



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO : 190

DATA : 10/01/2012

# A P P U N T I

STUDENTE : Guala

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 tecnologie dei materiali

Prof.ssa Laura Montanaro  
2010/11

---

**Materiale:** qualsiasi solido in grado di svolgere almeno una determinata funzione (meccanica, termica, ottica, magnetica, elettrica....) rendendolo valido per una certa applicazione.

## Materiali e proprietà

Proprietà fisiche

Proprietà meccaniche

Proprietà termiche

Proprietà elettriche

Proprietà magnetiche

Proprietà ottiche

Proprietà chimiche

## Classificazione dei Materiali

- **Naturali**, di origine geologica (pietre, rocce, argille...) o chimica (cellulosa, caucciù, carbone, ..),
- **Sintetici** (metalli ottenuti per trattamento dei minerali, ceramici, materie plastiche, ..)
- **Metalli** (Fe, Al, Cu, Mg, Ti) e loro Leghe (Acciai, Ghise, Ottoni, Bronzi....)
- **Materie plastiche:** Termoplastici-Termoindurenti -Elastomeri o Gomme
- **Ceramici** tradizionali e ingegneristici
- **Compositi:** CMC, MMC, PMC

## Metalli: materiali inorganici metallici

Ampio gruppo di elementi chimici caratterizzati da un numero variabile di elettroni di valenza delocalizzati (legame metallico).

Organizzazione degli atomi in strutture ordinate (cristalli). Molto difficile produrre metalli amorfi.

Legami intra-catena: legami forti (covalenti: C-C)

Legami inter-catena: prevalentemente deboli interazioni di Van der Waals (dipolo indotto – dipolo indotto; dipolo – dipolo..., legami idrogeno...)

Proprietà molto variabili da famiglia a famiglia:

- TP⇒duttile (deformazione plastica, irreversibile, anche estesa prima di rompersi)
- TI⇒fragili (deformazione elastica, reversibile)
- Gomme⇒estesissima deformazione elastica prima di rottura
  
- Bassa densità
- Facilmente formabili
- Bassa resistenza meccanica
- Bassa temperatura di decomposizione oppure di fusione (o, meglio, di rammollimento)
- Alta reattività chimica
- Riciclabilità a fine vita (TP)

## Compositi

Combinazioni di due o più materiali diversi, finalizzate all'accoppiamento delle migliori caratteristiche di ciascuno di essi (effetto sinergico) Matrice + Rinforzo

*Legno*, nel quale la matrice di lignina è rinforzata dalle fibre cellulosiche

*Vetroresina*, composito sintetico

- elevata resistenza a trazione delle fibre di vetro, intrinsecamente fragili
- notevole duttilità e flessibilità del materiale polimerico

Si conferisce alla matrice polimerica la capacità di sopportare i carichi richiesti ad un materiale strutturale.

Ceramic Matrix Composite: CMC

Metal Matrix Composite: MMC

Polymer Matrix Composite: PMC

GFRP: Glass-Fiber-Reinforced Polymer

CFRP: Carbon-Fiber-Reinforced Polymer

## Legami chimici

**Curve di Condon-Morse** (*su dispense*)

Gli atomi si collocano nelle tre dimensioni rispettando regole geometriche semplici e ripetitive. Ad esempio l'impacchettamento cubico semplice si ripete nelle tre dimensioni in un reticolo semplice.



Il **reticolo cristallino** è la struttura che si forma dall'organizzazione nello spazio di più celle elementari ripetute nelle tre dimensioni spaziali. La **cella elementare** è l'unità geometrica più semplice del reticolo cristallino.

Ci sono 14 scelte d'impacchettamento per le sfere nei cristalli (reticoli di Bravais) per le sfere nei cristalli, le più comuni sono le strutture di tipo cubico:

- semplice (rispetto al volume del cubo la materia non lo occupa interamente, ci sono interstizi e zone che chiamo piani di atomi alternati a piani vuoti di materia)
- a corpo centrato (CCC con un atomo nel centro del cubo e interstizi, si definisce il **fattore di impacchettamento atomico** come il volume occupato dagli atomi rispetto al volume della cella → F.I.A. = 0,68 68% materia e 32% vuoto)
- a facce centrate (CFC con meno spazi vuoti → F.I.A. = 0,74 74% materia e 26% vuoto)

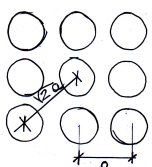
Poi c'è anche l'impacchettamento esagonale compatto (F.I.A. = 0,74 = CFC massimo realizzabile in natura).

Esistendo dunque impacchettamenti differenti, alcuni allocano più atomi a parità di volume, cioè comportano una maggiore **densità** ( $d = m/V$ ). La densità dipende dalla natura degli atomi (peso atomico) e dall'efficienza di impacchettamento (F.I.A.).

Abbiamo già visto come la densità differenzi la struttura cristallina e amorfa, ma come varia la densità nei materiali? I materiali più densi sono i metalli perché sono costituiti da elementi con elevato peso atomico e realizzano impacchettamenti molto efficaci per quanto riguarda il FIA, cioè quelli con meno vuoti; essi vanno da altissime densità (leghe ferrose 7,9-8,1 g/cm<sup>3</sup>) a densità inferiori (leghe leggere es. alluminio 2,7-2,8 g/cm<sup>3</sup>). I ceramici selezionano quasi tutti i tipi di celle elementari e contengono sempre non metalli leggeri come O, C, H; negli ossidi per esempio l'ossigeno è sempre presente ed è leggero, inoltre l'impacchettamento è solitamente poco efficace in quanto i ceramici hanno due vincoli ai legami: quello stechiometrico e quello direzionale i quali fanno sì che i ceramici non possano allocare tanta materia elementare all'interno della cella elementare (2,5-3,5 g/cm<sup>3</sup>).

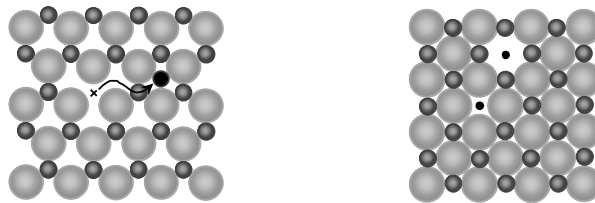
I polimeri solitamente hanno bassissima densità anche < 1 g/cm<sup>3</sup> (polietilene), in essi giocano due fattori: il caos dello stato amorfo e il peso leggero di elementi come il carbonio e idrogeno.

Oltre alla densità una particolare caratteristica è la **temperatura di fusione** nei solido cristallini ovvero la temperatura alla quale si ha equilibrio tra stato solido e liquido e che ad una data pressione è una T costante ed univoca; Il *quarzo* (silice cristallina) a pressione costante fonde a 1720 °C, l'*allumina* a 2054 °C. Se invece prendo un solido amorfo parlerò di intervallo termico di rammollimento (non c'è una temperatura fissa) perché lo stato amorfo non è di equilibrio della materia; il caos porta ad un surplus energetico, l'entropia, e la materia tende a svolgere verso la minor energia per l'equilibrio.



Un'altra caratteristica è esprimibile in questi termini: osservando il solido cristallino da due punti di vista differenti, varia la distanza interatomica, dunque varia l'energia di legame, misurando

Per i materiali di natura ceramica i difetti sono più complessi perché per loro non deve essere perturbata l'elettroneutralità e il rapporto stechiometrico si parla quindi di difetto di Frankel (accoppa una lacuna ad un autointerstiziale in zone adiacenti-l'atomo migratore va ad occupare una posizione interstiziale-) o difetto di Schottky (accoppia due lacune, una di tipo metallico e una di tipo non metallico-migra un atomo A, e migra anche un atomo B-), tramite questi due difetti i ceramici riescono a mantenere elettronegatività e stechiometricità.



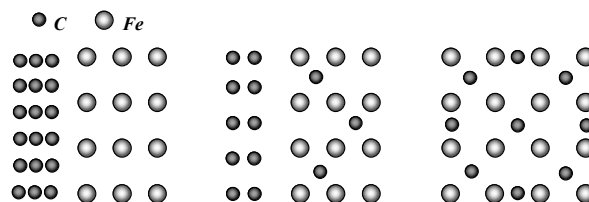
I difetti puntuali consentono la formazione di leghe metalliche o soluzioni solide; la soluzione è comune negli altri stati ma anche nei solidi avvengono soluzioni: quando aggiungo gli alliganti al metallo base questi entrano e partecipano al reticolo attribuendo al materiale particolari proprietà questo può anche avvenire nelle ceramiche, ecco perché parlo di **soluzioni solide**.

La diffusione degli atomi può avvenire per vacanza se la presenza di una lacuna consente lo spostamento degli atomi adiacenti; in numero dei vuoti e la mobilità degli atomi (tradotta in energia cinetica → aumento temperatura) favoriscono il processo. Un'altra modalità di diffusione è quella per interstiziali il difetto può spostarsi da un interstizio all'altro, il processo avviene con l'allontanamento degli altri e aumentando la temperatura si ha una maggiore facilità di movimento.

Tipi di leghe:

- ◆ **SOSTITUZIONALI** (*duralluminio* Al-Cu) l'alligante entra nella struttura reticolare del metallo base-Al- andando a sostituire degli atomi in alcune posizioni reticolari.
- ◆ **INTERSTIZIALI** (Fe-C) gli atomi di alligante non sostituiscono il metallo base nelle posizioni reticolari, ma ne entrano negli interstizi di questo.

Non c'è però separazione netta fra questi due tipi di leghe, ci possono essere infatti leghe con entrambe le caratteristiche → *acciaio INOX 18/10* (Fe-C è sicuramente una lega interstiziale perché il carbonio entra nel ferro solo in questo modo più Cu - Ni che per dimensioni non possono andare negli interstizi e quindi si sostituiscono al ferro).



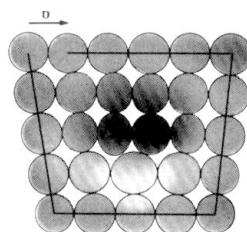
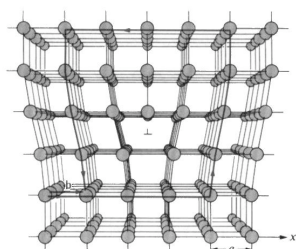
Noi possiamo fare soluzioni per esempio Ni-Co fino a percentuali totali perché hanno solubilità completa. Ci sono però anche elementi non intermiscibili, tanto più gli atomi sono simili ( $\Delta R < 15\%$ , =valenza, =struttura

$\frac{C_2 - C_1}{X_2 - X_1} = \nabla$  è il gradiente di concentrazione, perché il flusso avvenga ci dev'essere un disequilibrio (da zone a maggiore o minore concentrazione  $C_2 > C_1$ ): questo causa la diffusione della materia → diffusione solida (come nelle ceramiche tra pori dei compatti di polvere)

Il segno negativo è giustificato dal fatto che il flusso va da una concentrazione più alta ad una più bassa per rendere il flusso positivo.

## Difetti monodimensionali

Perturbazioni associabili ad un'intera fila o linea di atomi irregolari. La **dislocazione a spigolo** può essere vista come creata dall'inserzione di un piano incompleto di atomi all'interno del reticolo provoca l'assenza di una fila di atomi.



*Stato tensionale nell'interno della dislocazione. Gli atomi adiacenti alla dislocazione sono in stato di compressione (più scuri) o di tensione (più chiari).*

▲ la dislocazione non è il semipiano ma è lo spigolo inferiore del piano di atomi che non ha nessun atomo sotto di sé. È dunque qui che sono presenti atomi difettuari.

Cosa produce la dislocazione all'interno del reticolo? Si crea una perturbazione del reticolo che si estende per alcune distanze atomiche ⇒ ovvero i piani non sono più allineati e lineari; gli atomi al di sopra della dislocazione ⊥ (linea di dislocazione) sono mediamente più vicini a quello che dovrebbero essere (stress compressivo). Le due file sotto invece si trovano mediamente un po' più lontane (stress a trazione). La dislocazione porta così due stress come conseguenza.

Le dislocazioni ci interessano perché nei nostri cristalli se non ci fossero non potremmo osservare importanti caratteristiche meccaniche. In un cristallo ideale per deformarlo devo far scorrere un piano di atomi rispetto ad un altro lungo un piano di scorrimento attraverso uno stress di taglio ⇔ devo cioè spezzare tutti i legami lungo un piano ma arriverei dunque alla rottura e non alla deformazione plastica.

Le dislocazioni invece sono condizioni necessarie ma non sufficienti per deformazioni plastiche, per la duttilità del materiale, infatti applicando 2 forze opposte in presenza di dislocazione, è la dislocazione a muoversi all'interno del cristallo permettendo di rompere un legame tra atomi per volta e contemporaneamente alla rottura se ne forma un altro -compensando il bilancio energetico-: la dislocazione andrà a perdersi ed esaurirsi sulla superficie del cristallo. La linea di dislocazione si trova al di sotto dello spigolo del semipiano. Stress di taglio  $\tau$  →; la deformazione è plastica, irreversibile, il cristallo cambia la sua geometria.

proprietà di movimento deve passare da un cristallo all'altro ed andare ad esaurirsi nel bordo del cristallo, ma nei bordi di grano il loro movimento è impedito e rallentato perché qui le distanze tra i legami non sono regolari.

Un solido cristallino a parità di materiale è molto più duttile di un policristallo, inoltre i policristalli con microstruttura a grani più grandi saranno più duttili di quelli a grani piccoli, avendo infatti meno ostacoli le dislocazioni avranno bisogno di meno energia per muoversi tra esse.

### **Difetti tridimensionali**

Sono rappresentati da intere porzioni volumiche che sono difettuali, un vuoto, una porosità è un difetto tridimensionale che avrà conseguenze meccaniche di durabilità sul materiale.

Possiamo avere anche zone amorfe, vetrose all'interno di un materiale cristallino (in un mattone per esempio accanto alla struttura cristallina ci sono zone vetrose che ci consentono di raggiungere la resistenza voluta). Ci sono poi difetti detti **inclusioni** (per i metalli) ovvero porzioni di materiali estranei al nostro.

Lega metallica⇒ metallo fuso in contenitore di ceramica che può rilasciare della polverina che si insinua nel reticolo del metallo. Per evitare ciò nei processi viene introdotta una tappa di filtrazione del materiale fuso→differenza di comportamento fisico, chimico, meccanico.



che l'acqua sta asportando materia dall'interno, sta degradando cioè il materiale internamente, inoltre rappresenta un danno estetico del manufatto (la committenza può chiedere danni al costruttore).

La **subfluorescenza** porta a conseguenze ancora più serie, infatti oltre la solubilizzazione internamente del materiale si ha la formazione nella zona subcorticale di cristalli che ostruendo il poro possono sviluppare pressioni elevate alla struttura-compressione o a trazione-possano così rompere, fessurare e portare distacchi al materiale.

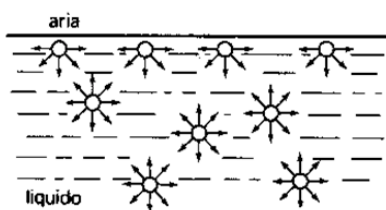
Un altro parametro chimico che influenza la durabilità dei materiali è il pH (il calcestruzzo ha pH molto basico >12,5) se il calcestruzzo subisce carbonatazione il pH diminuisce e sotto il 9 avrò importanti degni nelle armature del calcestruzzo.

## PROPRIETÀ' FISICHE

### Tensione superficiale

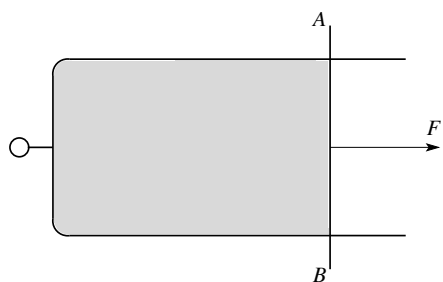
Molti fenomeni all'interno della nostra struttura possono avvenire in virtù delle superfici dei solidi, zone considerate difettuali rispetto al volume del solido in quanto l'energia degli atomi o molecole all'interno è molto inferiore, dunque sono più stabili degli atomi o molecole in superficie, ai quali compete un surplus di "energia libera superficiale".

Considero una vaschetta d'acqua:



In superficie l'atomo è circondato solo per metà da atomi uguali (è esposto ad un'altra fase → gassosa ad esso estranea con la quale l'energia di interazione è inferiore; l'altro atomo è totalmente circondato dalle molecole dello stesso tipo, interagisce con esse ed è in equilibrio con esse. Non essendoci interazioni tra fase liquida e gassosa gli atomi sulla superficie sono spinti a muoversi verso l'interno, verso l'equilibrio che

sarà dunque un equilibrio dinamico perché in movimento continuo: alle interfacce qualunque siano i tipi di fase a contatto compete un surplus energetico che tiene conto della maggiore instabilità, quantificata dal parametro **tensione superficiale**  $\gamma$  che rappresenta il lavoro che si deve spendere per aumentare (surplus di energia), unitariamente l'interfaccia di una determinata fase. Esiste un'esperienza fisica per valutare  $\gamma$ :

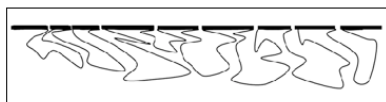


Filo rigido a U nel quale è collocato un filo mobile AB=l che inizialmente è collocato alla base della U. Pongo un liquido nella zona delimitata da questi 2 fili e muovo il filo per estendere l'interfaccia liquido-aria. Si valuta così il *lavoro necessario per estendere la superficie del liquido* =  $F dx$ . Se  $\gamma$  è il lavoro che spendiamo per creare una nuova superficie di interazione,

moltiplico  $\gamma$  per l'area della superficie e per 2 perché ci sono 2 superfici che si creano ugualmente e trovo  $F dx = 2 \gamma l dx$  ottenendo  $\gamma = F/2l$  [N/m] dine

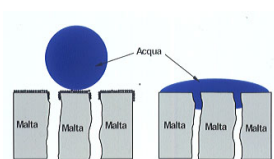
La **bagnabilità** di un liquido nei confronti di un solido è condizione necessaria ma non sufficiente alla penetrazione di un liquido nel solido.

Per avere assorbimento occorre un solido idrofilo con porosità: solitamente i materiali da costruzioni possiedono queste caratteristiche ⇒ bagnabile e assorbente

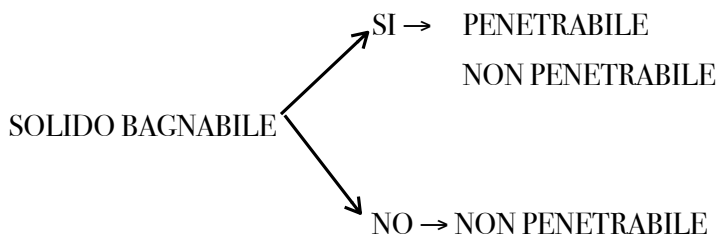


*Es.:* Il solido si lascia bagnare ma il fenomeno è solo superficiale se il solido è assente da porosità cioè completamente denso.

Il mercurio non bagna i materiali e quindi dobbiamo forzarlo all'interno dei pori e vedere quanto ne penetra in funzione della pressione esercitata → inversa proporzionalità pressione che ho dovuto applicare e raggio del poro.

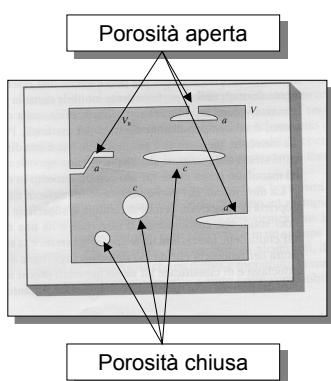


Il film idrorepellente che modifica  $\gamma_{SL}$  rendendo l'interfaccia non più energeticamente favorita: impediamo così la bagnabilità. Le porosità non sono chiuse ma cessando la condizione di bagnabilità non si ha assorbimento. (l'angolo cresce e la goccia non penetra più).



### Porosità ( $\epsilon$ ):

difetto di volume dei solidi che si manifesta in vuoti di volume detti pori. Non affligge generalmente i materiali metallici, mentre quelli ceramici sono più o meno afflitti da porosità, ed a questo dobbiamo, per molte applicazioni, mettere limite o riparo.



Abbiamo 2 tipi di porosità:

CHIUSA (vuoti, cavità con geometria irregolare però isolate tra di loro e non comunicanti con l'esterno) APERTA (cavità interconnesse tra loro e comunicanti con l'esterno)

Tutte e due incidono negativamente sulle proprietà meccaniche del materiale, in modo proporzionale alla % e alla dimensione dei pori; la chiusa ha limitatissime conseguenze per quanto riguarda la durabilità perché non rappresenta una via

Se considero i materiali ceramici avendo un comportamento con l'acqua molto simile posso ricavare un valore medio di  $\gamma$  e  $\theta$  e quindi valendo mediamente  $\frac{2 \gamma \cos\theta}{\rho g} = 15 \cdot 10^{-6}$

$$H_M = 15 \cdot 10^{-6} / r_c \quad \text{mattoni} \Rightarrow \begin{cases} r_c = 1 \mu\text{m} \rightarrow H_M = 15 \text{ m} \\ r_c = 10 \mu\text{m} \rightarrow H_M = 1,5 \text{ m} \end{cases}$$

Questa esperienza è ideale noi dobbiamo trasferirla alla realtà, i nostri capillari non sono solitamente impermeabili e l'acqua può evaporare sulla superficie per ventilazione lungo la risalita.

Es. Venezia: atmosfera satura  $\Rightarrow$  evaporazione esclusa (soluzione estetica, rivestimenti pietrosi  $\Rightarrow$  condizioni  $\cong$  esperienza ideale perché se la pietra è poco porosa non lascia passare l'umidità che non evaporando, sale; le zone di bagnatura più significative sono gli spigoli perché ci sono due superfici di evaporazione a contatto).

## PROPRIETÀ' TERMICHE DEI MATERIALI

**Conduttività termica** = è la capacità di un materiale di trasferire calore al proprio interno un flusso di energia termica, calore, ciò nonostante vale ugualmente la LEGGE DI FICK nella forma

$$J_x = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad \text{Il flusso va dalle zone più calde a quelle più fredde}$$

Il flusso è anche  $J_x = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{A}$  (quantità di calore che fluisce nell'unità di tempo attrav una superficie unitaria).

Ricavo Fourier  $\lambda = - \frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} \frac{dx}{dT}$  W/(m·K)

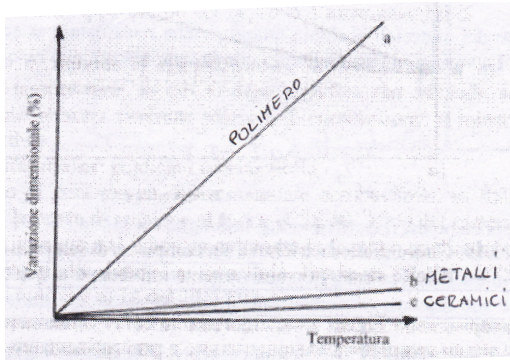
$\lambda$

Rame 320

Acciaio 45

Vetro 1

Aria immobile 0,02



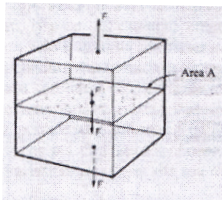
La dilatazione mi può dar vita a grosse problematiche se in una costruzione accoppio impropriamente materiali diversi con coefficienti di dilatazione diversi, anche per intervalli tecnici relativi, causando rotture impreviste e durabilità dei materiali. Per esempio devo collegare infissi e vetri delle finestre con materiali elastometrici.

### Comportamento al fuoco dei materiali (su dispense)

## LE PROPRIETÀ' MECCANICHE DEI MATERIALI

Se il comportamento del materiale situa nel campo elastico la relazione tra sollecitazioni e deformazioni è definita dalla TEORIA DELL' ELASTICITÀ' LINEARE.

Si definisce dunque SFORZO NOMINALE, il rapporto tra la forza  $F$  agente sul cubo e l'area  $A$  della sezione.



$$\sigma = \frac{F}{A} \quad [\text{N/m}^2] [\text{Pa}] \quad \text{MPa} = 10^6 [\text{N/mm}^2]$$

$A$ =area è la superficie portante del materiale (che sviluppa la reazione) ed è variabile in funzione della geometria, il materiale risponde allo stress in virtù degli atomi che reagiscono per le deformazioni delle loro lunghezze interatomiche di legame sviluppando una forza uguale e contraria.

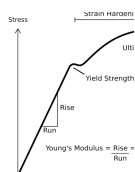
Essendo l'area  $A$  variabile descrivendo solo la  $F$  non ho sufficienti informazioni. *Es. Parquet sollecitato dai tacchi a spillo (60 Kg) o da una scarpa (120 Kg) la superficie portante è quella sollecitata 60 Kg  $\rightarrow$  30 cm<sup>2</sup> 120 Kg  $\rightarrow$  200 cm<sup>2</sup> rapportando la forza alla superficie portante ottengo nel caso dei tacchi una sollecitazione di 2 Kg/cm<sup>2</sup> mentre per la scarpa 0,6 Kg/cm<sup>2</sup>. Dunque la forza esterna deve sempre essere rapportata alla superficie portante che quel materiale espone.*

Si supponga ora che  $F$  non agisca normalmente alla faccia del cubo ma formi con essa un certo angolo (sollecitazione complessa), in tal caso  $F$  può essere scomposta in 2 componenti, una normale alla faccia  $F_n$  e l'altra parallela alla faccia  $F_t$  (che agisce con un effetto di taglio lo sforzo di taglio  $\tau$  nel campione del materiale secondo la direzione  $F_t$  è espresso da  $\tau = \frac{F_t}{A}$

Nel '600/'700 furono assegnati ad Hooke degli studi dalla Marina Militare inglese , per produrre navi ugualmente performanti ma più leggere ed a maggiore governabilità, Young riprese i suoi risultati che non furono capiti e li esplicò bene. Per i materiali aventi modulo elastico è possibile tracciare curve sforzo-deformazioni.

La costante di proporzionalità è detta **modulo elastico E** o modulo di Young ed ha le dimensioni di [GPa]. Nella realtà esistono materiali con deviazioni della Legge con comportamento elastico non lineare: elastomeri o gomme; un'altra deviazione della Legge può venire causata dal tempo di applicazione della forza (visco-elasticità). In generale però in campo elastico i materiali sono legati alla legge di Hooke.

ACCIAI DOLCI	210/220	GPa
GHISE	170/190	GPa
CLS	20/40	GPa
LATERIZI	15/30	GPa



Nelle leghe metalliche il modulo elastico può variare anche se di poco, per esempio nelle leghe alluminio-litio, questo agisce modificando l'energia di legame e quindi E anche se di poco. Modificare il modulo elastico è molto difficile perché proprietà intrinseca, la porosità però permette di ridurre il modulo elastico di un materiale.

Il modulo elastico descrive numericamente la rigidità (di un materiale sollecitato in un campo elastico) E deformazione macroscopica meccanica può essere valutata anche a livello atomico

$$R_o = f(E_o) \rightarrow R_o / \delta_o = E \quad R_o = \text{rigidità del legame} \quad E_o = \text{en. di legame} \quad \delta_o = \text{distanza interatomica di legame}$$

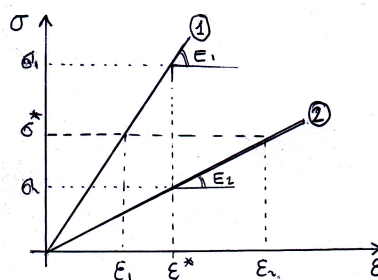
equivalenza provata grazie al diamante ed alla sua geometria precisa.

E viene definito a temperatura ambiente ed è costante per metalli e ceramici, fino a temperatura di fusione cioè non viene sostanzialmente alterato.

L'E delle materie plastiche dovrebbe essere deformazione apparente perché è in tutti i casi f(T) ecco che devo fare attenzione in fase di progetto perché E per i polimeri può variare anche di ordini di grandezza.

ACCIAIO	190/200 GPa	DIAMANTE	1000 GPa	MELAMMINICHE	6,7 GPa
LEGHE AL	69/79 GPa	SiC	450 GPa	PVC	0,003-0,09 GPa
TUNGSTENO	100 GPa				

*E<sub>s</sub>*:            MAT. 1                                    MAT. 2  
                   E<sub>1</sub>                                    >            E<sub>2</sub>  
                   + rigido                                    - rigido



## LE PROVE MECCANICHE

Vengono eseguite per disegnare la curva caratteristica del materiale  $\sigma, \epsilon$  e darne una descrizione sperimentale (normativa).

Le prove sono:

-**STATICHE**: meccaniche, nel corso delle quali lo stress viene applicato in modo progressivo al materiale sino a farlo pervenire a rottura e sono a TRAZIONE a COMPRESSIONE a FLESSIONE, di DUREZZA (unica che non porta alla rottura del materiale)

-**DINAMICHE**: carico impulsivo che provoca la rottura, sollecitazione improvvisa e di alto profilo energetico tale da spezzare istantaneamente il materiale → prova d'urto o resilienza

-**A FATICA**: 80-85% della causa di rottura strutturale, di essa soffrono molto i metalli. Il materiale dopo essere sottoposto a cicli di carico e scarico (inversioni continui del segno di stress), vede ridurre le progressivamente le sue capacità prestazionali e dopo un numero di cicli, di pervenire la rottura, seppur sollecitato da stress di progetto.

### PROVE A TRAZIONE

E' la più comune, essa viene eseguita sottoponendo il provino (a forma di osso di cane di diverse dimensioni a seconda del materiale -acciaio, alluminio, polietilene- con le estremità di dimensioni maggiori in quanto non si deve mai arrivare alla rottura delle zone afferrate, ma solo nel tratto utile) a trazione monoassiale, a velocità di deformazione costante (ciò influenzerà in modo significativo alcuni punti della curva) fino alla rottura.

Le attuali macchine di prova (composte da traversa mobile, cella di carico, morse, estensimetro o sensore per piccole deformazioni elastiche) a trazione consentono di registrare l'allungamento progressivo del provino in funzione della forza applicata: la traversa varia la propria altezza con delle viti la cui velocità di rotazione deve essere costante nel tempo →  $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt = \text{cost}$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \epsilon = \frac{\Delta l}{l_{iniz}}$$

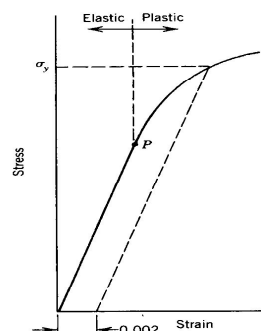
La prova è eseguita generalmente su materiali duttili ed elastoplastici, tuttavia sono registrabili 3 comportamenti:

**FRAGILE** ⇒ (materiali scendenti a trazione ma non a compressione -Teoria di Griffith) Il materiale presenta deformazione minima e la rottura avviene quando le deformazioni sono ancora elastiche, reversibili: CLS, vetro, ghisa, ceramiche ed alcuni materiali plastici;

**DUTTILE** ⇒ una deformazione plastica permanente segue quella elastica (leghe metalliche, resine termoplastiche);

**ELASTICO NON LINEARE** ⇒ la definizione elastica non è proporzionale allo sforzo che la provoca (elastomeri);

superiore a quello elastico, è una sollecitazione che produce già una piccola deformazione plastica. Lo calcolo applicando uno sforzo e poi riporto il provino a deformazione nulla, cioè a riposo, in tal modo il provino restituirà la deformazione elastica con un ritorno elastico ma manterrà le deformazione plastiche, cioè tornerà a  $\sigma=0$  con una retta di uguale coefficiente angolare a quella della deformazione elastica (Hooke) e non con una retta orizzontale che avrei se la deformazione fosse interamente plastica. Il  $\sigma_{0,2}$  si sceglie in modo che la deformazione plastica residua sia  $\epsilon=0,002$   $\epsilon\%= 0,2$ . Può però capitare che venga scelto  $\sigma_{0,1}$  come limite elastico convenzionale  $\rightarrow \epsilon_{plas} = 0,001$

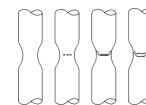


(4) **RESISTENZA A ROTTURA ( $\sigma_r$ ) o A TRAZIONE ( $\sigma_t$ )** si definisce lo sforzo massimo sopportato dal provino prima di rompersi nel corso della prova. Il valore di  $\sigma$  alla rottura non ha reale significato fisico

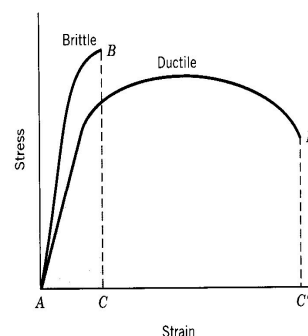
(5) **DEFORMAZIONE A ROTTURA o DI ALLUNGAMENTO PERCENTUALE DI ROTTURA  $\epsilon_r$**  corrisponde alla deformazione plastica a rottura del provino. Dopo  $\sigma_r$  il tratto è soggetto ad una def. localizzata in una zona detta di STRIZIONE, la curva è discendente in quanto la sezione in questa zona diminuisce dunque la deformazione tende ad aumentare la velocità ma volendo una velocità di deformazione costante dunque lo sforzo deve calare. Tale parametro qualifica la duttilità del materiale.

(6) **STRIZIONE C** è la variazione della sezione del provino nella zona dove si manifesta la rottura (tratto utile).

NON è graficamente rilevabile ma è espressa nella formula con  $C=(S-S_r)/S$  100 co  $S_r$  = la sezione minima che il provino realizza al momento della rottura; la strizione fornisce un' indicazione della duttilità del materiale.

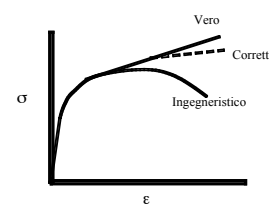


(7) **AREA SOTTESA** dalla curva: quantifica l'energia immagazzinata dal provino per pervenire a rottura, di questa ne verrà restituita dopo la rottura l'energia elastica sottesa dalla retta (in realtà neanche tutta). L'area legata al parametro 'TENACITÀ', in realtà l'energia che il provino accumula per pervenire a rottura viene valutata specificatamente con la prova d'urto o di RESILIENZA, ma può anche essere ricavata in questo modo. Tenacità è sinonimo di affidabilità: un materiale che assorbe molta energia per rompersi è in genere più affidabile di una che ne richiede meno.



**ACCORGIMENTI** Un materiale duttile è molto più tenace di uno fragile ma non c'entra niente questo con la resistenza: noto infatti che il fragile (ceramica) ha un  $\sigma_r >$  rispetto al materiale duttile. Per avere una buona tenacità devo abbinare una buona duttilità e una buona resistenza.

Esistono anche curve dette SFORZO VERO-DEFORMAZIONE VERA che sono meno utilizzate, ma che tengono conto del fatto che  $\sigma=F/A$  e non come nel nostro caso  $\sigma=F/A_0$  e  $\epsilon=\Delta l/l$  e non  $\epsilon=\Delta l/l_0$ . In realtà A ed l non sono costanti ma l cresce e A diminuisce, quindi si può dalle curve classiche con piccoli accorgimenti ricavare curve nuove.



compressione, pertanto nel provino fragile, la frattura partirà dalla parte inferiore (tesa) e sarà verso l'alto per portare alla decoesione del materiale. Ricaverò così  $\sigma_f$

## SCLEROMETRIA



Prova di durezza per materiali in opera. La **durezza** è la proprietà che quantifica l'attitudine di un materiale a farsi incidere o penetrare da un altro materiale.

Serve per verificare le caratteristiche nella vita in esercizio per vedere se c'è degrado. È l'unica prova statica meccanica che non porta a rottura il provino, prova non distruttiva (NDE - No Destructive Evaluation). Fornisce cioè in situ, anche di strutture in esercizio, informazioni proporzionali alla resistenza a rottura dei materiali non

metallici e rappresenta la resistenza del materiale a farsi incidere, scalfire. Riguarda dunque la superficie del materiale ma se la superficie non è differente dal volume, questa informazione può essere presa come indicativa dell'intero materiale.

$$H = (\text{hardness}) = \text{grado di durezza} = f \left( \frac{\text{forza di pressione applicata}}{\text{superficie dell'impronta}} \right)$$

4 tipi di prova di durezza:

HV (Vickers) HK (Knoop) → PUNTA PIRAMIDALE IN DIAMANTE (microindentazione per ceramici)

HB (Brinell) HR (Rockwell) → IDENTATORI SFERICI o IN ACCIAIO MOLTO DURO o IN CARBURO DI TUNGSTENO (per metallo duro)

Per usare l'apparecchio si preme il suo percussore sulla superficie da provare che deve essere sufficientemente levigata (poliata) fino al suo arresto. In questo modo la massa contenuta nell'apparecchio viene caricata, per mezzo di una molla, di una quantità fissa di energia.

Si libera quindi la massa, la quale urta contro il percussore ancora in contatto con la superficie in esame e rimbalza. L'entità del rimbalzo è misurata da una scala graduata.

L'apparecchio è tarato in modo da ricavare un'indicazione della durezza della superficie dell'entità dell'indice della scala graduata. In questo modo si può risalire alla resistenza a compressione del materiale.

## PROVA DI TRAZIONE PER MATERIALI POLIMERICI

Nei materiali polimerici il provino è più corto perché la deformazione è molto elevata. Il loro comportamento in duttilità è molto diverso perché alla base c'è un meccanismo molto diverso da quello metallico. Nei polimeri

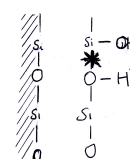


## IL COMPORTAMENTO DEI MATERIALI FRAGILI - LA TEORIA DI GRIFFITH

Griffith parte da un'osservazione, cioè mediante calcoli teorici, basati sulle forze di legame risultava che i materiali avrebbero dovuto avere resistenze nettamente superiori a quelle che si riscontrano praticamente. Nel 1930 Griffith risolve questa contraddizione studiando il comportamento della fibra di vetro (ceramica): sotto sollecitazione di trazione era infatti più semplice studiare materiali fragili dato che questi si deformano in modo puramente elastico sino a rottura.

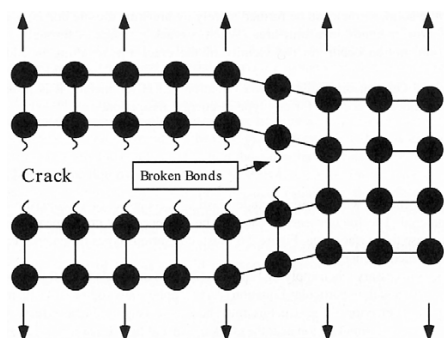
Griffith notò che se le fibre di vetro erano appena prodotte i valori di resistenza erano molto simili a quelli teorici, se invece le fibre non erano fresche di produzione, i valori di resistenza scendevano, diventando prossimi a quelli reali. Questo perché con l'invecchiamento le fibre possono subire danneggiamenti superficiali (cioè indebolimenti dovuti a cambiamenti di forma).

*Es.* la presenza di vapore acqueo portava nel vetro all'apertura di alcuni legami Si-O ed alla crescita di un difetto superficiale → Intaglio (assieme a fori e pori provoca un indebolimento particolarmente critico)



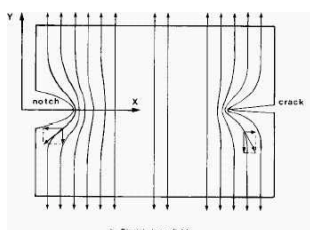
### Teoria del difetto di Griffith

Difetti microscopici ( $\mu\text{m}$  o  $10^{-6}$  m) che producono lo scollamento tra resistenza teorica e reale (NO difetti atomici  $\eta\text{m}$  o  $10^{-9}$  m ma macroscopici: incisioni, fori, fessure..)



Prendo un materiale qualsiasi che per qualche motivo, una serie di atomi hanno una discontinuità (assenza) di legami verticali. Alla trazione tutti gli atomi reagiscono allungando la lunghezza di legame, tra i 2 atomi nella zona di intaglio c'è però interruzione di legame, tuttavia a loro perviene una sollecitazione a cui in qualche modo devono reagire, non potendo reagire lungo z perché in tale direzione il legame è già sollecitato, l'unico modo è passare il surplus all'atomo accanto, il quale se anche lui non è più legato

all'atomo di sotto passare il suo surplus è quello ricevuto all'atomo accanto; si crea una catena che si va così a scaricare al primo atomo con il legame corretto: finalmente qui gli atomi potranno reagire variando la distanza di legame, scaricando tutta l'energia cumulata di tutta la catena difettuaria. La stessa catena si va formando tra gli atomi di sotto alla zona di intaglio, la sollecitazione cresce di atomo in atomo e viene trasmessa quando arriva al primo atomo con un legame lungo z. Ho quindi in tale zona la concentrazione di tutte le sollecitazioni, che non sarà dunque  $\sigma$  ma  $\sigma_y \gg \sigma$  in funzione della distanza dal vertice della micro-fessura.



Le isostatiche (pensate come linee lungo le quali le forze passano da un atomo all'altro internamente al materiale soggetto alla sollecitazione) si infittiscono facendo aumentare la sollecitazione a valore prossimo alla resistenza teorica determinando, per conseguenza, la rottura a catena dei legami tra atomi in questa zona.



Supponendo di avere tre oggetti di uguale volume dello stesso materiale ( $E$  è uguale,  $2\gamma$  è uguale). L'unica cosa che cambia è  $a$ . Il primo si romperà sotto  $\sigma_c$  minori, mentre il secondo su  $\sigma_c$  maggiore. Griffith sposta cioè l'attenzione su ogni singolo componente, ci dice cioè che le proprietà di un oggetto non dipenderanno solo dal materiale di cui è fatto ma anche dai difetti fisici e specifici del componente, se ho 20 componenti di un stesso materiale, avrò 20 diverse proprietà meccaniche, dovrò quindi ricavare una distribuzione statistica e individuare un valore medio probabile.

Dopo Griffith intervengono Orowan ed Irwin, per estendere la teoria ai materiali duttili

$$\sigma_c = \left[ \frac{E(2\gamma + \gamma_p)}{\pi a} \right]^{1/2}$$

$\gamma_p$  è il lavoro che si deve compiere per deformare plasticamente ognuna delle due superfici di rottura cioè è l'energia che devo spendere per deformare plasticamente il materiale prima di romperlo. (caratteristiche del materiale).

FRAGILI  $2\gamma$  → parametro = TENACITÀ  $G_c$  (*toughness*)

DUTTILI  $2(\gamma + \gamma_p)$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{EG_{Ic}}{\pi a}}$$

La tenacità rappresenta l'energia necessaria per creare due nuove superfici unitarie: ovvero l'energia massima che può essere immagazzinata per pervenire a rottura. Nei materiali fragili è solo  $2\gamma$  perché non viene impiegata energia per le deformazioni plastiche.

$G_c$  = dipende dalla natura del materiale non dalla porzione dell'oggetto.

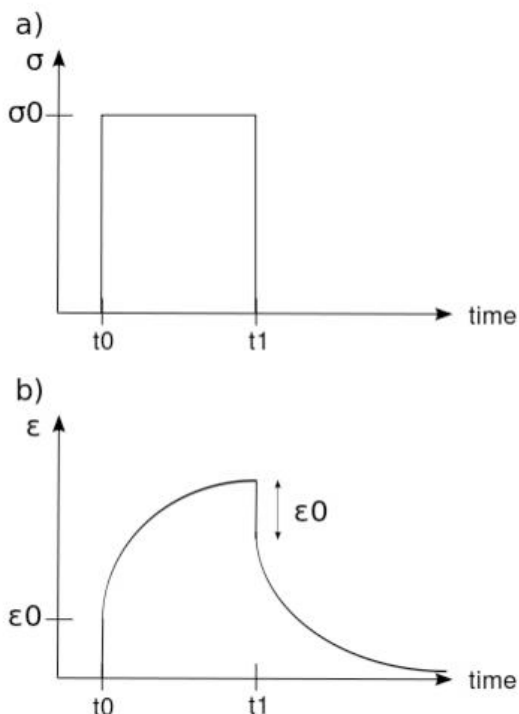
$a_c$  = dipende dal singolo componente

$K_{Ic} = (G_c E)^{1/2} = \sigma_c (\pi a_c)^{1/2}$  fattore di critico di concentrazione o TENACITÀ A FRATTURA [ $MPa \sqrt{m}$ ] (*fractur toughness*) è una caratteristica intrinseca del materiale e mette in relazione la sollecitazione critica con la taglia del difetto critico. Definisce la sensibilità del materiale alla presenza del difetto. Maggiore  $K_{Ic}$  indica minore sensibilità al difetto, ovvero a parità di  $\sigma$  applicata vede una maggiore taglia di difetto per essere critico. Questo parametro meccanico è in funzione della tenacità  $G_c$  e del modulo elastico  $E$ .

*Es. Una lastra in acciaio 4340 presenta  $\sigma_e = 1515 \text{ KPa}$  e  $K_{Ic} = 60,4 \text{ MPa (m)}^{1/2}$ . Qual è la dimensione del difetto critico sotto una  $\sigma$  pari a metà del limite elastico?*

$$\sigma_c = \sigma_E / 2 \quad a_c = a / \sigma = \sigma_c \quad K_{Ic} = \sigma_c (\pi a_c)^{1/2} \quad a_c = 1 / \pi (60,4) / (1515 / 2) = 0,002 \text{ m} = 2 \text{ mm}$$

## VISCOELASTICITÀ



La risposta meccanica a una materiale è in funzione del tempo e della temperatura, finora non si è tenuto conto del tempo ma taluni materiali subiscono quando vengono sollecitati istantaneamente nel campo elastico, una deformazione istantanea seguita da una deformazione differita viscoelastica. Un materiale è detto **viscoelastico** quando la sua risposta a uno sforzo meccanico costante varia nel tempo, quando lo sforzo viene rimosso il materiale riassume le dimensioni iniziali.

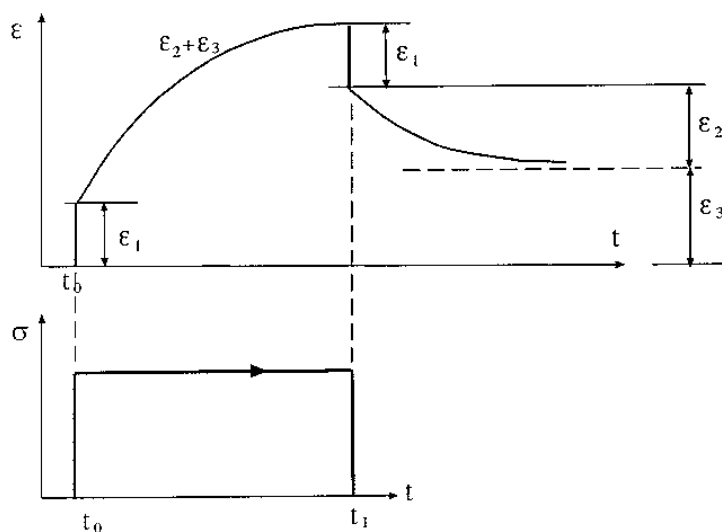
(andamento comune che mi aspetto per molti materiali deformazione istantanea recupero istantaneo di energia)

$$\epsilon_{el}^* = \sigma^* / E$$

Per molti polimeri nei quali lo srotolamento e l'allineamento delle catene avviene in modo viscoso l'andamento è così: tra  $0-t'$  la deformazione è stabile ma aumenta tra  $t$  e  $t_1$  la

deformazione è costante sotto un carico costante, cioè il materiale subisce una deformazione elastica istantanea respinta da una deformazione viscoelastica la quale richiede un certo  $t'$  per manifestarsi in modo completo, quando  $\sigma^*$  cessa ha un recupero istantaneo della deformazione elastica e torna a deformazione nulla con la restituzione della deformazione viscoelastica.

## VISCO PLASTICITÀ



Per taluni materiali accanto alla deformazione viscoelastica, in funzione del tempo di applicazione e del livello della sollecitazione, compare il fenomeno di **viscoplasticità**. In questo caso quando il provino è sottoposto ad uno sforzo istantaneo e tale sollecitazione è mantenuta per un tempo  $t_1$  il provino subisce una deformazione elastica istantanea  $\epsilon_{el}$  una deformazione viscoelastica  $\epsilon_{vel}$  ed una deformazione viscoplastica  $\epsilon_{vpl}$ .

## I MATERIALI DA COSTRUZIONE

### I LEGANTI

I leganti che noi considereremo di natura inorganica, sono dei collanti strutturali (i collanti tipo le *resine* sono inorganici e svolgono un ruolo simile), sostanzialmente ceramici e non metallici, in genere si presentano sotto forma di polvere finemente suddivisa vengono impastati con l'acqua a formare il plastico, deformabile, che nel tempo rapprende ed indurisce, perde la propria elasticità e sviluppa proprietà meccaniche attraverso reazioni semplici o complesse che possono protrarsi anche per lungo tempo.

Dunque sono collanti strutturali in grado di unire elementi dispersi per dar vita a componenti di struttura monolitica (→ è un continuo di materia dal punto di vista della ripartizione della sollecitazione che il materiale subisce).

Si dividono in:

**LEGANTI AEREI:** una volta impastati con l'acqua sono in grado di rapprendere e perdere la loro plasticità (presa) e di indurire solo se esposti continuamente all'aria. (gesso e calce)

**IDRAULICI** che dopo l'impasto fanno presa e induriscono mantenendo le loro proprietà meccaniche anche se completati immersi in acqua. (cementi e calci idrauliche)

Dunque i leganti vanno incontro a 2 fasi che rappresentano lo stesso procedimento ovvero lo sviluppo delle proprietà meccaniche che avviene in seguito a reazioni tra polvere del legame e acqua oppure tra polvere e altro reattivo ma sempre promosse dall'acqua pertanto il fenomeno è lo stesso diviso in 2 fasi:

- **PRESA**, la fase iniziale, nella quale ottengo dall'impasto il plastico modellabile che in un breve lasso di tempo perde la deformabilità cioè perdere scorrevolezza e fluidità; le reazioni cominciano nel momento in cui si produce l'impasto, e la presa porta a rapprendere il materiale.
- la stessa reazione procede portando all'**INDURIMENTO** cioè al rapprendimento e allo sviluppo della potenza meccanica del materiale (mesi o anni per completarsi).

Con il termine **pasta** si intende la miscela di polvere legante/acqua che è la fase reagente essenziale alle reazioni chimiche di presa e indurimento.

L'impasto può essere più o meno fluido e lavorabile in funzione della caratteristica della polvere e del rapporto acqua/legante ( $H_2O/L$ ); esso determina: scorrevolezza e fluidità, caratteristiche meccaniche e durabilità, tempi di presa e indurimento; dipende da: rapporti stechiometrici ed eventuale evaporazione.

La miscela legante+acqua+sabbia è detta **malta** (pasta+sabbia composta da aggregato fine <5 mm)

Infine la miscela legante+acqua+sabbia+ghiaia è chiamata **calcestruzzo** (i vantaggi sono la stabilità dimensionale dell'opera, la maggior resistenza meccanica, durabilità, riduzione costi). La ghiaia non è proprio aggregato inerte perché crea interfaccia tra aggregato e la malta; esistono in oltre aggregati reattivi e pericolosi per l'integrità della struttura.

**M**      $L+H_2O + A_{\text{Fine}} (<5 \text{ mm})$                       **CLS**      $L+H_2O + A_{\text{Fine}} + A_G$      A=aggregato     L=legante

emidrato  $\Rightarrow 1,5$  moli  $H_2O$ )  $\rightarrow$  l'ANIDRITE è la scagliola che ha perso anche la  $1/2$  molecola di acqua ( $CaSO_4 \rightarrow$  solfato di Calcio). La quantità di acqua necessaria all'idratazione (presa+indurimento) del legante gesso (scagliola) è teoricamente del 20-25% in peso, ma la reazione è fortemente esotermica dunque l'acqua può evaporare (e con tale percentuale parte della scagliola non verrebbe idratata) Dunque la % di acqua impiegata negli impasti è più elevata e può variare dal 30 al 100 % in peso del legante.

$$a/g \text{ (teorico)} = 0,2 \div 0,2 \qquad a/g \text{ (reale)} = 0,3 \div 1$$

L'acqua in eccesso rende più lavorabile l'impasto, alla fine dell'indurimento una parte dell'acqua è combinata per dare il solfato di calcio biidrato (necessaria a reazione chimica), una parte è evaporata nel gesso indurito e una parte resta intrappolata all'interno del prodotto indurito (non può reagire e man mano che l'intonacatura asciuga crea porosità evaporando).

Ecco perché le proprietà del gesso non sono mai di alto profilo.

$$\sigma_t = 1,5 - 3 \text{ MPa} \qquad \sigma_c = 2,7 - 7 \text{ MPa} \quad (2,7 \rightarrow a/g = 1 \quad 7 \rightarrow a/g = 0,3)$$

Passando da 1 a 0,3 perdo in lavorabilità e devo stare molto attento alla messa in opera però miglio le proprietà.

Il gesso è anche un discreto isolante termico; la reazione di disidratazione del gesso indotta da un incendio è  $CaSO_4 \cdot 2H_2O \Rightarrow CaSO_4 + 2H_2O$  è endotermica, cioè assorbe calore e durante il suo manifestarsi si libera acqua (di cristallizzazione) in quantità di circa il 21% rispetto al peso del gesso (asciutto il gesso si trasforma in scagliola) che viene sbriciolato e ritarda la propagazione: il materiale quindi perde le proprietà leganti ma allo stesso tempo ritarda l'incendio perché consuma energia termica di combustione per alimentare la decomposizione termica. L'insieme di questi fattori fanno del gesso un ottimo materiale per la protezione anti-incendio.

**CORRETTA PROGETTAZIONE MISCELA**  $\rightarrow$  minimizzare il rapporto  $a/g$ .

Le operazioni di impasto messa in opera e finitura devono essere compatibili con i tempi rapidi di presa del gesso.

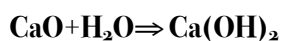
Il gesso può essere messo in opera direttamente sotto forma di pasta ( $L+H_2O$ ) cioè anche senza aggregato (che serve principalmente a fornire struttura rigida che contrasta il ritiro); proprio per la sua caratteristica di espansività dunque va molto bene per rattoppi ed elementi di fissaggio.

Il gesso sotto forma di pasta di malta viene usato per intonaci che si dividono in stesi a mano e lisciati o stesi con proiezione meccanica e lisciati.

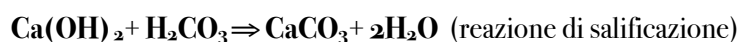
In gesso vengono anche realizzati blocchi prefabbricati per tramezzi e pareti divisorie (leggeri) normalmente con 3 blocchi si costruisce un metro quadrato di superficie.

Essi possono essere pieni o alveolati (cioè con fori passanti per reti di distribuzione elettrica, idrica, di servizio); hanno spessore variabile tra 4 e 15 cm ed i loro bordi sono sagomati per favorirne l'assemblaggio.

a penetrare all'interno del legame e quindi a carbonatarlo completamente. Ecco perché è un legame aereo, perché solo qui trova CO<sub>2</sub> in abbondanza. Il ruolo dell'H<sub>2</sub>O oltre a rendere lavorabile l'impasto è quello di veicolare la CO<sub>2</sub> verso l'idrossido di calcio:



L'anidride carbonica CO<sub>2</sub> in ambiente acquoso forma acido carbonico CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O⇒H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> e la reazione avviene solo in superficie: grazie all'acqua però l'acido carbonico si sposta verso il cuore del manufatto in tempi lunghi, ci vogliono anche anni perché si completi la **carbonatazione** ma progressivamente l'acqua tende ad evaporare se esposta all'esterno, dunque ancora adesso ci sono manufatti romani in calce con calce in profondità non ancora carbonata (ecco perché si parla di profondità di carbonatazione).



La qualità della calce viene valutata in base alla purezza del calcare da cui si è prodotta la calce, tanto più il materiale è ricco di carbonato di calcio, tanto più darà produttivo. **La resa in grassello** è un parametro che ne misura la bontà ed è espressa in m<sup>3</sup>/ton come rapporto tra volume max del grassello in fase di spegnimento (quando colgo la fessurazione della superficie) e la massa della calce che lo ha originato, in base ad esso le calci si distinguono in:

MAGRE (1,5 < R < 2,5)

GRASSE (R > 2,5)

Le prime idratano più lentamente delle seconde, le quali derivano da calcari più puri ed in esse il tenore in CaO è ≥ 9,5%; mentre per le calci magre che derivano da calcari impuri il tenore va da 82 a 95%.

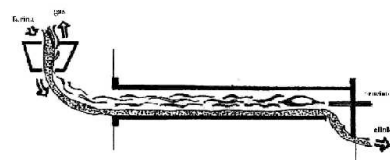
La calce idrata in polvere si può ancora distinguere in fiore di calce, con un contenuto di idrossido di calcio e magnesio >91%, e calce idrata spenta da costruzione nella quale questo contenuto deve comunque essere superiore al 82%.

Non esistono norme concernenti le prestazioni meccaniche della calce aerea, tutti i tipi di calce devono comunque rispondere bene alla prova di stabilità di volume che permette di valutare se la calce è stata spenta correttamente, si prepara una malta di buona plasticità con la calce che viene distesa su lastra di vetro in ambiente ben aerato per fare presa e poi esposta per sei ore a vapore acqueo. Non devono comparire fessurazioni, distorsioni o rigonfiamenti che sarebbero indice della presenza di ossido di calcio stracotto e non idratato.

Dato che l'indurimento della calce idrata avviene con contrazione di volume, essa non viene impiegata sotto forma di pasta ma sempre sotto forma di malta, al fine di evitare il ritiro ed il conseguente verificarsi di fessurazioni. L'aggregato stabilisce dei punti di stabilità distribuiti all'interno del legante formando uno scheletro continuo: riducendo il quantitativo di legante necessario ne riduce anche l'effetto del ritiro del materiale composto.

1 VOLUME DI GRASSELLO (15 Kg.) → 2-3 VOLUMI DI SABBIA (100 Kg.)

2. La loro COTTURA a circa 1450° C (in forno tubolare orizzontale, cuoce e gira per mescolare i componenti derivanti da decomposizione di argille e calcari);



3. RAFFREDDAMENTO del prodotto (**clinker**), sua MACINAZIONE con una percentuale di GESSO o ANIDRIDE (4/8%) che funge da regolatore di presa, cioè ritarda il tempo di presa ottenendo il portland.

Se macino il CLINKER con POZZOLANA o LOPPA D'ALTO FORNO dò luogo a **cementi pozzolanici e d'altoforno**.

Nel forno avvengono reazioni che portano alla formazione dei costituenti del clinker:

SILICATO TRICALCICO ( $3CaO \cdot SiO_2$  - *ossido di calcio - silice*)

SILICATO BICALCICO ( $2CaO \cdot SiO_2$ )

ALLUMINATO TRICALCICO ( $3CaO \cdot Al_2O_3$  - *allumina*)

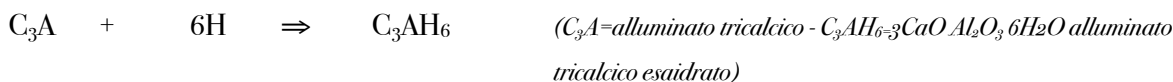
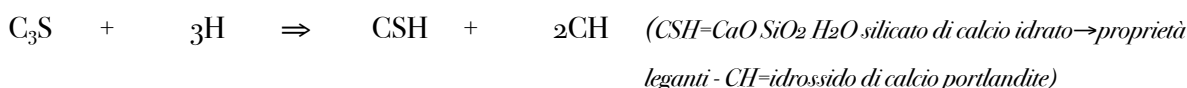
FERRO ALLUMINATO TETRACALCICO ( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$  - *tre ossidi ceramici diversi*)

La simbologia adottata nella chimica del cemento per la quale  $CaO=C$        $Al_2O_3=A$        $Fe_2O_3=F$   
 $SiO_2=S$        $Ca(OH)_2=CH$  (*portlandite*)       $H_2O=H$

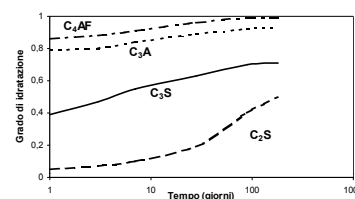
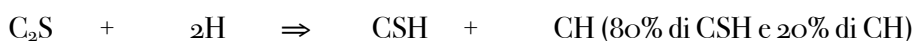
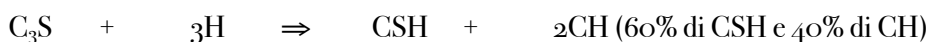
consente di scrivere le formule precedenti come:  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ , tale simbologia sarà utilizzata nel seguito.

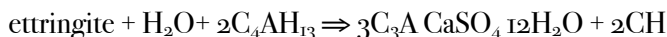
I due silicati di calcio costituiscono il 75-85% della massa del clinker e sono quelli che conferiscono le proprietà meccaniche al cemento indurito: da microscopio si può constatare ciò.

Le reazioni di idratazione dei due silicati di calcio possono essere così espresse:



Le reazioni di idratazione dei due silicati di calcio possono essere così espresse:





$3\text{C}_3\text{A CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  = monosolfato alluminato

CSH - CH -  $\text{C}_3\text{AH}_6$  -  $\text{C}_4\text{AH}_3$  - ettringite primaria - monosolfato

Guardo ora LA PORTLANDITE  $\text{C}_3\text{S}/\text{C}_2\text{S} + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{CSH} + \text{CH}$

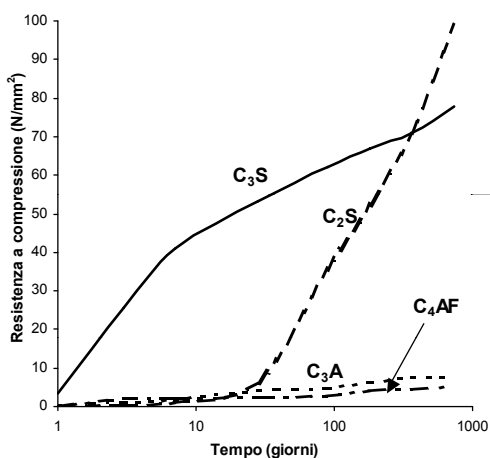
Noto che la pozzolana ( $\text{SiO}_2$ ) contiene sostanzialmente solo S pertanto per dare CSH

necessita CaO e H mentre la loppa d'altoforno ( $\text{CaO}, \text{SiO}_2$ ) contiene già S+C che sono due componenti per la tobernite, mi servirà cioè solo H.

Ecco perché la PORTLANDITE gioca un ruolo fondamentale nell'attivazione delle caratteristiche idrauliche latenti della loppa d'altoforno e delle caratteristiche pozzolaniche della pozzolana.

LOPPA + ACQUA → NON CAPITA NULLA! L' idraulicità è latente perché deve essere attivata, la portlandite funge da catalizzatore creando ambiente basico e cementando la reazione (da tabella vedo che mi basta un 5% di portland perché la portlandite funge da catalizzatore e basta)

LA PORTLANDITE PER LA POZZOLANA E' UN VERO E PROPRIO REAGENTE (comportamento molto differente)



In entrambi i casi si forma del CSH secondario, in un secondo momento che porta ad una conseguente formazione di un n° di fibrille di cristalli aciculari in più (maggiore resistenza e minore porosità).

Andando ad osservare l'andamento delle resistenze meccaniche dei costituenti del clinker in funzione del tempo osservo che:

le  $\text{C}_3\text{S}$  interviene nei primi periodi idratandosi rapidamente (ecco perché non posso usare solo cementi di  $\text{C}_2\text{S}$ ) Dopo un anno però il contributo al cemento per le resistenze meccaniche del

$\text{C}_2\text{S}$  sarà maggiore di quello del  $\text{C}_3\text{S}$  (ricordo 80% del CHS). Gli alluminati  $\text{C}_3\text{A}$  e  $\text{C}_4\text{AF}$  danno problemi quali la presa rapida e lo sviluppo di calore (CALORE DI IDRATAZIONE) inoltre sono aggredibili dai solfati che danno vita alla dannosissima ettringite secondaria, allora perché ci devono essere? fattore economico → abbassano la temperatura di cottura del cemento.

CALORE DI IDRATAZIONE (varia in funzione dei costituenti del clinker) → quantità di calore della reazione cemento/acqua

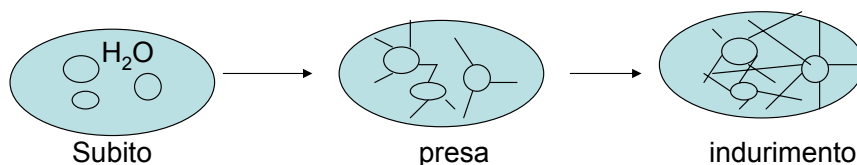


100 Kg → occupano un volume di 31,75 l

$31,75 \times 2,14$  → volume prodotti idrati

$31,75 \times 2,14 \times 0,28$  → H<sub>2</sub>O fisicamente adsorbita = 19 l/100 Kg.

H<sub>2</sub>O totale necessaria = 42 l ogni 100 Kg. a/c = 0,42



In generale verrà impiegata più acqua (per lavorabilità) che evaporerà nel tempo lasciando porosità negative per durabilità e proprietà meccaniche.

Introducendo il parametro GRADO DI IDRATAZIONE  $\alpha$  possiamo dire che il volume iniziale ( $\alpha=0$ ) della miscela, avendo impostato 100 Kg. di cemento e 42 l di acqua è:  $31,75 + 42 = 73,75$  l, mentre ad idratazione completata il volume dei prodotti idratati è  $31,75 \times 2,14 = 67,90$  l. Si ha quindi una contrazione 5,85 l su 73,75 l (7,9%) → ritiro che si manifesta con la formazione di pori.

I pori sono diversi per dimensione e si distinguono in PORI DEL GELO TOBERMORITICO racchiusi all'interno dei cristalli del cemento che non sono pericolosi per le proprietà meccaniche, nè per la durabilità perché hanno dimensioni troppo piccole di pochi nanometri; PORI CAPILLARI che rappresentano lo spazio non riempito dai solidi e le cui dimensioni si situano tra 0,02 a 5 micrometri la cui presenza è determinante sia per il comportamento meccanico sia per la permeabilità.

Il volume dei pori capillari, espresso in litri per 100 Kg di cemento, può essere ricavato dalla seguente equazione:  $V_c = 100 a/c - 36,5 \alpha$  dalla quale risulta evidente la proporzionalità tra acqua (più ce n'è, più i grani saranno lontani) e pori capillari.

Quindi se si desidera uno MOLTO IMPERMEABILE questa deve essere confezionata con un BASSO RAPPORTO a/c e completamente idratata. La condizione di impermeabilità dell'acqua si raggiunge in termini tanto maggiori quanto più elevato è il rapporto a/c.

Se il volume dei pori è elevato, è assai probabile che questi siano interconnessi e che emergono alla superficie del campione di pasta: in questo caso esso è non solo poroso ma anche permeabile pertanto gli agenti aggressivi non l'attaccano solo in superficie ma anche in profondità dato che possono permearlo. La porosità ha inoltre un effetto negativo sulle proprietà meccaniche della pasta indurita. I pori sono difetti interni sede di

L'acqua di impasto deve così sottostare a requisiti di accettabilità (un eccesso di acqua provoca scarsa resistenza meccaniche e durabilità del calcestruzzo): tutte le acque potabili sono idonee al confezionamento dei calcestruzzi.

La maggior parte delle acque naturali (anche salate) possono essere usate tranquillamente per cls non armati, mentre ESTREMA PRUDENZA ed un controllo più rigoroso RICHIEDE L'ACQUA DI SCARICO INDUSTRIALE, L'ACQUA NATURALE INQUINATA DA SCARICHI INDUSTRIALI.

Le sostanze che si trovano IN SOSPENSIONE, i sali disciolti (carbonati, bicarbonati, solfati, cloruri di calcio, magnesio e sodio) intervengono nella presa del cemento e nella reologia del conglomerato. Inoltre, possono dare luogo ad efflorescenze sul getto indurito.

Le sostanze in sospensione sono di piccole dimensioni e NON SI SEDIMENTANO MA TENDONO AD ADERIRE ALLA SUPERFICIE DELLE PARTICELLE DI AGGREGATO ED AVENDO NATURA VISCOSA O LATTIGINOSA DI SCORRIMENTO CREANO UN'INTERFACCIA MENO ATTIVA TRA PASTA DI CEMENTO E AGGREGATO (matrice e collante), ed in tal modo lo stress che dovrebbe essere trasferito dalla matrice all'aggregato, che è molto più performante, tramite un gioco di interfacce, non avviene ciò per l'AZIONE LUBRIFICANTE delle sostanze in sospensione che possono essere costituite da argilla, residui d'origine vegetale, alghe, microorganismi e non dovrebbero superare i 5 g/l per il cls e i 2 g/l per il c.a. (cls armato) e per il c.a.p. (cemento precompresso) in quanto interferiscono con il processo di indurimento del cemento, indeboliscono l'adesione tra aggregato e pasta di cemento e, per il c.a. e c.p. anche tra armatura (che deve assorbire gli sforzi di tensione) e pasta di cemento. Tra le sostanze disciolte meritano attenzione i carbonati e bicarbonati, i solfati, i cloruri e le sostanze organiche.

I **solfati** sono ritenuti agenti fortemente aggressivi QUANDO CONTENUTI IN ACQUE CHE POSSONO BAGNARE IL CLS GIA' INDURITO (ettringite secondaria) tuttavia il ruolo dei solfati (lim 2000 mg/l) nel cls fresco non deve suscitare eccessiva preoccupazione, essi sono importanti come ritardatori di presa (ettringite primaria), ma non devo esagerare per evitare il fenomeno della falsa presa: usando come acqua di impasto con rapporto a/c=0,5 dell'acqua di mare (pericoloso per i cloruri) che contiene 5 g/l di solfati si aumenta di circa lo 0,25% il tenore di solfati nell'impasto, non causando quindi nessuna conseguenza apprezzabile sulle caratteristiche dell'impasto.

Per quanto riguarda il pH, in genere le acque naturali hanno difficilmente  $\text{pH} < 6$  e quindi sono utilizzabili, un'acidità eccessiva è indice di probabile inquinamento da parte di scarichi industriali o  $\text{CO}_2$ . E' consigliabile dunque tenere il  $\text{pH} > 4$  per i cls ove la portlandite vede nell'acido una possibilità di salificazione (conseguenze su presa e indurimento) e  $> 4,5$  nel caso di strutture armate ove un abbassamento del pH è anche condizione favorevole al l'innescio di fenomeni di corrosione dell'armatura.

I **cloruri** sono particolarmente dannosi nella confezione dei cls armati ed in particolare dei precompressi in quanto promuovono la corrosione dell'armatura. I limiti del cloruro scendono infatti drasticamente da 20000

3. permette di ridurre la quantità di legante (cemento) da utilizzare, portando ad una RIDUZIONE DEI COSTI E DEL CALORE DI IDRATAZIONE (Il cemento è il costituente più caro perché è un prodotto di sintesi, l'aggregato di per sé non sviluppa reazioni esotermiche ed è dunque più facile controllare il calore di idratazione del getto nei primi giorni)

Esistono alcuni REQUISITI FONDAMENTALI (criteri di idoneità e di accettazione) per gli aggregati in assenza dei quali il cls rischia di essere degradato.

Il contenuto limite dei CLORURI è pari allo 0,05% in peso ed è correlato al rischio di corrosione dell'armatura, per lo più gli aggregati inquinanti da cloruri sono identificabili con la SABBIA DI MARE. Questa può essere impiegata come frazione fine di un aggregato per il cls purché il sale idrosolubile (cloruro di sodio) sia rimosso attraverso un preventivo lavaggio in acqua potabile.

I SOLFATI possono essere presenti nell'aggregato sotto forma di gesso o di anidride (non si solubilizzano rapidamente ma lentamente e diventano pericolosi e cls indurito poiché promuovono la formazione di ettringite secondaria che è una delle cause di aggressione solfatica del cls indurito interno, cioè il SOLFATO E' CREATO DALL'INTERNO PER SOLUBILIZZAZIONE (diviene gassoso) e causare fessurazioni.

Gli aggregati inquinanti da gesso o da anidride non possono essere bonificati e devono essere scartati.

L'aggregato non deve essere sporco cioè non deve avere sali in superficie PERCHÉ' GIOCANO LO STESSO RUOLO DELLE SOSTANZE DISCIOLTE NELL'ACQUA.

La UNI 8520/2 normalizza la GELIVITA' dell'aggregato, ovvero la sensibilità ai cicli di gelo e disgelo dovuta alla porosità (porosità più critica  $\Phi$  3 - 5  $\mu$ m).

Un'altra caratteristica normata è la SILICE AMORFA che rappresenta la più insidiosa forma di degrado del cls in quanto reagisce con gli ioni alcalini sodio e potassio e da reazioni alcali-aggregati.

Altri requisiti che deve avere l'aggregato è la scarsa presenza DI MATERIALE ARGILLOSO che ha una CATTIVA ADESIONE la cui presenza si può rilevare facendo decantare un campione in acqua cosicché la porzione fine si deposita subito sopra la sabbia e viene così valutato L'EQUIVALENTE IN SABBIA

$$\frac{h_s}{h_f} 100 = \frac{h_s}{(h_s + h_a)} 100 \quad \text{con } h_s = \text{altezza sabbia, } h_s + h_a = \text{altezza torbido}$$

Anche la presenza di SOSTANZE ORGANICHE va controllata in quanto hanno un ruolo negativo nel RALLENTARE LA PRESA E LE CINETICHE la loro ricerca si fa battendo dell'aggregato in una soluzione acquosa di NaOH al 3% che scioglie le sostanze organiche, si fa SEDIMENTARE l'aggregato e si osserva la colorazione dell'acqua rimanente e l'accettabilità è stabilita da un controllo cromatico, deve essere più chiaro di un certo limite.

Altro requisito fondamentale è la DISTRIBUZIONE GRANULOMETRICA DELL'AGGREGATO infatti nel confezionamento del cls si cerca di PERVENIRE ALLA MASSIMA DENSITÀ' DEL CONGLOMERATO

A assume valori crescenti per lavorabilità crescenti e nel passaggio da aggregati alluvionali (tondeggianti) a aggregati di frantumazione (che creano più attrito).

	UMIDO	SEMI-FLUIDO	SUPERFLUIDO
ALLUVIONALE	8	10	12
FRANTUMATO	10	12	14

L'aumento di A comporta un aumento del contenuto di materiale fine.

## Gli Additivi

Acceleranti, ritardanti, fluidificanti, superfluidificanti, antigelo, disarmanti, impermeabilizzanti.

Gli acceleranti fanno aumentare il grado di idratazione del cemento alle brevi stagionature, in modo da ACCORCIARE I TEMPI DI PRESA (acceleranti di presa) o di INCREMENTARE LA RESISTENZA MECCANICA NEI PRIMI GIORNI (acceleranti di indurimento) SOPRATTUTTO PER GETTI IN CLIMI FREDDI (resistenza. suff. a resistere al gelo) O PER RAPIDI DISARMI.

L'aggiunta di un RITARDANTE ha come obiettivo di ritardare la presa del cemento al fine di MANTENERE PIU' A LUNGO LA SUA LAVORABILITÀ' (per climi caldi) bisogna però sottolineare che IL RITARDANTE DILATA ANCHE I TEMPI DI INDURIMENTO E CIO' COMPORTA BASSE RESISTENZE A BREVI STAGIONATURE anche se a tempi lunghi il recupero di resistenza è notevole.

IMPERMEABILIZZANTI O IDROFOBIZZANTI=sono dei prodotti idrorepellenti, a base di silano applicati di solito alla superficie per rendere idrorepellente il cls o altri materiali da costruzioni inorganici (mattoni, malte) e proteggerli così da agenti esterni aggressivi.

Gli stessi possono essere anche aggiunti anche nell'impasto per idrofobizzare il cemento in tutta la sua massa → trattamento molto utile per i cls esposti agli agenti aggressivi più pericolosi come I SALI DISGELANTI.

ANTIGELO=abbassano la temperatura di congelamento

DISARMANTI=sono additivi di superficie applicati alle casseforme che verranno a contatto con il cls fresco e che hanno la funzione di FACILITARE IL DISTACCO TRA CASSAFORMA E CLS INDURITO, sono costituiti da miscele di OLI MINERALI E VEGETALI insieme ad un TENSIOATTIVO che ha la funzione di produrre una pellicola continua sottile ed informe sulla cassaforma. La loro applicazione non uniforme può portare alla formazione di macchie, bolle e strappi sul calcestruzzo.

AGENTI STAGIONANTI E ANTIEVAPORANTI=sono applicati sulle superfici libere di cls esposte all'aria e sono costituiti da SOSTANZE QUALI CERE, RESINE, GOMMA, DISCIOLTE IN UN SOLVENTE MOLTO

**ABBASSAMENTO  
OMOGENEO**

**DISOMOGENEITA'=  
Cattiva qualità del cls,  
i componenti non sono  
omogeneamente distribuiti  
e quindi ho una potenziale  
segregazione del getto**

**SPROFONDAMENTO  
RAPIDO E LIBERO DEL CLS  
(accettabile solo in presenza di  
fluidificanti) in tal caso si forma  
sovente dell'acqua sporca ai  
confini (SEPARAZIONE DI  
BOIACCA) e ciò indica che  
il rapporto a/c è troppo elevato e  
l'acqua tende a separarsi**

Anche lavorabilità e consistenza non sono sinonimi, SI AMMETTE CHE LA LAVORABILITÀ' E LA CONSISTENZA DI UNA MASSA PIU' O MENO PLASTICA SONO IN RELAZIONE AI FINI PRATICI.

A tale scopo è stata elaborata tale tabella

CLASSE DI CONSISTENZA	SLUMP	APPLICAZIONI
S <sub>1</sub> (umida)	10-40	pavimenti con vibro-finiture
S <sub>2</sub> (plastica)	50-90	strutture circolari (silos)
S <sub>3</sub> (semifluida)	100-150	strutture non armate
S <sub>4</sub> (fluida)	160-210	strutture mediam.armate
S <sub>5</sub> (superfluida)	>210	strutture fortem.armate

IL CLS DEVE ESSERE TESTATO CON LA PROVA NON APPENA MISCELATO SENNO' INIZIANO I FENOMENI DI PRESA E LA LAVORABILITÀ' DIMINUISCE così anche se mantengo l'impasto in agitazione, rinnovo le interfacce cemento/acqua in continuo, favorendo le reazioni.

La lavorabilità del cls dipende da diversi fattori (contenuto d'acqua, rapporto a/c e aggregato/cemento, granulometria, forma e distribuzione dell'inerte, eventuali additivi) così riassunti in una tabella

Diametro massimo aggregato(mm)	Tenore d'acqua (l/m <sup>3</sup> di cls)					
	Lavorabilità del cls slump (cm)					
	2,5-5		7,5-10		15-17,5	
	tondeggiant	spigoloso	tondeggiant	spigoloso	tondeggiant	spigoloso
<b>2,5</b>	190	210	200	225	230	255
<b>19,0</b>	170	195	190	210	210	225
<b>38,1</b>	160	170	170	190	190	210
<b>50,8</b>	150	165	165	180	180	195

- con riduzione del tenore di acqua e del rapporto a/c (a pari quantità di cemento e lavorabilità) → in tal caso l'additivo usato viene detto HRWR super-riduttore d'acqua

	CLS INIZIALE		+SUPERFLUIDIFICANTE	
CEMENTO	305	Kg/m <sup>3</sup>	305	Kg/m <sup>3</sup>
ACQUA	168	Kg/m <sup>3</sup>	134	Kg/m <sup>3</sup>
AGG.FINE	820	Kg/m <sup>3</sup>	860	Kg/m <sup>3</sup>
AGG.GROSSO	1010	Kg/m <sup>3</sup>	1060	Kg/m <sup>3</sup>
<b>SLUMP</b>	12	cm	12	cm
a/c	0,55		0,44	
<b>Rck</b>	35	MPa	45	MPa

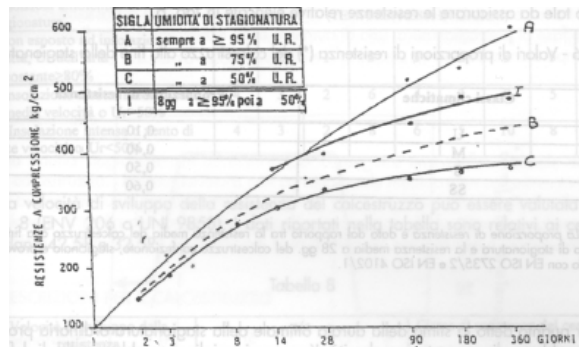
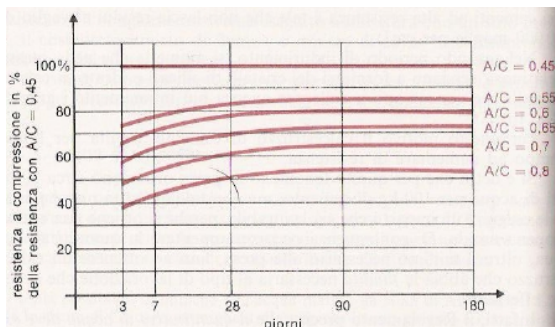
Il vantaggio è che posso ridurre l'acqua del 20-30%, riduzione rapporto a/c → minor a uguale lavorabilità minore porosità e permeabilità → maggiore resistenza e durabilità

- con riduzione del tenore d'acqua e di cemento (a pari rapporto a/c e lavorabilità) → suppongo cls superfluido ma resistente durevole ed impermeabile perché si è adottato un basso rapporto a/c (cioè con alto dosaggio di cemento) → tanta acqua comporta poco aggregato e basso rapporto a/c (tendenza a elevato ritiro idrometrico, inoltre il tanto cemento libero tanto calore di idratazione e c'è il rischio di fessurazioni. L'aggiunta del superfluidificante ha il ruolo di permettere l'aumento di aggre/cem, e la riduzione del tenore in cemento a parità del rapporto a/c lavorabilità e resistenza meccanica

	CLS INIZIALE		+SUPERFLUIDIFICANTE	
CEMENTO	489	Kg/m <sup>3</sup>	391	Kg/m <sup>3</sup>
ACQUA	220	Kg/m <sup>3</sup>	176	Kg/m <sup>3</sup>
AGG.FINE	721	Kg/m <sup>3</sup>	811	Kg/m <sup>3</sup>
AGG.GROSSO	879	Kg/m <sup>3</sup>	990	Kg/m <sup>3</sup>
<b>SLUMP</b>	24	cm	24	cm
a/c	0,45		0,45	
<b>Rck</b>	45	MPa	45	MPa

Si è detto in precedenza che oltre alla lavorabilità del cls è necessario tener conto anche di un'altra sua caratteristica: LA SEGREGAZIONE DEI MATERIALI che lo compongono.

All'interno di una cassaforma, GLI ELEMENTI PIU' GROSSI E PIU' PESANTI TENDONO A SEGREGARSI ED A SEDIMENTARE SUL FONDO, mentre quelli più piccoli e leggeri, e L'ACQUA IN PARTICOLARE, TENDONO A RACCOGLIERSI I SUPERFICIE.



Supposto di aver confezionato una miscela corretta per costituenti e tipo, tenendo conto della giusta lavorabilità devo porre attenzione alla successive operazioni che possono vanificare le proprietà della miscela, quali il getto all'interno delle casseforme che può portare a segregazione o un'aggiunta indiscriminata di acqua che può portare ad un decadimento della qualità o ancora un errato costipamento (→porosità).

La stagionatura nella maggior parte dei casi è fatta all'aria aperta, tranne che per gli elementi prefabbricati per i quali la stagionatura è a vapore (copro con teli e poi vapore per mantenere l'umidità, accelerare la stagionatura e quindi aumentare la produttività). La stagionatura viene portata fino allo sviluppo del 70% delle proprietà meccaniche e in ogni caso, a seconda dello sviluppo della resistenza, della temperatura, dell'umidità relativa, ci sono indicazioni normative sui tempi minimi di stagionatura (per evitare che per aumentare la produttività vengano ridotti tali tempi). Condurre la stagionatura in modo corretto, significa limitare l'evaporazione, proteggendo con la cassaforma le superfici laterali ed inferiori e la superficie libera viene ricoperta con sacchi di juta umidificati o film polimerici o (in estate) anche getti d'acqua.

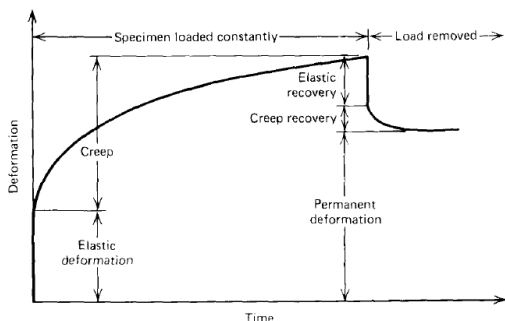
TEMPI STAGIONATURA = TEMPO DISARMO + TEMPO PROTEZIONE

Condizioni ambientali	Sviluppo resistenze								
	Rapido			Medio			Lento		
	5°C	10° C	15° C	5°C	10° C	15° C	5°C	10° C	15° C
Ombra umidità >80%	2	2	1	3	3	2	3	3	2
sole e vento medi u.r >90%	4	3	2	6	4	3	8	5	4
sole e vento forti u.r <50%	4	3	2	8	6	5	10	8	5

Particolare importanza riveste il fenomeno del **ritiro** del cls: la sua prima contrazione avviene nella stagionatura ed è detto RITIRO PLASTICO è provocato dalla variazione dell'umidità relativa dell'ambiente, esso è imputabile all'eliminazione di acqua adsorbita sulle particelle di gel del cemento. Ad esso segue il ritiro DA ESSICCAMENTO derivante dalla perdita d'acqua del cls umido posto in opera in un ambiente avente umidità relativa <100%: più alta è la percentuale di cemento e più grande è il ritiro.

Nel calcestruzzo il ritiro è influenzato dalla presenza di aggregati, quali di fatto limitano la concertazione della pasta di cemento se opportunamente dosati e selezionati.

Rcp rappresenta la resistenza del i-esimo prelievo  
 n° il numero di prelievi



in genere il cls viene sottoposto nel corso della sua vita ad un carico costante  $\sigma < \sigma_c$ , si è dimostrato come però la DEFORMAZIONE non sia costante come nel caso ideale ma VISCOPLASTICA, suppongo a un certo punto di togliere il carico, noto che la deformazione non viene totalmente restituita ma rimane una deformazione residua (viscoplastica). Questo è legato al fatto che nonostante il cls sia un materiale fragile, esso è composto e non monolitico e la

zona di interfaccia tra pasta di cemento ed aggregati può essere soggetta a mov. relativi e assestamenti.

## IL DEGRADO DEL CALCESTRUZZO

### CAUSE PRINCIPALI

- ▶ cls di qualità scadente
- ▶ attacco chimico del cls
- ▶ corrosione dei ferri dovuta ad inadeguata protezione TECNOLOGICHE 42%
- ▶ materiali non idonei
- ▶ scarso controllo della messa in opera
- ▶ assenza controllo messa in opera o ignoranze tecniche esecutive COSTRUTTIVE 20%

Il calcestruzzo va incontro ad un DEGRADO DI TIPO CHIMICO (solfati, anidride carbonica, cloruri, alcali) FISICO (gelo-disgelo, incendio) MECCANICO

ATTACCO DEI SOLFATI: ormai il manufatto è indurito e fragile in opera, se viene messo a contatto con acqua potabile il rigonfiamento è impercettibile, così non è nel caso di acque contenenti solfati che possono



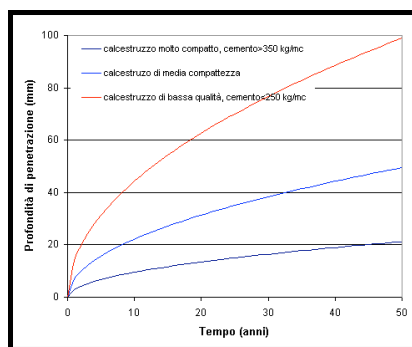
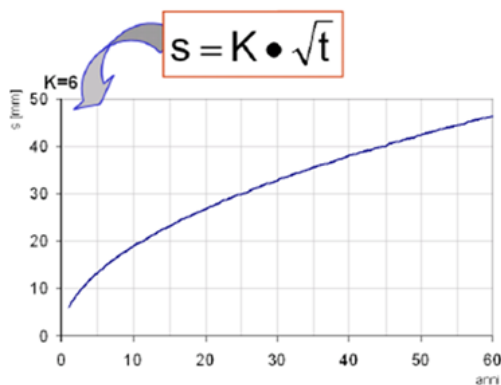
di cemento(silicato di calcio idrato), generando SILICE AMORFA (prova di proprietà leganti) e brucite(Mg(OH)<sub>2</sub>).

**CARBONATAZIONE:**Provoca il distacco del copriferro, la comparsa a vista dei ferri dell'armatura ed il loro degrado corrosivo ed è DOVUTO ALL'AZIONE DELLA CO<sub>2</sub>.

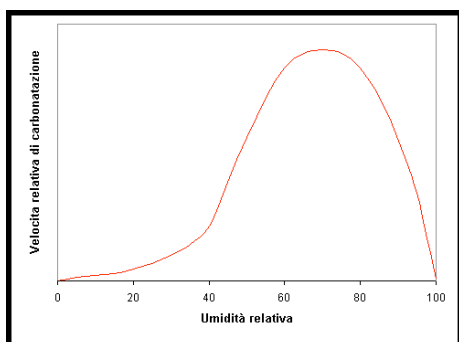
Nel cls ho 2 effetti indotti nella CO<sub>2</sub> in base a dove è contenuto, in aria o disciolta in acqua pura. Il primo caso è il più diffuso, il secondo è più confinato ma pur sempre grave (acqua di montagna, sorgente)

CO<sub>2</sub> in aria→il fenomeno consiste nella reazione della portlandite presente nel gesso con che con la CO<sub>2</sub> ((base +base) CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O⇒H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> Ca(OH)<sub>2</sub>+CO<sub>2</sub> → CaCO<sub>3</sub> +H<sub>2</sub>O è una reazione di salificazione che porta alla formazione di sali(carbonato di calcio) + acqua ma i sale è un solido quindi poco solubile che non da dilavamento però questa reazione abbatta il pH dà fortemente basica >12,5 a pH < 9 il che porta l'armatura ad essere soggetta a CORROSIONE (il cls non soffre dunque ma soffrono molto le armature), nel tasso di CO<sub>2</sub> varia molto a seconda dell'ambiente. Il gas CO<sub>2</sub> arriva sul manufatto solido, le reazioni gas-solido sono lente ma vengono promosse dall'umidità (come nella calce). La CO<sub>2</sub> si scioglie nell'acqua che condensa nei pori capillari (piccole dimensioni) e può dunque migrare più velocemente al cuore del manufatto.  $s=k\sqrt{t}$  (spessore strato di carbonato)

La carbonatazione presenta una PROFONDITÀ DI FENOMENO fortemente dipendente dalla qualità del cls infatti se ha tanti capillari favorisce la carbonatazione.



Così nel giro di pochi anni si supera lo spessore di copriferro ed inizia il degrado dei ferri.



Anche l'umidità relativa controlla il fenomeno.

se  $u_{ur} < 50\%$  la carbonatura è lenta, perché la CO<sub>2</sub> si muove dalla superficie verso il cuore sfruttando l'acqua di condensa nei pori capillari, ma se  $u_{ur} > 50\%$  non si crea nei pori un film continuo di condensa che riveste i pori. Se  $u_r > 90\%$  invece i pori sono saturati e si ha un crollo della velocità, il gas non li può permeare ne solubilizzarsi in vari punti della superficie, così la CO<sub>2</sub> è confinata alla superficie ed essendo i pori pieni l'acqua è ferma e non veicola.

La fase più lenta è l'ultima dunque la condizione di 21 specie limita la velocità, se l'acqua è pura ( $\text{OH}^- = 10^{-7}$  moli) se non è pura invece ci sono dei forti portatori di carica → IONI dunque la reazione è ancora più veloce se l'acqua è di mare o se le piogge sono acide.

Fenomeni del tipo avvengono sia per armature raggiungibili da acqua ed ossigeno (o  $\text{CO}_2$ ), ma anche in costruzioni di copertura dove CHIUDO 2 LASTRE DI ACCIAIO CON UN RIVETTO DI FERRO dove nelle zone di infiltrazione acqua ed umidità PUO' AVVENIRE LA CORROSIONE, ANCORA PIU' SPINTA E' LA CORROSIONE SE FACCIO UNA PILA GALVANICA → corrosione molto più spinta anche se ci vuole sempre un po' di umidità per il ponte salino.

## VITA SERVIZIO STRUTTURE

Edifici comuni (60 anni)

Costruzioni prestigiose (150 anni)

Ponti (120-150 anni)

Attracchi marittimi (30-50 anni)

## PREVENZIONE CORROSIONE:

- corretta progettazione strutturale e costruttiva (drenaggi)
- ambiente, condizioni di vita
- corretta scelta di materiali e MIX DESIGN
- copriferro di dimensione uniforme alle condizioni ambientali
- messa in opera, compattazione e maturazione a regola d'arte

## CONSEGUENZE STRUTTURALI

- riduzione sezione ferri (dimensionati per sforzi di trazione del manufatto → diminuzione resistenza o rottura, a fatica)
- fessurazione del cls (pericolo disancoraggio armature, aumento velocità corrosione, distacco cls)

## PROTEZIONI AGGIUNTIVE

- inibitori di corrosione (nell'impasto → modificano i potenziali d'elettrodo → costi più alti →  $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$ )
- trattamenti superficiali (pitture, membrane, trattamenti impermeabilizzazione per impregnazione superficiale cls)

Il bicarbonato si solubilizza in acqua e viene asportato → DILAVAMENTO DEL CLS

L'acqua aggressiva attacca il 1° strato nella zona di interfaccia, man mano avanza fino a raggiungere l'interfaccia CLS-ARIA. (l'aggressione sarà sempre più veloce perché man mano che l'acqua dilava crea nuove porosità nel cls) qui l'umidità ricca di sali evaporerà, dunque l'equilibrio A verrà spostato verso sinistra, conseguentemente si formerà del bicarbonato di calcio solido depositato (a spese del bicarbonato) (EFFLORESCENZA). L'acqua viene detta incrostante. Le zone più interessate sono quelle più esposte all'evaporazione → SPIGOLI E ZONE DI CONTATTO CON LUCE.

ALCALI REAZIONE (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>): Fenomeno che interessa gli ALCALI presenti nel cls portati dall'argilla e dall'esterno (sali disgelati) e gli ioni alcalini sodio e potassio in particolare gli alcali aggrediscono gli aggregati di natura silicica ma non quelli cristallini come le quaziti infatti esse sono poco aggredibili perché stabili, bensì quelli amorfi (OPALI, SCISTI SiO<sub>2</sub> con strutture disordinate e vetrose) tendendo a formare dei silicati più stabili (SILICATO DI POTASSIO o DI IODIO IDRATO) → conseguentemente si forma una fitta rete di fessurazione diversa da quella della CO<sub>2</sub> perché esse non seguono i ferri ma i granuli casualmente disposti di aggregato amorfo, motivo per cui l'aggregato per il cls non deve essere alcali-reattivo.

Il fenomeno alcali-reattivo è difficile da essere approcciato perché gli aggregati alcali-reattivi sono localizzati in modo casuale ed è molto difficile ricostruire i manufatti con tale degrado.

#### DEGRADO FISICO → GELO DISGELO

Osservabile da cls sfogliato, depositato alla base del manufatto, tale degrado è dato dall'H<sub>2</sub>O che entra nel manufatto, la temperatura oscillando intorno allo 0 Termico GHIACCIA, espande dentro i pori capillari sollecitando le pareti del poro e nelle zone di interfaccia può creare delle piccole fessure che andranno ingrandendosi, danneggiando il manufatto: questo degrado interessa la zona di interfaccia del cls con l'esterno, in quanto essendo ceramica è un buon isolante ed è difficile che la temperatura in profondità scenda sotto lo 0 termico, però prosegue man mano che vengono distaccati strati superficiali.

Su questo degrado si può intervenire in modo particolare e caratteristico cioè impiegando ADDITIVI AERANTI messi nel cls in fase di impasto e miscela volte a creare porosità sferiche isolate e distribuite in modo omogeneo, questi pori agiscono come camera di espansione del ghiaccio che non crea sollecitazioni.

Questi additivi ci fanno aumentare il tempo di vita del manufatto ma ne riducono la resistenza meccanica (bisognerà quindi operare con un basso a/c ed un alto quantitativo di c).

Passati i 450° C si formano nuove fasi che hanno stabilità sino a più alte temperature (→riprende l'espansione ma è un materiale che nulla ha che fare con il cls originario).

L'aggregato calcareo espande linearmente fino a 850°-900° quando avviene la decomposizione termica in particolare  $\text{CaCO}_3 \Rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}_{(\text{vap})}$  espande anche quando si ritira la pasta di cemento e questo crea forti tensioni alle interfacce.

L'aggregato siliceo espande fino a 550° C (quarzo A) in modo lineare, superato cambia improvvisamente struttura cristallina (quarzo B) con un'ESPANSIONE poco significativa ma improvvisa, infatti il quarzo B è meno denso, gli atomi sono meno impacchettati del quarzo A, l'effetto è dirompente perché il 75% degli aggregati è quazite→improvviso rigonfiamento!

Importanti sono le cadute delle proprietà meccaniche del cls esposto all'incendio. E' evidente come la perdita di resistenza avvenga a 450° C per l'aggregato siliceo significativamente in quanto c'è l'improvvisa espansione a 800° C per quello calcareo che si decompone termicamente.

### SCOPPIO DEL CLS

Degrado minoritario se il cls è poroso e nei pori capillari presenti sulle zone di copriferro è presente acqua, l'acqua evapora, espande provocando l'esplosione della parte di copriferro.

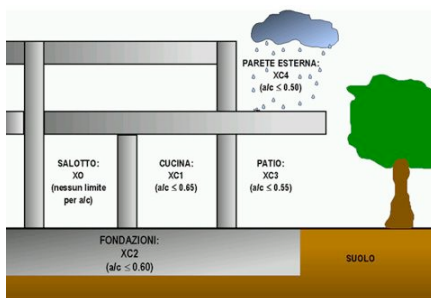
### INC. ARMATURA

E' isolata in condizioni normale del copriferro, se però il copriferro degrada ed espone l'armatura all'esterno essa è soggetta a due tipi di degrado (in presenza di incendio o comunque di escursioni termiche importanti) LO SCORRIMENTO VISCOSO o CREEP che provoca deformazioni irreversibili fin a rottura, DILATAZIONE TERMICA DIFFERENTE tra cls ed armatura con seguente distacco dell'armatura dal cls perché subiscono variazioni dimensionali diverse.

### **COME REALIZZARE UN CLS DUREVOLE**

Relativamente alle cause di degrado del cls la norma UNI 9858 e la norma EN 206 forniscono supporto al progettista stabilendo i criteri di valutazione dei rischi tramite la definizione di classe di esposizione sia indicando le misure preventive con vincoli composizionali del cls (linee guida+prescrizioni per evitare perseguibilità penale).

Ogni tappa tra impasto, messa in opera e stagionatura, influenza e può annullare totalmente la validità delle altre per quanto riguarda una buona realizzazione del cls, per confezionare opere durevoli i cls devono essere confezionati tenendo conto dell'aggressività dell'ambiente in cui sarà situata.



**PARAMETRI DA CONSIDERARE:**

COMPOSIZIONE CLS

PRESTAZIONE RICHIESTA AL CLS

SPESSORE COPRIFERRO

CLASSE DI CONSISTENZA DEL CLS (per messa in opera)

**TEMPO DI STAGIONATURA**

Naturalmente possiamo avere classi di esposizione accoppiate tra loro  $XF \Leftrightarrow XD$ , ed ogni classe è a sua volta divisibile in sottoclassi a secondo della pericolosità dell'ambiente in tale fenomeno.

	a/c <sub>max</sub>	Rck <sub>min</sub>	Mini cemento [Kg/m <sup>3</sup> ]
XC <sub>1</sub> asciutto	0,65	28	260
XC <sub>2</sub> bagnato,raram. asciutto	0,60	30	280
XC <sub>3</sub> moderat. umido	0,55	37	280
XC <sub>4</sub> ciclicam. asciutto e bagnato	0,50	37	300

-----  
 linee guida da rispettare

es. XD <sub>1</sub> moderatamente umido	0,55	37	300
XD <sub>2</sub> bagnato, raram.asciutto	0,55	37	300
XD <sub>3</sub> ciclicam.asciutto/bagnato	0,45	45	320

La norma prescrive poi oltre a questo, a seconda della classe di esposizione ambientale, anche il volume minimo di aria inglobata a secondo del diametro massimo degli aggregati, se gli aggregati devono essere resistenti al gelo, se il cls deve essere impermeabile, il tipo di cemento (nell'ambiente XA esso deve essere resistente ai solfati, ovvero povero di alluminati se il contenuto di solfati è >500 mg/Kg in acqua o >3000 mg/Kg nel suolo),il copriferro minimo.

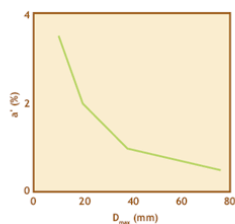


Fig. 4 - Percentuale d'aria (a') che rimane nel calcestruzzo compattato in funzione del diametro massimo (D<sub>max</sub>) dell'inerte.

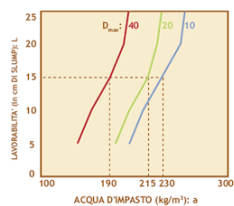


Fig. 3 - Lavorabilità in funzione dell'acqua di impasto con diverso diametro massimo (D<sub>max</sub>) espresso in mm. I valori di a sono mediati da quelli ottenibili con inerti alluvionali e di frantumazione.

A questo punto, per definire la composizione del calcestruzzo in termini di kg/m<sup>3</sup> di acqua (a), di cemento (c) e di inerte (i) si procede matematicamente. Noti a/c ed a si calcola c, mentre il volume di inerte (v<sub>aggr</sub>) è determinato mediante un semplice bilancio di volume sottraendo ad un m<sup>3</sup> di calcestruzzo, il volume di

acqua (V<sub>a</sub>), di cemento (V<sub>c</sub>) e di aria (V<sub>a'</sub>):

$$V_{aggr} = V_{cls} - V_c - V_a - V_{a'}$$

dove V<sub>cls</sub> = 1 m<sup>3</sup> = 1000 litri; V<sub>c</sub> = c/Q<sub>c</sub>; V<sub>a</sub> = a; V<sub>a'</sub> = 10 a'. Tenendo presente che la massa volumica del cemento (p<sub>c</sub>) è con buona approssimazione eguale a 3,15 kg/l, ed assumendo per la massa volumica apparente dell'inerte (p<sub>aggr</sub>) un valore di 2,7 kg/l, si può calcolare il peso dell'inerte (i) in kg per 1 m<sup>3</sup> di calcestruzzo:

$$A_{aggr} = V_{aggr} \cdot 2,7 = (1000 - c/3,15 - a - 10 a') \cdot 2,7$$

### Mix-design semplice:

quando sono forniti gli elementi base di calcolo ben definiti, ed in numero uguale o inferiore al minimo di 4 (R<sub>ck</sub>, L, D<sub>max</sub>, t<sub>c</sub>).

### Mix-design semplice chiuso:

quando gli elementi base forniti sono 4 e portano ad una sola soluzione del problema e, quindi, ad una sola composizione del calcestruzzo; per es.: R<sub>ck</sub>, L, D<sub>max</sub>, t<sub>c</sub> → (a.i.c), come è mostrato in Fig.1.

### Mix-design semplice aperto:

quando gli elementi base forniti sono meno di 4 e portano a più soluzioni del problema e, quindi, a più composizioni del calcestruzzo; per es.: R<sub>ck</sub>, L, D<sub>max</sub> → 9 possibili combinazioni di (a, c, i) a seconda del t<sub>c</sub> scelto (Fig. 7).

### Mix-design complesso:

quando oltre agli elementi base viene richiesto almeno un altro requisito (per es. la durabilità) (Fig. 5) e questo potrebbe essere in contraddizione con uno degli elementi base; per es.: R<sub>ck</sub>, L, D<sub>max</sub>, t<sub>c</sub> + D<sub>I</sub>, R<sub>ck</sub> e D potrebbero, oppure no, richiedere un unico rapporto a/c.

### Mix-design complesso aperto:

quando il mix-design è complesso e il numero degli elementi base è inferiore a 4; per es.: R<sub>ck</sub>, L, D<sub>max</sub> + D → offrono varie soluzioni ciascuna per ogni t<sub>c</sub>.