



**Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino**

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO : 496

DATA : 04/03/2013

# A P P U N T I

STUDENTE : Casalegno

MATERIA : Scienza e Tecnologia dei Materiali

Prof. Montanaro

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

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

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

# SCIENZA E TECNOLOGIA DEI MATERIALI

Conosce i materiali:

- per operare scelte corrette
- TAILORING: progettare in modo funzionale

**MATERIALE**: qualsiasi solido in grado di svolgere almeno una determinata funzione (meccanica, termica, ottica, magnetica, elettrica, ...)

Vari materiali possono svolgere la stessa funzione: occorre saper operare la scelta migliore.

## CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI

- **NATURALI**: di origine geologica (pietre, rocce, argille ...) o chimica (cellulosa, caucciù, carbone, ...).
- **SINTETICI**: ottenuti per trattamento dei minerali, ceramiche, materie plastiche, ...
  - **METALLI** (Fe, Al, Cu, Mg, Ti) e loro leghe (Acciai, ghise, bronzi, ...)
  - **CERAMICI** tradizionali e ingegneristici
  - **MATERIE PLASTICHE** (elastomeri, gomme, termoplastici, termoindurenti)

**METALLI** materiali inorganici metallici

struttura disordinata spesso dovuta a solidificazione veloce

**LEGAME METALLICO**: numero variabile di elettroni di valenza  
Atomi in strutture ordinate, **CRISTALLI** ⇒ difficile fare metalli **amorf**

## TIPDI METALLI

- **PURI**: parte sinistra della tavola periodica
- **LEGHE**: combinazione di due o più metalli o non metalli.



base + alligante	} - Fe - C : ghise e acciai - Al - Cu : duraluminio - Cu - Zn : ottone - Cu - Sn : bronzi
es: Fe    es: C	

## CARATTERISTICHE DEI METALLI

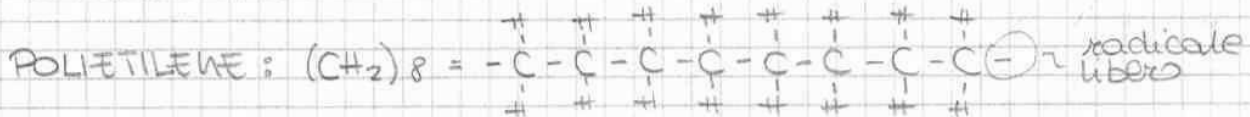
- **OPACHI** (non trasparenti alla luce), ma **LUCENTI** (riflettenti)
- **OTTIMI CONDUTTORI** di elettricità e calore
- **GRANDE RESISTENZA** meccanica.
- **DUTILITÀ**: deformabili plasticamente ⇒ in modo irreversibile contrario di elastici
- **TEMP. FUSIONE VARIABILI** (Al = 660°C, W = 3420°C)

## MATERIE PLASTICHE polimeri - materiali organici

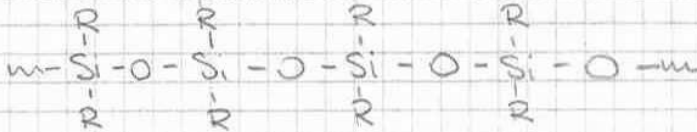
### LEGAME POLIMERICO

- LEGAMI INTRA-CATENA → legami forti (covalenti: C-C)
- LEGAMI INTER-CATENA → legami deboli di Van der Waals (dipolari)

Atomi organizzati da lunghe catene molecolari (MACROMOLECOLE) nelle quali uno o più gruppi (MONOMERI) si ripetono concatenandosi



SILICONI: polimeri con catene a base di Si (e non C)



TIPI DI PLASTICHE (Proprietà variabili a seconda di esse)

- TERMO-PLASTICHE (TP): duttili (deformazione plastica) <sup>irreversibile prima di rottura</sup>
- TERMO-INDURENTI (TI): fragili (deformazione elastica) <sup>reversibile</sup>
- GOMME: estensissima deformazione elastica <sup>ELASTOMERI</sup>

### CARATTERISTICHE DELLE PLASTICHE

- BASSA DENSITÀ
- BASSA RESISTENZA meccanica
- BASSA TEMP. FUSIONE (rammollimento, decomposizione)
- ALTA REATTIVITÀ CHIMICA
- FORMATURA FACILE
- RICICLABILI (TP) <sup>PE</sup> → polietilene tereftalato; <sup>PS</sup> → polistirene

## COMPOSITI

MATRICE + RINFORZO } combinazione di 2 o più materiali per migliorare le caratteristiche di ciascuno di essi.

COMPOSITO NATURALE → legno

matrice → lignina

rinforzo → fibre cellulosiche

## LEGAME COVALENTE / IONICO (+' debole) (CERAMICI)

Energeticamente molto forte

- > alta rigidezza
- > alta resistenza a rottura
- > alta temp. di fusione
- > bassissima dilatazione termica

Direzionale

- > Fragilità (deform. elastica)

Elettroni non liberi

- > pessimo conduttore termico e elettrico -> (isolante)

## INTERAZIONI DEBOLI (DIPOLARI)

VAN DER WALLS

## LEGAME SECONDARIO (POLIMERI)

Energeticamente debole

- > basso rigidità
- > basso resistenza a rottura
- > basso temp. di rammolimento
- > elevato dilatazione termica

Elettroni non liberi

- > I MIGLIORI ISOLANTI termici e elettrici

Le proprietà variano in base a temperatura e tipo (TP, Tg, ...)

## DEFORMAZIONI

I materiali reagiscono alle sollecitazioni esterne deformandosi

-> PRINCIPIO DI AZIONE - REAZIONE

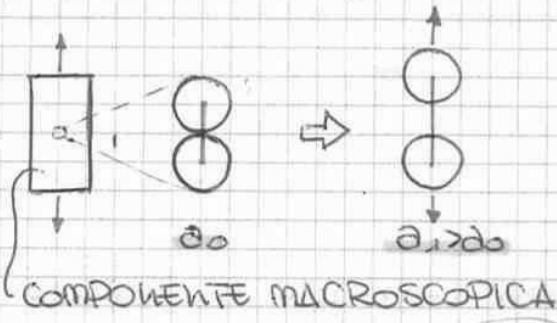
perturbazione di stress sollecitazione esterne

↳ uguale e contraria all'azione

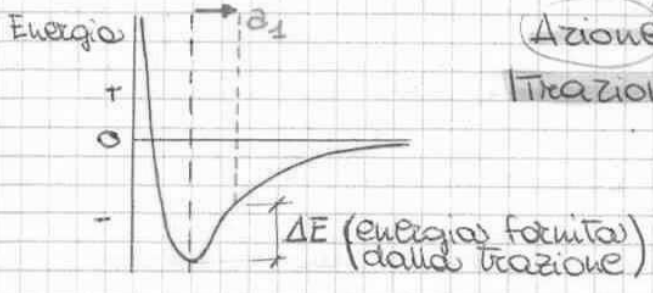
TIPICI DI DEFORMAZIONE

- REVERSIBILI (ELASTICHE): recuperabili quando si annulla lo stress
- IRREVERSIBILI (PLASTICHE): non recuperabili anche se si annulla lo stress

## TRAZIONE (uniasiale)

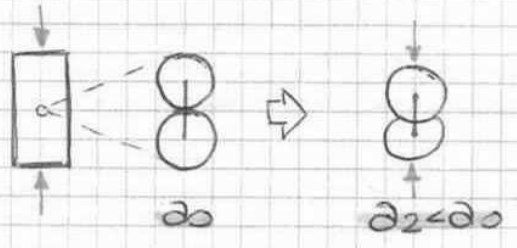


Applicando una forza la componente macroscopica si allunga in modo elastico.  
 => non si allungano gli atomi, ma **SI ALLUNGA LA DISTANZA DI LEGAME.**

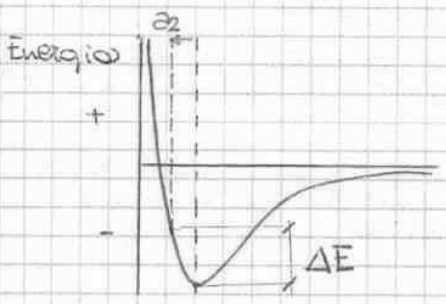


COMPONENTE MACROSCOPICA (esterna al materiale)  
 Azione <-> Reazione (interna)  
 $|Trazione| = |Attrazione|$   
 azione = trazione  
 reazione = attrazione  
 => il sistema è in una condizione di equilibrio

## COMPRESSIONE (uniasiale)



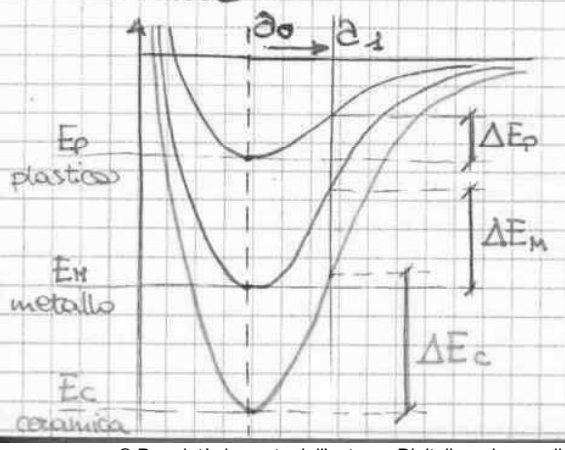
=> La componente macroscopica si comprime in modo elastico  
 => **SI ACCORCIA LA DISTANZA DI LEGAME**



Azione <-> Reazione  
 $|Compressione| = |Repulsione|$   
 azione = compressione  
 reazione = repulsione

DEFORMAZIONI REVERSIBILI poiché l'energia che tiene uniti i due atomi li richiama nelle rispettive posizioni di partenza.  
 Le curve di C-M giustificano SOLO ed ESCLUSIVAMENTE la deformazione ELASTICA!

=> non si usano per spiegare comportamenti PLASTICI, la duttilità.



$a_0$  -> 3 materiali diversi con stesso distanza di legame  
 $a_1$  -> stessa quantità di deformazione plastica -> legame di Van der Waals -> serve meno energia per spezzarlo  
 ceramica -> legame molto forte (->  $E_0$  i basso) -> serve più energia per spezzarlo  
 => per arrivare alla deformazione  $a_1$  devo fornire più energia ( $\Delta E_c$ )

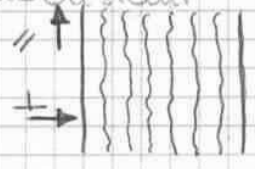
# STRUTTURA ED ORGANIZZAZIONE DEI SOLIDI

**SOLIDO CRISTALLINO:** ogni atomo occupa nello spazio una posizione ben definita, cioè ha un intorno assolutamente identico a quello degli altri ⇒ ordine a lungo raggio

**ANISOTROPIA:** una o più proprietà del materiale sono in funzione della direzione secondo la quale sono misurate

es: il legno è un materiale fortemente anisotropo, poiché è formato da fibre disposte lungo l'asse principale che ne conferiscono una grande elasticità lungo quell'asse

x monocristalli



⇒ resiste bene alle sollecitazioni del vento (forze ⊥ all'asse principale)

**SOLIDO AMORFO:** atomi organizzati secondo un reticolo tridimensionale ma distribuiti disordinatamente nello spazio.

**ISOTROPIA:** le proprietà del materiale non dipendono dalla direzione secondo la quale esse vengono misurate

A parità di composizione chimica, un solido amorfo è più reattivo di un solido cristallino (causa bordi di grano)

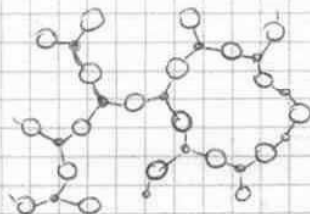
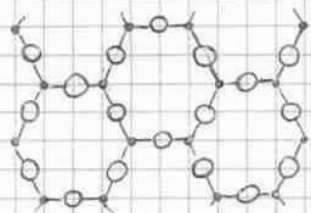
es: rappresentazione 2D di SiO<sub>2</sub>

SILICE CRISTALLINA

SILICE AMORFA (vetrosa)

policristalli Quarzo

vetro di silice

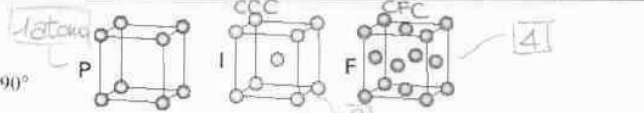


La silice cristallina reagisce molto lentamente con la calce a differenza di quella amorfa.

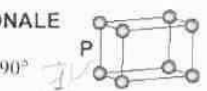
**CELLE ELEMENTARI (x solidi cristallini):** disposizione di atomi 3D più semplice che si ripete nell'intero reticolo cristallino

## Reticoli Fondamentali di BRAVAIS (14)

CUBICO  
a = b = c  
α = β = γ = 90°



TETRAGONALE  
a = b ≠ c  
α = β = γ = 90°



ORTOROMBICO  
a ≠ b ≠ c  
α = β = γ = 90°



ESAGONALE



Formazione di chiudenda per retinzione  
Moltiplicando a rotazione dagli angoli solidi

Esagonale compatta e Cubica a facce centrate sono i reticoli con impaccamento atomico maggiore (FC = 6 atomi; CFC = 4 atomi)

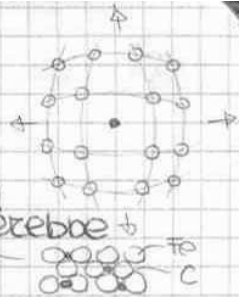
⇒ hanno densità maggiore

Cubico a corpo centrato (CC) ha densità minore

⇒ impacca più spazio vuoto

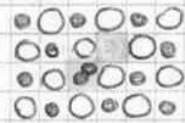
zincatura a maglie differenziate, di altezza minima m 1/4 compresa la formazione di scalandrini, cancelli ed ogni altro onere.  
ml € 10,72

• **DEFETTI INTERSTIZIALI**: presenza di un atomo piccolo in più inserito in un interstizio (spazio fra gli atomi)



Avviene quando l'atomo è molto più piccolo di quelli del reticolo e la sua sostituzione nel reticolo risulterebbe instabile (es: acciai: carbonio disciolto nel Fe)

• **DEFETTO DI FRENKEL**: insieme di una vacanza e di un atomo interstiziale



### CONSEGUENZE DEI DEFETTI PUNTUALI

• Creazione di SOLUZIONI SOLIDE (LEGHE) →

- ↳ **SOSTITUZIONALI** ① atomi di dimensioni simili
- ↳ **INTERSTIZIALI** ② atomi grossi con atomi molto piccoli

### • DIFFUSIONE NELLO STATO SOLIDO ③

#### ① SOLUZ. SOLIDA SOSTITUZIONALE COMPLETA

le due componenti sono completamente miscibili in una soluzione

4 REGOLE DI HUME-ROTHERY. I materiali devono avere:

- stessa valenza (n° elettroni che contribuiscono al legame chimico)
- stesso reticolo cristallino (es: entrambi CCC)
- simile elettronegatività
- differenza tra i raggi atomici minore del 15%

4 regole rispettate → **MISCIBILITÀ TOTALE** (es: Cu e Ni)  
 ⇒ in qualsiasi percentuale le due sost. sono completamente miscibili

3/4 regole rispettate → **MISCIBILITÀ PARZIALE** (es: Al e Cu)  
 ⇒ si creano delle leghe solo mescolando determinate percentuali di elementi

0 regole rispettate → **IMMISCIBILI** IN SOLUZ. SOLIDA SOSTITUZIONALE  
 ⇒ non posso fare una lega.

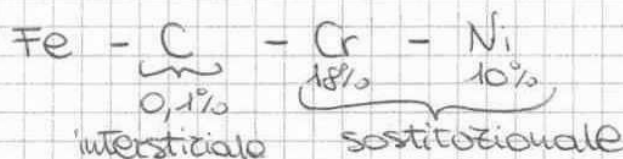
#### ② SOLUZ. SOLIDA INTERSTIZIALE

es: Fe + C → acciai o ghise ((a seconda) della % di C in Fe)

La solubilità è sempre **PARZIALE**, poiché gli spazi interatomici sono molto ridotti:

⇒ max 10% di soluto interstiziale

es: acciaio inox

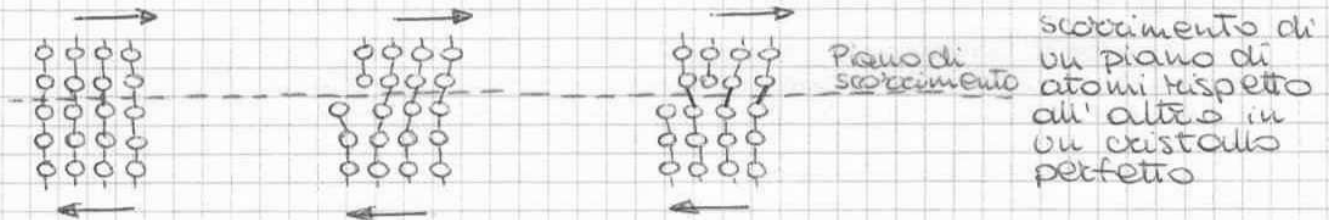




Il cristallo in prossimità della dislocazione risulta deformato:

- sopra la linea di dislocazione: distanze tra atomi minore della distanza d'equilibrio  
 ⇒ compressione
- sotto la linea di dislocazione: dist. tra atomi > dist. d'eq.  
 ⇒ trazione

⇒ aumenta l'energia totale del cristallo



scorrimento di un piano di atomi rispetto all'altro in un cristallo perfetto

Per deformare un cristallo perfetto occorre far scorrere un piano di atomi rispetto ad un piano adiacente. sforzo di taglio calcolato da Frankel

I valori del taglio per i cristalli perfetti sono elevati poiché per far avvenire lo scorrimento è necessario rompere simultaneamente tutti i legami adiacenti al piano di scorrimento

Per i cristalli in cui sono presenti dislocazioni lo scorrimento avviene facilmente lungo una direzione perpendicolare alla linea di dislocazione

⇒ le dislocazioni facilitano la deformazione plastica!  
 INCRUDIMENTO:  $T \uparrow$  alta ⇒ + energia ⇒ moto delle dislocazioni favorito

PERCHÉ I METALLI SONO DOTTILI E I CERAMICI NO?

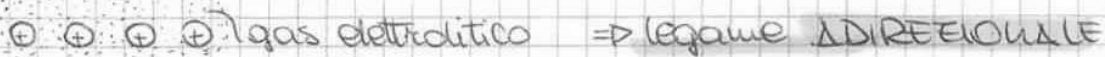
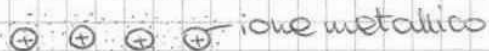
### METALLI

⇒ Legame metallico: atomi tenuti insieme da una nube di elettroni.

⇒ applico una sollecitazione al solido

→ gli atomi si spostano e occupano un'altra posizione all'interno della nube elettronica

→ il solido assume una nuova forma (deformazione plastica)



### CERAMICI

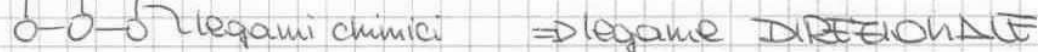
⇒ Legame covalente: messa in comune di atomi

⇒ applico una sollecitazione

→ il legame si deforma elasticamente → 

applico una sollecitazione più forte

→ il legame si spezza (rottura) ⇒ no def. plastica!



⇒ Legame ionico: passaggio (cessione) di  $e^-$

la deformazione plastica avviene solo nelle direzioni che non mettano a contatto ioni con la stessa carica

## DIFETTI A TRE DIMENSIONI

Una parte del cristallo è sostituita da un volume di un composto diverso  $\Rightarrow$  differenze di natura chimica (la parte estranea può essere un precipitato o un'inclusione)

**POROSITÀ**: assenza di materia in alcuni punti, fori

Difetti:

- crea una riduzione della resistenza poiché ho meno atomi nella struttura  $\Rightarrow$  meno legami

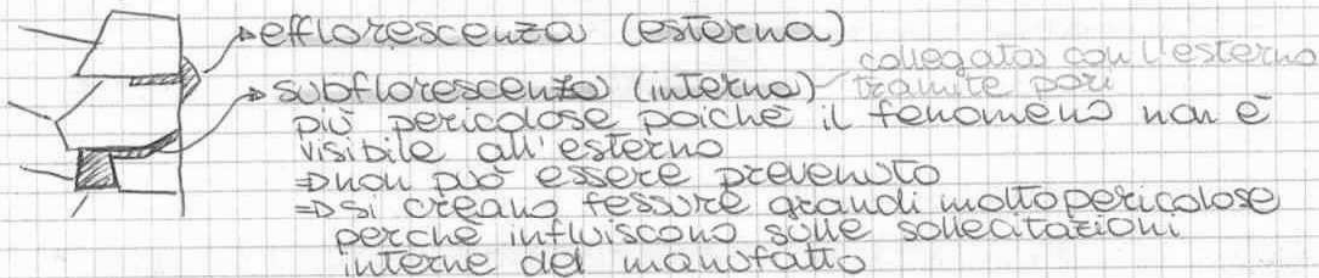
- \* degrado del materiale (corrosione) più veloce poiché non viene intaccata solo la superficie esterna

Pregi:

- buoni isolanti termici, poiché gli spazi vuoti interni contengono aria che non fa passare il calore

## \* EFFLUORESCENZA SU LATERIZIO CON FACCIA A VISTA ("patina" bianca sui mattoni)

Fenomeno di precipitazione: entra acqua all'interno dei pori capillari della muratura portando con se sostanze solubili in acqua.  
 $\rightarrow$  precipitazione dei sali  
 $\rightarrow$  aumento la dimensione dei pori nel laterizio



\*  
~~~~~

## I SOLIDI NON CRISTALLINI (AMORFI)

Minerali che non possiedono una struttura ordinata: solidi imperfetti secondo le 3 dimensioni.

**VETRI**: strutture disorganizzate ottenute raffreddando rapidamente miscele di silicati fusi.

**POLIMERI**: zone ordinate affiancate a zone amorphe  
 $\Rightarrow$  i polimeri non sono cristalli!

## \* PROP. CHIMICHE

(pessa)

- **SOLUBILITÀ** (dipende da  $T$ ): solfato di calcio idrato molto solubile
- **pH** (ionizzazione in soluz.)  $\rightarrow$  ferro non ossidagisce se fortemente basico
- **PRECIPITAZIONE** (solido in eccesso)

$\rightarrow$  EFFLORESCENZA!

## EQ. DI LAPLACE



$r$  = raggio di curvatura COSTANTE

contrazione di volume ( $dV$ )  $\leftrightarrow$  aumento pressione <sup>interno</sup> ( $\Delta P$ )

$\rightarrow$  Lavoro di contrazione =  $\Delta P \cdot dV$

- la goccia tende ad occupare un volume minimo  $\rightarrow$  spinta verso l'interno
- la goccia tende a cercare una posizione di minima tensione superficiale, cioè avere poca superficie esterna a contatto con l'aria.

Diminuzione dell'estensione superficiale di interfacce ( $dA$ )  $\leftrightarrow$  Aumento della tensione superficiale ( $\gamma$ )

- il liquido assume forma sferica poiché minimizza l'interfaccia  $\rightarrow$  diminuisce  $r$
- controspinta particelle di acqua poiché minor volume comporta maggiore pressione

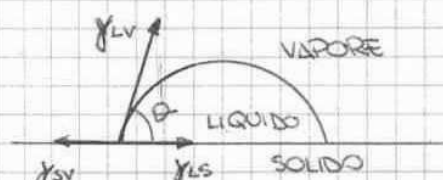
$\rightarrow$  Equilibrio tra 2 spinte:  $\Delta P \cdot dV = \gamma \cdot dA$       $\Delta P = \frac{\gamma dA}{dV} = \frac{\gamma \cdot 4\pi r^2}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{3\gamma}{r}$

$\rightarrow$  Tanto più piccola è la goccia tanto maggiore è la  $P$  tra le molecole

Tanto più piccola è la sup. esterna tanto più piccola è l'energia libera superficiale, maggiore tensione

$\Delta P = \frac{\gamma dA}{dV} = \frac{\gamma d(4\pi r^2)}{d(\frac{4}{3}\pi r^3)} \Rightarrow \Delta P = \frac{2\gamma}{r}$

## LEGGE DI YOUNG-DUPRE



- Tensioni superficiali:
- tra liquido e vapore  $\rightarrow \gamma_{LV}$
  - tra liquido e solido  $\rightarrow \gamma_{LS}$
  - tra solido e vapore  $\rightarrow \gamma_{SV}$

Nel punto di contatto tra solido (S), liquido (L), vapore (V) l'equilibrio delle tensioni superficiali è:

$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta$       $0^\circ < \theta < 180^\circ$  = angolo di contatto

$\rightarrow$  la forma della goccia deriva dall'equilibrio tra le 3 fasi

se  $\theta < 90^\circ \rightarrow$  il liquido bagna il solido: goccia distesa  
 prevale la fase solido-liquido  $\Rightarrow$  solido IDROFILO (o LIOFILO)  
per liquidi senza

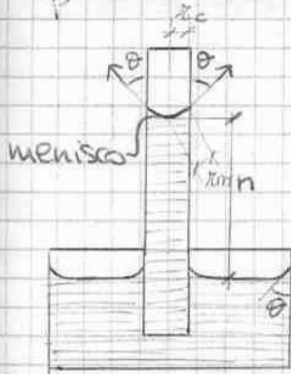
$\theta = 0 \rightarrow$  il liquido bagna completamente il solido

se  $\theta > 90^\circ \rightarrow$  il liquido non bagna il solido: goccia raccolta  
 prevale la fase vapore-liquido  $\Rightarrow$  solido IDROFOBO (o LIOFOBO)

$\theta = 180^\circ \rightarrow$  il liquido "si appoggia" al solido

## LA RISALITA CAPILLARE $P_c$

Risalita di un liquido all'interno di un capillare



↓ l'acqua risale nel tubo capillare richiamata dal fenomeno di adsorbimento delle molecole del solido.

**FORZE D'ADESIONE**: forze attrattive che si manifestano tra materiali diversi posti a contatto.

**FORZE DI COESIONE**: forze agenti tra particelle di uno stesso materiale.

Adsorbimento del solido (molecole in sup. troncata) → risalita del liquido  
→ creazione di forze d'adesione che contrastano le forze di coesione.

La risalita si blocca quando il peso della colonna di liquido bilancia la tensione superficiale.

Pressione capillare:  $P_c = \Delta P = \frac{2\gamma}{r_m}$  LAPLACE  
Tensione superficiale del liquido  
raggio di curvatura del menisco

raggio capillare:  $r_c = r_m \cdot \cos\theta$

$$\Rightarrow P_c = \Delta P = \frac{2\gamma}{r_c} \cos\theta$$

che spinge verso l'alto il liquido ( $r_c$  e  $\theta$  minori → risalita più elevata)

La risalita si blocca quando la  $P_c$  è equilibrata dalla  $P_i$ .

$$\Rightarrow P_i = \rho h g = \frac{2\gamma}{r_c} \cos\theta = P_c$$

$\rho$ : accelerazione di gravità  
 $h$ : altezza della colonna di liquido  
 $g$ : massa volumica del liquido  
 (pressione idrostatica)

Per  $H_2O$ :  $r_c = 1 \mu m \rightarrow h = 15 m$  di risalita } in condizioni  
 $r_c = 10 \mu m \rightarrow h = 1.5 m$  di risalita } di idramento

$$\Rightarrow h = \frac{15 \cdot 10^{-6}}{r_c} \quad \Rightarrow 2\gamma \cdot \cos\theta = 15 \cdot 10^{-6}$$

## LA DILATAZIONE TERMICA $\alpha$

Variatione della dimensione di un materiale sottoposto a una variazione di temperatura

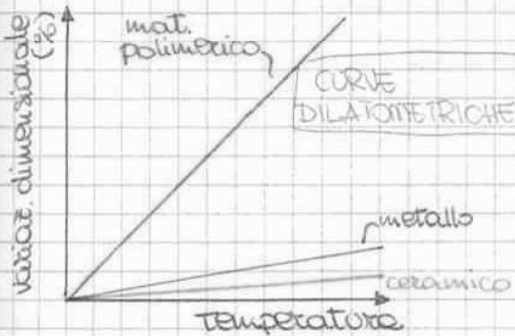
coeff. di dilatazione termica lineare  $\rightarrow \alpha = \frac{\Delta L / L_0}{\Delta T} = [C^{-1}]$  da  $\frac{L_1 - L_0}{L_0} = \alpha(T_1 - T_0)$  v. pag. 8

$\alpha$  = definita a seconda dell'intervallo termico in cui è stata misurata la deformazione.

$\Delta T$  = gradiente termico

$\frac{\Delta L}{L_0}$  = deformazione elastica subita dal materiale provocata da una variazione termica (non da uno stress meccanico).

DILATOMETRO: strumento per calcolare la dilataz. termica



$\alpha$  polimeri =  $50 / 250 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

(per i polimeri termoplastici)

$\alpha$  metalli =  $5 / 25 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$\alpha$  ceramici =  $5 / 10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$\Rightarrow$  i polimeri si dilatano molto più dei metalli e dei ceramici

La dilatazione termica non è un fenomeno trascurabile, soprattutto quando si parla di costruzioni, nelle quali materiali con coeff. di dilatazione diversi sono messi a stretto contatto.

## IL COMPORTAMENTO AL FUOCO

In vicinanza o al contatto con una fiamma i mat. si distinguono:

**COMBUSTIBILI**: (di origine organica)

- $\rightarrow$  sostanze che bruciano (legno, mat. plastiche)
- $\rightarrow$  generano o alimentano l'incendio.

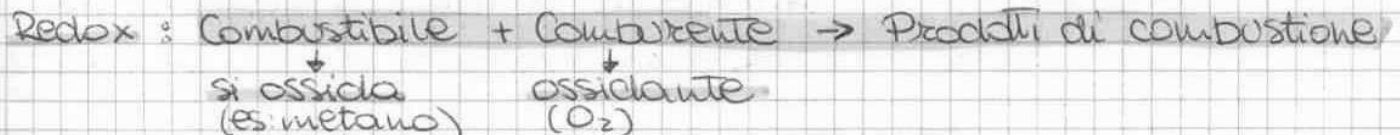
**INCOMBUSTIBILI**: sost. che non bruciano mai:

- $\rightarrow$  sost. che modificano la loro composizione chimica (marmi, cementi idraulici, leganti aerei e idraulici)
- $\rightarrow$  sost. che modificano in modo più o meno importante le loro dimensioni (acciai, laterizi)

È importante stabilire se un materiale è incombustibile o meno e, se è combustibile, quali sono le conseguenze della sua combustione.

## LA COMBUSTIONE reaz. di ossido-riduzione con $O_2$

**COMBUSTIBILE**: sostanze in grado di combinarsi con un **COMBURENTE** (in genere  $O_2$ , 21% aria)



Specie gassose e tossiche:

- gas NARCOTICI (CO: monossido di carbonio; HCN: acido cianidrico; benzene; acetone...): riduzione delle funzioni motorie, perdita di conoscenza fino a morte.
- gas IRRITANTI (HCl): offendono occhi e vie respiratorie, danni polmonari e morte.

Trasferimento di calore:

Condizione termica: scatta incendio anche senza conduzione



Trasferimento di energia attraverso vibraz. reticolari (fononi) o movimento elettronico

conduzione termica → innesco incendio stanza adiacente

Irraggiamento: propagazione di calore in tutte le direzioni

Convezione: trasferimento di calore tramite un fluido (gas) che modifica la sua densità e migra verso l'alto.

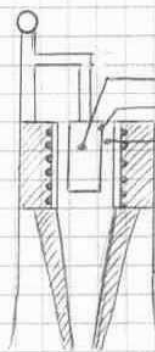


PROVE DI INCOMBUSTIBILITÀ (EN ISO 1182)

Consente di stabilire se un mat. contribuisce direttamente o indirettamente all'incendio.

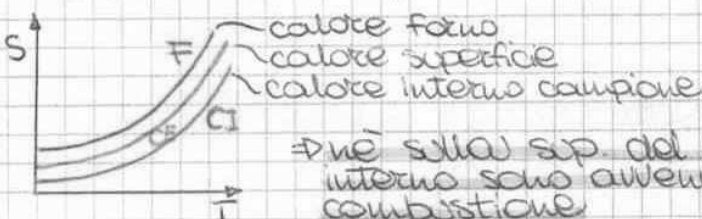
FORNO ELETTRICO con velocità di salita di T programmabile

con 3 termocoppie:



- termocoppia del campione
- termocoppia di superficie del campione
- termocoppia del forno

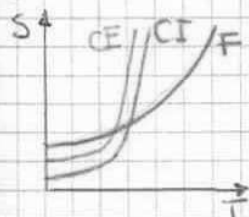
① le 3 termocoppie segnalano temperature prossime tra loro (simili) ⇒ accoglimento // delle 3 T.



⇒ né sulla sup. del campione né al suo interno sono avvenute reazioni di combustione

⇒ MAT. INCOMBUSTIBILE (di classe 0)

② le termocoppie del campione si discostano da quella del forno



⇒ si sta manifestando un fenomeno esotermico

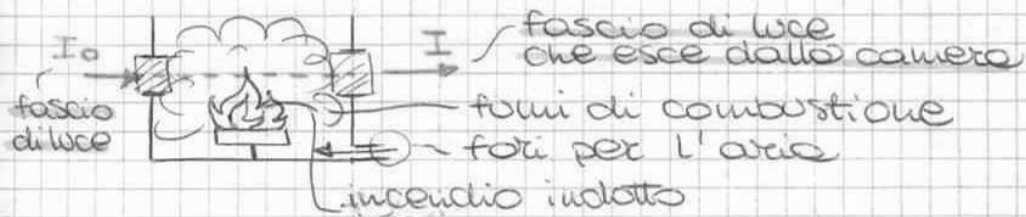
⇒ MAT. COMBUSTIBILE

Deve essere sottoposto ad altre prove che ne determinino il grado pericolosità.

#### 4. OPACITÀ DEI FUMI (ASTM)

Applicato principalmente alle mot. plastiche

Misura l'ammontare relativo di fumo prodotto dalla combust. e la decomposizione dei materiali  
 ⇒ misura della perdita di luce trasmessa attraverso un volume di fumo prodotto in condizioni controllate.



Provino esposto ad una fiamma di gas propano per 4min all'interno di una camera standard con 4 piccoli fori alla base (necessari per garantire lo sviluppo dei fumi).



tanto più la curva si abbassa quanto più fumo viene prodotto e si abbassa la visibilità.

#### EFFETTI DELL'INCENDIO SUI MAT. DA COSTRUZIONE

CALCESTRUZZO → incombustibile

Effetti dell'incendio su CLS:  
 a) sulla pasta cementizia  
 b) sugli aggregati  
 c) complessivi sul CLS

a) la pasta di cemento si disidrata progressivamente  
 ⇒ perdita delle capacità leganti del materiale.

b) aggregati silicei (quarziti) → variazioni dimensionali legate alle transizioni allotropiche

• aggregati calcarei → si decompongono termicamente  
 ⇒ perdita delle resistenze meccaniche

c) csi nel complesso → variazioni dimensionali ⇒ perde resistenza

cls permeabile → infiltrazioni d'acqua → vaporizzazione  $H_2O$  dei pori → pressioni interne → "scoppi del cls" (espulsione scaglie)

CLS ARMATO + acciaio → incombustibile

• fenomeni di scorrimento viscoso sull'armatura → diminuzione del limite elastico

• dilatazione termica diversa tra cls e armatura  
 ⇒ perdita di adesione ⇒ isola con copriferro

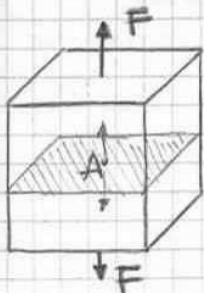
#### PROBLEMA IN FASE DI SPEGNIMENTO DELL'INCENDIO

Idrossido di calcio si disidrata in ossido di calcio con il calore. con l'acqua per spegnere si reidrata

Reazione molto espansiva ⇒ nuovi tensionamenti nella struttura già danneggiata

# PROPRIETÀ MECCANICHE Teoria dell'elasticità lineare

## TRAZIONE UNIASSIALE F

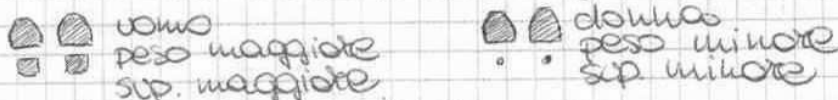


Reaz. di allungamento  $\Delta L$  lungo la direzione di trazione:   
 deformazione a trazione

$$\Delta L = L - L_0$$

Valutando il binomio  $F \rightarrow \Delta L$  non valuto il comportamento del mat., ma solamente l'aspetto nella sua forma.

es: PROVA DEL TACCO A SPILO (x resistenze parquet)



La sollecitazione della donna provoca uno stress maggiore al materiale

Fragisce su una sezione del cubo parallela alla superficie sulla quale esso è stato applicato

• SFORZO NOMINALE (sollecitazione) o stress

$$\sigma = \frac{F}{A} = \left[ \frac{N}{m^2} \right] = [Pa]$$

$$\sigma \rightarrow 1 MPa = 10^6 Pa = 10^6 \frac{N}{m^2} = 1 \frac{N}{mm^2}$$

A = area portante

• DEFORMAZIONE NOMINALE di Strain (risposta del materiale)

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \text{adimensionale} = [\%] \frac{mm}{m} \quad L_0 = \text{lunghezza iniziale}$$

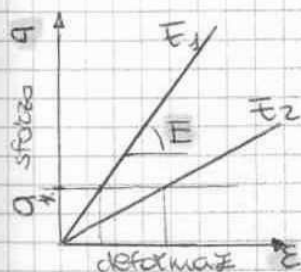
## LEGGE DI HOOKE

Vale solo in campo elastico, non plastico !!

Ricavata tramite osservazioni sperimentali

$$\sigma = E \epsilon \quad E = \text{modulo elastico (di Young)} = \left[ \frac{N}{m^2} \right] = [Pa] = 10^9 Pa \quad \text{come } \sigma$$

Tale legge non vale per elastomeri e gomme (comportamento elastico non lineare).



## GRAFICO DELLA LEGGE DI HOOKE

E è legata alla pendenza dello stesso sforzo-def.

E è una proprietà intrinseca del mat.: dipende dall'intensità dei legami tra gli atomi = difficile da modificare (modificabile creando dei compositi o dei pori)

A parità di stress di progetto ( $\sigma^*$ ) il materiale che si deforma di meno è quello con modulo elastico maggiore ( $E$ )

$\Rightarrow E = \text{rigidezza del mat.}$

Unità di misura  $[E] = [GPa]$  poiché:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \sigma - MPa \quad \epsilon - \text{numero molto piccolo}$$

$$1 Pa = 10^{-6} MPa = 10^{-9} GPa$$



## LE SOLLECITAZIONI

Mat. sottoposto a forze esterne

Reaz.  $\rightarrow$  si creano sollecitazioni all'interno del materiale

### SOLLECITAZIONI SEMPLICI

1. Trazione uniaxiale  $\leftarrow \boxed{\text{cubo}} \rightarrow$
2. Compressione uniaxiale  $\rightarrow \boxed{\text{cubo}} \leftarrow$
3. Pressione interna (biassiale): di un materiale contenente un fluido pressurizzato  $\boxed{\text{cubo}}$
4. Pressione idrostatica: di un materiale immerso in un fluido  $\boxed{\text{cubo}}$
5. Sollecitaz. di Taglio (tangenziale puro,  $\tau$ ): che agisce parallelamente alla superficie portante.  $\boxed{\text{cubo}}$

### SOLLECITAZIONI COMPOSITE

Sollecit. che possono essere scomposte vettorialmente in sollecit. semplici.

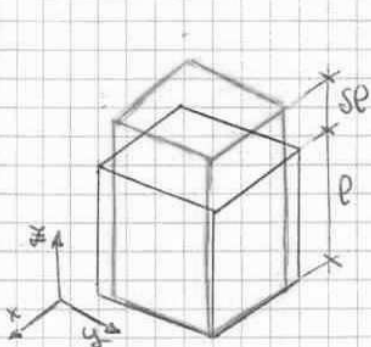


es: FLESSIONE = trazione uniaxiale + compressione uniaxiale

### COSTANTI ELASTICHE

\* LEGGE DI HOOKE: per trazione  $+\sigma$  e compressione  $-\sigma$  uniaxiale  
 $\sigma = E \epsilon$   $\epsilon_z$  (asse longitudinale)

\* COEFFICIENTE DI POISSON:  $-\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z}$



$V = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z}$   
 $\frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} \rightarrow$  deformazione trasversale  $\rightarrow \frac{\delta p}{p}$  (lungo x (opp. y))  
 $\epsilon_z \rightarrow$  deformazione longitudinale  $\rightarrow \frac{\delta l}{l}$   
 convenzione per rendere positivo il valore  
 $\downarrow$   
 trazione uniax:  $E$  positivo,  $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$  negative  
 compressione uniax:  $E$  negativo,  $\epsilon_x$  e  $\epsilon_y$  positive

Mat. ISOTROPO ( $\epsilon_x = \epsilon_y$ ): deformazione lungo asse x uguale alla def. lungo y  
 $\rightarrow$  valore della proprietà indipendente dalla direzione lungo la quale si misura

Mat. ANISOTROPO: proprietà dipendenti dalla direzione (es: legno)

PLASTICHE  $\rightarrow \nu = 0,5$

METALLI  $\rightarrow \nu = 0,3 / 0,4$

CERAMICI  $\rightarrow \nu = 0,1 / 0,2$

## PROVE MECCANICHE

Consentono di ottenere valori delle proprietà meccaniche che permetteranno di apprezzare il comportamento del materiale in opera

Per essere valide devono implicare sollecitazioni semplici e note ed essere di interpretazione inequivocabile.

Si dividono in:

- **STATICHE**: sollecitazione crescente gradualmente fino a rottura del provino
- **DINAMICHE**: sollecitazione applicata bruscamente sotto forma di impulso di energia, tale da indurre la rottura del provino al momento dell'impatto (es: martellato).
- **A FATICA**: sollecitazione applicata ciclicamente molte volte fino a produrre, dopo un certo numero di cicli, la rottura

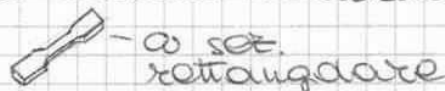
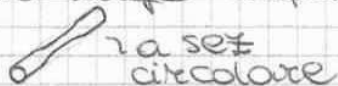
Normative per materiali: EN UNI, EN ISO, ASTM

## PROVE STATICHE

- \* Prova a trazione
  - \* Prova a compressione
  - \* Prova a flessione
  - \* Prova di durezza
- } carico progressivamente aumentato fino a rottura
- > ci si ferma prima della rottura

## \* PROVA A TRAZIONE UNIASSIALE

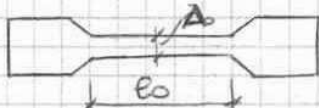
Provini a "OSSEO DI CAHE" formati da due teste con sezione più larga rispetto alla sezione centrale



Gli afferraggi della macchina ruotano le teste per applicare una forza di trazione uniaassiale al provino.

Le teste sono di sez. più grande poiché esse devono sopportare lo stress senza rompersi.

La parte centrale ha sez. più sottile poiché la rottura del provino deve avvenire in quella zona, detto tratto utile ( $l_0$ )



$A_0$  = area sez tratto utile iniziale  $\Rightarrow \sigma = \frac{F}{A_0}$

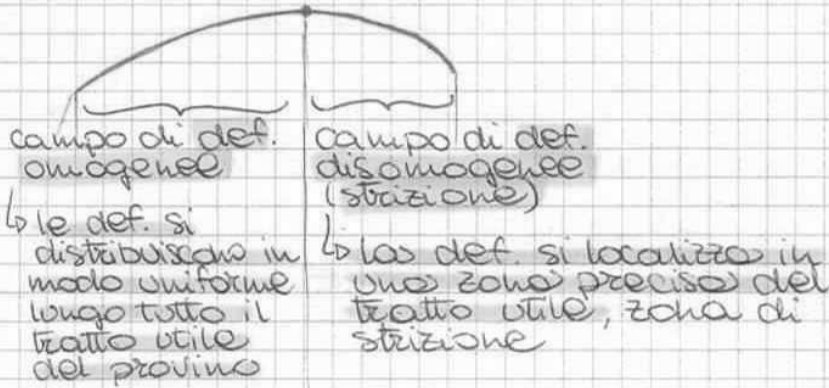
$l_0$  = lunghezza iniziale del tratto utile  $\Rightarrow \epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$

Le prove vengono condotte a velocità di deformazione costante

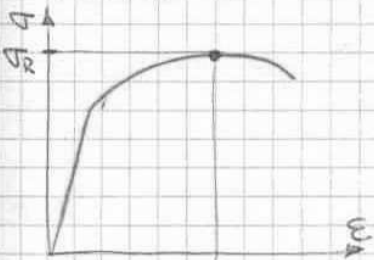
$\frac{d\epsilon}{dt} = \text{cost}$   $\Rightarrow$  velocità di deformazione crescente  $\rightarrow$  resistenza a rottura più bassa

Per confrontare i mat. dobbiamo sempre usare lo stesso velocità di deformazione.

CAMPO DI DEF. ELASTOPLASTICA (II e III): la def. elastica rimane fino a quando cessa la sollecitazione



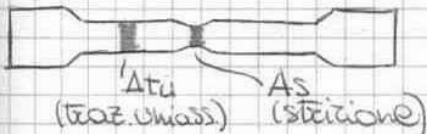
PARTE II



- RESISTENZA A ROTTURA, O A TRAZIONE ( $\sigma_R$ ): massimo valore di  $\sigma$  nel grafico ( $\sigma, \epsilon$ ) oltre al quale avviene la strizione
- RESISTENZA A COMPRESSIONE ( $\sigma_C$ )

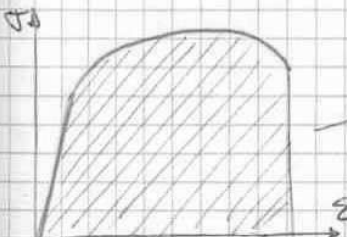
PARTE III

Il tratto di STRIZIONE non ha alcun significato meccanico (fisico) in quanto il materiale è già instabile.  
 Dato che la prova deve procedere a velocità costante controlliamo la deformazione  $\Rightarrow$  non permettiamo una volta raggiunta  $\sigma_R$  che il provino si deformi e si rompa alla velocità che vorrebbe.  
 Il provino si deforma solo nella zona più debole: diminuisce  $F$  per avere la velocità di def. costante



- STRIZIONE A ROTTURA ( $\sigma_R$ ): variazione della sezione del provino nella zona in cui si manifesta la rottura
- ogni  $\sigma_{tu} = F/A_{tu} \Rightarrow \sigma_s = F/A_s$   
 $\Rightarrow \sigma_R = \frac{A_0 - A_s}{A_0}$        $A_0$  = area iniziale  
 $A_s$  = area max di strizione

DEFORMAZIONE (PLASTICA) A ROTTURA ( $\epsilon_R$ ): def. irreversibile che ha il provino a riposo



- LAVORO SPESO PER UNITÀ DI VOLUME DEL MATERIALE (Area sottesa) (la curva): energia di rottura del materiale



TENACITÀ: energia [ $J/m^3$ ] che deve essere fornita all'unità di volume del mat. per prevenire la rottura

- $E \rightarrow$  RIGIDEZZA
- $\sigma_{el}, \sigma_{0.2}, \sigma_R \rightarrow$  RESISTENZA
- $\epsilon_R, \sigma_R \rightarrow$  DUTILITÀ (DEF.)
- Area sottesa  $\rightarrow$  TENACITÀ

⇒ PROVA A TRAZIONE x MAT. DUTILI

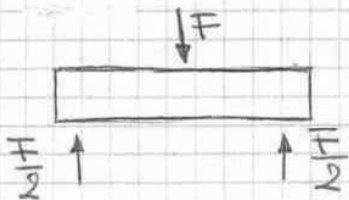
PROVA A COMPRESSIONE x MAT. FRAGILI

\* PROVA A FLESSIONE

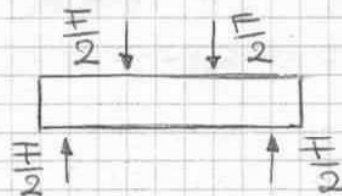
Sollecitazione complessa = compressione + trazione

Usate per qualificare le zone di giunzione (es: giunto di saldatura) per i metalli.

PROVA A FLESSIONE A 3 PUNTI



PROVA A FLESSIONE A 4 PUNTI



Solitamente la prova a 4 punti ottiene risultati peggiori di quello a 3 perché il provino ha il volume più soggetto alle sollecitazioni.



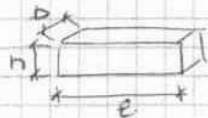
La superficie superiore ha un massimo di compressione, mentre la superficie inferiore ha un massimo di trazione.

In corrispondenza dell'asse neutro, compress. e trazione si eguagliano ( $|\sigma_c| = |\sigma_t|$ ), ma il provino non è scarico.

MAT. FRAGILE:  $\sigma_c > \sigma_f > \sigma_t$  → si rompe prima a trazione, poi a flessione e infine a compressione.

MAT. DUTILE: solitamente non consente di pervenire alla rottura in prove a fl.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2}$$



[MPa]

\* PROVA DI DUREZZA (HARDNESS → H)

Resistenza superficiale ad un danneggiamento o a una pressione

PROVINO con superficie liscia, non rugosa

Prova fatta tramite l'utilizzo di un INDENTATORE: sonda di materiale molto più duro del provino, poiché non si deve danneggiare.

Si poggia l'indentatore sul provino e si applica una pressione per un certo tempo di applicazione. Viene poi misurata la scalfittura, l'impronta lasciata sul provino.

⇒ Non si previene alla rottura del provino

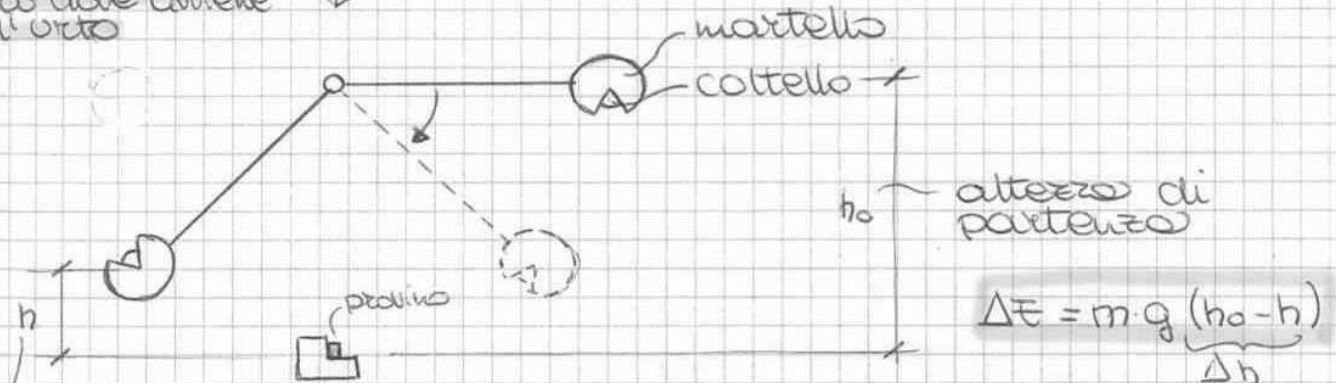
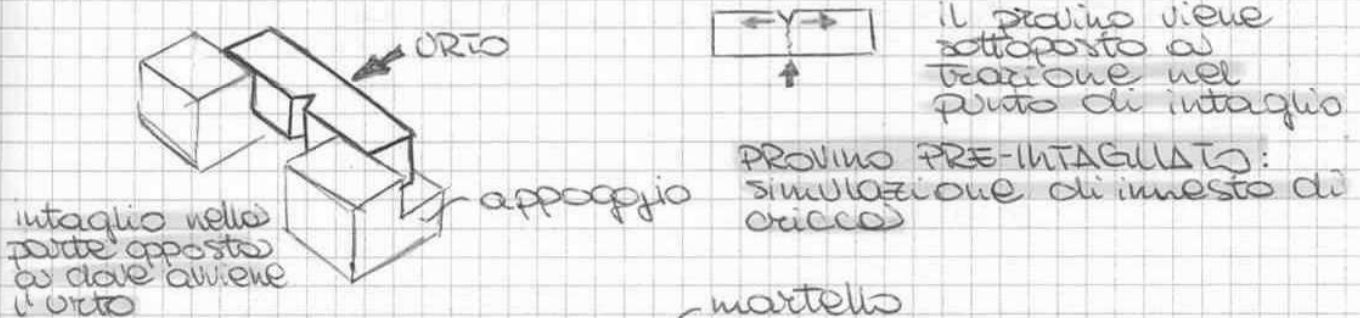
## \*PROVA DI RESILIENZA (PROVA D'URTO)

Capacità di un mat. di resistere a sollecitazioni improvvise.

$[J/m^2]$  = energia per unità di superficie assoluta di un materiale portata al rottura.

MACCHINA  $\begin{cases} \rightarrow$  Pendolo di Charpy (europeo) \\ \rightarrow Pendolo di Izod (americano)

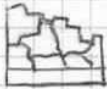
PROVINO: parallelepipedo con piccolo intaglio (sito preferenziale per la propagazione della cricca)



altezza massima che il pendolo raggiunge una volta che ha spezzato il provino: dipende dall'energia che il provino oppone al pendolo.

## SUPERFICIE DI FRATURA

• MAT FRAGILE: sup. di frattura lungo i bordi di grano (granulato)

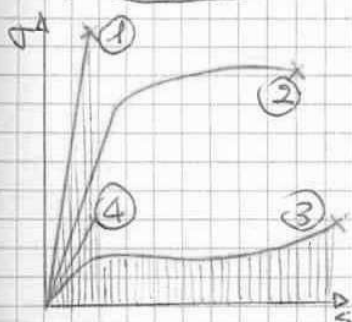


⇒ poca deformazione

• MAT. DUTILE: frattura con picchi e avvallamenti data dalla deformazione plastica avvenuta prima dello rottura.



IL PROVINO DEVE SPEZZARSI COMPLETAMENTE PERCHÉ LA PROVA SIA VALIDA



① ceramici:  $\sigma_R >$ , molto resistente, non si deforma

② metalli: tenacità  $>$  (area sottesa)

③ termoplastico:  $E_R >$ , poco resistente, molto duttile

④ resine termo-indurenti

⇒ TENACITÀ:  
metalli  $>$  TP  $>$  ceramici  $>$  TI

$\sigma_c$  = SOLLECITAZIONE CRITICA: valore di  $\sigma$  applicato all'intero componente che localmente si moltiplica tanto che  $\sigma_y = \sigma_R$  (di rottura)  
 ⇒ provoca la propagazione della rottura

⇒  $\sigma_y = \sigma_R = \sigma_c (1+k)$   $\sigma_y = \sigma_{rottura}$  quando applico  $\sigma_c$

MAT. FRAGILI → Griffith:  $\sigma_c = \sqrt{\frac{2\delta E'}{\pi a}}$

MAT. DUTILI → Dorman-Irwin:  $\sigma_c = \sqrt{\frac{2(\delta - \delta_p) E'}{\pi a}}$

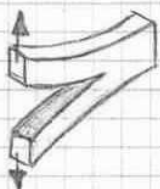
$\delta$  = lavoro per creare una nuova sup. unitaria

$E$  = modulo di Young

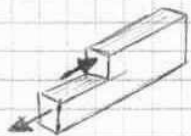
$\delta_p$  = energia spesa per la def. plastica di ogni sup. di frattura

⇒ TENACITÀ:  $\int$  mat. fragili →  $G_c = 2\delta$   
 mat. duttili →  $G_c = 2(\delta - \delta_p)$  ⇒  $\sigma_c = \sqrt{\frac{G_c E'}{\pi a}}$

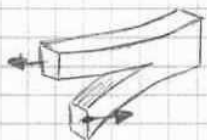
**MODI DI PROPAGAZIONE DI UNA CRICCA**



• TRAZIONE SEMPLICE UNIASSIALE [MODO I]  
 Due lembi vengono trazionati e si separano  
 È il più severo



• TAGLIO [MODO II]  
 Due lembi della cricca scivolano tra loro  
 Meno critico



• COMBINAZIONE DI TRAZIONE E TAGLIO [MODO III]  
 I due lembi si muovono come una forbice  
 Meno critico

$\neq G_c \rightarrow$  TENACITÀ

TENACITÀ A FRATTURA: fattore critico di concentrazione della sollecitazione

$K_{Ic} = \sqrt{E G_c}$  → proprietà mecc. proprie del MATERIALE  
non dipendono dalla forma indipendentemente dalle componenti che lo compongono.  
 $= \sigma^* \sqrt{\pi a}$  → prop. delle componenti ( $\sigma^* = \sigma_c$ )

$K_{Ic}$  è una proprietà di un mat. che contiene una fessura, cricca, e descrive la sua capacità di resistere alla propagazione di essa, alla frattura.

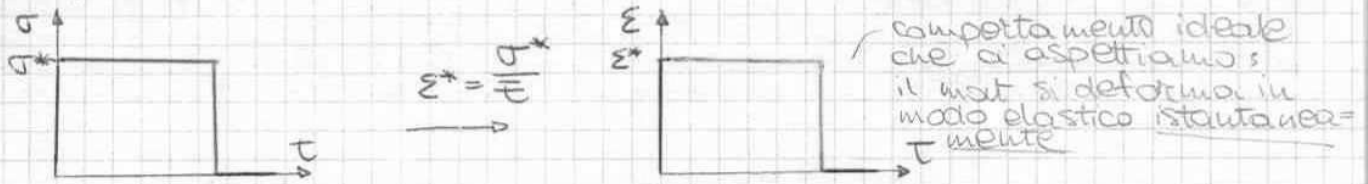
**TOLLERANZA AL DIFETTO**

$K_{Ic}$  elevato → mat. più TOLLERANTE alla presenza di difetti microscopici.

Metalli → Ceramici → Termoplastici → Termoisolanti  
 più tolleranti meno tolleranti

## SCORRIMENTO VISCOSO ( $\Delta$ CALDO) : CREEP

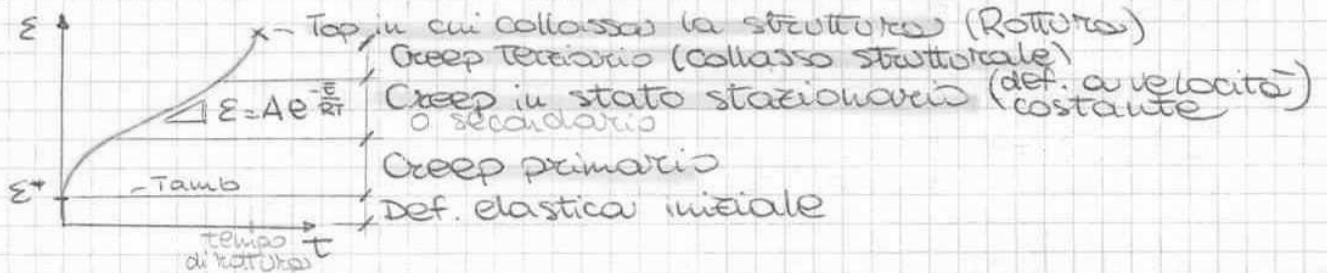
A  $T_{amb}$  (basse Temperature) METALLI e CERAMICI si deformano indipendentemente dal tempo di carico



A Temperatura elevata: ho fenomeni di def. viscoplastica

- per i METALLI:  $T_{op} \approx 0,35K$  (circa  $1/2 T_{fusione}$ )
- per i CERAMICI:  $T_{op} \approx 0,45K$  (circa  $2/3 T_f$ )

La deformazione ha un comportamento diverso: deformazione totalmente irreversibile fino a rottura.

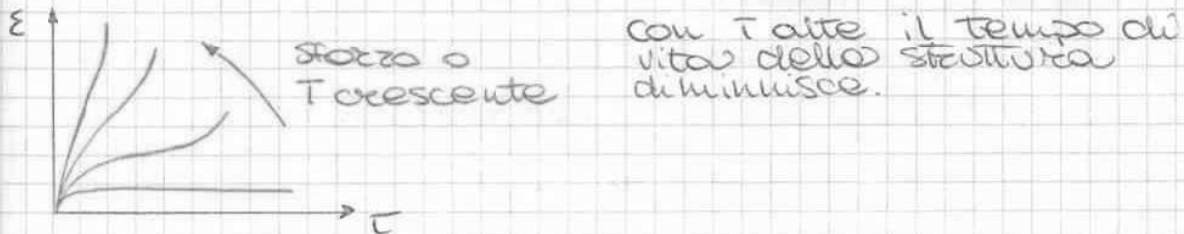


I metalli hanno  $T_{op}$  di collasso + bassa  $\Rightarrow$  + pericolosi durante incendi

$\Rightarrow$  SCORR. VISCOSO: def. plastica che si manifesta in temperatura sotto una sollecitazione costante per un lungo tempo.

Dipende da  $T$  e  $\tau$  applicato

$\Rightarrow$  tanto stress,  $T$  alto  $\rightarrow$  molta def. in poco tempo



# IL GESSO LEGANTE AEREO (mat. più antica, colore bianco)

Materia prima: petrae da gesso →  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$   
 (solfato di calcio biidrato (minerale))

Viene escavato, macinato, cotto e messo in commercio sotto forma di scagliola.

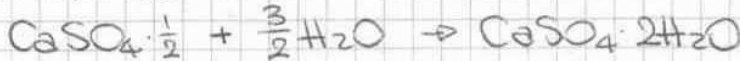
## COTTURA:

- ①  $T = 120/180^\circ\text{C}$  → solf. di G EMIDRATO (SCAGLIOLA) usato come legante  
 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O} + \frac{3}{2}\text{H}_2\text{O}$
- ②  $T = 180/250^\circ\text{C}$  → ANIDRITE SOLUBILE:  $\text{CaSO}_4 (\alpha)$  no  $\text{H}_2\text{O}$
- ③  $T = 250/600^\circ\text{C}$  → ANIDRITE INSOLUBILE:  $\text{CaSO}_4 (\beta)$   
non si lega con  $\text{H}_2\text{O}$

TEMPO DI PRESA: inizia dopo ca. 4 min. e tempo di presa tot. ≈ 30 min.

- ① 1-4 min } mescolati con acqua tornano  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  e fanno presa.
- ② ≈ 20 min }
- ③ non reagisce con l'acqua → non fa presa (devo usare dei catalizzatori)

La scagliola, impastata con acqua, forma nuovamente solfato di calcio biidrato:



## IDRATAZIONE

- 4/6 TEORICO
- \* Acqua necessaria stechiometricamente = 20/25% in peso
- 1/4 REALE
- Acqua impiegata = 30-100% in peso

L'acqua in eccesso rende più lavorabile l'impasto, ma non reagisce con l'emidrato e, evaporando, lascia delle porosità.

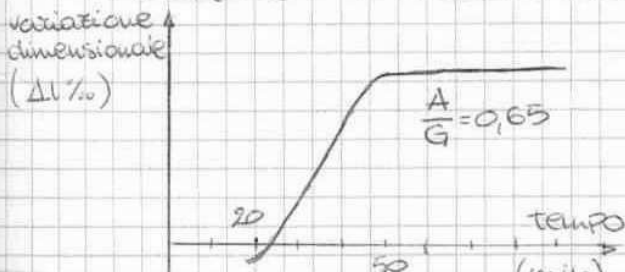
POROSITÀ: dipende da  $\frac{A}{G}$  abbatte le prop. meccaniche (Griffith)  
 → lavora bene solo a compressione (poco tenace)  
 - < vita in esercizio: gli agenti aggressivi possono entrare

\* REAZ. ESPANSIVA: il volume del prodotto è maggiore del volume dei reagenti. (+ altri leganti)

⇒ si può utilizzare senza appoggiati (per fissaggio di tasselli o riempire i fori).

\* REAZ. ESOTERMICA: sviluppa calore

⇒ alta T di impasto che tende a far evaporare l'acqua ⇒ metta acqua in eccesso.



Rapporto acqua/legante

$$\frac{A}{G} = \frac{\text{acqua}}{\text{gesso}}$$

TEMPO PRESA = 15-60 min



## PRODOTTI CORRELATI - Aggiunte al gesso

- \* **STUCCO**: usato per rivestimenti, finiture, ornamenti...  
Additivato con solfato di zinco ( $ZnSO_4$ ) e colle proteiche.
- \* **GESSO SABBIAIO (SMAGRITO)**: per finiture  
Mescolato con sabbia
- \* **GESSO ALLA CALCE**: per finiture, restauri  
Mescolato a calce idrata

## COMPONENTI PREFABBRICATI

- \* **BLOCCHI PREFABBRICATI**: blocchi in gesso per pareti divisorie; facilmente maneggiabili con profili "maschio-femmina" per facilitarne l'incastro.
  - 3 blocchi coprono circa  $1 m^2$ ;
  - pieni o alveolari (con fori per far passare impianti)
  - spessi 4-15 cm
  - bordi sagomati per assemblaggio
  - scaghiola + acqua colati in forme, indoriti e venduti fange da rivestimento e "ornamentalizzato"
- \* **LASTRE DI CARTON-GESSO**: pasta di gesso colata tra due fogli di cartone; laminazione che avviene tra due cilindri che impartiscono lo spessore desiderato.
  - spessore 9,5-25 cm
  - larghezza 60-120 cm
  - altezza 200-320 cm
  - usato per muri divisorii, controsoffittature, rivestimenti per murature
- \* **PANNELLI PER ISOLAMENTO TERMICO E ACUSTICO**:
  - gesso più:
  - trucioli
  - paglia
  - fibre di vetro
  - fibre di cellulosa
  - polimeri espansi

usate anche per rinforzare il gesso in caso di incendio che da solo si disgregherebbe

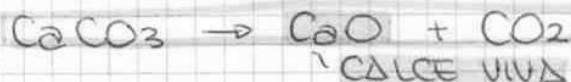
## LA CALCE AEREA

## LEGANTE AEREO (antico) (bianco)

Materie prime: rocce calcaree  $\rightarrow CaCO_3$  - carbonato di calcio  
rocce dolomitiche  $\rightarrow CaCO_3 \cdot MgCO_3$

## PRODUZIONE DEL LEGANTE

- 1) **DECARBONATAZIONE**: cottura a circa  $900^\circ C$   
si decompone il carbonato e si ottengono calce viva e anidride carbonica.



- 2) **SPEGNIMENTO della calce viva**: aggiunta di acqua



**REAZ. ESOTERMICA**: sviluppo di calore e aumento di T  
 $\rightarrow$  evaporazione dell'acqua impiegato  
 $\rightarrow$  per ottenere lo spegnimento completo si deve utilizzare un eccesso di acqua.

**REAZ. ESPANSIVA**: aumento di volume di circa il 10%

## PROVA DI STABILITÀ DI VOLUME

valuta se la calce è stata spenta correttamente

Se la calce non è stata spenta bene, i granelli di ossido ( $CaO$ ) residuo tenderanno a spegnersi nell'intonaco in opera provocando un aumento localizzato di volume

→ sollevamento e distacco della parte di intonaco sovrastante il granello di calce idratato in ritardo ("CALCHAROLO")

Tutti i tipi di calce aerea devono rispondere positivamente alla PROVA DI STABILITÀ DI VOLUME

→ Preparo una malta di buona plasticità con la calce, la distendo su un vetro, lascio fare presa in ambiente ben aereato e poi la espongo per 6 ore al vapore acqueo. Non devono comparire fessurazioni, distorsioni o rigonfiamenti (indice di calce stracato e non idratato)

## LA CALCE IDRAULICA

LEGANTE IDRAULICO (antica)

MALTA IDRAULICA: calce + sabbia amata o vetrosa

Queste sabbie (non silicee cristalline) sono in grado di reagire con la calce conferendo grandi prop. meccaniche

• SABBIA POZZOLANA: di origine vulcanica

Reagisce con la calce formando alluminati di calcio idrati  
→  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot xH_2O$

• COCCIO PESTO: argilla calcinata, mattoni o tegole macinati fini  
forma silicati di calcio idrati  
→  $CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O$

## CALCI IDRAULICHE ATTUALI

• POLVERE DI CEMENTO PORTLAND "tagliata" + SABBIA FINE ( $\sigma_c > 3MPa$ )

• POLVERE DI CEMENTO PORTLAND "tagliata" + CALCE AEREA

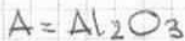
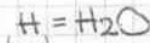
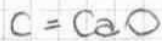
↳ MALTE BASTARDE: meno costose del cemento puro

• AGGLOMERATI CEMENTIZI (simili a malte bastarde): cementi mal cotti, di scatto, diluiti con inerti ( $\sigma_c$  basse)

④ RAFFREDDAMENTO RAPIDO DEL CLINKER (TEMPRA)

Importante per garantire la presenza di fasi idrauliche

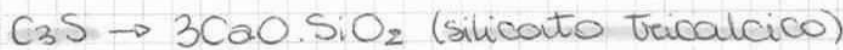
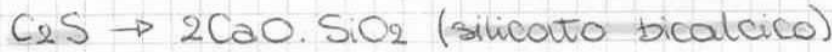
NOMENCLATURA CHIMICA DEI CEMENTI



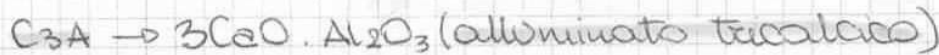
L'uno idrogeno  $\frac{1}{1000}$

COSTITUENTI DEL CLINKER DI CEM. PORTLAND

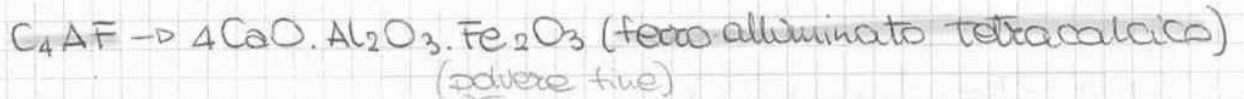
• silicati di calcio 75-85% → danno buone prop. meccaniche



• alluminato di calcio



• ferroalluminato di calcio



⑤ MACINAZIONE DEL CLINKER CON AGGIUNTA DI GESSO

+ CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O circa 4-8% di peso

→ funziona da REGOLATORE DI PRESA.

GENERICA COMPOSIZIONE DEL CEM PORTLAND

CaO = C → 58-68% di peso molto di più della silice

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = A → 4-8% } in quantità ridotte perché creano

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = F → 2-5% } problematiche nel tempo.

SiO<sub>2</sub> = S → 16-26%

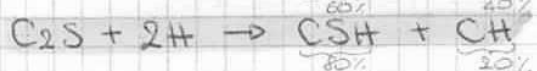
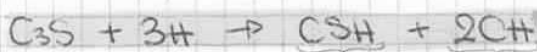
MgO → 1-4%

Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O → 0-0,6% } ossidi alcali  
già presenti nel cem e non eliminabili,  
ma possono dare un fenomeno di degrado  
quando si sono aggregati nei perfettamente  
meriti.

REAZIONI DI IDRATAZIONE

I componenti del cem reagiscono con l'acqua dando origine, con PRESA e INDURIMENTO, ad un nuovo composto con determinate proprietà.

Idratazione dei silicati di calcio:



CSH = TOBERMORITE (silicato di calcio idrato, CaO.SiO<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O)

Cristalli di forma aciculare che conferiscono proprietà meccaniche che discendono dal fitto intreccio tra i cristalli.



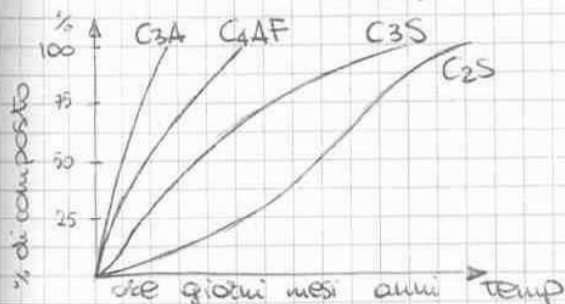
⇒ non si deve eccedere con l'aggiunta del gesso! (7-8%)

Eccesso di gesso può portare:

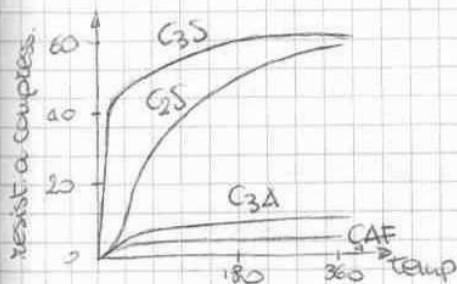
- Fenomeni di fessurazione a causa della reaz. espansiva che forma l'ettringite secondaria
- Gesso non più solubile in acqua ⇒ precipitazione del gesso

⇒ **FALSA PRESA**: consolidamento momentaneo dell'impasto

Le reazioni di idratazione dei diversi costituenti del cemento avvengono con diversa velocità



La velocità di idratazione del C3A è nettamente superiore a quella dei silicati.



Il contributo alle resistenze meccaniche a compressione è fornito principalmente dai silicati

⇒ Perché non si producono cem. a base di solo silicati?

- Materie prime impure (contengono  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$ )  
⇒ la purificazione aumenterebbe i costi
- $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$  agiscono da "FONDENTI" facendo compiere una fase liquida transitoria a  $T \approx 135-1450^\circ C$  (promozione delle reaz. allo stato solido che porta alla formazione di silicati di calcio)  
⇒ in loro assenza ho bisogno di T più elevate e più tempo

### CALORE DI IDRATAZIONE

Le reaz. di idratazione dei costituenti del cemento sono esotermiche, sviluppano calore.

| Tempo di idrataz. | calore di idratazione [cal/g] |               |               |               | CEMENTO           |
|-------------------|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|
|                   | C3S                           | C2S           | C3A           | C4AF          |                   |
| 3 giorni          | 58                            | 12            | 212           | 69            |                   |
| 1 anno            | 117                           | 54            | 279           | 90            |                   |
| 1 anno in $kJ/kg$ | $\approx 500$                 | $\approx 260$ | $\approx 865$ | $\approx 420$ | $\approx 380-500$ |

La maggior parte del calore viene emesso nei primi 3-7 giorni di vita del cemento, periodo di STAGIONATURA (soprattutto C3A).

**PREGI E DIFETTI DEL CALORE DI IDRATAZIONE:**

- A basse T (cinetiche ridotte ⇒ tempo di presa e scasso lunghi)  
⇒ azione positiva del C.D.I. che riduce i tempi di presa (si sceglie cem. con più C3A)

## IMPERMEABILITÀ DELLA PASTA DI CEMENTO

Mat. impermeabile: porosità chiusa, pori non interconnessi con l'esterno e tra loro.

Tempo richiesto per avere capillari isolati

| Rapporto a/c | Tempo   |
|--------------|---------|
| 0,4          | 3 gg    |
| 0,45         | 7 gg    |
| 0,5          | 2 sett. |
| 0,6          | 6 mesi  |
| 0,7          | 1 anno  |
| >0,7         | mai     |

L'impermeabilità è una funzione del rapporto a/c.

→ il cls è poco durabile perché non sarà mai impermeabile.

## ACQUA E RAPPORTO ACQUA/CEMENTO

Dopo l'idratazione nel cem. si ha l'acqua sotto forma di:

- ACQUA CAPILLARE: presente nei pori, facilmente evaporabile.
- ACQUA ADSORBITA: fisicamente trattenta sulla superficie dei solidi della pasta indurita, si può eliminare per essiccamento il quale provoca il ritiro della pasta indurita.
- ACQUA COMBINATA: chimicamente legata ai prodotti di idratazione, si libera solo per degradazione chimica o TATTA (incendio).

Quantità di acqua stechiometricamente necessaria (combinata) ~ 23% del peso del cem.

→ a/c (stechiometrico) = 0,23

→ + H<sub>2</sub>O adsorbita: 28% del vol. del cem  
19% del peso del cem.  
23 l H<sub>2</sub>O per 100 kg cem.

Per avere una pasta sufficientemente lavorabile ho bisogno di più acqua, 30-35%

→ a/c (pasta lavorabile) = 0,30 - 0,35

Per avere una malta lavorabile, 40-45% di acqua

→ a/c (malta lavorabile) = 0,40 - 0,45

Per avere un calcestruzzo aggiungo fino all'80% di acqua

→ a/c (cls) < 0,80

Stechiometricamente ho bisogno di 23 l di acqua per idratare 100 kg di cem + acqua adsorbita (28% del volume occupato dai prodotti di idratazione)

→ 1 cm<sup>3</sup> di cem (x=100%) richiede ~ 2,14 cm<sup>3</sup> per alloggiare i prodotti di idratazione.

100 kg di cem hanno volume di 31,75 l (densità 3,15 g/cm<sup>3</sup>)

→ acqua adsorbita = 0,28 × 31,75 × 2,14 = 19 l x 100 kg cem

→ 23 l (stechiom) + 19 l (adsorbiti) = 42 l ⇒ minimo a/c = 0,42

di volume = (100/3,15) + 42 = 73,75 l

## SOMMARIO

- Definizioni (cemento e costituenti)
- Classificazione (tipi di cem.)
- Requisiti di accettabilità (fisico-meccanici, chimici)
- Criteri statistici di conformità (scarti accettabili rispetto ai valori definiti dalla norma)

### 0. INTRODUZIONE

C'è bisogno di una norma comune a livello europeo per uniformare le caratteristiche fondamentali.

La norma si interessa di materiali "tradizionali" e "ben collaudati".

La norma tratta i cementi "normali" e non quelli "speciali", con proprietà supplementari.

### 1. SCOPO

La norma specifica le prop dei costituenti dei cementi comuni e le proporzioni con cui vanno combinati per produrre una serie di tipi e classi di cem.

Definisce specificamente i requisiti meccanici, fisici e chimici dei tipi di classe e definisce le regole per valutare la conformità ai requisiti.

### 2. RIFERIMENTI NORMATIVI

La norma fa riferimento alla norma EN 196 per i metodi prova dei cementi, nelle sue varie parti.

### 3. CEMENTO

Def: legante idraulico (mat. inorganico finemente macinato) che mescolato con acqua forma una pasta che rapprende e indurisce a seguito di reazioni e processi di idratazione e che una volta indurita, mantiene la sua resistenza e la sua stabilità anche sott'acqua.

Il marchio CE permette di riconoscere e commercializzare un cemento con la sigla CEM: in grado di produrre una malta o di cls capace di conservare la lavorabilità per un tempo sufficiente a garantire, dopo la stagionatura, determinate prop. meccaniche e una stabilità di volume.

L'indurimento idraulico è dato dai silicati di calcio ( $S_3C$ ,  $S_2C$ ).

VINCOLO COMPOSIZIONALE:  $CaO + SiO_2 \geq 50\%$  in massa

Importante è il processo di macinazione per garantire omogeneità e finezza.

### 4. COSTITUENTI

#### 4.1. CLINKER DI CEMENTO PORTLAND (K)

Mat. idraulico composto per almeno i  $\frac{2}{3}$  in massa da silicati ( $C_3S$  e  $C_2S$ ).

Parte rimanente:  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  e altri ossidi

Rapporto  $CaO/SiO_2 \geq 2$

Tenore di  $MgO < 9,5\%$

Farina di ossidi macinati finemente e omogenei.

## 5.1 TIPI DI CEMENTO - 5.2 COMPOSIZIONE

- I → Portland
- II → Portland Composito (6 composizioni diverse)
- III → d'altoforno (3 sottotipi: A, B e C → aumenta % di lappo)
- IV → pozzolanico (2 sottotipi: A e B → aumenta % pozzolanico)
- V → Composito

## 5.3 DENOMINAZIONE NORMALIZZATA

I cementi europei devono essere identificati attraverso il tipo ed un numero identificante una classe di resistenza.

Cemento EN 196-1 CEM I 42,5 R  
 ↳ tipo      ↳ resistenza      ↳ elevata resistenza a 28 gg.

Resistenze a compressione a 28 gg:  $\begin{cases} 32,5 \\ 42,5 \\ 52,5 \end{cases}$  MPa

## 6. REQUISITI MECCANICI

Una volta si facevano anche le prove di flessione, ma risultati poco attendibili

### 6.1 RESISTENZA NORMALIZZATA

Resistenza a compressione a 28 gg secondo l'EN 196-1 testata su provini cubici di malta "plastica" dopo varie scadenze di tempo (tempi di stagionatura)

MALTA PLASTICA. Sono definiti:

- sabbia da usare (naturale e granulometria)
- rapporto sabbia/cemento = 3:1
- rapporto acqua/cemento = 0,5
- modalità di miscelazione
- " " compattazione e conservazione in camera climatica ...

Un tempo: prove condotte a 3, 7, 28 gg dall'impasto

oggi: a 2 gg: valutazione più precisa e tempestiva per poter intervenire tempestivamente a correggere la produzione.  
 a 28 gg.

### 6.2 RESISTENZA INIZIALE

Resistenza a compressione a 2 o 7 gg dall'impasto (EN 196-1)

- resistenza iniziale ordinaria (indurecimento normale)
- elevata resistenza iniziale (indurecimento rapido) → R

Un tempo:  $\begin{cases} 325 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow 31,88 \text{ MPa} \\ 425 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow 41,69 \text{ MPa} \\ 525 \text{ kg/cm}^2 \rightarrow 51,50 \text{ MPa} \end{cases} \geq 325 \text{ kg/cm}^2$

oggi:  $\begin{cases} 32,5 \text{ MPa} \\ 42,5 \text{ MPa} \\ 52,5 \text{ MPa} \end{cases} \left. \begin{array}{l} \text{aumento del } \sim 2\% \text{ delle prestazioni} \\ \text{richieste del cemento} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \geq 32,5 \text{ MPa} \\ \leq 52,5 \text{ MPa} \end{array}$

## 7. REQUISITI FISICI

### 7.1 TEMPO DI INIZIO PRESA

Importante tecnologicamente per definire le tempistiche di messa in opera del conglomerato cementizio

TEMPO DI FINE PRESA: ha perso significato con l'anticipo delle prop. meccaniche a 2 gg.

## Evidenze:

- Diluizione della polvere di cem. con calcare o argilla → frade
- Carbonatazione del cem. (perdita di  $\text{CO}_2$ ) o siccamento (perdita di  $\text{H}_2\text{O}$ ) causato da conservazione in ambienti umidi in cui si avvia l'idratazione.

## 8.2. RESIDUO INSOLUBILE

Porzione del cem. non solubilizzata in  $\text{HCl}$  e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$

Deve essere  $\leq 5\%$  in massa

Evidenze frodi: aggiunta di sost. insolubili.

## 8.3. SOLFATI (es: $\text{SO}_3$ )

Non si deve eccedere in aggiunte di solfati (gesso) per non avere la **FALSA PRESA**.

Valore max  $7-8\%$  in peso di gesso →  $3.5-4\%$

## 8.4. CLORURI

- Promuovono la corrosione dei ferri d'armatura.
- Un tenore basso di cloruri è indispensabile per garantire un'adeguata durabilità delle armature. →  $0,10\%$

CEM III → d'alto forno: limite di cloruri superiore poiché le luppe immobilizzano al loro interno quantitativi rilevanti di cloruri che non vengono rilasciati in modo significativo.

## 8.5. PORCELANICITÀ

Test sui CEM IV → porcelanici: reagiscono con determinate sostanze per creare altre sost. idradicamente reattive

Consiste nell'idratazione (a  $40^\circ\text{C}$  per 8gg) di una miscela di cemento e acqua saturata di  $\text{Ca}(\text{OH})_2$   
→ la concentrazione di  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , dopo 8gg, deve essere inferiore a un limite stabilito dalla norma.

## 9. CRITERI DI CONFORMITÀ

### 9.1.2. CONTROLLO STATISTICO DELLA QUALITÀ

Controllo della qualità effettuato ricorrendo a metodi statistici (carte di controllo o piani di campionamento)

#### 9.1.15. RISCHIO DEL CONSUMATORE

Rischio del consumatore di avere un cem. dichiarato conforme alla norma, ma che in realtà la percentuale dei difetti è maggiore di quella accettabile  $p > p_0$

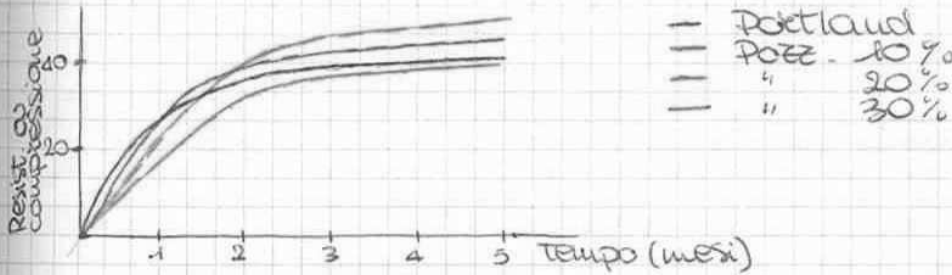
#### 9.1.16. RISCHIO DEL PRODUTTORE

Rischio del produttore che una produzione sia dichiarata non conforme alla norma e perciò rifiutata, anche se la percentuale dei difetti è minore di quella accettabile  $p < p_0$



Produzione di CSH (primaria e secondaria) → la pasta di cem. pozz. diventa più ricca di materiale fibroso e quindi compatto  
 ⇒ meno poroso di una pasta di cem. Portland con stesso a/c.  
 ⇒ meno permeabile ⇒ più duratura

CEM III/A → 11-35% di pozzolana } in quantità da reagire  
 CEM III/B → 36-55% " " } con l'idrossido di calcio



### CEMENTO D'ALTOFORNO

Clinker di cem. Portland + gesso + 36-95% loppa granulata d'altoforno

LOPPA D'AF: mat. idraulico latente, presenta prop. idrauliche se attivato opportunamente

↳ sottoprodotto dell'industria metallurgica ottenuto liquido alla base degli altoforni e raffreddato rapidamente per ottenere una struttura vetroso

2/3 in massa di loppa vetroso  
 1/3 in massa di CaO, MgO e SiO<sub>2</sub>  
 (MgO + CaO) / SiO<sub>2</sub> < 1

LOPPA + H<sub>2</sub>O → reaz. lenta

LOPPA + idrossido di Ca → reaz. veloce che produce CSH secondario  
 Ca(OH)<sub>2</sub> = calce spenta = CH = portlandite

### CENERI VOLANTI

Mat. { silicio-aluminose → prop. pozzolaniche  
 silicio-calcaree → prop. idrauliche latenti

## I CEMENTI SPECIALI

### CEMENTO PORTLAND BIANCO

Bassissimo contenuto di ossido ferrico (responsabile della colorazione grigia); ma richiede l'aggiunta di adatti coloranti. Usato per scopi estetici nel cls "a faccia a vista", anche in combinazione con pigmenti inorganici (0,5-3%) e aggregati colorati.

### CEMENTO PORTLAND FERRICO

Cemento resistente ai solfati.

Mat. prime contenenti elevati tenori di ossido ferrico in modo da evitare la formazione di C<sub>3</sub>A (sensibile all'attacco solfatico) e produrre C<sub>4</sub>AF (più resistente ai solfati).

### CEMENTO ALUMINOSO (no Portland)

Cem. senza silicati con norma a se stante (no 197-1)

## SOST. IN SOSPENSIONE

Argilla, residui di origine vegetale, alghe, microrganismi possono interferire con il processo di indurimento del cem. e indebolire l'adesione tra aggregato e pasta di cem. (interfaccia debole)

< 2 g/l di acqua

## SOST. DISCIOLTE

• CARBONATI e BICARBONATI: influenzano i tempi di presa

< 2 g/l

• SOLFATI: fortemente aggressivi se contenuti in acque che possono bagnare il ds indurito.

Con un rapporto  $g/l = 0,5$  di acqua di mare contenente 5 g/l di solfati:

- aumento di circa il 25% di solfati nell'impasto
- nessuna conseguenza pericolosa nell'impasto: non vi è falso presa.

L'acqua di mare, però, non contiene solo solfati, ma anche altre sost. aggressive (es: cloruri che eliminano la passivazione).

• CLORURI: pericolosi nel confezionamento dei ds armati e precompressi  
→ promuovono la corrosione dell'armatura

Cloruro di calcio, ottenuto dalla reaz. con la portlandite, è un accelerante dell'idratazione del cem. portland.

**STRESS CORROSION:** a parità di composizione, un componente che subisce una sollecitazione si corrode più di uno componente a riposo.

• pH: le acque naturali hanno difficilmente  $pH < 6$   
→ utilizzabili senza problemi

Acque acide ( $pH < 6$ ):

- indice di probabile inquinamento di scarichi industriali
- innesco di fenomeni di corrosione di C.A.

⇒ pH debb. essere  $> 4/4,5$  per strutture armate

- bicarbonato → basicità  
 $HCO_3^- + H_2O \rightarrow H_2CO_3 + OH^-$

- anidride carbonica → acidità  
 $CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3$

• SOST. ORGANICHE: contenute in quantità limitate in acque potabili e fluviali.  
→ rallentano il fenomeno di presa → sviluppo di prop. meccaniche a brevi stagionatura

Zuccheri → 100 mg/l (tenore max ammesso)

Fosfati → 100 "

Nitrati → 500 "

Riombo → 100 "

Zinco → 100 "

## MODELLO MATEMATICO

Curva di Fuller per determinare la massima densità apparente

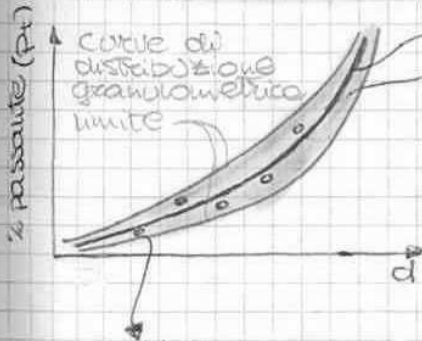
EQ. DI FULLER e THOMPSON:  $P_T = 100 \sqrt{d/D}$

$P_T$  = percentuale (rispetto al totale di solidi) del passante cumulativo al setaccio con apertura di diametro  $d$

$D$  = diametro massimo dell'aggregato

- non deve superare il 25% della sezione minima del getto, per evitare eterogeneità.
- non deve superare la distanza massima tra i fori d'ormatura diminuita di 5 cm, per evitare che un aggregato grossolano ostruisca il flusso del cls.
- non deve superare del 30% lo spessore del caprifero per evitare l'ostruzione al flusso del cls tra armature e cassafornia.

Attraverso questa eq si ottiene un FUSO GRANULOMETRICO intorno alla curva di Fuller



Attraverso il setacciamento di un quantitativo noto di agg. tramite una serie di setacci saltaposti e aventi aperture decrescenti dall'alto verso il basso, viene pesato quanto è rimasto sui vari setacci e riportato in percentuale sul grafico del fuso.

La distribuzione granulometrica ricavata deve cadere all'interno del fuso di Fuller

Un cls che soddisfa granulometricamente l'eq. di F-T:

- presenta il massimo impaccamento possibile;
- coincide con un impasto poco lavorabile (messo in opera con difficoltà, con difficile scortecciamento)

⇒ Bolomey modifica questa eq. aggiungendo un parametro  $A$ :

EQ. DI BOLOMEY:  $P = A + (100 - A) \sqrt{d/D_{max}}$

Tiene conto di: → esigenze di lavorabilità (facilità di messa in opera e costipamento).  
→ tipo di aggregato (tondeggianti o a spigoli vivi)

se  $A=0$  → eq. di F-T

$A$  (valori da 8 a 14) cresce se:

- cresce la lavorabilità
- abbiamo aggregati di frantumazione piuttosto che tondeggianti
- abbiamo più contenuto di mat. fine (passante al taglio con apertura  $d=5mm$ )

AGGR. BAGNATO ( $u > u_a$ ): cede l'acqua in eccesso all'impasto  
→ aumenta la quantità di acqua totale d'impasto (a)  
→ aumenta il rapporto a/c (aumenta la lavorabilità a scapito delle prop. meccaniche)

AGGR. SATURO ( $u = u_a$ ):  
→ rapporto a/c invariato

AGGR. INSATURO ( $u < u_a$ ) o ASCIUTO ( $u = 0$ ): assorbe parte dell'acqua d'impasto.  
→ diminuisce a  
→ diminuisce il rapporto a/c (minore lavorabilità dell'impasto e maggiori resistenze)

È indispensabile controllare <sup>quotidianamente</sup> il tenore di umidità degli aggregati per poter intervenire sul dosaggio di acqua tot. d'impasto.

### CRITERI DI IDONEITÀ (ACCETTAZIONE) DELL'AGGREGATO

UNI 8520

- \* Distribuzione granulometrica (1)
  - \* Gelività (4)
  - \* Cloruri
  - \* Solfati
  - \* Silice alcali-reativa
  - \* Limo-argilloso
  - \* Sostanze organiche
- } di cui è indispensabile la presenza

#### ⊛ CLORURI Sabbia di mare

Limite 0,05% in peso

- su cementi armati → rischio di corrosione dei ferri d'armatura → degrado
- su cls senz'armatura → danno superficiale (estetico): depositi salini sulla superficie di mat. esposti a aria di bagnatura e asciugatura → EFFLORESCENZE.

Aggregati inquinati da cloruri (sabbia di mare) possono essere impiegati solo dopo che è stata pulita con acqua potabile.

#### ⊛ SOLFATI Gesso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) e anidrite ( $CaSO_4$ )

Limite 0,2% in peso

Provocano un lento rilascio di solfati nel cls indurito con formazione di ETTRINGITE SECONDARIA (reazione con monosolfato alluminato o con alluminati di Ca idrati)

ETTRINGITE PRIMARIA → regolatore di presa nel cls fresco

ETTRINGITE SECONDARIA → composto espansivo nel cls indurito → fessurazioni

Gli agg. inquinati da gesso o anidrite non possono essere bonificati e devono essere scartati dalla produzione del cls.

Agg. contenenti MINERALI A BASE DI SOLFURI ( $FeS_2$ , pirite)  
→ possono ossidarsi a solfati → ETR. SEC.

## ① FLUIDIFICANTI / SUPERFLUIDIFICANTI

Intervengono a modificare la lavorabilità (fluidità) dell'impasto

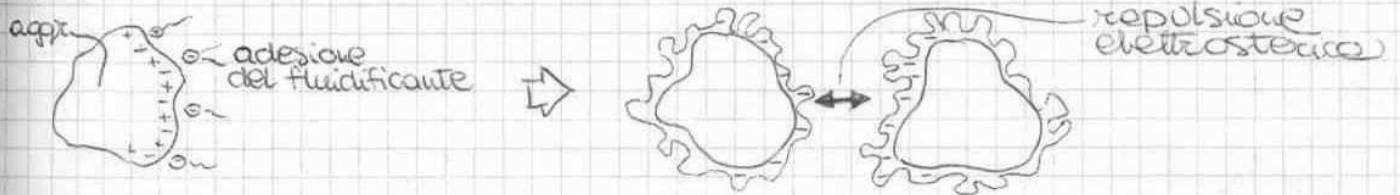
→ a parità di lavorabilità ottenuta, posso diminuire il quantitativo di acqua d'impasto → migliore resistenza mecc.

Quantità di additivo impiegato rispetto alla massa di cem < 2% (circa 1%)

Azione deflocculante:

Le lunghe catene polimeriche dei fluidificanti si vanno a posare sui granelli di cemento facendoli allontanare tra loro per tre meccanismi repulsivi:

- impedimento STERICO: le catene occupano dello spazio e si mettono in mezzo tra i granelli allontanandoli.
- repulsione ELETTROSTATICA: le catene hanno del sodio che si scioglie in acqua e rende la catena elettro-negativa
- effetto ELETTRO-STERICO (combinazione dei primi due)



## ② INIBITORI DI CORROSIONE

Per prevenire la corrosione delle armature, per lo più indotta dai cloruri.

- Nitrito di calcio,  $\text{CaNO}_2$  (una volta si usava il nitrito di sodio) → ha un'efficacia controversa: nel caso di cls fessurati superficialmente, la presenza di questi additivi può aggravarne l'aggressione

→ In ambienti fortemente aggressivi si utilizzano metodi più efficaci: protezione catodica, acciai inossidabili.

## ③ ACCELERANTI

Fanno aumentare il grado di idratazione  $\alpha$  del cem. alle brevi stagionature, modificano le prestazioni del cls in corso di esecuzione, ma non quelle del cls in esercizio.

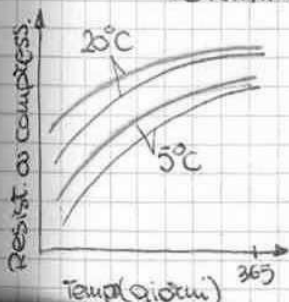
- si accorciano i tempi di presa → ACCELERANTI DI PRESA
- si incrementano le resistenze meccaniche nei primi giorni → ACCELERANTI DI INDURIMENTO

Impiegati per getti in climi freddi o rapidi disarmi.

Composizione:

Un tempo → a base di cloruri ( $\text{CaCl}_2$  aggiunto in circa il 2% rispetto alla massa del cem.) sono stati abbandonati, poiché portavano alla corrosione.

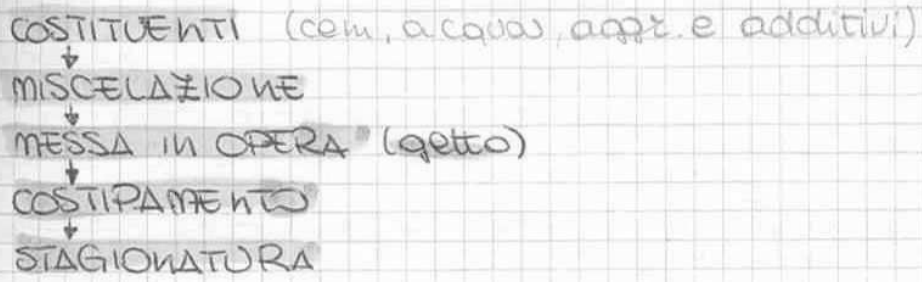
Ora → TRITANOLAMMINA:  $\text{N}(\text{CH}_2\text{-CH}_2\text{-OH})_3$ , 0,25% in peso  
FORMIATO DI CALCIO:  $\text{Ca}(\text{HCOO})_2$ , qualche % risp. massa cem.



Acceleranti alcalini: pericolosi da maneggiare e tendono a ridurre le resistenze meccaniche alle lunghe stagionature.

Acceleranti privi di alcali: accelerano l'indurimento senza penalizzazione sulle prestazioni meccaniche del cls indotto.

## PROCESSO DEL CLS



## IL CLS FRESCO

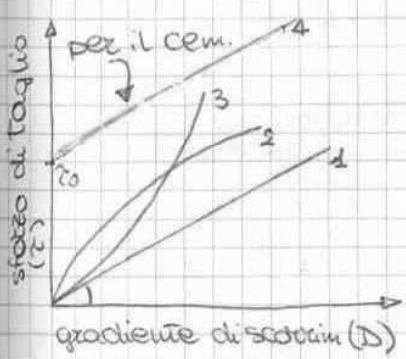
Le caratteristiche del cls fresco sono raggruppate nel termine **LAVORABILITÀ**: attitudine dell'impasto cementizio ad essere messo in opera con il minor dispendio di energia e di tempo, senza perdere compattezza e omogeneità.

## REOLOGIA DEL CLS

Scienza che studia lo scorrimento e la deformazione della materia.

⇒ può applicarsi agli impasti cementizi freschi i quali sono deformabili e capaci di scorrere.

Il comportamento delle paste cementizie è più complesso di quello dei fluidi semplici: componenti con caratteristiche molto diverse.



Curva 1: fluidi a regime laminare **NEWTONIANI**

$$\tau = \eta D$$

- $D = \text{gradiente di scorrimento} = \frac{d\varepsilon}{dt}$  (deformazione rispetto al tempo)
- $\tau = \text{sollecitazione di scorrimento}$
- $\eta = \text{viscosità}$

Curva 4: comportamento **PLASTICO**, di Bingham

$$\tau = \tau_0 + \eta D$$

$\tau_0 = \text{limite di scorrimento (sollecitazione minima)}$

Curva 2: comportamento **FLUIDIFICANTE** scorre con più difficoltà all'inizio, non c'è proporzionalità diretta.

Curva 3: comportamento **CONDENSANTE** scorre con più difficoltà con sollecitazione maggiore.

$$\tau = \eta D = [\text{Pa}]$$

$$D = \frac{d\varepsilon}{dt} = [s^{-1}]$$

$$\eta = \frac{\tau}{D} = [\text{Pa} \cdot s]$$

s = secondi  
sec = seconda

$\eta_{\text{acqua a } 20^\circ\text{C}} = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s} = 1 \text{ cP}$

$\eta_{\text{pasto di cem. fresca}} = 100/300 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  (Bingham)



Il cem. d'altoforno è meno viscoso del cem. Portland.



### Classi di consistenza

- S1 (0-4 cm) → Umida → Pavimenti
- S2 (5-9 cm) → Plastico → Strutture circolari
- S3 (10-15 cm) → Semifluido → Strutture non armate
- S4 (16-20 cm) → Fluida → Strutture mediamente armate
- S5 (>20 cm) → Superfluida → Strutture ad alta densità di ferri d'arm.

### REGOLA DI LYSE

Quantitativi di acqua che occorre impiegare per confezionare cls di diversa classe di consistenza.

- a) Per un dato  $D_{max}$  dell'aggregato, maggiore è la classe di consistenza del cls fresco, maggiore dev'essere l'acqua d'impasto.
- b) Fissata una classe di consistenza, al crescere del diametro massimo dell'aggregato, diminuisce la quantità di acqua richiesta per raggiungere quella classe di consistenza.

Contenuto di acqua indicativo per cls di differente lavorabilità e contenuto d'aggr. con diverso  $D_{max}$ :

- se voglio avere più lavorabilità (slump maggiore) aumento il quantitativo di acqua. → 1<sup>a</sup> regola di Lyse
- gli aggregati spigolosi richiedono più acqua degli aggr. tondeggianti (scorrono facilmente per la loro forma) → 2<sup>a</sup> regola di Lyse
- aggregati con  $D_{max}$  minore richiedono l'utilizzo di più acqua per ottenere una determinata lavorabilità, poiché ho una superficie a contatto maggiore (esposta)
  - ↳ per garantire una determinata sferolosità dei granuli ho bisogno di un quantitativo d'acqua in grado di ricoprire tutta la sup. dei granuli
  - ⇒  $D_{max}$  maggiore → sup. esposta minore → meno acqua

Basta una piccola percentuale di acqua, aggiuntiva per avere un aumento rilevante di slump.

Slump : da 2 a 5 → aggiungo 6% di acqua  
 da 11 a 14 → " 3% " "

### USO DI SUPERFLUIDIFICANTI (1%)

Utilizzato per far passare un cls da una classe di consistenza poco lavorabile (S1) ad una molto lavorabile (S5) senza modificare la composizione del cls (rapporto a/c) ⇒ mantenendo le resistenze meccaniche



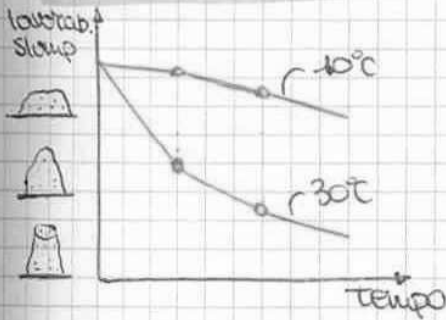
Voglio più lavorabilità : pari a/c con aggiunta di superfluidif. ⇒ pari  $R_{ck}$

## CINETICA



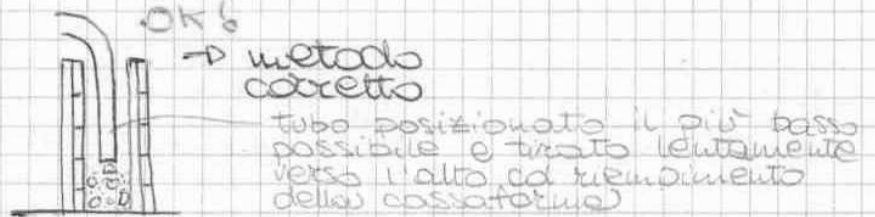
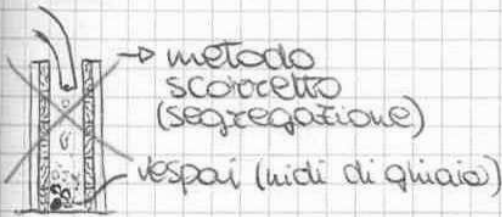
La lavorabilità dei cls in movimento si abbassa velocemente poiché la cinetica favorisce il fenomeno di idratazione. L'impasto fermo, invece, mantiene più costante la lavorabilità. È necessario però tenere in movimento l'impasto per prevenire la segregazione!

## TEMPERATURA



A T alte la cinetica è velocizzata, mentre a T basse la cinetica è rallentata → il cls rimane lavorabile più a lungo.

## MESSA IN OPERA DEL CLS (GETTO)



Trasferimento del conglomerato dalle betoniere nelle casseforme e successiva costipazione per garantire un riempimento completo e omogeneo.

Bisogna evitare che il conglomerato cada dall'alto urtando le armature e le pareti delle casseforme o formando vespai o nidi di ghiaia. In un cls molto fluido i vespai si formano molto poco, e sono necessari pochi secondi di vibrazione per eliminare i difetti di getto.

Materiali per le CASSEFORME:

- Legno: piccole opere, buona durabilità, economiche, a volte utilizzate per riprendere il motivo estetico delle venature.
- Acciaio: più costose, più durevoli, necessitano di manutenzione.
- Mat. plastico: usate per effetti architettonici particolari poiché possono essere modellate a basso costo → sempre più diffuse.

## COSTIPAMENTO

Quando il cls viene introdotto nelle casseforme contiene dal 5 al 20% in volume di aria intrappolata a seconda della sua lavorabilità. ⇒ Occorre compattare (costipare) l'impasto per eliminare tale aria.



# STAGIONATURA (CURING)

Procedure poste in atto, immediatamente dopo il getto, al fine di realizzare le condizioni ottimali per fabbricare la presa e l'indurimento del cemento del c/s.

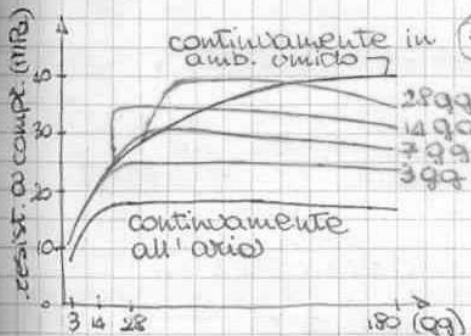
- **Controllo dell'umidità:** un sufficiente grado di umidità assicura un adeguato apporto d'acqua, necessario per l'idratazione (controllo della perdita d'acqua per evaporazione) (4)
- **Controllo della temperatura:** controlla il chimismo delle reaz. d'idratazione (l'evaporazione cresce al crescere della T)

L'evaporaz. deve essere sfavbrata poiché l'acqua è un reagente fondamentale per l'idrataz. del c/s.

La durata della stagionatura deve essere di almeno 7gg oppure per un tempo necessario a sviluppare il 70% della resistenza a compressione richiesta per il manufatto.

In fun. delle condizioni termoclimatiche si hanno:

- **Stag. ORDINARIA:** che avviene in cantiere
- **Stag. ACCELERATA:** condotta in fabbrica per la produzione di prefabbricati. Stag. più veloce in cui il manufatto è esposto a **PRESSIONE DI VAPORE** e a T alto.



Se esponiamo direttamente all'aria il getto le caract. mecc. sono scarse poiché parte del reagente acqua evapora e non tutte le fasi umide riescono a idratarsi. Le caratteristiche mecc. migliorano molto anche solo dopo 3gg di esposizione in amb. umido.

⇒ Bisogna conservare la pasta cementizia il più possibile saturata d'acqua (amb. umido) per avere buone prop. mecc.

Condizioni ambientali:

umidità relativa

- STAG. OTTIMALE**
- umidità relativa alta ≈ 80% (U.R)
  - T modesta ≈ 20°C
  - velocità del vento bassa ≈ 4 m/s
  - Ombra
- garantisce una buona conservaz. d'acqua nella pasta.

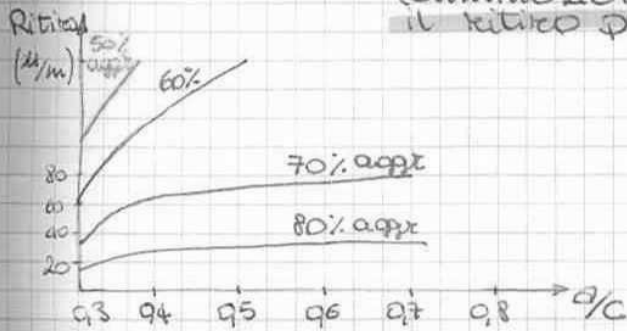
La norma UNI 9858 (o EN 1206) stabilisce la tempistica della stagionatura sulla base delle condizioni ambientali.

| Condizioni amb. durante la stagionat. | SVILUPPO DI RESISTENZA |      |      |       |      |      |       |      |      | Tempi di sviluppo di resist. in base al rapp. %<br>giorni necessari per la stagionatura |
|---------------------------------------|------------------------|------|------|-------|------|------|-------|------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
|                                       | Rapido                 |      |      | Medio |      |      | Lento |      |      |                                                                                         |
|                                       | 5°C                    | 10°C | 20°C | 5°C   | 10°C | 20°C | 5°C   | 10°C | 20°C |                                                                                         |

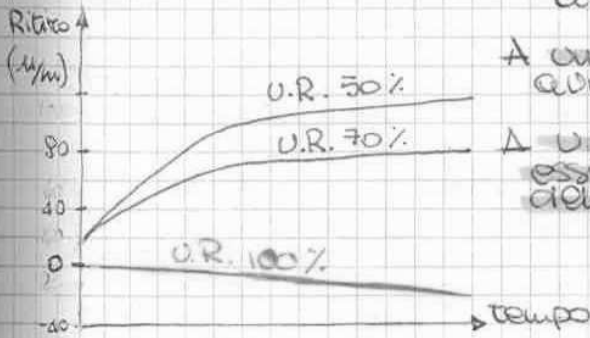
- T<sub>amb</sub> T<sub>bassa</sub> → + tempo di stag. (idratazione lento, para cinetica)
- U.R: U.R bassa → + tempo di stag. (aria) secca → evapora l'acqua
- vento: vento forte → + tempo di stag. (più scambio di sup → evaporaz.)
- insolazione o ombra: insolaz → + tempo di stag. (meno umidità, + evaporazione)
- T<sub>c/s</sub>

(44)

**RAPPORTO a/c**: all'aumentare del valore del rapporto a/c (diminuzione del contenuto di cem) aumenta il ritiro per essiccamento perché ho più acqua che da poter evaporare



**CONDIZIONI IGROMETRICHE DELL'AMBIENTE** ha effetti diversi a seconda delle condizioni ambientali



A umidità relativa 100% si ha un aumento di volume (espansione)

A U.R. < 100% si ha un ritiro per essiccamento che aumenta al diminuire dell'U.R.

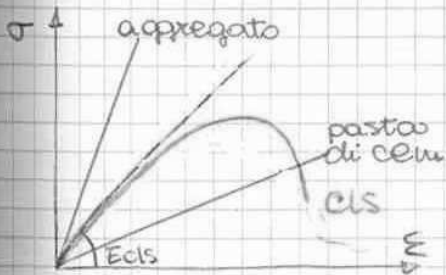
## IL CLS INDURITO

mat. lapidee tenute insieme dalla pasta di cem.

Mat. composito formato da:

- MATRICE** → pasta di cem. indurita
- RINFORZO** → aggregato

Sono due fasi distinte con prop. meccaniche distinte che lavorano insieme. separatamente il rinforzo e la matrice si comportano da mat. fragili (ceramici).

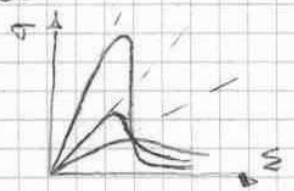


**REGOLA DELLE MISCELE** (per ricavare il modulo elastico del cls)

$$E_{cls} = X_m \cdot E_m + X_r \cdot E_r$$

$X_m$  matrice       $X_r$  rinforzo

$$X_m + X_r = 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} X_m = \frac{m_m}{m_m + m_r} \\ X_r = \frac{m_r}{m_m + m_r} \end{array} \right.$$



PROP. MECC. CLS = TRATTO ELASTICO + TRATTO PLASTICO

⇒ Il cls è leggermente duttile (non completamente fragile)

Il cls ha un comportamento viscoplastico

→ **FLUAGE DEL CLS**: proprietà data dalla presenza di un'interfaccia tra aggr. e pasta di cem.

(V. grafico p. 80)

# IL DEGRADO DEL CLS

Il cls è un mat. durevole, tuttavia una serie di fattori possono minare la sua durabilità e/o quella della struttura.

## CAUSE DI DEGRADO DELLE STRUTTURE IN CLS

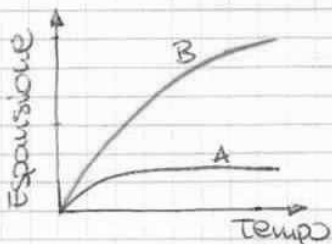
- |                 |                                                                                                                                                                                                                                                           |       |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Tecnologiche →  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• cls di qualità scadente</li> <li>• attacco chimico del cls</li> <li>• corrosione dei ferri dovuta ad inadeguata protezione con cls di scarsa qualità</li> <li>• materiali (cem, inerti...) non idonei</li> </ul> | } 42% |
| Costruttive →   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• scarso controllo della messa in opera</li> <li>• assenza del controllo della messa in opera o ignoranza delle tecniche costruttive</li> </ul>                                                                    | } 22% |
| Strutturali →   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• calcolo strutturale inadeguato</li> <li>• calcolo insufficiente per un'adeguata prestazione strutturale</li> </ul>                                                                                               | } 12% |
| Sovraccarichi → | • strutture progettate per altri usi e sovraccaricate.                                                                                                                                                                                                    | } 8%  |
| Fondazioni →    | • fondazioni inadeguate                                                                                                                                                                                                                                   | } 7%  |
| Accidentali →   | • incendio                                                                                                                                                                                                                                                | } 4%  |
| Collasso →      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• risultante da almeno 2 delle cause precedenti</li> <li>• rottura delle strutture di collegamento</li> </ul>                                                                                                      | } 5%  |

La durabilità del cls è una condizione necessaria, ma non sufficiente a garantire la durabilità di una struttura.

## CAUSE DI DEGRADO DEL CLS

- |                    |                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                           |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Chimico</b> →   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Solfati (<math>SO_4^{2-}</math>)</li> <li>• Anidride carbonica (<math>CO_2</math>)</li> <li>• Cloruri (<math>Cl^-</math>)</li> <li>• Alkali (<math>Na^+</math> e <math>K^+</math>)</li> </ul> | Bisogna intervenire in fretta con il risanamento del degrado se no i costi aumentano esponenzialmente.<br><br>Se si hanno pochi solati è più facile prevenire il degrado. |
| <b>Fisico</b> →    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gelo-disgelo</li> <li>• Ritiro da essiccamento</li> <li>• Incendio</li> <li>• Calore di idratazione</li> </ul>                                                                                |                                                                                                                                                                           |
| <b>Meccanico</b> → | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Urto, scoppio</li> <li>• Erosione, abrasione</li> <li>• Sismi</li> <li>• vibrazioni</li> </ul>                                                                                                |                                                                                                                                                                           |

## \* AGGRESSIONE SOLFATICA

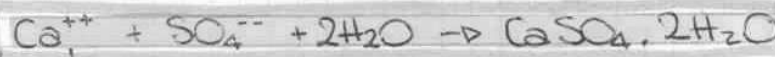


A → cls immerso in acqua potabile: si rigonfia leggermente

B → cls immerso in acqua contenente solfati: si rigonfia parecchio

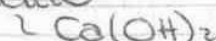
Questo fenomeno avviene solo in presenza di pori aperti.

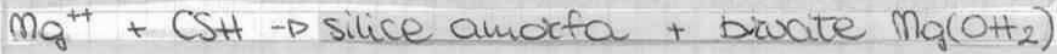
FASE 1: Portlandite + Solfati → Gesso



ioni  $Ca^{++}$  presenti nella Portlandite

reaz. espansivo ⇒ dannoso

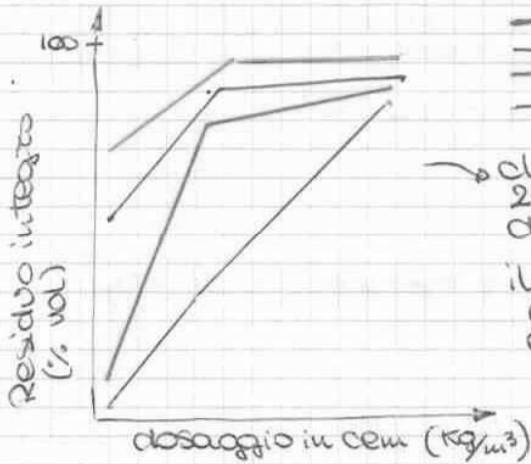




→ il CSH (della pasta di cem) si consuma e forma la brevite

Prevenzione:   
 • eliminazione delle porosità aperte (basso  $\alpha/c$ )   
 • diminuzione della quantità di portlandite e alluminati di calcio idrati } come per i solfati e i cloruri.

La durata dei manufatti soggetti ad attacco da acqua di mare è molto breve: aggressione chimica + abrasione



- cem. d'altoforno (loppa > 50%)
- cem. ferrico
- cem. d'altoforno (loppa < 35%)
- cem. Portland

→ cls preparati con diversi cementi dopo 25 anni di esposizione all'acqua di mare:

il Portland si degrada molto, mentre un cls costituito con cem. d'altoforno con loppa > 50% si conserva abbastanza

\* AGGRESSIONE DA ANIDRIDE CARBONICA (CARBONATAZIONE)

1) CO<sub>2</sub> GASSOSA portlandite



acido + base → sale + acqua reaz. di salificazione

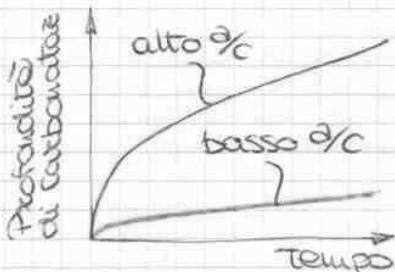
Questa reaz. rende meno basico l'ambiente che circonda l'armatura creando le condizioni atte all'instaurarsi della corrosione (depassivazione).

La carbonatazione procede dalla sup. per poi proseguire verso l'interno

Spessore di carbonatazione →  $s = Kt^{1/n}$  (t = tempo)   
dipende da  $\alpha/c$  e cls (tra 6 e 9)

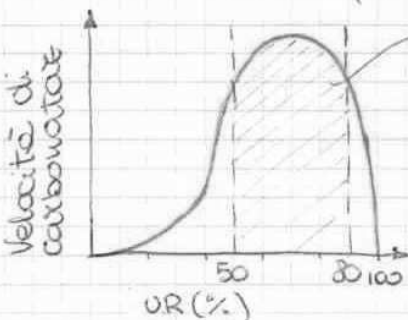
Velocità di carbonatazione →  $v = \frac{ds}{dt} = \left(\frac{K}{n}\right) t^{\frac{1-n}{n}}$

Per cls comuni (porosità = 20-30%) si usa  $n=2 \Rightarrow s = K\sqrt{t}$



↓ cls con rapporto  $\alpha/c$  basso hanno una profondità di carbonatazione minima nel tempo, poiché hanno un alto contenuto di cem e quindi è meno poroso.   
 Per porosità minori  $n > 2$

$\alpha/c$  basso → s basso   
 $\alpha/c$  alto → s alto



Zona di reazione di carbonatazione molto veloce → maggiore aggressione (UR 50-80%)

UR < 40-35% → bassa velocità di carb.

UR ≈ 100% (cls bagnato) → low CO<sub>2</sub> non riesce a diffondersi nei pori (bassa v)

U.R. = 50-80% → zona di PESSIMUM

## \* REAZIONE ALCALI-AGGREGATO

$\left\{ \text{Na}^{++} \text{ e } \text{K}^{++} \right\}$   $\left\{ \text{silice amorfa} \right\}$

Sodio e potassio sono già presenti nel cem. in quanto componenti minimi dell'argilla (presenti come ossidi)

Il sodio può avere anche altre provenienze:

- sali disciolti
- acqua di mare (contatto o aerosol marino)
- terreni (raramente)

Silice amorfa + Alcali  $\rightarrow$  Silicati alcalini idrati

Reaz. espansivo  $\rightarrow$  fenomeno di FOLL-OUT: distacco di una scheggia di materiale che parte dal dove è presente l'aggregato

Reaz. velocizzata da: tanti alcali, tanti aggr., umidità

Prevenzione: scelta accurata degli aggr.

- uso di cem di miscela
- protezioni impermeabilizzanti
- additivi aereanti (che assorbono l'espansione)

## \* GELO E DISGELO

Per variazioni termiche tra  $5^{\circ}\text{C}$  e  $40^{\circ}\text{C}$  insorgono sollecitazioni all'interfaccia pasta di cem-aggregato dovute al loro diverso coeff. di dilatazione.

Questo fenomeno è trascurabile rispetto al degrado che avviene per variazioni cicliche che avvengono intorno agli  $0^{\circ}\text{C}$ .

L'acqua dell'umidità entra nei pori capillari

- $\rightarrow$  a  $0^{\circ}\text{C}$  l'acqua nei pori ghiaccia e si espande
- $\rightarrow$  applica una pressione sulle pareti dei pori  $\rightarrow$  rotture interne
- $\rightarrow$  la T si alza e si abbassa per vari cicli  $\rightarrow$  i pori si riempiono di più

GRADO DI SATURAZIONE (per cui si manifesta il degrado)  $\geq 91,4\%$  in Vol (volume di acqua nei pori capillari / volume totale dei pori)

- Prevenzione:
- sistemi di drenaggio o impermeabilizzazione per evitare la risalita dell'acqua nei pori
  - basso  $\frac{a}{c}$
  - uso di aggr. non gelivi
  - uso di additivi aereanti

## ADDITIVI AEREANTI

Consentono di introdurre nel cls delle microbolle d'aria nelle quali va a scaricarsi la pressione idrostatica

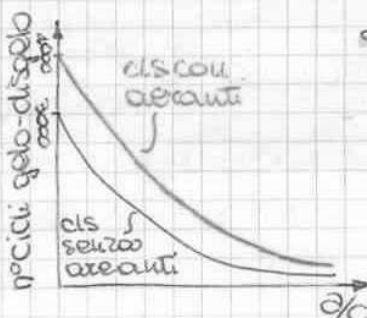
fronte del ghiaccio



L'acqua spinta dal fronte del ghiaccio penetra nelle bolle e scarica la pressione

L'introduzione di microbolle provoca però una diminuzione delle resistenze mecc. del cls  $\rightarrow$  si rimediano usando un  $\frac{a}{c}$  più basso

Se il rapporto  $\frac{a}{c}$  è molto basso, ho meno pori,  $\rightarrow$  resiste a più cicli di gelo-disgelo



• **CORROSIONE SECCA**: in assenza d'acqua allo stato condensato

Gli atomi superficiali del componente metallico (molto reattivi) si combinano con l'ossigeno atmosferico per formare l'ossido (poco aderente al metallo  $\Rightarrow$  la reaz. prosegue)  
Avviene a T. alte; ossidazione diretta

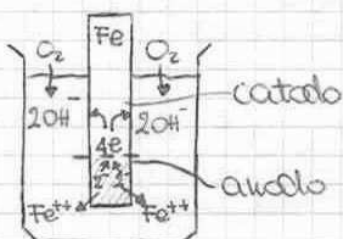
• **CORROSIONE UMIDA**: in presenza di acqua allo stato condensato

meccanismo elettrochimico che coinvolge gli ioni presenti nello strato d'umidità condensato sulla sup. del metallo.  
Avviene a T. ordinaria  $\Rightarrow$  più frequente.

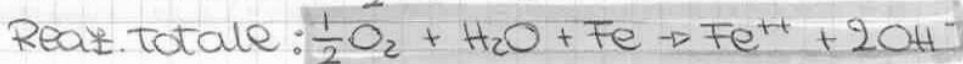
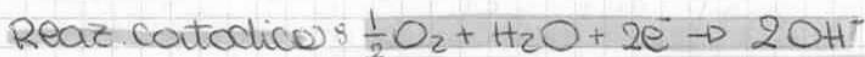
**CORROSIONE DELL'ACCIAIO**  $\rightarrow$  formazione di RUGGINE

- Non ha alcuna caratteristica portante
- si riduce la sezione portante dei ferri d'armatura

### PILA A CONCENTRAZIONE



$P_{O_2} \text{ aria} > P_{O_2} \text{ acqua} \Rightarrow$  si genera una  $\Delta E$  (pressione ossigeno aria) (f.e.m. della pila)



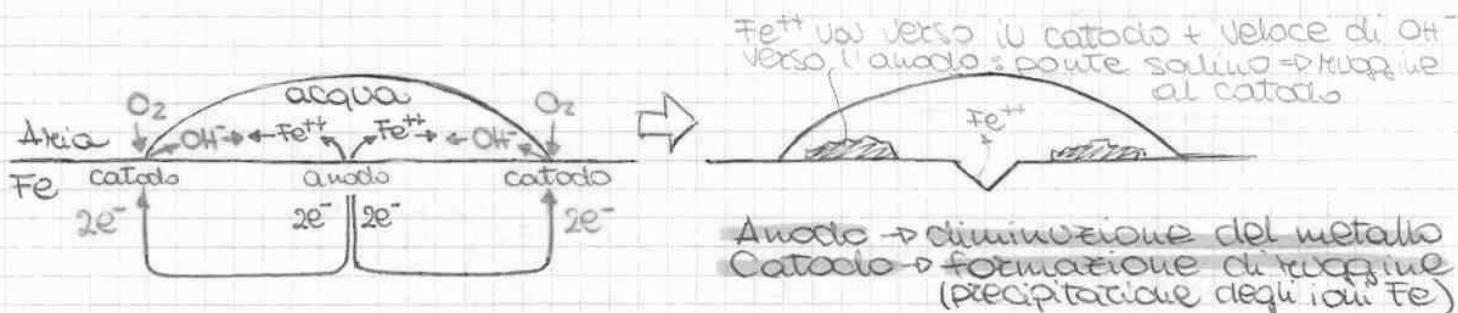
Il ferro funziona da sito anodico e catodico

**ANODO**: zona in cui il Fe (toccato da H<sub>2</sub>O) si ossida dando vita a ioni Ferrici (Fe<sup>++</sup>) che si staccano dalla sup. del metallo.  
*in acqua*  $\Rightarrow$  si liberano 2e<sup>-</sup> che si trasferiscono al catodo.

**CATODO**: zona in cui il metallo trasferisce i 2e<sup>-</sup> all'H<sub>2</sub>O che, prendendo un atomo di ossigeno dall'aria, si trasforma in OH<sup>-</sup>  
*con aria e acqua*

**CONDUZIONE DI I SPECIE (ELETTRONICA)**  $\rightarrow$  Reaz. anodica

**CONDUZIONE DI II SPECIE (IONICA)**  $\rightarrow$  Reaz. catodica



### COMBATTERE LA CORROSIONE

**Fase di progetto**: definire l'ambiente dal punto di vista corrosivistico (T, pH, U.R., potere ossidante), scegliere i mat. e il design.

**Fase di costruzione**: eseguire correttamente le saldature, uso di rivestimenti protettivi, evitare accoppiamenti con nobiltà diverse (accoppiamenti galvanici)

**Opera completa**: mantenimento e controllo

# VITA IN ESERCIZIO DELLE STRUTTURE

- Edifici comuni → 60 anni
- Costruzioni prestigiose → 150 anni
- Ponti rilevanti → 120-150 anni
- Ambiente marittimo → 30-50 anni (ambiente aggressivo)

⇒ È necessaria la prevenzione della corrosione per tutta la vita di progetto.

## PREVENZIONE DALLA CORROSIONE DELLE STRUTTURE

- Corretta progettazione strutturale
- Corretta scelta dei materiali e delle miscele
- Copriferro conforme alle condizioni ambientali
- messa in opera, compattezza e manutenzione a regola d'arte

## CONSEGUENZE:

- ♦ **Riduzione della sezione portante dei ferri**  
 ⇒ diminuzione delle prop. meccaniche: resistenza a trazione, resistenza a fatica, proprietà di deformazione
- ♦ **Fessurazione del cls**  
 ⇒ crepe espansive che provocano il distacco dell'interfaccia tra armatura e cls.

## PROTEZIONE:

- \* **Inibitori di corrosione**  
 Addizionati all'impasto (es:  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ ) che tendono a ossidarsi prima del Fe  
 ⇒ azione sacrificale fino a completa consumazione
- \* **Trattamenti superficiali**  
 Pitture, membrane, trattamenti di impermeabilizzazione per impregnazione superficiale del cls.

Problema: riduzione l'interfaccia tra Fe e cls.

Es: Rivestimenti → impermeabili a:  $\text{CO}_2$  (molto)  
 $\text{Cl}^-$  (molto)  
 $\text{H}_2\text{O}$  (poco)

Impregnanti → " " :  $\text{CO}_2$  (poco)  
 (silani) " " :  $\text{Cl}^-$  (molto)  
 " " :  $\text{H}_2\text{O}$  (molto)  
 " " : costosi!

- \* **Rivestimenti con resine epossidiche**  
 Applicazione elettrostatica di polveri polimeriche a 240°C su ferra sabbiati

Problema: riduzione del 10-20% dell'adesione tra cls e Fe.

- \* **Zinco**  
 Solo per strutture con Cem. con  $\text{pH} < 13$  (cem. di miscela) se no lo zinco viene portato via.

- \* **Acciai inox**  
 Costo elevato (contiene il Cr che crea una pellicola protettiva di ossido di Cr).  
 Corrosione possibile in ambienti molto ossidanti in cui  $\text{Cr}(\text{III})$  diventa  $\text{Cr}(\text{VI})$  che origina  $\text{CrO}_3$  volatile.  
 Corrosione intergranulare: formazione di carburi di Cr nei bordi di grano

## CLASSE XC (corros. da CO<sub>2</sub>)

| Sottoclasse | Ambiente                        | Esempi                                               |                   |
|-------------|---------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------|
| XC1         | Asciutto                        | • Interni di edifici con U.R. molto bassa            |                   |
| XC2         | Bagnato raramente asciutto      | • Strutture idrauliche<br>• Fondazioni               |                   |
| XC3         | Moderatamente umido             | • Interni con U.R. medio-alto<br>• Strutture esterne | DATA<br>a/c = 0,5 |
| XC4         | Ciclicamente asciutto e bagnato | • Strutture esterne esposte all'acqua piovana        |                   |

Il rapporto a/c è più basso con l'aumento della classe  
 ⇒ aumento di pericolosità (+ cem ⇒ + pericolo)

La Rck a 28gg aumenta all'aumentare delle classi  
 ⇒ per garantire maggiore sicurezza in amb. pericolosi

Classe XC4 (più aggressivo):

cicli di:  $\left\{ \begin{array}{l} \text{aria asciutta} \rightarrow O_2 \text{ e } CO_2 \\ \text{aria umida (o pioggia)} \rightarrow H_2O \end{array} \right\}$  corrosione dovuta alla carbonatazione

I fedi del cls possono essere esposti a corrosione provocata da cloruri nelle classi:

- XD → cloruri non di origine marittima (sali disgelati)
- XS → " di origine marittima
- XF → gelo-disgelo + sali disgelati

## CLASSE XD (Deicing salts = sali disgelati)

| Sottoclasse | Ambiente                      | ES.                                                            |
|-------------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| XD1         | Moderatamente umido           | • Pavimenti esposti a spruzzi occasionali di salamoia          |
| XD2         | Bagnato raramente asciutto    | • Piscine<br>• Vasche di acque industriali                     |
| XD3         | Ciclicamente asciutto bagnato | • Palletti di ponte<br>• Pavimenti e sdai di parcheggi coperti |

a/c basso molto cem. Rck alto } classe alta

Le classi XC e XD possono trovarsi a lavorare contemporaneamente (carbonatazione + cloruri)

Classe XD1: rischio minore di corrosione

→ c'è O<sub>2</sub> ma non c'è umidità continua per la formazione di acqua adsorbita che trasporta i cloruri

Classe XD2: corrosione media

→ c'è l'acqua, ma non c'è O<sub>2</sub> trasportato



| sottoclasse | Ambiente (acqua) |    |                 |                              |                  |
|-------------|------------------|----|-----------------|------------------------------|------------------|
|             | SO <sub>4</sub>  | PH | CO <sub>2</sub> | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> | Mg <sup>++</sup> |
| XA 1        | ↓                | ↑  | ↓               | ↓                            | ↓                |
| XA 2        |                  | ↑  |                 |                              |                  |
| XA 3        | ↓                | ↑  | ↓               | ↓                            | ↓                |

All'aumentare del contenuto di questo sost. e dell'acidità aumenta la classe

Un cls durevole richiede che si definiscano 3 elementi da verificare in corso d'opera:

- Una Rck che corrisponda al rapporto % da adottare o secondario della classe di esposizione ambientale;
- Costipazione del cls in opera tale che la massa volumica della struttura (misurata su cubo) non scenda più del 3% sotto quello del corrispondente provino (su cui si determina la Rck) compattato o rifiuto.
- Stagionatura umida della sup. del cls per almeno 30gg dopo la scasseratura.

## MIX DESIGN (PROGETTARE LA MISCELA)

Procedimento di calcolo della composizione del cls: dosaggio in cem, acqua, agg.

Requisiti:

- Proprietà del cls indotato (Rck, E, ritiro, fluage, durabilità)
- Esigenze esecutive dell'opera (lavorabilità, modalità del getto)
- Materiali disponibili (tipo di cem, natura degli aggregati, additivi)

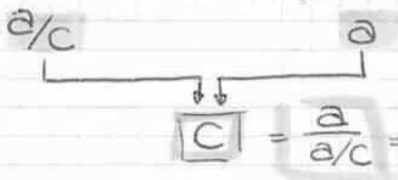
Parametri di partenza vincolati per la progettazione:

- Rck
- tc (tipo di cem)
- L (lavorabilità)
- D<sub>max</sub>



**SEMPLICE**: progettazione di miscela che dipende solo dai 4 parametri di partenza (Rck, tc, L, D<sub>max</sub>)

**COMPLESSO**: 4 parametri classici + almeno un parametro aggiuntivo (es: durabilità)



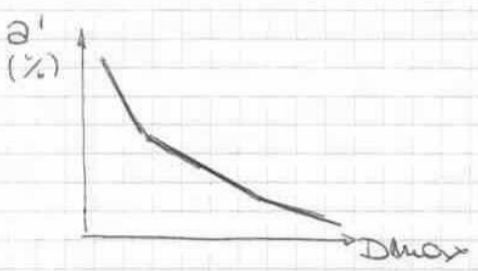
$C = \frac{a}{a/c} = \text{kg di cem per m}^3 \text{ di cls} \rightarrow Vc = \frac{C}{\rho_c}$

densità cem

Tipo di inerte ( $D_{max}$ )



$a'$  → volume di aria intrappolata nel cls % dipende dal  $D_{max}$



$a' = \frac{V_{a'}}{V_{cls}} \cdot 100$

$V_{a'} = \text{vol. aria intrappolata}$

$V_{cls} = \text{vol. cls}$

$V_{cls} = 1000 \Rightarrow a' = \frac{V_{a'}}{1000} \cdot 100 \Rightarrow 10a' = V_{a'}$

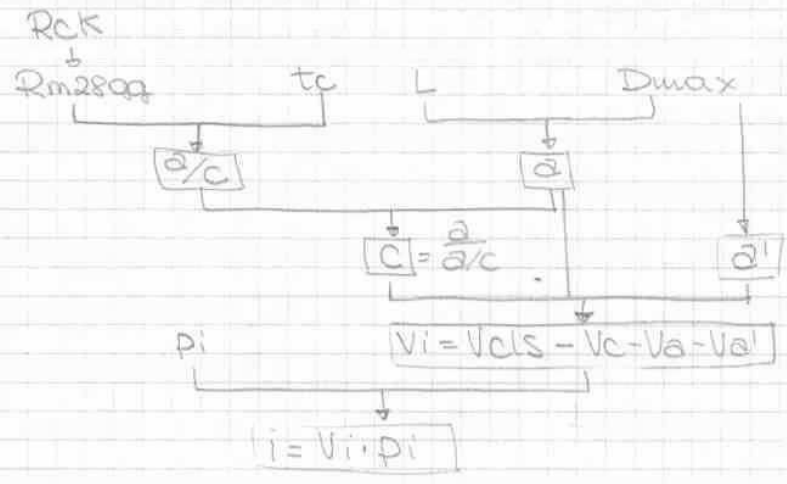
$V_{l. tot} = Vc + Va + Va' + Vg$  ~ vol. aggregati (inerte)

$V_i = V_{cls} - Vc - Va - Va'$

aggr. fine e grossolano mischiati secondo la distrib. granulometrica di Fuller

⇒ massa aggr. :  $i = V_i \cdot \rho_i$  ~ densità media aggr.

$\rho_i = S + G$  (sabbia + grossolano)



$a = Va$   
 $a' = \left( \frac{V_{a'}}{V_{cls}} \right) \cdot 100$   
 $C = Vc \cdot \rho_c = \frac{a}{a/c}$   
 $V_{cls} = 1000$