da ruote laterali (Top roll) che producono intagli e permettono di ottenere spessore desiderato. \*Alta qualità, produce grandi quantità e molto preciso.

\* Quando esce dal bagno di stagno il vetro viene trasportato in Tunnel di ricottura che abbassa T fino a T<sub>amb</sub> (chimico Transizione).

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_b} + \frac{1}{h_i}$$

$$R_s = \frac{1}{h_t} = \sum_1^N \frac{1}{h_s} + \sum_1^M d_j \cdot r_j$$

$r_j$  = resistività Termica  
1 soda lime

$d_j$  = spessore ogni materiale

$$h_s = h_r + h_g$$

$$h_r = h \cdot G \left( \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)^{-1} T_m^3$$

$\epsilon_1 = 0,837$  lastra monolitica  $\epsilon_2 =$  rivestimento  $T_m = 283 \text{ K } (10^\circ\text{C})$

$$h_g = Nu \cdot \frac{\lambda}{s}$$

$Nu > 1$  solo convezione  
 $< 1$  solo conduzione

$s$  = spazio intercapedine

$h_c$  = è funzione del vento, umidità e altri fattori climatici, in un retro ordinario è pari a  $25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

$$h_c = h_r + h_g = 4,1 + 3,6 \quad \text{per retro climico soda-lime}$$

$$h_r = \frac{4,1 \cdot \epsilon}{0,837} \quad \text{per retro con rivestimento}$$

$$U = \left( \frac{1}{h_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + R_s + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{1}{h_c} \right)^{-1}$$

I rivestimenti utilizzati sono di ossidi, carboni, nitruro (spessore inferiore al micron) ridotta emissività e conducibilità (go in intercapedine)

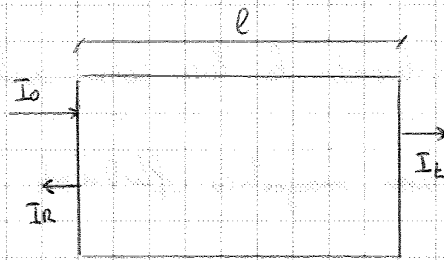
BOWING EFFECT = fenomeno di movimento differente delle due lastre di vetro

dovuto alla variazione di pressione nel momento in cui ci si trova ad elevate altitudini con presenza di go in pressione all'interno dell'intercapedine.

assorbimento e riflessione.

$$T = I_t / I_0$$

$I_0$  = raggio incidente



$$I_t = I_0 (1 - R)^2 \cdot e^{-\beta l}$$

$R$  = frazione riflessa

$$I_R = I_0 \cdot R$$

$l$  = dimensione della strada che deve compiere il raggio.

dei sistemi di ossidi come impurezza ( $FeO - Fe_2O_3$ ) fanno variare anche di trasmissione di un vetro piombo.

RIFRAZIONE: si riferisce per polarizzazione elettronica ovvero la luce trasmessa

distorce le murchi elettroniche (costituite dagli elettroni degli atomi costituenti il vetro)

attraverso la sua componente di campo elettrico ( $E$ ). Questa interazione tra campo

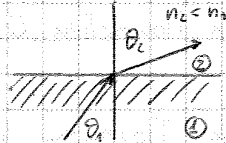
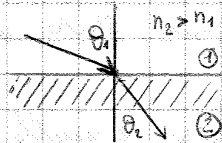
elettrico della radiazione luminosa e atomi del vetro, fa sì che la velocità della

luce diminuisca passando attraverso il materiale e quindi cambia direzione

all'interfaccia  $n = \text{Indice di rifrazione} = \frac{c}{v}$

$n = 1,52$  Soda-lime

$n = 2,10$  piombo



RIFLESSIONE: riflessione  $R$  rappresenta la frazione di luce incidente che viene riflessa

all'interfaccia, se luce ha incidenza normale  $R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2}$

$n_1, n_2$  = indici rifrazione dei mezzi

$n_1 = 1,5$   $R = 4\%$  silice

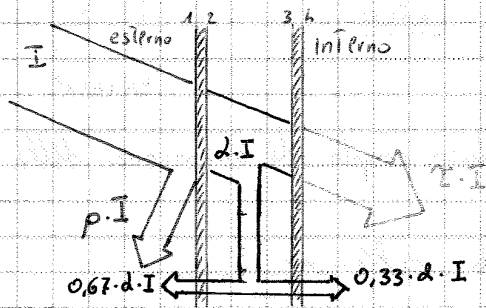
$n_3 = 1$  aria

$n_1 = 2,1$   $R = 13\%$  piombo, etrate  $R$

$$E_{N, ENTRANTE} = \tau \cdot I + 0,33 \cdot d \cdot I = I(0,33 \cdot d + \tau)$$

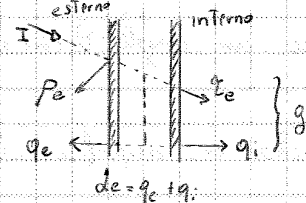
FATTORE SOLARE =  $\frac{E_{N, ENTRANTE}}{E_{N, INCIDENTE}}$   
 o FATTORE g

$$FS = \frac{I(0,33d + \tau)}{I} = (\tau + 0,33d)$$



da sorgenti luminose e la DGS sono  
 sorgenti DIURNA

Da notazione



EFFETTO SERRA: Infolge Trömmere e absorbita dai corpi presenti nell'ambiente, l'aumento della temperatura dei corpi comporta emissione di radiazioni IR a lunghezza d'onda molto maggiori di  $3 \mu m$

Il vetro non lascia passare radiazioni con  $\lambda > 4 \mu m$  quindi aumenta la Temperatura degli ambienti chiusi.

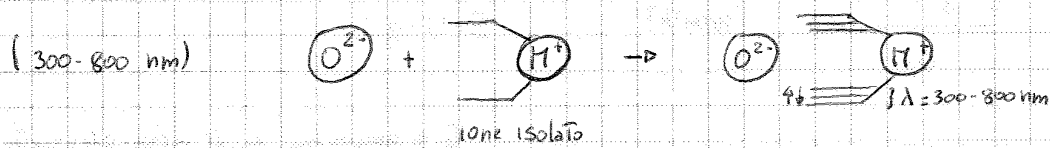
In estate è importante ridurre al minimo l'apporto calore termico dall'esterno verso l'interno, si usano vetri assorbenti o riflettenti.

In inverno lo scopo è ridurre al minimo le dispersioni termiche quindi si usano vetri isolanti o termoemissivi

### BILANCIO ENERGETICO

È un bilancio tra dispersione termica e apporto di calore utile mediante la radiazione solare entrante nell'edificio per un dato periodo. Utile per confrontare le prestazioni di differenti prodotti vetri.

il solto di livello avviene nel range del visibile del punto di vista delle  $\lambda$



Il comportamento del catione metallico dipende:

- quanti elettroni liberi
- tipo di coordinazione tra catione isolato e ione  $O^{2-}$
- contorno struttura reticolare (legami ecc..)

Ma loro è la COPPA DI LICURTO IV.

## 2. VETRI RIFLETTENTI (ESTATE)

Soluzioni ottimali per attenuare l'eccessiva irradiazione solare, riflettono verso l'esterno delle vetrate una notevole quantità di energia solare incidente.

Si ottengono per deposizione di metalli e/o ossidi metallici:

- PIROLISI  $\rightarrow$  reazione sulla superficie del vetro caldo di opportuni reagenti che vengono spruzzati (in soluzione). Film di ossido di Titanio.

Subito dopo la ricottura che elimina il 95% delle tensioni interne vengono

spruzzati sali che si decompongono e vanno a finire sulla superficie del vetro


- SPUTTERING CATORICO  $\rightarrow$  in campo elettromagnetico e sotto vuoto spruzzo di metalli e ossidi metallici (oro, acciaio inox...)



**PROPRIETÀ MECCANICHE DEL VETRO**

I vetri possono deformarsi in flusso viscoso, un solido e viscoso alle alte temperature, è visco-elastico intorno alle temperature di transizione ( $T_g$ ) ed è fragile a temperatura ambiente.

ROTTURA FRAGILE: è improvvisa e isotropica, senza il preavviso di una

deformazione plastica ; i dati di resistenza sono particolarmente variabili e si può trovare un valore medio di carico di rottura e spessore più il collare o carichi decisamente più alti ma anche decisamente più bassi (l'utilizzo è legato a notevole scollamento in quanto non sono vischiosi).

Il carico di rottura dipende dalle condizioni superficiali, la manipolazione meccanica o l'esposizione ambientale determinano un abbassamento sensibile del carico di rottura. Il carico di rottura è particolarmente basso in base all'intimità

dei legami chimici (Si-O 50% ionico e 50% covalente con una certa direzionalità quindi sono legami forti). I vetri sono facilmente danneggiabili in superficie

scale di Mohs = 6; resistenza limitata ( $\sigma_{Tmax} = 100 \text{ MPa}$ ); si rompono senza preavviso; mostrano incidenti fenomeni di fatica statica ( $T_{max}$ -conosciuti); i valori di resistenza sono molto dispersi ( $\pm 30\%$ ).

MECCANICA DELLA FRATTURA: Studia e quantifica i rapporti fra proprietà del materiale, livello di sforzo, presenza di difetti capaci di indurre formazioni di



- un materiale che non si deforma plasticamente (fragile) cede di schianto.

Concentrazione degli sforzi in nicche lunghe e con raggio molto piccolo:

$$K_t = \sigma_m / \sigma_0 = 2 \left( \frac{c}{\rho} \right)^{1/2}$$

FATTORE DI CONCENTRAZIONE DEGLI SFORZI

misura il grado di amplificazione dello sforzo all'apice della nicca o

dell'intaglio o dello spigolo vivo. Nelle microfratture del vetro  $K_t \approx 100$  o +.

- criterio energetico di Griffith:

collegata allo sforzo  $\sigma$ , la lancia possiede una energia di deformazione  $\sigma^2/2E$ .

- la presenza della nicca comporta il rilascio di energia di deformazione ( $E_d$ )

da parte della nicca, quindi  $E_d = -\pi c^2 \sigma^2 / E$  (negativa poiché rilasciata).

- la formazione della nicca implica creazione delle superfici (distacco piani

atomici continui) che  $\Delta$  delimitano la cui area è all'incirca pari al

doppio della lunghezza della nicca cioè a  $4c$ . L'energia superficiale

che deve essere fornita al materiale per creare le due superfici della

nicca (volume di area  $2c$ ) sarà  $E_s = 4c \cdot \gamma$ , l'energia totale messa in

gioco nella formazione dell'intaglio (energia della nicca) sarà

$$E_{TOT} = E_d + E_s = -\pi c^2 \sigma^2 / E + 4c \cdot \gamma$$

Fino alla lunghezza critica la nicca è stabile, perché per forza natura occorre

fornire energia ma una volta raggiunta la dimensione critica

diviene instabile, poiché il suo accrescimento comporta diminuzione energia.

un'azione frattura fragile in questo materiale

$G_s = 2\gamma_s$  energia specifica di frattura, rappresenta energia assorbite per

nuove aree unite di massa.  $K_{Ic} = (EG_c)^{1/2}$   $K_{Ic} = (EG_{Ic})^{1/2}$

■ Resistenza a frattura in seguito a sollecitazione di Trazione:

$$\sigma_F = \frac{K_{Ic}}{Y\sqrt{a_c}}$$



■ Resistenza a frattura in seguito a sollecitazione compressione:

molto superiore a quella a Trazione in quanto tende a chiudere le

miche, questa prova è utile per vedere resistenza a carichi strutturali. Ha

come incrementi la distorsione del provino e bisogna tenere conto che queste

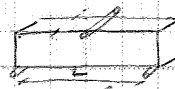
prove consistono le prestazioni del materiale che in futuro può essere soggetto

a frattura precoce.

■ Prova di flessione: può essere a 3 o 4 punti

a 3 punti

$$\sigma_{max} = \frac{3}{2} \frac{F \cdot L}{B \cdot W^2}$$



a 4 punti

$$\sigma_{max} = \frac{3}{2} \frac{P \cdot (S_1 - S_2)}{B \cdot W^2}$$



la resistenza a flessione è influenzata dai seguenti fattori: condizione della

superficie, velocità di applicazione e durata del carico, area di superficie

colposta a sforzi di Trazione, Temperatura, ambiente circostante, invecchiamento

dimensioni critiche. d'approccio fornito da Weibull per descrivere la resistenza di un materiale unidirezionale è la PROBABILITÀ DI SOPRAVVIVENZA

$P_s(V_0) = 1 - P_R$  ovvero frazione di campioni uguali di volume  $V_0$ , che

rispondono ad un carico  $G$ , opposto della probabilità di rottura  $P_R$

$$P_s(V_0) = e^{-\left(\frac{G}{G_0}\right)^m}$$

$m$  = modulo di Weibull  $G_0$  = parametro di normalizzazione

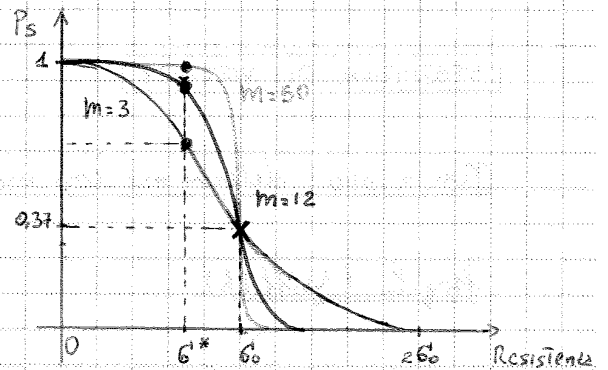
per  $G=0$   $P_s(V_0)=1$  poiché tutti i campioni rispondono, per  $G$  elevato allora

si rompono tutti e  $P_s(V_0)=0$

$G=G_0$  per qualunque  $m$  vale  $P_s=0,37$

$m$  alto, ha meno dispersione di rotture

$m$  basso ha elevate dispersione di rotture



In unidirezionali  $m$  varia da 1 a 10 circa.

La funzione di distribuzione può essere rappresentata in forma logaritmica:

$$P_s(V_0) = e^{-\left(\frac{G}{G_0}\right)^m} \rightarrow \ln[P_s(V_0)] = -\left(\frac{G}{G_0}\right)^m \rightarrow \ln\left[\frac{1}{P_s(V_0)}\right] = \left(\frac{G}{G_0}\right)^m \rightarrow$$

$$\rightarrow \ln\left\{\ln\left[\frac{1}{P_s(V_0)}\right]\right\} = m \ln\left(\frac{G}{G_0}\right) \rightarrow \ln\left\{\ln\left[\frac{1}{P_s(V_0)}\right]\right\} = m \ln G - m \ln G_0$$

Ripetendo in  $y$  il valore  $\ln\left\{\ln\left[\frac{1}{P_s(V_0)}\right]\right\}$  e in  $x$  il valore  $\ln G$  si ottiene una

retta  $y = mx + q$  di pendenza  $m$  (modulo Weibull) e intercetta  $q = -m \ln G_0$

Alla curva  $P_s$ -Resistenza posso associare una curva di CRITICITÀ  $(G-c)$

## MATERIALI CERAMICI

### Proprietà meccaniche:

Comportamento puramente elastico con elevato E, buona resistenza a compressione e scarsa a trazione, materiali fragili con buona tenacità a frattura

Proprietà chimiche: Stabilità agli acidi, ai solventi organici e all'acqua

Proprietà fisiche: densità, ottimi isolanti elettrici (grafite) e termici, anisotropici, elevate T di esercizio (refrattori), generalmente opachi alla luce, ma possono essere anche trasparenti.

Microstruttura: hanno microstrutture complesse, sono per lo più policristallini ma anche plurifasici (ad una fase principale si accompagnano spesso una fase vetrata e una certa porosità, i cristalli si suddividono tra materiali a legame prevalentemente ionico e materiali a legame prevalentemente covalente;

CERAMICI IONICI (meccanismo di deformazione)

le direzioni e i piani di scorrimento sono vincolati dalle cariche, due ioni con lo stesso segno non possono venire in contatto; movimento delle dislocazioni è possibile ma difficile poiché lo scorrimento può avvenire nei piani che non hanno la massima densità atomica; numero limitato di sistemi di scorrimento - strutture cristalline a bassa simmetria.



CERAMICI COVALENTI (meccanismi deformazione)

movta delle dislocazioni è difficile poiché il legame covalente è fortemente direzionale. alcuni sistemi di scorrimento diventano attivi solo alle alte Temperature.

Si suddividono in ceramiche a pasta porosa (sp. pori riempiti da pol. ed interstizi) e pasta compatta (i pori sono riempiti da fase vetrata in seguito a fusione dimantocottura)

### Materie Prime

d'argilla è composta da allumina o: bicati idrati + ossidi e idrossidi (Fe, K, Al) + carbonati (Ca, Mg, Fe)

le argille derivanti da alterazione di rocce feldspatiche contengono equos. bidimensionalmente un solo minerale il caolino ( $2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2H_2O$ ); gran parte argille sono impure per presenza di ossidi di ferro (colore rosso); le argille pure, sodiche, usano come biomiche.

azione di agenti atmosferici (non gelivite = resistenza al gelo e impermeabilità = definire limiti del passaggio di acqua dalla fascia superiore a quella inferiore).

## ■ Piastrelle.

Materie prime: argille + carbonati + feldspati + quarzo + inerti con azione fondente

Tipi di cottura:

- smaltati: [ 1. pH cromatici non smaltati → cottura si svolge a T di 950-1600°C
- smaltati [ 2. pH cromatici smaltati → BICOTTURA successiva e cottura si effettua in smaltatura e smalto e fondere e fondere lo smalto al supporto
3. MONOCOTTURA → si effettua smaltatura su prodotto cotto → unica cottura che produce sia trasformazione del supporto sia fusione e finaggio di smalto

Cromatici e poste porose:

Cotto = materie prime di base (argille, sabbie, carbonati e ossidi di Fe) hanno azione resistiva all'usura, migliorabile con processo di preratura.

Forme e Macchine: queste piastrelle sono rivestite con vetrina trasparente o smalto opaco, hanno elevato contenuto di  $CaCO_3$  → azione decolorante e aumento adesione degli smalti alle poste, alta porosità e resistenza meccanica modesta.

Cottolatte

Imaglia

Cromatici e poste compatte:

Gres: rivestiti con argille che durante cottura danno luogo alla graduale formazione di una fase liquida (quercione) → prodotto impermeabile e con elevata resistenza meccanica e agli acidi. naturali quando argille hanno già sufficienti quantità di ossime od azione fondente, artificiali ottenuti per miscelazione di fondenti ad argille pure.

Porcellane: prodotti a posto bianco, molto compatti e rettificati ottenuti da calcine quarzo e feldspati, tenne quando piccole fase liquida (elevata trasparenza), dove problema fase cristallina

Klinker: argille refrattorie + fondenti + ossidi colorati + clorite resistente a ossime

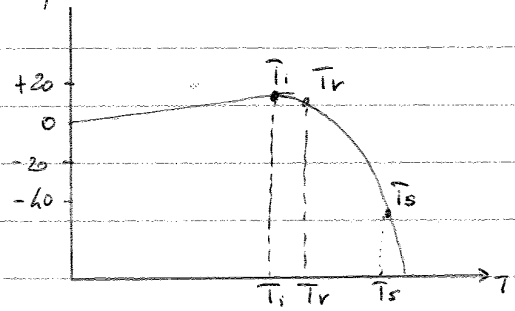
inizia e originarsi un po' di liquido l'ottimo del processo inizia e diminuisce.

$T_r$  = temp. max. alla quale può essere usato

il refrattorio

$T_i$  = temp. di iniezione

$T_s$  = temp. di scioccamento



Altre proprietà: Conduttività termica, Dilatazione termica, resistenza a shock termici, stabilità strutturale, resistenza a compressione

Diagramma di stato Silice - Allumina

a 1595°C si ha punto eutttoidico nel caso in cui ho silice e allumina pure, nel caso di impurezza si abbassa. Bisogna avere impurezza inferiori al 2-3%.

Si vogliono refrattori con sempre più allumina perché le prime fasi liquide si formano a temperature più elevate e inoltre sono più pregiati

Refrattori basici = contengono ossido di magnesio - o refrattori molto elevati ma non possono resistere a contatto con sostanze acide; hanno  $\alpha$  piuttosto elevato che determinano una scarsa resistenza agli shock termici.

(si dividono in magnesiaci, dolomitici)

## PIASTRELLE

UNI 11411 → permette una uniformità delle caratteristiche delle piastrelle

- Argille
- Carbonati
- Feldspati
- Smagranti

Si analizza il range di temperatura rispetto ai laterizi. Possono essere soggette a monocottura o bicottura.

Il gres viene prodotto con una cottura che dà luogo alla grafiteazione cioè si ha una fase liquida

(Vedi slide per classificazione)

La classificazione avviene per assorbimento di acqua superficiale e per la formatura

- ↓
- metodo di pressatura B
  - metodo di estrusione A

Per ogni gruppo abbiamo le appendici che ci dicono le resistenze e le caratteristiche dei materiali

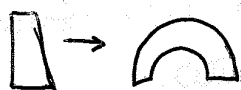
## REFRATTARI

La plurifasicità di materiali ceramici fanno sì che non si abbia un punto refrattario.

Questi materiali devono garantire una resistenza meccanica a sollecitazione a temperature sopra i 500°C

Devono conferire l'energia termica ed è fondamentale che non reagiscano con i materiali con cui vengono a contatto.

Refrattarietà libera = indice molto approssimativo della massima temperatura in assenza di sollecitazione, che il materiale può sopportare



Con seger che con l'aumentare della temperatura rammolisce e

## Diagramma di stato silice - allumina

A 1595 °C abbiamo punto eutetico. se ho silice pura e allumina pura con impurezze invece questo punto si abbassa.

Bisogna avere impurezze minori del 2-3%

Vogliamo refrattari con via via sempre più alluminio perché la prima fase liquida si avrà a temperatura più elevata.

## REFRATTARI BASICI

Contengono ossidi di magnesio → abbiamo una refrattarietà molto elevata ma non possono venire a contatto con sostanze acide

Hanno un  $\alpha$  piuttosto elevato che determina una scarsa resistenza agli shock termici.

## REFRATTARI NEUTRI

Vengono usati come intermezzo tra refrattari acidi e basici.

Zirconia → ha trasformazione polimorfa con conseguente variazione di volume. d'ossido di calcio stabilizza nella forma cubica.

## PROPRIETA' TERMICA dei MATERIALI

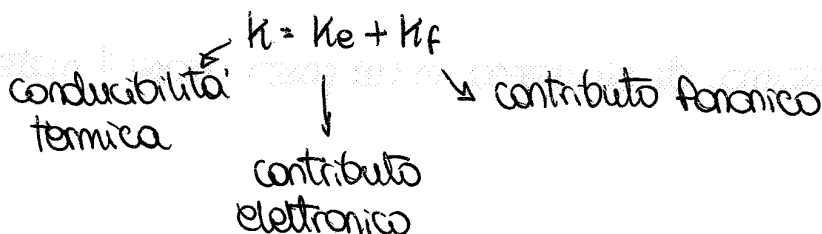
Vibrazioni termiche degli atomi all'interno delle molecole.

le vibrazioni non sono libere ma accoppiate ~~ed~~ ai legami interatomici.

si formano delle onde termiche che si distribuiscono nel reticolo.

Questa onda vibratoria è la responsabile della conducibilità termica.

Il diamante ha la maggiore conducibilità termica



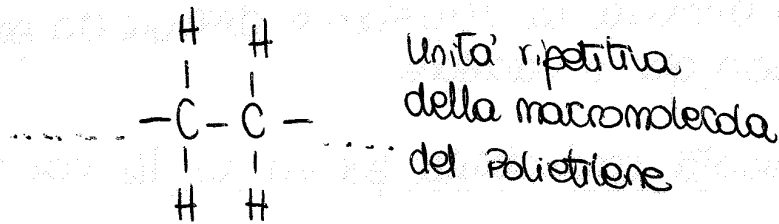
fonone: vibrazione termoelastica del materiale

il riscaldamento è quindi legato alla vibrazione degli atomi.  
la vibrazione si propaga dal lato caldo a quello freddo.



# I POLIMERI

Sono formati dalla ripetizione dei monomeri. Esistono polimeri naturali non sintetici.



Gli atomi di carbonio e idrogeno seguono un percorso a zig-zag. Possiamo avere dei legami all'interno delle catene molto forti, covalenti.

I legami tra catene diverse possono essere deboli (van der Waals) oppure forti (covalenti).

A seconda del grado di polimerizzazione io avrò più o meno legami tra i C.

La flessibilità delle catene dipende dalla presenza o meno di gruppi laterali voluminosi.

## PROPRIETA'

Termoplastici: rammolliscono a riscaldamento

Termoindurenti: hanno resistenza di temperatura maggiore dei termoplastici. Ciò significa che non possono essere riciclati.

Kevlar → catene lineari appaiate che hanno una serie di legami idrogeno quindi legami secondari.

Materiale termoplastico

Bakelite → fenolo + formaldeide che si comporta come un polimero con struttura tridimensionale.

Si lavorano per stampaggio, a temperature basse rispetto ai polimeri, con ritmi di produzione elevati.

Termoplastici: molti legami incoisi, duri e fragili, non sommano al riavvolgimento (resistono ad alte T ma oltre il limite massimo liquefanno, non sono riciclabili). Legami primari coesenti anche fra le catene, presentano resistenza meccanica superiore rispetto ai Termoplastici. Sono di due tipi:

- elastomeri (gomme)
- Termoplastici ad alto grado di reticolazione (quindi questo <sup>non</sup> comporta il riavvolgimento)

### ristallinità dei polimeri

Capacità di impacchettamento delle catene molecolari al fine di produrre una struttura atomica ordinata. A causa delle dimensioni e complessità le molecole dei polimeri sono solitamente solo parzialmente cristalline (regioni cristalline all'interno di regioni amorfe). Un polimero non è mai completamente cristallino poiché in ogni caso delle zone in cui la catena si ripiega (valore max di cristallinità = 95%, grado 0% = completamente amorfo)

→ Importanza della cristallinità:

a parità di peso molecolare, la densità di un polimero cristallino è maggiore di quella dello stesso polimero amorfo poiché in una struttura cristallina le catene sono più compatte, il grado di cristallinità è determinato mediante misure di densità  $\% \text{ cristallinità} = \frac{\rho_c(\rho_s - \rho_a)}{\rho_s(\rho_c - \rho_a)} \cdot 100$

→ Fattori che influenzano la cristallinità dei polimeri sono:

- velocità di raffreddamento durante la solidificazione, si deve lasciare tempo sufficiente perché le catene si allineino
- composizione chimica: la cristallinità è elevata nei polimeri che derivano da monomeri con strutture chimiche complesse
- struttura delle catene: le ramificazioni interferiscono nel processo di cristallizzazione

N.B. Se aumento cristallinità di un polimero → maggior densità (maggiore impacchettamento), maggior stabilità termica (punto di riavvolgimento più elevato), maggior rigidità e

A fine processo la viscosità è cambiata aumentando il COEFFICIENTE STATISTICO = rappresenta lo stato delle catene e fine processo ottimiziate

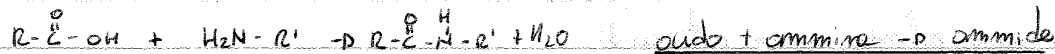
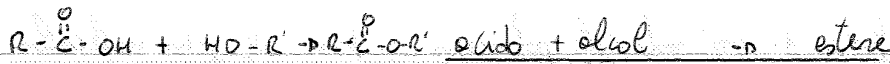
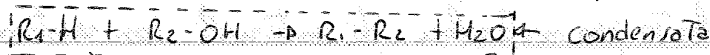
• polietilene

LDPE → ramificato (altamente amorfo)

HDPE → lineare (altamente cristallino)

2. POLIMERIZZAZIONE PER CONDENSAZIONE (poliesteri, poliammidi, policarbonati, urea epossidiche)

Si ha quando da due monomeri diversi si forma un polimero con eliminazione di una molecola di prodotto secondario semplice come acqua



Elastomero: materiale capace di subire deformazioni reversibili sotto l'azione di sforzi relativamente piccoli, e di recuperare rapidamente la forma e le dimensioni originali non appena lo sforzo viene rimosso. Essi sono polimeri lineari nei quali si sono introdotti un certo numero di legami e ponti che conferiscono al materiale una struttura tridimensionale e assicurano proprietà di elasticità molto elevate. Questi legami, covalenti o ione-covalenti, sono introdotti dopo lo stampaggio del materiale mediante una reazione chiamata VULCANIZZAZIONE.

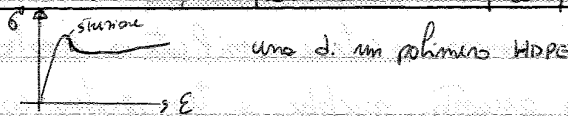
I punti di unione tra le catene impediscono lo scorrimento reciproco sotto carico. VULCANIZZAZIONE: processo di lavorazione della gomma, che viene chimicamente legato allo zolfo (S) mediante riscaldamento. da reazione di vulcanizzazione determino una ricomposizione con formazione di legami covalenti e tra loro ponti zolfo del materiale. In tale processo si utilizza un autoclave che permette utilizzarsi simultaneamente di temperatura e pressione

Tg nei materiali polimerici:

Temperature alle quale non sono più presenti legami di van der Waals fra catene perché le vibrazioni termiche sono sufficienti a romperli. Riguarda la componente amorfa del materiale.

Crazing e Scorrimento: sono due tipi di "meccanismi", il meccanismo in cui avviene il meccanismo determina il modo di frattura del materiale

- CRAGING: comporta la formazione di tante piccole fessurazioni dette crazes che non sono vere e proprie crepe ma sono collegate da "fibrille" (catene polimeriche allungate); le fibrille prima si allungano, poi si unifica la rottura improvvisa per livelli di deformazione bassi (comportamento fragile e frattura)
- SCORRIMENTO: si forma una striscione che può propagarsi lungo tutto il provino fino ad arrivare a rottura, la frattura si unifica per grandi deformazioni (comportamento T mole)



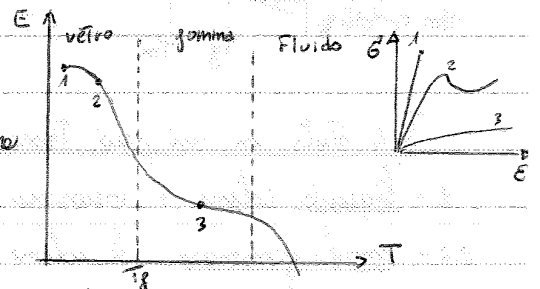
N.B. le caratteristiche meccaniche sono molto sensibili alle variazioni di T (al variare di T diminuisce E e diminuisce carico di rottura).

T polimeri e T ambiente possono essere tenaci e deboli, fragili e deboli, fragili e forti, tenaci e forti.

N.B. le proprietà meccaniche dipendono dalla struttura amorfa o semicristallina del polimero:

• POLIMERO AMORFO:

- $T < T_g$  materiale vetroso, comp. fragile, mecc. per crazing
- $T < T_g$  materiale vetroso, mecc. per scorrimento, aumenta  $\sigma_f$  e rottura
- $T > T_g$  materiale gommoso, def. e rottura elastiche, resistenza molto alta



le plastiche rigide vengono usate al di sotto della loro  $T_g$ , allo stato vetroso  
 le plastiche come polietilene vengono usate al di sopra di  $T_g$ , allo stato gommoso

PVC: elevata resistenza chimica, buona resist. alla fiamma, presenza di un gruppo atomo di Cl che causano impedimento sterico e repulsione elettrostatica, riducono flessibilità.

PS (polistirene): introduzione di benzene

• POLIMERO CRISTALLINO

All' aumentare del grado di cristallinità:

- maggiore impacchettamento delle macromolecole  $\rightarrow$  maggiore densità
- punto di ramollimento più elevato  $\rightarrow$  maggiore stabilità termica
- maggior numero di legami intermolecolari  $\rightarrow$  maggiore rigidità e resist. meccanica

Polimeri semicristallini comprende presenza di sferuliti, in base a T a cui si opera il materiale ha comportamento differenti:

### Elastomeri:

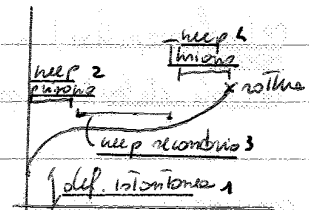
- allungamenti elastici dell'100-800%, poi frattura
- proprietà meccaniche fortemente variabili a seconda delle mescole
- gomme naturali impigriti da vulcanizzazione tramite legami a base zolfo. Tra le altre da vulcanizzazione aumenta modulus elastico, resistenza a trazione e all'ossidazione

### Resistenza a scorrimento viscoso (CREEP)

applicazione di un carico costante a "elastica" T di origine e una deformazione crescente nel tempo (non costante). È un fenomeno molecolare che limita la vita di un materiale.

- fenomeno attivato termicamente
- diffusione allo stato solido
- queste prove misurano e valutano risposta di un materiale sotto carico costante di entità costante per tempi lunghi
- si usano dispositivi che misurano allungamento del materiale

Si distinguono curve che evidenziano quattro tratti distinti  
 più il carico è alto minore è il tempo di rottura maggiore è def.  
 più temperatura è alta " " " " " " " "



### Resistenza a fatica

Sollecitazioni cicliche può provocare un indebolimento localizzato o la rottura può verificarsi a causa di un ammorbidimento del materiale

### SILICONI

particolari polimeri nei quali le catene principali omiche esse costituite da atomi di C sono formate dal susseguirsi di atomi di Si e di O formando catene condotte "silossaniche"

Struttura: le due catene vicine per ciascun atomo di silicio sono stante con radicali organici del tipo  $-CH_3$ ,  $-C_2H_5$ , Talvolta sono stante da atomi di O che formano un ponte tra catene silossaniche di una struttura reticolare tridimensionale

Proprietà: sono resistenti all'acqua in quanto idrorepellenti; resistenti all'ossidazione; sono stabili a  $Temp > 200^\circ C$ ; possono essere liquidi, pastosi, solidi, del tipo delle gomme

• Compositi rinforzati con fibre: processi preparativi complessi, costi e proprietà meccaniche molto migliori e elevati; proprietà meccaniche anisotrope, fibre lunghe-corte-temute.

ho proprietà meccaniche isotrope quando si mettono strati con orientazioni diverse.

fibre di carbonio: miscela di canapa e grafite, ha modulo elevato parallelamente ai piani basali delle celle cristallografiche e basso perpendicolarmente.

Proprietà meccaniche delle fibre: le fibre spesso prodotte possono raggiungere risultati meccanici elevatissimi; le proprietà di un elemento fragile dipendono da presenza di una ricca di lunghezza critica associata a sforzo critico.

di fibre vetrose per matrice polimerica si dividono in vetro E (alta resistenza elettrica, non contiene idrogeno mobili quindi conferiscono conducibilità e sbattono resistenza all'acqua) e vetro S

(alta resistenza meccanica, struttura con elevate rigidità per presenza di ossido di Boro, queste fibre devono essere protette da appretto per evitare perturbazioni sul materiale)

↳ conferisce maggiore compatibilità all'interfaccia.

### Comportamento meccanico:

→ influenza della lunghezza delle fibre = le caratteristiche meccaniche non dipendono solo dalle proprietà meccaniche delle fibre ma anche da come un carico applico viene trasmesso dalle matrici alle fibre (importante conoscere piano del legame all'interfaccia fibra-matrice), il legame interfacciale due volte forte in quanto <sup>quadrato</sup> viene applicato un carico la matrice si deforma, sono importanti gli effetti associati alle estremità delle fibre.

NB lunghezza critica della fibra ( $l_c$ ) = lunghezza minima per avere un'efficace meccanismo di rinforzo. Dipende dal diametro delle fibre ( $d$ ), dalla sua resistenza a trazione  $\sigma_f^*$  e dal legame

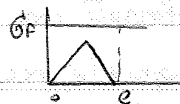
fibra-matrice  $\tau_c$  (o carico massimo a Togliola della matrice)  $l_c = \frac{\sigma_f^* \cdot d}{2 \tau_c}$

$l = l_c$  raggiunge tensione massima  $\sigma_f^*$  solo al centro della fibra

$l > l_c$  il rinforzo è più efficace

$l \gg l_c$  fibre continue

$l < l_c$  non si raggiunge rinforzo efficace



→ influenza orientazioni: fibre continue e allineate, corte e allineate, corte con orientamento casuale

Caso di fibre continue e allineate: fibre ha comportamento fragile, matrice duttile = applicando carico longitudinalmente si ha:

1. se le fibre che la matrice si deformano elasticamente

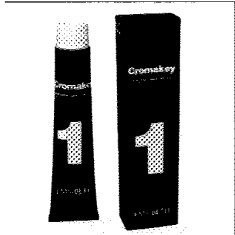
2. A  $E_m$  la matrice inizia a deformarsi plasticamente, mentre fibre ancora in campo elastico

# EMSIBETH

C O S M E T I C S

CLIENTE

DATA



## VETRI

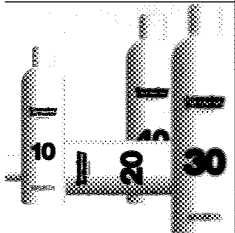
- P. FISICHE : VISCOSITA' E TEMP - TEMP. TRANS.
- P. MECCANICHE : MODULO ELASTICO, - DUREZZA - DOTI. FRAGILE - GRIFFITH
- P. OTTICHE : TRASPARENZA - INDICE DI RIFRAZIONE
- P. CHIMICHE :

## CERAMICI

- P. FISICHE : DENSITA' - ISOLANTI ELETTRICI E TERMICI - AMAGNETICI - REFRATTARI - OPACHI ALLA LUCE
- P. CHIMICHE : STABILITA' AGLI ACIDI, SOLVENTI E ACQUA
- P. MECCANICHE : ELEVATO E - BUONA RESISI. COMPR. E BASSA A TRAZ. - FRAGILE CON BASSA TENACITA' A FRATTURA
- P. TERMICA :  $K_1, K_2, K_3$

## POLIMERI

- P. MECCANICHE : BASSI E, RESIST. TRAZ < SOAPA ; TERMOIND SONO FRAGILI!
- TERMOPLASTICI  $T < T_g$  FRAGILI,  $T > T_g$  DUTILI ; INFLUENZATI DA T, AMBIENTE
- CRAZING - SCORRIENTO

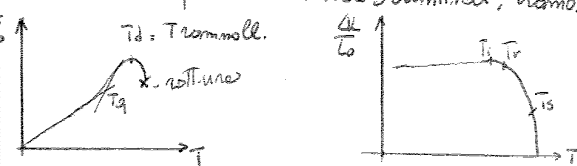


CARTELLO VETRINA  
70x100 cm

TERMOPLASTICI: duttili, rammolliscono a riscaldamento, elevate resistenza a temperatura e agenti chimici, ho temperatura di Transizione vetrosa (stato liquido, amaro gommoso, amaro vetroso, cristallino), comportamento fragile sotto  $T_g$ , duttili sopra  $T_g$ .

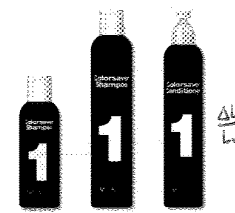
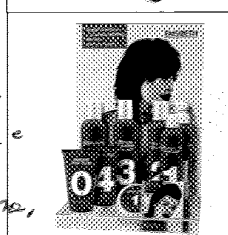
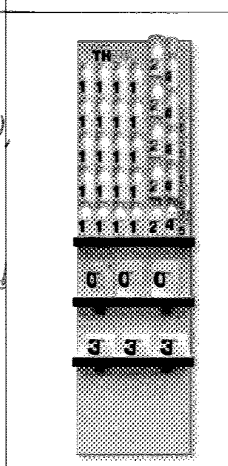
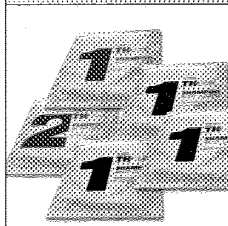
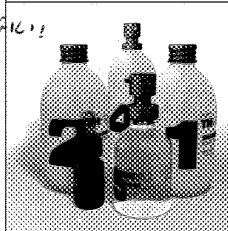
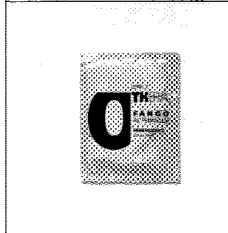
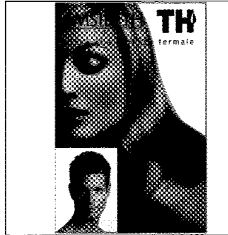
TERMOINDURENTI: duri, fragili, non rammolliscono ma si decompongono ad alte temp., hanno legami incrociati, elevate resistenza meccanica

- PASTA POROSA : cotto, cottoforte, tenaglie, Foeme e Moisliche
- PASTA COMPATTA: gres (impermeabile e alta resist. a ossidi), porcellane, klinker
- REFRATTARI: quono, silicio- alluminati, nemo. carbonati, ossido Mg, carbonio

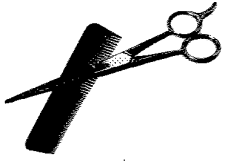


VETRO CELLULARE (FOAM GLASS) = struttura celle chiuse, incombustibile, resist. compr e proporzionale a densita', isolanti termico e acustico, carbonio si decompone in CO2 e produce pori.

LANA DI VETRO: (AEROGEL DI SILICE); bassissima densita', conducibilita' termica bassa,



HAIRMODE  
Network Acconciatori



PAGAMENTO

# EMSIBETH

C O S M E T I C S

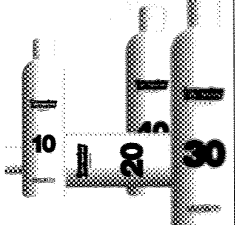
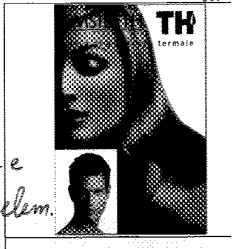
CLIENTE

DATA

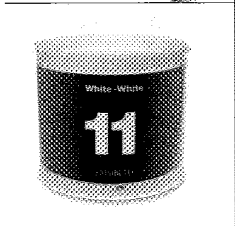
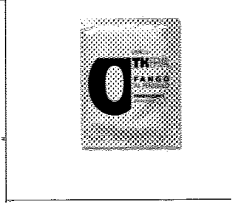
2 Tipi di processi rafforzamento = inacidimento e trattamento termico.  
 altre e composizioni con raccomandazione si indica anche stato metallurgico trattamento



**ALLUMINIO:** densità minore rispetto ad acciaio, proprietà meccaniche inferiori ad acciaio, costo elevato in quanto ci vuole molta energia per produrre legami alluminio ossigeno,  $T_{fus}(Al) < T_{fus}(Fe)$ , modulo elastico  $E_{Al} < E_{Fe}$ , elevata resistenza a corrosione atmosferica, conduttività elettrica e termica elevate, elevata duttilità, resistenza meccanica aumenta con aggiunta di elem. di lega o corrosione a freddo, inacidimento ottenuto per precipitazione:  $H_2Zn$



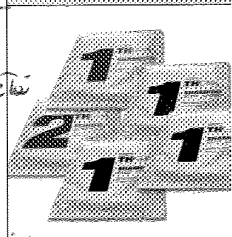
**RAME:** tenace, duttile, lavorato a freddo illimitatamente, resiste a corrosione atmosferica, marina e chimica. Proprietà meccaniche migliorabili tramite alligazione, non possono essere inacidite o rafforzate con trattamenti termici. Ottimi = Cu + Zn, Zn elemento alligante predominante, fase  $\beta$  stabile fino a 35% in pct di Zn, sono duttili, facilmente lavorabili a freddo, con % Zn più elevate ho formazione di fase  $\beta'$  quindi fase  $\beta + \beta'$  cumulate proprietà meccaniche e sono lavorabili e caldi.



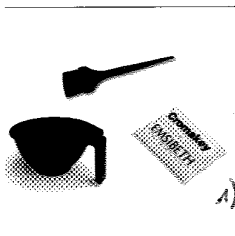
Bronzi = Cu + Al + Si + Ni + Sn maggiore resistenza meccanica e alla corrosione  
 Rame + Bismuto ottime proprietà elettriche, corrosione e usura, + costosi.



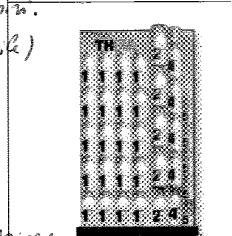
**CORROSIONE MET. METALLICI:** fenomeno elettrochimico è processo degradativo spontaneo e irreversibile (solo parziale reversibile) che porta alterazione delle proprietà fisiche, chimiche e meccaniche.



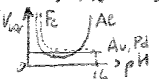
$O_2 \rightarrow$  corrosione con reattività base;  $H_2O \rightarrow$  catalizzatore azione corrosione  
 A SECCO O A CALDO



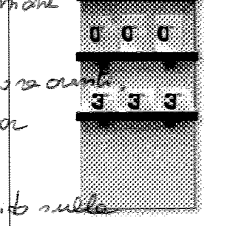
**AUMIDO**  
 Elementi aggressivi:  $Cl^-, SO_2, H_2S, HCl$  solo se vi è anche acqua senza polo ossigeno.  
 Corrosione uniforme (predita in mare elevata) o localizzata (predita in mare trascurabile)  
 predita in mare dipende da Temp., ambiente, materiale  $V_{corr} = \Delta m / S \cdot \Delta t$



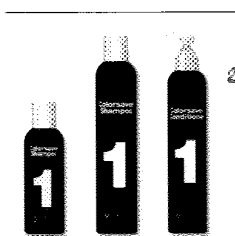
pH  $\rightarrow$  influenza reattività corrosione



1) **TEORIA POTENZIALE MISTO** = Teoria per spiegare fenomeni corrosivi, sup. materiale oggetto e due reazioni elettrochimiche all'anodo (ossidazione ferro) e al catodo (riduzione ossigeno in acqua o idrogeno) si ottiene  $Fe(OH)_2 \rightarrow Fe(OH)_3 \rightarrow Fe_2O_3 \cdot H_2O$  = ruggine  
 Il metallo Thole è stato termodinamicamente più stabile = l'anodo posto sup. protezione  
 Confronto potenziale standard di riduzione Fe con quello O e vedo che O ha maggior tendenza a ridursi mentre Fe a ossidarsi.



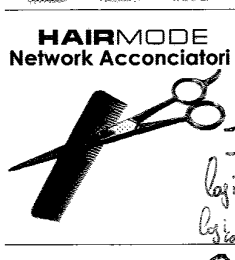
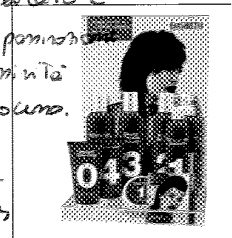
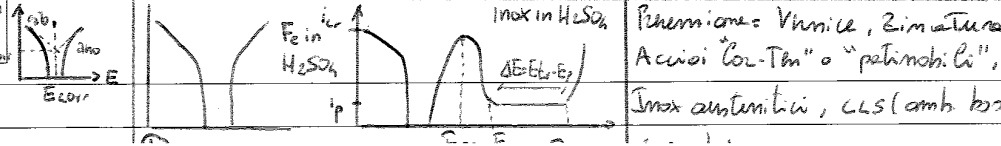
**PASSIVAZIONE:** fenomeno in cui gli ossidi di Ti, Al e Fe formano uno strato sottile di ossido sulla superficie del materiale che lo protegge dalla corrosione e riduce  $V_{corr}$ . (isolano da  $H_2O$  e  $O_2$ )  
 $(Fe + \%O_2 \rightarrow \%O)$  ottimizano con formazione film di protezione.



2) **PROVE CORROSIONE ACCELERATA** = polarizzo materiale applicando un potenziale al materiale, materiale oggetto a reazione catodica a cui corrisponde  $E_{rev,c}$  e una anodica  $E_{rev,a}$ .  
 (potenziale reversibile calcolabile con Nernst). da due reazioni, vengono a stessa reattività elettrolitica.  
 Se applico potenziale  $\rightarrow E_{corr}$  o forzando reazione anodica, intensità corrente è prop. a potenza.  
 Traccio una di polarizzazione = insieme di punti a cui posso determinare pot. applicato e corrente relativa (a), corrente corrosione può essere trasformata in  $V_{corr}$ .  
 (a) Esp: pt. di massima pendenza con i nitici, nitro in fase film protezione di nuova superficie ho  $E_p = pot. pendenza$  con i nitici, aumento E ma non ip,  $E_{tr-pot}$  Term-potenziale si rompe film riprende processo.

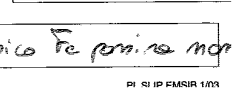


**PITING** - ATMOSFERE CORROSIVE ( $HCl + SO_2 + O_2 + H_2S$ )  
**CREVICE**



**HAIRMODE**  
 Network Acconciatori

PAGAMENTO





## Fabbricazione Acciai

- Ciclo integrale da minerali: Minerali di Fe, coke, fondenti → riduzione in altoforno → ghisa liquida → decarburazione mediante convertitore → acciaio liquido
- Ciclo da rottami: rottami di Fe → fusione in forno elettrico → acciaio liquido

1) Altoforno è un reattore verticale in continuo, si alimenta dal basso con minerali di ferro e dall'alto con coke riducente e fondenti come  $Fe_2O_3$ , grafite porosa e  $CaO$  usato per controllare alcune reazioni reomorfiche dovute alle impurezze del minerale. Il minerale si muove dall'alto in basso e il CO dal basso in alto. Durante discesa  $Fe_2O_3$  è progressivamente ridotto a ferro metallico per reazione con CO (che si ossida diventando  $CO_2$ ). Nella zona finale il ferro liquido entra in contatto con la grafite e si arricchisce di C. Dal fondo dell'altoforno si esce ghisa liquida con tenore di carbonio di circa 4%. Nel convertitore la ghisa liquida viene fatta reagire con un getto di ossigeno puro, C si ossida e il CO prodotto (gas) esce dal bagno metallico. Con opportune regolazioni si diminuisce il tenore di C, fino a ottenere acciaio liquido. Può anche essere ridotto il tenore di altri elementi indesiderati.

Acciaio liquido viene raccolto in un convertitore refrattario (siriaca). Durante i successivi trattamenti in siriaca è presente una scoria liquida composta da ossidi che galleggia sopra acciaio in modo da impedire la diretta reazione del metallo con ossigeno. In siriaca l'acciaio liquido viene sottoposto ad una serie di elaborazioni che possono prevedere:

- aggiunta elementi leganti;
  - eliminazione O, H, N;
  - eliminazione di elementi indesiderati come S, O mediante formazione solfuri e ossidi che compaiono le scorie.
- d'acciaio liquido viene colato in lingotti oppure in colate continue.

Nelle colate continue l'acciaio è solidificato in bramme di lunghezza indefinita, i difetti si concentrano nelle parti centrali, solidificate per ultime; dopo la colata l'acciaio è sottoposto a processo di deformazione a caldo, che ha il duplice scopo di produrre la sezione desiderata e ridurre le disomogeneità dovute alle colate.

Le inclusioni nei metalli possono essere:

- S e P provengono da coke e minerali, diminuiscono in quanto riducono tenore e producono inclusioni
- O, H, N provengono dall'aria, O può produrre inclusioni (ossidi) dovute e sviluppo di gas durante la solidificazione, H può rimanere sciolto nel reticolo cristallino e ridurre tenore.

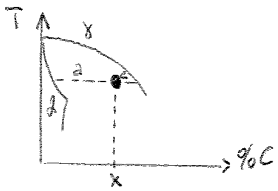
Geometria delle inclusioni non è modificata da trattamenti termici.

Trasformazioni di fase allo stato solido negli acciai

Fe presenta le forme cristallografiche: ferrite  $\alpha$  (912°C) CCC - austenite  $\gamma$  (912-1336°C) FCC - ferrite  $\delta$  (1336°C - 1538°C) CCC.  $\alpha$  e  $\delta$  sono isomorfe  
Fusione

- Diagramma di stato Fe-C, stabile in cui compare fase C (grafite) è rilevante per studio della solidificazione da liquido
- Diagramma di stato Fe-C, metastabile in cui compare fase Fe<sub>3</sub>C (cementite) è rilevante per lo studio delle trasformazioni allo stato solido.

Il diagramma di stato presenta in funzione di temperatura e frazione di carbonio delle regioni monofasiche, nelle quali è stabile una sola fase e delle regioni bifasiche nelle quali è stabile una miscela di due fasi (in queste regioni in ciascun punto le frazioni delle due fasi ed il contenuto di C di ciascuna di esse sono determinati e calcolabili con la regola della leva).



$$\left. \begin{aligned} f_{\alpha}(x-z) + f_{\gamma}(x+c) &= x \\ f_{\alpha} + f_{\gamma} &= 1 \end{aligned} \right\} f_{\alpha} = \frac{c}{z+c}; f_{\gamma} = \frac{z}{z+c}$$

Nel diagramma di stato si identificano punto eutettico (non presenti due fasi solide e una liquida) punto eutettoidico (presenza di due fasi solide derivanti da una fase solida  $x = \alpha + \gamma + z$ ) punto peritettico

1. Trasformazione dell'austenite in ferrite e cementite.

L'austenite è stabile finché  $T > 727^{\circ}\text{C}$ , a  $T = 727^{\circ}\text{C}$  l'austenite si trasforma interamente in ferrite e cementite, questa trasformazione richiede che il C sia distribuito in modo discreto tra ferrite e cementite. Si ottiene la perlite costituita da lamelle di ferrite e cementite alternate con regolarità. Questo processo solo sia per leghe eutettoidiche che leghe ipoeutettoidiche.

2. Trasformazione martensitica e bainitica

~~martensite~~ = se si aumenta velocità di raffreddamento la trasformazione peritettica è soppressa e sostituita dalle trasformazioni martensitica e bainitica che avvengono a T minori. Trasformazione austenite in ferrite, cementite o perlite si verifica senza che vi sia una relazione geometrica predefinita tra i reticoli delle fasi, non vi è regola che definisca le posizioni degli atomi nel reticolo (TRASFORM. RICOSTRUTTIVA).

martensite = trasformazione displaciativa (relazione geometrica tra atomi di una fase con quella successiva) in un reticolo FCC austenite è presente un ed suo interno una cella CCC, quindi mediante spostamento di piani cristallini è possibile ottenere un reticolo CCC con atomi di C elastici. Quindi reticolo martensite è FCC. La martensite presenta elevata quantità di difetti reticolari e dislocazioni. Da questa delle lamelle di martensite e estremamente veloce e si può considerare istantanea non può essere intesa ed inoltre tale trasformazione da austenite a martensite dipende solo da temperatura. da formazione inizia a Tmp Ms e finisce a MF (può essere minore di Tamb) da Ms diminuisce all'aumentare del tenore dei leganti.

Bainite = trasformazione displaciativa con relazione cristallografica tra reticolo austenite e ferrite, in cui atomi di C si spostano per diffusione sia all'interno, sia all'interfaccia tra nuova fase e austenite.  
 bainite superiore = formata a T alte, diffusività di C comporta migrazione di atomi di C fuori dalle unità di bainite.  
 bainite inferiore = una parte di C rimane all'interno delle unità e da luogo a precipitazione di cementite, dopo precipitazione, le unità sono di ferrite.

## Diagrammi TTT e CCT:

Curve Tempo/Temperatura/Trasformazione e Curve Raffreddamento Continuo/Trasformazione sono usate per descrivere la cinetica delle Trasformazioni di fase.

► TTT sono determinate così:

- Numerosi campioni di acciaio sono austenitizzati, riscaldandosi ad una stessa temperatura;
- ciascun campione è raffreddato con la massima rapidità possibile fino ad una data temp. e mantenuto a tale temperatura fino al completamento delle Trasformazioni di fase;
- per ciascun campione, si osserva lo svolgimento delle Trasformazioni di fase nel tempo, a temperatura costante, e si riportano in un piano Tempo/Tempo i punti corrispondenti a determinate % di Trasformazione;
- infine, si tracciano curve TTT interpolando i punti sperimentali e poi % Trasformata e tipo di Trasformazione.

Il diagramma TTT di un acciaio dipende dalla sua composizione e dalla dimensione del grano austenitico e dalla temperatura di austenizzazione.

► CCT sono ottenute osservando l'evoluzione delle Trasformazioni di fase durante una serie di esperimenti nei quali i campioni dopo essere stati austenitizzati, tutti allo stesso modo, sono raffreddati con diverse velocità di raffreddamento. Si tracciano quindi le curve CCT rappresentate in un piano Temperatura/Tempo (ciascun punto appartiene ad una curva di raffreddamento). Si osserva in ciascun esperimento di raffreddamento continuo diversi tipi di Trasformazioni successive.

Non è possibile ricavare le curve TTT dalle curve CCT o viceversa.

Nei diagrammi CCT si presentano elevate variabilità sperimentale, a cui contribuisce anche l'uso di diversi metodi di raffreddamento per realizzare diverse velocità.

Fratture duttile o fragile

fratture duttile nel caso in cui si effettua prova a trazione con carico quasi-statico e carico a 1D monoassiale, duttile e chl. plastica

fratture fragile nel caso in cui si effettua con carico impulsivo, carico 3D (mitiglio), Tmp. ambiente, avviene in campo elastico, rapida, tipica ceramica.

Questi tre fattori impediscono fratture plastiche in quanto

carico impulsivo -> non da tempo di sviluppo def. plastica

mitiglio -> produce una piccola regione che supera  $\sigma_y$  ma la sua def. plastica impedita da materiale circ.

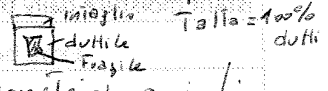
Tmp. ambiente -> fornisce movimento delle dislocazioni

Si vuole evitare fratture fragili perché rapide e su tutta la sezione.

Metodo di progetto -> si richiede un valore minimo di resistenza a fratture fragili.

Prova Charpy: usata più solitamente energia di impatto, si produce mitiglio nel provino e si solida meglio avvolge del pendolo che equivale all'energia assorbita nell'into.

Prodotta la frattura si individuano sulla superficie della frattura una zona duttile (opaca) e una zona fragile (lucida) e si fa calcolo  $A_{duttile} / A_{totale} = \% \text{ zona duttile}$



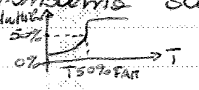
Da questa prova non è possibile ricavare un parametro indipendente dalla geometria quindi:

- si presume una resistenza minima e si calcola a momento
- la misura di assib. su come confronto tra i diversi metalli.

Funzione della prova è determinare se il materiale mostra una transizione duttile-fragile al diminuire della temperatura. (transizione legata a Temp. e l'energia impatto assorbita)

da determinazione della Temp. Transizione avviene tramite:

- criterio 50% FAT => Tmp. ambiente in corrispondenza della quale si ha 50% fr. duttile e
- criterio  $KV / T_{mp. ambiente}$  50% fr. fragile



FAT = Temp. Trans. al 50% di apertura della frattura

Fattori che influenzano Resistenza (KV) e Tmp. Transizione sono:

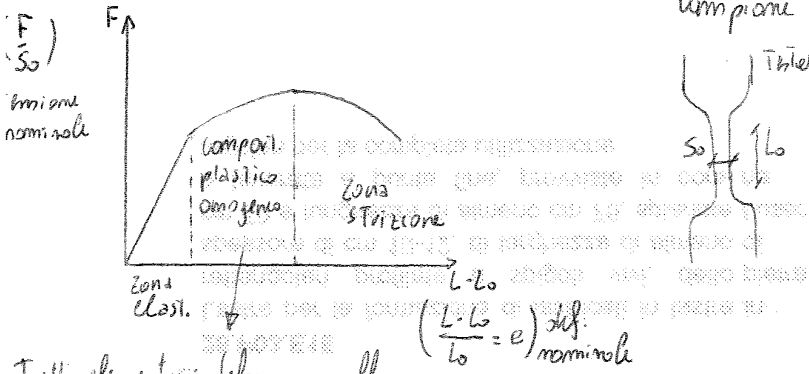
- diminuzione del grano: più fine o più T.T.R. è bene
- struttura cristallina: FCC non hanno T.T.R. CCC hanno T.T.R.
- composizione chimica

Se T.T.R. bene ho KV alto e quindi migliore duttilità

Mecanismi di frattura microscopici

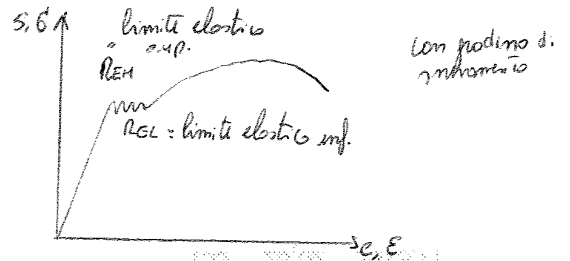
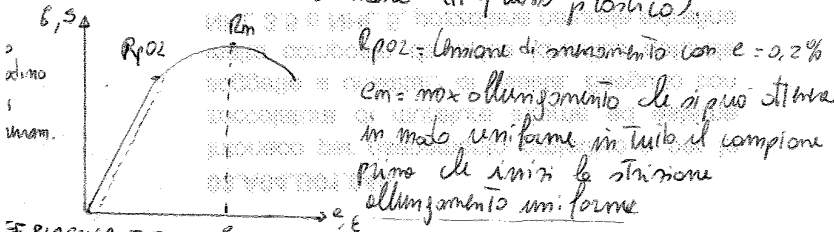
- dislocazione (fr. H. Transgranulare } fragile
- fratture intergranulare
- nucleazione e crescita } duttile
- miste

# Prova di Trazione



Tutti elementi si deformano allo stesso modo che regola di conservazione volume; campione si allunga e assottiglia  $L_1 L_1 S_1 = S_0$

Zona strizione = campione inizia a presentarsi un collo locale dove sezione si riduce molto rispetto a sezione precedente: + la sezione si riduce, + la tensione agente aumenta  $\Rightarrow$  usi avviene più in fretta sul materiale. la riduzione di area è + che compensa dell'aumento della resist. meccanica x effetto dell'aumento della tensione di flusso plastica.



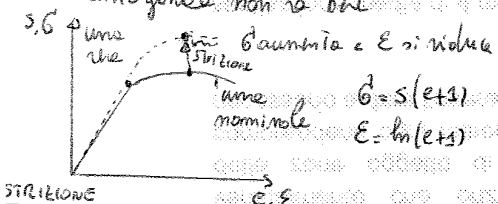
**EF PLASTICA E TENS. Cm**  
 tensione ingegneristica (nominale) =  $\frac{F}{S_0} = \sigma$   
 tensione vera =  $\frac{F}{S} = \sigma'$   
 strizione istantanea

DEF. PLASTICA il volume si conserva  $\Rightarrow L_0 S_0 = L S = \Rightarrow \sigma' = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} \frac{S_0}{S} = \sigma \frac{L_0}{L} = \sigma (1 - e)$   
 $\sigma' = \sigma (1 - e)$   
 tensione vera = tensione ing. (def. nominale + 1)

**EF. VERA**  
 def. vera  $\epsilon$ : allungamento che ha funzione delle lunghezze istantanee  
 $d\epsilon = \frac{dL}{L}$  (m.d. def. istant.)  
 $\epsilon = \int_0^L \frac{dL}{L} = \ln(\frac{L_1}{L_0})$

tensione vera = tensione ing. (def. nominale + 1)  
 L di compressione  $e < 0$ , in. aumento  
 $\epsilon = \ln(1+e)$  detta def. logaritmica è una def. cumulata del campione, minore di quella nominale  
 $e = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \Rightarrow e + 1 = \frac{L_1 + L_0}{L_0} = \frac{L_1}{L_0}$

Si può ricavare la curva vera in un tratto di diagramma istantaneo omogeneo non va bene



$F = \sigma' S$   
 $dF = d\sigma' S + \sigma' dS = 0$   
 $\Rightarrow$  aumento sezione  
 diminuzione

- Nel tratto elastico non c'è influenza tra curva vera e curva ingegneristica
- limite elastico = limite di snervamento x metallo

$\sigma' S d\sigma' > \sigma' dS \Rightarrow$  deformazione omogenea (se snervamento prevale sulla riduzione sezione, in ripetitivo punto di si è deformato più degli altri non può deformarsi ulteriormente: infatti viene strita forza totale ma la sua resistenza è maggiore. Lo finiscono da tutto il provino non abbia raggiunto lo stesso livello di def. locale. Se prevale la riduzione di sezione in un punto più deformato offre una resistenza locale minore. Si deforma ulteriormente ma il resto del campione rimane indeformato. ( $dF < 0$ )  $e = e_{OMOGENA} + e_{STRIZIONE}$

A allungamento finché a rottura (si usano colori prima prova o dopo prova) =  $\frac{L_{rottura}}{L_{originale}} - 1$   
 $\epsilon$  riduzione area dopo rottura (si rapporta lo a quello originale) =  $\frac{area_{rottura}}{area_{originale}} - 1$   
 $E$  modulo elastico  $70 GPa$  Al  
 $150 GPa$  leghe Al

## **DUREZZA**

E' la resistenza che la superficie oppone alla scalfitura (Scala di Mohs), all'abrasione e alla deformazione plastica per compressione. Si misura creando un'impronta sulla superficie del materiale mediante un carico statico di compressione tenuto costante per un certo tempo, quindi misura la resistenza ad una deformazione permanente. I metodi mediante i quali si determina durezza sono basati sulla valutazione delle dimensioni dell'impronta lasciata o della profondità di penetrazione della punta e sono tre:

- BRINELL
- VICKERS
- ROCKWELL

### **1.Brinell**

Utilizza un penetratore a forma sferica con diametro 10mm sulla quale viene applicata una forza F (varia da 500-3000kg). Il numero di durezza è funzione sia del carico F che del diametro della sfera  $HBW = F/Scalotta$ . Si possono anche usare modelli per descrivere la deformazione elastica e plastica dai quali si ottiene  $HBW=3\sigma$  ( $\sigma$  = tensione di scorrimento plastico).

### **2.Vickers**

Utilizza un penetratore di diamante a geometria piramidale sulla quale si applica un forza F (che varia da 0,1-100kg)  $HV = F/Spiramide$ . Inizialmente si carica poco in modo da preparare la superficie e poi si aumenta il carico, l'impronta viene osservata al microscopio ottico e misurata.

### **3.Rockwell**

si realizza con penetratori di forma o conica con punta sferica (realizzati in diamante) oppure sferica (realizzati in carburo di tungsteno). Essa avviene secondo più stadi successivi di carico. La durezza è determinata in base alla deformazione elasto-plastica del materiale in esame.

La procedura consiste nel collocare il penetratore sulla superficie del pezzo di cui misurare la durezza, applicando una forza iniziale (precarico)  $F_0=10$  kg e quindi applicando una forza addizionale  $F_1$  ( $F_0+F_1 = 150$ kg) per un intervallo di tempo definito. Quando il penetratore raggiunge la penetrazione massima si rimuove la forza addizionale lasciando il precarico che agisce ancora sul pezzo. La misura della profondità raggiunta è correlata con la misura di durezza. I parametri sono o HRB o HRC.

Più i grani sono piccoli e più il termine  $\sigma_y$  è grande.

**AFFINAMENTO DEL GRANO:** Le strutture deformate a freddo (incrudite) possono ritornare allo stato antecedente alla lavorazione mediante un opportuno trattamento termico. Il recupero è il risultato di due differenti processi:

- Recovery = riorganizzazione delle dislocazioni e diminuzione del loro numero
- Ricristallizzazione = formazione di una nuova configurazione di grani non deformati con bassa densità di dislocazioni simili a quelli antecedenti alla deformazione a freddo (prima def. a freddo e poi riscaldamento facendo variare T e regolando la dimensione dei grani).

Siccome i grani ottenuti per ricristallizzazione sono simili a quelli antecedenti all'incrudimento ad essa è associata una diminuzione della resistenza a trazione e un aumento della duttilità del materiale.

Questo metodo non fa variare molto la capacità di deformazione del materiale.

### 3. Soluzioni solide

Formare soluzioni solide sostituzionali o interstiziali con l'aggiunta di atomi estranei aumenta la resistenza e la durezza dei metalli. I metalli ad elevata purezza solitamente sono più teneri e meno resistenti delle leghe. Gli atomi estranei inducono stati tensionali sul reticolo degli atomi ospitanti che li circondano. Ne consegue un'interazione tra questo campo di sollecitazioni prodotto da distorsioni reticolari e il campo associato alle dislocazioni che porta ad un limitato movimento delle dislocazioni stesse.

Un atomo di impurezza più piccolo dell'atomo ospite produce una sollecitazione a trazione nel reticolo cristallino circostante. Un atomo sostituzionale più grande provoca una sollecitazione a compressione nelle sue vicinanze. Questi atomi di impurezza tenderanno a disporsi intorno alle dislocazioni in modo da ridurre l'energia di deformazione globale, in modo da eliminare parte della deformazione del reticolo intorno alla dislocazione.

Rafforzamento per interstiziale è più forte di quello costituzionale poiché ha campo di tensioni più elevati.

Un gruppo di atomi interstiziali collocati attorno ad una dislocazione è chiamata "ATMOSFERA DI COTTRELL", ci vuole una notevole forza per separare le dislocazioni, questo fenomeno si verifica in molte dislocazioni e grani e produce i punti di massimo e minimo di snervamento nella curva sforzo-deformazione. Quando l'azione ancorante delle atmosfere di Cottrell sulle dislocazioni non avviene più vi è la formazione sulla superficie del metallo delle cosiddette "BANDE DI LAUDERS" (zone con differenti sforzi di plasticizzazione).

### 4. Precipitazione o Seconda Fase

I precipitati rendono più difficile il movimento delle dislocazioni, le proprietà dei precipitati devono essere:

- Duri *particelle di seconda fase (più grandi di un atomo)*
- Discontinui
- Piccoli
- Molto numerosi (in modo che le discontinuità con più probabilità li possano incontrare)
- Rotondi (non appuntiti)

## Saldatura

processo che nel quale una porzione limitata di un componente è fusa e indurita  
mediante apporto di calore e ulteriore metallo (simile ma non uguale e metallo <sup>base</sup> ~~strutturale~~)  
fusione = riduzione giunzioni tra due componenti

Dal punto di vista metallurgico si distinguono 3 zone allontanandosi dalla zona salda: - zona fusa e solidificata, zona ZTA metallo non fuso ma è stato soggetto a trasformazioni permanenti o stato solido, metallo originario inalterato

proprietà meccaniche sono determinate da microstruttura e dalle tensioni prodotte durante ciclo termico  
virtuali difetti di solidificazione e rientrate ossidazione di idrogeno (aria). Delle componenti di tensioni residue, presenza idrogeno e microstrutture sensibili possono competere fenomeni di rottura dopo la saldatura, le rotture si classificano in:

- rottura a caldo → contrazione volumica durante solidificazione
- microfratture ZTA → tensioni termiche e di trasform. di fase durante solid.
- rottura a freddo → idrogeno, tensioni residue e microstrutture fragili

Per ripristinare microstrutt. ottimali di acciaio si ricorre a ~~rinverdi~~ ricottura o bonifica

A distanza crescente da ZTA si individuano tre regioni:

- reg. austenitizzata o alta T
- " " " " " zone T
- " parziale austenitizzata
- " non austenitizzata
- " inalterata

Regione austenitizzata è quella più critica in quanto durante raffredd. si formano costituenti fragili  
poiché non appena termina apporto di calore può esser soggetto a raffreddamento sufficientemente  
rapido da produrre fasi di martensite e bainite inferiori. da regione austenitizzata proviene  
maggiore danno ma tenacità minore rispetto a microstruttura originaria.

Saldabilità acciaio (probabilità di formare martensite nella ZTA) è funzione da parametro compositivo  
vale carbonio equivalente  $C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$

saldabile →  $C_{eq} < 0,25$

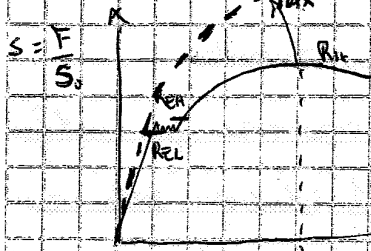
non saldabili →  $C_{eq} > 0,5$



11-03-2013

chi la strizione non si innesca subito? perché c'è un fenomeno di incrudimento durante  
 quale il materiale aumenta le proprietà meccaniche

una convenzione che si utilizza per i valori delle grandezze nei fogli elettronici per materiali



mass allungamento che si produce uniformemente in tutte le parti del  
 campione prima che si possa osservare la strizione

una convenzione con cui si indica il punto di massima elongazione: deformazione impropria  $\frac{F}{S_0} = s$

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

però occorre che il volume si conservi durante la deformazione plastica

$$L_0 S_0 = L S$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{S_0} \frac{S_0}{S} = s \frac{L}{L_0} = s \left( \frac{L}{L_0} - 1 + 1 \right)$$

deformazione impropria

$$\sigma = s(2 + 1)$$

energia vera è sempre un po' più alta di quella impropria se la curva è di  
 tipo...

è presente è la deformazione vera durante l'allungamento la lunghezza del campione  
 resta per cui l'allungamento ulteriore è una percentuale della lunghezza attuale

vero  $d\varepsilon = \frac{dl}{l}$

però la deformazione totale faccio l'integrale

$$\int d\varepsilon = \int \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

la def di deformazione vera sotto deformazione logaritmica o deformazione vera ed è  
 più minore delle deformazioni improprie

inizio della prova quando la def impropria è zero anche quella vera è zero  
 deformazione vera risulta essere sempre un po' meno delle deformazioni improprie  
 il max si trova la curva vera --- con il punto di max un po' più a

### Struttura cristallina metalli

CFC: cella unitaria cubica con atomi disposti nei vertici del cubo e al centro di ciascuna faccia. (Cu, Al) n° atomi appartenenti CFC = 4, struttura con numero

di coordinazione e il fattore di compattazione, il primo è il no di atomi vicini ad uno isolato, = 12; FCA = frazione di volume occupato dagli atomi rispetto al volume = 0,74

CCC = cella unitaria cubica con un atomo centrale e altri 8 posizionati ai vertici. Contiene 2 atomi, n° coordinazione 8, fattore compattazione 0,68.

ESC = esagonale compatto sei atomi con uno centrale sulle due facce e piombo intermedio con 3 atomi, contiene 6 atomi, n° coordinazione 12, FCA = 0,74

### Piombi cristallografici

Orientamenti dei piombi appartenenti ad una struttura cristallina sono rappresentati con sistema di coordinate a 3 assi riferiti a cella unitaria. Piombi sono specificati Tramite indici di Miller (h, k, l). In alle esagonali si usa indici di Miller-Bravais a quattro indici (h, k, l, i)

### Difetti:

> **Puntuali** = si riconosce (posto mancante di un atomo) la sua presenza rende più instabile il sistema  
't2 = doppio difetto impossibile anche materiali se sono volume  
FETTO DI FRENKEL

2° **autointerstiziale** (atomo che si trova ripulato in un sito interstiziale, ovvero piccolo spazio vuoto che di solito non viene occupato) introduce una distorsione che si propaga nel reticolo, esiste in concentrazioni molto piccole.

> **Impurezza nei solidi:** puntuali  
3° **substituzionale** (atomi di impurezza rimpiazzano o sostituiscono atomi ospitanti)  
fattori che influenzano: fattore dimensione atomica, struttura cristallina ultracompatte, regola HUGHES-ROBERTS LAWS  
4° **interstiziale** (atomi di impurezza rimpiazzano i vuoti o interstizi presenti tra atomi ospitanti) dimensioni più piccole di atomi ospitanti

> **Dimensioni** 5° **dislocazione** (porzione di un piano aggiuntivo di atomi i cui spigoli terminano entro cristallo e spigoli; difetto lineare centrato intorno ad una linea (prossimo di un piano cristallografico in piano in modo rispetto a reticolo perfetto) gli atomi sopra una dislocazione sono compressi sotto sono tesi. - e vice versa: regione superiore anteriore del cristallo è compressa di una distanza interatomica rispetto a porzione superiore, ovunque lungo una dislocazione da maggior parte sono miste.

d'ampiezza e la direzione della distorsione del reticolo coincide con una dislocazione è bene da rettile di Burgers (ottenuto tramite circuitazione di Burgers)