
Struttura e Proprietà del Calcestruzzo

**Prof. Bernhard Elsener,
Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche
Università degli Studi di Cagliari**

**Email: belsener@unica.it
<https://people.unica.it/bernhardelsener/>**

Parte di questa lezione si base sul libro L. Bertolini, B. Elsener, R. Polder, P. Pedferri,
Corrosion of Steel in Concrete, Wiley VCH (2013)

11 Struttura e Proprietà del Calcestruzzo

11.1 Introduzione

11.2 Produzione del cemento, ecologia

11.3 Idratazione del cemento

- pasta cementizia

11.4 Porosità capillare

- effetto del rapporto a/c e della stagionatura

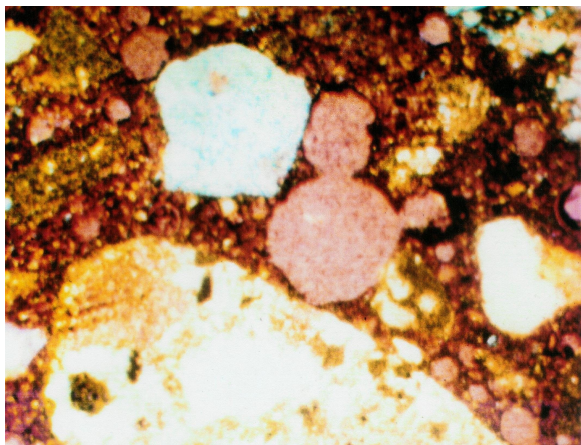
- materiali pozzolanici

10.5 Un buon calcestruzzo

10.6 Riassunto

10.7 Domande di verifica

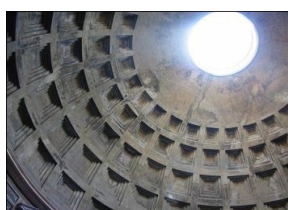
11.1 Introduzione



Il calcestruzzo in fotografia

Il calcestruzzo è un materiale formato da una matrice cementizia (ottenuta dall'idratazione del cemento) e da aggregati.

Il calcestruzzo non può essere messo sotto trazione.



Il Pantheon a Roma



Attacchi in superficie

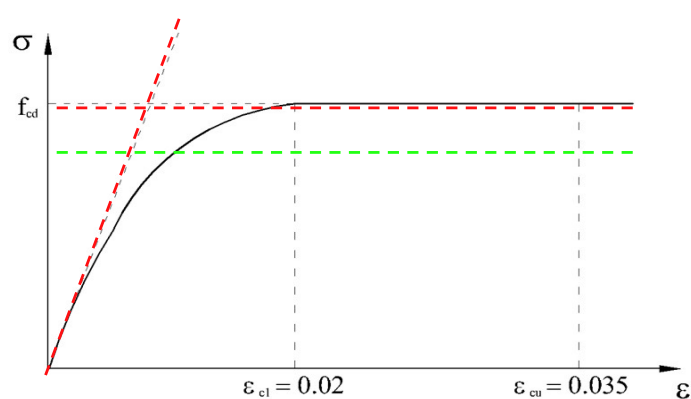
Il calcestruzzo può presentare la durabilità di una pietra naturale almeno in assenza di specifiche cause di degrado (ambienti acidi o solfatici).

11.1 Introduzione

Il calcestruzzo ha un'ottima resistenza a compressione.

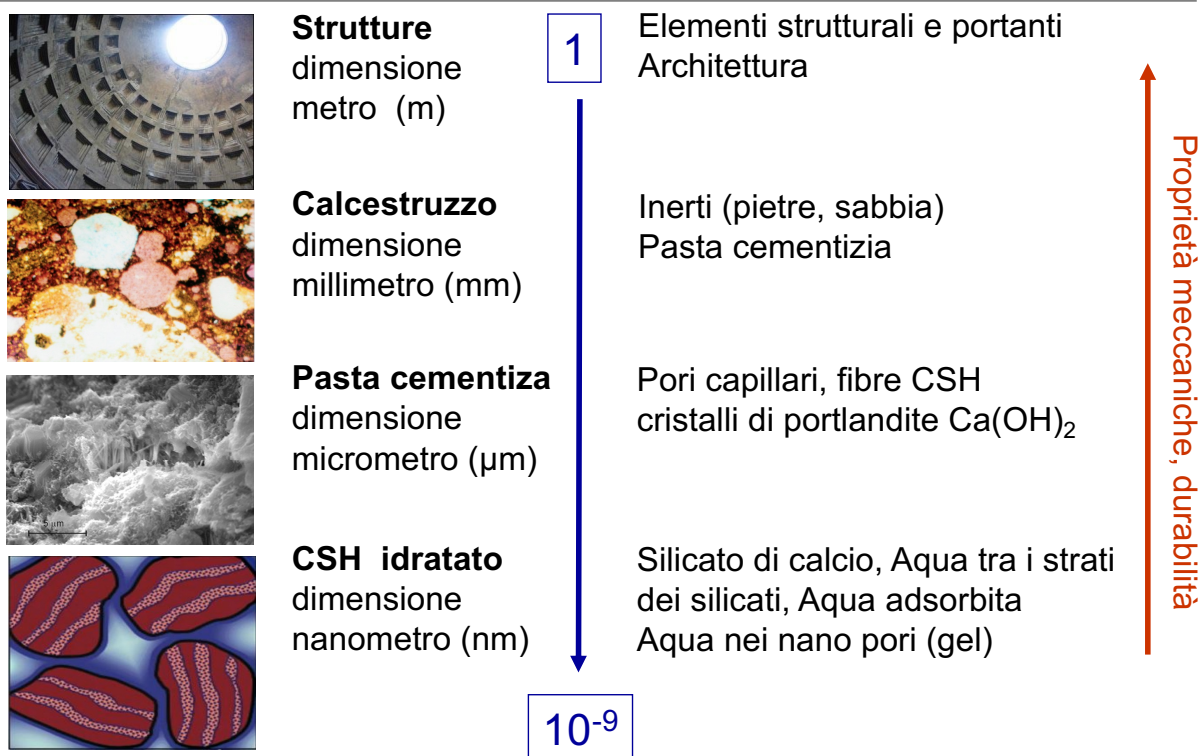
$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0,83 R_{ck}}{\gamma_c}$$

$$f_{cl} = 0,85 f_{cd} = 0,85 \frac{0,83 R_{ck}}{\gamma_c}$$



- R_{ck} resistenza a compressione cubica (28 giorni)
- f_{ck} resistenza a compressione cilindrica
- f_{cd} resistenza a compressione del cubo
- γ_c coefficienti parziali di sicurezza (norme)

11.1 Introduzione – livelli di struttura



11.2 Cemento portland - produzione

Il cemento viene prodotto da calcare e argilla che vengono miscelati e macinati. Avviene una cottura a temperature di ca. 1450 ° C e dopo raffreddamento brusco si forma il clinker, un granulato anidro di silicati di calcio (80% C_3S e C_2S , 20 % C_3A e C_3AF). Vengono aggiunto ca. 5% di gesso (regolatore per la presa).



Estrazione di calcare

Forno a rotazione (ø 3 - 6 m)

Il clinker e gli altri costituenti del cemento, per poter essere utilizzati, devono essere macinati i mulini rotanti. Il cemento si presenta come farina impalpabile. La finezza è importante per la sua reattività (idratazione).

L'Italia è uno die maggiori produttori mondiali di cemento.

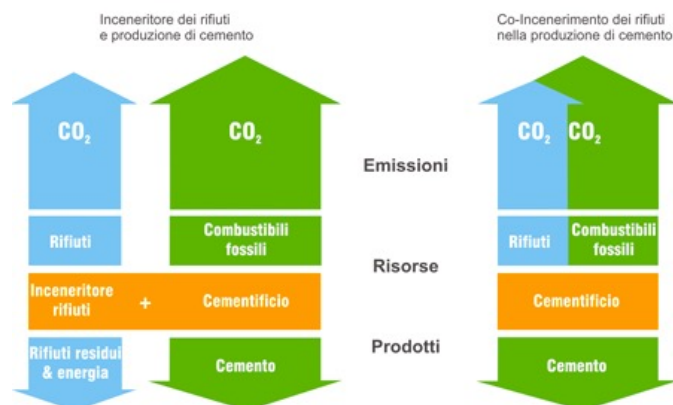
Vedi capitolo 2 in: L. Bertolini, P. Pedefferri, Tecnologia dei materiali - Leganti e calcestruzzo

<https://www.aitecweb.com/Il-cemento/>

11.2 Cemento portland - produzione

La produzione del cemento portland (clinker) avviene a temperature molto elevate (1.450° C), che si raggiungono con un consumo energetico pari a 3.200 - 4.200 MJ per tonnellata prodotto. In più per tonnellata di clinker viene emesso di CO₂.

Per ridurre l'impatto ecologico l'industria di cemento sostituisce i combustibili.



Riduzione del consumo di energia

Riduzione dell'impronta CO₂

Riduzione del volume di rifiuti da depositare /incenerare

Per ridurre l'emissione di CO₂ „intrinseco“ vengono utilizzati cementi con meno clinker (CEM II, CEM III).

<https://www.aitecweb.com/Il-cemento/Cosè-il-cemento>

11.2 Cemento portland – composizione

Principali costituenti del cemento portland (clinker macinato) sono **ossidi**.

Silicato tricalcico	3 CaO * SiO ₂	C ₃ S	45 - 60 %
Silicato bicalcico	2 CaO * SiO ₂	C ₂ S	5 - 30 %
Alluminato tricalcico	3 CaO * Al ₂ O ₃	C ₃ A	6 - 15 %
Ferroaluminato tetracalcico	4 CaO * Al ₂ O ₃ * Fe ₂ O ₃	C ₃ AF	6 - 8 %
Gesso	CaSO ₄		3 - 5 %

L'idratazione dei silicati (C₃S, C₂S) dà luogo a un prodotto colloidale formato da silicati idratati di calcio e indicato con la sigla C-S-H (H sta per H₂O).



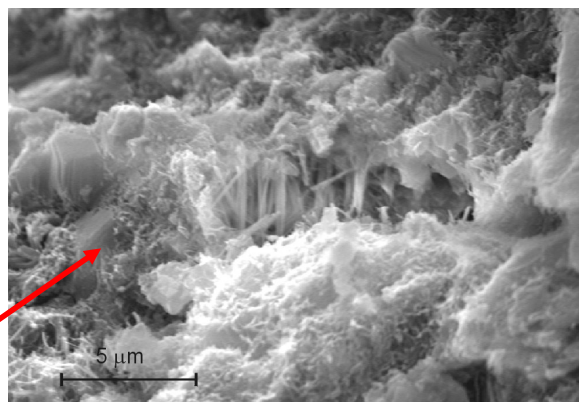
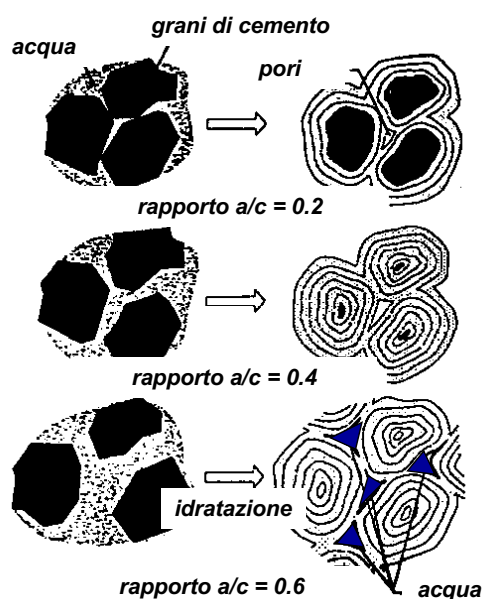
La sua composizione non è ben definita in quanto, al variare del grado di idratazione, del rapporto aqua/cemento (a/c) e della temperatura, cambia. Può essere approssimato con la formula C₃S₂H₃.

L'idratazione dei silicati, inoltre, produce cristalli esagonali di idrossido di calcio Ca(OH)₂, portlandite.

11.3 Idratazione del cemento

La reazione chimica cemento + H₂O dà luogo ad un prodotto colloidale di silicati idrati di calcio (**pasta cementizia CSH**) e portlandite Ca(OH)₂.

Valore stechiometrico rapporto a/c = 0.4

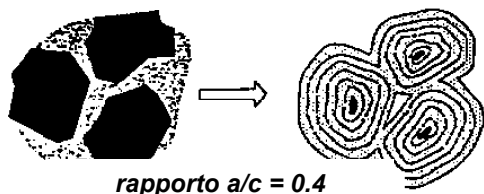


Matrice cementizia con pori nano-metriche e cristalli di Ca(OH)₂

> Soluzione nei pori pH > 12.5, alcalino

11.3 Idratazione del cemento – rapporto acqua/cemento

Come ogni reazione chimica anche l'idratazione del cemento (portland) ha una stechiometria. Quando tutto il cemento (C_3S) consuma tutta l'acqua (H)



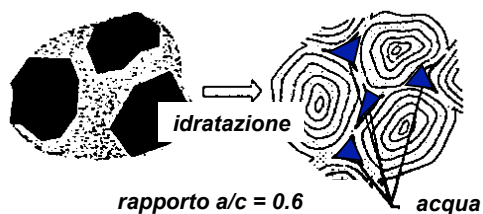
Il rapporto stechiometrico tra acqua e cemento (a/c) è pari a 0.4.

Domanda: dove avviene la (prima) reazione tra acqua e granulo di cemento ?

Domanda: perché la soluzione acquosa nel cls ha un pH minimo di 12.5 ?

11.3 Idratazione del cemento – rapporto a/c 0.6

Come ogni reazione chimica anche l'idratazione del cemento (portland) ha una stechiometria. Quando si aggiunge troppo acqua questo rimane in eccesso.

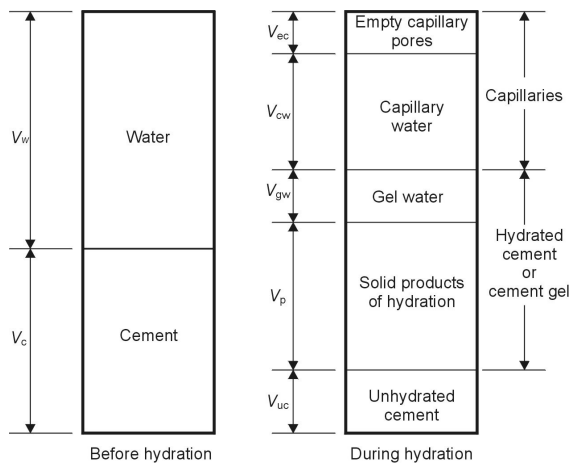


Con un rapporto a/c 0.6 rimane ca. 30% di **acqua non reagito**.

Domanda: che cosa succede con l'acqua non reagito quando il cls viene esposto all'atmosfera ?

11.3 Idratazione del cemento

Idratazione (reazione chimica tra cemento e acqua)



Durante l'idratazione, il volume dell' impasto non cambia, $V = V_{cem} + V_{H_2O}$

Il volume dopo reazione consiste in:

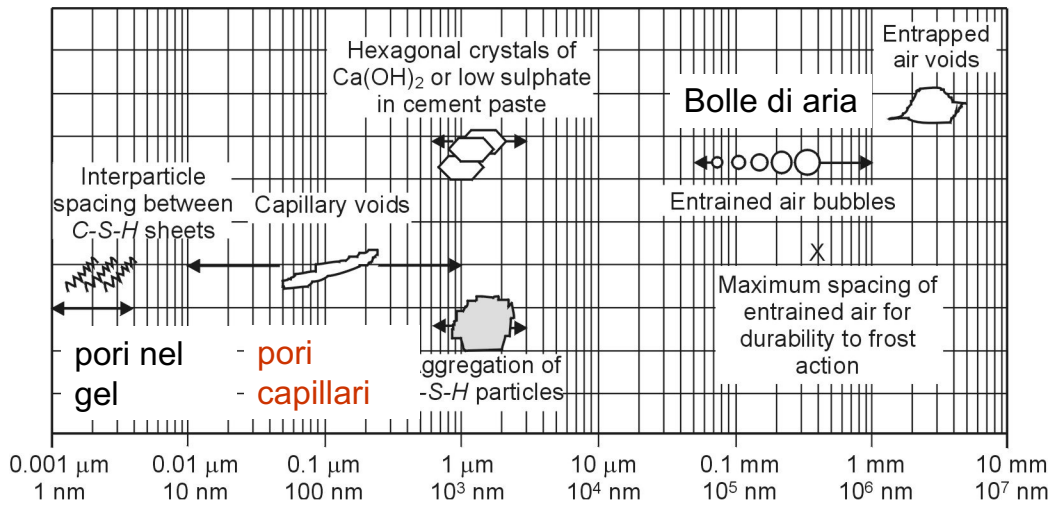
- pori capillari
- acqua nel gel CSH
- prodotti di idratazione CSH
- cemento non ancora reagito

Reazione completa: rapporto $a/c = 0.4$

Il volume dei **pori capillari** è dato dallo spazio non riempito dai componenti solidi della pasta idratata. Questo volume si riduce al procedere dell'idratazione --> importanza pratica: maturazione del CLS

11.4 Porosità del calcestruzzo

Il sistema dei pori nel calcestruzzo

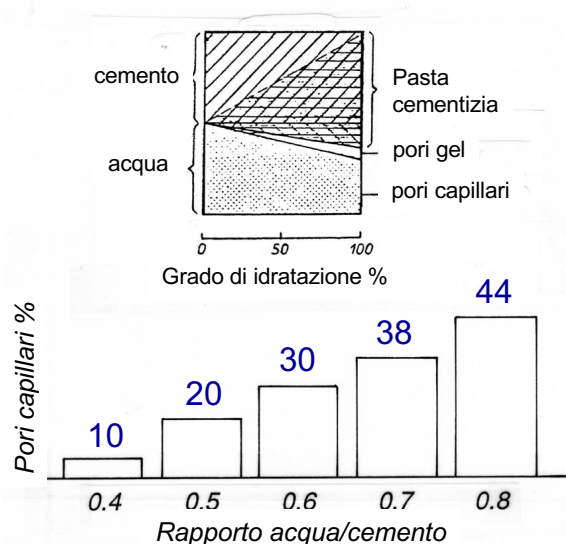


Pori nel gel: dimensione nm, diffusione di molecole di H₂O possibile

Pori capillari: tipicamente 0.1 μm, controllano il trasporto nel CLS

Bolle di aria : ca 0.1 mm, per la resistenza all'azione di gelo/disgelo

11.4 Porosità del calcestruzzo



I **pori capillari** si formano quando l'acqua non reagita nell'idratazione del cemento evapora.

La percentuale di pori capillari aumenta con il rapporto a/c e diminuisce con il grado di idratazione.

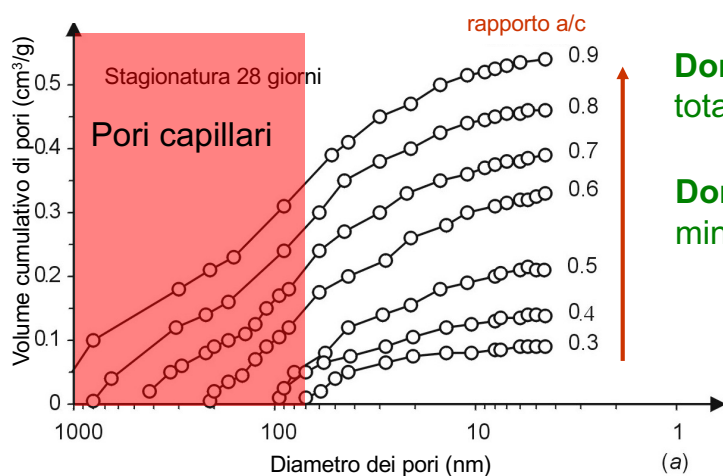
Porosità capillare per 90% di idratazione

I **pori capillari** sono responsabili per l'ingresso di acqua, cloruri e CO_2 nel calcestruzzo, cioè per l'interazione tra CLS e ambiente circostante.

Domanda: perché la porosità capillare aumenta linearmente con a/c ?

11.4 Porosità del calcestruzzo

Effetto del rapporto a/c sulla distribuzione dimensionale dei pori nel calcestruzzo



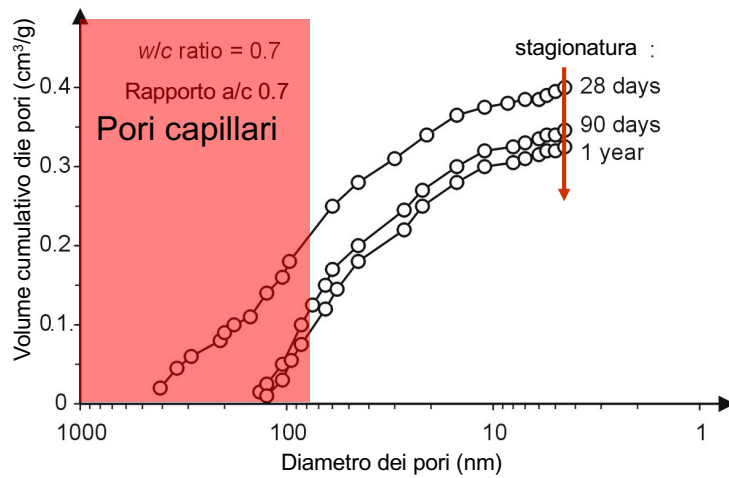
Domanda: come cambia la porosità totale al diminuire del rapporto a/c ?

Domanda: quale parte dei pori diminuisce ?

Il volume dei **pori capillari** ($\varnothing > \text{ca. } 60 \text{ nm}$) diminuisce al diminuire del rapporto a/c. --> importanza pratica: rapporto a/c ≤ 0.45

11.4 Porosità del calcestruzzo

Effetto della **stagionatura** sulla distribuzione dimensionale dei pori nel calcestruzzo



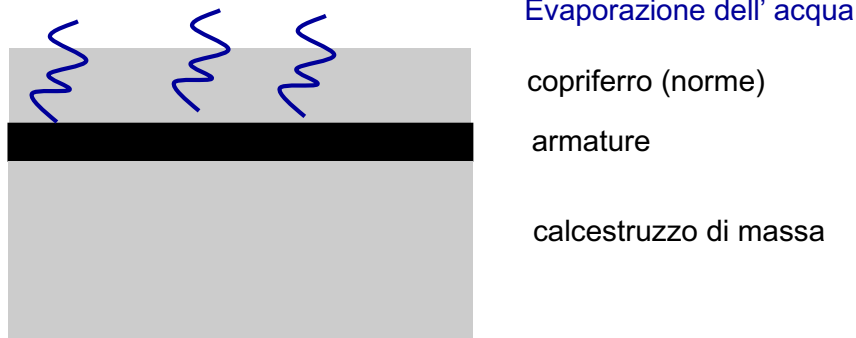
La riduzione del volume totale dei pori all' aumentare del tempo dell' idratazione deriva principalmente dalla diminuzione dei pori capillari.

-> importante per la durabilità

Il volume dei pori capillari ($\varnothing > \text{ca. } 60 \text{ nm}$) diminuisce all' aumentare del tempo di idratazione. --> importanza pratica: stagionatura

11.4 Porosità del calcestruzzo - stagionatura

Cosa succede senza stagionatura (tenere umido al superficie del cls)...



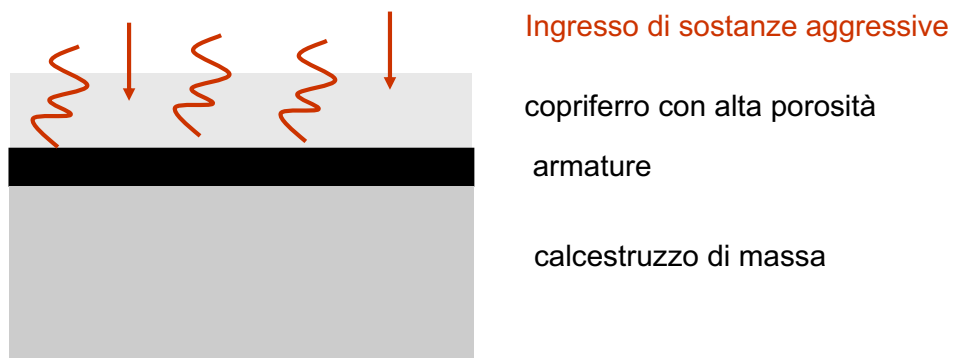
Senza stagionatura (coprire la superficie del CLS, tenendo umido) l'acqua nel CLS evapora e non è più presente per il processo di idratazione.

L'idratazione si ferma e in superficie rimane un CLS con alta porosità capillare nonostante un rapporto a/c basso.

La qualità più alta il calcestruzzo dovrebbe avere **nel copriferro !**
--> importanza pratica: stagionatura

11.4 Porosità del calcestruzzo - permeabilità

Ingresso di sostanze aggressive in copriferro poroso ...



In un copriferro con alta porosità capillare le sostanze aggressive dall'ambiente (CO_2 , ioni cloruro) possono **penetrare** facilmente e rapidamente.

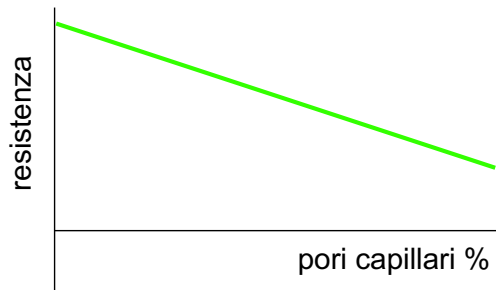
Nonostante uno spessore di copriferro secondo le norme la vita di servizio previsto dal progettista non viene raggiunto.

Una vita di servizio lunga richiede un rapporto $a/c \leq 0.45$ e un copriferro secondo la classe di esposizione e una buona stagionatura.

11.4 Porosità del calcestruzzo - proprietà

Effetto della porosità

All' aumentare della porosità capillare diminuisce la resistenza meccanica (a compressione) del calcestruzzo linearmente.



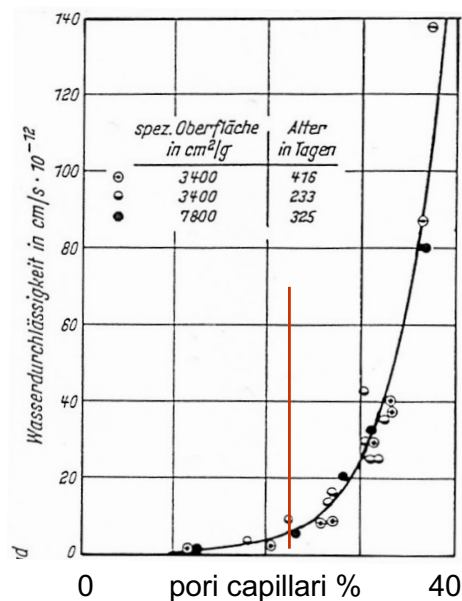
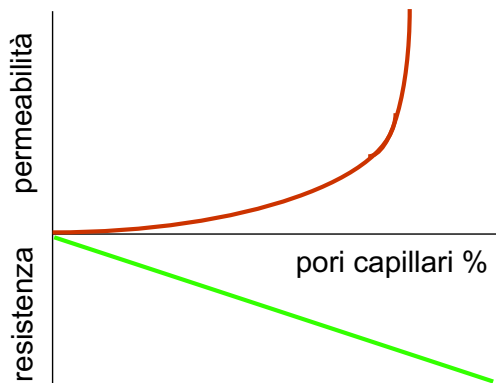
Spiegare perché la resistenza a compressione del cls diminuisce all' aumentare della porosità.

Quale andamento si aspetta per la permeabilità ?

11.4 Porosità del calcestruzzo - proprietà

Effetto della porosità

All' aumentare della porosità capillare la permeabilità aumenta fortemente.

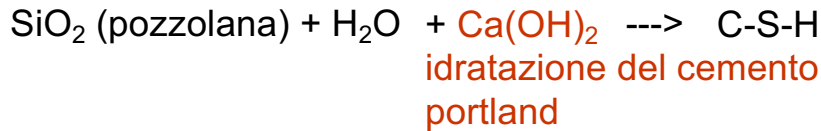


La permeabilità, cioè la qualità del CLS, dipende fortemente dalla quantità di pori capillari. Si osserva una soglia a ca. 22 %, al di sotto il CLS è denso.

11.4 Porosità del calcestruzzo – materiali pozzolanici

Materiali pozzolanici possono essere naturali (la pozzolana) o artificiali (ceneri volanti, fly ash) e la microsilice (silica fume). Sono **prevalentemente silicei** con un tenore di calcio ridotto.

Non possiedono di per sé proprietà leganti ma le acquistano in presenza di calce e acqua:

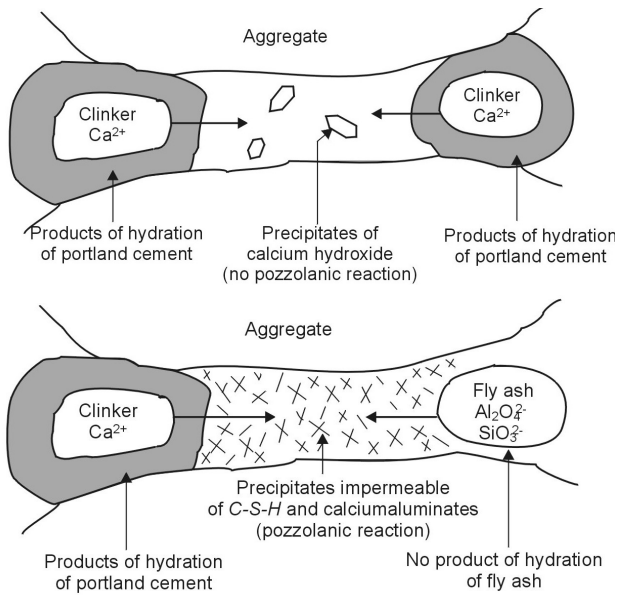


La calce necessaria per reagire con la pozzolana è fornita dall' idratazione del cemento portland, diminuisce dunque la riserva alcalina (solido Ca(OH)_2). La reazione pozzolanica può avvenire solamente dopo l'inizio dell' idratazione.

Cementi con aggiunte pozzolaniche richiedono una stagionatura più lunga.

11.4 Porosità del calcestruzzo – materiali pozzolanici

Struttura di idratazione



Senza materiali pozzolanici:
Prodotti di idratazione, pori capillari, idrossido di calcio

Con materiali pozzolanici:
Prodotti di idratazione, pori capillari riempiti di precipitati di CSH
-> porosità capillare ridotta
-> CLS diventa "impermeabile"

Cementi con aggiunte pozzolaniche riducono fortemente la porosità capillare

11.5 Processi di trasporto nel calcestruzzo

Permeabilità

Attraverso i pori del calcestruzzo penetrano sostanze gassose (O_2 , CO_2) oppure liquide (acqua con ioni disciolti, Cl^-). Con il termine permeabilità si indica la proprietà di un CLS di consentire l'ingresso (facile) di queste sostanze.

Ingresso di sostanze gassose:

-> sistema di pori capillari aperto (non riempito di acqua).

Struttura del sistema dei
pori capillari (percentuale
e interconnettività)



Grado di riempimento del
sistema dei pori al
variare dell'umidità relativa

Ingresso di ioni (cloruro):

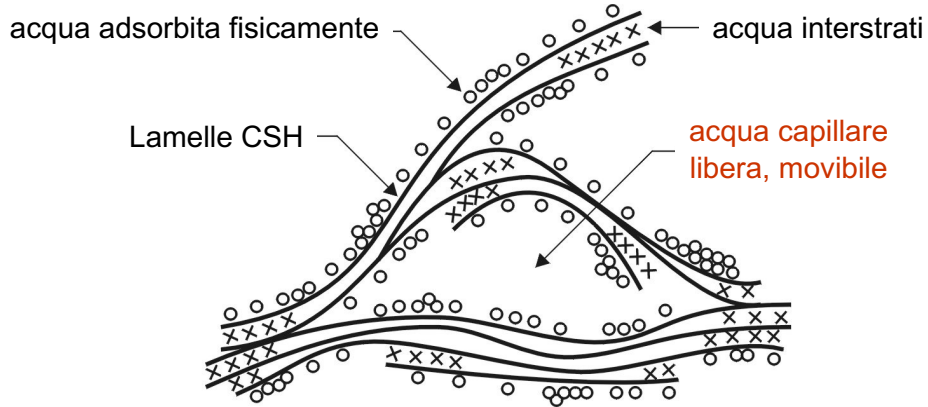
-> sistema di pori capillari riempito di acqua.

La permeabilità del CLS (del copriferro) è determinante in relazione a degrado del CLS e alla corrosione delle armature. -> processi di trasporto nel CLS

11.5 Processi di trasporto nel calcestruzzo

Acqua nella pasta cementizia

I pori della pasta di cemento possono contenere acqua in cui sono disciolte ioni. La soluzione nei pori in un CLS idratato con cemento portland è costituito principalmente da NaOH e KOH (provenienti da Na_2O e K_2O del cemento)

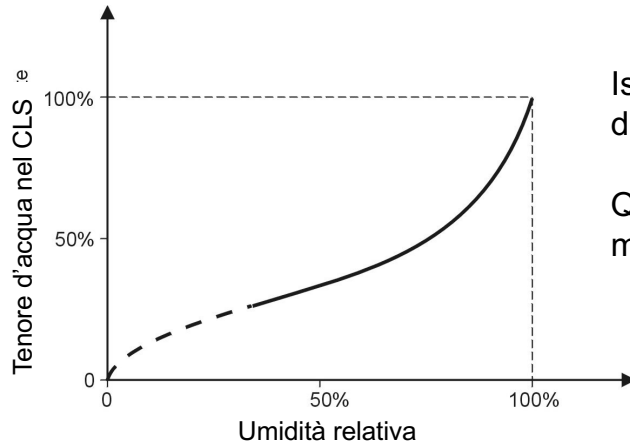


La soluzione nei pori in un CLS idratato con cemento portland (non carbonatato) è costituito da NaOH e KOH e raggiunge un pH tra 13 e 14.

11.5 Processi di trasporto nel calcestruzzo

Acqua capillare

L'acqua contenuta nei pori capillari costituisce la frazione principale. Nei pori di diametro > 50 nm è da considerarsi libera di forze di legame con la superficie solida (diametro di una molecola d'acqua 1.5 nm).



Isotherma di adsorbimento (schematica) di un CLS in condizione di equilibrio.

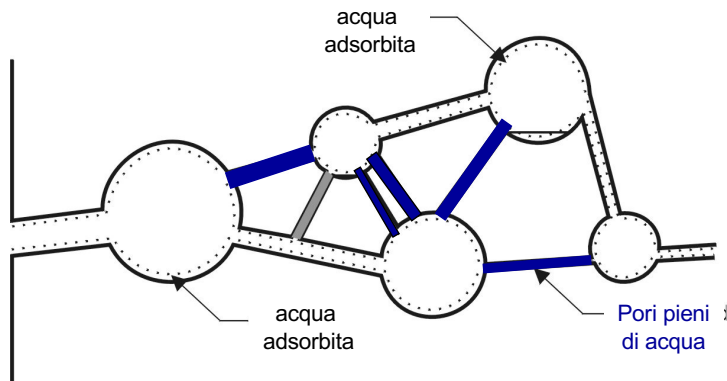
Questa curva è influenzata fortemente dalla porosità capillare.

All' aumentare dall' umidità relativa dell' ambiente esterno il CLS si riempia di acqua. Vengono riempiti primo i pori piccoli (effetto capillare).

11.5 Processi di trasporto nel calcestruzzo

Acqua nei pori capillari in contatto con atmosfera non satura

L'acqua nei pori capillari risulta dapprima adsorbita alla loro superficie e successivamente, man mano che aumenta l'umidità relativa esterna, si raggiungono all'interno del CLS le condizioni per condensazione capillare.



A seconda della porosità e dell'umidità relativa risulta un grado di saturazione del CLS diverso.

Il grado di saturazione del CLS influenza in maniera marcata la cinetica dei processi di trasporto: pori riempiti di acqua ostacola l'ingresso di sostanze gassose mentre facilita il movimento delle specie ioniche.

11.5 Processi di trasporto nel calcestruzzo

Processi di trasporto

Sono possibile le seguenti meccanismi di trasporto:

Diffusione:

per effetto di gradiente di concentrazione (esterno - interno)

- ingresso di CO_2 in un CLS con pori vuoti

- ingresso di ioni cloruro o solfato in un CLS saturo (immerso in acqua di mare)

Permeazione:

per effetto di una differenza di pressione

- ingresso di CO_2 in un CLS con pori vuoti

Assorbimento capillare:

Materiali porosi assorbono acqua nei pori per effetto di forze capillare



- ingresso di acqua con cloruri (spruzzi di acqua di mare in CLS secco)



Per specie ioniche disciolto in acqua (ad es. Ioni cloruro) l'assorbimento capillare è il meccanismo di trasporto più veloce.


11.6 Un buon calcestruzzo



Come si ottiene un CLS con alta qualità ?

Influiscono i seguenti parametri:

-   **Rapporto acqua/cemento:**
Un rapporto $a/c \leq 0.45$ assicura una porosità capillare $< 25 \%$.
 - Materiali pozzolanici migliorano la qualità
 - CLS con permeabilità molto bassa

-   **Copriferro :**
Uno spessore di copriferro secondo le norme (classe di esposizione)

-  **Lavorazione:**
Vibrazione (per compattare ed eliminare i vuoti) e buona stagionatura -> CLS con qualità omogeneo

-  **progettazione**  **esecuzione**

Una alta qualità del CLS (bassa porosità) significa: ottima resistenza alle corrosione delle armature, lunga vita di servizio.

11.6 Un buon calcestruzzo

Copriferro

L'adeguato copriferro viene definito dal progettista in funzione dell'ambiente in cui la struttura è collocato. I valori minimi per garantire la durabilità si trovano nei codici per la costruzione (classe di esposizione).



Il copriferro necessario viene garantito con l'utilizzo di distanziatori.

$$C_{\text{nom}} = C_{\text{min}} + \Delta C_{\text{dev}}$$

C_{nom} nominale
 C_{min} minimale
 ΔC deviazione (10 mm)

Più grande il copriferro più alta è la protezione contro l'ingresso di sostanze aggressive dall'ambiente fino alle armature.

11.6 Un buon calcestruzzo

Copriferro c_{min} per la durabilità (classe di esposizione)

Environmental Requirement for $c_{min,dur}$ (mm)							
Structural Class	Exposure Class according to Table 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

XC carbonatazione / XC1 secco / XC2, XC3 / XC4 cicli secco-bagnato

XD ingresso di cloruri / XD1 umidità bassa / XD2 / XD4 cicli secco-bagnato

Oltre alla dimensione del copriferro conta molto la qualità del cls nella parte esterna (copriferro). Rapporto a/c e stagionatura.

11.7 Riassunto

Il calcestruzzo, un materiale fatto da inerti, cemento e acqua, è molto economico, ha buona resistenza a compressione e può dimostrare le proprietà di una “pietra naturale”.

La reazione chimica del cemento Portland (CEM I) con acqua (idratazione) dà luogo ad un prodotto colloidale di silicati idrati di calcio (**pasta cementizia CSH**) e cristalli di portlandite Ca(OH)_2 .

Se si aggiunge acqua in eccesso del rapporto $a/c = 0.4$ (stechiometrico) l'acqua non reagita dopo evaporazione lascia **pori capillari**. Lo scopo della tecnologia del calcestruzzo è di minimizzare la porosità – di regola si richiede un rapporto $a/c < 0.45$.

Per ottenere un calcestruzzo (soprattutto anche il copriferro) con bassa porosità oltre al rapporto $a/c < 0.45$ è importante una buona stagionatura (tenere umido il calcestruzzo) per promuovere il processo di idratazione.

11.8 Domande di verifica

Perché il calcestruzzo ha un'ottima resistenza a compressione ma non resiste a trazione ?

Perché nelle norme per un calcestruzzo di ottima qualità si prescrive un rapporto acqua/cemento $a/c < 0.45$?

Perché la resistenza a compressione del calcestruzzo diminuisce linearmente con il rapporto a/c mentre la permeabilità aumenta esponenzialmente con a/c ?

Perché l'aggiunta di materiali pozzolanici riduce la porosità del calcestruzzo ma la stagionatura deve essere molto più lunga ?

Spiegare perché il pH di un calcestruzzo sano è maggiore di 12.5 ?

Spiegare perché la reazione tra cemento e acqua (idratazione) è un processo che dura molto a lungo ?