
Durabilità del Calcestruzzo Armato

**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)



Durabilità del calcestruzzo armato
Tecnologia dei Materiali e Chimica Applicata

Bernhard Elsener
AA 2022/2023

12 Durabilità del Calcestruzzo

12.1 Introduzione

12.2 Idratazione del cemento, porosità, pH del calcestruzzo

12.3 Durabilità del calcestruzzo armato

12.4 Corrosione dovuto alla carbonatazione

- reazione chimica, cinetica, fattori controllanti a/c, copriferro, ..

12.5 Corrosione da cloruri

- corrosione localizzata,

12.6 Vita utile delle strutture, tecniche diagnostiche

12.7 Armature in acciaio inossidabile

12.8 Riassunto

12.9 Domande di verifica

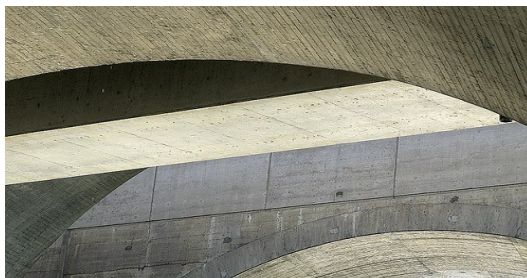
12.1 Introduzione

Il calcestruzzo



Il Pantheon a Roma, prestigiosa opera dei romani 125 d.C. è in condizioni di conservazione perfetta per quasi 2000 anni.

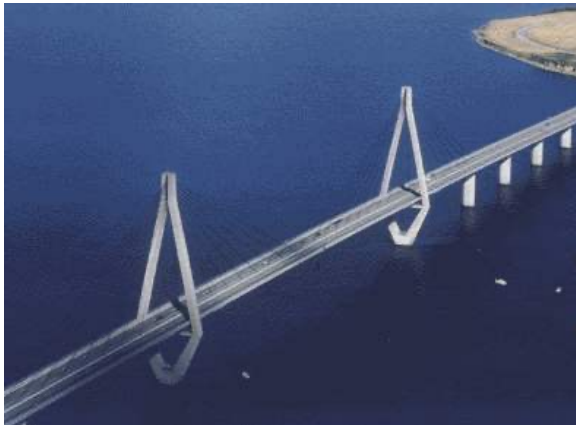
E' la dimostrazione che il calcestruzzo può presentare la durabilità di una pietra naturale almeno in assenza di specifiche cause di degrado (ambienti acidi o solfatici).



Il calcestruzzo non può essere messo sotto trazione.

12.1 Introduzione

Il calcestruzzo armato

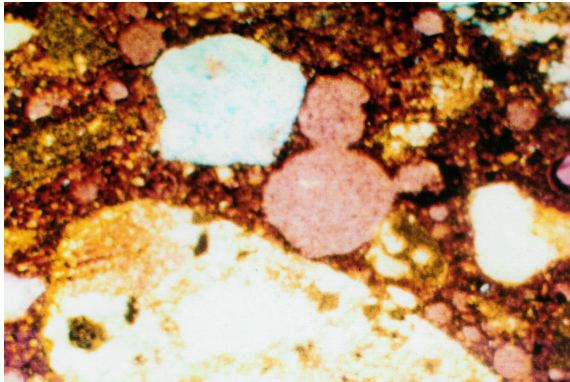


Materiale di costruzione ideale....

.... ma non sono eterne o quasi, come si riteneva fino agli anni '70, ma hanno una durata limitata, a causa della corrosione delle armature.

12.1 Introduzione

Calcestruzzo armato è un materiale composito



Il calcestruzzo (inerti, acqua e cemento) è facile da preparare ovunque.

> Alta resistenza a compressione.



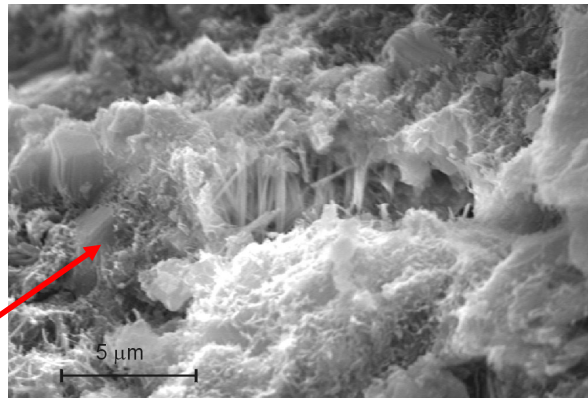
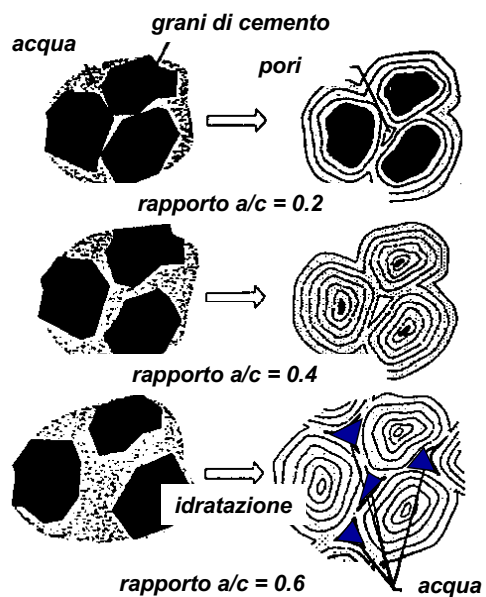
Armature in acciaio, diverse funzioni (statica, evitare fessure).

> Alta resistenza a trazione.

Le armature nel CLS, per la sua alcalinità elevata, sono protetti contro la corrosione (passività). Copriferro e qualità secondo le normativo: durevole.

12.2 Idratazione del cemento

La reazione chimica tra cemento e H_2O dà luogo ad un prodotto colloidale di silicati idrati di calcio (pasta cementizia CSH) e cristalli di portlandite $Ca(OH)_2$.
Valore stechiometrico rapporto a/c = 0.4

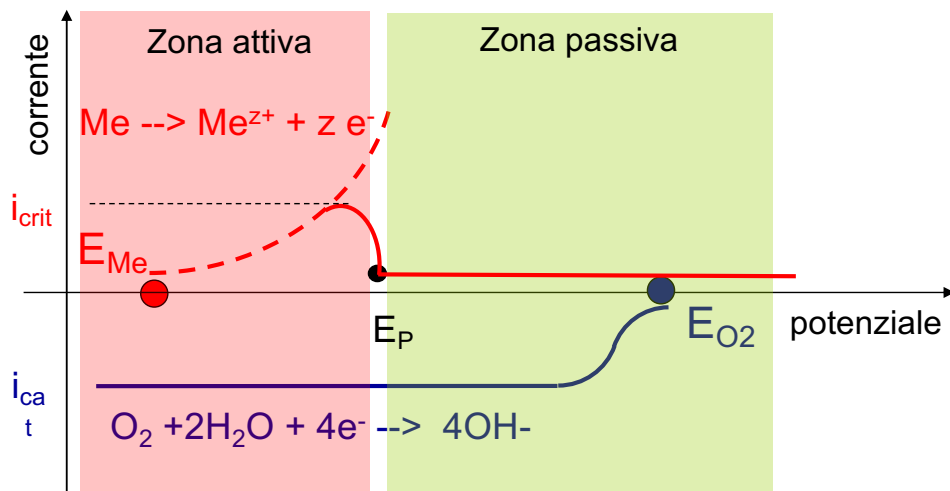


Matrice cementizia con pori nano-metriche e cristalli di $Ca(OH)_2$

> Soluzione nei pori $pH > 12.5$, alcalino

12.2 Passivazione dell' acciaio nel calcestruzzo

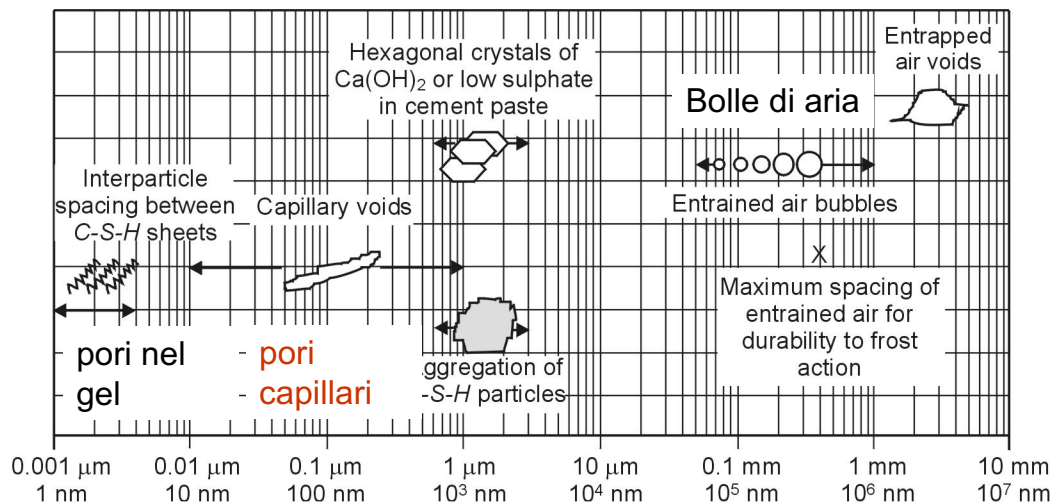
Passivazione spontanea dell' acciaio nel calcestruzzo (pH > 12.5)



Passivazione: Si forma spontaneamente uno strato sottilissimo ma protettivo (film passivo). Condizione per una passivazione spontanea $i_{crit} < i_{cat}$

L'acciaio nel CLS alcalino è protetto contro la corrosione.

12.2 Tipi di pori nel calcestruzzo



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

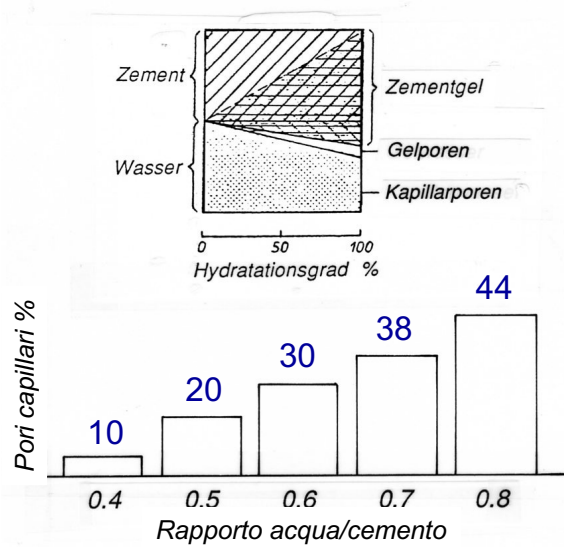
Pori capillari: tipicamente 0.1 μm, controllano il trasporto nel CLS

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

Perché sono i pori capillari che controllano I fenomeni di trasporto ?

12.2 Porosità capillare e rapporto acqua / cemento

Porosità capillare



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.

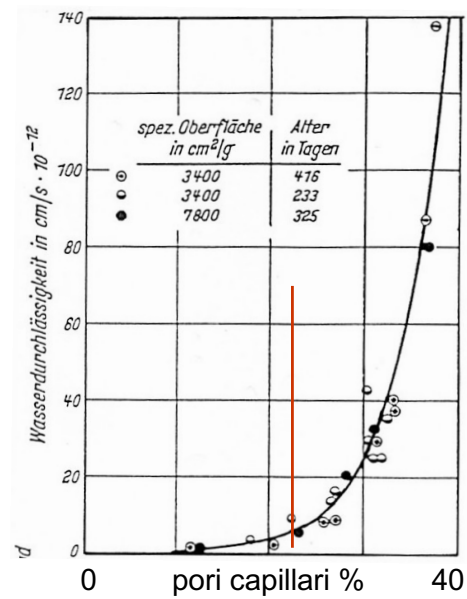
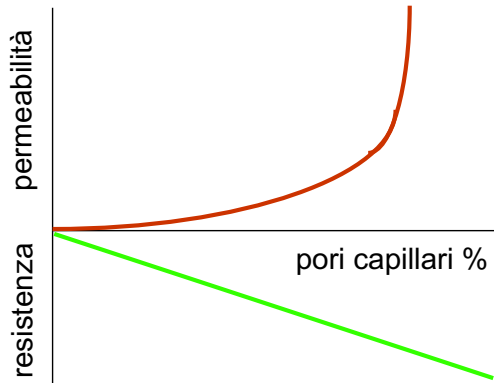
Porosità capillare per 90% di idratazione

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.

12.2 Porosità capillare e permeabilità

Effetto della porosità

All' aumentare della porosità capillare diminuisce la resistenza meccanica del CLS. 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.

12.3 Durabilità del calcestruzzo armato

Corrosione delle armature nel CLS

- L'ingresso dei cloruri o l'abbassamento del pH dovuto alla carbonatazione distrugge il film passivo

corrosione da cloruri



Corrosione localizzata dovuta alla penetrazione di ioni cloruro

corrosione da carbonatazione



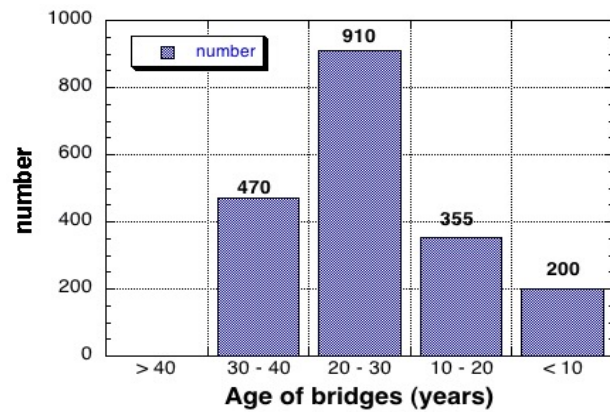
Corrosione uniforme e distacco del CLS dovuto alla carbonatazione

Quali sono le cause della corrosione ?

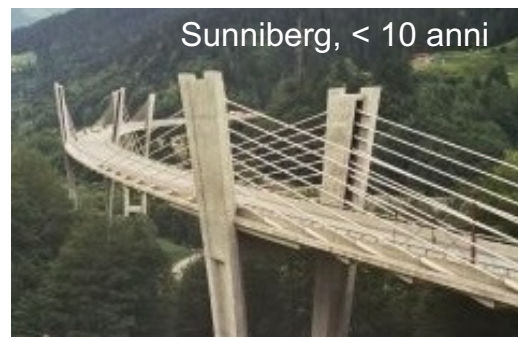
12.3 Durabilità del calcestruzzo armato

Costi della corrosione

Distribuzione di età dei ponti (Svizzera)



La riparazione di 1 m² di un ponte costa tra **800 e 1200 € (CH 2001)**



12.3 Durabilità del calcestruzzo armato

Un esempio tipico...

Risanamento totale Rofla A13 (2004/05)



Rimozione del copriferro e sostituzione delle armature corrose (Traversabrücke)

TBA GR Info Nr. 59

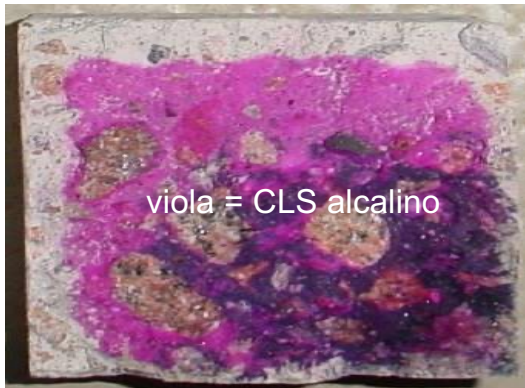
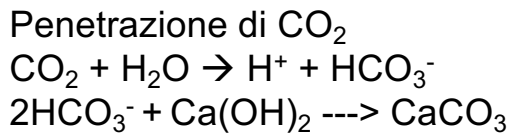
Salzwasser als Betonkiller

Von grosser Tragweite für den Zustand der gut dreissigjährigen Kunstbauten sind die damals üblichen geringen Betonüberdeckungen von 0 bis 3 Zentimetern und der damit einhergehende ungenügende Schutz der Stahlarmierungen. Die aus dem winterlichen Salzwasser stammenden Chloride reichern sich zudem im Beton an und reduzieren den natürlichen Korrosionsschutz

Cause della corrosione ?

“...copriferro con spessore insufficiente di 2 - 3 cm degli anni 70...”

12.4 Carbonatazione del calcestruzzo armato



Indicatore spruzzato sulla superficie

La carbonatazione neutralizza il CLS
pH < 10: depassivazione delle
armature

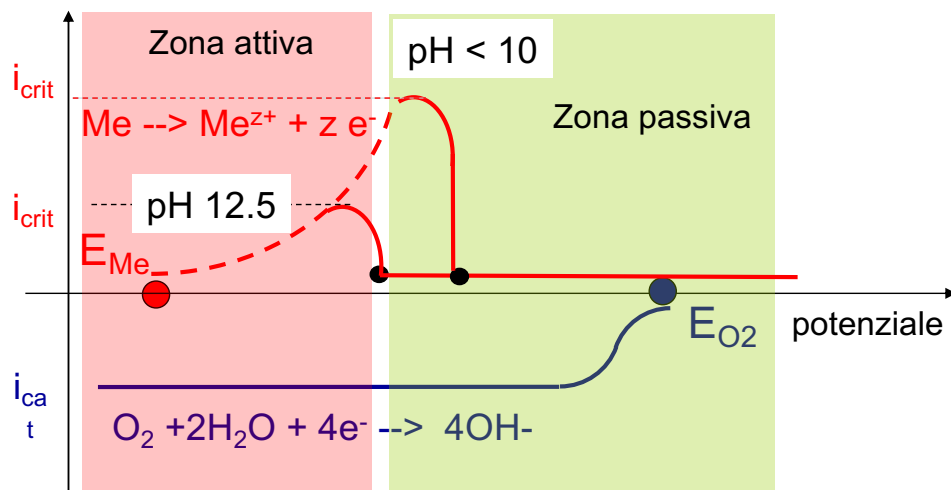
In presenza di H₂O e O₂
si forma la ruggine



La ruggine è più voluminosa del
Ferro -> il copriferro si distacca.

12.4 Depassivazione delle armature

La carbonatazione neutralizza il CLS, $\text{pH} < 10$: depassivazione delle armature. La densità critica per la passivazione aumenta fortemente.

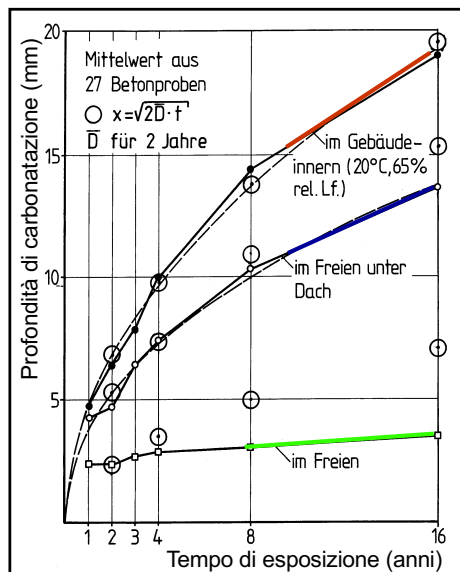


La condizione per passivazione spontanea $i_{crit} < i_{cat}$ non è più data. Le armature si corrodono in presenza di acqua e ossigeno.

Indicare il potenziale di corrosione per $\text{pH} > 12.5$ e $\text{pH} < 10$.

12.4 Cinetica della carbonatazione

Avanzamento della carbonatazione



Clima costante 65% UR (laboratorio)
(pori capillari vuoti, leggermente umido)

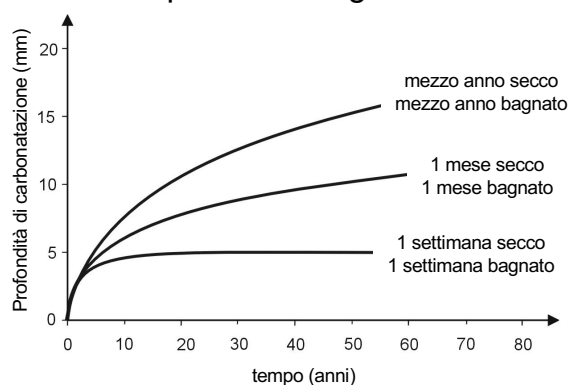
Clima esterno (riparato)
(a UR alte l'umidità condensa nei pori e riempie i pori piccoli -> penetrazione della CO₂ limitato)

Clima esterno con pioggia
(la pioggia riempie i pori capillari molto velocemente, processo di evaporazione lento -> ingresso della CO₂ cessa)

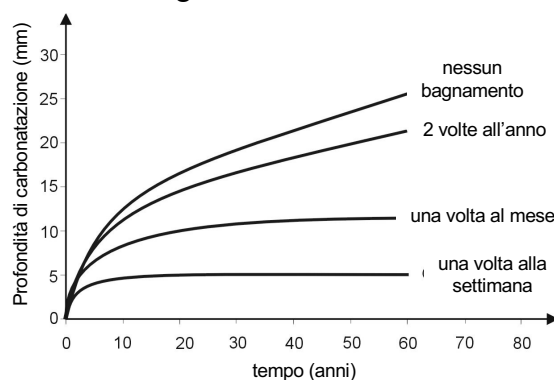
L'andamento della carbonatazione nel tempo segue una legge del tipo:
 $s = K \cdot t^{1/n}$ in CLS porosi l'esponente n vale circa 2 -> parabolico

12.4 Fattori che controllano la carbonatazione

Durata dei periodi di bagnamento



Cicli di bagnamento



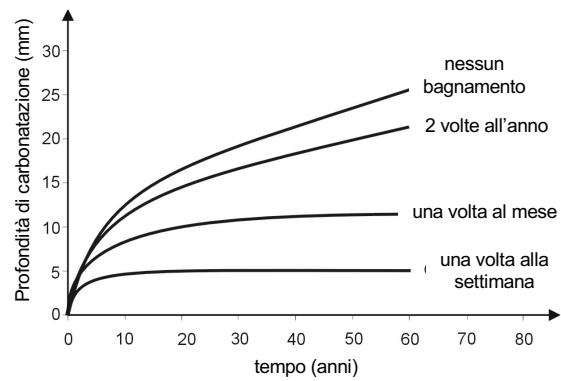
Oltre all' umidità relativa i parametri importanti sono il tempo in cui la struttura resta bagnato, ma anche la frequenza e la durata die cicli di bagnamento - asciugamento.

Corrosione delle armature da carbonatazione per strutture esposte alla pioggia: non sono state rispettate le norme (copriferro e qualità del CLS)

12.4 Fattori che controllano la carbonatazione



Perché si osserva la ruggine ?
Spessore del copriferro ?

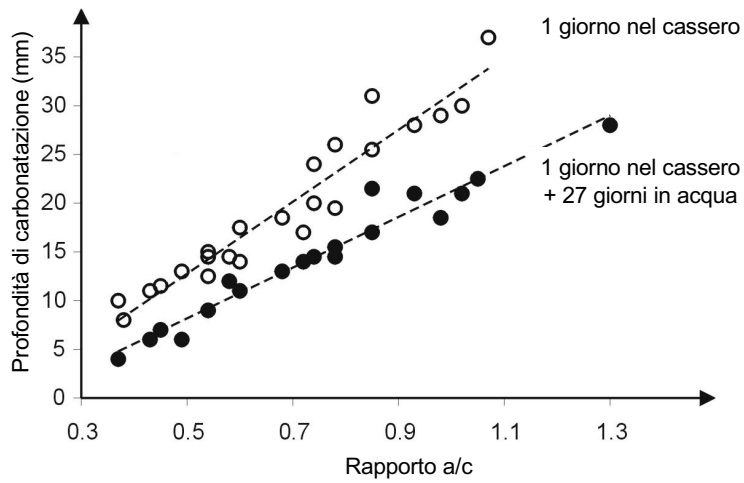


Piove una volta al mese. Profondità di carbonatazione ?

Corrosione delle armature da carbonatazione per strutture esposte alla pioggia: non sono state rispettate le norme (copriferro e qualità del CLS)

12.4 Effetto del rapporto a/c

Calcestruzzi di cemento Portland, mantenuti per 6 anni a 20 ° C e 50% UR.



La diminuzione del rapporto a/c e una buona maturazione riduce la porosità capillare della pasta cementizia e rallenta la penetrazione della carbonatazione.

12.4 Fattori che controllano la carbonatazione

Concentrazione dell' anidride carbonica

Al crescere del contenuto della CO_2 nell' atmosfera la velocità di penetrazione aumenta (fino a concentrazioni di 3 - 5%) -> prove accelerate

Temperatura

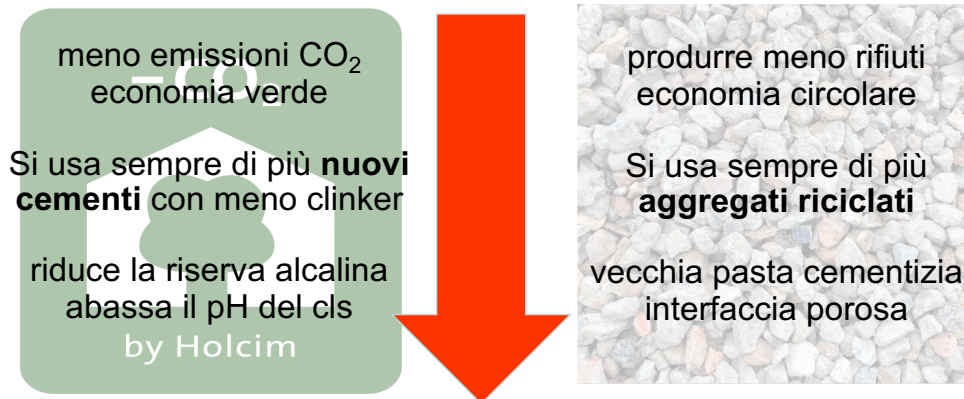
L'aumento della temperatura fa crescere la velocità di penetrazione

Alcalinità del calcestruzzo

La capacità di fissare la CO_2 è proporzionale all' alcalinità presente nella pasta cementizia, quindi dipende dalla quantità di cemento utilizzato.

Nel caso di cementi con aggiunte pozzolaniche (o anche CaCO_3) l'alcalinità è ridotta, questo potrebbe creare problemi nel futuro.

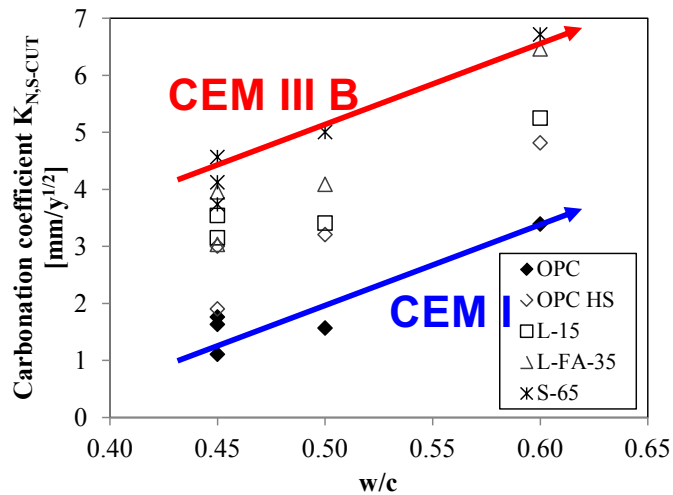
12.4 Strutture in CA sostenibili



Le proprietà protettive del calcestruzzo diminuiscono

12.4 Nuovi cementi con meno clinker

Per ridurre gli emissioni di CO₂ (proporzionale alla decomposizione del CaCO₃) si cerca di ridurre il tenore del clinker (CEM I, portland).



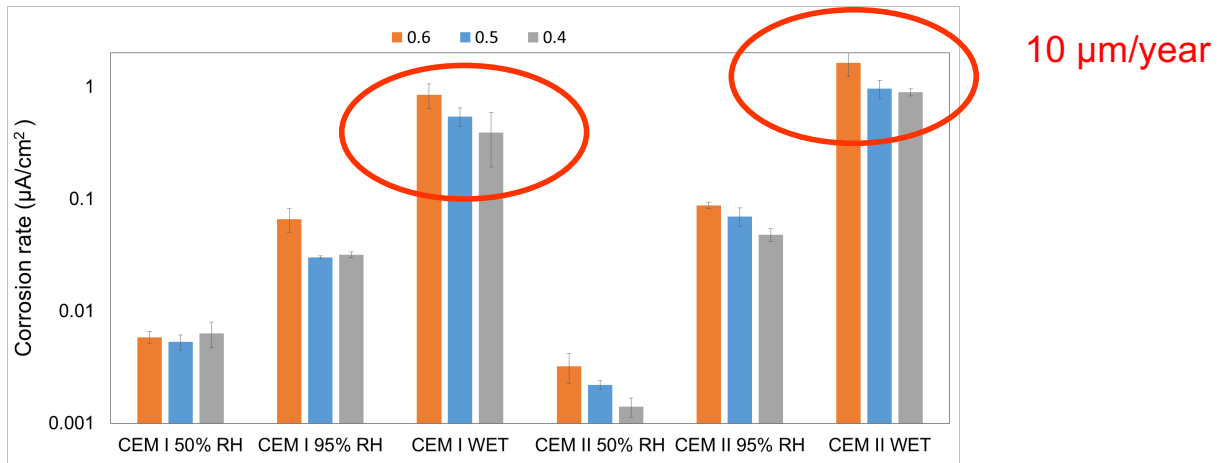
Leemann et al., *Cement and Concrete Composites* 62 (2015) 33 - 43

Questi cementi nella idratazione hanno una quantità ridotta di Ca(OH)₂, dunque una riserva alcalina più bassa. La velocità di carbonatazione è più veloce.

12.4 Nuovi cementi con meno clinker

Carbonatazione del cls significa depassivazione. Per avere corrosione ci vuole anche l'umidità

...le armature soffrono di **velocità di corrosione molto alte** solamente in ambienti con alta umidità o cicli bagnato/secco.



M. Stefanoni, B. Elsener, U. Angst, Nature Scientific Reports 8 (2018) 7407

12.4 Importanza del copriferro

Copriferro secondo le classe di esposizione XC

Le classe di esposizione sono dato nelle norme (ENV 206). I valori indicati sono i **valori minimi** da rispettare.

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

XC1 secco (interno)

XC2, XC3

XC4 cicli secco-bagnato

La corrosione delle armature da carbonatazione si può evitare

12.4 Importanza del copriferro

Copriferro deve essere specificato nel progetto

Responsabilità dell'ingegnere progettista -> ordine di fissare le armature



Controllare nell'esecuzione

Responsabilità del capo cantiere

Più una buona compattazione e una buona stagionatura.

La corrosione delle armature da carbonatazione si può evitare

12.5 Corrosione da cloruri

I cloruri penetrano dall' ambiente esterno (fino a 40 kg/m² sali disgelanti all' anno)



Forte riduzione della sezione

Quando il tenore dei cloruri nella soluzione dei pori supera il Cl_{crit} le armature sono depassivate

I prodotti di corrosione nei pit sono solubili (pH basso, complessi di ferro con idrossidi e cloruri)

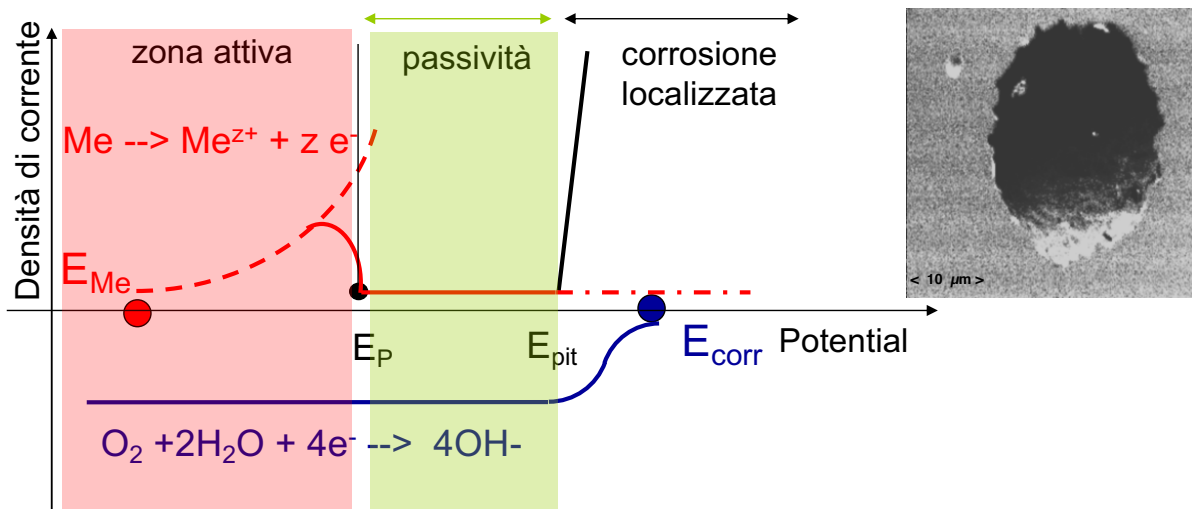
-> non si forma ruggine

-> il copriferro non si spacca

Perché è pericoloso se il copriferro non si spacca ?

12.5 Corrosione da cloruri

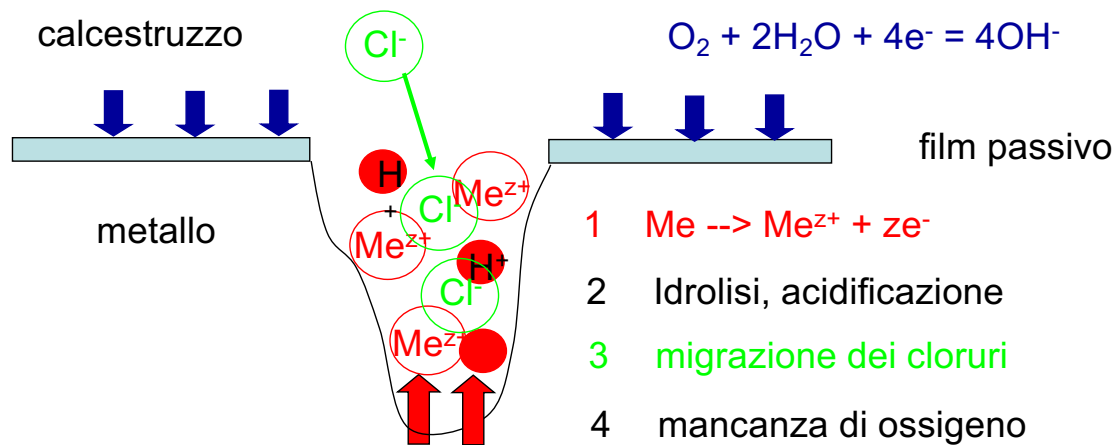
Corrosione localizzata



Il film di ossido protettivo (film passivo) viene distrutto dai cloruri, le armature sono depassivate. In presenza di H_2O e O_2 inizia la corrosione localizzata.

12.5 Corrosione da cloruri

Processi successivi nel stabilire la propagazione del pitting. Si forma un ambiente occluso - molto acido e ricco di cloruri

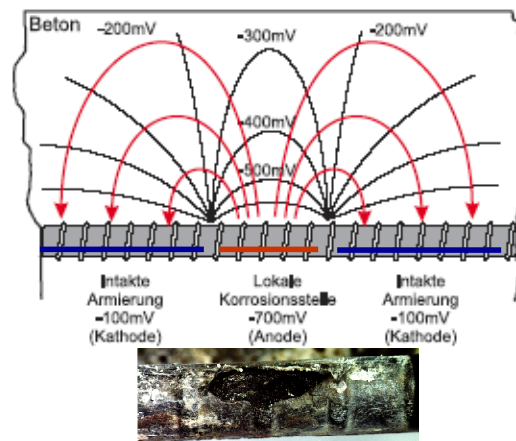


Più intenso è la dissoluzione del metallo più si formano condizioni aggressive. I prodotti di corrosione sono solubili.

12.5 Corrosione da cloruri - macrocoppia

armature intatte
passivi, E ca. -0.1 V

zone catodiche
(O₂, di)



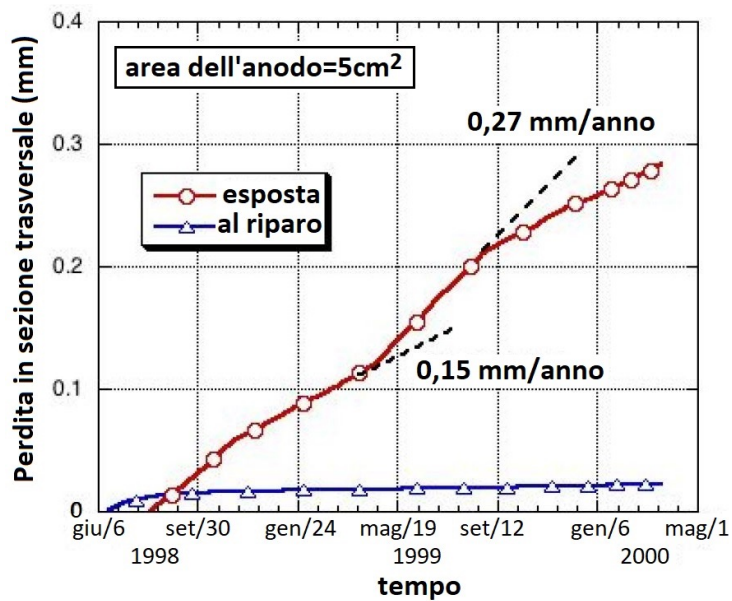
corrosione localizzata
E ca. - 0.7 V

zona anodica
(tenore di Cl⁻ alto,
pH basso)

La circolazione di corrente dalle zone anodiche a quelle catodiche determina un movimento di cloruri in senso opposto (in quanto di carica negativa). L'ambiente nella zona anodica diventa più aggressivo.

Il meccanismo di macrocoppia risulta in velocità di dissoluzione locale molto alte, può arrivare anche a 1 mm/anno.

12.5 Corrosione da cloruri – velocità della corrosione



Esperimenti su un ponte negli alpi svizzeri con carote di calcestruzzo armato

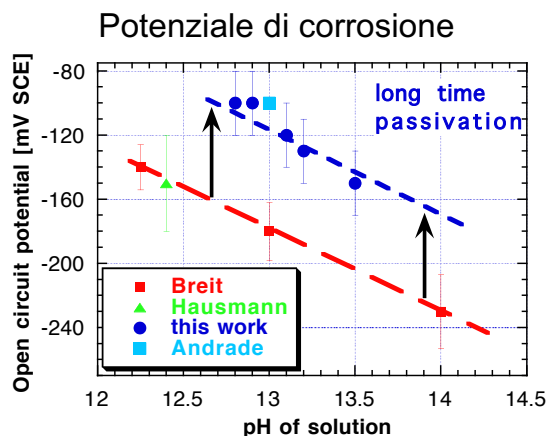
Misure della corrente macrocoppia.

Nota la differenza tra inverno e estate.

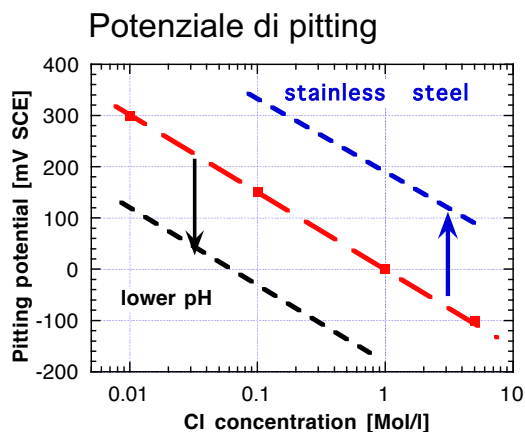
L'esposizione della superficie all' acqua (contenente cloruri) è decisivo per la velocità della propagazione della corrosione localizzata.

12.5 Condizione per la corrosione localizzata

La corrosione localizzata inizia quando $E_{\text{pit}} < E_{\text{corr}}$



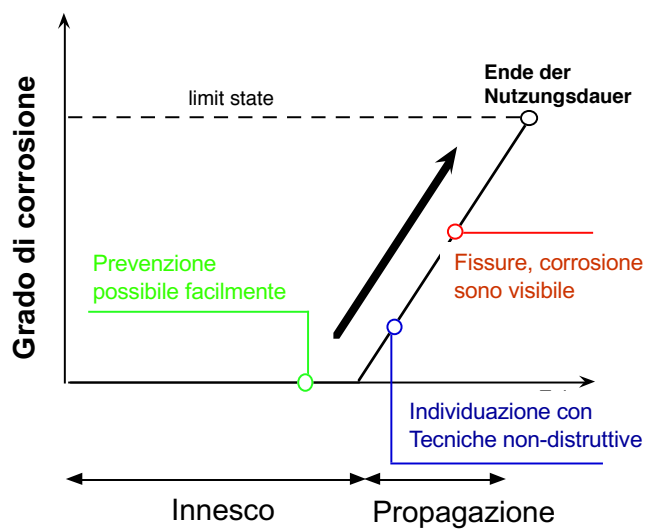
Il potenziale di corrosione E_{corr} aumenta al diminuire del pH
 -> rischio molto più alto in CLS carbonatato



Il potenziale di pitting E_{pit} diminuisce all' aumentare del tenore dei cloruri
 -> rischio aumenta

Comportamento tipico di un sistema: non esiste un unico contenuto critico di cloruri. Dipende dalle caratteristiche del CLS e dall' esposizione ambientale.

12.6 Vita utile delle strutture in cemento armato



armature in CLS alcalino
sono passivate

Penetrazione di CO_2 / Cl^-

armature sono depassivate
(fine del periodo di innesco)

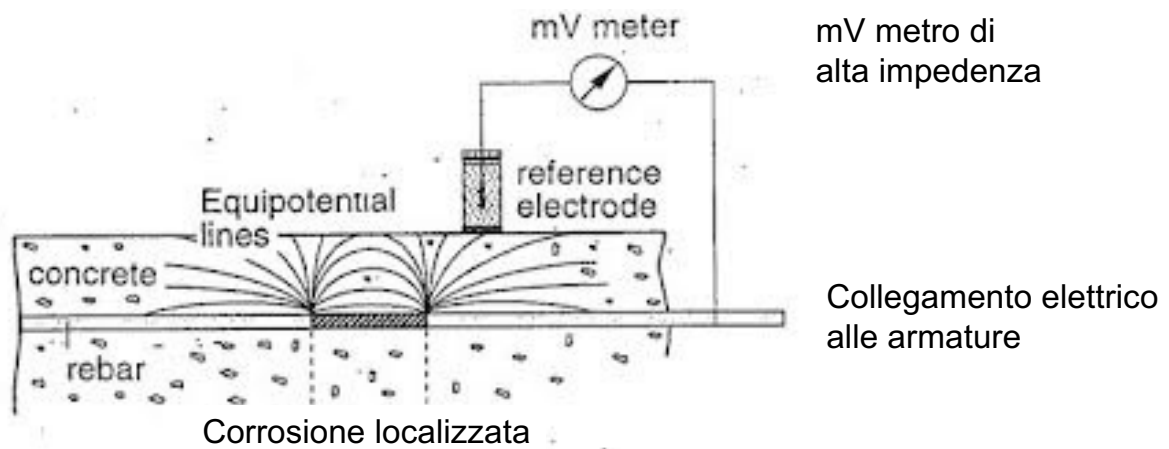
In presenza di umidità e di O_2

periodo di propagazione
della corrosione

Primo si individua un (possibile) danno, più semplice (e più economico) è la sua riparazione ("The rule of five").

12.6 Mappature del potenziale

Tecniche non-distruttive per individuare zone con corrosione
Mappatura del potenziale



12.6 Mappature del potenziale

Tecniche non-distruttive per individuare zone con corrosione
Strumentazione semplice



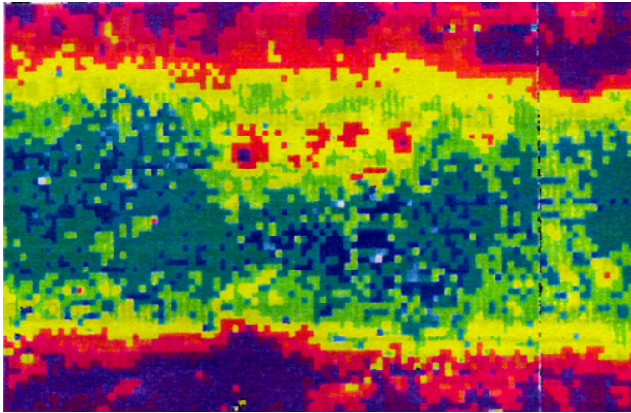
Durabilità del calcestruzzo armato
Tecnologia dei Materiali e Chimica Applicata

Bernhard Elsener
AA 2022/2023

12.6 Mappature del potenziale

Mappatura del potenziale

Consente di individuare, prima che il danno diventi evidente, le zone in cui le armature si corrodono.



L'individuazione della corrosione è più facile con ...

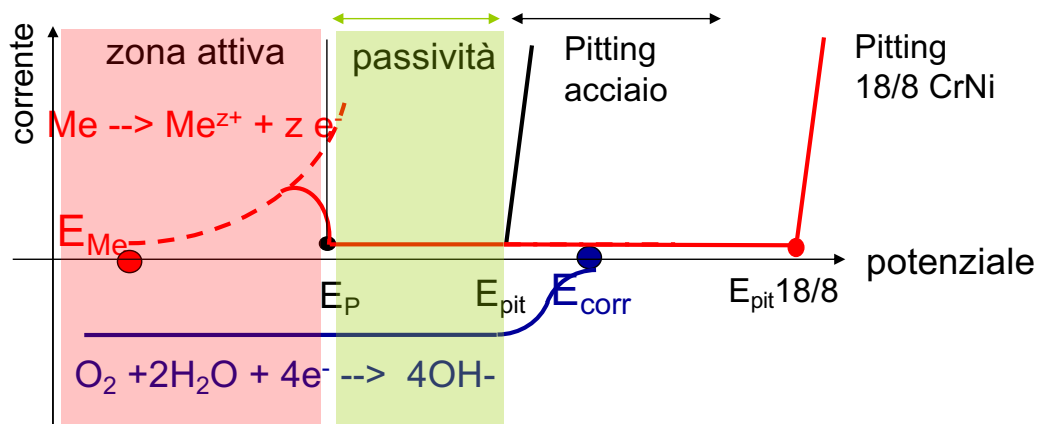
- un copriferro piccolo
- un CLS umido
- differenze tra umido / secco
- griglia di misura fine

L'individuazione delle zone con corrosione si base sulle differenze di potenziale Superfici molto grandi si possono misurare con multi-elettrodi con ruote.

-> [più informazioni si trovano sul sito](#)

12.7 Armature in acciaio inossidabile

Spesso, le condizioni dell' ambiente sono talmente aggressive (soprattutto elevato tenore di cloruri) che metodi sulla base della tecnologia del calcestruzzo (copriferro, qualità del cls) non sono sufficienti per garantire la vita utile della struttura.

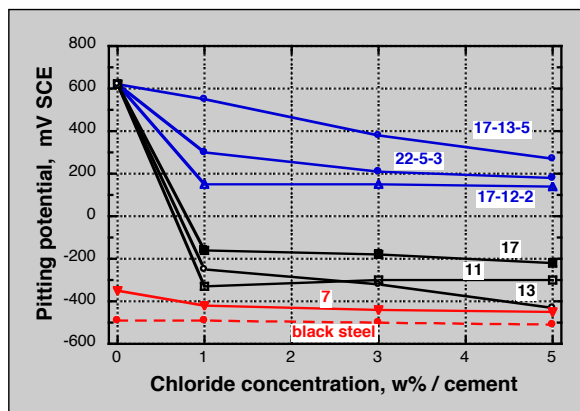


In questi condizioni acciai inossidabili (tipo 18Cr/8Ni) con un potenziale di pitting molto positivo possono evitare la corrosione dovuto ai cloruri.

12.7 Armature in acciaio inossidabile

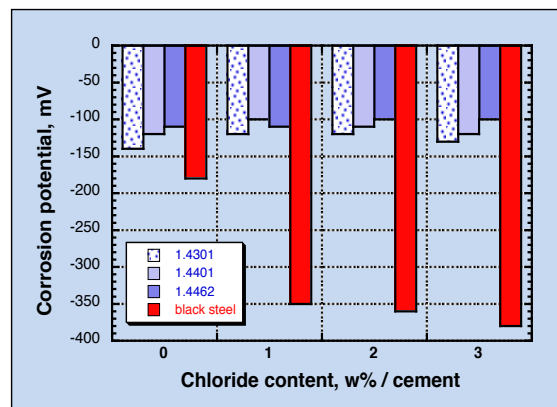
Risultati di laboratorio

Potenziale di pitting in malta carbonatata, 0 – 5 % Cl⁻



Nürnberg, U., Beul, W. Onuseit, G.,
Bauingenieur 70 (1995) 73 - 81

Potenziali di corrosione in malta 0 – 3% Cl⁻



T. Pastore, P. Pedferri, L. Bertolini, F. Bolzoni
C. Cigada, Duplex Stainless Steels (1991)

Ottima resistenza alla corrosione localizzata per Cr > 17%

12.7 Armature in acciaio inossidabile

Stonecutters Bridge, Hongkong



1.4462 for towers skin reinforcement
Expected service life 120 years

Haynes Inlet Slough Bridge, Oregon (USA)



400 tons of stainless steel reinforcement
Expected service life 120 years

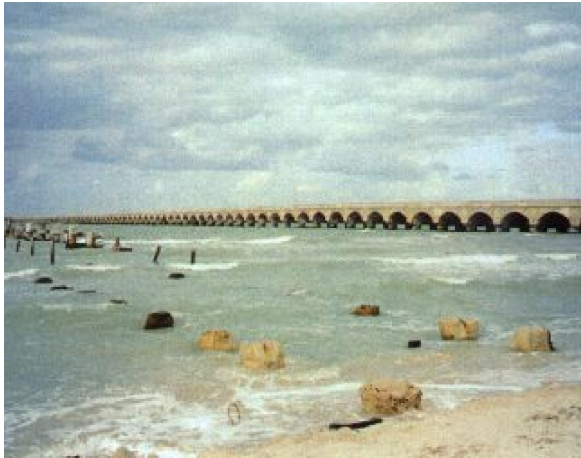
Perché utilizzare acciai inossidabili come armature ?

Durabilità del calcestruzzo armato
Tecnologia dei Materiali e Chimica Applicata

Bernhard Elsener
AA 2022/2023

12.7 Armature in acciaio inossidabile

Esempio (molto famoso) in pratica: Mole in Yucatan (1941)



ARMINOX, www.stainless-rebar.org

Armature in acciaio inossidabile
Mole in Yucatan, Messico, 1937 - 41
Lunghezza 1.75 km lang, 200 to 18/8
CrNi Stahl

Tenore di cloruri in profondità 75 mm
1.2% per peso cemento, clima tropi-
cale, acqua di mare

> Non ci sono fenomeni di corrosione

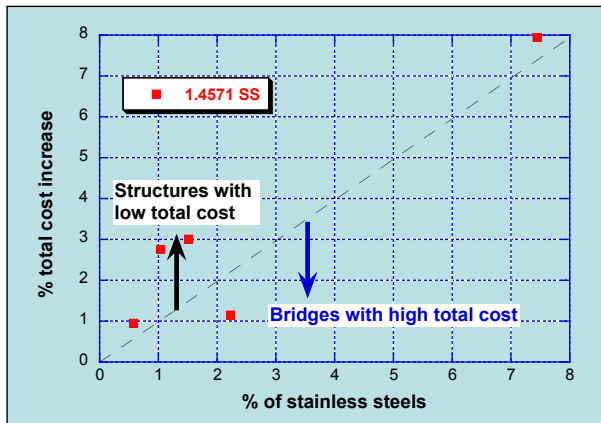
La struttura in acciaio normale è
completamente distrutta.

Primo di tutto: CLS di alta qualità, copriferro secondo le norme
 $a/c \leq 0.45$, copriferro > 55 mm

12.7 Armature in acciaio inossidabile

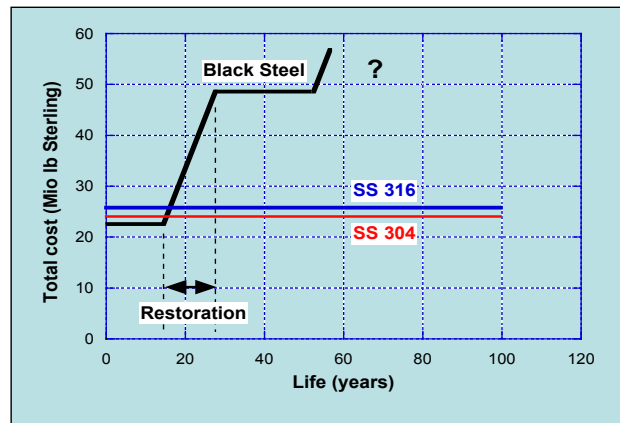
Calcoli dei costi totali (life cycle costing)

Costi iniziali ...



Informazioni da F. Hunkeler, VSS Report 543 (2000) (ponti in Svizzera)

Costi totale (con riparazione) ...



Calcoli per ponte Oeland, Svezia (da www.stainless-rebar.org)

Pochi percentuali di costi in più permettono vita di servizio > 120 anni

12.8 Riassunto

L'acciaio nel calcestruzzo sano è protetto di un sottile film di ossido (film passivo) che si forma spontaneamente in ambiente alcalino ($\text{pH} > 12$).

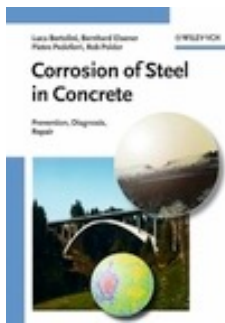
Questo film protettivo viene depassivato (diventa instabile) quando il pH del calcestruzzo diminuisce dovuto alla carbonatazione a $\text{pH} < 10$ (reazione dei componenti alcalini del cls con la CO_2 dell' ambiente).

Il film protettivo può anche essere distrutto dai ioni cloruro (anche in ambiente alcalino) e l'acciaio diventa depassivato.

In entrambi i casi la corrosione delle armature avviene in presenza di ossigeno e acqua (umidità) nel calcestruzzo.

Le norme per l'applicazioni del calcestruzzo armato definiscono per ogni classe di esposizione il copriferro minimo e il rapporto a/c massimo da applicare per la struttura.

Per chi ne vuole sapere di più....



L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli, R. Polder, "Corrosion of Steel in Concrete"
Wiley VCH (2013)

P. Pedferri, L. Bertolini
La durabilità del calcestruzzo armato
McGraw-Hill (2000)