



**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1730A -

ANNO: 2015

# APPUNTI

STUDENTE: Faraci Alessio

MATERIA: Scienze dei materiali - prof. Spriano, Vitale

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.**

# INDICE:

1. CLASSIFICAZIONE MATERIALI	pag. 1
2. STRUTTURA DEI MATERIALI	pag. 10
3. DIFETTI RETICOLARI	pag. 18
4. DIAGRAMMI DI STATO	pag. 36
5. ACCIAI	pag. 45
6. PROPRIETÀ MECCANICHE (+ PROVA COMPRESSIONE CUS)	pag. 68, 87
7. PROPRIETÀ TERMICHE	pag. 91
8. POLIMERI	pag. 100

→ LEGAME METALLICO

$G_{e_i}$  e di valenza } <sup>nuvola elettronica</sup> non sono legati ai singoli atomi e si trovano in una "nuvola di elettroni" che schermava le cariche positive del nucleo.  $G_{e_i}$  e<sup>-</sup> appartengono a tutti gli atomi e a nessuno in particolare.

Il legame metallico è <sup>adirezionale</sup> **NON DIREZIONALE** (ovvero un atomo non ha un legame preferenziale con un altro)

Il legame metallico è **FORTE** con **ELETTRONI DELOCALIZZATI**

{  $\rightarrow$  campo positivo (nuclei ordinati) } elettroneutralità  
 {  $\rightarrow$  campo negativo (nuvole elettroniche) }

→ PROPRIETÀ

- RIFLETTANZA** → perché l'energia degli e<sup>-</sup> fa sì che gli e<sup>-</sup> reagiscano con la radiazione luminosa ⇒ vengono riflessi
- RIGIDEZZA** → la forza di legame fra i nuclei (molto forte) fa sì che i nuclei non si separano facilmente se sottoposti a carichi  
 (materiale che non si lascia deformare facilmente.)  
 (ELASTICITÀ deformazione per carico recuperabile)  
 (temporanea)
- AUTORESISTENZIALI** → elevata resistenza meccanica  
 (≠ Rigido) (si rompono/spezzano se sottoposti a carichi elevati)
- CONDUCIBILITÀ TERMICA ED ELETTRICA** → poiché e<sup>-</sup> mobili

## → LEGAME COVALENTE

Gli  $e^-$  sono condivisi fra atomi per saturarne la valenza orbitando tra i due elettroni

Es: diamante, carboni / nitrucci,  $H_2$   
↓ gli  $e^-$  permangono per un tempo identico a ciascuno dei due nuclei

Il legame covalente è **DIREZIONALE**

## → AFFINITÀ FRA LEGAME COVALENTE E IONICO

- molto forti (+ forti di quello metallico)
- $e^-$  localizzati

## → DIFFERENZE FRA LEGAME COVALENTE E IONICO

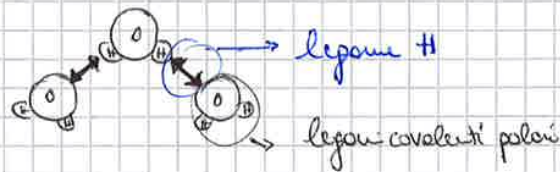
COVALENTE	IONICO
↓	↓
<b>DIREZIONALE</b>	<b>NON DIREZIONALE</b>
<b>FORZA DI LEGAME MAGGIORE</b>	<b>FORZA DI LEGAME MINORE</b>
$e^-$ condivisi fra più nuclei	$e^-$ è ad un singolo nucleo

→ LEGAMI SECONDARI (legami deboli) → ( $\approx 10 \text{ kJ/mol}$ )

Risulta dall'interazione di dipoli atomici o molecolari

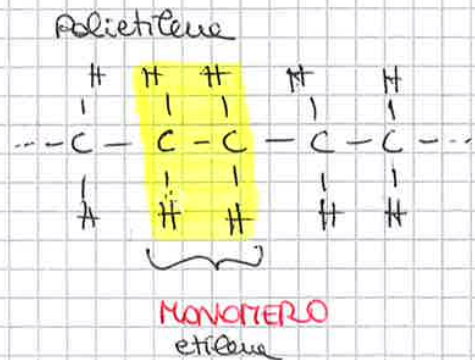
È un **LEGAME FISICO** → non coinvolge trasferimento di e<sup>-</sup>  
 È interazioni di tipo elettrostatico ⇒ **DIPOLI PERMANENTI**  
 FORZE DI VAN DER WAALS

Es:  $\text{H}_2\text{O}$  → LEGAME H



→ MATERIALI POLIMERICI

Legami covalenti sono intramolecolari  
 (fra gli atomi di carbonio)



È legami deboli sono fra una macromolecola e l'altra (intermolecolari)

• composti organici → naturali  
 → sintetici

• bassa densità ( $< 1 \text{ g/cm}^3$ ) ⇒ galleggiano in  $\text{H}_2\text{O}$

• molto lavorabili

• isolanti elettrici e termici

• resistenza meccanica e termica buona

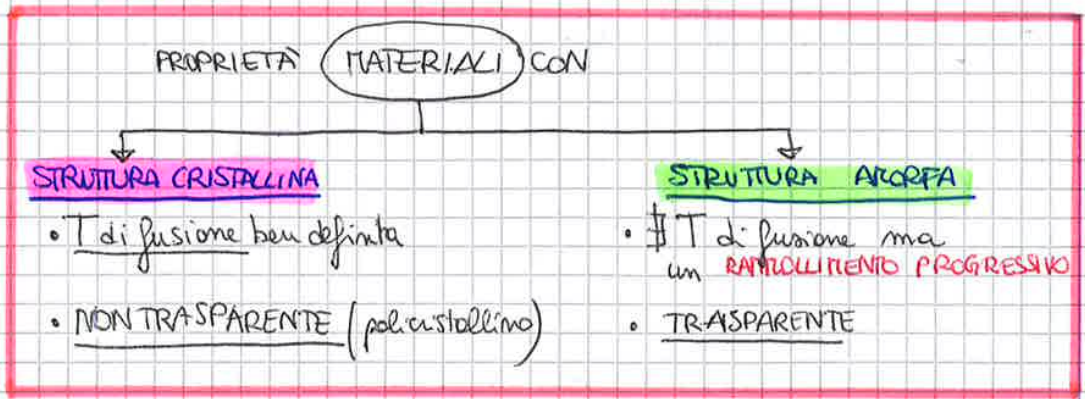
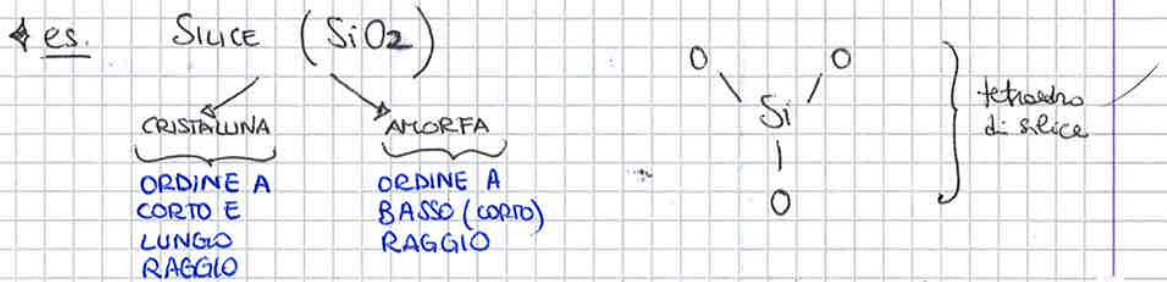
• flessibile

Es: pneumatici, vernici

b) **STRUTTURA DEI MATERIALI**

1) materiali possono essere classificati in funzione della regolarità con cui i loro atomi o ioni sono disposti nello spazio gli uni rispetto agli altri.

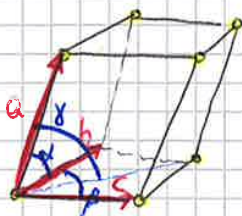
- 1) **STRUTTURA CRISTALLINA** → ordinata (metalli, ossidi, <sup>solidi covalenti</sup> ceramici, nitruuri, carburi)
- 2) **STRUTTURA AMORFA** → disordinata (polimeri amorfi, solidi amorfi, vetri)
- 3) **STRUTTURA SEMICRISTALLINA** → al loro interno presentano sia zone amorphe che cristalline in base al processo di raffreddamento subitico (polimeri semi cristallini, silice)
  - strutture cristalline immerse in una matrice amorfa



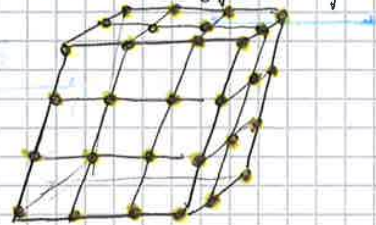
# STRUTTURA DEI MATERIALI

- Nei **MATERIALI CRISTALLINI** gli atomi/ioni/molecole sono sistemati in maniera ordinata in **posizioni geometriche ben definite** disponendosi ad una **distanze di EQUILIBRIO** tale per cui risultano essere termodinamicamente ed elettronegativamente stabili (forze repulsive = forze attrattive)

**CELLA UNITARIA**: solido geometrico regolare la cui ripetizione da origine al **RETICOLO CRISTALLINO** (ordine a lungo raggio). Atomi = **SFERE RIGIDE** a raggio ben definito  $d_{12}$  (tra 2 atomi) = diametro



CELLA UNITARIA



RETICOLO CRISTALLINO

→ Per descrivere una cella cristallina servono **6 parametri**

$$\left. \begin{array}{l} \text{LUNGHEZZA} \\ \text{in \AA} \\ [1-3 \text{ \AA}] \\ \text{(a. Toumanti)} \end{array} \right\} \begin{array}{l} a \\ b \\ c \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} a \\ b \\ c \end{array}} \right\} \text{parametri di cella}$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{array} \right\} \text{angoli di cella}$$

→ Se cambio la  $T \Rightarrow a, b, c$  variano perché il materiale si dilata questo perché gli atomi vibrano <sup>intorno le posizioni di equilibrio</sup> sempre ( $\Delta T > \Rightarrow$  vibrazioni maggiori).  
 Ad eccezione dello zero assoluto 0K in cui gli atomi sono fermi sulle posizioni di equilibrio.  
 All'  $T >$  oscillano intorno le posizioni di equilibrio provocando effetti macroscopici quali **dilatazione termica** e **fusione**.



SOLIDI CRISTALLINI

MONO CRISTALLINI

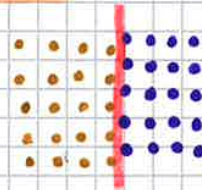
ripetizione regolare della  
cella elementare nello  
spazio che formano  
un MONOCRISTALLO

POLI CRISTALLINI

Aggregato di molti piccoli  
cristalli o **grani**

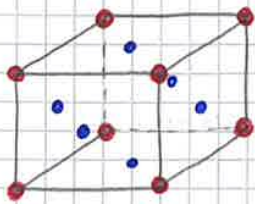
↓  
Vi è DISCONTINUITÀ nelle  
regioni di confine tra un  
grano e l'altro. Queste  
zone sono dette **bordi di**

**grano**

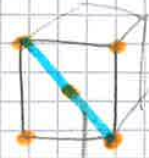


N.B. Ciascun GRANO è un  
unico cristallo

### ♦ STRUTTURA CUBICA A FACCE CENTRATE FCC, CFC



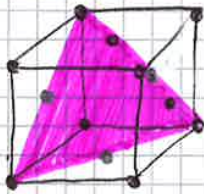
atomi disposti ai vertici e al  
centro di ogni faccia  
(+ densamente impacchettato)



Es: Fe ad alta t, Au, Cu, Al

la diagonale delle facce del cubo è la DIREZIONE A PIÙ ALTO  
IMPACCHETTAMENTO (A MAX IMPACCHETTAMENTO)

Il piano diagonale del cubo che taglia 3 facce è un  
PIANO A MAX IMPACCHETTAMENTO  
(atomi a contatto tra loro)



ACCIAI FERRITICI  $F_{\alpha}$



STRUTTURA BCC

a bassa t → fragile

ACCIAI AUSTENITICI  $F_{\gamma}$

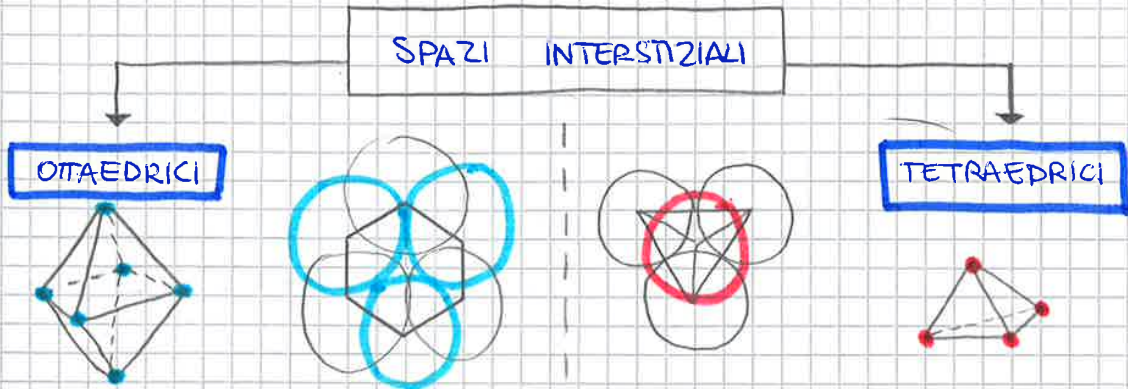


STRUTTURA FCC

a bassa t → + duttile

## SPAZI INTERSTIZIALI

Sono SPAZI VUOTI che influenzano le proprietà dei materiali  
(la loro presenza è dovuta al fatto che gli atomi non occupano tutto il V della cella unitaria)



Sovrapposizione di 2 sfere di sfere sferate di  $60^\circ$

↓  
Locusa a forma di ottaedro

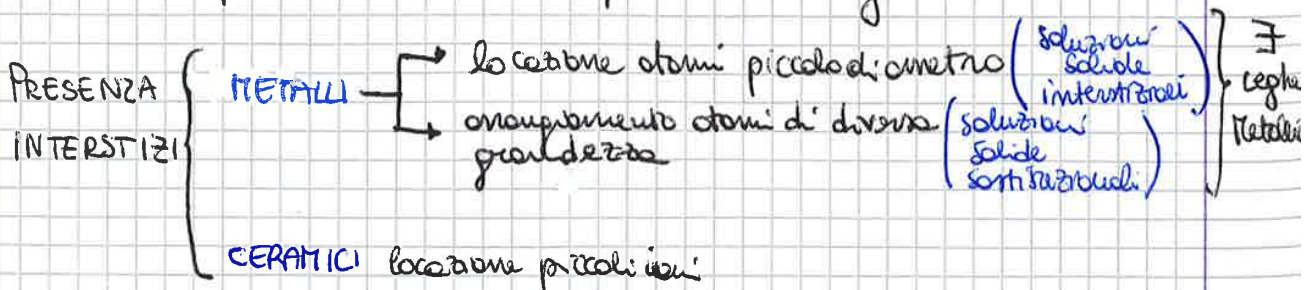
BCC → piccole dimensioni (OTI, TET)

FCC → poche OTI ma grandi  
→ poche TET piccole  
→ interstizio di dimensioni maggiori

Addeciamento di 3 sfere su uno stesso piano ed una quarta poggiata sulle precedenti

↓  
Tetraedro con vuoto al centro in grado di ospitare un atomo di piccolo diametro

Atomi di piccolo diametro si posizionano negli interstizi



# DIFETTI RETICOLARI

classificati in base alla dimensione



↓ DIFETTI RETICOLARI

Sono imperfezioni su scala atomica del reticolo cristallino. Essi influenzano tutte le proprietà del materiale: meccaniche, fisiche, termospiche.

Reticolo imperfetto (ovvero non ideale), ma questi difetti sono molto utili. Ecco perché l'acciaio (che ha un n° > di difetti) è più resistente del ferro.

↳ Invece un materiale che presenta DIFETTI MACROSCOPICI (FORI O CRICCHE) in genere non è un buon materiale perché essi possono essere deleteri. (es. Cu)

- vibrazioni atomiche (evaporazioni), più aumenta la  $T$ , più aumenta la vacante

→ La vacante permette la **DIFFUSIONE**: movimento degli atomi da un nodo reticolare ad un altro.

(ovvero gli atomi si spostano grazie agli spazi vuoti ovviamente solo se posseggono una certa energia ( $\Rightarrow$  influenza della  $T$ ))

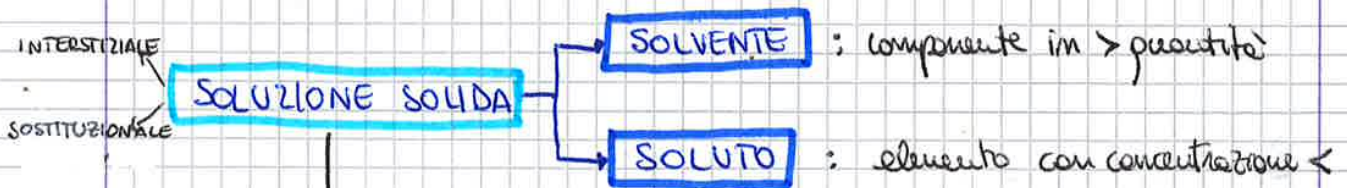
$\Rightarrow$  a  $T$  alta :

- + vacante
- + energia
- + diffusione

## (b) **ATOMI INTERSTIZIALI**

Sono dei difetti che permettono la creazione di una **SOLUZIONE SOLIDA** (miscuglio intimo di atomi, ovvero gli atomi si mischiano entrando nel reticolo di uno nell'altro)

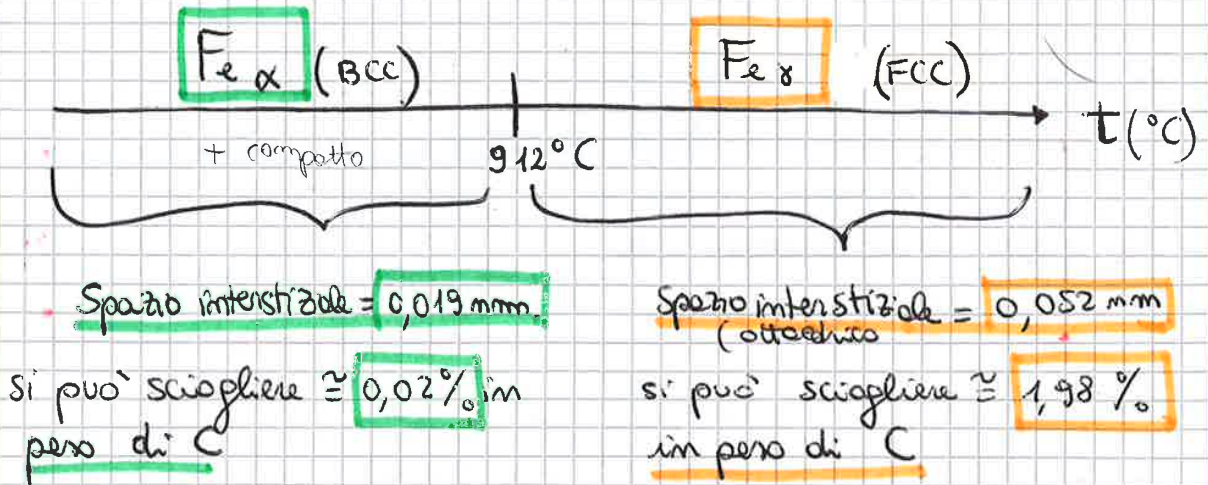
[es: leghe metalliche, bronzo, ottone, acciaio]



si forma se, per aggiunta di atomi di soluto nel solvente:

- viene mantenuta la **STRUTTURA CRISTALLINA** del SOLVENTE
- la composizione è omogenea: gli atomi impuri sono distribuiti uniformemente nel solido

**LEGHE INTERSTIZIALI Fe-C** [ $r(C) = 0,071 \text{ nm}$ ]

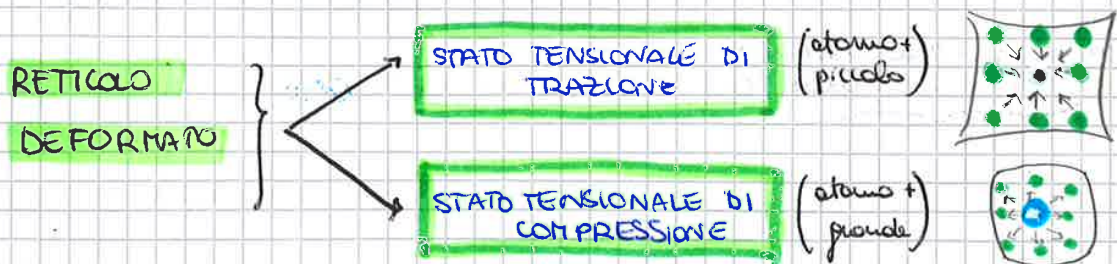


**(C) ATOMI SOSTITUZIONALI**

$\sim$  elettonegatività  
 $\sim$  dimensione

Atomi (più grandi o più piccoli) sostituiscono gli atomi ospitatori  $\Rightarrow$  SOLUZIONE SOLIDA SOSTITUZIONALE

$\Rightarrow$  generano delle perturbazioni nel reticolo.  
La distanza tra gli atomi dipende dall'equilibrio delle forze attrattive e repulsive

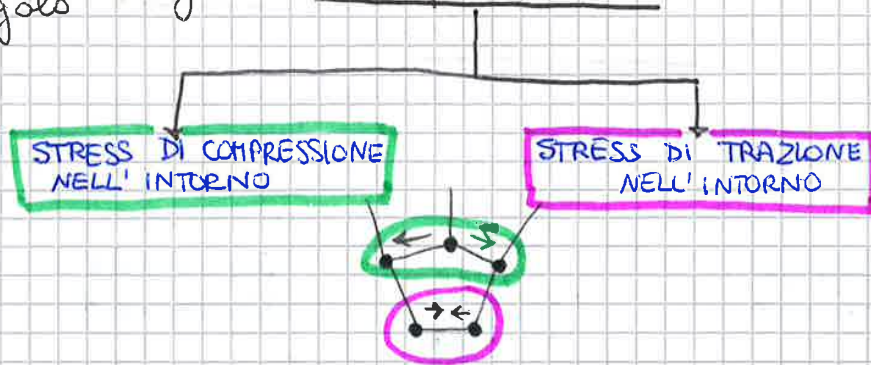


**N.B.** Se passo da un metallo puro ad una lega ho un rafforzamento (xk<sub>0</sub> la lega è meccanicamente + resistente xk<sub>1</sub> ha un reticolo distorto  $\Rightarrow$  le  $F^{INT}$  si oppongono alle deformazioni)  
CAMPI TENSIONALI = forze che tendono a riportare gli atomi nella posizione di equilibrio.

**CAMPI TENSIONALI** si oppongono alla deformazione plastica (ovvero al movimento delle dislocazioni)  $\Rightarrow$  **INCREMENTO CARICO SNERVAMENTO**

il vettore di Burgers  
e la linea di dislocazione } identificano la dislocazione inserita nel cristallo

La dislocazione genera 2 campi tensionali a spigolo



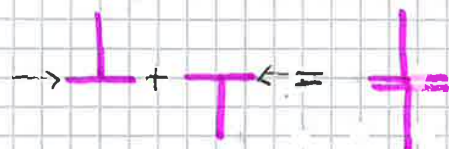
Dislocazioni con lo stesso verso si respingono, con verso opposto si attraggono e si annichilano

REPULSIONE :

i 2 campi (campo di compressione sopra e di trazione sotto) si sommano e si allontanano perché lo stato tensionale è troppo alto

ATTRAZIONE :

le 2 dislocazioni sono in senso inverso  
⇒ compensazione  
⇒ si forma un cristallo con 1 piano in + perfetto  
Si annulla la dislocazione

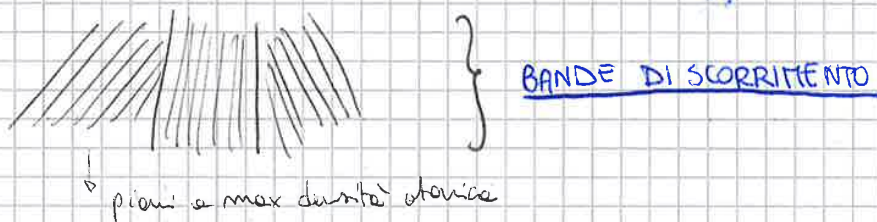


N.B. Le dislocazioni si muovono lungo il vettore di Burgers  $b'$

## Dislocazioni e piani

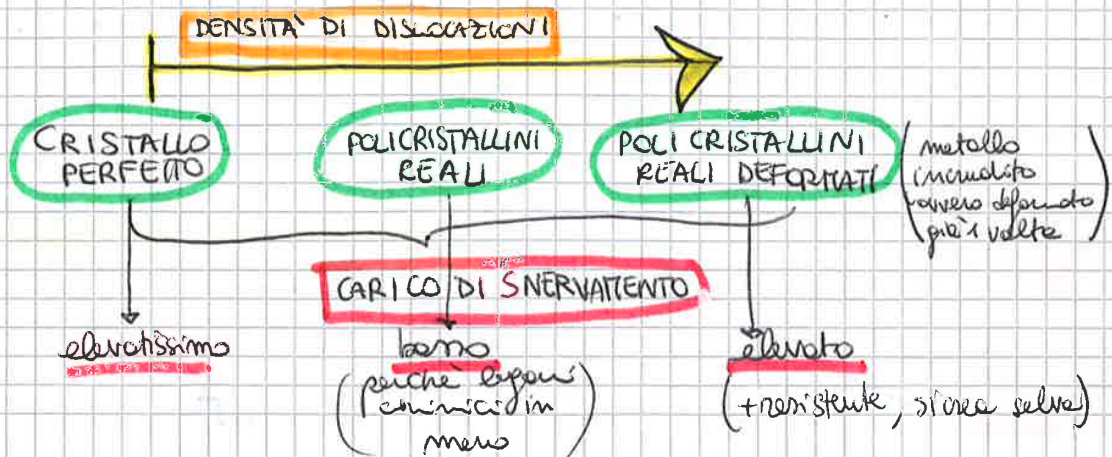


**N.B.** BCC - capacità di def. plastica rispetto a FCC anche se ha + sistemi di scorrimento  
 Xché BCC non ha piani ad impacchettamento così elevato come FCC (ma ha solo direzione max imp.)



Le dislocazioni in movimento generano altre dislocazioni  
 => il campione si deforma plasticamente  
 => si genera una SELVA DI DISLOCAZIONI

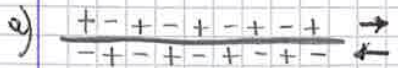
→ Le dislocazioni si bloccano le une con le altre (a causa della repulsione dei campi tensionali)



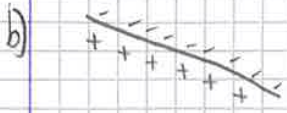


**DISLOCAZIONI NEI SOLIDI IONICI**

(ossidi, materiali fragili, poco densi)



a)  $\uparrow$  2 piani slittano <sup>in direzione non preferenziale</sup> fanno sì che si sovrappongono cariche dello stesso segno  $\Rightarrow$  repulsione  $\Rightarrow$  FRATTURA CRISTALLO



b)  $\uparrow$  2 piani slittano in direzione preferenziale (piani preferenziali). Il n° di piani è limitato. La dislocazione si può muovere perché le cariche non cambiano

$\Rightarrow$  Sono permessi pochissimi spostamenti  $\Rightarrow$  MATERIALI FRAGILI [Nom del. plastica  $\Rightarrow$  rottura fragile]

**DISLOCAZIONI NEI SOLIDI IONICI**

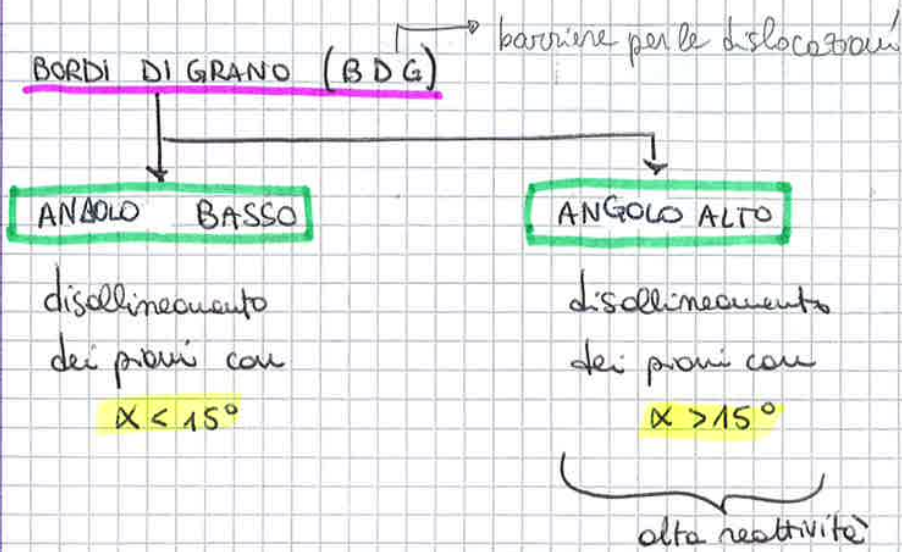
**FRAGILI**

- Gli ioni (le cariche) sfavorisano il moto delle dislocazioni.
  - Non ci sono piani ad alta densità atomica perché poco densi.
  - parametri reticolari alti
- $\Rightarrow$  sfavorisano movimento dislocazioni  $\Rightarrow$  materiali fragili

**DISLOCAZIONE NEI SOLIDI METALLICI**

**DUTTI**

- moto dislocativo favorito
    - elevato impaccettamento
    - parametri reticolari bassi
    - legame non direzionale
- $\Rightarrow$  materiali duttili, grande deformazione plastica



BDG sono regioni con STRUTTURA A TORFA, non cristallina.

N.B. BDG sono superfici (2D) mentre i grani 3D

Si concentrano in:

- soluti
- precipitati
- seconde fasi

È più spazioso libero perché gli atomi sono meno compatti, quindi la DIFFUSIONE avviene più velocemente

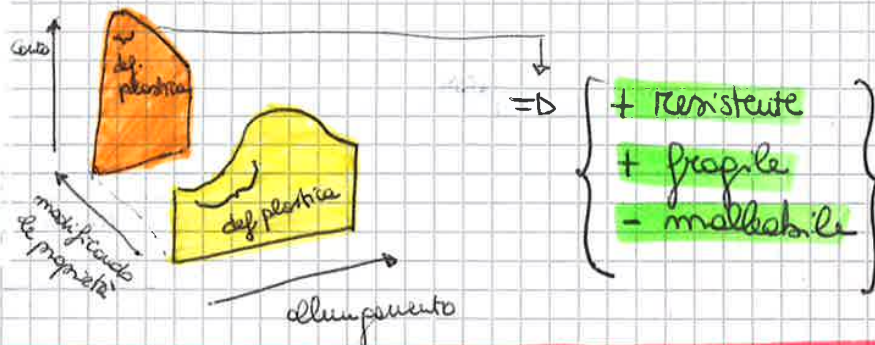
BDG hanno un contenuto energetico (dovuto alla presenza di molte dislocazioni) che è proporzionale all'angolo tra i 2 grani confinanti (+ grande  $\alpha$ , + alta energia)

⇒ maggiore reattività chimica

→ ad alte T → SCORRIMENTO VISCOSO lungo i BDG che diventano regioni di debolezza

## VANTAGGI DEI DIFETTI RETICOARI

Modificando i difetti posso modificare le proprietà termo-meccaniche dei materiali con lo scopo di RAFFORZAMENTO attraverso l'AUMENTO DEL CARICO DI SNERVAMENTO (ovvero per inibire la def. plastica a carichi + elevati)



**IN.B.** Nei METALLI PURI le dislocazioni si muovono facilmente  $\Rightarrow$  carichi di snervamento bassi

$\hookrightarrow$  La presenza di CAMPI TENSIONALI nel reticolo BLOCCA IL MOVIMENTO DELLE DISLOCAZIONI ( lo introduce spostando gli atomi dalle posizioni di equilibrio)

◇ METODI DI RAFFORZAMENTO NEI METALLI (obiettivo spostare il carico di snervamento a soglie più alte)

- ① ◇ INCRUDIMENTO
- ② ◇ AFFINAMENTO DEL GRANO (facce piane molto piccole  $\Rightarrow$  ho BDG in più  $\Rightarrow$  blocco le dislocazioni)
- ③ ◇ SOLUZIONI SOLIDE (sposta gli atomi dalle posizioni di equilibrio)
- ④ ◇ SECONDA FASE

Per affinare il grano di un metallo devo **SOLIDIFICARLO**  
**RAPIDAMENTE:**

$v$  di solidificazione  
+ alta  $\Rightarrow$  + grani fini

CARICO DI SMERNAMENTO + ALTO



### ◆ SOLUZIONE SOLIDA

Aumento la resistenza inserendo in lega elementi  
con raggio atomico  $\neq$  dal metallo base (soluzione solida)

$\Rightarrow$  **RETICOLO DISTORTO**  $\Rightarrow$  **CAMPI TENSIONALI** che  
si oppongono alla deformazione plastica  
 $\Rightarrow$  aumento carico di smernamento

N.B. Conoscendo la % di un componente in una  
lega  $\Rightarrow$  prevedo la resistenza del materiale

## DIAGRAMMI DI STATO

I diagrammi di stato sono dei grafici che ci danno delle informazioni sui cambiamenti di fase.

**LEGA** : materiale metallico ottenuto tramite la combinazione chimica di elementi diversi (non è un elemento puro)

**SOLVENTE** : elemento o composto in maggiore quantità (es: acciaio)  
Fe

**SOLUTO** : elemento o composto in minor quantità (es: acciaio)  
C, Ni, Cu

**SOLUZIONE SOLIDA** : lega ottenuta per aggiunta di soluto nel materiale ospite, in modo da preservarne la struttura cristallina e garantire l'omogeneità composizionale e strutturale

STRUTTURA CRISTALLINA → del SOLVENTE

POSIZIONE INTERSTIZIALE → SOLUTO  
o POS. SOSTITUZIONALE

**SISTEMA** : serie di leghe possibili

**FASE** : porzione omogenea con caratteristiche fisico-chimiche uniformi (sia a livello strutturale che di composizione)  
Sottoposte a perturbazioni reagisce in maniera identica in ogni sua parte.

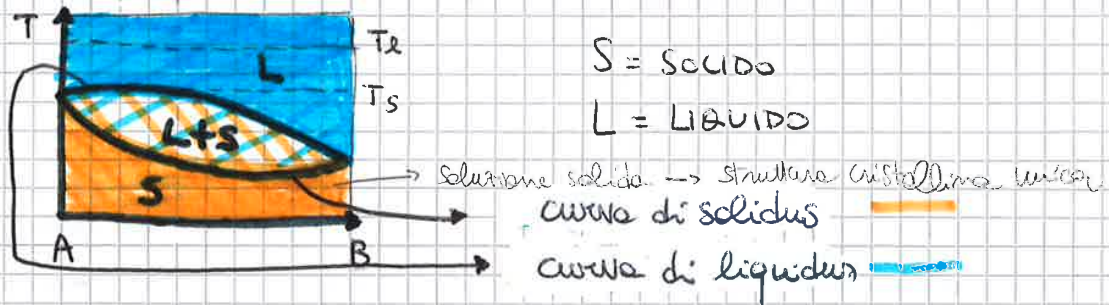
Esso può essere costituita da + di un elemento chimico

Un elemento o composto può presentarsi in + fasi diverse (H<sub>2</sub>O lip. e solida)

1

## DIAGRAMMI DI STATO A MISCIBILITÀ ILLIMITATA

Si ha miscibilità illimitata se 2 elementi o 2 composti sono completamente solubili sia nello stato solido che nello stato liquido. (Es: Cu-Ni, Ag-Au)



N.B. Tutte le leghe hanno un INTERVALLO DI FUSIONE ≠  
del rammollimento progressivo (passaggio di stato)

Per conoscere la composizione delle fasi  
↳ REGOLA DELL'ORIZZONTALE

Per conoscere le quantità delle fasi  
↳ REGOLA DELLA LEVA

## MICROSTRUTTURA DI UNA LEGA

### STRUTTURA

struttura cristallografica (es: cubica a facce centrate)

### MICROSTRUTTURA

tutte le caratteristiche dei grani in una fase

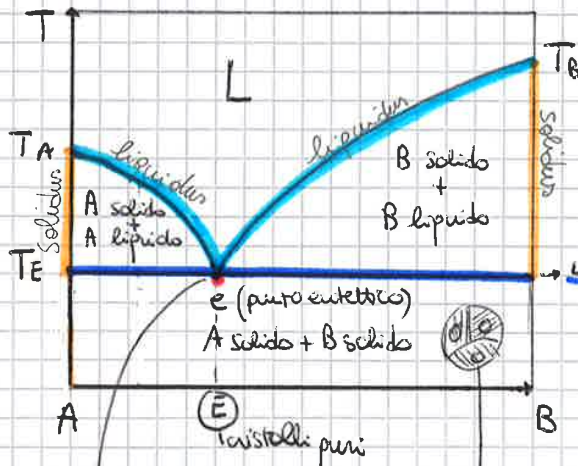
- tipo
- forma
- quantità
- dimensioni

(es: ferrite Fe-C unica fase policristallina  
con grani tutti uguali  
→ microstruttura uniforme)

2

## DIAGRAMMI DI STATO A MISCIBILITÀ NULLA ALLO STATO SOLIDO

2 elementi o composti con diverse - dimensioni - elettronegatività  
- strutture cristalline non possono miscelarsi allo stato solido



$T_B$  → temperatura di fusione

$T_E$  = temperatura eutettica alla quale il sistema ha meno energia e forma cristalli di A e B

LINEA DELL'EUTETTICO

in e → la lega fonde → **LEGA EUTETTICA**  
fonde ad una determinata  $T_E$  e si comporta come un elemento puro

**N.B. Alla solidificazione si ottengono due composti distinti**



lamelle alternate di A e B



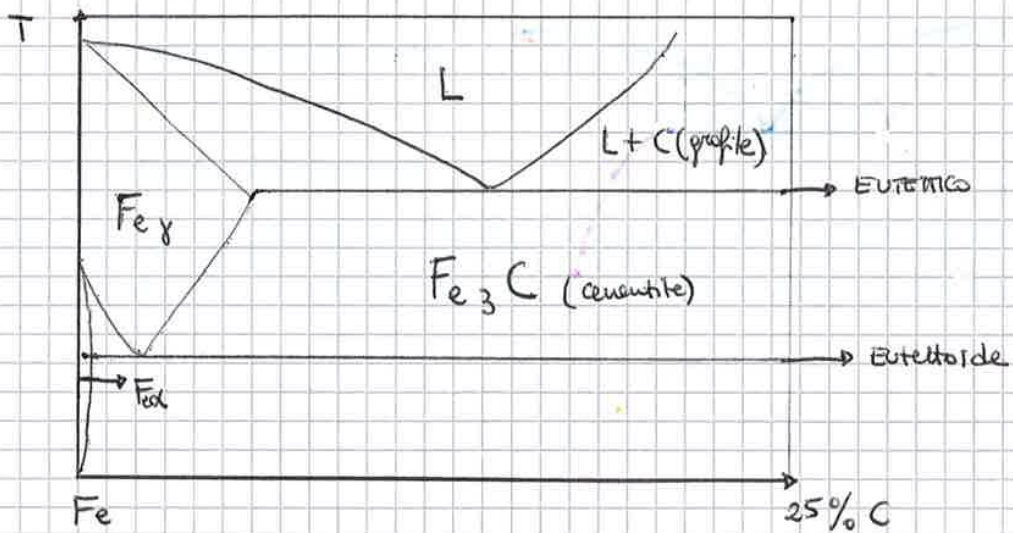
lamelle di A e grani di B

**LEGA EUTETTICA**

elementi si comportano come cristalli puri

REAZIONE	raffreddamento	Diagramma
EUTETICO	$L \rightarrow \alpha + \beta$ <i>e.g. sol. liq.</i>	
EUTETOIDE	$\alpha \rightarrow \beta + \delta$ <i>Solido solidi</i>	

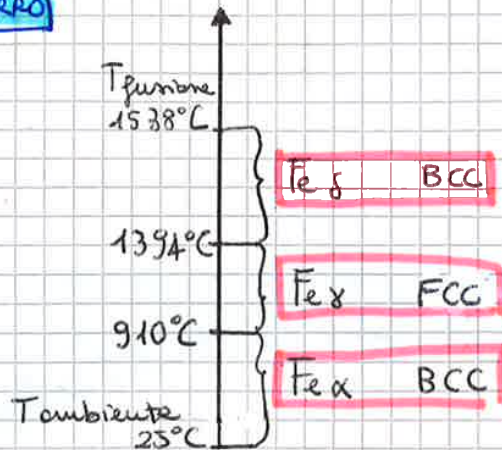
DIAGRAMMA REALE Fe - C (poco usato) (Ferro - grafite)





## FORME ALLOTROPICHE DEL FERRO

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{\text{fusione}} = 1538^\circ\text{C} \\ d_{\text{Fe}} = 7,84 \text{ g/cm}^3 \end{array} \right.$$



## LEGHE FERROSE

**ACCIAI**

$$0 < C < 2\%$$

**GHISE**

$$2\% < C < 4,3\%$$

- STRUTTURE
- AUSTENITE
  - FERRITE
  - PERLITE
  - CEMENTITE

$\blacklozenge$  **AUSTENITE** ( $\gamma$  stabile a  $t$  intermedie)

- Soluzione solida di  $\text{Fe } \delta$  e C

- STRUTTURA FCC FCC interst. maggiore solubilità che ha spazi  $\text{OIT} + \text{grandi}$  di BCC

- Carbonio interstiziale (solubilità MAX = 2% in peso)

$\blacklozenge$  **FERRITE** ( $\alpha$  stabile a basse  $t$ )

-  $\text{Fe } \alpha + \text{C}$

- STRUTTURA BCC

- Carbonio interstiziale (solubilità MAX = 0,03%)

$\Downarrow$   
 $\text{Fe } \alpha$  quasi puro, inadatto per applicazioni strutturali perché è duttile

## MICROSTRUTTURA

Acciaio: isole di perlite (dura e fragile) circondate da ferrite ( $Fe\alpha$  duttile)  $\Rightarrow$  resistente e duttile

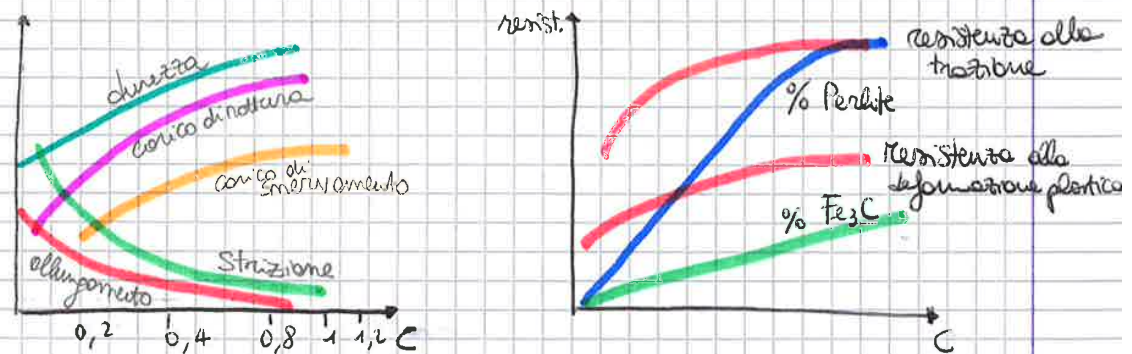
determina:

- 1) durezza
- 2) resistenza meccanica e alla corrosione
- 3) tenacità e duttilità
- 4) deformabilità e lavorabilità

influenzata da:

- 1) composizione materiale
- 2)  $\sigma$  di riscaldamento e raffreddamento
- 3)  $t$  e tempo di trattamento

## VARIAZIONE PROPRIETÀ MECCANICHE IN FUNZIONE DEL TENORE DI C



N.B.  $Fe_3C$  + dura e + fragile della Ferrite ( $Fe\alpha$ )

$\Rightarrow$  %  $Fe_3C$   $\uparrow$   $\Rightarrow$  materiale + duro  
 + resistente  
 - duttile  
 - tenace

+ Perlite + resistente alla trazione + è lavorabile  
 +  $Fe_3C$  + duro + fragile

**PROPRIETA' LEGHE Fe-C**

Microstruttura della perlite formata a T isoterma

- $T >$  ⇒ PERLITE GROSSOLANA (> diffusione)
- $T <$  ⇒ PERLITE FINE (< diffusione)
  - + durezza e resist
  - duttile della grossolana

se  $T <$  dell' EUTETTIDE (di poco) ⇒ PERLITE GLOBULAREO SFEROIDITE

↓  
diminuzione area di confine tra  $Fe\alpha$  e  $Fe_3C$

**ALTRI COSTITUENTI MICROSTRUTTURALI**

(MARTENSITE non la vedo sul grafico ma non è fase di equilibrio)

La **MARTENSITE** si forma quando <sup>le leghe di</sup> Fe-C raffreddate molto velocemente da  $T > A_3$  a T.a.

↓  
fase SINGOLA in condizioni di non equilibrio che si forma senza diffusione

ovvero Essa si forma quando  $T$  raffreddamento  $\gg$  : diffusione C-X

⇒ l' **AUSTENITE FCC**  $\xrightarrow[\text{polimeri in}]{\text{trasformazione}}$  **MARTENSITE TCC** (tetragonale a corpo centrato)

**N.B.** Molti acciai conservano la loro struttura martensitica a T.a. ⇒ FASE METASTABILE

Martensite: hanno m° di piani di scorrimento della struttura TCC e atomi interstiziali che ostacolano il movimento delle dislocazioni

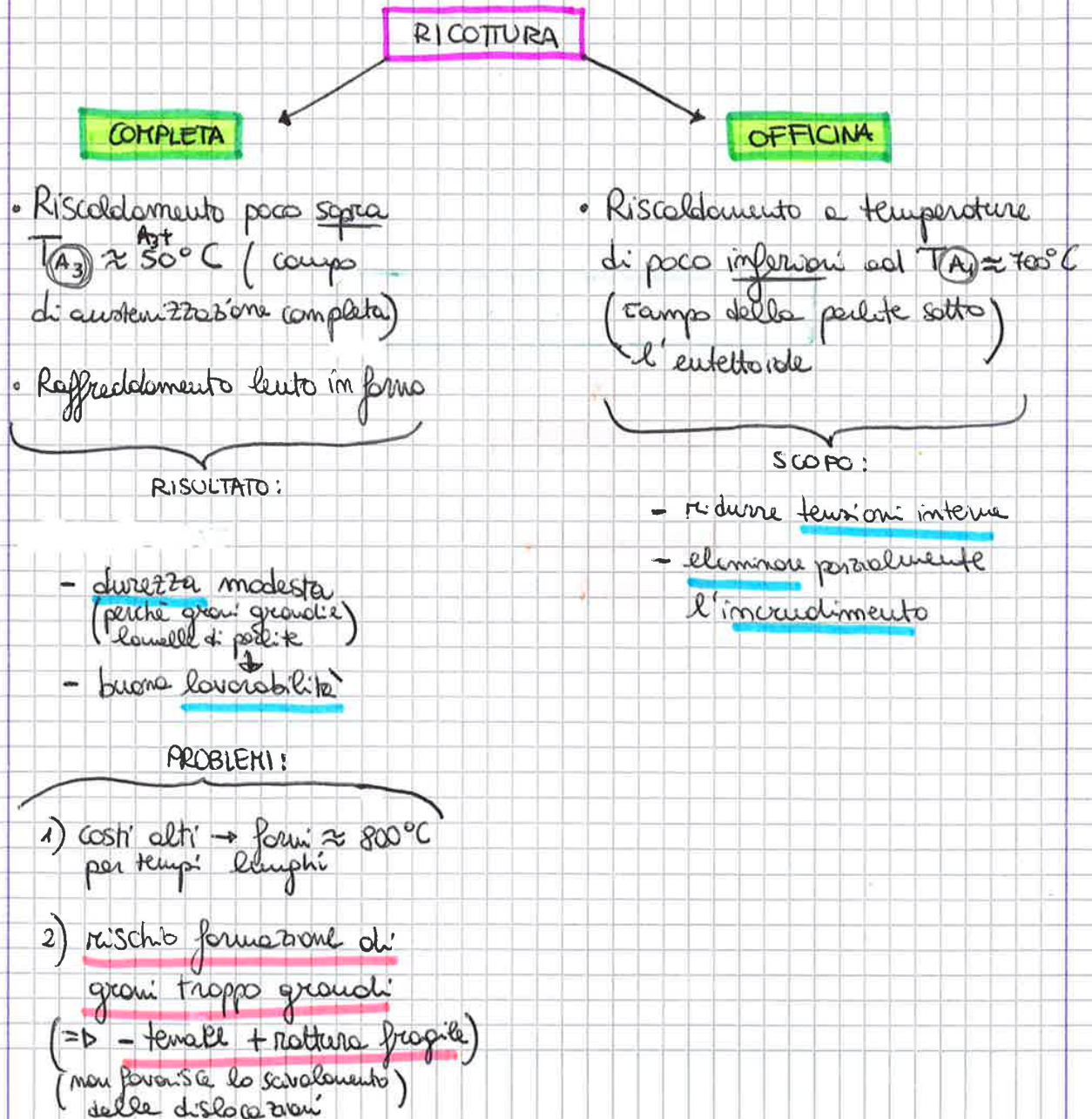
1)



## RICOTTURA

Processi che addolciscono l'acciaio per poterlo lavorare meglio. Si usa per

- 1) OMOGENEIZZARE LA COMPOSIZIONE DELL'ACCIAIO
- 2) ELIMINARE LE TENSIONI INTERNE di precedenti lavorazioni
- 3) conferire CARATTERISTICHE DI LAVORABILITÀ E DUTILITÀ



## TEMPRA MARTENSITICA SQUARE

tempra + blanda → minimizza le tensioni e le  
crucche dovute a raffreddamento  
non omogeneo

### PROCEDIMENTO

1) immergo i pezzi in un bagno salino a

$T_{\text{poce}} > M_s$  (temperatura di formazione martensitica)  
(cost)

↳ si trova su tabelle (no diagrammi)

2) Raffreddamento ad olio fino a T.e.

↳ la trasformazione martensitica avviene uniformemente  
su tutto il pezzo ⇒ - cruciali - difetti - tensioni interne

⇒ OTTENGO: STRUTTURA COMPLETAMENTE MARTENSITICA

martensite rinvenuta: particelle di cementite molto piccole uniformemente disperse in una matrice di ferrite  
(di martensite rinvenuta  $t = 1h$ )

+ durezza  
ie  
rimv.  
↓  
< durezza  
> crescita  
di  $Fe_3C$

### RINVENIMENTO

(adolcisce il metallo portandolo dal + duro possibile)

Si effettua su acciai che hanno subito o

- tempra o
- normalizzazione

- RIDUCO FRAGILITÀ
- MAGGIORE RESISTENZA AGLI URTI
- PICCOLA DIMINUIZIONE DUREZZA

(  
> duttilità  
> tenacità  
< tensione interna

realizzati scaldando a  $T < T_{trasformazione} \Rightarrow$  cambiamenti strutturali della martensite  $\Rightarrow$  si raffredda in aria od olio  
+ alta  $T \Rightarrow$  > dimensione grani  $Fe_3C$  < ferrite/ $Fe_3C$   $\rightarrow$  < durezza  
< resistenza  
> duttilità  
> tenacità

### 5) BONIFICA

TRATTAMENTO

- 1) TEMpra
- +  
2) RINVENIMENTO

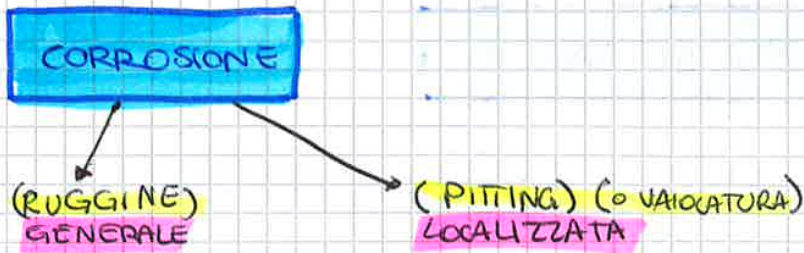
acciai da bonifica

### ACCIAI DA BONIFICA

Acciai al C o debolmente legati

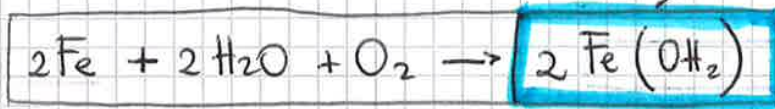


> dimensioni > proprietà meccaniche  $\Rightarrow$  acciaio con tenacità elevata

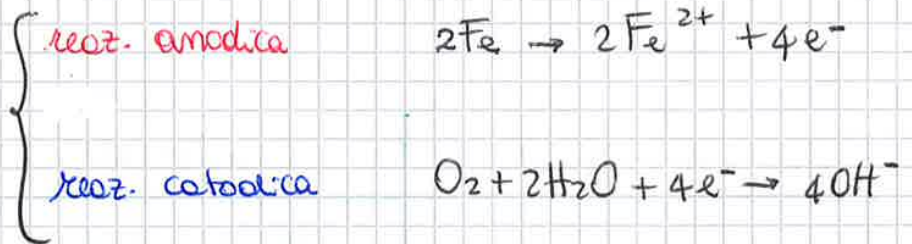


◇ CORROSIONE GENERALE

formazione di ruggine superficiale



Ruggine



La corrosione dipende dalla reattività di un metallo

+ potenziale negativo → + reattivo

$$\Delta G = -n F \Delta E$$

→ cost Faraday  
 ↓                      ↘ d.d.p.  
 valore 1600

se  $\Delta G < 0 \Rightarrow$  avviene la reazione perché prodotti più stabili dei reagenti

## ✦ CORROSIONE NELLE ARMATURE DEL CLS

Tipo di corrosione: ad umido (xke c'è  $H_2O$  nel CLS)  
 elettrolita  
 (conduttore)

SOLUZIONE DI IPROSSIDO DI SODIO E DI POTASSIO (pH 13/14 o 12,5)  
 basico

In soluzioni alcaline aeree con pH > 11,5  
 (sute la presenza di cloruri) Fe si ricopre di film di ossido

Condizioni di PASSIVITA'  $\cong V_{corrosione} = 0$

### CAUSE DELLA CORROSIONE

#### CARBONATAZIONE

(effetto secondario)  
 (liberazione)

$CO_2$  (acida) nell'aria neutralizza  
l'alcalinità del CLS  
 (basicità CLS neutralizzata)

⇒ la soluzione mai porosa a pH < 9 ⇒  
 distruzione del film di ossido delle armature

valore min  
 pH = 11,5

⇒ CORROSIONE UNIFORME  
 della superficie dell'  
 armatura in presenza  
 di  $H_2O$  e  $O$

#### PRESENZA DI CLORURI

Se l'ambiente presenta CLORURI essi penetrano  
fino alle armature  
il film si rompe  
localmente (pitting)

Rotto il film la corrosione  
 va avanti se e solo se  
 ⇔ presenza di  $H_2O$  e  $O$



## ↳ PREVENZIONE DELLA CORROSIONE DELLE ARMATURE

- ispezione ferri
- manutenzione
- evitare spigoli vivi e geometrie complesse
- evitare zone ristagno acqua

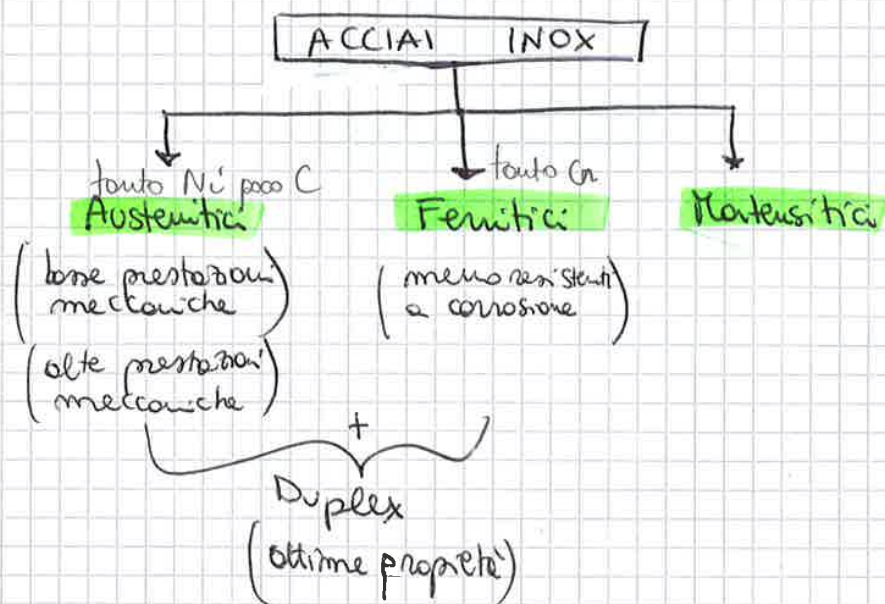
## ACCAI INOSSI DABILI (inox)

Acciai al **Cr** o **Ni + Cr**

con tenore di **Cr  $\geq 12\%$**

- Capacità di mantenere superficie lucida
- resistenza buona alla corrosione

- strato di ossido di Cr superficiale
- Microstruttura omogenea e massiccia



acciai in barre ad aderente migliorata

- ACCIAIO NERVATO -

• **B450 C** (acciaio laminato a caldo)

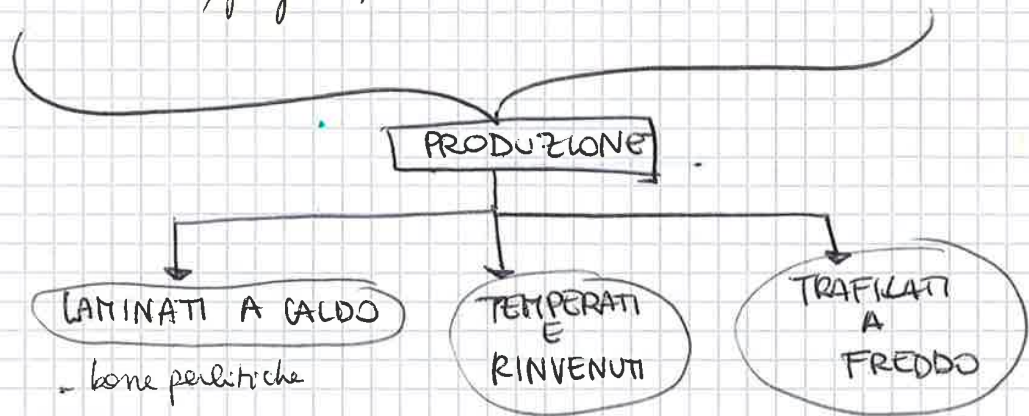
- Carico di smernamento = 450 MPa
- carico di rottura = 540 MPa
- deformazione minima percentuale al carico MAX = 7,5 %
- composizione controllata (C < 0,22 %, P e S < 0,05 %)

② **ACCIAIO PER CCS PRE-COMPRESSO**

- carico smernamento elevato 1000/1800 MPa
- [C]<sub>max</sub> = 0,9 %
- presente Mn, Cu, Mo, V

Non saldabili

- diminuzione nel tempo dello sforzo a carico cost può diminuire la pre-compressione
- duri, fragili, non duttili



Corfu → acciaio di qualità → piccola % di Cr  
→ corrosione iniziale ⇒ ruggine protettiva

# PROPRIETÀ MECCANICHE

**PROPRIETÀ MECCANICHE** → materiale sottoposto ad uno **SFORZO ESTERNO**

descrivono il modo in cui il materiale si comporta quando lo:

- si tira
- si comprime
- si piega
- si torce
- colpo netto

PROPRIETÀ	COMPORTAMENTO
ELASTICITÀ	comportamento reversibile
PLASTICITÀ	capacità di subire cambiamenti irreversibili di forma in risposta alle forze applicate
FRAGILITÀ	tendenza a rompersi senza deformazioni e snervamenti (modo in cui si rompe)
USURA	particolare condizione di prove del materiale (scarnamento di 2 pezzi)
DUREZZA	Valore numerico che indica le caratteristiche di deformabilità plastica di un materiale
FATICA	materiale sottoposto a carichi ciclici nel tempo si danneggia fino alla rottura

## STATI DI SOLLECITAZIONE MECCANICA

L'applicazione di una  $F$  crea alla struttura uno STATO DI SOLLECITAZIONE che determina una DEFORMAZIONE

DEFINIZIONI

### ◆ SFORZO o TENSIONE $\sigma$

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

forza  
superficie  $\left[ \frac{N}{m^2} = Pa \right]$

### ◆ DEFORMAZIONE $\epsilon$

(si verifica in seguito a sollecitazioni di trazione o compressione)

$$\epsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

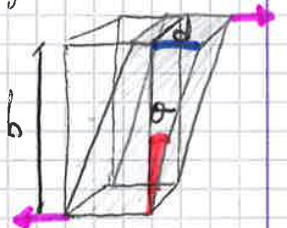
$l_0$  = lunghezza iniziale  
 $l$  = " in seguito a sollecitazione  
[adimensionale]

### ◆ DEFORMAZIONE DA TAGLIO $\gamma$

(in seguito a sollecitazioni di taglio)

$$\gamma = \frac{d}{b} = \operatorname{tg} \theta$$

$\theta$  = angolo di taglio  
se  $\theta$  piccolo  $\operatorname{tg} \theta \approx \theta$



3 STATI DI SOLLECITAZIONE

◆ TRAZIONE



◆ COMPRESSIONE



◆ TORSIONE → TAGLIO

o prima  
o



◆ COEFFICIENTE DI POISSON (dipende dalla dilatazione del materiale)

descrive il comportamento elastico di un materiale, ovvero l'allungamento in direzione del carico (con un conseguente restringimento della sezione)

$$\nu = \frac{-\epsilon_{lat}}{\epsilon_{ass}}$$



N.B. Se la deformazione avvenisse a  $V_{volume} = \text{cost} \Rightarrow \nu = 0,5$  sempre. Ma poiché  $V \neq \text{cost}$  ma aumenta durante la trazione  $\Rightarrow$

$$\begin{aligned} 0,17 < \nu_{\text{CERAMICI}} < 0,27 \\ \nu_{\text{METALLI}} &\approx 0,33 \\ 0,33 < \nu_{\text{POLIMERI}} < 0,5 \\ 0,15 < \nu_{\text{CLS}} < 0,2 \end{aligned}$$

se  $\nu = 0 \Rightarrow$  la contrazione laterale è nulla

se  $\nu < 0 \Rightarrow$  MATERIALI AUXETICI (es: spugne)

(se  $\nu = -1 \rightarrow$  spugne)

◆ **PLASTICITA'** (inizio moto di dislocazioni)

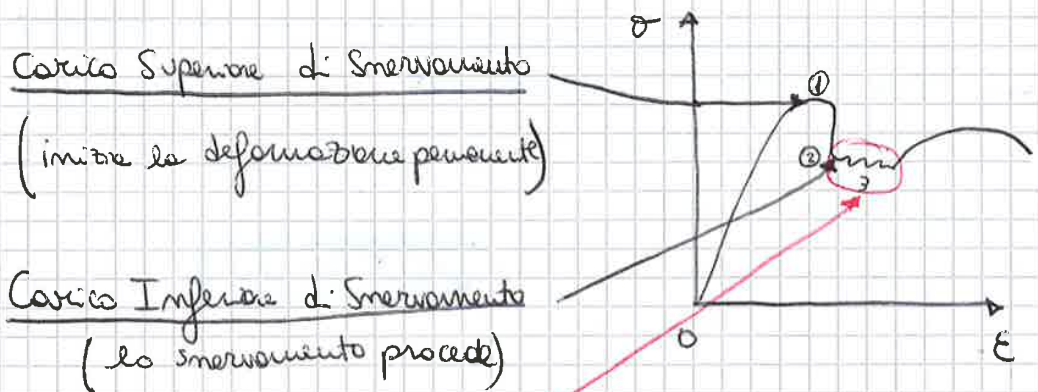
↑ **materiali DUTTI** sollecitati oltre il limite

elastico → deformazione plastica (irreversibile) (atomi scivola per dislocazioni)

$\sigma_y$  = carico di snervamento oltre il quale induce la deformazione permanente (limite) (difficile da indovinare per concentrazioni  $\sigma_3$  corrisponde ad una deformazione permanente del 0,2%)

**N.B. IN campo plastico non vale la legge di Hooke**

Negli ACCIAI a basso tenore di C si hanno 2 carichi di snervamento:



**BANDE DI LÜDERS** righe sul provino che rendono il materiale non liscio ma a gradini

inizio moto delle dislocazioni in (1)

procede in maniera non uniforme in (2)

⇒ genera delle bande di Luders (effetti macroscopici) gradino

Ogni banda rappresenta la traccia superficiale di una serie di piani di scorrimento ad alta densità atomica sul quale si sono generati carichi di taglio tali da provocare il moto delle dislocazioni

**N.B.** Le curve di sforzo  $\sigma$  / deformazione  $\epsilon$  dipendono dalla temperatura.

Infatti alcuni materiali (polimeri) passano da un comportamento fragile ad uno duttile in base alla temperatura

### PROPRIETÀ DEI CERAMICI

CERAMICI  $\rightarrow$  FRAGILI  $\rightarrow$   $\nexists$  deformazione plastica

$\sigma_y$  = carico di snervamento è molto alto

la rottura  $\equiv$  <sup>carico</sup> rottura dei legami forti covalenti-ibridi

$\downarrow$   
difficile lo spostamento delle dislocazioni  $\rightarrow$  assenza plasticità

**Cause di fragilità dei ceramici:**

- 1) POROSITÀ
- 2) DIFETTI SUPERFICIALI

N.B. Le curve di sforzo  $\sigma$  / deformazione  $\epsilon$  dipendono dalla temperatura.

Infatti alcuni materiali (polimeri) passano da un comportamento fragile ad uno duttile in base alla temperatura.

### PROPRIETÀ DEI CERAMICI

CERAMICI  $\rightarrow$  FRAGILI  $\rightarrow$   $\nexists$  deformazione plastica

$\sigma_y$  = carico di snervamento è molto alto

la rottura  $\equiv$  <sup>carico</sup> rottura dei legami forti covalenti-ionici

difficile lo spostamento delle dislocazioni  $\rightarrow$  assenza plasticità

Cause di fragilità dei ceramici:

- 1) POROSITÀ
- 2) DIFETTI SUPERFICIALI



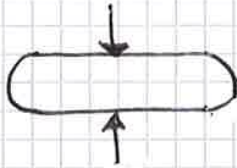
## INCONVENIENTI LEGATI ALLE DIMENSIONI DEI PROVINI

- Se la sezione è troppo grande

$$\frac{\text{LUNGHEZZA}}{\text{DIAMETRO}} < 2$$

⇒ **BARRELING** :

il provino durante la compressione si deforma al centro ma sui lati non si ha forte attrito



⇓  
prova falsata

- Se la sezione è troppo piccola

$$\frac{\text{LUNGHEZZA}}{\text{DIAMETRO}} > 5$$

⇒ **CARICO DI PUNTA** :

difficile allineare perfettamente la F lungo l'asse centrale del provino



⇓  
non pure compressione ma taglio

⇓  
prova falsata

localmente lo stress della cricca è  $\gg$  del  $\sigma_{applicato}$ .  $\Rightarrow$   
 Nei materiali duttili si forma una zona plastica nell'interno  
 della cricca. Proseguendo col carico ciclico  $\Rightarrow$  zona  
 plastica si estende ed inaridisce  $\Rightarrow$  cricca avanzata.

Come prevenire?

✦ **TENSIONE LIMITE DI FATICA**

(oltre il quale il materiale non)  
 sopporta + altri cicli)

al di sotto del quale non si verificano  
 fenomeni di rottura a fatica anche  
 per un  $n^{\circ}$   $\infty$  di cicli

✦ **N° CICLI PROBABILE ROTTURA**

ACCIAI  $\longrightarrow$  <sup>range che dipende dalla geometria</sup> 30 - 60 % della resistenza  
 a trazione

LEGHE NON  
 FERROSE  $\longrightarrow$   $\nexists$  limite definito



→ Se uso INDENTATORE CON PUNTA SFERICA

$$H_B = \frac{\text{Carico}}{\text{Area impronta}}$$

↓  
durezza

METODO BRINELL

→ Se uso INDENTATORE CON PUNTA PIRAMIDALE

$$H_V = \frac{\text{Carico}}{\text{Area impronta}}$$

METODO VICKERS

→ altre prove di durezza

• RIMBALZO (PROVA SHORE)

oggetto di dim e massa definite viene fatto rimbalzare → misura rimbalzo

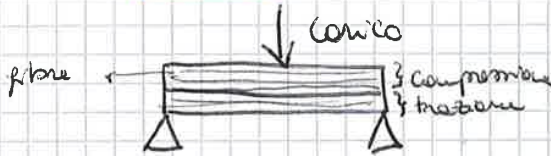
SUP. DURE (meno plastiche) ⇒ rimbalzo maggiore

• RIGATURA (SCRATCH TEST)

Indentatore preffe sotto carico costante  
→ si valuta il solco

ALTRE PROVE

1) FLESSIONE A 3 PUNTI - 4 PUNTI



**FLUAGE DEL CLS**

deformazione lenta (o scorrimento viscoso) di un materiale sottoposto a carico costante nel tempo ( $\approx 30$  anni).

Il comportamento meccanico del CLS dipende dal rapporto  $\frac{a}{c}$  (al decrescere di  $\frac{a}{c} \Rightarrow$   $\leftarrow$  scorrimento viscoso)



{ + scorso è il CLS e poroso  
+ è evidente il fenomeno }

Se rimuovo il carico lentamente la trave può tornare nel suo asse

Se non è il carico ad essere costante ma  $E = cost$  (deformazione costante)  $\Rightarrow$  PROGRESSIVO RILASSAMENTO DEL CARICO

$\Rightarrow$  **FATICA STATICA** se  $\sigma > 70\%$  della resistenza a compressione  $\Rightarrow$  frattura precoce

## PROVA DI ROTTURA DEL CUS

- 1) regolarità geometrica (dim e peso)
- 2)  $v_{prova} =$  velocità di incremento del carico costante  
||  
50 N/cm<sup>2</sup>s
- 3) tempo = pochi minuti

RISULTATO

CARICO DI ROTTURA

⇒ calcolo la resistenza media del materiale con calcoli statistici ⊕

## ♦ TIPI DI ROTTURA (indica della resistenza del cus)

si rompe in serie di piramidi con faccia con angolo  $\approx 45^\circ$  con la base

↳ CUS elevata resistenza a compressione

(i materiali scadenti si sbriciolano senza precisi piani di rottura)

## FORTAZIONI PIRAMIDI DI ROTTURA ⇔ sforzi tangenziali

Il comportamento del materiale è controllato dalle cricche che non si propagano fino a  $\approx 30\%$  del carico max. Propagandosi le cricche aumentano in numero.

Raggiunto oltre 80% carico max ⇒ cricche instabili e si propagano anche senza aumento del carico.

## MODULO DI ELASTICITÀ NEL CLS



Materiali come CLS che hanno una microstruttura fortemente disomogenea il modulo elastico dipende da molti parametri

$E_c$  = modulo secante = pendenza retta tangente per 0 e intersecante la curva al 40% dello sforzo max.  
 → 40% perché corrisponde al valore limite entro il quale il comportamento del materiale è permanentemente elastico.

**CLS** → segue la LEGGE DI HOOKE se soggetto a sforzi di compressione di breve durata e < 30% della sua resistenza a compressione, oppure a sforzi di trazione ≤ 70% della sua resistenza a trazione.

Il modulo elastico del CLS è variabile in funzione di parametri tecnologici:

1) CLASSE DI RESISTENZA DEL CLS

(↑ resistenza ⇒ ↑ E)

2) COMPOSIZIONE GRANULOMETRICA

3)  $\frac{a}{c}$

4) MODALITÀ DI POSA IN OPERA

5) GRADO DI MATURAZIONE

CLS SCARSI  
 $E \approx 15000 \frac{N}{mm^2}$

CLS OTTIMI  
 $E \approx 45000 \frac{N}{mm^2}$

$E_{CLS \text{ MAX}} \rightarrow$  in 6 anni

### a) Aumento di temperatura

Riscaldamento  
(fornisco calore)  $\rightarrow$  aumenta l'ampiezza delle  $\Rightarrow \uparrow T$   
vibrazioni termiche ( $\uparrow E_k$ )

- degli atomi / ioni / molecole intorno alle loro posizioni di equilibrio
- degli atomi all'interno delle molecole (influenza sui polimeri che fa sì che siano dei buoni isolanti)
- moti rotatori delle molecole
- moto elettronici (se metalli o semiconduttori)

### b) Dilatazione termica

Energia fornita dal riscaldamento non tutta trasformata in  $E_k$  ma parte in  $E_{pot}$  causando l'aumento delle distanze tra atomi / molecole / ioni.

### c) Trasformazioni di fase

Il calore fornito viene utilizzato per far avvenire la trasformazione stessa. La  $t$  è costante e non aumenta perché utilizza tutto il calore a disposizione finché la trasformazione non è avvenuta ( $\Rightarrow$  non trasformata in  $E_k$ )

✦ **CAPACITÀ TERMICA**

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

© **CALORE SPECIFICO** (capacità termica specifica)

Sostanze con c alto variano lentamente la loro temperatura quando vengono riscaldate o raffreddate

Capacità termica di una massa unitaria di materiale ( $1/kg$ )  
(dipende solo dal tipo di materiale)

$$c = \frac{dQ}{m dT} \quad \left[ \frac{J}{kg K} \right] \text{ o } [cal]$$

[CALORIA = calore per  $\uparrow$  di  $1^\circ C/K$  la T di  $1 g$  di  $H_2O$ ]

**N.B.** Non dipende dalla natura del chimico del materiale, né dalla struttura cristallina, né dal tipo di legame, ma solo dal **PESO ATOMICO** del MATERIALE

Se P.A.  $\downarrow \Rightarrow c \uparrow$

© **CALORE ATOMICO O MOLARE**

Per aumentare di  $1^\circ C/K$  la t di un materiale devo fornire  $25 J$  per ogni mole di sostanza ( $N_A$ )

per moli solidi  $\bar{c} \approx 25 \frac{J}{mol K}$

- T basse  $\Rightarrow C_{mol}$  dipende
- T.a  $\Rightarrow C_{mol} = cost = 25 \frac{J}{mol K}$
- T alte  $\Rightarrow C_{mol} \approx (>) 25$



© **MECANISMI DI CONDUZIONE**

Q in un materiale è trasportato dai:

- fononi
- elettroni

$$K = K_{e^-} + K_f$$

la conducibilità termica è funzione della temperatura

Se  $\uparrow T \Rightarrow$  peggiora la propagazione dei fononi  
 (perché si propagano meglio quando ci sono poche vibrazioni ( $E_k \downarrow$  e  $t + \text{basso}$ ))



N.B. La **CONDUTTIVITÀ TERMICA** dipende da:

- |  |  |
|--|--|
| $\left. \begin{array}{l} \text{fononi} \\ \text{moto} \\ e^- \end{array} \right\}$ | <ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>DIFETTI RETICOLARI</b></li> <li>- <b>MICROSTRUTTURA</b></li> <li>- <b>PROCESSO DI LAVORAZIONE</b></li> </ul> |
|--|--|

N.B. [Metalli + resistenti meccanicamente ( $\sigma_y$  alto)]  
 non sono buoni conduttori termici e elettrici

**CONDUTTIVITÀ TERMICA DICHIARATA (UTILE) (2)**

valore di conducibilità termica relativa a 25 °C di esercizio del prodotto misurato a 10°

**RESISTENZA DICHIARATA (UTILE)**

96

$R = \frac{S}{\lambda}$  → spessore di isolante  
 → C.T.D.

Capacità di opporsi al passaggio del calore

$$\frac{l}{R} = \text{Fluss termico utile} / \Delta T$$

## ◆ DILATAZIONE TERMICA

### ◎ MATERIALI POLIMERICI TERMOPLASTICI

elevata espansione termica  
perché catene macromolecolari legate con legami deboli  
e non ci sono reticolazioni

### ◎ MATERIALI TERMOINDURENTI

presenti reticolazioni (legami di Van der Waals sostituiti da legami covalenti tra le macromolecole)

⇒ valore espansione termica ↓

### ◎ SOLIDI CON LEGAME FORTE

- alto  $E$  (modulo elastico)
- alto punto di fusione
- basso coefficiente di dilatazione termica

Se sollecitato (compressione/trazione) ripetutamente

↓  
deformazioni / fratture

$$\sigma = E \alpha_e \Delta T$$

se  $\begin{cases} \Delta T < 0 & \sigma < 0 \Rightarrow \text{COMPRESIONE} \\ \text{(scaldamento)} \\ \Delta T > 0 & \sigma > 0 \Rightarrow \text{TRAZIONE} \\ \text{(raffreddamento)} \end{cases}$

- ↳ ◆ CERAMICI hanno  $\alpha$  xke legami forti  
anisotropo xke strutture cristalline a buona simmetria
- ↳ ◆ CERAMICI AMORFI E A STRUTTURA CRISTALLINA CUBICA  
 $\alpha \rightarrow$  isotropo = uguale in tutte le direzioni

# POLIMERI

## NATURA FISICA E CHIMICA DEI POLIMERI

### MACROMOLECOLE

catene lineari o ramificate di unità ripetitive

### UNITÀ RIPETTIVA

Unità chimica minima dalla cui ripetizione → catena polimerica

### MONOMERI

Reagenti per ottenere polimeri. Derivano dal petrolio e dal metano principalmente

## LEGAMI ALL'INTERNO DELLE CATENE

→ legami inter-molecolari  
influenzano • rigidità  
• viscosità • res. mecc

### FORTI E COVALENTI

## LEGAMI TRA LE CATENE

→ determinano le proprietà meccaniche di un polimero

### DEBOLI (termoplastici)

### COVALENTI (resine termoindurenti)

### PONTI S (elastomeri)

USO DI CARICHE → fino 80%

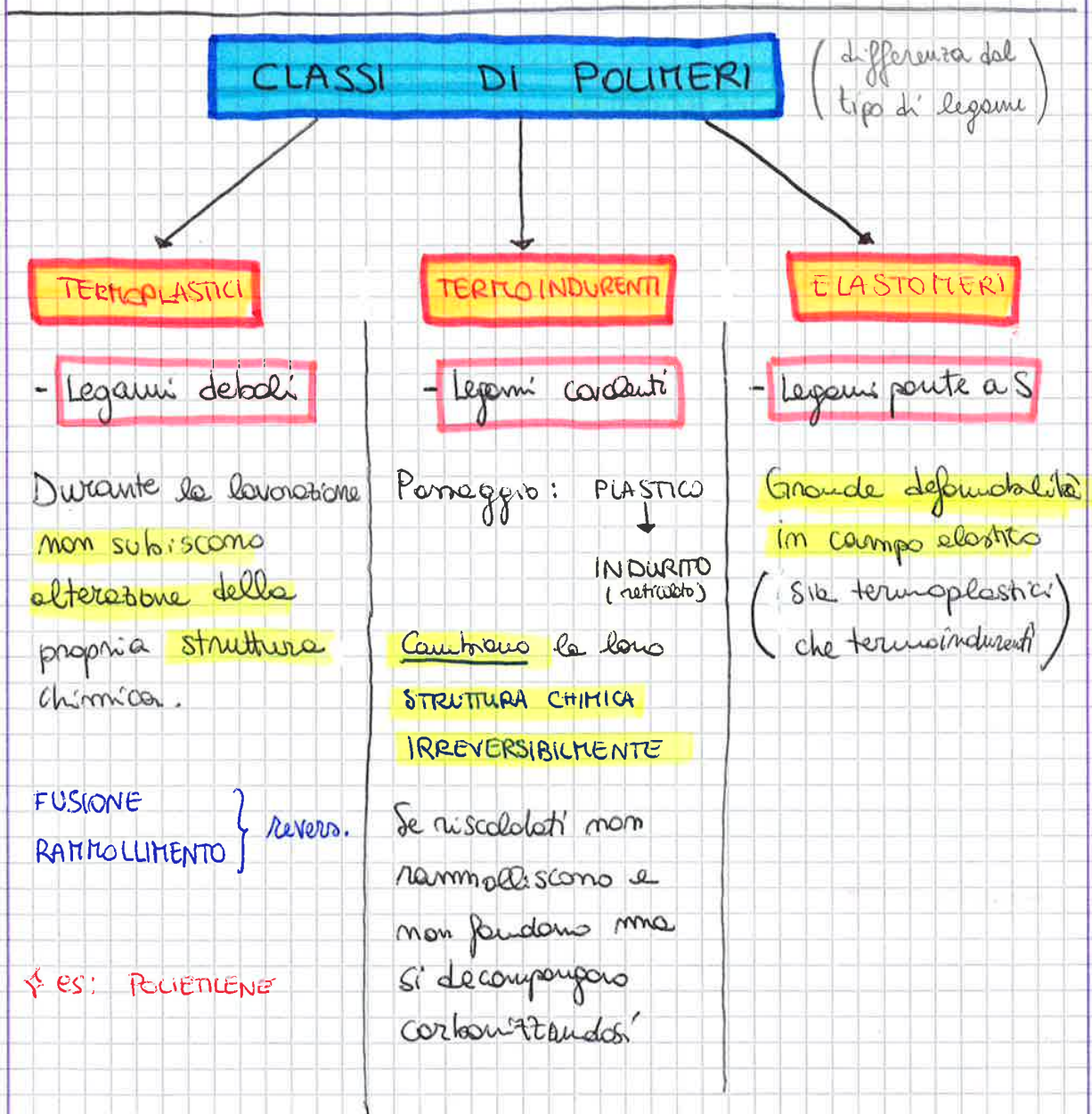
↳ Ge: **ADDITIVI** implicano un **aumento di prestazioni**

↳ migliorano RESISTENZA TERMICA  
STABILITÀ DIMENSIONALE  
RESISTENZA ABRASIONE

✦ **COPOLIMERI**

Sono detti dell'alternanza all'interno delle macromolecole di più unità ripetitive messe in modo:

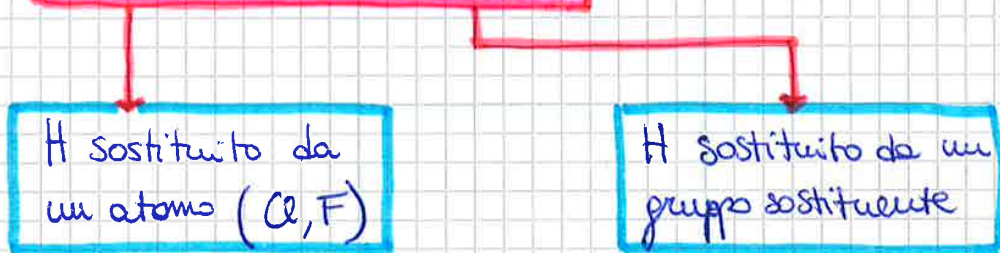
- alternato
- casuale
- a blocchi



## ② POLIETILENE

- deriva dall' ETILENE ( $C_2H_4$ )
- elevato grado di cristallinità
- elevata resistenza a corrosione
- proprietà isolanti
- incolore e semitrasparente
- tenace e flessibile
- degrada per esposizione alla luce

## ② DERIVATI DEL POLIETILENE



In base all' elettronegatività dell' atomo sostituyente

↓  
Forze di Van der Waals  
+ forti

+ ingombrante gruppo  
⇓

- catene irregolari
- difficoltà cristallizzazione
- ↑ rigidità
- ↑ T rammollimento

Derivati sono:

- PVC
- Polipropilene
- Polistirene
- Polimetilmetacrilato (plexiglas)
- Teflon

ACCAI INOSSIDABILI (INOX) contengono Cr o Ni+Cr

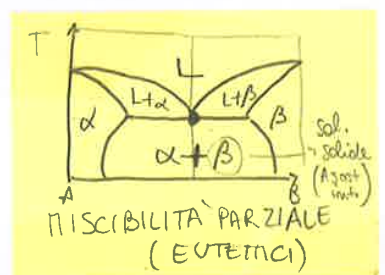
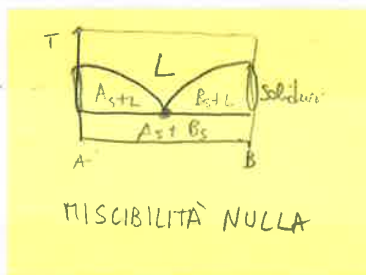
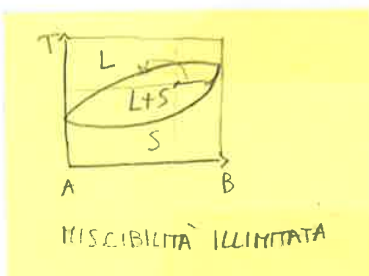
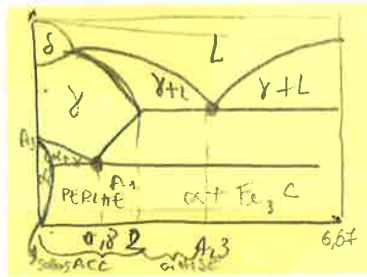
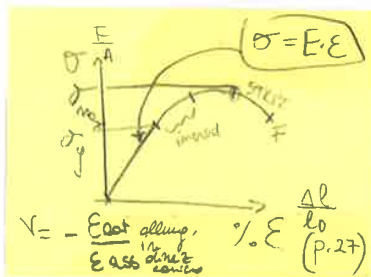
ACCAI DA COSTRUZIONE   
 DI BASE (al C senza leganti) normalizzati   
 DI QUALITÀ (legati al V, Ti, Al)

ACCAI PER CLS ARMATO   
 B 22K (dola)   
 B 32K  $\sigma_y$  (semiduro)   
 B 450C  $\downarrow$  MAX

COR-TEN acciaio di qualità  $\rightarrow$  piccola % Cr  $\rightarrow$  corrosione iniziale  $\Rightarrow$  ruggine superficiale

RUGGINE  $2Fe(OH)_2$

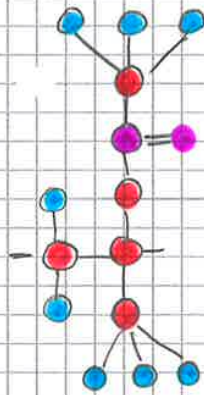
CARBONATAZIONE  $CO_2$  acido neutralizza alcalinità CLS  $\downarrow$  res.   
CLORURI  $\rightarrow$  pitting (ve avanti  $\Rightarrow O_2$  e  $H_2O$ )  $\downarrow$  rotta fessura ruggine rottura fragile



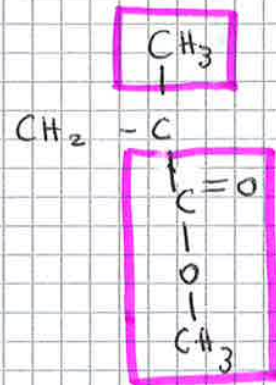
## INDICE:

8. POLIMERI	pag. 1
9. POLIMERI PER L'EDILIZIA	pag. 14
10. MATERIALI ISOLANTI PER L'EDILIZIA	pag. 20

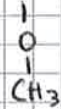
⊙ **PEXIGLAS - POLIMETILMETACRILATO**



● OSSIGENO

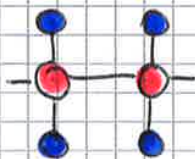


Aggiunta di  $-\text{CH}_3 + -\text{C}=\text{O}$



- amorfo
- trasparente
- **resistente** meccanicamente
- rigido
- si ammorbidisce in  $\text{H}_2\text{O}$  bollente
- usato come additivo dei lubrificanti
- « nelle vernici acriliche

⊙ **POLITETRAFLUOROETILENE - TEFLON**



● FLUORO

- **cristallino**
- **ottima res.** al calore
- **isolante elettrico**



④ → **GRADO DI CRISTALLINITÀ** (non monocristalli <sup>completamente</sup> cristallini)

STRUTTURA CRISTALLOGRAFICA

**AMORFA**  
(vetro organico)

**SEMICRISTALLINA**  
orientate casualmente o direzionali  
(zone cristalline disperse in matrice amorfa)

- > res. a T
- > res. ad agenti chimici
- > densità
- > E (modulo elastico)
- > res. mecc

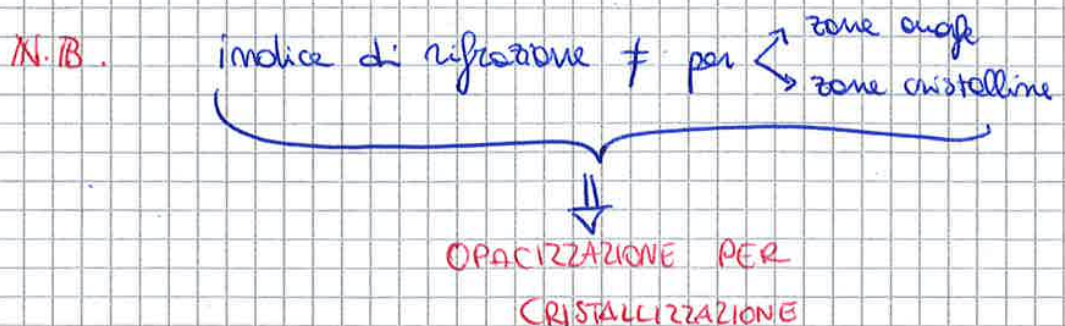
Il grado di cristallinità dipende da:

- 1) Stato chimico materiale
- 2) Struttura molecolare

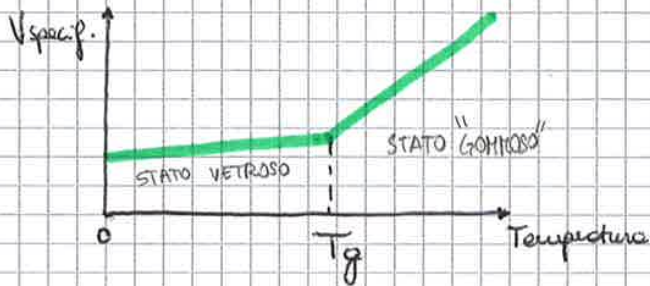
CARATTERISTICHE

Unità ripetitive certe e simmetrica ⇒ **CRISTALLINITÀ 80-90%**

Catene ramificate ⇒ **AMORFO**



⑥ TEMPERATURA DI TRANSIZIONE VETROSA



Tg = temperatura di transizione vetrosa per i polimeri:

↳ Temperatura a cui non sono più presenti legami di Van der Waals fra le catene perché le vibrazioni termiche sono sufficienti a romperle

(Riproduce la componente anaga del materiale)

N.B.

Nei polimeri la deformazione plastica non è dovuta al moto delle dislocazioni ma al movimento delle macromolecole in modo da oscurare il carico applicato

**T < Tg** es: polistirene, polimetacrilato

Le catene non sono in grado di muoversi per creare nuove configurazioni in grado di diminuire la sollecitazione alla quale sono sottoposte, ⇒ 2 casi

- 1) CATENE FORTI ⇒ resistono alla forza applicata ⇒ NO PIEGAMENTO PLASTICO
- 2) FORZA ACTA ⇒ si rompe in modo fragile

**POLIMERO FRAGILE E DURO**  
⇒ Comportamento vetroso

**T > Tg** es: elastomeri, polietilene, polipropilene

Le catene si muovono facilmente ⇒ molecole si muovono per diminuire le sollecitazioni applicate

**POLIMERO STATO GOMMOSO**

ma non è una gomma perché ha ↑ deformazione plastica e non elastica

Le catene si muovono sotto sforzo

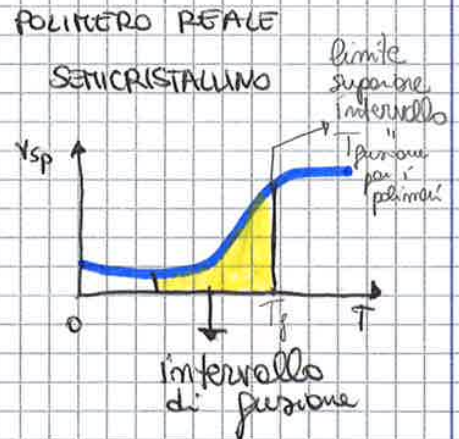
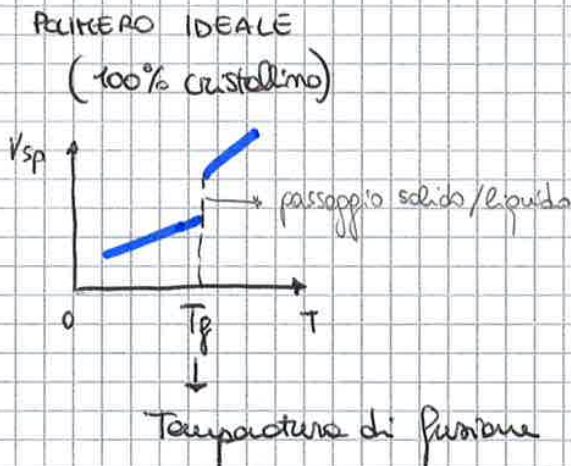
⑦ ▶ **PUNTO DI FUSIONE**

SOLIDI SEMICRISTALLINI

Alla fusione si ha:

- 1) prima fusione cristalli più piccoli e liberi di difetti
- 2) poi fusione delle zone cristalline di dimensioni maggiori (T fusione del polimero)

+ ↑ ° cristallinità ⇒ + ↑ netto il passaggio solido/liquido  
 ⇒ + ↑ è la T di fusione



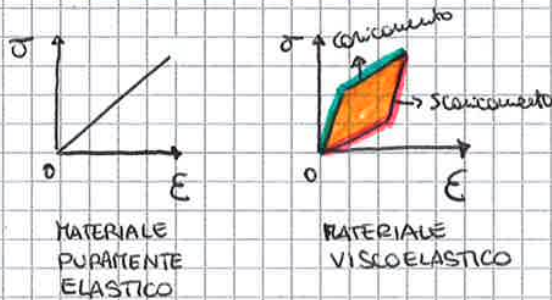
(Aumento T ≡ ↑ Volume)

⑧ ➤ **CARATTERISTICHE MECCANICHE**

- **bassi E** (moduli elastici) [ *selezioni e legami forti* ]  
o di V. d. W.
- Resistenza a trazione non molto elevata
- forte dipendenza della deformazione dal tempo
  - \* deformazione viscoelastica
  - \* deformazione viscoplastica (creep e bone T)

[N.B. VISCO = non lineare e dipende dalla  $v_d$  deformazione]

➤ **ZONA VISCOELASTICA**



deformazione viscoelastica

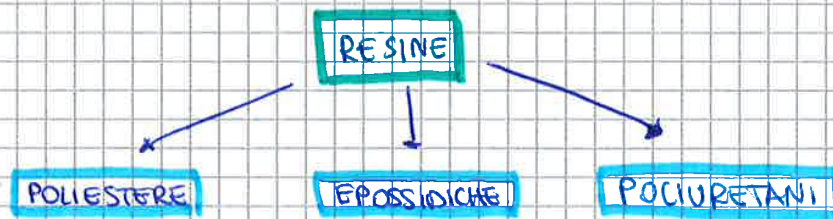
ciclo di isteresi, le 2 curve non coincidono più perché le trasformazioni dipendono o da tempo (dipartimento delle catene polimeriche) ⇒ presente sopra  $T_g$

## ◆ POLIMERI TERMOINDURENTI



### RESINE

- legami tra catene → Covalenti
- se induriti NON RATTRODISCONO per riscaldamento successivo
- NON FONDONO
- > Res. mecc e termica rispetto i termoplastici



- adesivi
- vernici
- matrici per compositi rinforzati

# POLIMERI PER L'EDILIZIA

## ADESIVI

Giunzioni per sovrapposizione di lembi, i quali sono sottoposti a sollecitazioni di:

- Sollecitazioni
- compressione
  - taglio
  - peeling (pelaggio) → da evitare!

### FRATTURA DI UNA GIUNZIONE

- all'interfaccia tra adesivo e aderendo } adesivo mediocre
- all'interno dell'adesivo }
- all'interno dell'aderendo } adesivo ottimo

### ADESIVI TERMOINDURENTI (RESINE) PER LEGNO

#### • RESINA UREA-FORMALDEIDE

- buona resistenza all'H<sub>2</sub>O
- elevato costo

#### • RESINA MELAMMINA-FORMALDEIDE

- proprietà meccaniche ↑
- ↓ resistenza al calore e all'umidità

adesivi con  
 FORMALDEIDE  
 emesso nel  
 tempo =>  
 problemi di salute

## ◆ PITTURE E RIVESTIMENTI

### PROTEZIONE DI STRUTTURE IN ACCIAIO ESPOSTE

- ◆ **EFFETTO BARRIERA** : **film polimerico protettivo**
    - se inizia corrosione prosegue velocemente al di sotto della vernice
- COMPOSIZIONE
- ① **TERMOPLASTICO** : macromolecole sciolte in grandi quantità di solvente ⇒ evaporazione restano solo macromolecole
  - ② **TERMOINDURENTE** : indurisce per reticolazione + spemi ⇒ + densità
  - ③ **PIGMENTO** : polveri inorganiche coloranti
  - ④ **SOLVENTI** : regolano la viscosità della vernice

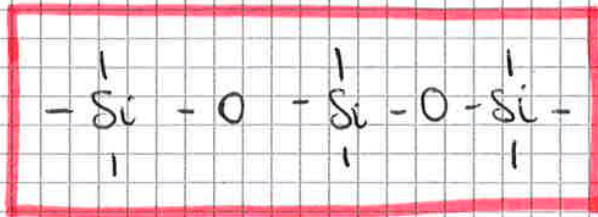
- ◆ **PIGMENTI ATTIVI** : auto-riparanti
  - buona protezione anche in caso di corrosione del ricoprimento

↳ contengono **POLVERI DI Zn**

↳ Zn ha una funzione anodica (- mobile del Fe)  
 ⇒ corrosione della vernice (anodo sacrificabile)  
 ma il ferro non si corrode perché è reso catodico

⇒ scioglimento anodo e produzione di ossido di Zn che protegge

♦ **SILICONI** (idrofobi)



↓  
Polimeri con catene di Si (tetravalente) e Ossigeno

**CATENE SILOSSANICHE**

Si è legato con  $\left. \begin{array}{l} -\text{CH}_3 \\ -\text{C}_2\text{H}_5 \\ -\text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right\}$  RADICALI ORGANICI

CARATTERISTICHE:

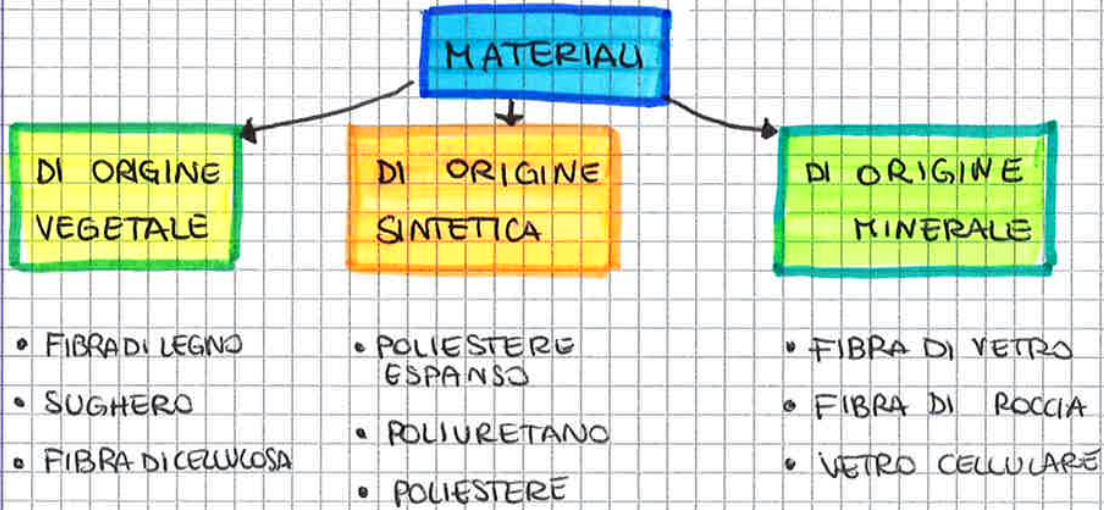
- facilmente formabili
- chimicamente inerti
- resistenti ad UV

Il silicone una volta esposto all'aria reagisce con l'umidità liberando acido acetico e originando una struttura reticolata insolubile



# MATERIALI ISOLANTI PER L'EDILIZIA

per l'isolamento termico



## ▶ FIBRA DI LEGNO

Legno trattato con solfato di alluminio e sostanze impermeabilizzanti (per legni idrorepellenti)

- eco-compatibili
- isolamento termico dal caldo (perché  $\uparrow$  calore specifico)  
ma anche  $\downarrow$  ma non  $\uparrow$  T
- fono assorbenti
- traspirabilità ottima
- Non imbevuti di  $H_2O$  (anche se il potere isolante rimane)  
cost

## FIBRA DI LEGNO MINERALIZZATA

Imprugnato con magnesite (ossidato dalle fibre) e cemento (che riveste le fibre)

- durata maggiore
- isolanti dal caldo
- incombustibile



- Vantaggi {
- leggero
  - lunga durata ( $\approx 30$  anni)
- Svantaggi {
- solubile con solventi organici
  - si scioglie generando fumi nocivi
  - degrado da raggi UV

### © SINTERIZZATO (EPS)

- Struttura cellulare con celle grandi  $\Rightarrow$ 
  - non impermeabile del tutto all'  $H_2O$
  - no isolamento per pareti fino a terra
- isolamento dal freddo
- traspirante

### © ESTRUSO (XPS)

- struttura a celle chiuse fini, omogenea e stabile
  - $\Rightarrow$  insensibile ai lipidi
  - $\Rightarrow$  utilizzato per cappotti fino a terra
- buona resistenza a compressione
- barriera a vapore
- isolamento dal freddo

## ▶ FIBRA DI ROCCIA!

rocce eruttive + additivi colanti

- tossicità fibre
- ottimo isolante acustico, dell'acqua
- trasparente alla diffusione del vapore
- struttura a celle aperte  $\rightarrow$  ottima fonoassorbente
- ostacolo sia il passaggio di caldo sia di freddo

## ▶ VETRO CELLULARE!

Fusione di polveri di vetro con C (o è insufflato gas nella massa fusa del vetro)

- ecocompatibile
- impermeabile all' $H_2O$  e al vapore (xkè cellule chiuse)
- buona resistenza a compressione
- Non combustibile

Raffreddamento  
 ↳ progressiva diminuzione  
 ↳ di viscosità

**VETRI** *quindi*

→ No transizione di fase } legami  
 → No T fusione } si rompono  
 a T ≠

Un materiale vetroso o amorfo si ottiene per progressivo irrigidimento (aumento della viscosità) di un liquido che non è stato in grado di cristallizzare durante il raffreddamento.

$v_{raffreddamento} > v_{cristallizzazione}$

Condizione necessaria per ottenere un vetro partendo dallo stato liquido

Le strutture amorfe sono **TERMODINAMICAMENTE METASTABILI** (posizione non di equilibrio termodinamico degli ioni)

dipende dalla cinetica ⇒ infatti si trasformano in cristalline se condizioni termodinamiche e v<sub>raffreddamento</sub> favorevoli

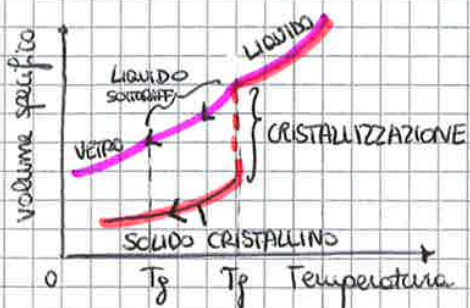
Si possono venire anche a creare delle **STRUTTURE IBRIDE** (vetrose e cristalline) con delle proprietà meccaniche superiori inducendo una devetificazione.

Non ha una transizione di fase perché non ha una temperatura di fusione ben precisa perché i legami degli amorfi non si rompono tutti alla stessa temperatura.

⇒ SOLIDO AMORFO → RANFOLISCE → "FONDE"  
 (progressiva diminuzione di viscosità)

**N.B.** [Liquidi hanno atomi più distanti e maggior volume libero rispetto agli amorfi.]

♦ **VOLUME SPECIFICO**



$d = \frac{m}{V}$

— amorpho  
— cristallino

$V_{specifico} = \frac{1}{d} = \frac{V}{m}$

$T_g$  = temperatura di fusione

$T_g$  = temperatura di transizione  
vetrosa

**RAFFREDDANDO** MATERIALI CRISTALLINI → a  $T_g$  brusca diminuzione del volume

**MATERIALI AMORFI**:  
- diminuzione continua di V ed dimin. di T  
- variazione pendenza curva a  $T_g$

**VETRI TRADIZIONALI**

Solidificazione senza cristallizzazione di un miscuglio

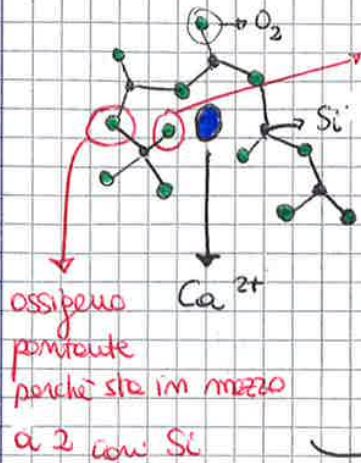
- omogeneo di:
- 1) SILICE
  - 2) SODA
  - 3) CALCE

fuso ad  $T \approx 1500^\circ C$  fino ad ottenere una massa viscosa

♦ **STRUTTURA DEI VETRI**

QUARZO ( $SiO_2$ )  
↓  
silice cristallina  
 $Si^{4+}$  e  $O^{2-}$   
distribuzione regolare dei tetraedri (con angoli costanti)  
STRUTTURA CRISTALLINA  
- ordine a lungo raggio  
- volume a corto raggio

VETRO DI SILICE  
↓  
tetraedri ma con angoli che variano tra loro continuamente  
STRUTTURA AMORFA  
- ordine a corto raggio  
- NO ordine a lungo raggio  
verificato dalla diffrazione dei raggi X che non presenta picchi



ossigeno non pontante  
valenza saturata dalle  
cariche del catione ( $Ca^{2+}$ )

( Se catione bivalente  
=> 2ox pontanti, se monovalente  
=> 1ox pontante )

EFFETTO DI UN MODIFICATORE  
SUL RETICOLO ATOMICO DELLA SILICE

PROPRIETÀ FISICHE

TRANSIZIONE VETROSA

VISCOSITÀ

La risposta meccanica  
di un vetro alle  
sollecitazioni dipende  
della temperatura:

-  $T < T_g$  (temperatura di trans. vetrosa)  
→ comportamento  
elastico e  
frattura fragile

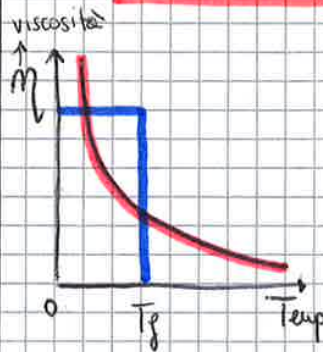
-  $T > T_g$   
→ comportamento  
viscoso (non duttile)  
(meno fragile) con  
scorrimento delle  
unità strutturali del  
vetro

↳ Resistenza allo scorrimento in  
risposta ad una sollecitazione  
meccanica applicata tangenzialmente  
(// alle superficie)

in risposta  
ad una  
spinta i  
legami si  
spezzano  
e si riformano  
in un'altra  
posizione

N.B. la deformazione plastica negli  
amorf avviene per scorrimento  
viscoso.

$\Delta$  deformazione =  $K \sigma_{applicato}$   
↑  
proporzionale



viscosità amorf  
decresce esponenzialmente  
con la T

N.B.  $T_{incollatura} > T_g > T_{deformazione}$

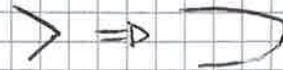
$$\sigma_m = 2\sigma_0 \left( \frac{a}{\rho_t} \right)^{\frac{1}{2}}$$

se  $\sigma_m > \sigma_y$  (carico di snervamento)



SNERVA

l'apice della cricca (si stonda) si arrotonda abbassando la tensione



**FATTORE DI CONCENTRAZIONE DEGLI SFORZI**

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

misura il grado di superficazione degli sforzi

all'apice della cricca o dello spigolo vivo

Durante la propagazione di una cricca il materiale:

- CEEDE ENERGIA DI DEFORMAZIONE ELASTICA
- ASSORBE ENERGIA SUPERFICIALE per la creazione di 2 nuove superfici all'apice della cricca

per i **MATERIALI FRAGILI**

$$\sigma_c = \frac{2E\gamma_s}{\pi a}$$

**TENSIONE CRITICA**  
oltre la quale il difetto si propaga

$E$  = modulo di Young  
 $\gamma_s$  = energia superficiale specifica

per i **MATERIALI DUTILI**

$$\sigma_c = \left( \frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a} \right)^{\frac{1}{2}}$$

**TENSIONE CRITICA**

$\gamma_p$  = energia superficiale di def. plastica  
↓  
è 0 per materiali fragili

## TENACITÀ A FRATTURA IN CONDIZIONI DI DEFORMAZIONE PIANA

$$K_{Ic} = Y \sigma_c (\pi a)^{\frac{1}{2}}$$

condizioni critiche di dim (difetto, tensione)

⇒ FRATTURA FRAGILE IN presenza materiale

$$K_{Ic} = Y \left( \frac{a}{W} \right) \sigma_c (\pi a)^{\frac{1}{2}}$$

a = lunghezza

W = larghezza

## PROPRIETÀ TERMICHE - CONDUCEBILITÀ

Vetri = solidi ad alto disordine strutturale



movimento libero dei fononi

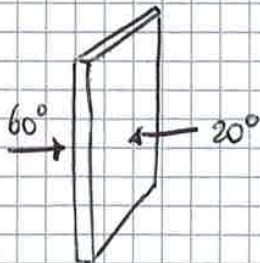
e' breve xke incontrano ostacoli

fonone =  
quanto di Energia  
vibrazionale  
termica che si propaga

CATTIVI CONDUTTORI

DI CALORE (si dilatano molto col calore)

(ma per isolamento termico servono comunque investimenti particolari)



La differenza di T tra le due facce di una stessa lastra provoca:

dilatazione differenziale ⇒ tensione

localizzate in grado di rompere il vetro

$\alpha$  = coeff. dilatazione  
 $\delta$  = coeff. di Poisson

$$\sigma = \frac{E \alpha \Delta T}{2(1-\delta)}$$

TENSIONE GENERATA



## PRODUZIONE DI VETRI

### PRODUZIONE MASSA VETROSA

1) **PREPARAZIONE MISCELA**

(miscelamento polveri  $\rightarrow$  max omogeneità dei reagenti)  
di carbonati

2) **FUSIONE**

(si ottiene massa fusa ed omogenea (6h,  $t \approx 1500^\circ$ ))

$T_{max}$   
 $\eta_{min}$   
 $\downarrow$   
allungamento  
bolle facilitate

3) **AFFINAZIONE** (usando  $NaNO_3$ ,  $As_2O_3$ ,  $Na_2SO_4$ , miscelate relativamente portando con le bolle persistenti)  
(eliminazione gas e impurità mediante diminuzioni)  
 $t \rightarrow$  fino a  $1200^\circ C$  in 12h

4) **FORMATURA** (da stato fuso ottengo l'oggetto)  
(fino alla  $T$  di lavorazione)

5) **RICOTTURA**

(rilascio tensioni interne mediante riscaldamento  $T \approx T_g$  e raffreddamento a T.a.)

② ◆ **VETRO SODA-LIME** (più comune)

- basso costo
- buona resistenza
- migliore durabilità con aggiunta di  $Al_2O_3$
- poco resistenti agli sbalzi termici
- finestre

③ ◆ **VETRI CON PIOMBO**

- T lavorazione bassa
- n alto ⇒ brillanti
- lenti

④ ◆ **VETRI BORSIACATI (PYREX)**

- ottima resistenza sbalzi termici (α basso)
- " resistenza chimica
- attrezzature chimica

⑤ ◆ **VETRI ALLUMINO-BORO-SILICATI**

- ottima resistenza chimica (grazie all'alluminio)
- profumi, fuseri

⑥ ◆ **VETRI ALLUMINO SILICATI**

- sopportano T elevate
- α basso
- resistenza a proff.
- iPhone

## FATTORE SOLARE (FS)

$$FS = \frac{\text{Energia trasmessa } (\Phi_t)}{\text{Energia incidente } (\Phi_0)}$$

FS indica quanto parte della radiazione solare arriva al sistema

L'energia trasmessa ( $\Phi_t = \tau \Phi_0$ ) insieme ad una parte di E assorbita dal vetro che poi viene ri-emessa, giungono all'interno di un locale.

→ Vetri non trattati ⇒  $\frac{1}{3} E_a$  viene ri-emessa nell'appartamento

$$E_{\text{entra}} (\text{TOT}) = E_m \text{ trasmessa} + \frac{1}{3} E_m \text{ assorbita}$$

↓ ovvero

$$\Phi_{\text{TOT}} = \Phi_t + \frac{1}{3} \Phi_a$$

$$\Phi_{\text{TOT}} = \tau \cdot \Phi_0 + \frac{1}{3} \alpha \Phi_0 = \Phi_0 \left( \tau + \frac{\alpha}{3} \right)$$

||  
FS

$$\Phi_{\text{TOT}} = FS \cdot \Phi_0$$

## ① EFFETTO SERRA

$\Phi_t$  è ASSORBITA dai corpi presenti nell'ambiente

⇒ ↑  $T_{\text{corpi}}$  ⇒ emissione radiazione IR  $\approx 950$  nm

⇒ la vetrata è opaca a tali radiazioni (non le lascia passare fuori)

⇒ ↑  $T_{\text{ambiente chiuso}}$

## PIROLISI

Trattare a temperatura calda dei reagenti che vengono spruzzati sul vetro. Si originano anche pesi vapori tossici (nocivi all'ambiente).

Si applica un **FILM DI OSSIDO** (di Ti, Palladio, Fe, Al, Zn, Ni) durante la lavorazione del vetro quando ancora la lamina è calda nel forno di ricottura (costi bassi)

## SPUTTERING CATIONICO

- genera un campo elettromagnetico ~~perpendicolare~~
- in ruoto molto spinto,
- colpisce il target (bagnello = vetro da rivestire) con ossidi metallici. Il target (o vetro) è off line, ovvero un prodotto già finito quando avviene lo sputtering cationico. Il rivestimento è sottile, non tossico (Oro, Ni) che garantisce ottime trasparenze

+ buono per isolamento termico

+ delicato

(es: Saint-Gobain Coe - UTE)

Vetro float chiaro	81%	r.t.i.
Vetro float riflettente	20%	radiazione trasmessa all'interno

miglioramento  
sensibilità

## BILANCIO ENERGETICO

flussi termici che attraversano un vetro:

- DISPERSIONI TERMICHE (int → ext)  
controllate dalla U
- APPORTI TERMICI SOLARI (ext → int)  
controllati da  $\sigma$  (FS)

BILANCIO ENERGETICO

$$BE = S \cdot (-U \cdot Gh + \Phi_m \cdot FS) \quad [\text{Watt}]$$

↑ irraggiamento solare medio  
 ↓  
 Superficie vetrata  
 ↳ PRODOTTO BASE STAGIONALE  
 ↳ gradi giorno · 24h

**N.B.**  $BE > 0 \Rightarrow$  impiego vetri basso emissivi  
 (cioè  $\Phi_{entrata} > \Phi_{uscita}$ )

## ISOLAMENTO ACUSTICO

### LIVELLO SONORO (dB)

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

↳ intensità di soglia affinché il suono sia udibile

### PFI POTERE FONDOISOLANTE

Misura i decibel ottenuti: (riduzione intensità di un suono) da parte di un materiale (che viene attraversato dalle onde sonore)

$$\text{> massa} \Rightarrow \text{> PFI} \quad \left( \begin{array}{l} \text{Smorzamento} \\ \text{del suono} \end{array} \right)$$

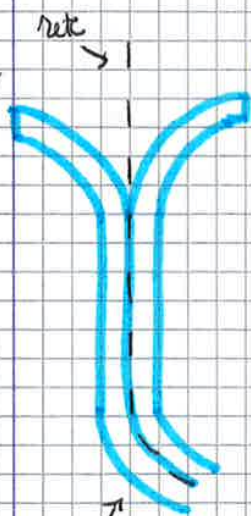
perché vetro ha buona massa  $\Rightarrow$  buona densità  $\Rightarrow$  buona PFI

M.B. Se inserisco un foglio di Plostra smorza bene le vibrazioni sonore (vetro stratificato = 2 laste + foglio polimerico interposto)

① ② **VETRI ARMATI O RETINATI** (classificazione R.E. = stabi di fuoco)

→ non migliora la resistenza meccanica  
 incorporate una rete metallica che ritarda la  
 propagazione delle fiamme in caso di incendio e tiene  
 in posizione il vetro imper un certo t ( se si  
 rammolisce o rompe)

**N.B.** ⇒ Queste lastre non esplodono al contatto  
 con la fiamma per l'azione diffondente  
 della rete



vetro con viscosità  
 bene per far aderire la  
 rete

↳ il vetro NON è un BUON CONDUTTORE  
 ⇒ punti a T + alta e altri a T bassa  
 che portano alla rottura

→ la rete metallica (BUON CONDUTTORE)  
 omogenizza il  $\nabla T$  su tutto il vetro  
 provocando un lento rammolimento  
 della lastra

② ③ **VETRI TEMPRATI** (migliore caratteristiche meccaniche)

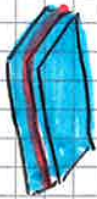
Attraverso:

- tempra termica (processo fisico)
- tempra chimica (processo chimico)

vengono create nel vetro delle tensioni permanenti  
di compressione in superficie e di trazione al  
centro

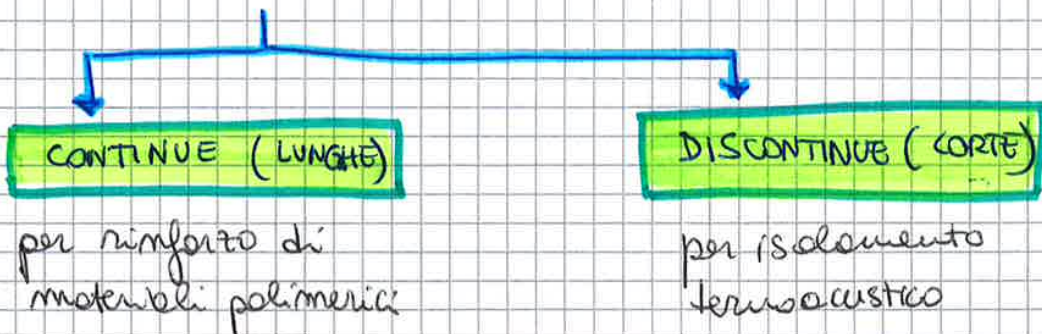
### ③ ② VETRI STRATIFICATI (+ utilizzati)

Unione per riscaldamento e pressaggio di due lastre (olmas) con uno strato di materiale trasparente interposto (polivinilbutirale = materiale plastico)

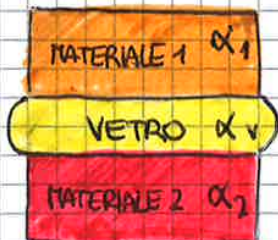


- ⇒
- elevata resistenza a urti
  - rottura localizzata e pezzi vetro rimangono aderenti alla plastica
  - migliori proprietà di isolamento termico e acustico

### ◇ FIBRE DI VETRO



### VETRI PER GIUNZIONE



$$\alpha_1 \neq \alpha_2$$

$$\alpha_1 < \alpha_v < \alpha_2$$

$\alpha$  = coefficiente di dilatazione termica

$\alpha_v$  → occorre e gli stati termici termici dei due materiali:

Vetro giunge 2 materiali diversi

↓  
deve bagnare sia mat 1 che mat 2

⇓  
deve essere compatibile



# POROSITÀ

POROSITÀ = difetto perché peggera le proprietà meccaniche infatti:

## I PORI

- \* forniscono punti preferenziali di innescio delle cricche
- \* diminuiscono la sezione reale del provino

$\sigma = \text{maximal}$   
(senza pori)  
 $p = \text{con i pori}$

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0} \quad \sigma_p = \frac{F}{A_{reale}} \quad \sigma_p > \sigma_0 \quad \text{se } A_{reale} < A_0$$

$$A_0 = A_p$$

## CATEGORIE DI POROSITÀ

- 1) **POROSITÀ APERTE** → comunicanti con l'esterno
- 2) **POROSITÀ CHUSE** → non comunicanti con l'esterno

**M.B.** Se ↑ POROSITÀ ⇒ E ↑ e  $\sigma_f$  ↑

↓ modulo di Young      ↓ Resistenza alla flessione

Se P (pressione) ↑  
E ↓ e  $\sigma_f$  ↓

## PORI E CONDUCEBILITÀ TERMICA

↑ POROSITÀ ⇒ ↓ CONDUCEBILITÀ TERMICA K

perché il trasferimento attraverso i pori è lento ed inefficiente dovuto alla presenza dell'aria che ha un valore di conducibilità molto basso.

- ⇒ **PORI RISORSA PER**
- MATERIALI SOGGETTI AD ELEVATO SHOCK TERMICO (⇒ pori impediscono la propagazione di cricche indotte termicamente)
  - MATERIALI ISOLANTI

# ARGILLA

Costituente base della maggior parte dei ceramici tradizionali:

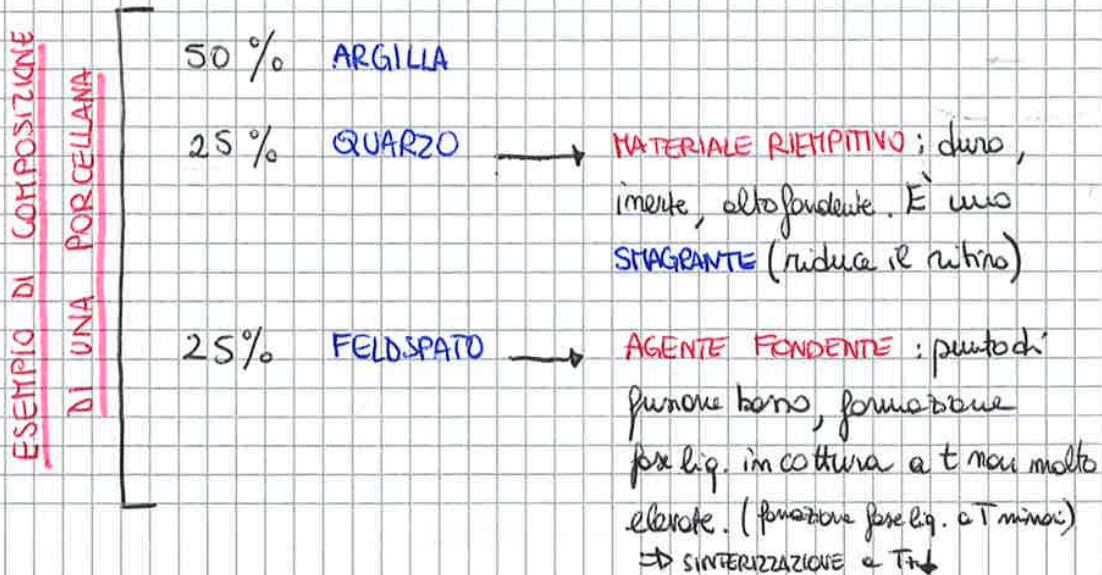
## COMPOSIZIONE ARGILLA

- ALLUMINO-SILICATI IDRATI
- Ox e idrox di Fe, K, Al, Si, Ti...
- Carbonati di Ca, Mg, Fe, Ti...

↳ ceramici ordinari sono le argille, idrosilicati di Al, in forma di polveri fini, lamellari e contenenti quantità variabili di altri minerali ( $Fe_2O_3, SiO_2$ ) [struttura a strati { <sup>ottaedri di idrossi di Al</sup> tetraedri di silice }]

Le argille sono abbondanti e poco costose. Sono dei **MATERIALI IDROPLASTICI**, ovvero se mischiate con  $H_2O$  formano una massa plastica facilmente lavabile, perché  $H_2O$  si interpone fra gli strati di lamelle e forma un film sottile attorno le particelle d'argilla.

Le argille sono materiali **PLASTICI**, ovvero hanno la capacità di deformarsi e mantenere la deformazione.



STATO DI PLASTICITÀ DI UN'ARGILLA

1) **FORMATURA**

deformazione plastica senza rottura

2) **ESSICCAMENTO**

umidità → H<sub>2</sub>O analitica rimossa e le particelle di argilla si muovono (per coalescere la fono)

⇓  
PROCESSO REVERSIBILE → argilla di nuovo lavorabile

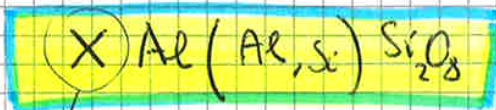
3) **COTTURA**

↑ resistenza meccanica alla ↓ H<sub>2</sub>O IRREVERSIBILE  
⇒ non più lavorabile

◆ **FELDSPATI** (a base di K sono i più comuni)

↓  
gruppo di minerali

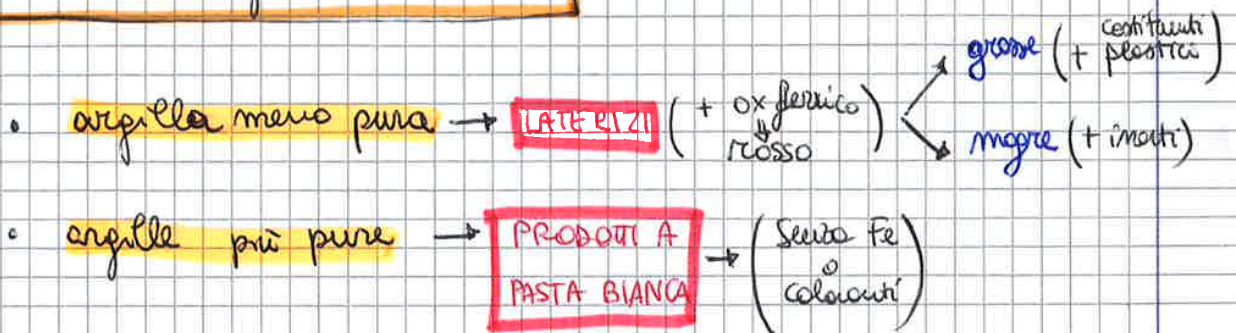
FORMULA GENERALE



- K
- Ca
- Na
- Ba

Tetraedri di SiO<sub>4</sub> e AlO<sub>4</sub> costituiscono catene doppie in struttura a zig zag

♫ **FELDSPATI fondano a T**



# 1 **MACINAZIONE** (a martelli o a palla)

## ⑤ **SECCA**

Materie prima unica con  $H_2O$  max 5%  
 ↳ per riduzione granulometrica

richiede una  
 successiva  
**ATOMIZZAZIONE**

## ⑥ **UMIDA** (più efficace)

→ maggiore riduzione granulometrica  
 → migliore omogeneizzazione

## ~ ATOMIZZAZIONE

essiccamento rapido ⇒ macinato da 37%  $H_2O$  (impeso)  
 a 3-6% in peso

è adatto per la formatura per pressatura

Si ottiene: **agglomerati quasi sferici con alta fluidità**

# 2 **FORMATURA**

## **PRESSATURA**

- impasto poco umido 5-7%
- effettuato spesso in 2 tempi per rimuovere aria - pistole, stoviglie

## **ESTRUSIONE**

- impasto umido 10-20%
- pistole
- laterizi

MATERIALI PER STAMPI: - Gesso  
 + collante → durata stampo <  
 - RESINA

CAVI PIENI

## **COLAGGIO** (BARBOTINA)

- impasto molto umido 35-40%
- aggiunta alla BARBOTINA (legante liquido ottenuto dall'impasto di  $H_2O$  e argilla) di DEFLOCCULANTI (carbonati e silicati solici o miscela poliacrilati) impedisce la FLOCCULAZIONE (creazione fase solida in fase: in sospensione)
- Sanitari

L'uso di Resine microporose ⇒ stampi ad alta resist. meccanica ⇒ **COLAGGIO IN PRESSIONE**

- $t_{imp} <$ ,  $H_2O <$  ⇒  $t_{essiccamento} <$  ⇒  $<$  Energia impieg.
  - densità e uniformità >
  - $<$  ritiro ⇒  $<$  rischio rotture
- ma maggiori costi

Oltre ai forni tradizionali, sono fornite  $Q$  (per riscaldare il prodotto e far evaporare  $H_2O$ ) irradiando il prodotto con **MICROONDE** (radiazioni elettromagnetiche e cui sono associate energie che può essere assorbite, trasmessa, riflessa dai corpi che vengono colpiti)

→ **↓ trattamento** → ↑ capacità produttiva.

L'energia delle onde elettromagnetiche attraversano la parte solida (che trasmettono solo le microonde quindi sono trasparenti (e lasciano passare) e vengono completamente assorbite e dissipate in  $Q$  da  $H_2O$ ).

↳ Ottengo un riscaldamento **SELETTIVO, RAPIDO, UNIFORME**

### PROCESSI POST ESSICCAMENTO

- 1) **INGOBBIATURA O STALTIATURA**  
applicazione rivestimento vetriceo (prima della cottura)
- 2) **DECORAZIONE SU STALTO O SOTTO**
- 3) **ARROTATURA**

FORZA MOTRICE DELLA SINTERIZZAZIONE

È la riduzione di energia libera totale  $\Delta G_t$

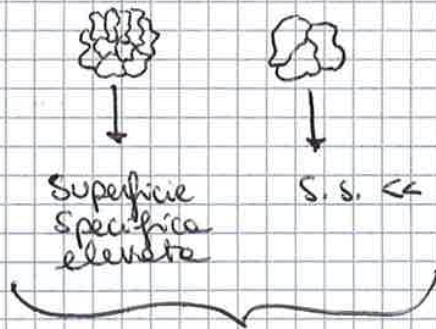
$$\Delta G_t = \Delta G_v + \Delta G_o + \Delta G_s$$

↓                      ↓                      ↓  
 del volume          per la riduzione dei BDG          per la riduzione di superficie

ovvero vi è una forte spinta termodinamica verso l'abbassamento di energia di superficie  $\gamma$

$$\Delta G_s = \gamma \Delta A \rightarrow \text{[sinterizzazione tradizionale]}$$

⇒ evoluzione spontanea → Energia + bene ( $\Delta G \downarrow$ )



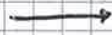
si realizza mediante l'aggregazione di particelle piccole in poche grandi

→

④

### SINTERIZZAZIONE REATTIVA

COMPATTO DI POLVERI



Reagisce chimicamente con pori formose e lipide

### SINTERIZZAZIONE VISCOSA

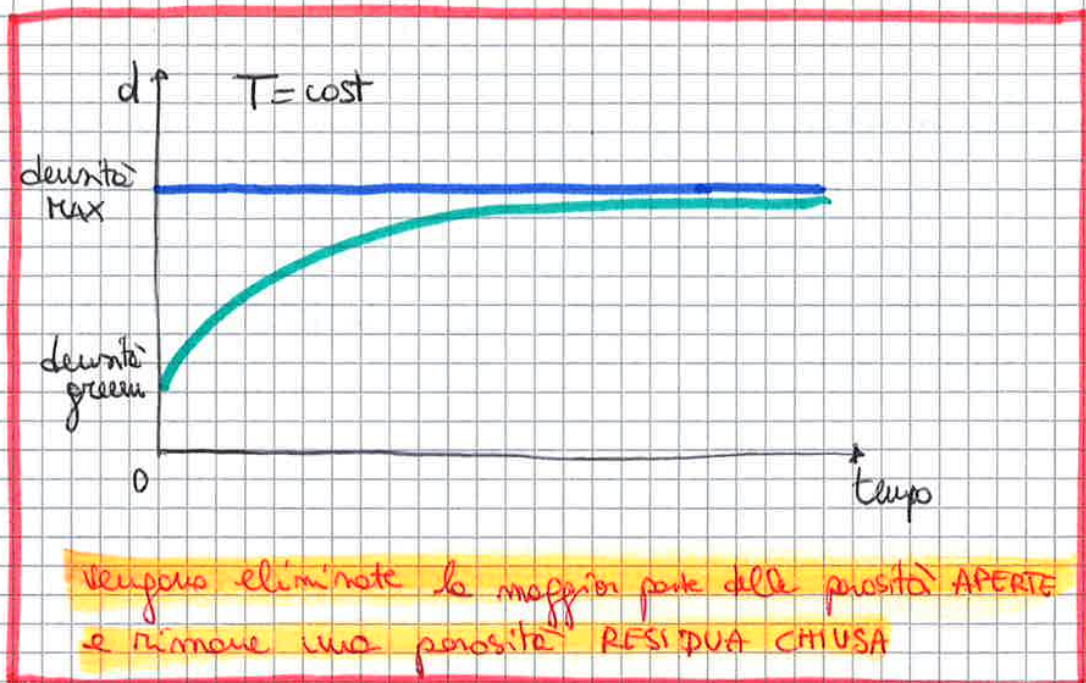
(per porcellane)

quando 20%  $V_{iniziale}$  (di nuovo)  $\xrightarrow[\text{trasformazione}]{Si}$  FASE FLUIDA

↓  
(Chiusura porosità iniziale)

Consolidamento attraverso

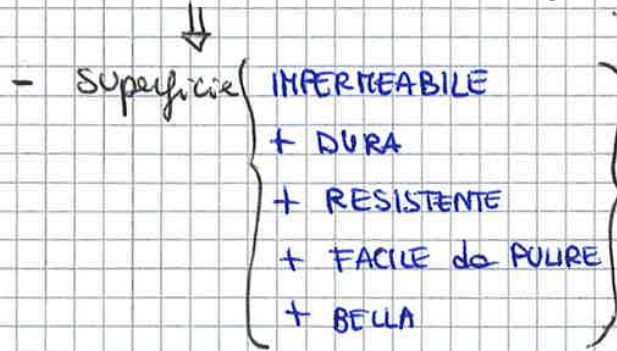
- formazione liquido
- scorrimento viscoso
- vetrificazione



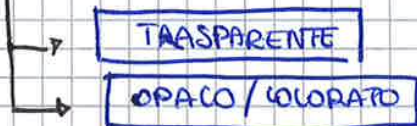
## INTERO PROCESSO DI SINTERIZZAZIONE

## SMALTATURA

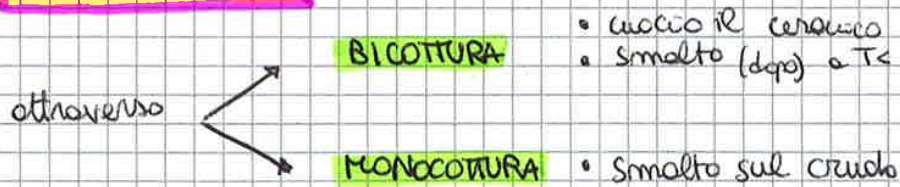
Rivestimento di matrice vetrosa ( $T_g$ )



Lo **SMALTO** deve essere **ADEGUATAMENTE FLUIDO** per una buona stesura e ancoraggio



## VERIFICAZIONE





## CERAMICI A PASTA COMPATTA

### GRES

opille che durante la cottura danno origine a fase liquida (REFICAZIONE)



- impermeabile
- alta resistenza meccanica
- alta resistenza agli acidi

#### - GRES NATURALI

opille contenenti sostanze fondenti

#### - GRES ARTIFICIALI

miscelazione fondenti (feldspato) ad opille pure (senza ossido ferroso)

### PORCELLANE

prodotti ceramici a pasta bianca, compatta e vetrificata, ottenuta per miscela di materie prime pure:

- Caolino
- feldspati
- Quarzo

#### - P. TENERE

prevale la fase liquida  
⇒ ↑ trasparenza

#### - P. DURE

prevale fase cristallina

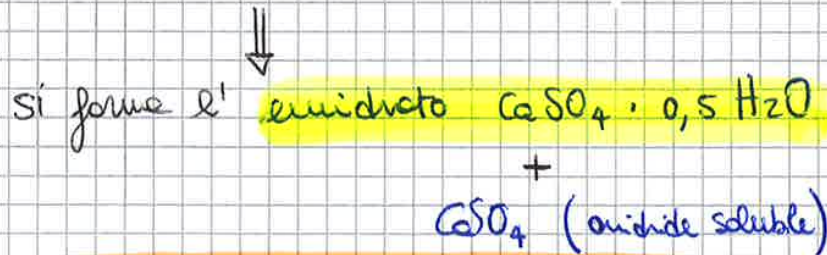
- doppia cottura (900-1000°C)
- aggiunta rivestimento

- elevata resistenza chimica, meccanica, elettrica

◆ **CESSO**

MINERALE  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  → **PIETRA DA GESSO** (mattoni prima)

La pietra da gesso viene riscaldata a  $T = 150^\circ\text{C}$



La **presa** è determinata da:  
 (indurimento)

- maggiore solubilità dell' emidrato e dell' ossido in  $\text{H}_2\text{O}$  rispetto alla forma bivalente
- le 2 fasi metastabili si sciolgono in  $\text{H}_2\text{O}$  e **PRECIPITA IL MENO SOLUBILE** ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) in forma di cristalli fibrosi → Perdite di plasticità e indurimento della pasta

IMPASTO → emidrato si scioglie → soluzione soprassaturata di bivalente ⇒ **PRECIPITA**

$t_{\text{presa}} = 15 - 60 \text{ min}$

- Reazione:
- espansiva (0,3 - 1,5%)
  - esotermica → forte sviluppo di calore
- ↓  
 richiede eccesso di  $\text{H}_2\text{O}$  nell'impasto

$\frac{a}{g} \text{ teorico} \approx 20/25\%$  in peso di  $\text{H}_2\text{O}$   
 $\frac{a}{g} \text{ reale} \approx 30/100\%$  in peso di  $\text{H}_2\text{O}$

## PRODOTTI A BASE DI GESSO

⊙ Gesso da modellatori (Sg. pl. da)

⊙ Gesso ordinario (o colto o da presa)

polvere granulosa per evitare presa troppo rapida di colore  
bianco sporco → (cottura a 170°C)  
(Gesso da MURO)

⊙ STUCCO (decorazioni)

⊙ GESSO FORTE (o da pavimenti)

presa lenta ma molto resistente (cottura a 300°C)

Il gesso è utilizzato per:

- 1) INTONACI
- 2) COMPONENTI PREFABBRICATI  
(cartongesso)



**GRASSELLO**

H<sub>2</sub>O in eccesso ⇒ Sviluppo di Q (evaporazione e disgregazione delle calce vive)  
(≈ 24 h)

- dispersione di particelle minute di Ca(OH)<sub>2</sub> in H<sub>2</sub>O con formazione di pasta consistente

↳ successivamente deve avvenire la **STAGIONATURA** che favorisce la completa idratazione dei granuli fino al cuore evitando così idratazioni ritardate che provocano fenomeni di disgregazione del legante in opera



**CALCE IDRATA**

si ottiene per addizione all'ox CaO un quantitativo di H<sub>2</sub>O prossimo a quello richiesto dal peso stechiometrico e Ca(OH)<sub>2</sub> (≈ 1/3 del peso di CaO)

- ≥ 91% → FIORE DI CALCE
- 82-90% → CALCE IDRATA DA COSTRUZIONI

➔ **PROVA DI STABILITÀ DI VOLUME**

Valutazione corretto spegnimento calce

- calce con buona plasticità distesa su lastre di vetro lasiate e for presa in ombra ben oscurata e poi esposte per 6h e vapore acqua

→ Se non compaiono: Fessure, distorsioni, rigonfiamenti (indice della presenza di CaO staccato e non idratato)  
⇒ malta ox

## POROSITÀ DI UNA CALCE DI MALTA AEREA

con evaporazione  $H_2O \Rightarrow$  Volume  $<$   $\Rightarrow$  CREPE e FESSURAZIONI

### SOLUZIONE

malta + Sabbia

- scheletro indeformabile
- piccoli pori distribuiti omogeneamente
- possibile penetrazione  $CO_2 \Rightarrow$  carbonatazione

Quali sabbie uso?

- **SABBIE SILICEE** (quasi ossidati - meccanicamente + resistenti)
- **SABBIE CALCAREE** (carbonati di Ca, Mg)
- SABBIE ARGILLOSE  $\rightarrow$  DA SCARTARE x<sup>ché</sup> c'è argilla  
passo migliore effettuando un lavaggio con  $H_2O$

Qual'è la funzione della sabbia?

- impedisce nitino malta indurita
- il legante si dispone intorno i granuli di sabbia  
 $\Rightarrow$  FAVORIMENTO CARBONATAZIONE

La **calce** riempie i vuoti lasciati dalla sabbia (30/40% in V)  
 $\Rightarrow$  massa m<sup>ai</sup> troppo impermeabile (eccetto GRASSELLO, bene carbonatazione)  
 m<sup>ai</sup> troppo porosa (poco grassello, bene resist. mecc)

$\Rightarrow$  SERVE GRANULOMETRIA ASSORTITA

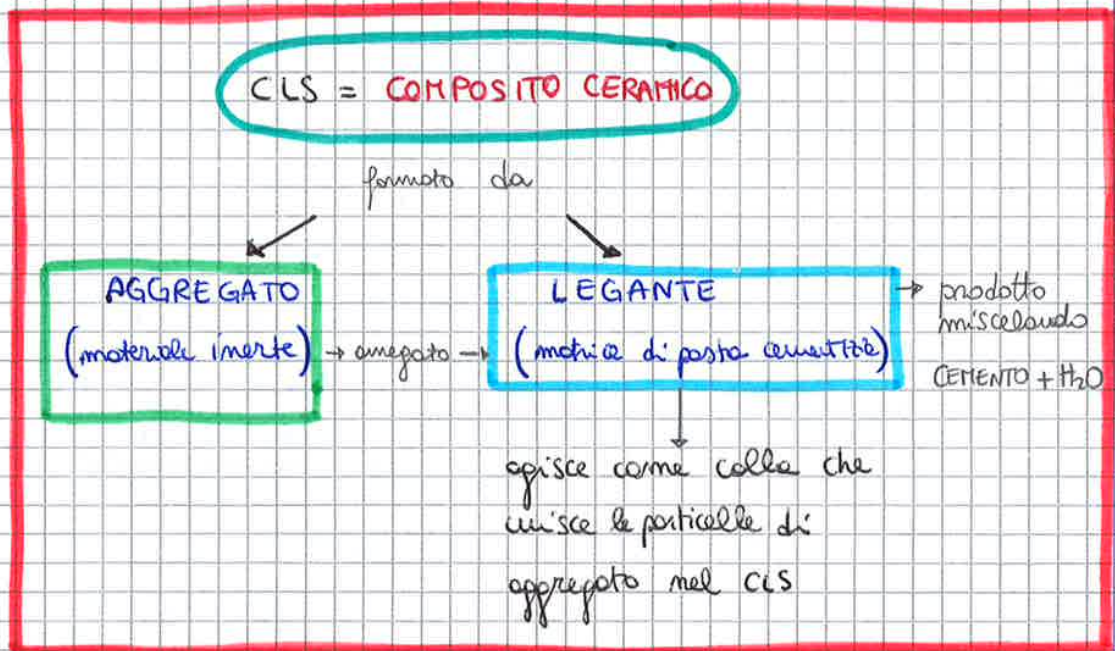
## CEMENTO E CLS

### VANTAGGI DEL CLS:

- flessibilità di progettazione
- economicità
- durabilità
- prodotto sul luogo di utilizzo

### SVANTAGGI DEL CLS:

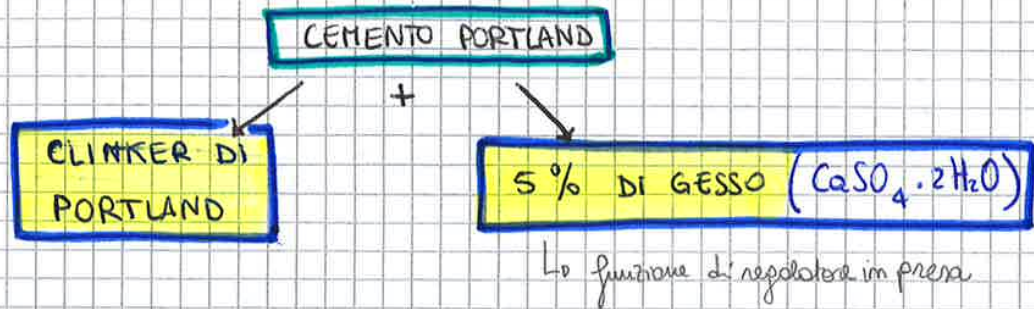
- bassa resistenza a trazione
- bassa duttilità
- fenomeni di ritiro



Il CLS fresco appena confezionato è detto **impasto**.

Con i fenomeni della presa e indurimento assume l'aspetto definitivo

▶ CEMENTO PORTLAND



◆ CLINKER DI PORTLAND

Il clinker è un elemento base per la produzione del cemento. Il clinker di portland è un materiale a comportamento idraulico che è composto da:

- $\frac{2}{3}$  in massa di silicati di calcio
  - tricalcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )
  - e
  - bicalcico ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )
- $\frac{1}{3}$  in massa di ossidi
  - ossido di Alluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) principalmente sotto forma di alluminato  $3\text{Ca} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
  - ossido di ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) sotto forma di fase ferrica
  - ossido di Magnesio ( $\text{MgO}$ )
  - altri ossidi

COSTITUENTI CLINKER DI PORTLAND % in PESO

- ≈ ♦ 66%  $\text{CaO}$
- ≈ ♦ 22%  $\text{SiO}_2$
- ≈ ♦ 5%  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- ≈ ♦ 2%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$
- ≈ ♦ 15%  $\text{MgO}$

→ resto di ossidi di Metalli alcalini e di Mn e Ti



## PREPARAZIONE CLINKER DI PORTLAND

- ESTRAZIONE E MACINAZIONE MATERIE PRIME
- RISCALDAMENTO MATERIE PRIME ( $\Rightarrow$  25% stato liquido)
- SINTERIZZAZIONE ( $\Rightarrow$  granuli tonoggrati 5-20 mm)
- MACINAZIONE FINALE E AGGIUNTA ALTRE SOSTANZE

### 1) ESTRAZIONE MATERIE PRIME E PREPARAZIONE MISCELA CRUDA

- |               |   |  |   |
|---------------|---|--|---|
| MATERIE PRIME | } | • ROCCE CALCAREE ( $\frac{3}{4}$ ) $\rightarrow$ forniscono $\text{CaO}$     |   |
|               |   | • ARGILLE ( $\frac{1}{4}$ ) $\rightarrow$ forniscono $\text{SiO}_2$ ma anche |   |
|               |   | - $\text{Al}_2\text{O}_3$  | } forniscono la<br>formazione di<br>silicati di calcio<br>a T+↓ |
|               |   | - $\text{Fe}_2\text{O}_3$  |   |
|               |   | - $\text{MgO}$   |   |
|               |   | - alcali   |   |

↓ minerali ottenuti in cura devono essere **frantumati** e omogeneizzati per via:

- **SECCA**  $\rightarrow$  minerali duri con poco contenuto di umidità  
 $\Rightarrow$  si ottiene una polvere fine ed omogenea
- **UMIDA**  $\rightarrow$  minerali che si spappano facilmente in  $\text{H}_2\text{O}$   
 $\Rightarrow$  si ottiene una malta fine ed omogenea

La **macinazione** delle materie prime avviene in mulini a sfere  $\Rightarrow$  farina ottenuta omogeneizzata in silo dove viene fatta insufflare d'aria



#### 4) MACINAZIONE E AGGIUNTA DI ALTRI ADDITIVI

clinker + gesso (+ eventuali additivi)



MACINATI CON MULINI A PALLE  
E SETACCIATI

per conferire > FINEZZA ⇒ > REATTIVITÀ  
> V. indurimento

#### ↳ AGGIUNTE DI MINERALI

##### ♦ POZZOLANICHE

- materiali silicei ( $\text{SiO}_2$  AMORFA)
- alta superficie specifica
- basso tenore di  $\text{CaO}$
- alto tenore di  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Le POZZOLANICHE acquistano proprietà LEGANTI in presenza di  $\text{Ca(OH)}_2$

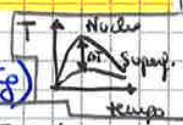


Per gran idratazione  
spese non usò  
Portlanda ma  
cemento con  
sviluppo di  $C_3A$  <  
(Problemi di FESSURAZIONE)

# IDRATAZIONE DEL CEMENTO PORTL.

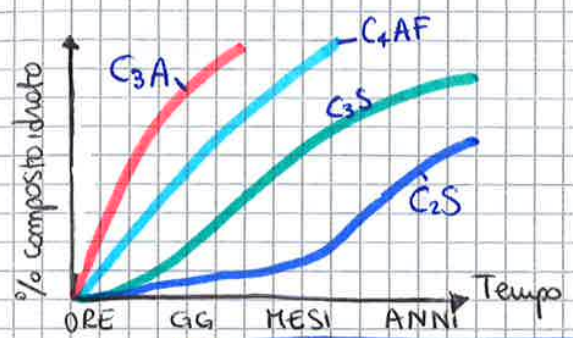
IR calore si diffonde  
per conduzione

di idratazione → ESOTERMICHE (da 380 → 500 kJ/kg)  
reazione tra costituenti cemento + H<sub>2</sub>O ⇒ PRESA E INDURIMENTO



$V_{eff} = \frac{1}{spessore^2}$   
dipende da  
• COMPOSIZIONE  
• FINEZZA  
• Temperatura

Le reazioni avvengono ALCUNE SIMULTANEAMENTE altre IN  
SUCCESIONE ⇒ I COMPOSTI NON SI IDRATANO ALLA STESSA V

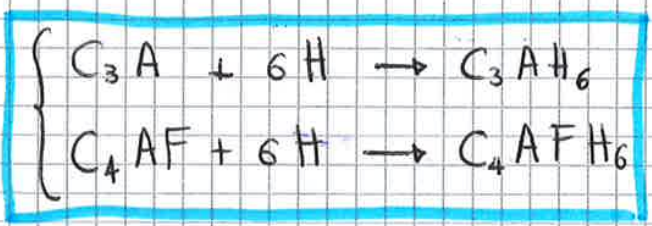


→ influenzano la PRESA (e la plasticità di lavorabilità)  
♦ Gli ALLUMINATI e la FASE FERRICA reagiscono + velocemente rispetto ai SILICATI

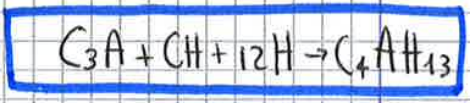
la v<sup>o</sup> d'idratazione dipende da: COMPOSIZIONE - FINEZZA - ADDITIVI - T

N.B.  $v(C_3A)$  talmente veloce che deve essere rallentata altrimenti si perde plasticità in pochi minuti

## REAZIONE DI IDRATAZIONE DEGLI ALLUMINATI / FERROALLUMINATI DI Ca



in presenza di CH generata da idratazione dei silicati



non ha effettivamente queste reazioni ma

PRESA RAPIDA ⇒ controllata con aggiunta di plasma

Ricorda che  $\begin{cases} A = Al_2O_3 \\ F = Fe_2O_3 \\ H = H_2O \\ CH = Ca(OH)_2 \end{cases}$   
(S = SiO<sub>2</sub>)

MODERATORE DI PRESA

La velocità di presa di un cemento dipende da:

- **Reattività clinker (R.C)**
- **disponibilità solfati in soluzione (d.S.s)**

	R.C.	d.S.s
1)	bassa	bassa
2)	alta	alta
3)	alta	bassa
4)	alta	assente
5)	bassa	alta

+ veloci

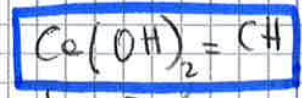
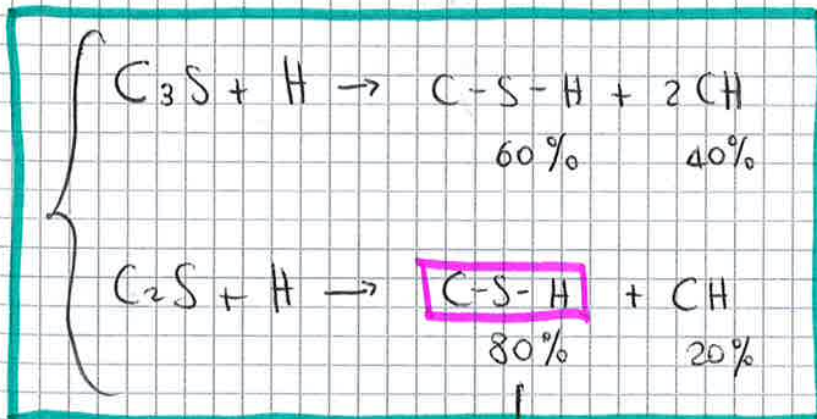
- tempo

**REAZIONE DI IDRATAZIONE DEI SILICATI TRICALCOICI E BICALCOICI**

L'idratazione di  $C_3S$  e  $C_2S$  dà luogo ad un

**PRODOTTO COLLOIDALE DI COMPOSIZIONE NON BEN DEFINITA**

**C-S-H** (ad idratazione completa  $C_3S_2H_3$ ) e **CRISTALLI**  $\rightarrow$  (formati solo a IT (posim) sufficienti)  
**ESAGONALI DI  $Ca(OH)_2$**   $\rightarrow$  **PORTLANDITE** (porelli + vicini porosi) per rimuovere acqua



Calce idrata (idrossido di Ca)

**PORTLANDITE**

Protege la matrice perché ha pH basso  $pH > 12,5$  (passivazione)

Calore idratazione  $C_3S > C_2S$

responsabile delle proprietà adesive

$C_2S$  ne produce di +  $\Rightarrow$  +  $C_2S$  in un cemento + resistenza meccanica

ma  $C_3S$  si idrata molto + velocemente  $\Rightarrow$  la resistenza meccanica di un cemento Portland  $\uparrow$  all'  $\uparrow$  di  $C_3S$

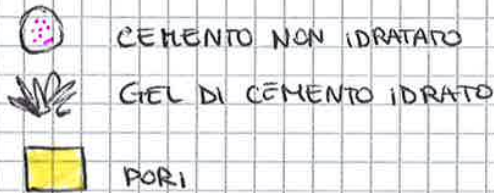
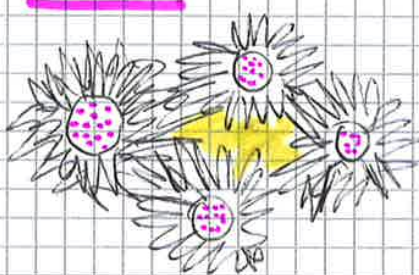
**CINETICA FORTAZIONE PRODOTTI**

ETTRINGITE max 24 h  
 ↓  
 Pori  
 MONOSOLFATO

C-S-H si forma tanto + v quanto ↑ [C<sub>3</sub>S]

**PASTA INDURITA**

ammasso poroso di prodotti di idratazione in forma di fibre o lamina insieme a prodotti cristallini e residui dei composti liquidi



LEGAMI CHIMICI

- PRIMARI → pochi (Covalenti da idratazione)
- SECONDARI → molti (H, Van der Waals)

⇒ si crea una STRUTTURA DI FIBRE INTRECCIA TE che conferisce resistenza (funzione della dist fra i granuli)

•  $\frac{a}{c}$  (→  $> \frac{a}{c}$  ⇒  $<$  n° contatti tra fibre)

N.B. con  $\frac{C_3S}{C_2S}$  regola la resistenza e brevi stagionature

$> \frac{a}{c}$  ⇒  $\left. \begin{matrix} > \text{porosità} \\ < \text{n° contatti fibre} \end{matrix} \right\} < \text{resist meccanica}$

**INDURIMENTO**

se  $T \downarrow$   $\Rightarrow$  ritardo indurimento ma  $\uparrow$  resist. meccanica

si creano fibre  
di  $C-S-H$  +  $lumphe$

se  $T \uparrow$   $\Rightarrow$  accelerazione indurimento  $\downarrow$  resistenza meccanica

perché rimane una  
struttura + porosa

se climi freddi ( $\Rightarrow \downarrow T$ ) SOLUZIONI:

- ADDITIVI (accelerano l'indurimento)
- $H_2O$  imposto ( $\frac{a}{c} <$ )
- miscelato ingredienti
- macinati + fini

**RAPPORTO ACQUA / CEMENTO**

•  $H_2O$  stechiometricamente necessaria  $\approx 23\%$  del peso cemento

$$\frac{a}{c} \text{ (stechiometrico)} = 0,23$$

• per l'imposto deve essere abbastanza fluido per essere lavorabile  $\Rightarrow H_2O \approx 30-35\%$

$$\frac{a}{c} \text{ (posto lavorabile)} = 0,3 - 0,35$$

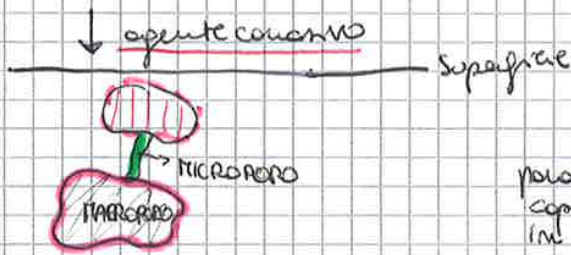
DOPO  
L'IDRATAZIONE

- acqua capillare  $\rightarrow$  nei pori  $\rightarrow$  facilmente evaporabile
- acqua adsorbibile  $\rightarrow$  trattenute sulla superficie indurita
- acqua combinata  $\rightarrow$  chimicamente legata ai prodotti di idratazione

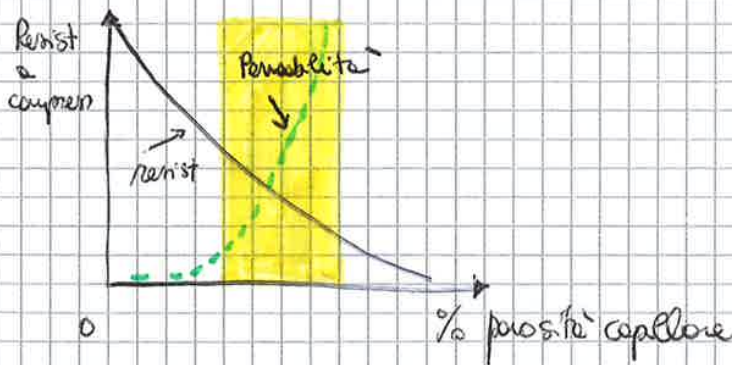
La PERMEABILITÀ è legata solo ai MACROPORI (perché nei micro è ostacolato) (come)

Per ridurre permeabilità lavoro su  $\frac{a}{c}$  e struttura

È sufficiente però avere SEGMENTAZIONE DEI PORI (ovvero micro legati a macro) per bloccare la permeabilità



- se  $\frac{a}{c}$  alto  $\rightarrow$  > dist tra pori di cemento e anche se  $a^\circ$  di idratazione completa (100%) non riesce a segmentare
- se  $\frac{a}{c}$  basso  $\rightarrow$  Segmento i pori  $a^\circ$  di idratazione + hemi perché particelle più vicine



CLS (aggregati + pasta di cemento)

aumento delle caratteristiche meccaniche del CLS

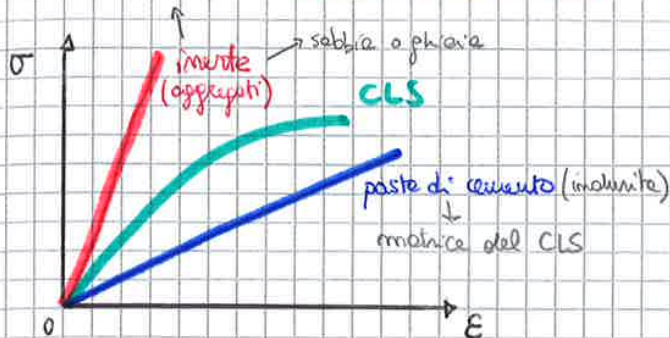


Diagramma (in compressione) sforzo - deformazione del CLS e dei suoi componenti

COMPOSIZIONE CLS	
per $1\text{ m}^3$	• 300 Kg CEMENTO
( $\approx 2400\text{ Kg}$ )	• 120 l $\text{H}_2\text{O}$
	• 0,4 $\text{m}^3$ SABBIA
	• 0,8 $\text{m}^3$ GHIAIA

AGGREGATO

FUNZIONE

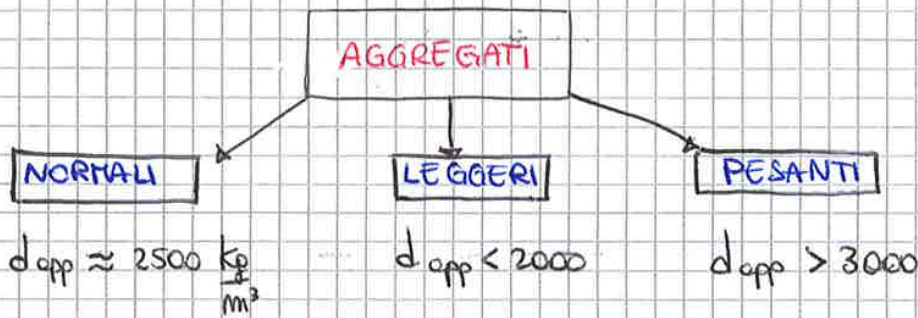
SOST. INDESI DEBATE

- SOST. ORGANICHE (rallentano idratazione cemento)
- SOST. FINISSIME (argille / limo che depositandosi sugli aggregati riducono l'adesione con il cemento)
- PARTICELLE MECCANICAMENTE DEBOLI (carbone)
- SOLFATI che reagendo col cemento danno prodotti espansivi e cloruri  $\rightarrow$  corrosione strutture

- $\uparrow$  le proprietà meccaniche
- non si ritira, E elevato  $\Rightarrow$  si oppone al ritiro della pasta legante  $\rightarrow$  agisce come parte rigida (scheletro indeformabile)
- meno quantità di legante  $\Rightarrow$   $\downarrow$  idratazione e riduzione costi

► DENSITA'

- ASSOLUTA (esclusi i pori)
- APPARENTE (compresi i pori) (+ usata)
- IN MUCCHIO (densità del volume del materiale nello storo in cui si trova prima dell'impiego)



VAGLIATURA = processo per separare le varie sezioni granulometriche (& setacci)

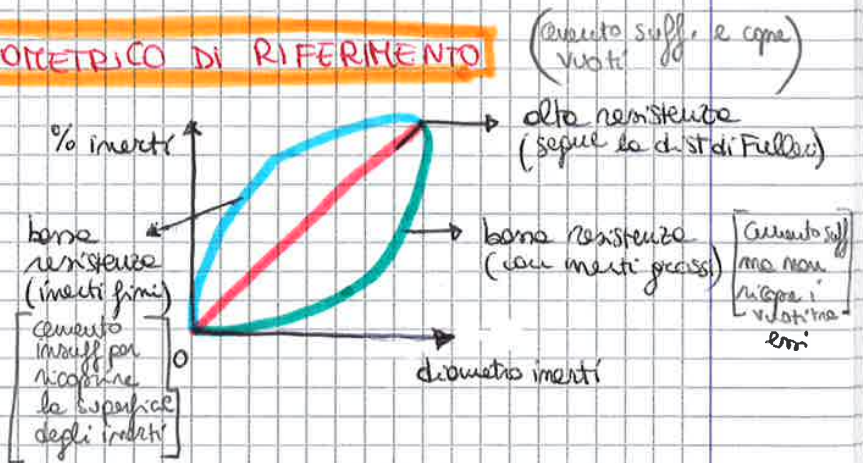
N.B. + ↑ Vaghi ⇒ - trattenuto cumulativo

ASSORTIMENTO GRANULOMETRICO DI RIFERIMENTO

DISTRIBUZIONE DI FULLER (min % di vuoti)

$$P = 100 \sqrt{\frac{d}{D}}$$

P = passate al setaccio  
 d = dim (setaccio)  
 D = dim<sub>max</sub> (aggregato)



Bisogna portare al vol. min i vuoti tra le partielle ⇒ MAX d. mucchio

⇒ - cemento ⇒ max lavorabilità del cis fresco ⇒ trave di più ⇒ - fenomeni di ritiro, spaccatura la segregazione impasto

N.B. MAX densità non ≠ MAX scovendute ⇒ COMPROMESSO



## ◆ ACQUA DI MPASTO

E' importante la qualità di  $H_2O$

Sali o impurezze  $\Rightarrow$  interferiscono con i processi di presa e indurimento

- no buone proprietà meccaniche
- macchie
- efflorescenze sulla superf. del CIS

$\rightarrow$  Vogliamo bene  $H_2O$  dolci con contenuto salino  $< 1000$  ppm e cloruri  $< 500$  ppm e senza sostanze organiche o uniche in soluzione

Si usano acque potabili, sotterranee, naturali, solo dopo un controllo.

N.B. NO USO di acque SALINASTRE, MARINE, o NERE

PROVE DI LAVORABILITÀ DEL CLS (sono menzionate diverse prove per valutare le lavorabilità del CLS)

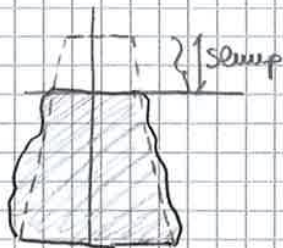
- ① CONO DI ABRAMS (SLUMP-TEST)
- ② FATTORE DI COMPATTAZIONE
- ③ SPANDIMENTO
- ④ CONSISTOMETRO VEBE

▶ CONO DI ABRAMS (SLUMP-TEST)

Viene rovesciato un secchiello riempito a norma di CLS tirando via il contenitore il CLS si abbassa di un certo tratto (slump)

+ grande slump ⇒ + CLS fluido

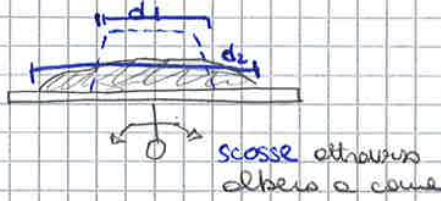
$$\begin{cases} \text{min (slump)} = 0 \\ \text{max (slump)} = 30 \text{ cm} \end{cases}$$



dal cono di ABRAMS si ottengono 5 classi di consistenza  
(per impasti <sup>molto</sup> troppi fluidi o <sup>molto</sup> troppi asciutti & poco ottenibile)

CLASSE	SLUMP (cm)	DENOMINAZIONE
S1	0 - 4	terzo umida
S2	5 - 9	plastica
S3	10 - 15	semi-fluida
S4	16 - 20	fluida
S5	20 - 30	super fluida

▶ SPANDIMENTO



Valuto la variazione di diametro del cono e di quello finale

SPANDIMENTO = aumento % di diametro rispetto d<sub>iniz</sub>

IMPORTANZA DELLA LAVORABILITÀ

La lavorabilità è funzione della GEOMETRIA DELLA STRUTTURA e delle modalità di VIBRAZIONE IN CANTIERE.

È una lavorabilità ideale per tutto, ogni consistenza ha una sua motivazione d'esistenza.

Le più usate sono S3 e S4.

Le consistenze dipendono dal progetto, delle geometrie delle strutture ⇒ + armata + geometria complessa  
↓  
+ fluida

N.B. PROBLEMA se aggiungo t<sub>h0</sub> in cantiere (influenza i comportamenti meccanici)

► BLEEDING

Fenomeno legato alla sedimentazione.

Vi è una separazione di H<sub>2</sub>O di impasto che affiora in superficie in seguito ad arrestamento.

⇒ CLS con  $\frac{a}{c}$  falso e molto più (localmente) alto ⇒ punto di debolezza

> Bleeding ⇔ impasti + fluidi  
 < Bleeding ⇔ impasti con + fini (perché > sup. specif.)

EFFETTI del BLEEDING:

- riduzione  $\frac{a}{c}$  ⇒ passo efficace operazioni di finitura e lisciate
- se depongo un 2° strato su uno con H<sub>2</sub>O di bleeding, la parte inferiore del secondo getto contiene + H<sub>2</sub>O ⇒ < qualità
- v<sub>bleeding</sub> elevata ⇒ si creano crateri per l'H<sub>2</sub>O che trasporta cemento formando crateri in superficie

▶ FATTORI CHE INFLUENZANO LA RESISTENZA

- Composizione aggregati
- $\frac{a}{c}$
- condizioni ambientali durante la stagionatura

① AGGREGATI

le caratteristiche minime contano poco, quelle superficiali molto perché è l'aspetto che può pregiudicare l'aderenza tra l'aggregato e il cemento

- ⇒ buona qualità, pulito, ben dosati
- ⇒ influenza granulometrica

◆ INERTI NEL CALCESTRUZZO AD ALTE PRESTAZIONI

CLS ORDINARI →  $\frac{a}{c} > 0,45$  → res. mec. = 60 MPa

l'elemento debole è la matrice cementizia. L'inerte è + compatto e resistente della parte cementizia

CLS ALTE PRESTAZIONI →  $\frac{a}{c} (0,25/0,35)$  → r.m = 80 MPa

la matrice cementizia diventa + compatto e resistente dell'inerte (elemento debole)

→ impiego inerti privi di porosità

NB

↑  $\frac{a}{c}$  ⇒ ↓ res. mec. ⇒ ↑ lavorabilità  
 xke ↑ porosità

## STAGIONATURA

↳ crea condizioni favorevoli per reazioni di  $H_2O$  e cemento (CLS in ambiente umido il + a lungo possibile)

⇒  $H_2O$  deve evaporare il meno e il più tardi possibile

altrimenti: - reat. idratazione incomplete  
- RITIRO ⇒ fessurazioni crepe

La stagionatura dipende da:

- durata
- Temperatura
- Umidità ambiente

> stagionatura ⇒ > grado di idratazione del cemento

Come si fa?

- 1) Casseri impermeabili o di legno piro e bagnato
- 2) Dopo sconsolidare coprire con sabbia, teli e bagnato

Cemento Portland almeno 7g

N.B. + dure la stagionatura ⇒ < penalità res. max

# DEGRADO CLS

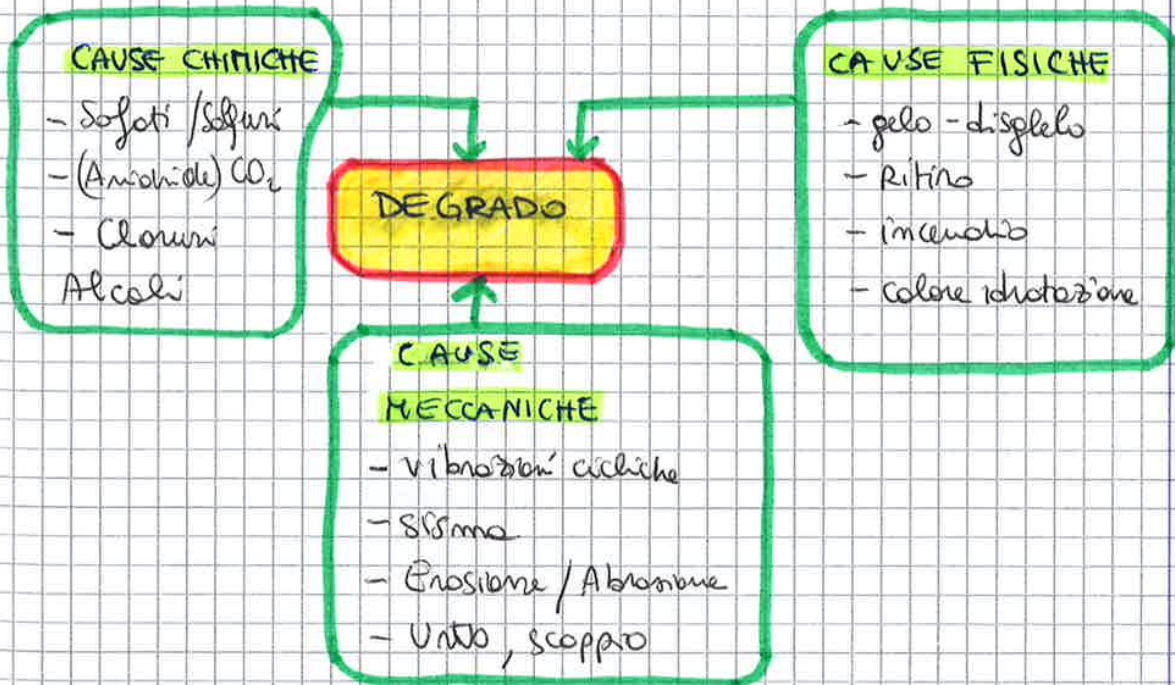
▶ **DURABILITÀ** (il CLS non è immune da degrado)

Capacità di tenere le **caratteristiche funzionali** al livello richiesto per **tempo lunghi**

L'azione dell'ambiente → determina il **progressivo danneggiamento** della struttura: CLS (legante e aggregato) e armature (con carbonatazione e penetrazione di cloruri)

**ELEMENTI CHE SCATENANO IL DEGRADO**

- |                                 |                     |
|---------------------------------|---------------------|
| - H <sub>2</sub> O              | - acidi             |
| - O <sub>2</sub>                | - temperature       |
| - CO <sub>2</sub>               | - azioni meccaniche |
| - Cl <sup>-</sup>               |                     |
| - SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> |                     |



### ♦ MgO e CaO residui

→ CaO residuo del clinker non si combina

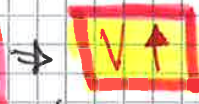
→ MgO se non è < 2,5%



CaO e MgO si idratano nel cemento indurito.



FORMAZIONE DI



- microfessure
- tensioni interne
- ↓ res. mecc.
- disgregazione

### ♦ Attacco da gelo disgelo

$\Delta T$  maturazi ⇒ danneggiato CLS

con  
peggiori

- 1) T varia ciclicamente intorno 0°C
- 2) CLS saturo di umidità



H<sub>2</sub>O nei pori

congela ⇒ V ↑ (9%)

(ad idratazione avvenuta)  
rimangono pori

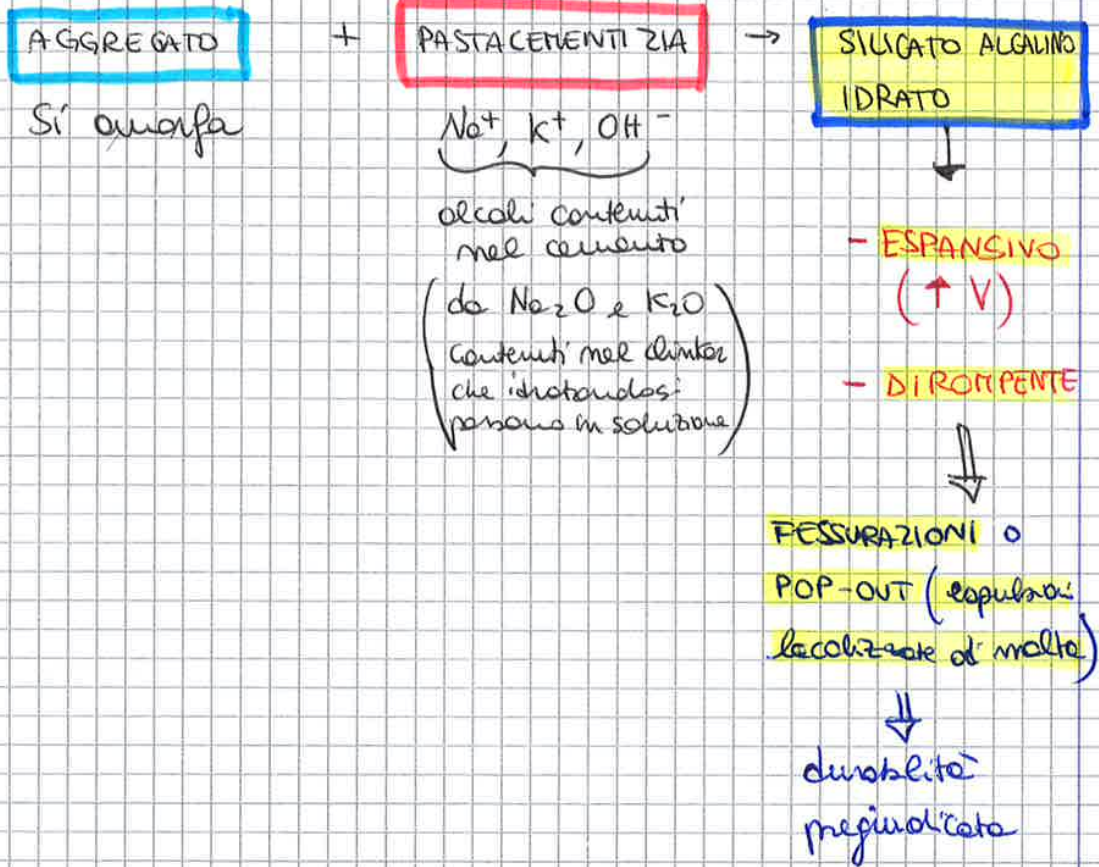


Sollecitazioni cicliche provocano un effetto disgregante sul materiale.





## REAZIONE ALCALI-AGGREGATI (t lunghi)



### PREVENZIONE

- $\downarrow \frac{q}{c} \Rightarrow \downarrow$  permeabilità a.s.
- aggiunte pozzolane → pH e contenuto alcali nei pori
- uso aggregati non reattivi

### FENOMENI DI POP-OUT

se posto con cemento con pochi alcali la prevengo.  
Gli alcali arrivano anche da sostanze esterne (es. <sup>sale:</sup> antigelo)

7 **FASE DI INNESCO** (è necessario per avere carbonatazione profonda nel copriferro) dipende dalla penetrazione carbonat. e dallo spessore del copriferro.

Le strutture interne o riprodottemente soggette servono a calcolare la **VITA DI SERVIZIO**

## ♦ **ATTACCO DA CLORURI**

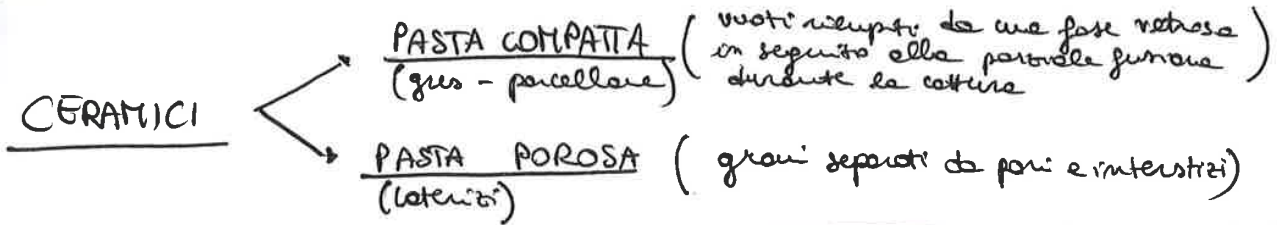
**FILM** si rompe se

- penetrazione dei **CLORURI**
- ambienti **marini** / **Sali antigelo**

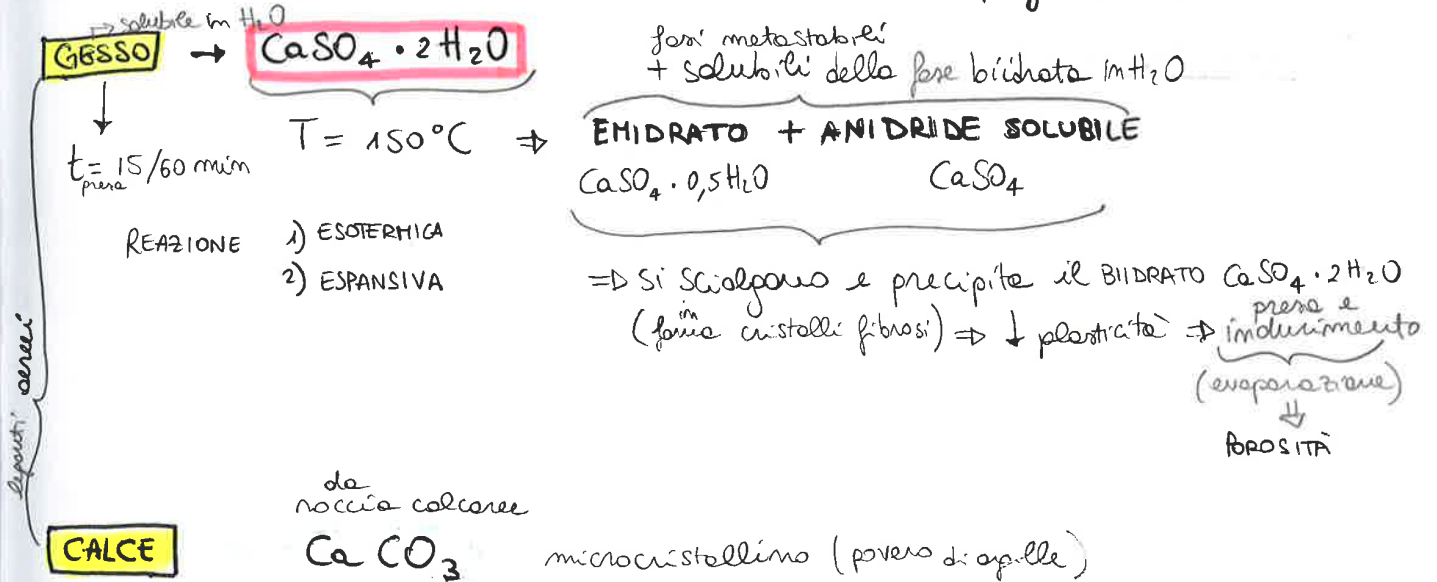


## PREVENZIONE

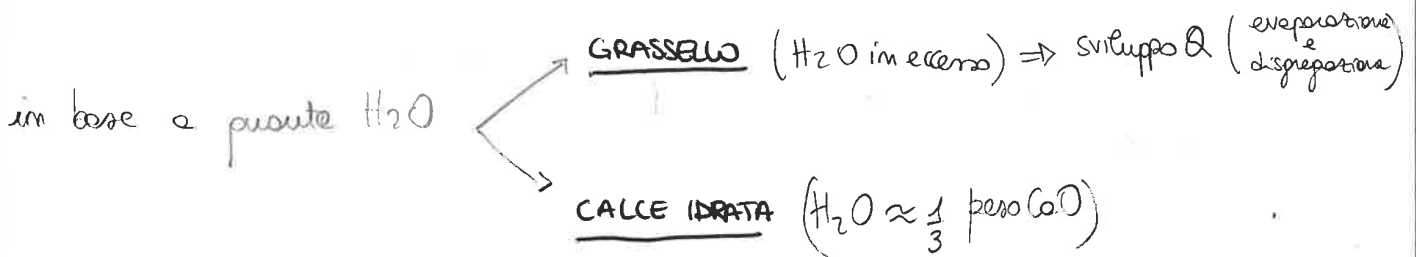
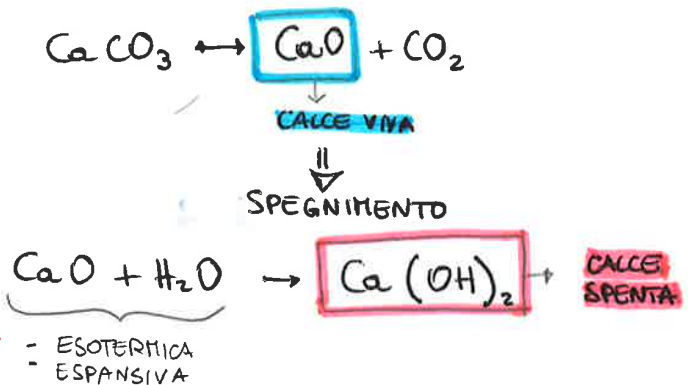
- ↓  $\frac{a}{c}$  ⇒ buona permeabilità cis
- ↑ Compattazione ⇒ < difetti porosi >
- > Spessore copriferro ma attenzione al rischio di fessurazione
- uso ossidativi
- strutture zincate o inossidabili



**LEGANTE** materiale in polvere + H<sub>2</sub>O = massa plastica lavorabile in grado di indurirsi progressivamente



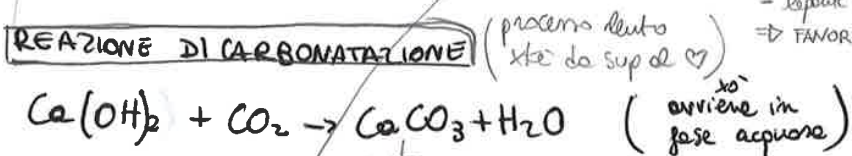
N.B. se calce non spenta bene  
 ↓  
 granelli di ossido si spargono nell'interno in opera  
 ⇒ ↑ V → rigonfiamento localizzato



**PRESA** = perdite plasticità

**INDURIMENTO** = sviluppo proprietà meccaniche

necessita CO<sub>2</sub> ⇒



FASI:

- 1) evap. H<sub>2</sub>O eccesso ⇒ ↓ Volume ⇒ crepe
- 2) mascheramento imposto

(cristalli: corpo solido insolubile in H<sub>2</sub>O)

SOLUZIONE MALTA + SABBIA  
 ↓  
 - impal. se ritira molto indurita  
 - Riparte intorno granuli ⇒ FAVOR. CARBONATAZIONE

$\downarrow T \quad \downarrow v_{presa} \quad \downarrow v_{inclinamento} \Rightarrow \uparrow \text{res. mecc}$   
 $\uparrow T \quad \uparrow v_{presa} \quad \uparrow v_{inclinamento} \Rightarrow \downarrow \text{res. mecc (xte + porosa)}$

$$\frac{a}{c} = 0,23$$

$$\frac{a}{c} = 0,3 - 0,35$$

POROSITÀ CAPILLARE dipende da stagnantaria,  $\frac{a}{c} \Rightarrow \downarrow \text{POROSITÀ}$   
 $\downarrow \frac{a}{c} \Rightarrow \uparrow \text{stagn.}$   
PERMEABILITÀ  $\rightarrow$  macropori  $\Rightarrow$  SEGMENTAZIONE PORI (blocco)

H<sub>2</sub>O nei pori influenza sul ritiro della pasta di cemento

CLS legante + H<sub>2</sub>O + aggregato  
 - cemento                      - sabbia  
     - ghiaie

AGGREGATO  $\left\{ \begin{array}{l} \uparrow \text{prop. mecc} \\ \downarrow \text{ritiro (xte Edto)} \\ \downarrow \text{B. idratazione} \end{array} \right.$

Porosità  $\sim 2-40\%$   
 SSA (saturo a sup. asciutta)  
 pori H<sub>2</sub>O e sup.  $\rightarrow$  pieni

EFFETTI BLEEDING  $\downarrow \frac{a}{c}$ , < qualità, (cristi superficiali)

$\uparrow \text{fini} \Rightarrow \uparrow \text{H}_2\text{O}$

+ pasto rispetto inerti > plasticità

$\uparrow \text{fluidità} \Rightarrow \uparrow \rightarrow \text{SEGREGAZIONE}$

$> \text{stagn.} \Rightarrow \begin{cases} > \text{idratazione cell} \\ < \text{perd. res. mecc} \end{cases}$

DILAVAMENTO



PORTLANDITE

BICARB. DI CA  $\rightarrow$  Solubile

$\downarrow \frac{a}{c} \Rightarrow \downarrow \text{permeabilità}$

ATTACCO SOLFATICO

1) Solfati nella matrice cementizia

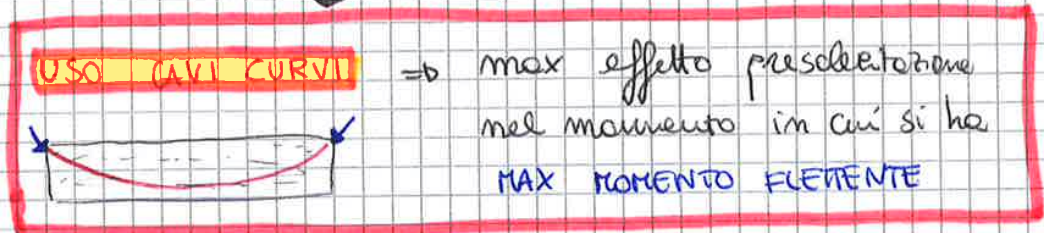
2) SOLFATI + CH  $\rightarrow$  GESSO

3) GESSO + ALLUMINATI  $\rightarrow$  <sup>(C<sub>2</sub>A-H)</sup> ETTRINGITE 2<sup>a</sup>

$\downarrow \frac{a}{c} \Rightarrow \downarrow \text{permeabilità}$   
 $\downarrow \text{CH} \Rightarrow \downarrow \text{C}_3\text{A} + \text{C}_4\text{AF}$

Si conferisce al conglomerato una **compressione preventiva** tale che possa **bilanciare la trazione** determinata dal peso proprio e dai carichi.

→ Nelle strutture di una certa dimensione



### ► CLS ARMATO PRECOMPRESSO: PRE-TENSIONE

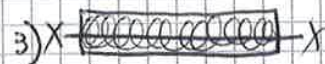
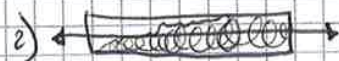
- 1) METTO in tensione i fili
- 2) getto l'imposto (indurimento)
- 3) ELIMINO la tensione dei fili

L'accorciamento elastico del cavo è contrastato dal CLS indurito, trasferendo, per coerenza, lo sforzo a compressione

→ Estremità ornature togliate (teste vive)

protette da corrosione con materiali protettivi o getto di CLS

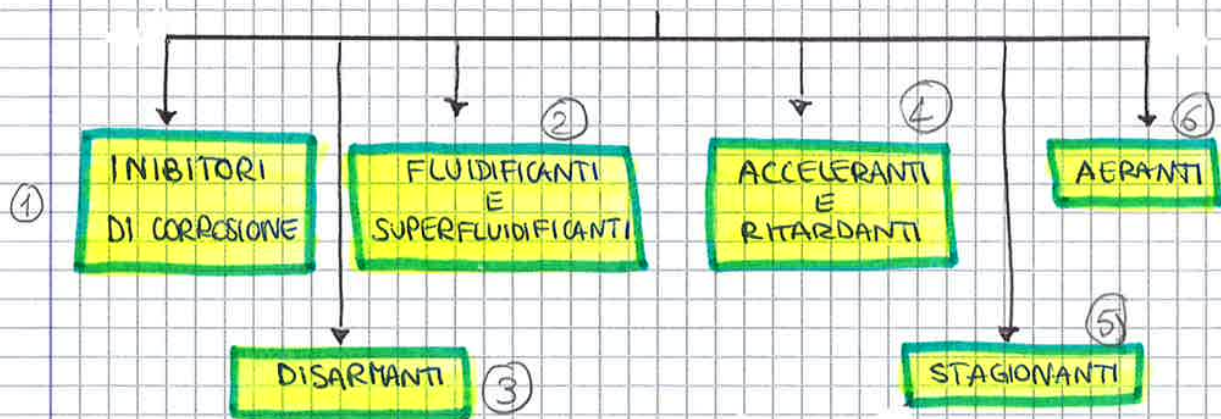
L<sub>0</sub> CAMPO PREFABBRICAZIONE



## ADDITIVI PER CLS

Durante confezionamento CLS uso prodotti chimici, **ADDITIVI** che migliorano le proprietà del CLS

$$\text{DOSE MAX} = 10 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$



### ① ► INIBITORI DI CORROSIONE

Prevenivano la corrosione delle strutture. Lavorano sulla stabilità di ossido protettivo per evitare il distacco o la corrosione causata da cloruri. ↳ si ottiene

♦ PRODOTTI INORGANICI (NITRITO DI CA) a base di nitrati che rafforzano il film protettivo delle strutture e lo rendono stabile anche in presenza di elevate concentrazioni di cloruri

♦ PRODOTTI ORGANICI (AMMINE) si ossidano sulla superficie dell'armatura un film protettivo

2) utilizzo poliacrilati (carbossilati) che sono macromolecole + impregnanti che rivestono i granuli di cemento generando una sorta di catene laterali esposte verso l'esterno dei granuli  $\Rightarrow$  effetto: riduce la tendenza a legarsi tra loro rimanendo lantani

L'effetto del superfluidificante può essere utilizzato in 3 modi:

◆ A PARI COMPOSIZIONE DEL CLS

$$\frac{a}{c} = \text{cost} \quad R_{ck} = \text{cost}$$

◆ A PARI CEMENTO E LAVORABILITÀ CON RIDUZIONE DI H<sub>2</sub>O e  $\frac{a}{c}$

↓ -20% di H<sub>2</sub>O      ↓ -20%  $\frac{a}{c}$   
 pari lavorabilità      ↑ durabilità e res. mecc.

◆ A PARI  $\frac{a}{c}$  e LAVORABILITÀ RIDUZIONE H<sub>2</sub>O e cemento

↓ H<sub>2</sub>O -20%      ↓ -20% C

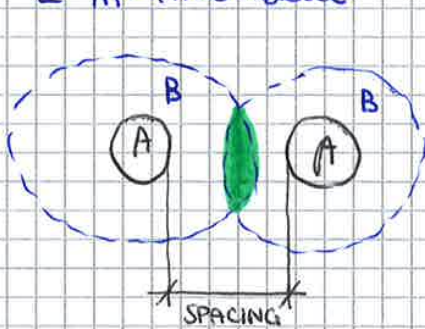
pari lavorabilità, R<sub>ck</sub>, durabilità

< ritiro igrometrico, coefficiente termico, deformazione viscosa.



## PARAMETRI CHE INFLUENZANO LA RESISTENZA A CICLI DI GELO E DISGELO

- dimensione
- distanza reciproca (spacing)
- no microbolle



**L'area di influenza di A**  
 Se si sovrappongono le **sferi di azione** ⇒ fusione  
 se: - bolle distribuite UNIFORMEMENTE

CL5 protette

> lavorabilità > coesione CL5 fresco  
 dovuta alla sfericità e deformabilità delle bolle che facilitano lo scorrimento

### ▶ STAGIONANTI

CL5 esposti aria ⇒ puntura evaporazione CL5



PELLICOLA di cere o resine che protegge il CL5

Se devo effettuare delle riprese di getto devo eliminare la pellicola

## CLS SPECIALI

Si dividono in:

- 1) LEGGERI (LWC)
- 2) PESANTI
- 3) FIBRORINFORZATI
- 4) POLIMERO-IMPREGNATI
- 5) RCP
- 6) AUTOCOMPATTANTI

### ▶ CLS LEGGERO

$300 < \text{peso specifico} < 2000 \text{ kg/m}^3$

#### VANTAGGI

- sezioni più piccole
- riduzione dim (fondazioni)
- costruzione su terreni senza alta portanza
- + resistenti al fuoco
- migliori isolanti termici

▶ **CLS FIBRORINFORZATO** ↑ Tenacità  
↑ res. a flessione e a flessione

Disperda delle fibre (max 2% in volume)

- • migliore tenacità
- migliore res. a flessione e a flessione

♦ **CLS COM FIBRE DI ACCIAIO**

- resistente agli scoppi
- resistente a flessione

♦ **CLS <sup>con fibre</sup> POLIESTERICHE** (basso E)

- impediscono flessione da ritiro plastico

▶ **CLS POLIESTERICO-IMPREGNATO** → SVANTAGGIO: COSTOSO

CLS tradizionale indurito

↓  
Successivamente ericcato

↓  
Riempito con **LIQUIDI MONOMERICI**  
che **POLIMERIZZANO DENTRO I PORI**  
della pasta cementizia

→ CLS ad alte prestazioni

### VANTAGGI

- migliore res. agli agenti aggressivi
- migliore res. in trazione che in compressione

## ▶ CLS AUTOCOMPATTANTE (SCC):

Se getto CLS in spazi stretti (non vibro compattato)

### PROPRIETÀ

- Elevata fluidità
- " mobilità
- " segregazione

### OTTENUTO TRAMITE:

- SUPERFLUIDIFICANTI CARBOSSILICI
- elevato volume di fini
- additivi modificatori di viscosità  
( $\Rightarrow \uparrow$  coesione  $\downarrow$  segregazione)
- Dimensione max bone e pochi aggregati grossi

## VALUTAZIONE DI UN CLS

### ▶ SLUMP - FLOW (SPANDIMENTO)

- 1) stesso caso di Abrams
- 2) voluto t impiegato a raggiungere un diametro di 50 cm
- 3) voluto assenza di segregazione

### ▶ J-RING

Voluto la facilità del CLS di fluire dentro una determinata puzza

## VANTAGGI

- disponibilità illimitata
  - materiale naturale
  - versatilità
  - alto rapporto  $\frac{\text{Resistenza}}{\text{peso specifico}}$
- ⇓  
LEGGIEREZZA

## SVANTAGGI

- anisotropia
  - basso E
  - suscettibilità ad UMIDITÀ
- ⇓  
RIGONFIAMENTI  
⇓  
< durabilità
- combustibilità

♦ **STAGIONATURA** → fusione delle direzioni (⇒ deformazioni)

Riduzione del quantitativo di umidità ad un livello accettabile (ovvero prossimo a quello che occurrerà nell'ambiente di utilizzo)

**VALORE DI RIFERIMENTO = umidità 12%** eq. a 25°C e  $\varphi = 65\%$

LEGNO VERDE (al momento del taglio) → UMIDITÀ  $\approx 60/200\%$

## FASI DELL'ESSICCAMENTO

- umidità  $\approx 30\%$  → H<sub>2</sub>O nel lume
- PUNTO DI SATURAZIONE → H<sub>2</sub>O presente nelle pareti
- SOTTO P. DI SATURAZIONE →
  - rimozione H<sub>2</sub>O dalle pareti
  - ⇒ evaporazione
  - ritiro dimensionale
  - ⇒ ↑ resist. meccanica
  - possibilità deformazione

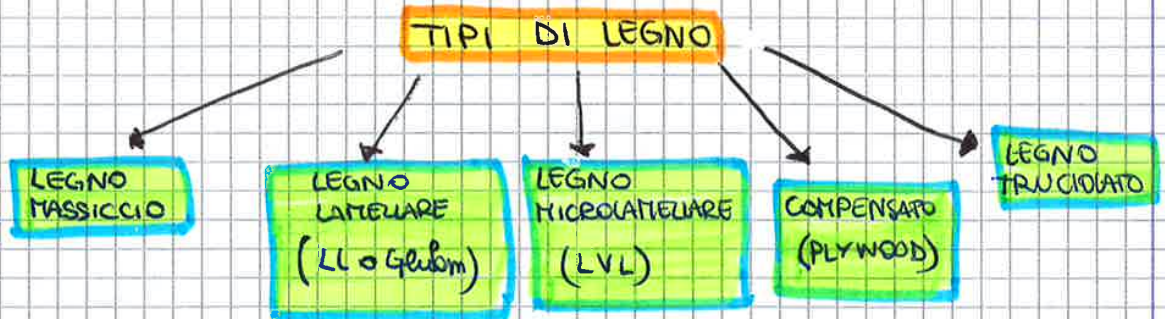
Il cedimento del legno a carichi di compressione non avviene per formazione e propagazione di micro-cricche, ma implica un **CORRUGAMENTO** dovuto alla **deformazione delle fibre**. La direzione di propagazione del corrugamento c'è **perpendicolare** alla direzione su cui è applicato il carico di compressione.

### ▶ NODI

- ↓ proprietà meccaniche
- problemi di lavorabilità

N.B.

Se il rigonfiamento del legno è impedito da più elementi rigidi ⇒ tensioni interne  
↓  
cricche



## ▶ TRUCIOLATO

Panelli in fibre di legno composti di trucioli (scontati) + colla e (eventualmente) cemento

- Durabilità bene
- Si sbriciola

---

## ◆ DEGRADO

### ① EFFETTO IGROMETRICO

Assorbimento / desorbimento  $\Rightarrow$  espansione / ritiro

CICLICAMENTE  
PORTANO

- formazione di crepe e pori

DANNEGGIAMENTO MECCANICO

### ② DEGRADO FISICO

- gelività
  - cristallizzazione sali solubili
- }  $\times$   $\Rightarrow$  materiale poroso

### ③ DEGRADO CHIMICO

- UV  $\Rightarrow$  micro-crepe
- acidi

### ④ DEGRADO DA AGENTI BIOLOGICI

- insetti
- funghi