



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 588

DATA: 17/07/2013

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

STUDENTE: Piccione

MATERIA: Tecnologia dei Materiali da Costruzione

Prof. Actis Grande

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

## PROPRIETÀ DEI MATERIALI

PROPRIETÀ MECCANICHE = risposta alle sollecitazioni di qualsiasi tipo

PROPRIETÀ TERMICHE = collegate alla trasmissione del calore e alla capacità termica, utili da conoscere ad esempio in occasione di un incendio

PROPRIETÀ ELETTRICHE E MAGNETICHE = risposta ai campi elettromagnetici, conducibilità elettrica,

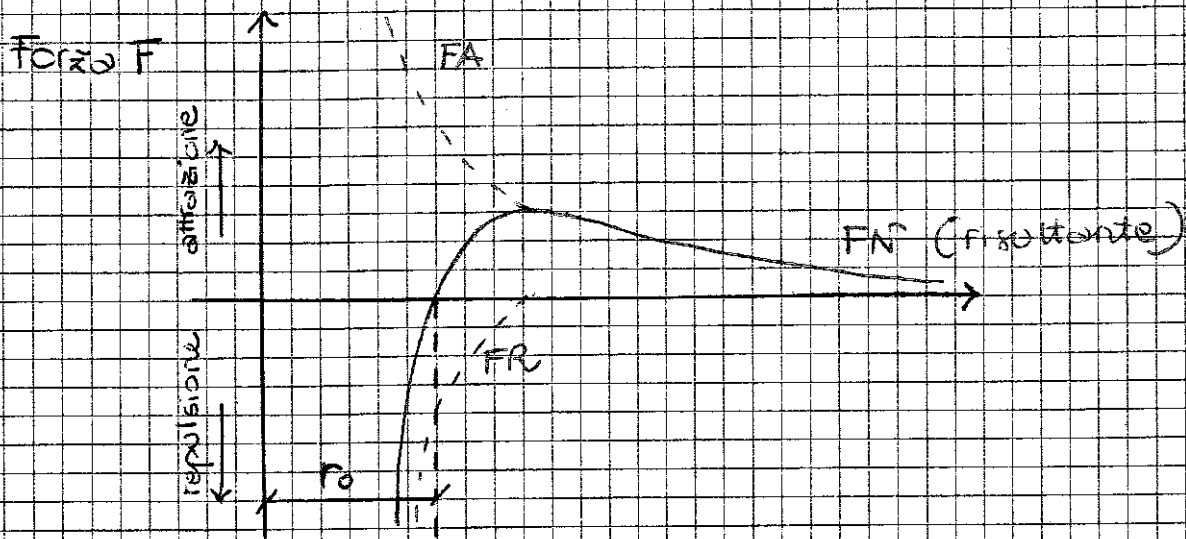
PROPRIETÀ OTICHE = assorbimento, trasmissione e diffrazione della luce → giocano un ruolo fondamentale per i polimeri ed i ceramici più che per i metalli.

PROPRIETÀ CHIMICHE

distanza infinita l'uno dall'altro.

A distanza  $r_0$ , detta distanza di equilibrio

$F_A = F_R \rightarrow$  la risultante è nulla.



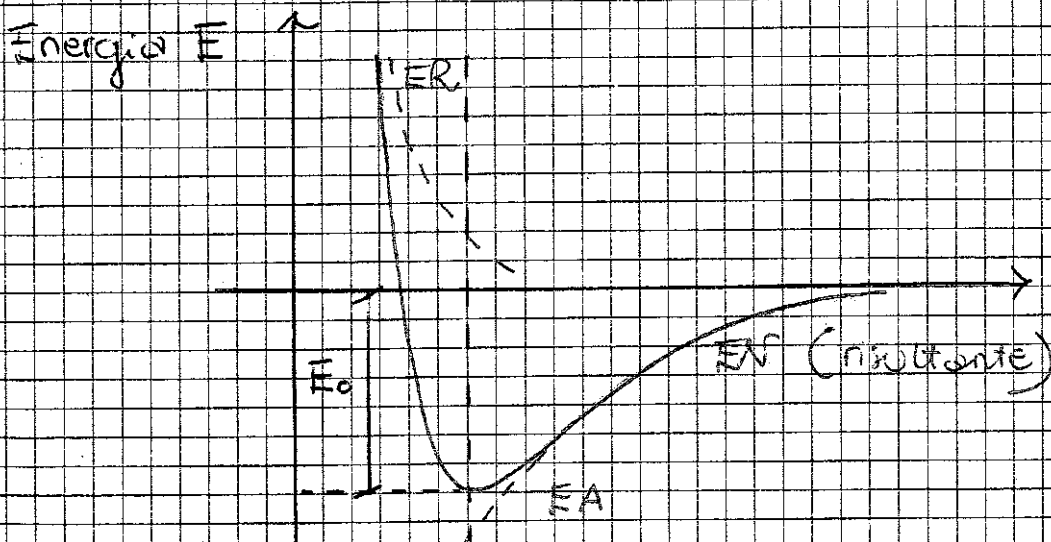
La pendenza del primo tratto della curva è diversa a seconda del materiale e fornisce un'indicazione del modulo elastico

### CURVA DELL'ENERGIA NETTA (di CONDON-MORSE)

Nasce dallo studio effettuato in precedenza delle forze fra due atomi

$$E = \int F dr \quad \text{energia potenziale fra 2 atomi}$$

Tale curva mostra l'energia totale di un sistema di due atomi in funzione della distanza interatomica



La rigidità dunque è massima per i materiali ceramici e minima per quelli polimerici

## LEGAMI CHIMICI

Il legame chimico influenza le macroproprietà dei materiali, come: temperatura di fusione, dilatazione termica, conduttività termica ed elettrica, rigidità, resistenza a rottura e duttilità.

Energia di legame = energia da fornire per portare due atomi a distanza infinita → caratterizza il tipo di legame

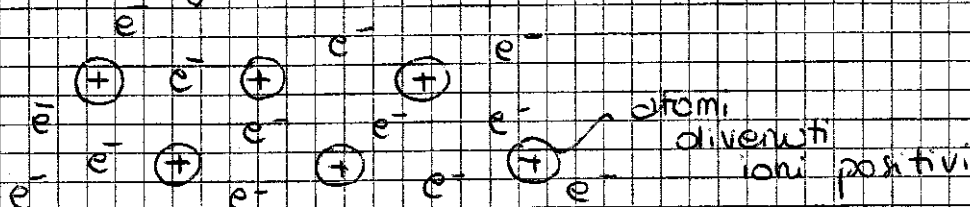
### FORTI

- LEGAME IONICO
- LEGAME COVALENTE =  
condivisione di uno o più coppie di elettroni fra due atomi → la coppia condivisa unisce gli atomi in una direzione ben precisa → legame direzionale
- LEGAME METALLICO =  
elettroni di valenza mesh in compartecipazione → gli elettroni sono liberi di muoversi → legame adirezionale

### DEBOLI

Legami di tipo fisico

- LEGAME VAN DER WAALS =  
creazione di dipoli temporanei
- LEGAME IDROGENICO =  
creazione di dipoli permanenti



7 materiali Ceramici sono in genere cristallini e vengono prodotti per sinterizzazione e non per fusione poiché hanno un punto di fusione molto elevato.

## 2b. VETRI

Sono ceramici allo stato amorfo e vengono prodotti per fusione, poiché l'aggiunta di ossidi ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , ...) abbassa il punto di fusione.

7 vetri non conducono calore né elettricità.

## 3. POLIMERI

Sono materiali organici: alla base ci sono serie di lunghe catene di carbonio. Il legame secondario è debole e conferisce loro bassissima rigidità, bassa resistenza a rottura, bassa  $T$  di fusione e alta dilatazione termica. La presenza di elettroni non liberi li rende i migliori isolanti termici ed elettrici.

7 polimeri presentano basse densità e molte proprietà diverse a seconda che siano:

- termoplastici (polietilene, PVC, ...)
- termindurenti (resine)
- elastomeri (gomme)

## 4. COMPOSITI

Sono composti da una matrice (elemento con continuità tridimensionale all'interno del composito) e da un rinforzo che modifica le proprietà del materiale esaltandone almeno

La struttura cristallina è caratterizzata dunque da ordine a lungo raggio; la cella unitaria è la più piccola unità che si ripete ordinatamente nello spazio.

Diverse possibili celle a seconda di vari parametri:

$a, b, c$  = parametri di cella ( $x, y, z$ )

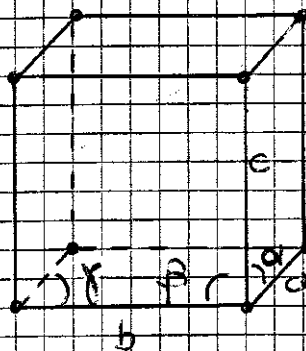
$\alpha, \beta, \gamma$  = angoli di cella

La grandezza delle celle è funzione di:

- tipo di legame
- tipo di materiale
- condizioni esterne, soprattutto la  $T$  ( $T$  è energia, vedi le curve di Condon-Morse)  $\rightarrow$  col crescere di  $T$  si ha una variazione delle distanze interatomiche
- zero termico ( $0$  Kelvin, condizioni di energia minima)  $\rightarrow$  atomi nelle posizioni di equilibrio  $\rightarrow$  aumentando la  $T$  gli atomi oscillano intorno alle posizioni di equilibrio provocando la dilatazione del materiale.

Visualizzazioni della struttura cristallina:

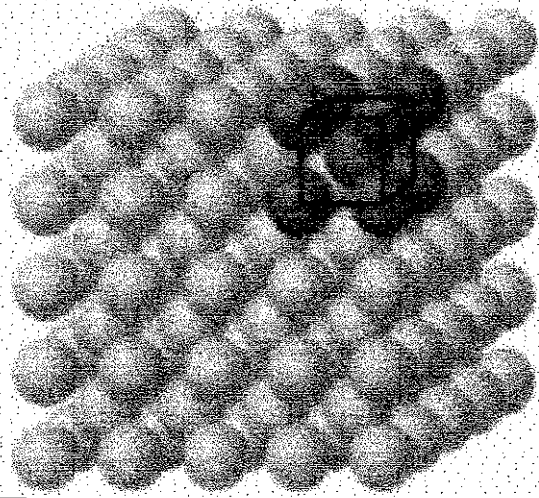
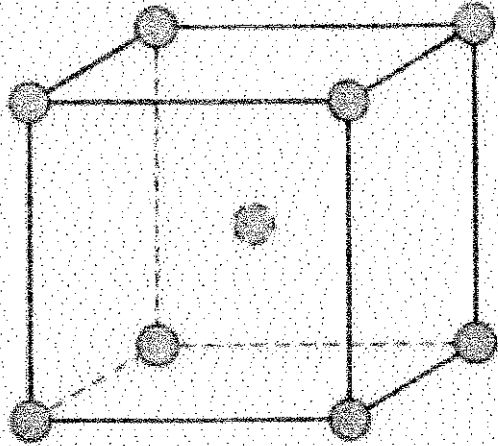
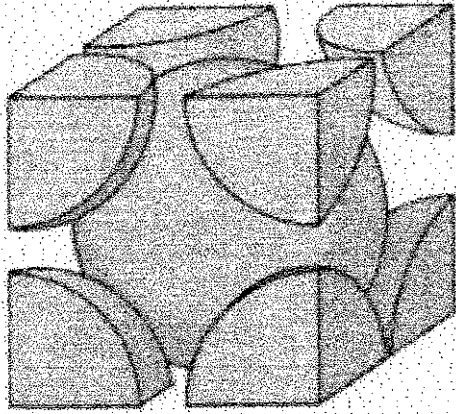
- atomi come sfere rigide, il diametro è la distanza minima fra gli atomi
- reticolo (griglia bidimensionale)  $\rightarrow$  i punti di intersezione fra le linee (spigoli) sono i centri degli atomi



a loro dipendenza di cella in funzione di  $a, b, c$  e  $\alpha, \beta, \gamma$  (cubica, tetragonale, rombica, esagonale, ...)

## 2) CUBICA A CORPO CENTRATO (Cr, Mo)

Cella unitaria cubica con atomo centrale e atomi ai vertici del cubo



Numero atomi per cella = 2

Numero di coordinazione = 8

FIA = 0,68 (32% vuoto)



**PIANI CRISTALLOGRAFICI** = convenzione di definire il comportamento di un materiale in funzione ad esempio di una certa sollecitazione  $\rightarrow$  piani con maggiore o minore densità  $\rightarrow$  deformazione più o meno grande

**SOLIDI MONOCRISTALLINI** = ripetizione di atomi per tutto il solido senza interruzioni; poco frequenti

**SOLIDI POLICRISTALLINI** = aggregati di piccoli cristalli; celle che crescono orientate in direzioni diverse. Confini fra grani  $\rightarrow$  bordi di grano (zona disordinata)

## • STRUTTURA CRISTALLINA DEI CERAMICI

Y Ceramici sono formati da almeno due elementi, quindi le strutture sono in genere più complesse

Il legame è ionico / covalente  $\rightarrow$  % legame ionico, % legame covalente

n. cationi = n. anioni  $\rightarrow$  il cristallo deve essere complessivamente neutro

Tipi di strutture: AX,  $A_m X_p$ ,  $A_m B_n X_p$

## • STRUTTURA DEI POLIMERI

Se unità fondamentali sono le molecole componenti  $\rightarrow$  disposizioni atomiche più complesse

la cristallinità è in genere solo parziale  $\rightarrow$  grado di cristallinità =  $\phi$  = 95%

Velocità di raffreddamento lenta e monomeri con strutture semplici favoriscono la cristallinità

Fattori che favoriscono la solubilità:

- diametro degli atomi diverso di non più del  $\pm 15\%$  (dimensioni simili)
- strutture cristalline uguali
- no differenze apprezzabili di elettronegatività
- stessa valenza dei due elementi

Sostituzione con un atomo più grande  $\rightarrow$  tensione di compressione.

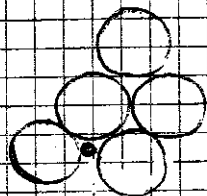
Sostituzione con un atomo più piccolo  $\rightarrow$  tensione di trazione.

$\rightarrow$  si generano deformazioni del reticolo e si modificano le caratteristiche locali

- soluzioni interstiziali  $\rightarrow$  atomi molto più piccoli che si inseriscono negli spazi fra gli atomi del materiale originale

\*

$r_2 < r_1$   
 $\frac{r_2}{r_1}$



Massima concentrazione possibile di atomi interstiziali  $< 10\%$

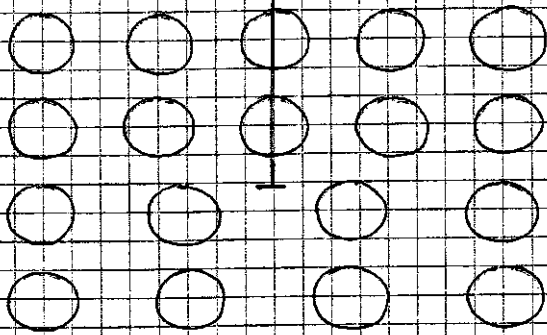
ES Carbonio nel Ferro  $\gamma$  (CFC)  $\rightarrow$  stabile fra  $912 - 1394$  °C

raggio atomico Fe =  $1,29 \text{ \AA}$   
raggio atomico C =  $0,75 \text{ \AA}$  } differenza del  $42\%$

Il ferro può contenere in tali condizioni il  $2,08\%$  di carbonio  $\rightarrow$  max quantità possibile di C nell'acciaio

- Dislocazioni a spigolo  $\rightarrow$  piano aggiuntivo di atomi ai spigoli terminano entro il cristallo

L indica il verso in cui è presente la dislocazione. La parte che la ospita è soggetta a tensione di compressione, la parte inferiore a trazione.



Applicando una sollecitazione al sistema, la dislocazione si muove: i legami di una fila si rompono e si riformano con quella vicina  $\rightarrow$  al bordo esterno si genera uno scalino (bordo grano).

La dislocazione permette di rompere un legame per volta invece che tutti contemporaneamente: essa è condizione necessaria ma non sufficiente perché si abbia la duttilità. Oltre alla sua presenza, infatti, è anche necessario che si muova.

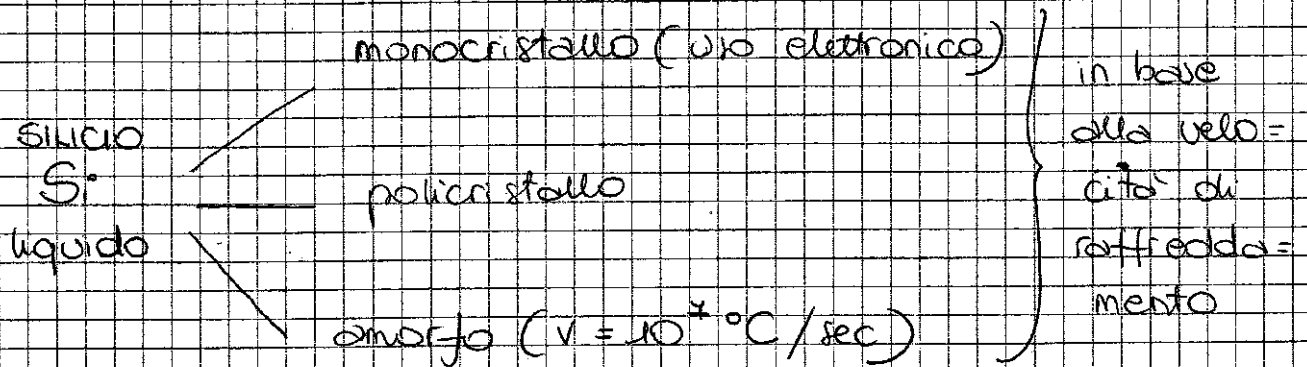
Una dimensione grande dei grani (più spazio fra i bordi di grano) permette una mobilità delle dislocazioni maggiore, e quindi una maggiore deformabilità.

Vettore di Burgers = vettore perpendicolare al piano della dislocazione, che evidenzia la chiusura di un circuito realizzato in prossimità di una dislocazione.

## Microscopia

Microscopia ottica:

1. Preparazione superficie: levigatura + lucidatura di specchio → superficie completamente riflettente
  2. Attacco metallografico → soluzione acida preparata in base al materiale da osservare → si formano dei solchi lungo i bordi di grano poiché sono le zone più reattive
- ⇒ osservazione dei grani



## STRUTTURA AMORFA

Elevata energia → sistema non stabile → tendenza ad evolvere verso un sistema stabile (cristallino) ovvero con energia minima.  
 La struttura amorfa è ottenuta raffreddando il fuso a velocità molto elevate

viscosità = resistenza allo scorrimento laminare in risposta ad una sollecitazione // alla superficie.

②

Per i materiali cristallini è associata al moto delle dislocazioni; per i materiali non cristallini consiste in fenomeni di scorrimento

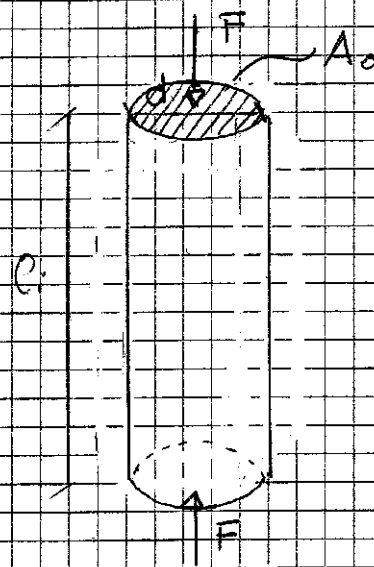
# PROPRIETÀ MECCANICHE

Risposta del materiale ad una sollecitazione derivante dall'applicazione di forze.

Test meccanica con procedure fisse e normative → ASTM (American Society for Testing and Materials)

## • PROVA DI COMPRESSIONE

Sollecitazione di compressione uniaxiale



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

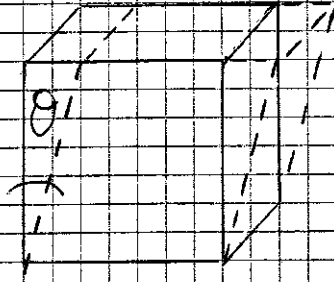
$$\epsilon = \frac{e_i - e_0}{e_0} = \frac{\Delta e}{e_0} < \varphi$$

La prova viene condotta a velocità  $\dot{\epsilon}$  costante.  
 I provini possono essere cubici o cilindrici, questi ultimi sono caratterizzati dal rapporto  $h/d$  in modo da evitare la flessione del campione che avviene se  $d \ll h$ .

Occorre evitare l'attrito fra le piastre e le basi del provino che può causare sollecitazioni di taglio (barrelling)



• PROVA DI TAGLIO E TORSIONE



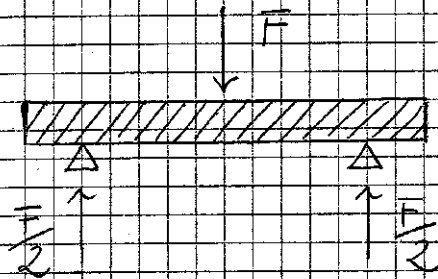
$$\gamma = \frac{F}{A_0}$$

$$\gamma = \frac{\varphi}{h} = \operatorname{tg} \varphi$$

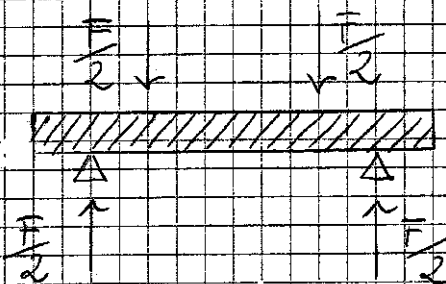
• PROVA DI FLESSIONE

γ provini sono a forma di parallelepipedo

Flessione su 3 punti:



Flessione su 4 punti:



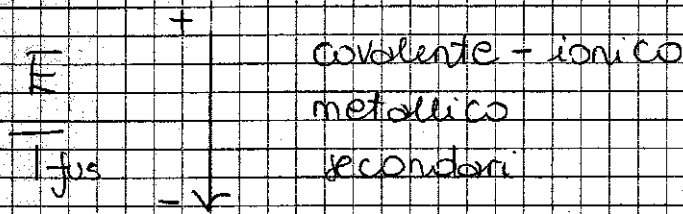
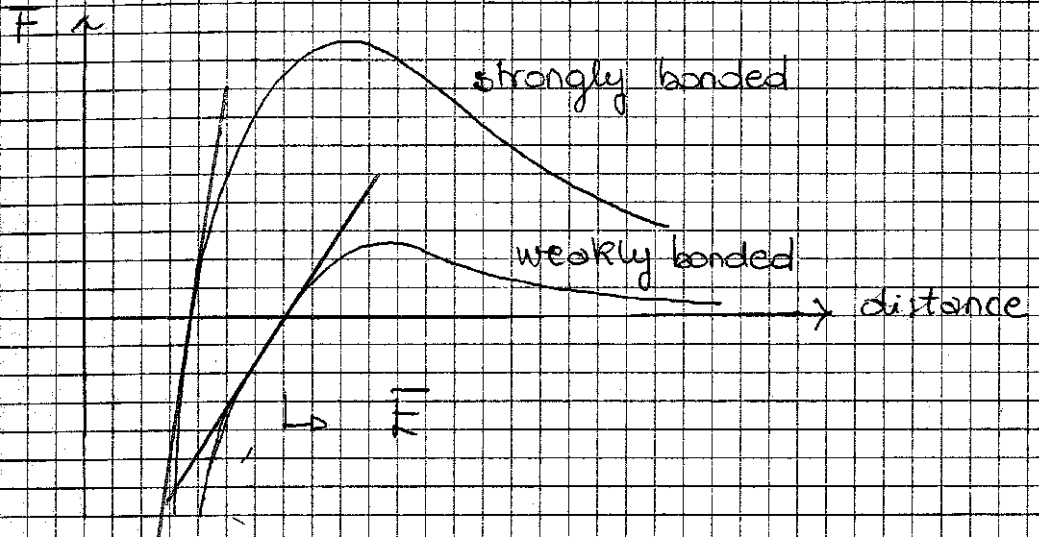
$$\sigma = \frac{Mx}{I}$$

x = distanza dal centro del provino alle fibre più esterne

x, I variano in fnz della sezione del provino (circolare o rettangolare)

Per alcuni materiali (els, molti polimeri) il tratto elastico non è lineare  $\rightarrow$  linearizzato  
 $\rightarrow$  modulo tangente / modulo secante

$E$  dà una misura della resistenza opposta alla separazione di due atomi



Il modulo elastico decresce con la temperatura (maggiore energia  $\rightarrow$  maggiore propensione a variare la propria condizione)  $\rightarrow$  maggiori deformazioni plastiche

### COEFFICIENTE DI POISSON

Ipotesi:

- sforzo interamente uniaxiale lungo  $x$
- materiale totalmente isotropo

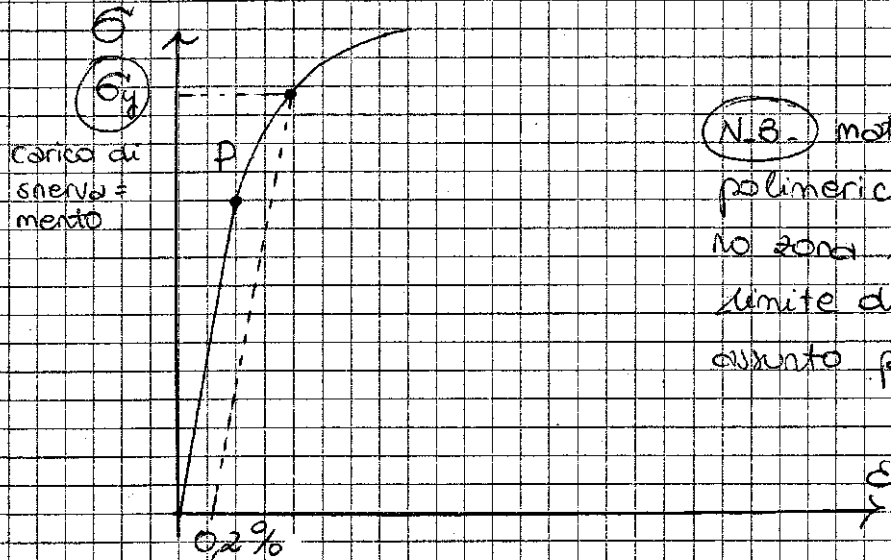
Le deformazioni lungo  $x$  ed  $y$  sono uguali e sono opposte a quella longitudinale

## PUNTO DI SNERVAMENTO

Transizione fra comportamento elastico e comportamento plastico.

Comportamenti diversi degli acciai:

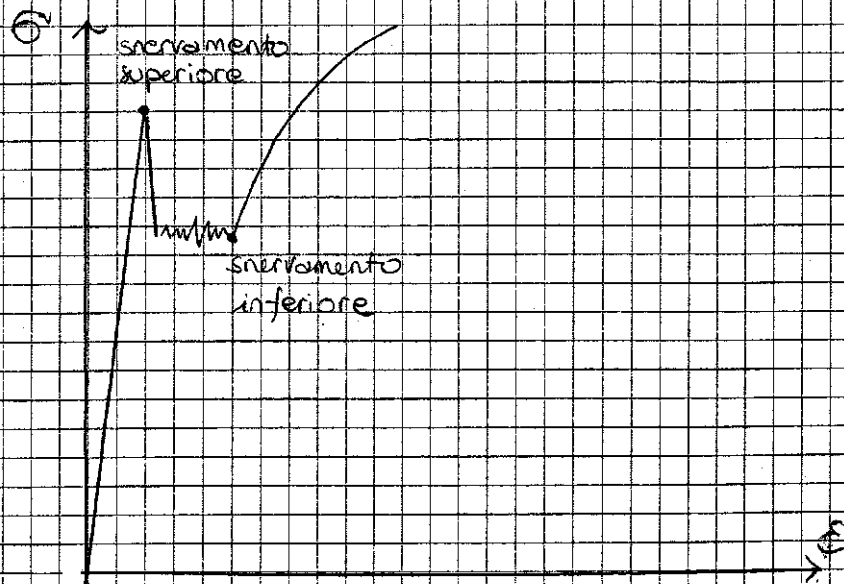
① Evidente e netto punto di snervamento



①.3. materiali polimerici o ghise: no zona lineare → limite di snervamento assunto per  $\epsilon = 0,5\%$

Il punto di snervamento non è P, ma è quello che corrisponde ad una deformazione plastica dello 0,2%, poiché durante la prova è molto difficile individuare P.

② Punto di snervamento superiore ed inferiore





CFC  $\rightarrow$   $(12)$  sistemi di scorrimento: 4 piani  
 $\{111\}$  nelle 3 direzioni  $\langle 110 \rangle$

In funzione del tipo di cella ci sono  
 quantità diverse di sistemi di scorrimento  
 lungo direzioni di scorrimento diverse su piani  
 di scorrimento diversi

### Influenza del legame atomico:

- Metalli: nube elettronica  $\rightarrow$  i moti dislocati  
 o v. sono tutti equamente possibili (adirezio-  
 nalità legame)
- Ceramici:
  - legame ionico  $\rightarrow$  lo scorrimento non deve  
 portare a contatto due ioni dello  
 stesso segno
  - legame covalente  $\rightarrow$  forte direzionalità  
 che si oppone al moto dislocativo

In un materiale policristallino anche con  
 sollecitazione di pura trazione si hanno  
 componenti di taglio in tutte le direzioni  
 a parte // e  $\perp$  alla direzione degli  
 sforzi  $\rightarrow$  direzioni di scorrimento variabili  
 in relazione alle direzioni cristallografiche

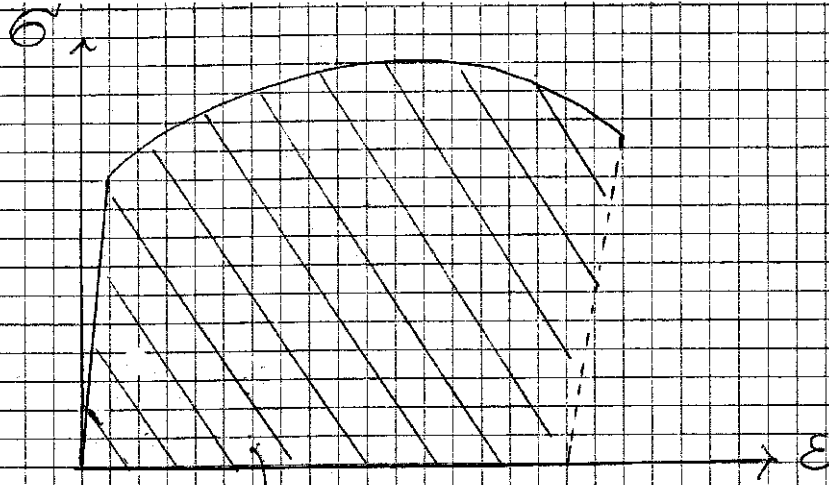
In un monocristallo c'è invece un'unica  
 direzione di scorrimento

I bordi di grano non si separano né si  
 aprono anche nel corso della deformazione

### DOTTILITÀ

Misura della deformazione plastica che un materiale  
 può subire senza rompersi

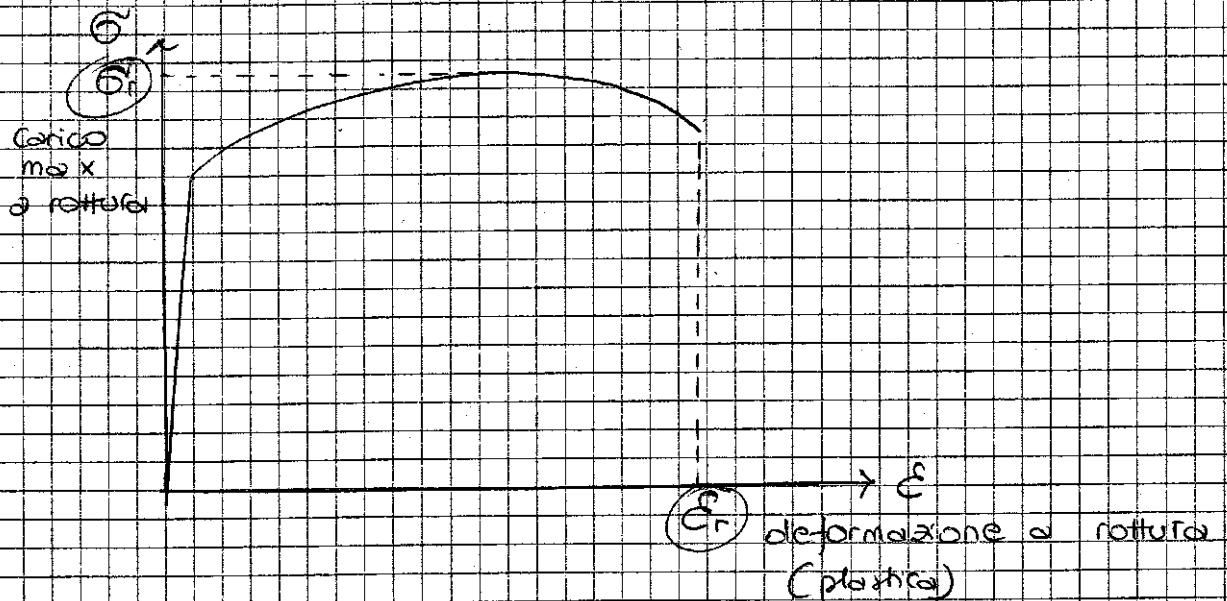
FRAGILITÀ = materiale con scarso o inesistente  
 deformazione plastica



energia immagazzinata per unità di volume (lavoro da compiere per rompere il materiale)

- Carico dinamico (impulsivo)

Associata alla velocità di deformazione, determinata con test ad impulso



$\sigma_r$  ed  $\epsilon_r$  non corrispondono sulla curva poiché la sezione portante tende a diminuire  $\rightarrow$  STRAZIONE

Nella curva "ingegneristica" il carico massimo è sottovalutato → curva cautelativa

$$\epsilon_R = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0}$$

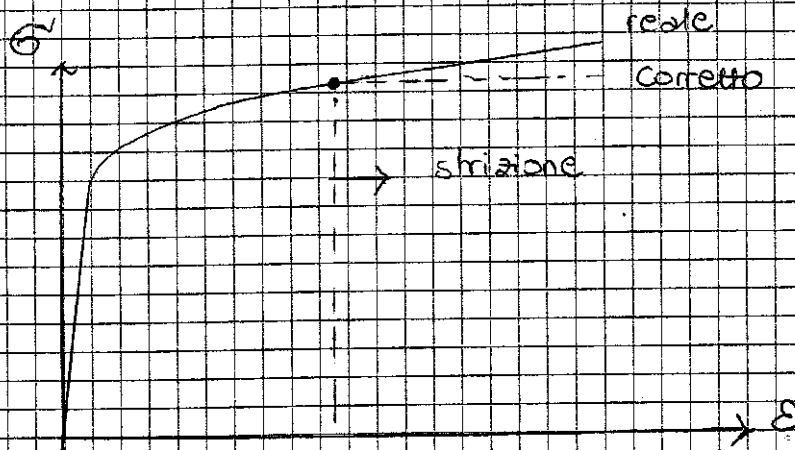
se il volume è costante ( $A_1 l_1 = A_0 l_0$ ):

$$\begin{aligned} \sigma_R &= \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{A_0}{A_1} = \frac{F}{A_0} \cdot \frac{l_1}{l_0} = \\ &= \sigma \cdot \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = \sigma (1 + \epsilon) \end{aligned}$$

$$\rightarrow \sigma_R > \sigma$$

$$\epsilon_R = \ln (1 + \epsilon)$$

Cio' vale fino alla strizione: correzione curva reale



### CURVE $\sigma - \epsilon$ POLIMERI

Comportamenti:

- 1) fragile
- 2) plastico
- 3) elastomerico

Le condizioni di  $T$  sono molto importanti per metalli e polimeri  $\rightarrow$  progressivo indebolimento del materiale al diminuire della  $T$

## FRATTURA DEI MATERIALI

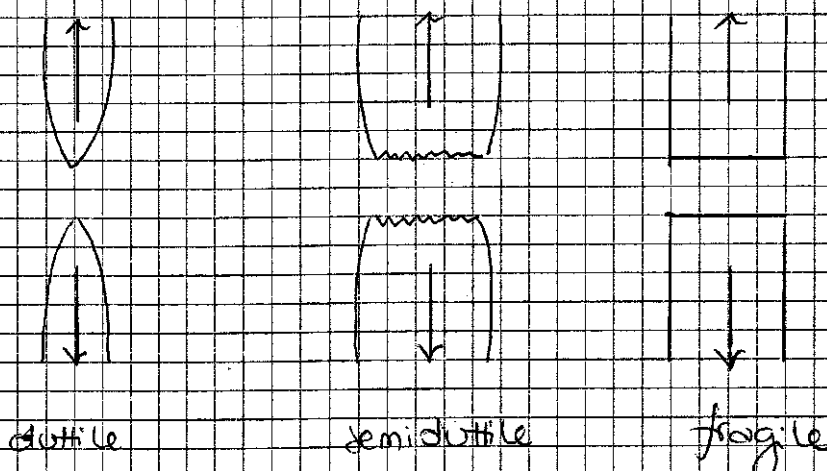
Quattro meccanismi di frattura:

- fragile
- duttile
- per fatica
- per creep

La rottura è funzione di:

- struttura del materiale
- $T$
- velocità di deformazione

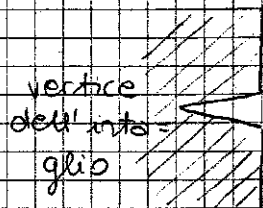
In linea teorica si ha rottura se lo sforzo applicato è maggiore o uguale allo sforzo necessario a separare permanentemente due piani atomici (rottura di tutti i legami presenti su una superficie). In realtà però ci sono tanti difetti anche a livello macroscopico (cricche, porosità, ...) che decrementano le caratteristiche meccaniche



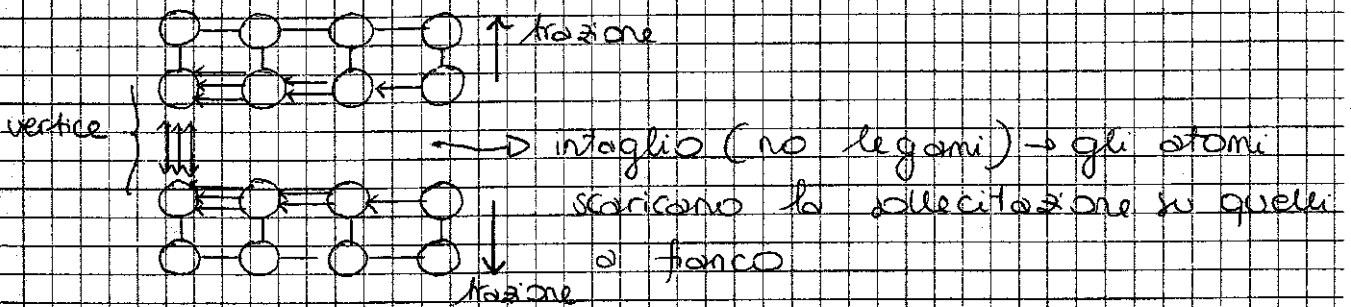
Rottura fragile: linee o creste a ventaglio dal punto di origine della cricca → processo di cleavage → rotture ripetute dei legami lungo piani cristallografici ben definiti

## MECCANICA DELLA FRATTURA

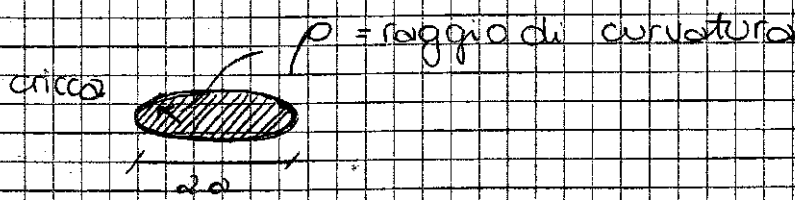
Teoria di Griffith (1920): i materiali possiedono resistenze calcolate teoricamente a partire dai loro legami chimici di molto superiori ai valori ottenuti sperimentalmente poiché sono presenti cricche e difetti superficiali che inficiano le proprietà meccaniche di ogni materiale



incaglio: difetto macroscopico (ordine di grandezza  $\mu m \approx 10^{-6} m$ )



$\sigma_v \gg \sigma$   
 sollecitazione di vertice >> sollecitazione normale esterna



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

Carico al materiale

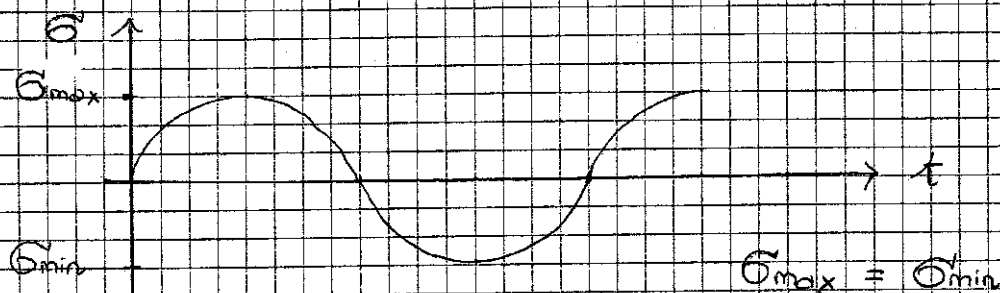
I metalli sono i materiali con maggiore  $K_c$  e quindi presentano alta tolleranza alla presenza dei difetti.

**FRATTURA DEI POLIMERI:** propagazione dei microstrappi che si formano in zone molto localizzate dove si raggiunge il limite di snervamento  $\rightarrow$  si forma una cricca data dalla coalescenza delle microcavità. Microstrappo  $\neq$  cricca  $\rightarrow$  può sostenere ancora un carico in quanto ci sono ponti fibrillari fra gli strappi.

## FATICA

Nei materiali reali la rottura non è quasi mai dovuta ad una singola sollecitazione, ma ad una serie di sforzi ripetuti nel tempo  $\rightarrow$  sforzi dinamici e fluttuanti  $\rightarrow$  rottura per carichi bassi; rottura fragile anche per i metalli.

- Ciclo a carico invertito

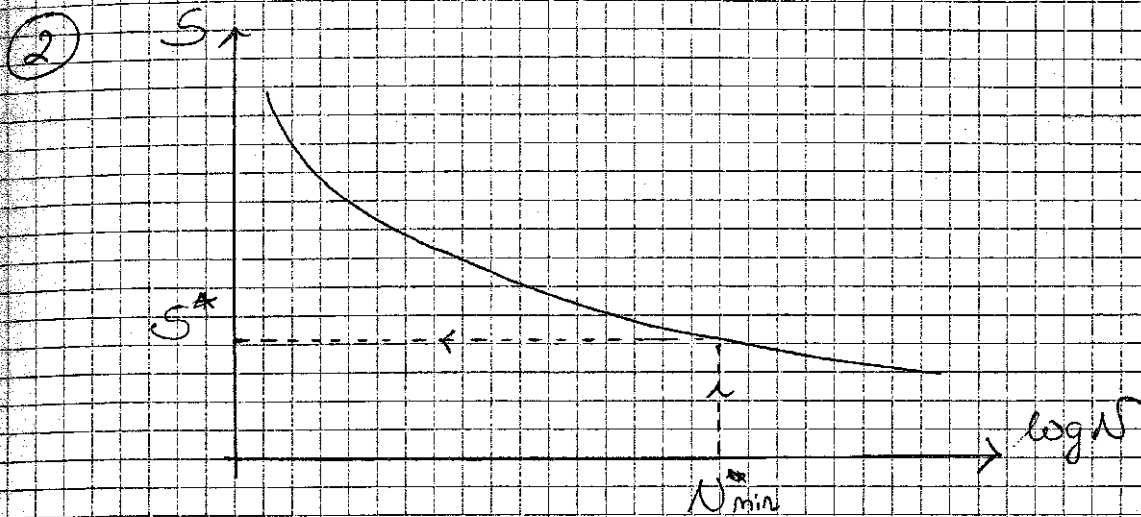


- Ciclo a carico ripetuto

Trazione  $\rightarrow \sigma_{max} > \sigma_{min}$

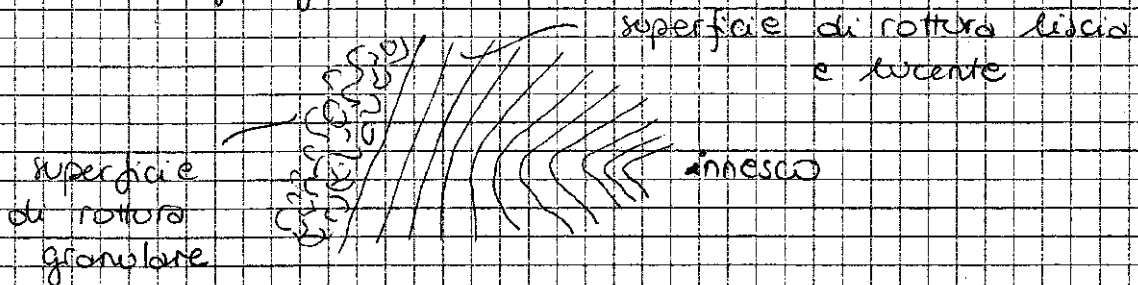
- Ciclo a carico casuale

Variazione casuale del carico: è la tipologia più frequente nella realtà.



No limite a fatica  
 Si fissa  $N_{min}^*$  che dev'essere rispettato per il progetto

Crack superficiale che si propaga all'interno (vibrazione onde) fino a quando la superficie resistente non diminuisce enormemente e si giunge a rottura



Più la superficie è regolare, più il materiale resiste a fatica

Ci sono una serie di condizioni di carico per cui però la crack non si forma in superficie ma poco sotto (es. contatto ruota - rotaia)

Fattori influenzanti la vita a fatica:

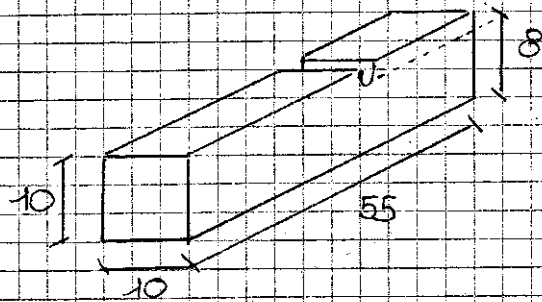
- sforzo medio
- effetti superficiali
- effetti ambientali (es. fatica termica per  $\Delta T$   
 $\rightarrow \sigma_f = \alpha E \Delta T$ )

$\dot{\epsilon}_s$  = velocità minima o di creep stazionario  
(pendenza del tratto lineare)

## IMPATTO

Prova dinamica: sollecitazione improvvisa e di alto profilo energetico  $\rightarrow$  prova di resilienza

Valutazione dell'energia di impatto

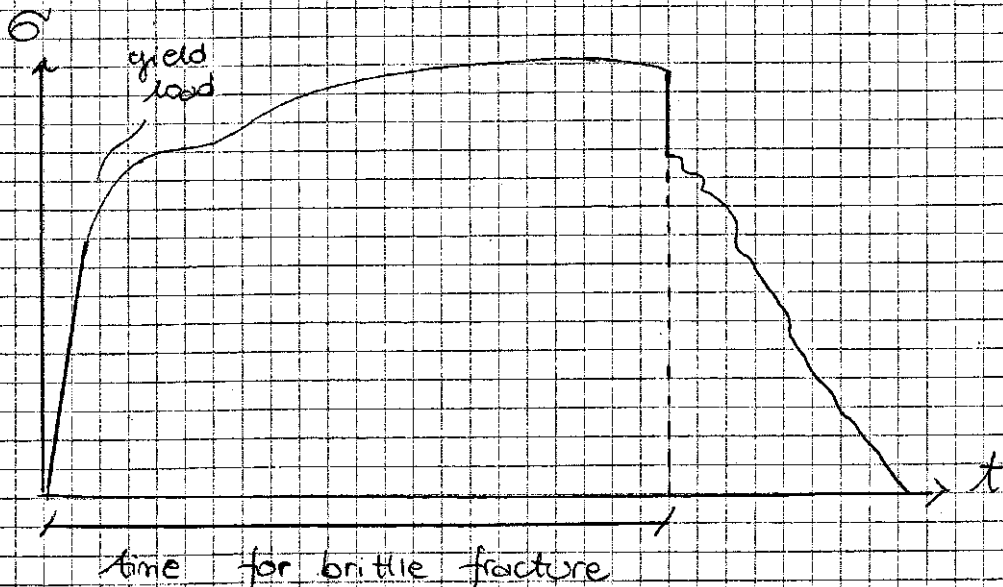


incisivo sul provino, effettuato perché esso si rompa proprio in quel punto

Configurazioni di prova:

- Izod: molto usata in America
- Charpy: martello di massa nota che cade da una certa  $h$  sul campione e risalendo con movimento pendolare si ferma ad  $h' < h$

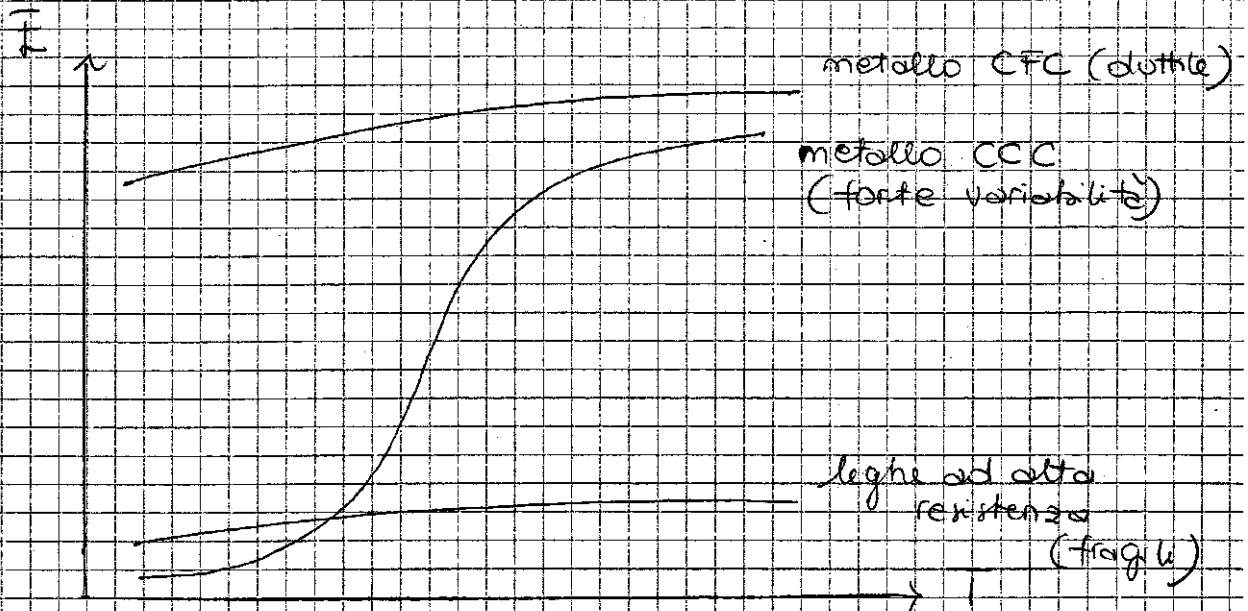
$mgh - mgh' \rightarrow$  si ricava la tenacità (energia d'impatto)





Tali prove mettono in evidenza la natura variabile del comportamento di certi materiali in funzione della temperatura.

T transizione duttile - fragile (intervallo)  $\rightarrow$  tipico dei materiali con struttura CCC (es. acciai a basso tenore di carbonio)



$T$  di transizione = valore medio di resistenza fra max e min  $\rightarrow$  50% rottura duttile  
30% rottura fragile

In esercizio il materiale deve operare a  $T > T_{trans}$

Fattori influenzanti  $T_{trans}$ :

- dimensione dei grani
- tenore di carbonio per gli acciai

## Metodi:

### 1. Variazione della dimensione dei grani

Grani piccoli  $\rightarrow$  maggior numero di grani  $\rightarrow$  maggior numero di bordi grano  $\rightarrow$  minore mobilità delle dislocazioni  $\rightarrow$  minore deformabilità e maggior resistenza

### 2. Creazione di soluzioni solide (leghe)

Inserimento di un elemento più piccolo o più grande nel reticolo  $\rightarrow$  zona compressa o tesa  $\rightarrow$  ostacolo al moto delle dislocazioni

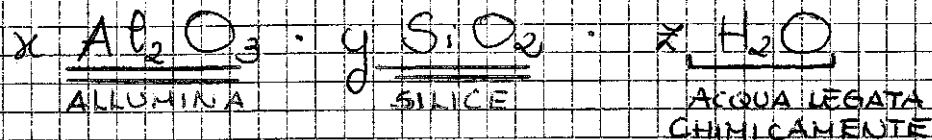
### 3. Aumento dell'incrudimento (deformazione plastica) $\rightarrow$ aumento del numero di dislocazioni $\rightarrow$ minore mobilità (lavorazione a freddo)

- inerzia chimica
- bassa resistenza agli shock termici (variazione repentina della temperatura)

Tutti i materiali ceramici presentano porosità.

Le ceramiche tradizionali sono ottenute tramite modellazione e cottura di impasti a base di argille - minerali argillosi - + sostanze inerti e fondenti.

Le argille sono rocce sedimentarie costituite da alluminio - silicati idrati:



Tipi di argille:

- bentonite  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4 \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- caolino  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{SiO}_2 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$

con colori diversi a seconda della purezza: il caolino è bianco poiché è più puro.

La struttura è fatta da lamelle esagonali sottili disposte a strati, il che conferisce plasticità al materiale.

Nelle argille non sono presenti solo alluminio-silicati, ma anche altri ossidi idrati: silice idrata, alluminio idrato, ossido ferrico idrato (che dà colore all'argilla, dall'ocra fino al rosso scuro).

Gli impasti argillosi, se miscelati con acqua sono plastici, ovvero mantengono la forma una volta rimossa l'azione esterna attraverso cui si sono deformati. La plasticità si perde dopo l'essiccamento.

- magre: ricche di inerti, con plasticità limitata → spesso occorre aggiungere bentonite per incrementarlo.

Prodotti a pasta bianca:

- argille con poco ossido di ferro
- caolini puri, quarzo, feldspati

## CICLO PRODUTTIVO

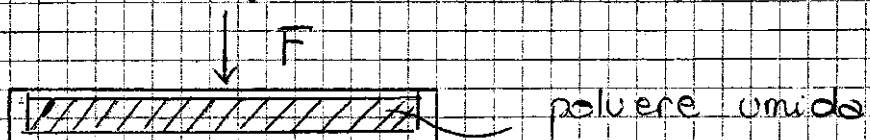
(A) Reperimento materie prime (spesso locali)

(B) Frantumazione e macinazione per ottenere una polvere. La macinazione può essere:

- a secco ( $\% H_2O < 5\%$ ) per materia prima unica
- a umido per le miscele artificiali, in modo da ottenere un materiale più omogeneo

(C) Formatura: si conferisce forma all'impasto applicando una pressione sufficiente a deformarlo stabilmente → l'oggetto deve sopportare il suo peso e la movimentazione. Esistono 3 tecnologie diverse a seconda della percentuale di acqua utilizzata. La scelta della tecnologia si effettua in base alla forma geometrica del prodotto, alle dimensioni e al volume da produrre.

1) PRESSATURA ( $5-7\% H_2O$ ) per piastrelle, stoviglie. Si riempie uno stampo con polvere ceramica umida e si applica una forza per compattare le particelle argillose.



### 3) COLAGGIO per sanifon

La sospensione argillosa si comporta come un liquido. NaCO si comporta come defloculante e si può aggiungere all'impasto per mantenere le particelle ben disperse. L'impasto è colato in uno stampo di gesso che essendo molto poroso permette l'allontanamento istantaneo dell'acqua d'impasto → drenaggio veloce. In tal modo si ha un essiccamento non omogeneo: la superficie a contatto con lo stampo si asciuga più velocemente → vantaggio se si realizzano forme cave. Si utilizzano anche stampi in resine polimeriche con porosità.

(D)

Essiccamento del crudo (oggetto che possiede una forma ma deve essere ancora intenzionato). L'oggetto contiene una certa quantità d'acqua d'impasto che viene allontanata facendo avvicinare le particelle → diminuzione del volume (ritiro da essiccamento). Bisogna controllare la velocità dell'essiccamento: se è troppo rapido interessa soprattutto la parte superficiale, mentre la parte interna rimane dello stesso volume → distorsioni, rottura.

1° step: preriscaldamento in ambiente umido e a  $T$  basse → trasferimento dell'acqua dal cuore alle zone superficiali.

2° step: diminuzione dell'umidità dell'ambiente ed aumento della  $T$  → evaporazione dell'acqua.

(A-)  $T = 1200 - 1450^{\circ}C \rightarrow$  aumento della fase liquida e diminuzione dei vuoti.

La decisione di operare quest'ultimo passaggio dipende dal tipo di oggetto che si vuole produrre:

- ceramica a pasta porosa
- ceramica a pasta compatta

Cosa accade alle particelle di argilla durante la sinterizzazione?

Inizialmente esse sono vicine (semplice contatto) solo grazie a deboli forze elettrostatiche (no legame chimico). Aumentando la temperatura avviene una diffusione allo stato solido

$\rightarrow$  "colli di sinterizzazione" = giunzioni fra particelle  $\rightarrow$  le particelle perdono la loro forma sferica e si crea quello che nel materiale sinterizzato sarà il bordo di grano.

Inizialmente le porosità sono connesse, poi il materiale tende alla densificazione completa (porosità chiuse). La fase fondente deve fondersi prima della chiusura delle porosità per poter accedere e colmare ogni poro.

Nonostante i ceramica a pasta compatta abbiano migliori caratteristiche, non vengono prodotti tutti in tal modo poiché le alte  $T$  di sinterizzazione richiedono costi elevati. I ceramica a pasta porosa (tradizionali) sono più economici e rispettano comunque i requisiti di progetto.

- smalto (opaco)
- vetrina (trasparente)

Il rivestimento migliora anche la resistenza all'abrasione e all'aggressione chimica (es. bancarelle dei laboratori chimici)

I rivestimenti vetrosi sono miscele di polveri che durante un trattamento termico sono in grado di vetrificare formando uno strato compatto.  $\rightarrow$  silice + allumina + ossidi metallici (colorazione)

Rivestimento applicato direttamente sul crudo dopo l'essiccamento in modo da procedere con una sola cottura: è la soluzione migliore dal punto di vista economico. Inoltre la monocottura permette una migliore adesione fra rivestimento e supporto: il rivestimento ha una viscosità tale da penetrare nelle rugosità superficiali del crudo migliorando l'adesione fra i due strati.

## CERAMICI TRADIZIONALI

Sono classificati in base a:

- rivestimento superficiale (può non essere presente)
- colore del supporto (pasta bianca o colorata)
- microstruttura (porosa o no)

$\swarrow$   
pasta porosa =  
assorbimento  
dell'acqua  $> 5\%$

$\searrow$   
pasta compatta

Diverse  $T$  di sinterizzazione:

- bassa  $\rightarrow$  porcellane tenere (grossa quantità di fase vetrosa)
- alta  $\rightarrow$  porcellane dure (prevalenza di fase cristallina)

rivestimento  $\rightarrow$  resistenza chimica

quarzo  $\rightarrow$  maggiori proprietà meccaniche

feldspati  $\rightarrow$  isolamento elettrico

caolino  $\rightarrow$  refrattarietà

## LATERIZI

Si utilizzano per la realizzazione di murature, tetti, rivestimenti,...

Componenti:

- argille comuni impure (rosso mattone)
- quarzo come smagranite
- $\text{CaCO}_3$  come fondente ( $\leq 20\%$ )
- solfati (impurezze) che possono portare ad efflorescenze

Normativa UNI EN 771: definisce le tipologie di laterizi  $\rightarrow$  dimensioni, caratteristiche meccaniche, prove da effettuare,...

Tipologie di mattoni:

- mattone pieno = percentuale di foratura  $< 15\%$   
 $25 \times 12 \times 5,5$  cm  $\rightarrow$  per muri portanti o pavimenti
- mattone semipieno =  $45\% < \% \text{ foratura} < 15\%$   
con fori di varia forma  $\rightarrow$  per muri portanti, soprattutto per pareti facciate poiché di solito hanno geometria più uniforme
- mattone forato =  $\% \text{ foratura} > 45\%$  con fori longitudinali rettangolari; superficie rigate per migliorare l'adesione della malta  $\rightarrow$  per



## Tipi di murature:

- portanti → con funzione strutturale → solo laterizi con  $\leq 55\%$  fori per rispettare i requisiti di resistenza a compressione
- tamponamento → no funzione strutturale
- per divisioni interni

## Ulteriore classificazione:

- monostrato
- doppio / pluristrato → strati contigui o leggermente distanziati per inserire un materiale che funge da isolante termico
- miste → strati di mattoni compensati fra loro

## Murature in zona sismica (classe 1, 2, 3):

- non portanti in mattoni pieni o semipieni con resistenza alle azioni verticali  $> 5 \text{ MPa}$  e alle azioni orizzontali  $> 1,5 \text{ MPa}$
- muri di tamponamento con spessori  $> 10 \text{ cm}$  ed in grado di assorbire le deformazioni.

## Laterizi per pavimentazioni

UNI EN 1344 / 2004

### Requisiti specifici:

- resistenza allo scivolamento
- permeabilità al vapore → per evitare il ristagno dell'acqua dal sottosuolo
- bio-compatibilità
- durabilità
- no reazione tossica al fuoco
- varietà cromatica e dimensionale
- controllo rumor da calpestio e comfort termico, controllo proprietà meccaniche (variazioni di volume)

CARATT. MECCANICHE  
SUPERFICIALI

- resistenza all'abrasione (UGL)
  - " " " (GL)
- } solo per  
} polimer

CARATTERISTICHE  
TERMO - IGRO -  
METRICHE

- resistenza al gelo (no per interni)
- resistenza agli shock termici
- dilatazione termica
- dilatazione legata all'umidità
- resistenza al cavillo GL (via di fuga)

CARATTERISTICHE  
CHIMICHE

- resistenza all'attacco chimico
- resistenza alle macchie

CARATTERISTICHE  
DI  
SICUREZZA

- cessione di ioni Pb e Cd (GL) -  
elementi tossici che possono essere  
usati nei rivestimenti
- resistenza allo scivolamento  
(coefficiente d'attrito) → solo per  
pavimenti)

DURABILITÀ DEI CERAMICI

Prevenzione: meglio attuare dei piccoli accorgi-  
menti prima o durante la messa in opera

Porosità aperte ed interconnesse = veicolo per gli  
agenti di degrado

Tipi di degrado

① GELO - DISGELO

Si verifica quando la temperatura oscilla  
intorno a  $0^{\circ}\text{C}$

Le porosità assorbono acqua che quando  
la temperatura  $\leq 0^{\circ}\text{C}$  ghiaccia subendo  
un aumento di volume del + 9%.

- **SUBFLORESCENZE** → fenomeni ventosi che aumentano la velocità di evaporazione dell'acqua la quale non ha tempo di spostarsi in superficie ma evapora all'interno del materiale nelle sue porosità → l'aumento di volume provoca la compressione il materiale → formazione creche → rottura

Se efflorescenze sono comunque pericolose poiché costituiscono un sintomo evidente del degrado e potrebbero indicare un possibile sviluppo di subflorescenze.

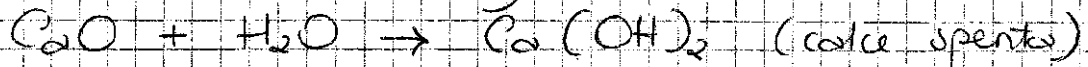
Se l'efflorescenza si presenta soprattutto ai bordi dei mattoni significa che il sale è presente nella malta.

**Sali:**

- solfati o cloruri (sodio o potassio) → polvere biancastra solida sulla superficie, molto solubile in  $H_2O$  e quindi facilmente rimovibile. Sono sali spesso già presenti nel manufatto (cemento / calce della malta o laterizio), oppure arrivano dall'acqua d'impasto o dal terreno.
- solfato di  $Mg$  → polvere biancastra e amara già presente nella malta o nel laterizio o proveniente da additivi usati per il confezionamento.
- solfato di calcio → polvere biancastra aderente presente nella malta, nel laterizio o nell'acqua d'impasto.
- carbonato di calcio → velo biancastro insolubile in acqua, effervescente in  $HCl$ .

### ③ CALCE LIBERA

Impurezze argilla di partenza: carbonato di calcio che durante la cottura dà vita a  $\text{CaO}$  (calce viva)



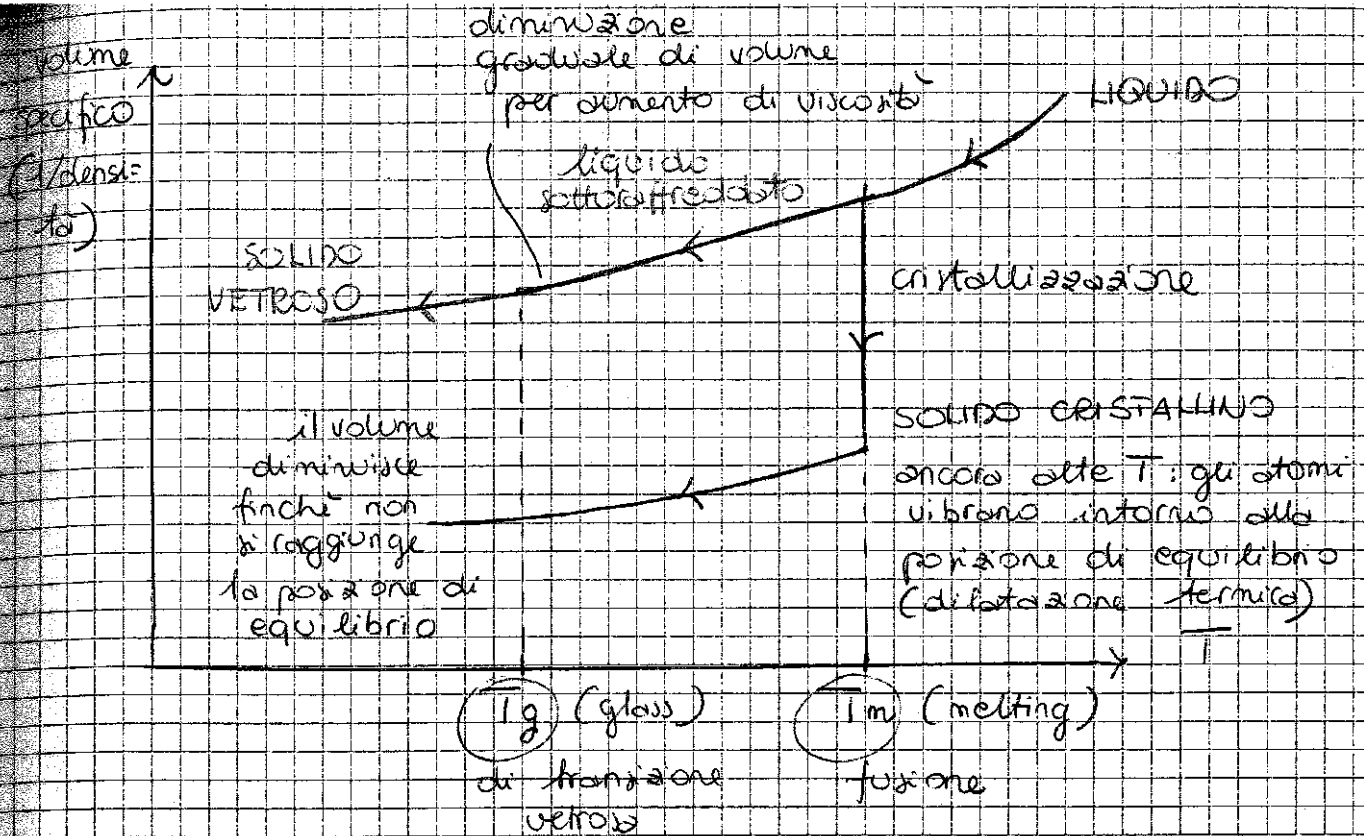
↳ reazione con aumento di volume

### ④ DEGRADO BIOLOGICO

Legato alla presenza di acqua nei pori che veicola all'interno spore, muffe, muschi, licheni.

### ⑤ ABRASIONE SUPERFICIALE

### ⑥ CORROSIONE PER PRESENZA DI INSERITI METALLICI



- $T_m$  ben definita per il cristallino (passaggio istantaneo solido - liquido)
- Intervallo di ramollimento per gli amorfici
  - passaggio graduale con variazione di viscosità → i legami non si rompono tutti allo stesso  $T$

## VETRI INORGANICI

Miscela di silicati a struttura amorfa

Silice + soda + calce → miscuglio omogeneo fuso a  $T \approx 1500^\circ\text{C}$

Materie prime:

### ① FORMATORI (VETRIFICANTI)

Preservano la struttura amorfa attraverso il raffreddamento veloce:

- silice
- anidride borica o fluorica
- ossido di germanio o tellurio
- ossidane boro - fluoriche

## PROPRIETÀ MECCANICHE

I valori di  $E$  sono funzione della composizione del vetro. Ad esempio i vetri al piombo (cioè con aggiunto di  $PbO$ ) hanno  $E$  inferiore, infatti l'aggiunta di ossidi intermedi fa diminuire i legami. La durezza dei vetri è indipendente dalla composizione e vale circa 7 (scala Mohs).

### MECCANICA DELLA FRATURA

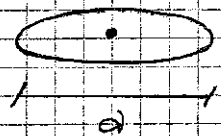
È fondamentale la presenza dei difetti in relazione alla resistenza meccanica.

Resistenza teorica = 10 - 30 GPa 10000 MPa

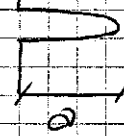
Resistenza reale = 100 MPa

Ciò si verifica poiché i difetti intensificano lo sforzo agente sul materiale in misura proporzionale al raggio di curvatura  $\rho$  e alla dimensione della cricca  $a$ .

cricca interna



cricca superficiale



$$\sigma_m > \sigma_f$$

tensione effettiva > tensione nominale applicata

I materiali duttili modificando la forma della cricca mimetizzano l'amplificazione, cosa che non avviene per i materiali fragili.

$$K_t = \frac{\sigma_m}{\sigma_f}$$

fattore di amplificazione dello sforzo all'apice della cricca

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

TENACITÀ  
A FRATTURA

↓  
larghezza provino

$K_{IC}$  grande  $\rightarrow$  materiali duttili

$K_{IC}$  piccolo  $\rightarrow$  materiali fragili; ha comunque valori abbastanza variegati in funzione del tipo di materiale e della sua composizione

Dunque la resistenza teorica tiene conto solo dei legami e della loro forza; mentre quella reale tiene anche conto della presenza dei difetti.

Nella pratica si fissa una soglia di resistenza del materiale e si determina la lunghezza critica della cricca a cui essa corrisponde e si fanno poi controlli in base a questo.

La trazione aumenta la dimensione del difetto, mentre la compressione la diminuisce ecco perché i materiali fragili come i vetri lavorano male a trazione.

Una lastra di vetro in esercizio è spesso soggetta a flexione  $\rightarrow$  contributo di trazione e compressione  $\rightarrow$  la resistenza è molto rispetto quella a compressione

resistenza a compressione = 1000 MPa

resistenza a flexione = 40 MPa

120 MPa per lastre temperate

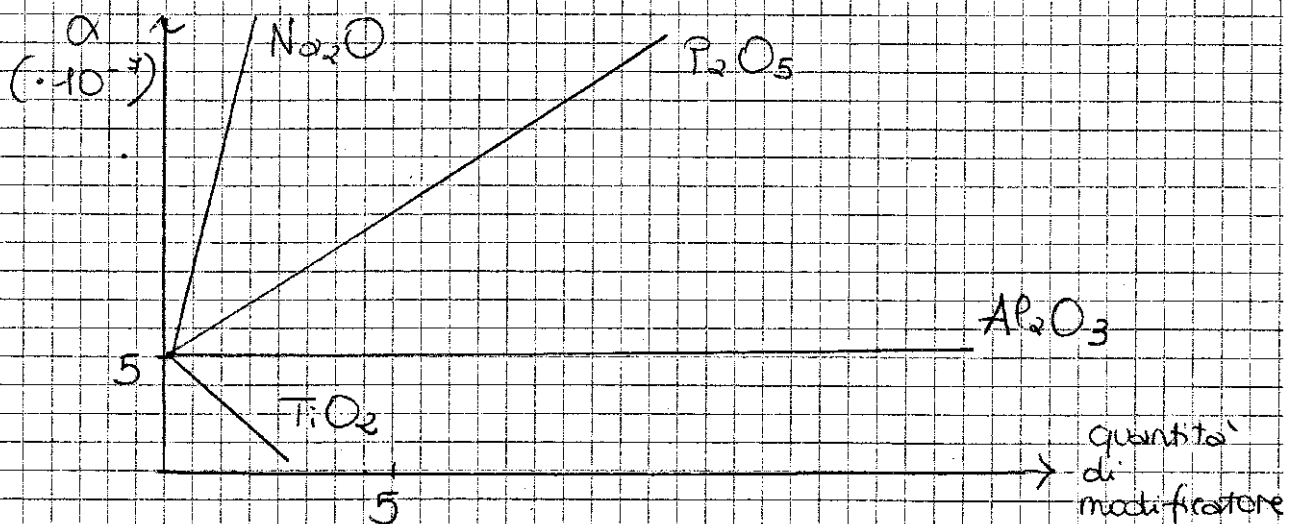
distanze fra gli atomi. La trasmissione del calore è dunque basata solo sulla vibrazione degli atomi del reticolo → cattiva conduttività;

Il vetro è però meno efficace come isolante di legno, c.s.,... → utilizzo di rivestimenti particolari per favorire l'isolamento.

- DILATAZIONE TERMICA = fenomeno elastico che porta attraverso un aumento di  $T$  (energia) alla vibrazione degli atomi aumentando la distanza media fra atomi → aumento volume

( $\alpha$ ) coefficiente di dilatazione termica = misura dell'aumento di lunghezza quando si aumenta la  $T$  di  $1^\circ\text{C}$

Modificatori: influenzano i legami del reticolo facendo variare in modi diversi  $\alpha$



Esistono condizioni particolari di esercizio (es. lastra non interamente esposta alla radiazione solare) per cui si ha  $\Delta T$  fra le varie zone della lastra → aumento di volume solo in una parte → stati tensionali

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad [\text{N/mm}^2]$$

(2)  $(1 - \nu)$  Coefficiente di forma per le lastre piane



Forni :

- chiusi per processi discontinui (in caso di volumi piccoli)
- a bacino per processi continui

Problema: formazione di bolle d'aria difficili da eliminare poiché il fluido è viscoso e i carbonati liberano  $CO_2$ . Si utilizzano allora  $T > T_f$  per diminuire ulteriormente la viscosità ed agenti affinati (nitrati, solfati) che passando allo stato gassoso trascinano via le bolle (ulteriore vantaggio rimescolamento del fluido con ancora maggiore omogeneità).

Ⓒ

### FORMATURA

Si aumenta la viscosità diminuendo la  $T$  con una certa velocità fino a raggiungere la  $T$  di lavoro a cui il materiale può essere modellato. Si utilizzano diversi processi a seconda della forma che si vuole conferire:

1. Float → lastre

Le materie prime sono poste nel bacino di fusione al cui termine inizia il processo di raffreddamento mentre il fuso scorre su rulli che gli conferiscono un certo spessore. Poi il fuso è fatto galleggiare su un bagno di stagno fuso che dà alla superficie inferiore una certa planarità, mentre quella superiore è sottoposta a pulitura a fuoco sempre per ottenere una buona planarità. Poi il vetro passa nel forno di ricottura ed è infine raffreddato e tagliato.

Il processo è nato nel 1965 rimpiazzando processi di tiratura che non permettevano il controllo

2. Tempra chimica  $\rightarrow$  scambio ionico fra il vetro con ioni  $\text{Na}^+$  e gli ioni  $\text{K}^+$  della soluzione con  $\text{KNO}_3$  fuso in cui è immersa. Ciò avviene nella zona superficiale della lastra.  $\text{K}^+$  ha raggio maggiore di  $\text{Na}^+$ ; ciò induce tensioni di compressione sulla superficie.

(F)

### CONTROLLI

Si dividono le lastre a seconda della dimensione dei difetti e si controlla la qualità del prodotto.

## TIPICI DI VETRO

VETRO DI SILICE

VETRO SODICO - CALCICO  $\rightarrow$  vetro comune

SILICATO DI  $\text{Pb}$   $\rightarrow$  lenti, schermi per radiazioni

BOROSILICATO (PIREX)  $\rightarrow$  vetro con resistenza agli sbalzi termici

ALUMINO - BOROSILICATO  $\rightarrow$  vetro resistente dal punto di vista chimico (allumina) e agli shock termici (ossido di boro)

ALUMINO - SILICATO  $\rightarrow$  vetri di ultima generazione (per applicazioni elettroniche): basso coefficiente di dilatazione termica (ottimo per applicazioni in cui si usano materiali diversi circostati fra loro), sopportano  $T$  elevate

Nell'antichità spesso si realizzavano finestre piccole per permettere l'ingresso della luce ma limitare gli effetti del pessimo

# TECNOLOGIA DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE

## PARTE (2)

ELISA PICCIONE

Ing. Civile

Per limitare l'irradiazione solare si possono usare:

- **Vetri Assorbenti** (energia trasmessa  $\approx 60\%$ )  
 Si interviene sulla % di energia assorbita. Si aggiungono ossidi metallici che modificano la colorazione del vetro e quindi anche lo spettro di trasmissione  $\rightarrow$  nel range del visibile la porzione trasmessa è ridotta. Una parte dell'energia assorbita è però ritrasmessa all'interno.
  - **Vetri Riflettenti** (energia trasmessa  $\approx 50\%$ )  
 Si interviene sulla % di energia riflessa depositando sulla superficie del vetro un film sottile di ossidi metallici.
    - **piroli n**  $\rightarrow$  quando il vetro è ancora caldo si spruzza una soluzione di ossido metallico ad esempio ossido di titanio, che ha anche un effetto autopulente quando interagisce con la radiazione solare.
    - **sputtering catodico**  $\rightarrow$  si pone il vetro in un campo elettromagnetico e sottovuoto: avviene un trasferimento di particelle di ossido metallico dal target al vetro.
- I vetri riflettenti permettono la visione in senso unico: dall'ambiente meno illuminato a quello più illuminato.

Per migliorare l'isolamento termico in climi freddi e/o in inverno: (evitare che il calore si dissipi all'esterno)

$$Q = - U \Delta T + \textcircled{G} \textcircled{E}$$

$\downarrow$                        $\downarrow$   
 fattore                      energia  
 oltre                      incidente

flusso di calore  
 attraverso la  
 parete

$t \rightarrow$  massa piccolo  $\rightarrow$  basso potere forniante  
PFI

$$PFI = 13 + 14,5 \log(P)$$

media dei valori ottenuti a varie frequenze

$P$  peso in  $\text{kg/m}^2$  della lastra di vetro

Spessori maggiori incidono poco sul PFI  $\rightarrow$  la doppia vetrata non è efficace, poiché il PFI dipende dal peso

Inserimento fra due lastre di un film polimerico  $\rightarrow$  VETRO STRATIFICATO

## VETRI DI SICUREZZA

Carichi di vario genere:

- dinamici (vento)
- statici (peso proprio, neve, ...)
- accidentali (grandine, torioni, sisma, ...)
- urti da corpo molle
- urti da corpo duro
- urti da proiettile

### • VETRI ARMATI

Inserimento di una rete metallica

Peggioramento della resistenza meccanica  
 $\rightarrow$  causa del non perfetto accoppiamento metallo - vetro.

Miglioramento della stabilità al fuoco  $\rightarrow$  in caso di incendio la rete tiene in posizione il vetro che rammolisce.

Abella ven°

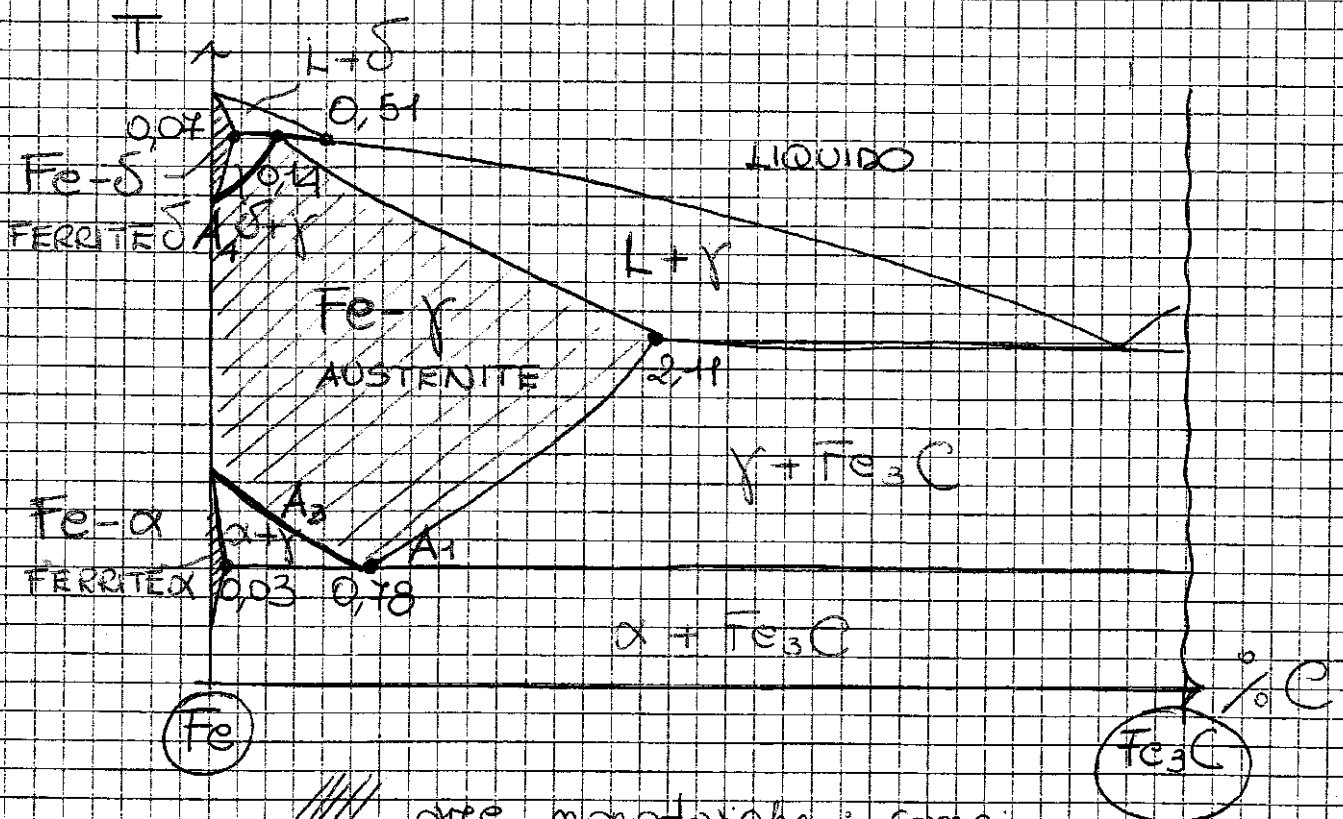
## DIAGRAMMA $\text{Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$

Modificando il sistema si ottiene il diagramma di stato ( $\rightarrow$  valido in condizioni di equilibrio) ferro - cementite ( $\% \text{C} = 6,67\%$ ). Esso descrive la natura di acciai e ghise, ed è rappresentativo di condizioni di tempo infinito in cui le reazioni hanno tutto il tempo di avvenire e il sistema di cambiare (nella realtà ciò non avviene mai).

Si hanno diversi stati in funzione della temperatura e del tenore di carbonio  $\rightarrow$  soluzione solida (no composizione chimica ben definita) vs composto interstiziale (composizione chimica ben definita)

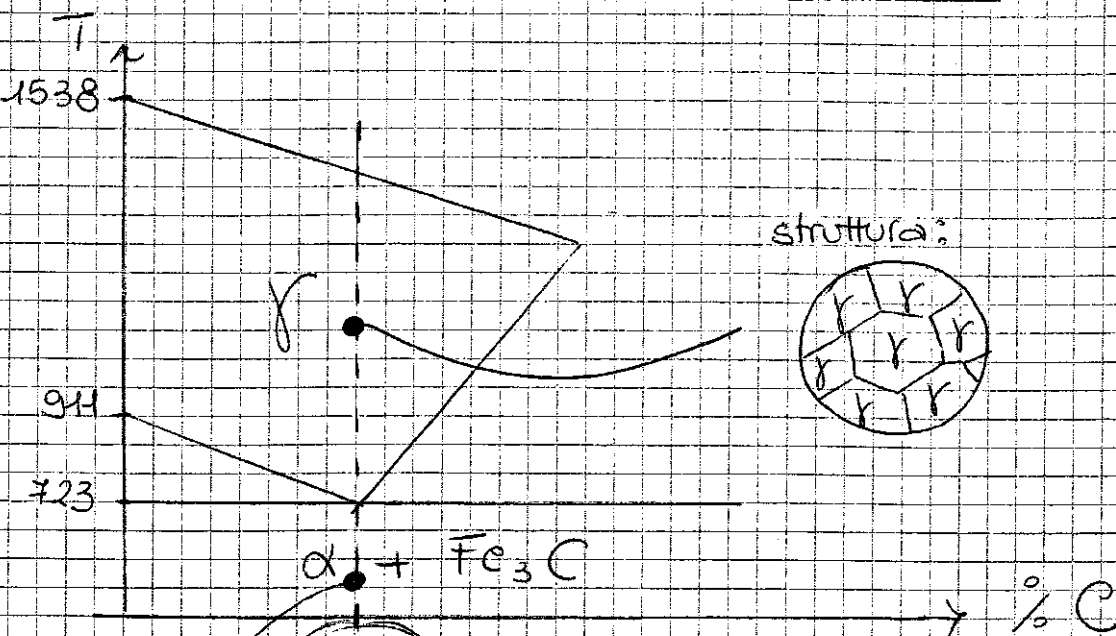
$\% \text{C} < 2,11\%$   $\rightarrow$  ACCIAI

$2,11\% < \% \text{C} < 6,67\%$   $\rightarrow$  GHISE



/// aree monofasiche: comp. di esistenza delle soluzioni solide con riferimento a certe strutture del ferro ( $\delta - \gamma - \alpha$ )

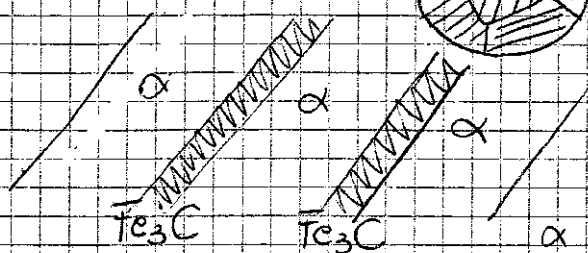
STRUTTURA DELL'ACCIAIO EUTETTOIDICO %C ≈ 0,8%



struttura:



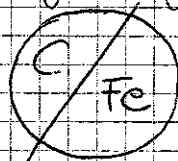
struttura:



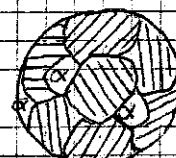
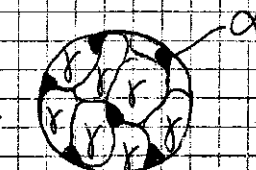
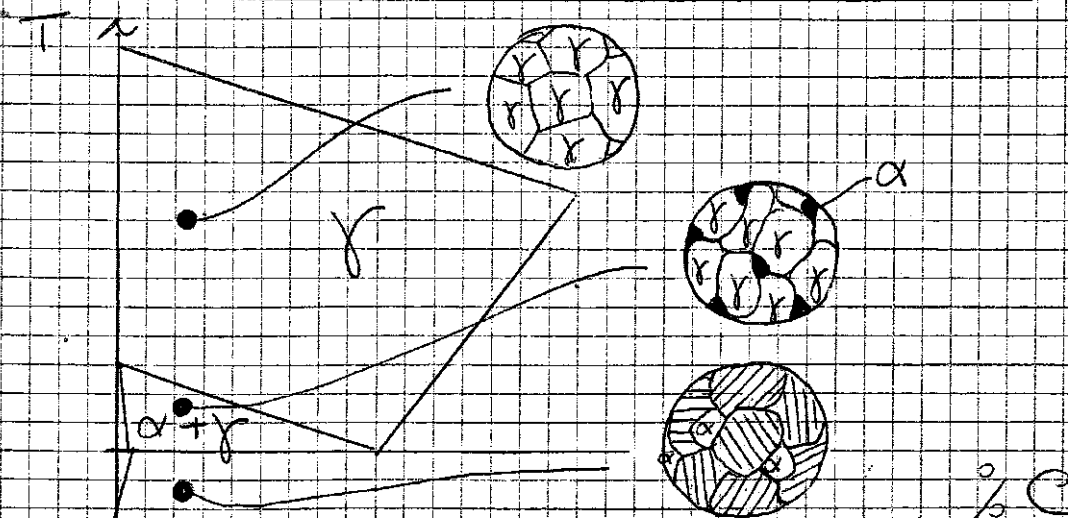
**PERLITE** = intima miscela di α e Fe<sub>3</sub>C fra loro separate

Si ha alternanza di fasi α e Fe<sub>3</sub>C per ogni grano (fasi con %C molto diverse)

A  $t = \infty$  o  $T = 723^\circ\text{C}$  si tenderebbe ad avere per ogni grano:



STRUTTURA DELL'ACCIAIO IPOEUTETTOIDICO %C < 0,8%



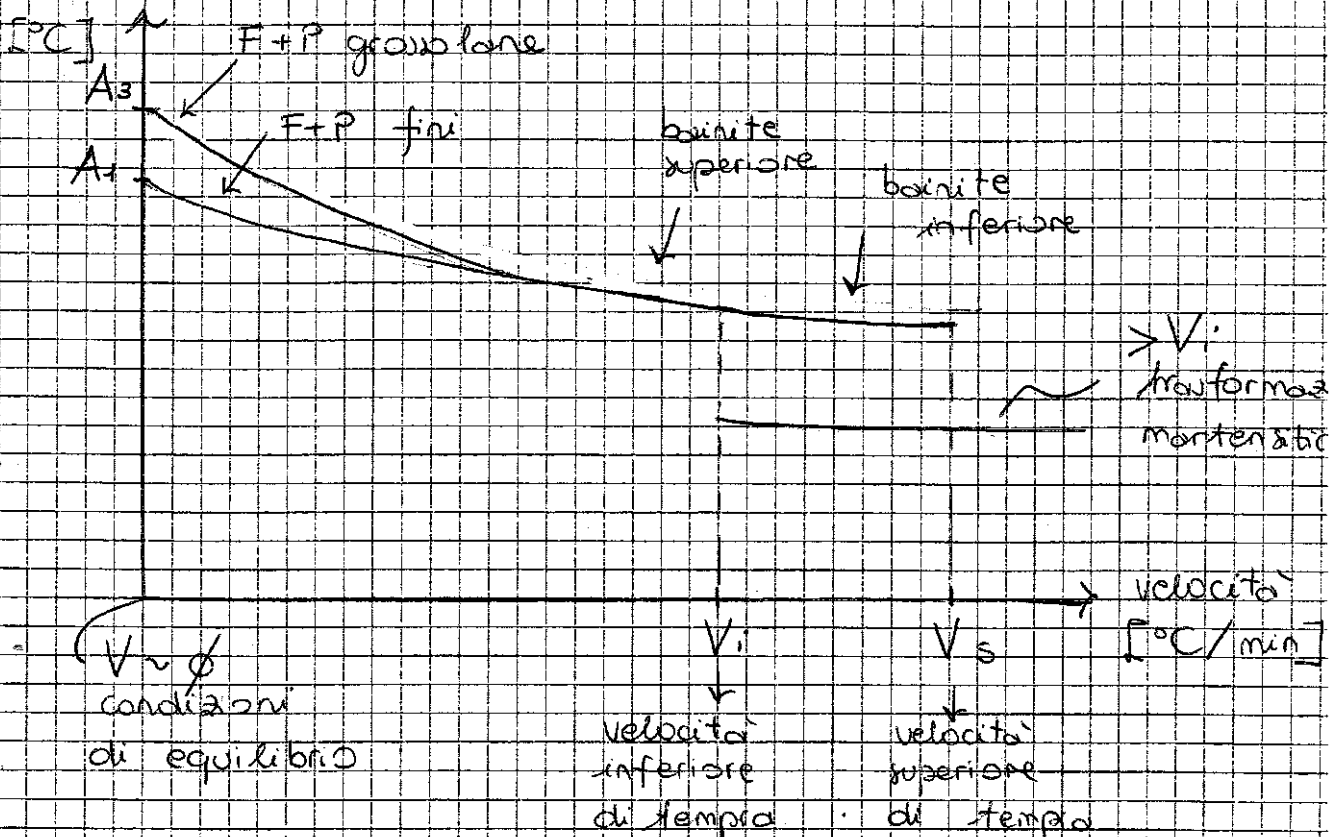


Si richiede una struttura omogenea in partenza per ottenerne una omogenea dopo il trattamento preventivo **AUSTENITIZZAZIONE**

I parametri di austenizzazione sono:  
 $T$  di austenizzazione  
 $t$  di austenizzazione

Struttura austenitica  $\rightarrow$  condizioni di omogeneità. Si deve operare sempre al di sopra di tali condizioni (pt. critici  $A_3$  e  $A_{cm}$ )

Velocità di raffreddamento che aumenta  $\rightarrow$  differente distribuzione dei punti critici  $\rightarrow$  non si lascia il tempo alle trasformazioni di avvenire e punti si spostano nel tempo (in avanti)



F = ferrite  
 P = perlite

Si ottengono strutture diverse a seconda della  $T$  di raffreddamento

zione

$M_f$  (martensite finish):  $T$  di fine trasformazione  
 se la  $T$  finale è  $> M_f$  la trasformazione non avviene per intero  $\rightarrow$  austenite residua

RICOTTURA (condizioni che rispettano il diagramma di stato)

Trattamento termico con bassa velocità di raffreddamento grazie al raffreddamento in forno si eliminano le disomogeneità all'interno del materiale.

- RICOTTURA COMPLETA

$T = A_3 + 50^\circ\text{C}$  per acciai ipoeutetoidici  $\rightarrow$  generazione ferrite e perlite grossolane

$T = A_1 + 50^\circ\text{C}$  per acciai ipereutetoidici  $\rightarrow$  globulizzazione della cementite

- RICOTTURA DI OMOGENIZZAZIONE (o diffusione)

In campo austenitico:  $T = 1000 - 1200^\circ\text{C}$

Rischi: fusione parziale (acciaio bruciato); ingrossamento del grano cristallino dovuto al fatto che si fornisce energia  $\rightarrow$  minore resistenza e minore durezza al crescere della dimensione del grano.

- RICOTTURA DI RIGENERAZIONE

Modifica struttura ferrite-perlite aciculare derivante da  $\gamma$  a grano grosso per ottenere  $\gamma$  rigenerata a grano fine che dà vita a ferrite-perlite cellulare con struttura più fine e migliori proprietà meccaniche