



5th Edition

GIC

**GIORNATE ITALIANE DEL CALCESTRUZZO
E DEGLI INERTI DA COSTRUZIONE E DEMOLIZIONE**
ITALIAN CONCRETE DAYS

18-20 April 2024
Piacenza - Italy



VENERDÌ 19 APRILE
Quartiere Fieristico di Piacenza Expo
Sala C - Ore 09:30 - 12:30

**PROTEZIONE CATODICA:
UNA TECNICA PER PREVENIRE
E CONTROLLARE LA CORROSIONE
DELLE ARMATURE**

Seminario organizzato da

APCE
ASSOCIAZIONE PER LA PROTEZIONE DALLE CORROSIONI ELETTROLITICHE



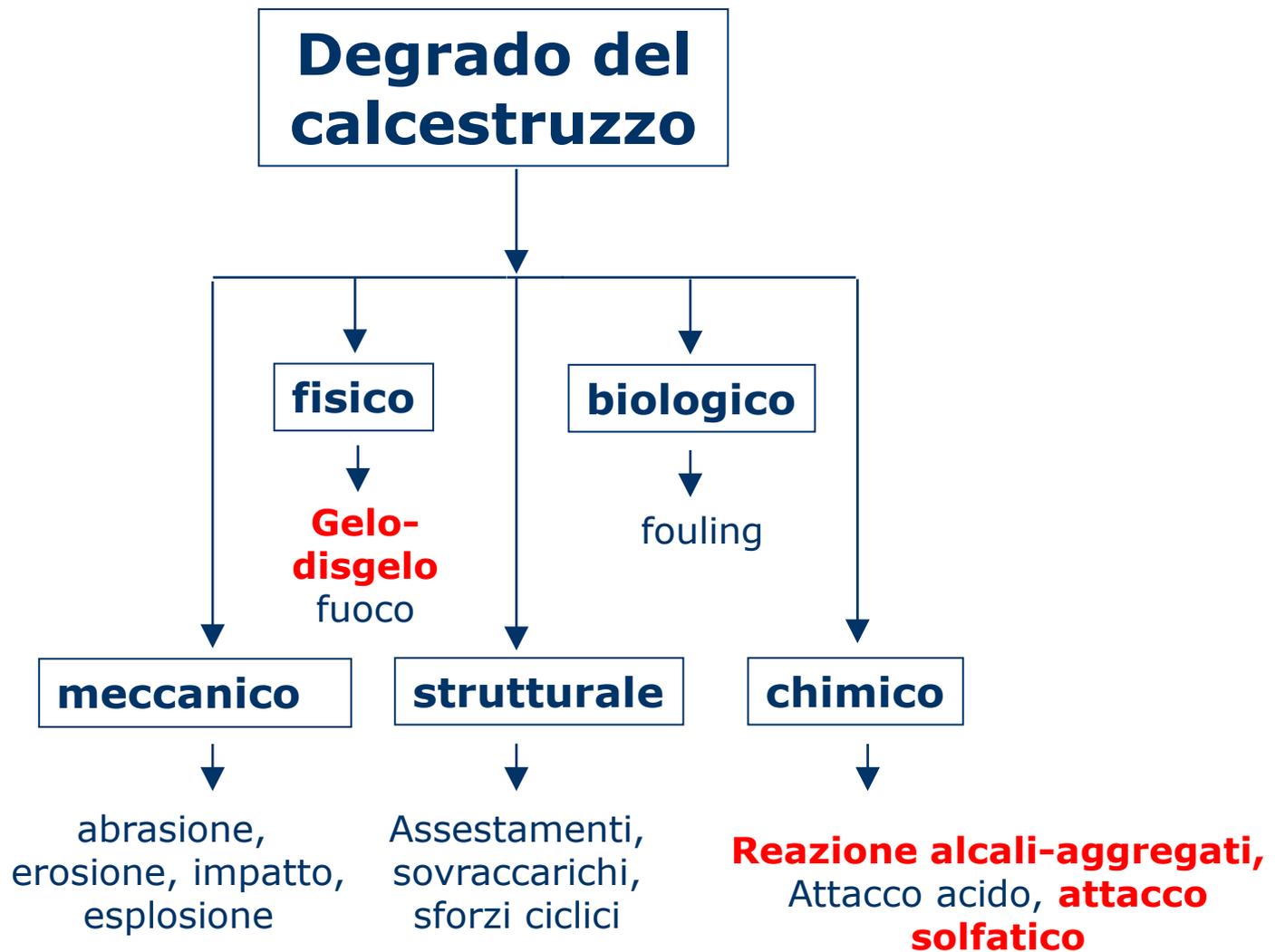
POLITECNICO
MILANO 1863

Corrosione delle armature nel calcestruzzo e metodi di prevenzione e protezione

Prof. Fabio Bolzoni (fabio.bolzoni@polimi.it), Prof. Marco Ormellese
Politecnico di Milano

Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica “G.Natta”
Laboratorio di corrosione dei materiali «Pietro Pedeferri»

Durabilità del calcestruzzo



Corrosione delle armature

Soluzione nei pori:

Ca(OH)_2
NaOH
KOH



pH \approx 13-14



Passività

Condizioni di stabilità film passivo:

1) pH > 11,5



Carbonatazione

2) assenza di cloruri



Acqua di mare
Sali antigelo

Corrosione delle armature - carbonatazione



Corrosione delle armature – cloruri (sali antigelo)

Milano: sovrappasso Monte Ceneri, dopo circa 40 anni dalla costruzione



Milano, tangenziale est, dopo circa 30 anni dalla costruzione



Corrosione delle armature – cloruri (acqua di mare)

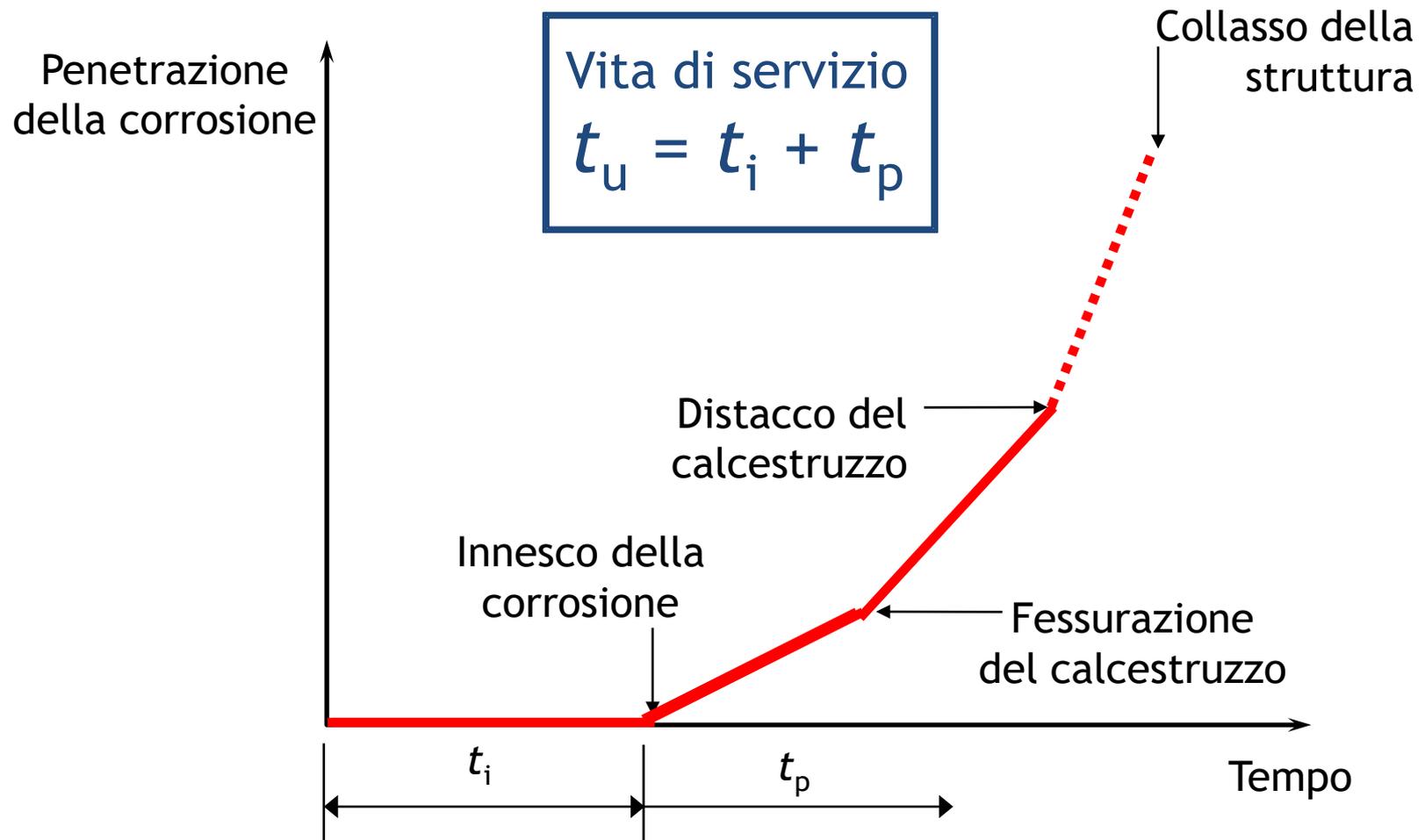


**Porto di Manfredonia
Costruzione 1979 (foto 2004)**

Corrosione da cloruri – sali antigelo

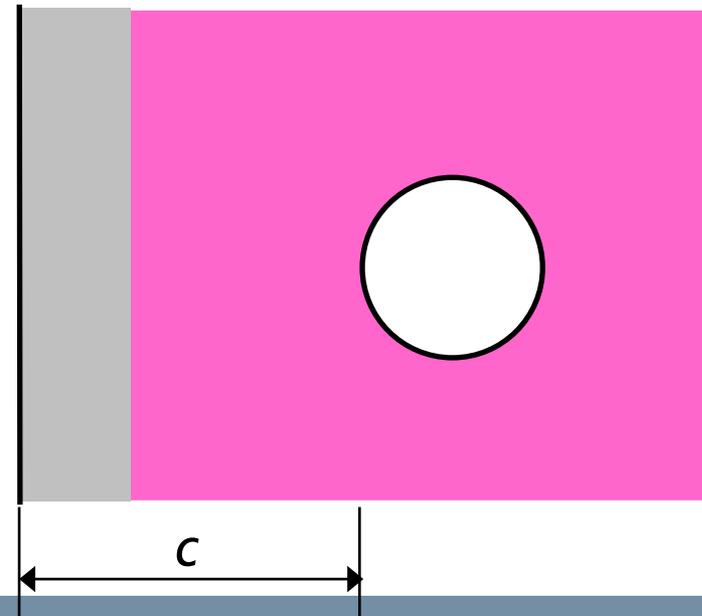
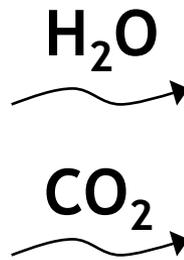
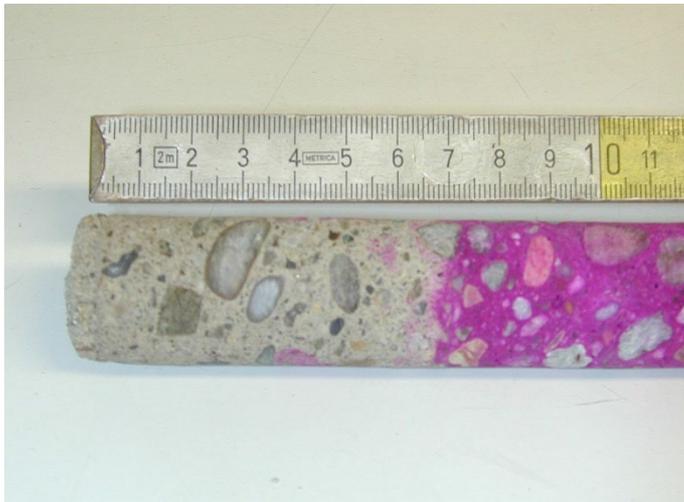
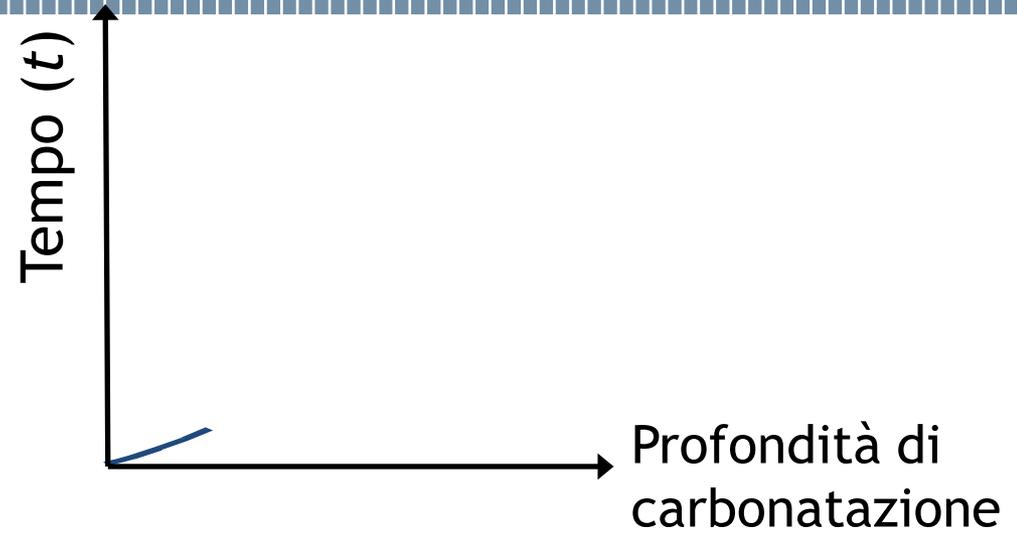


Vita utile delle strutture in c.a. (Modello di Tuutti)



Tuutti K Corrosion of steel in concrete 1982

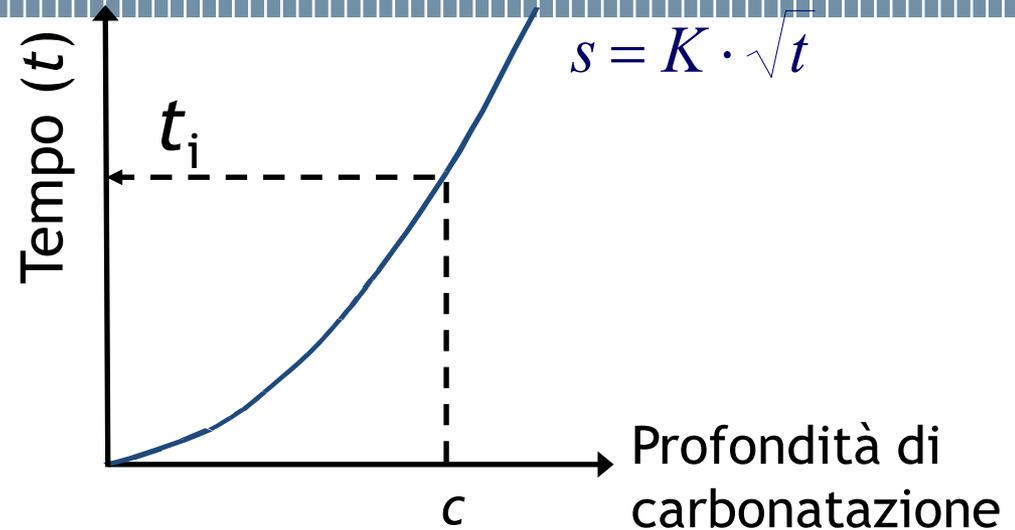
Corrosione da carbonatazione



Corrosione da carbonatazione

Tempo di innesco:

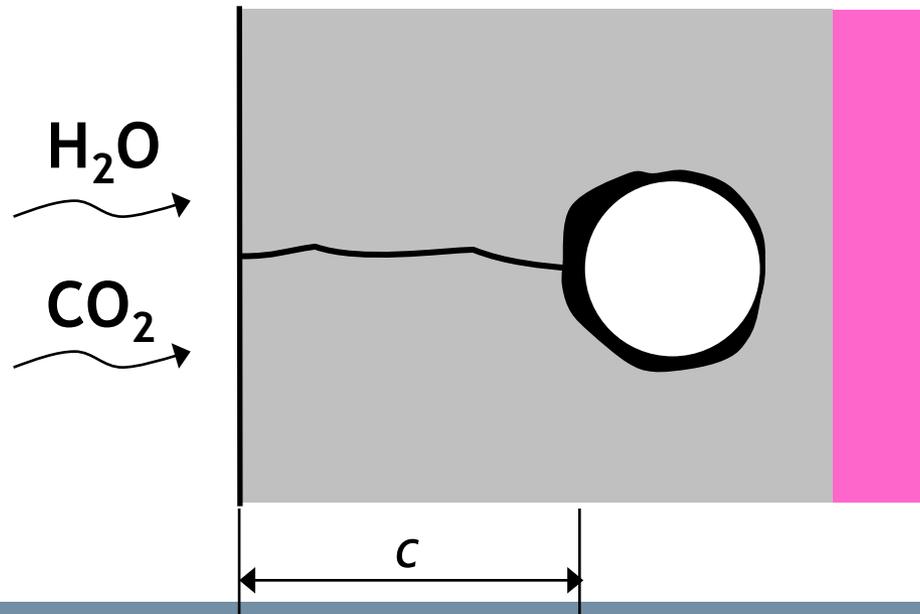
$$t_i = \left(\frac{c}{K} \right)^2$$



Tempo di propagazione (t_p):

- velocità di corrosione (V_{corr})
- penetrazione limite (P_{lim})

$$t_p = \frac{P_{\text{lim}}}{V_{\text{corr}}}$$



Corrosione da carbonatazione (innesco)

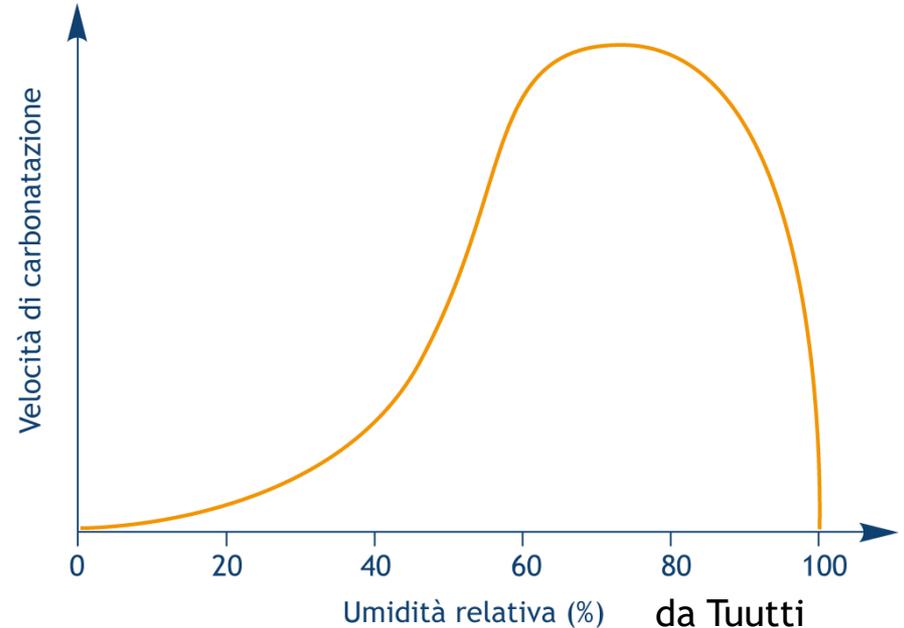
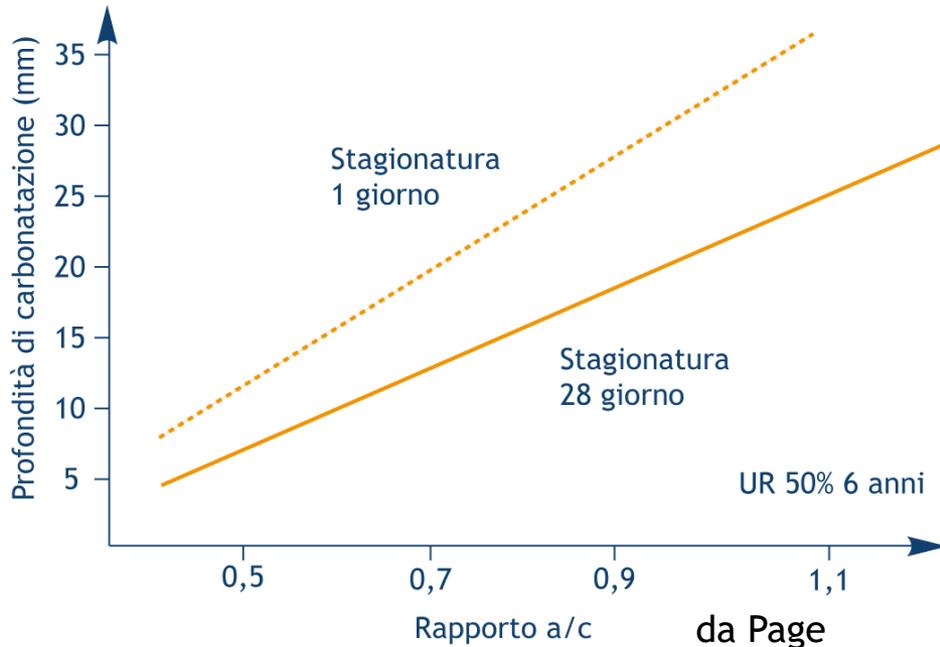
La velocità di carbonatazione dipende da:

✓ materiale

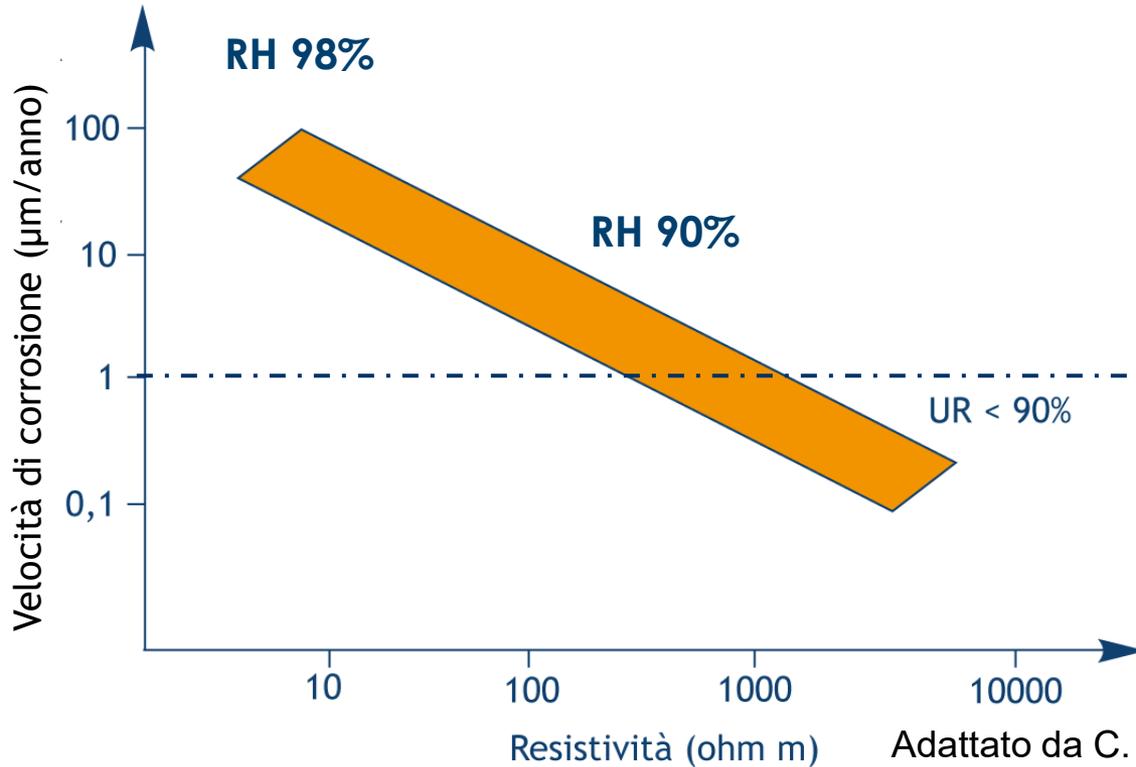
- ✓ porosità capillare
- ✓ aria intrappolata
- ✓ fessure
- ✓ (tipo di cemento)

✓ ambiente

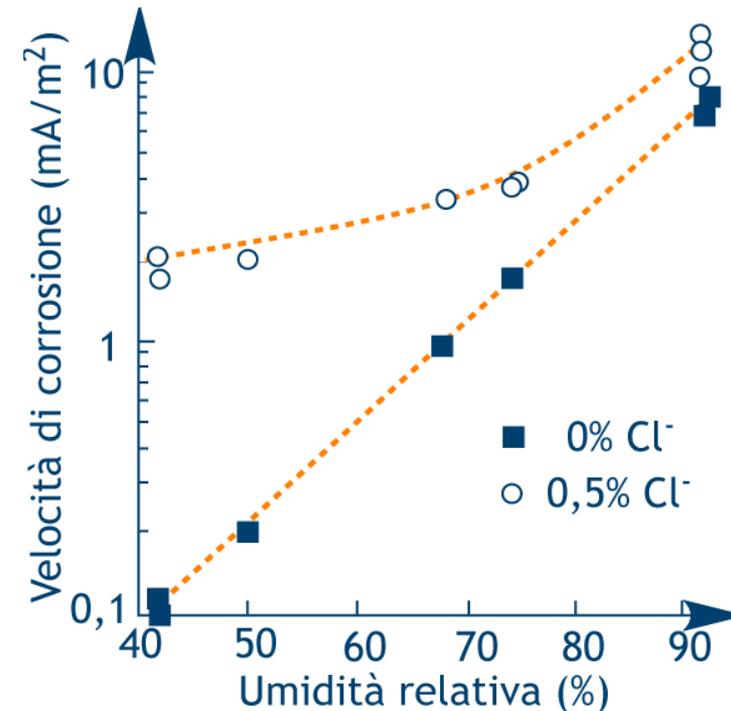
- ✓ umidità relativa
- ✓ temperatura
- ✓ contenuto di CO_2



Corrosione da carbonatazione (propagazione)



Adattato da C.
Andrade et al 1988



da Page et al (1991)

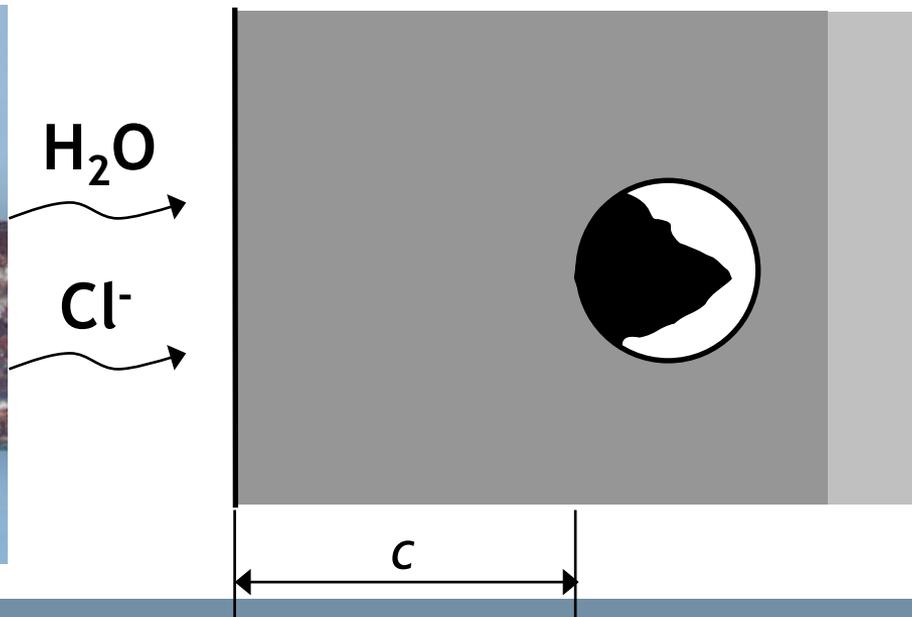
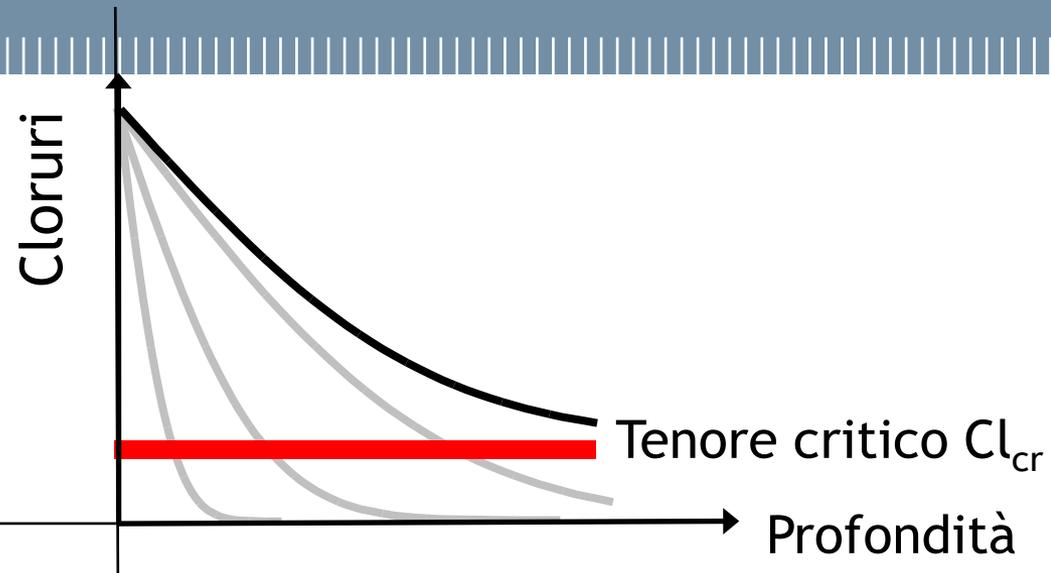
La **resistività** del calcestruzzo dipende da porosità e contenuto di acqua

In presenza di cloruri la velocità di corrosione aumenta in modo significativo

Corrosione da cloruri

Vita di servizio

$$t_u \approx t_i$$



Innesco della corrosione da cloruri

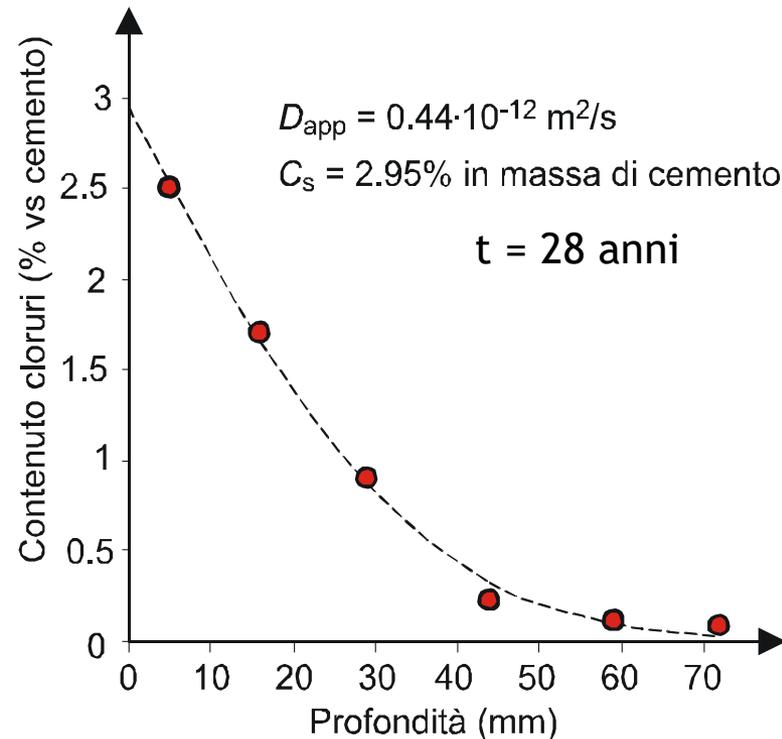
La corrosione si innesca quando si raggiunge una **concentrazione critica di cloruri** a livello delle armature.

Il tempo di innesco della corrosione dipende da:

- **Trasporto** di cloruri
- Spessore di **copriferro**
- **Concentrazione critica** di cloruri

Soluzione analitica (2° legge di Fick della diffusione di massa)

$$C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$$



Profilo di concentrazione dei cloruri misurato su un pontile a mare (zona degli spruzzi)

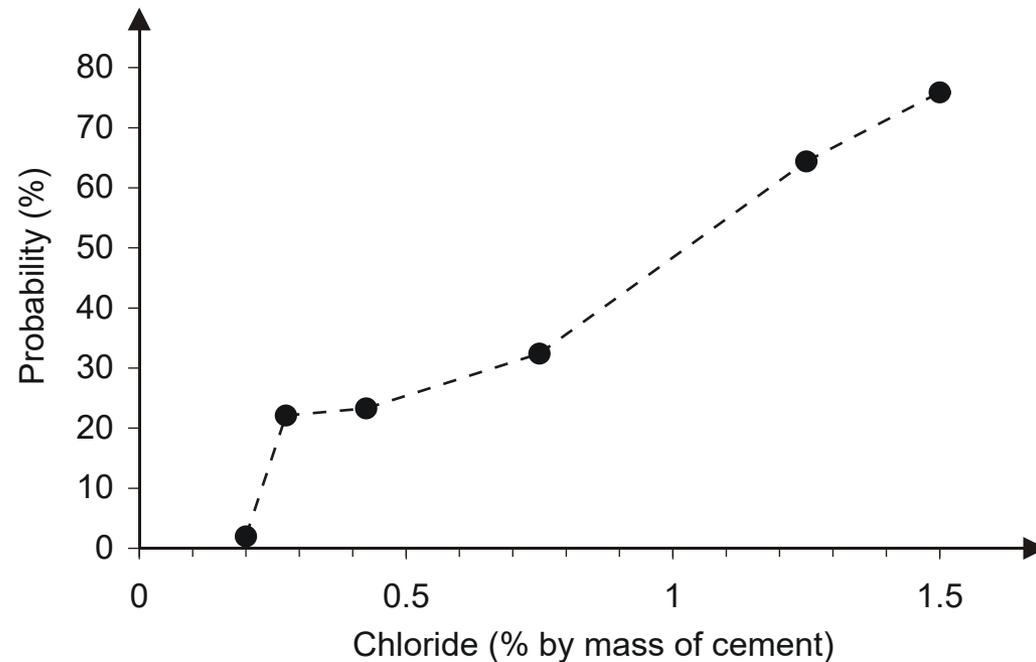
Innesco della corrosione da cloruri

La corrosione si innesca quando si raggiunge una **concentrazione critica di cloruri** a livello delle armature.

Valori indicativi (% in massa vs cemento)

- Acciaio al carbonio **0,4 ÷ 1%**
- Acciaio zincato **1 ÷ 1.5%**
- Acciai inossidabili **3.5 ÷ 8%**

A destra:
Correlazione tra contenuto di cloruri e percentuale di armature corrose in solette di ponti



Da P. R. Vassie, Proc. of Inst. Of Civ. Eng., 1984

Corrosione delle armature nelle strutture in c.a.p.

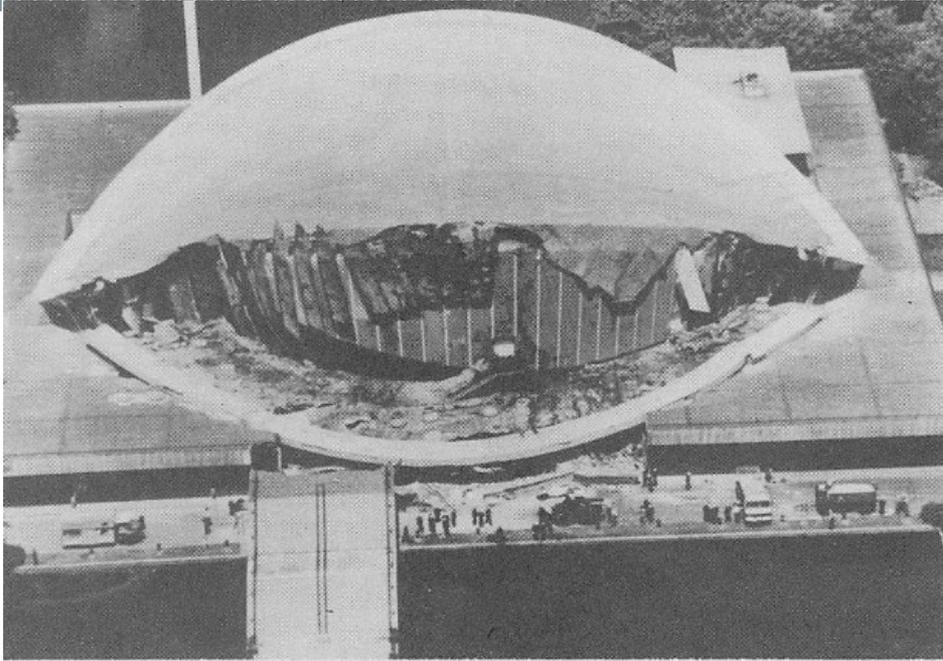
Le conseguenze della corrosione possono essere molto gravi sulle armature di precompressione.

Le armature da precompressione possono essere soggette a **infragilimento da idrogeno**:

- suscettibilità degli acciai ad alta resistenza
- elevate sollecitazioni meccaniche
- presenza di idrogeno atomico

La **prevenzione della corrosione** da carbonatazione e da cloruri è di primaria importanza anche per prevenire l'infragilimento da idrogeno

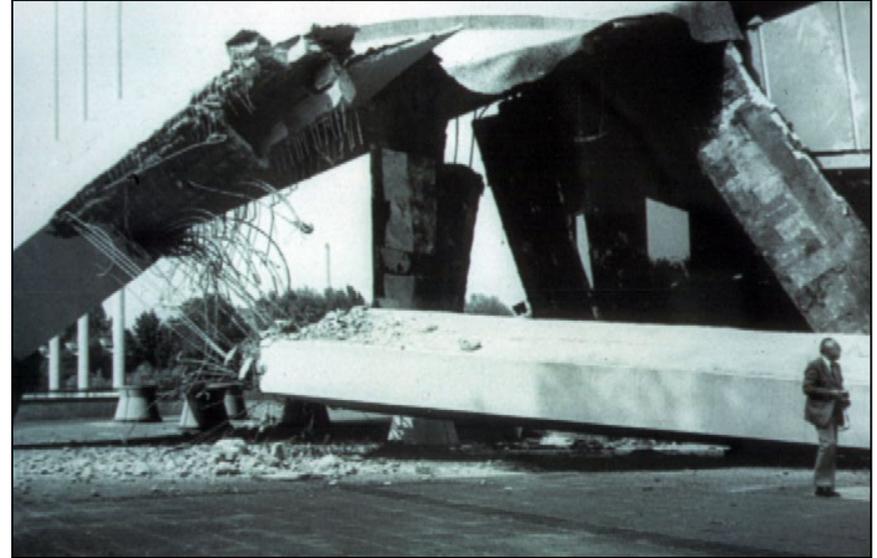
Infragilimento da idrogeno



**Congress Hall (Berlino, Germania),
costruita nel 1961, crollata 1980** (in alto)

B. Isecke, in Crane A.P. editor "Corrosion of reinforcement in Concrete Construction", Ellis Horwood Limited, 1983, p.79.

**Ponte in c.a.p (Stoccarda, Germania) in
basso a destra**



Infragilimento da idrogeno



Cedimento di barre a elevata resistenza, Fiera Milano, 1997 (sinistra)

Infragilimento da idrogeno di armature a elevata resistenza, 2002 (costruzione 1979) (destra)

Pietro Pedferri "Calcestruzzo armato e precompresso. Cedimenti strutturali e corrosione delle armature"
L'Edilizia, N. 129, agosto 2003, pp 50-59.

EN 206: Concrete - Part 1. Specification, Performance, Production and conformity

EN 1992:1 (*Eurocode 2*): Design on concrete structures – Part 1: General rules and rules for building

EN 13670-1: Execution of reinforced concrete structures

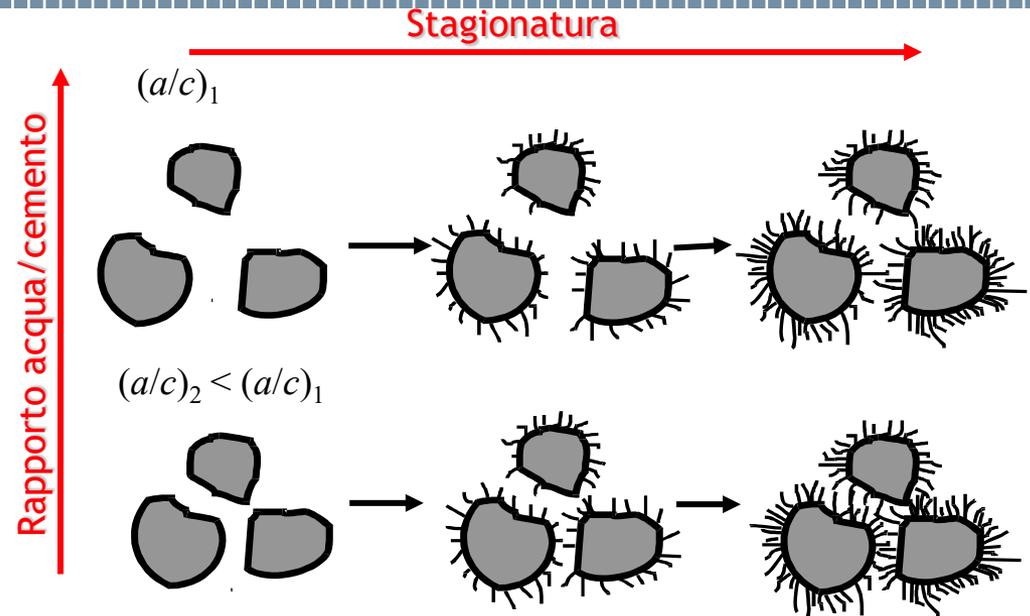
Raccomandazioni:

- Massimo rapporto a/c
- minimo spessore di copriferro
- minimo tempo di stagionatura

Progetto della durabilità

Proprietà del calcestruzzo

- Rapporto a/c
- Stagionatura
- Tipo di cemento / aggiunte
- Contenuto di cemento
- Additivi
- Lavorabilità
- Posa in opera
- Resistenza a compressione
- Calcestruzzi speciali (SCC, HPC, ...)



Progetto della durabilità

Spessore di
copriferro

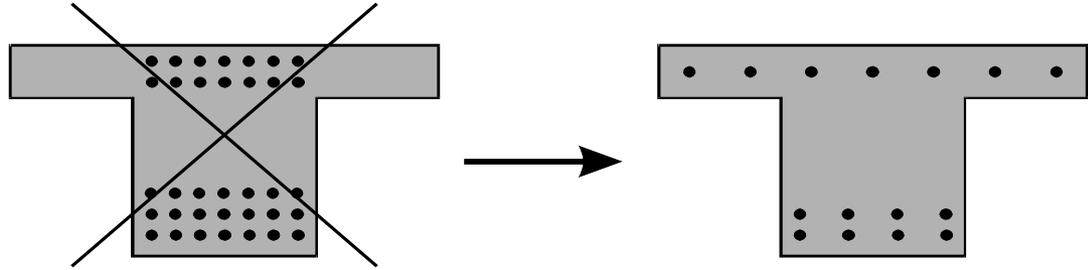
Uno spessore molto alto può avere un comportamento peggiore rispetto a quello atteso (es. maggiore apertura delle fessure).

Spessore effettivo in opera →



Progetto della durabilità

Progetto della
struttura



Vita nominale e durabilità

Vita nominale (V_N): “... numero di anni nel quale la struttura, purchè soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo per la quale è destinata”. Le NTC richiedono di fissare valori minimi:

- opere ordinarie, maggiore o uguale a 50 anni
- grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di grandi dimensioni o importanza strategica, maggiore o uguali a 100 anni

La **durabilità**, definita come conservazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali e delle strutture,, deve essere garantita attraverso:

- un’opportuna **scelta dei materiali**
- un opportuno **dimensionamento delle strutture**,
- comprese le **eventuali misure di protezione e manutenzione**

Valori limite raccomandati - UNI EN 206-1

Classe di esposizione		Max. <i>a/c</i>	Min. resist.	Min. cem. (kg/m ³)
Nessun rischio	<i>X0</i>	-	C12/15	-
Corrosione da carbonatazione	<i>XC1</i> (secco/saturo)	0,65	C20/25	260
	<i>XC2</i> (sempre umido)	0,60	C25/30	280
	<i>XC3</i> (mod. umido)	0,55	C30/37	280
	<i>XC4</i> (cicli bagn.)	0,50	C30/37	300
Corrosione da cloruri da acqua di mare	<i>XS1</i> (sulla costa)	0,50	C30/37	300
	<i>XS2</i> (sommerso)	0,45	C35/45	320
	<i>XS3</i> (spruzzi)	0,45	C35/45	340
Corrosione da cloruri da altre fonti	<i>XD1</i> (mod. umido)	0,55	C30/37	300
	<i>XD2</i> (umido)	0,55	C30/37	300
	<i>XD3</i> (cicli bagn.)	0,45	C35/45	320

1) nel presupposto di una vita utile di 50 anni

Durata della stagionatura - UNI ENV 13670-1

Classi X0 e XC1:

- almeno 12 ore

Altre classi:

- finché non si raggiunge il 50% della resistenza richiesta a 28 giorni

Tempo di stagionatura (giorni)

	Sviluppo della resistenza del calcestruzzo: $r = R_{cm2} / R_{cm28}$			
Temperatura della superficie del calcestruzzo (T):	Rapido $r \geq 0.50$	Medio $r = 0.30$	Lento $r = 0.15$	Molto lento $r \leq 0.15$
$T \geq 25$	1.0	1.5	2.0	3.0
$25 > T \geq 15$	1.0	2.0	3.0	5
$15 > T \geq 10$	2.0	4.0	7	10
$10 > T \geq 5$	3.0	6	10	15

Spessore di copriferro - UNI EN 1992-1 (Eurocodice 2)

Classe di esposizione		Minimo spessore di copriferro (mm) (*)	
		c.a.	c.a.p.
Nessun rischio	<i>X0</i>	10	10
Corrosione da carbonatazione	<i>XC1</i>	15	25
	<i>XC2, XC3</i>	25	35
	<i>XC4</i>	30	40
Corrosione da cloruri	<i>XS1, XD1</i>	35	45
	<i>XS2, XD2</i>	40	50
	<i>XS3, XD3</i>	45	55

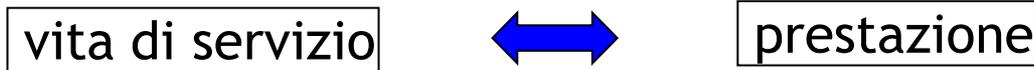
(*) In funzione della “classe strutturale”

Per una vita nominale di **50 anni** (opere ordinarie), come prescrizione minima, il progettista dovrebbe:

- definire la classe di esposizione (EN 206-1)
- richiedere il rispetto dei vincoli sulla composizione del calcestruzzo (EN 206-1)
- richiedere il rispetto dallo spessore di copriferro minimo (Eurocodice 2 o NTC), aumentati delle tolleranze di posa
- definire la durata minima della stagionatura (UNI ENV 13670-1)

Progettazione della durabilità

- 1) Approccio prescrittivo (EN 206, eurocodici, NTC)
- 2) Approccio prestazionale (esempio FIB model code)



L'approccio prestazionale consentirebbe di **progettare** correttamente la **durabilità**, in particolare nei casi di:

- lunga vita di servizio (>50 anni)
- ambienti molto aggressivi (ad esempio zona del bagnasciuga delle strutture marine, uso di sali antigelo ..)
- calcestruzzi speciali e/o protezioni aggiuntive

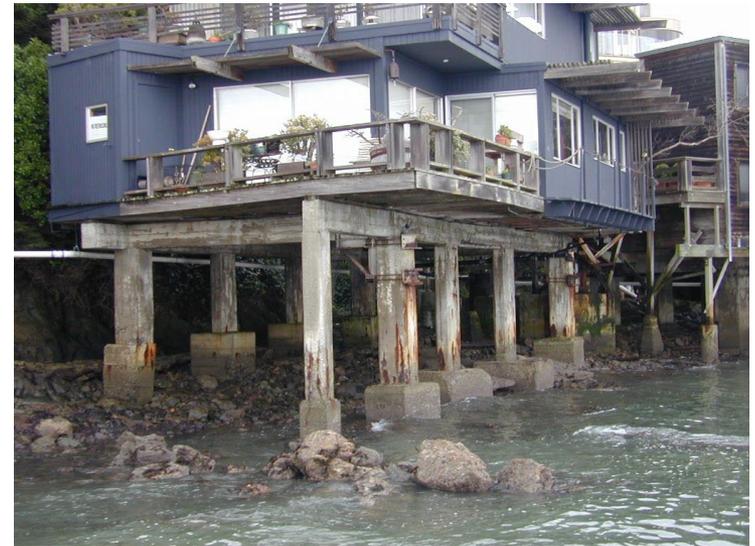
Fondamentale importanza rivestono l'**ispezione** e le **prove** sui materiali

Allo stato attuale l'uso di modelli come il FIB Model Code è da considerare sperimentale; la loro applicazione richiede specifiche competenze per comprendere le leggi chimico-fisiche che stanno alla base delle equazioni presenti nel modello e conoscere i parametri da utilizzare nel modello stesso

Metodi di prevenzione / protezione aggiuntiva

L'impiego di tecniche di prevenzione/protezione aggiuntiva può essere necessario in caso di:

- ambiente molto aggressivo (cloruri)
- vita di servizio richiesta molto lunga
- difficile accessibilità alle strutture
- impossibilità d'impiego di un adeguato copriferro
- elevati costi, diretti e indiretti, di manutenzione
- zone critiche della struttura (ad. es. zona degli spruzzi)



Protezioni aggiuntive

Armature resistenti a corrosione: zincate, resine epossidiche, inossidabili

Rivestimenti: idrorepellenti, cementizi, sigillanti, organici

Aggiunte minerali: loppa, silica fume, pozzolana

Inibitori: massimi, migranti, organici, inorganici

Tecniche elettrochimiche: prevenzione e protezione catodica, rimozione elettrochimica dei cloruri, rialcalinizzazione

Armature in acciaio zincato

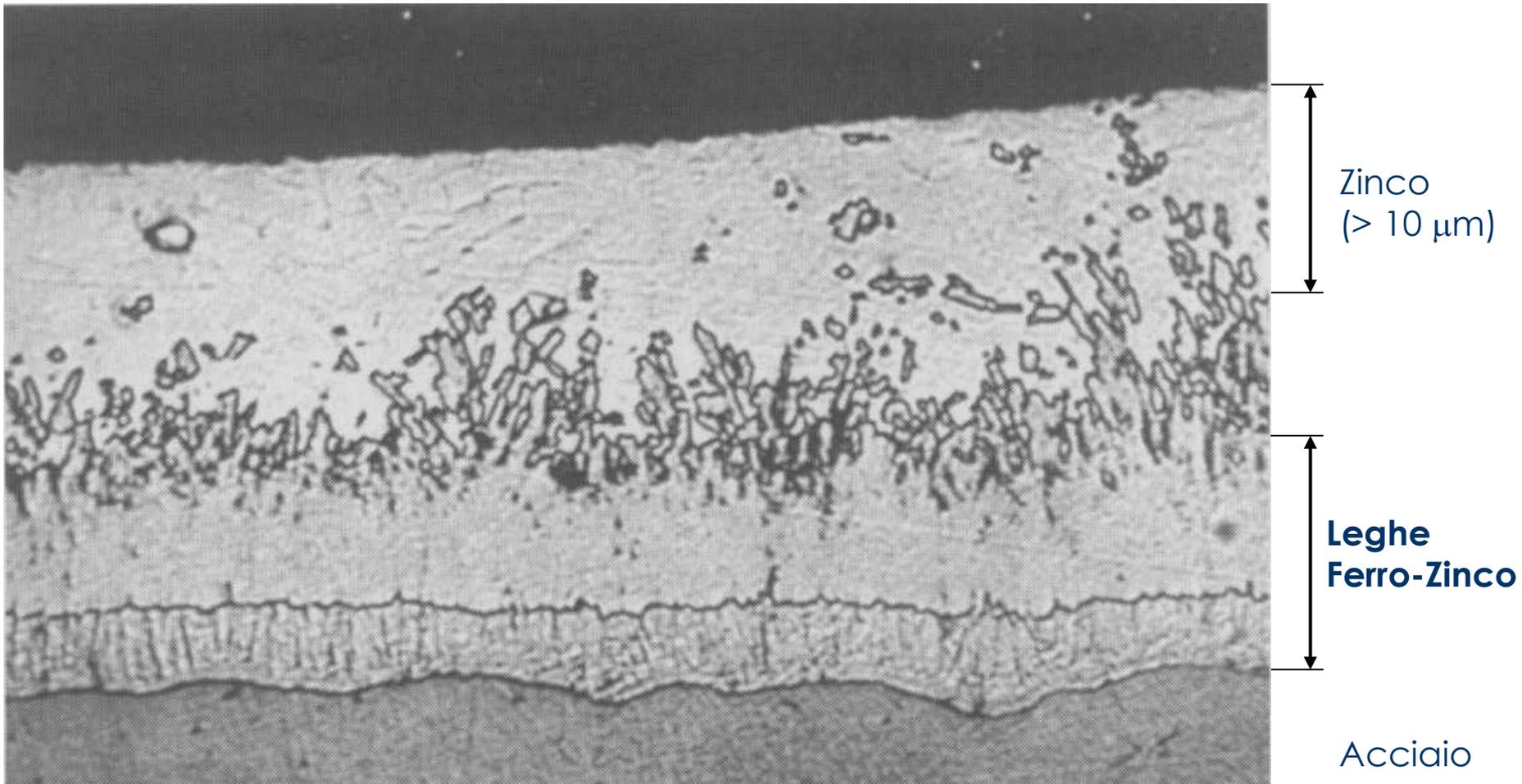


Il rivestimento può essere ottenuto per:

- immersione in bagno fuso (“a caldo”)
- elettrodeposizione
- rivestimento con pitture a elevatissimo contenuto di zinco (superiore al 95%)

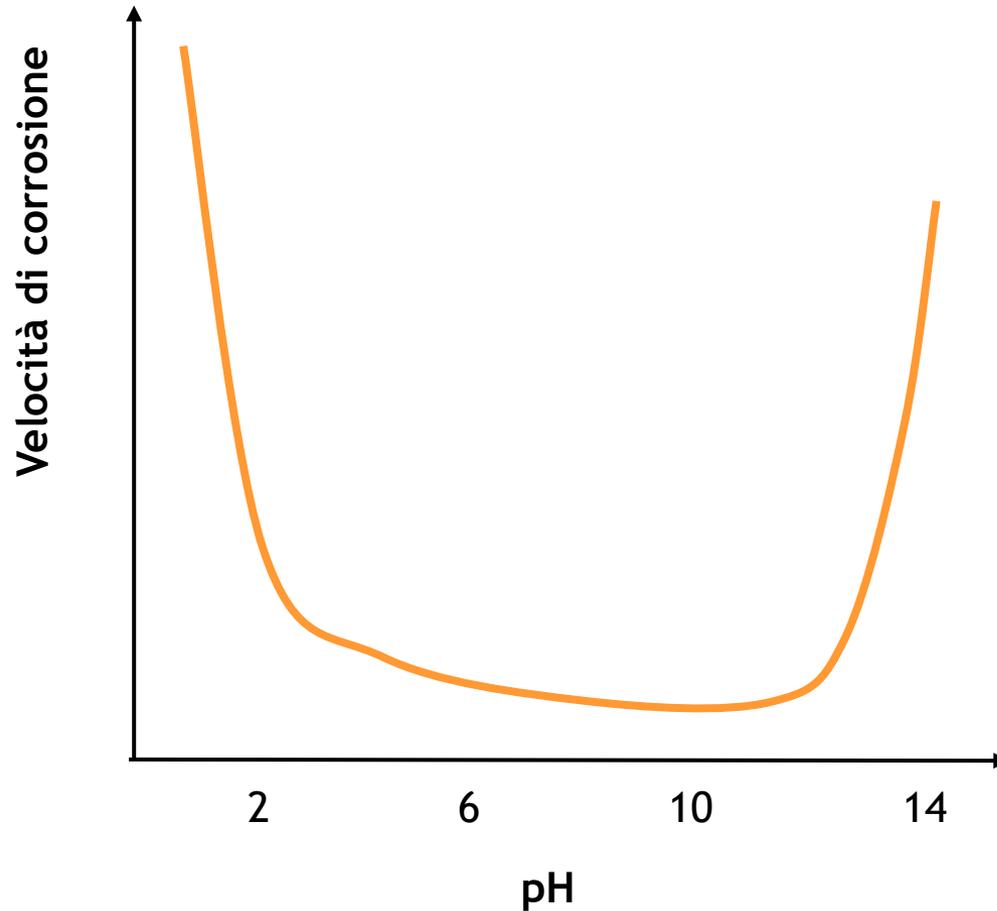
Armature in acciaio zincato

Zincatura a caldo



Armature in acciaio zincato

V_{corr} - pH



Zincatura nel calcestruzzo

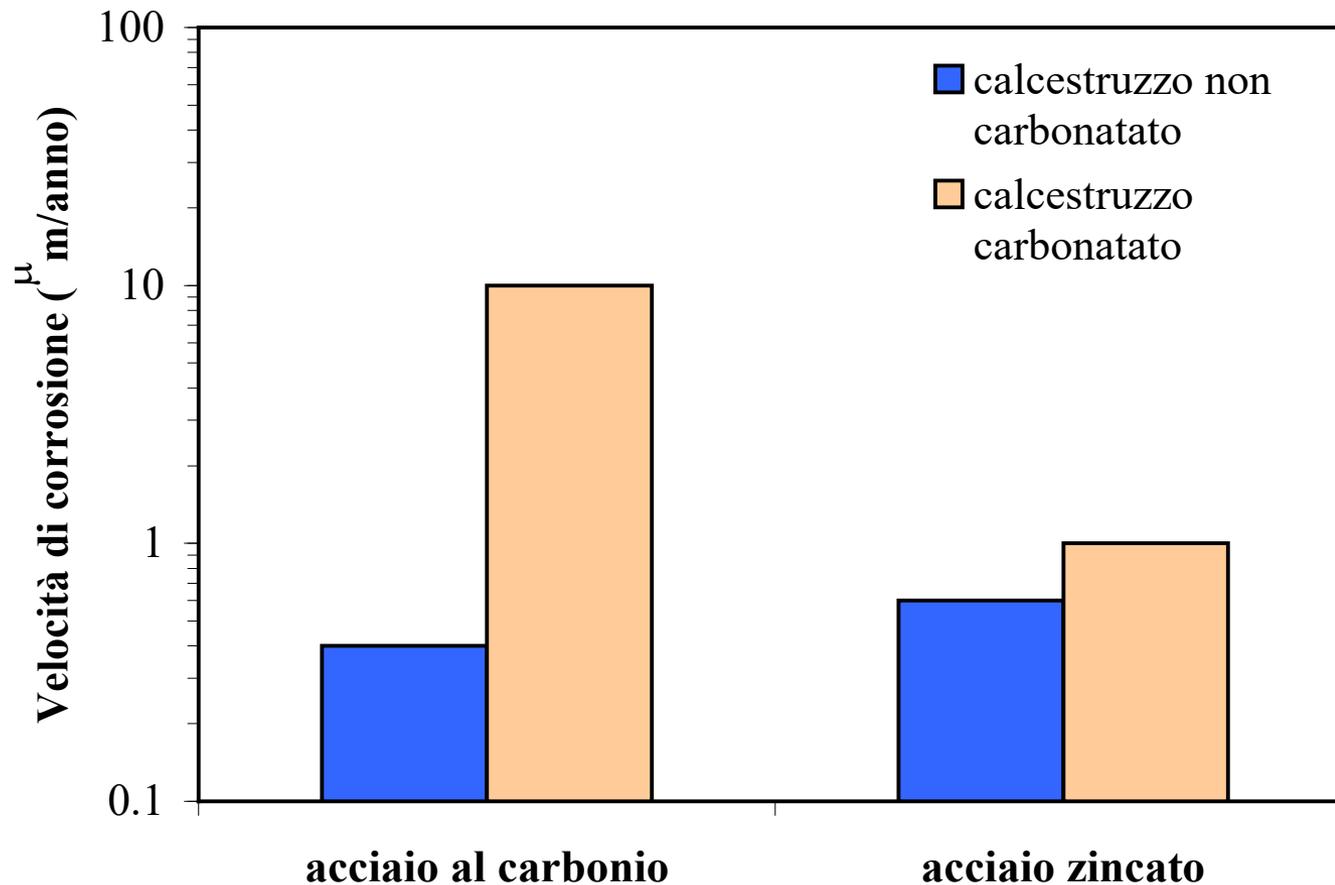
- pH 12-12,8: formazione di cristalli in grado di ricoprire perfettamente la superficie
- pH 12,8-13,3: i cristalli hanno dimensioni maggiori e hanno maggiori difficoltà a ricoprire tutta la superficie
- pH > 13,3: prodotti di corrosione

Nel periodo successivo al getto il pH deve essere minore di 13,3

Per una protezione efficace, lo strato esterno di zinco puro deve avere spessore superiore ai 10 μm

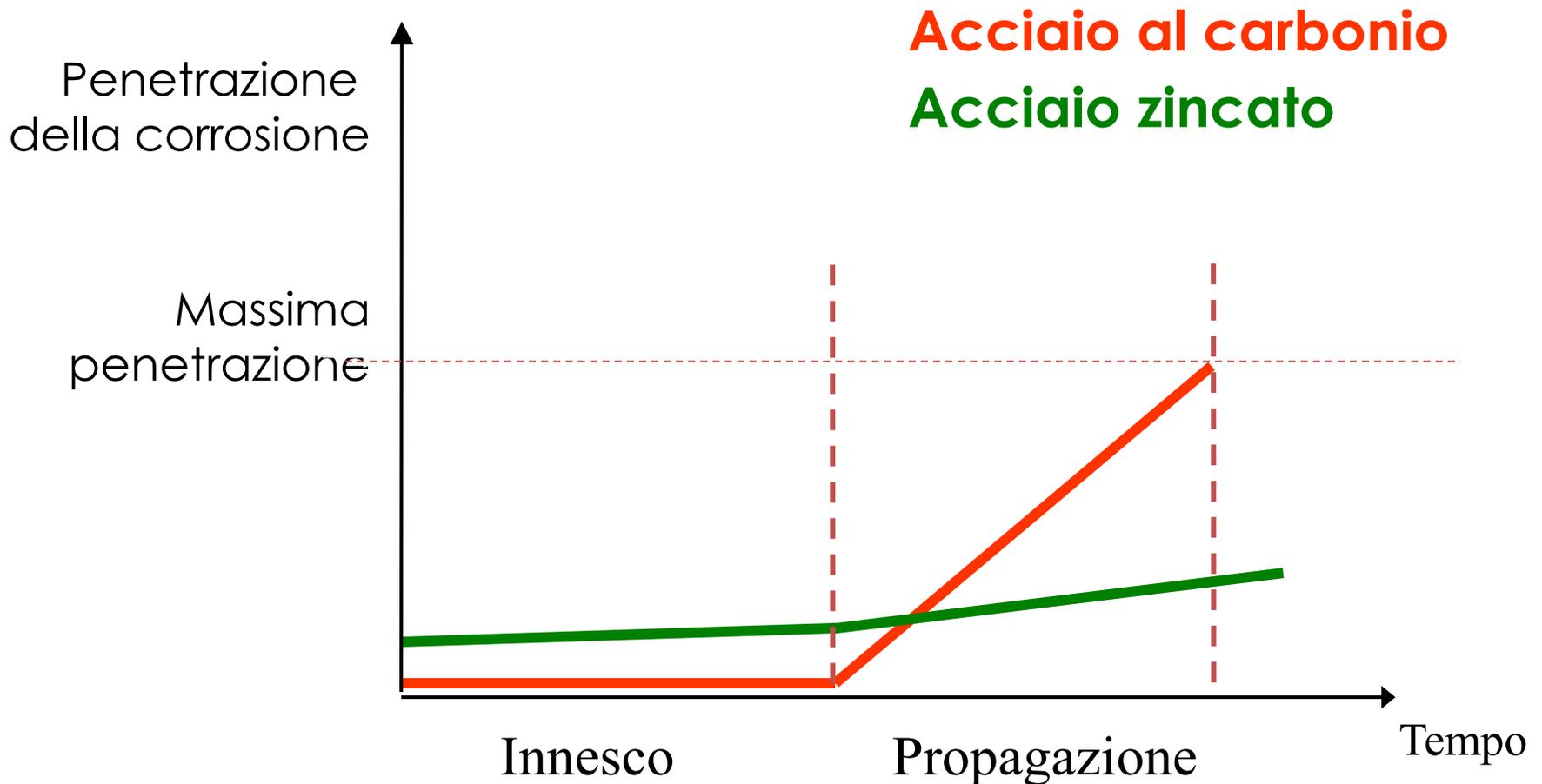
Armature in acciaio zincato

Carbonatazione



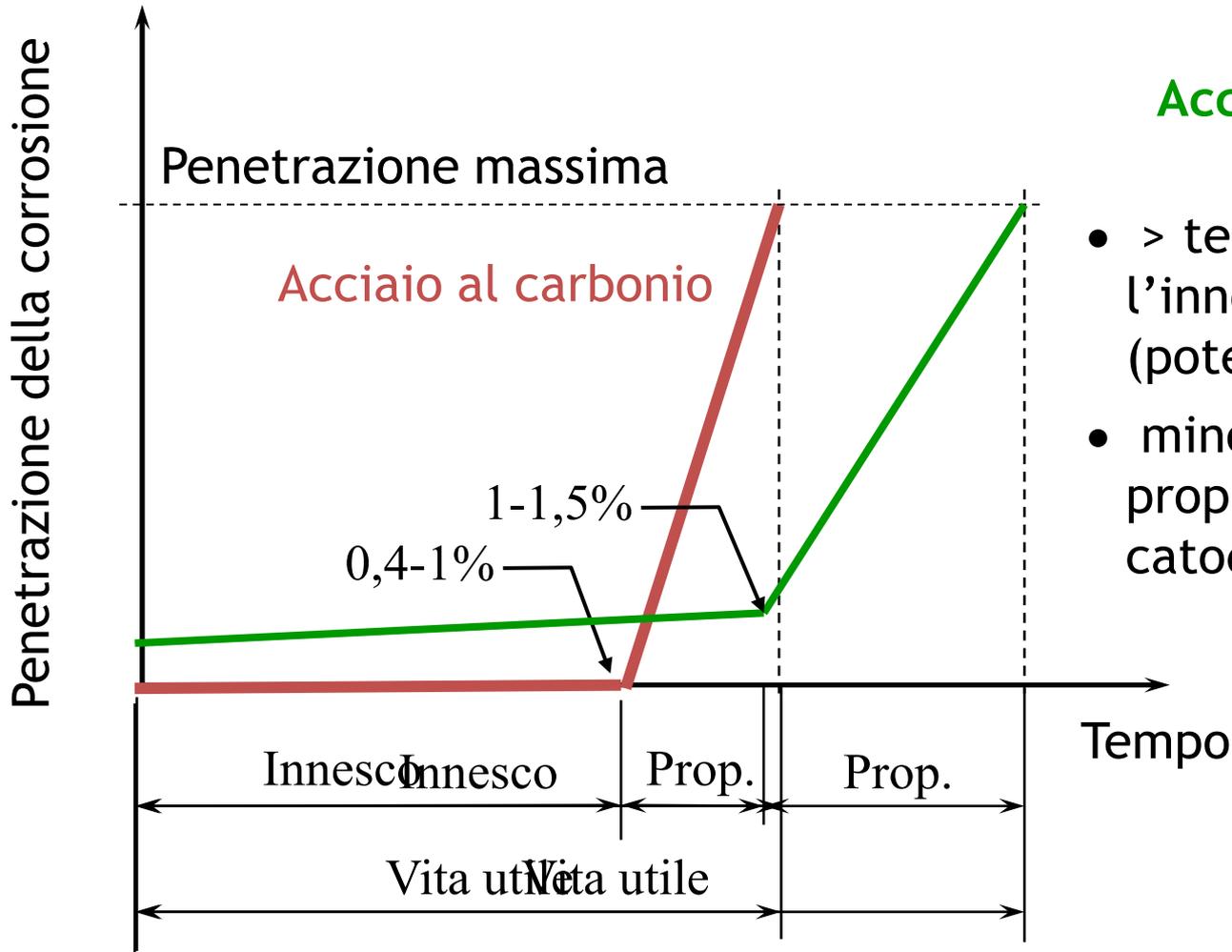
Armature in acciaio zincato

Carbonatazione



Armature in acciaio zincato

Cloruri



Acciaio zincato

- > tenore critico per l'innesco della corrosione (potenziale)
- minor velocità di propagazione (peggior catodo)

Armature in acciaio zincato

Costo: acciaio al carbonio · 1,5

Problematiche

- ✓ difettosità del rivestimento
- ✓ Accoppiamento con armature in acciaio al carbonio
- ✓ Aderenza calcestruzzo - armature
- ✓ Sviluppo di idrogeno (in fase di produzione, nelle prime ore del getto, in esercizio in assenza di ossigeno)

Armature in acciaio zincato

Grande Moschea, Roma (Paolo Portoghesi, 1995)



Armature rivestite con resina epossidica

Normativa: ASTM A775 (1981), UNI 9747-90

- Spessore del rivestimento: 100-300 μm

Per armature ad aderenza migliorata, è necessario almeno uno spessore di 180 μm

- Meccanismo di protezione: *barriera*

- Difettosità:

- difetti originali (max 5 o 6/m)
- trasporto
- lavorazione
- messa in opera
- Prove di piega, di aderenza, di stabilità chimica, di durezza

Armature in acciaio inossidabile

Microstruttura	Designazioni		Composizione (elementi caratteristici)
	AISI	EN 10088	
Austenitica	304L	1.4307	<0.03%C, 18%Cr, 9%Ni
	316L	1.4404 1.4436	<0.03%C, 17%Cr, 12%Ni, 2,5-3%Mo
Duplex	318 03	1.4462	<0.03%C, 22%Cr, 5%Ni, 2,5-3%Mo, N
Ferritica	405		13 Cr

Si usano anche austenitici e duplex contenenti azoto

Armature in acciaio inossidabile

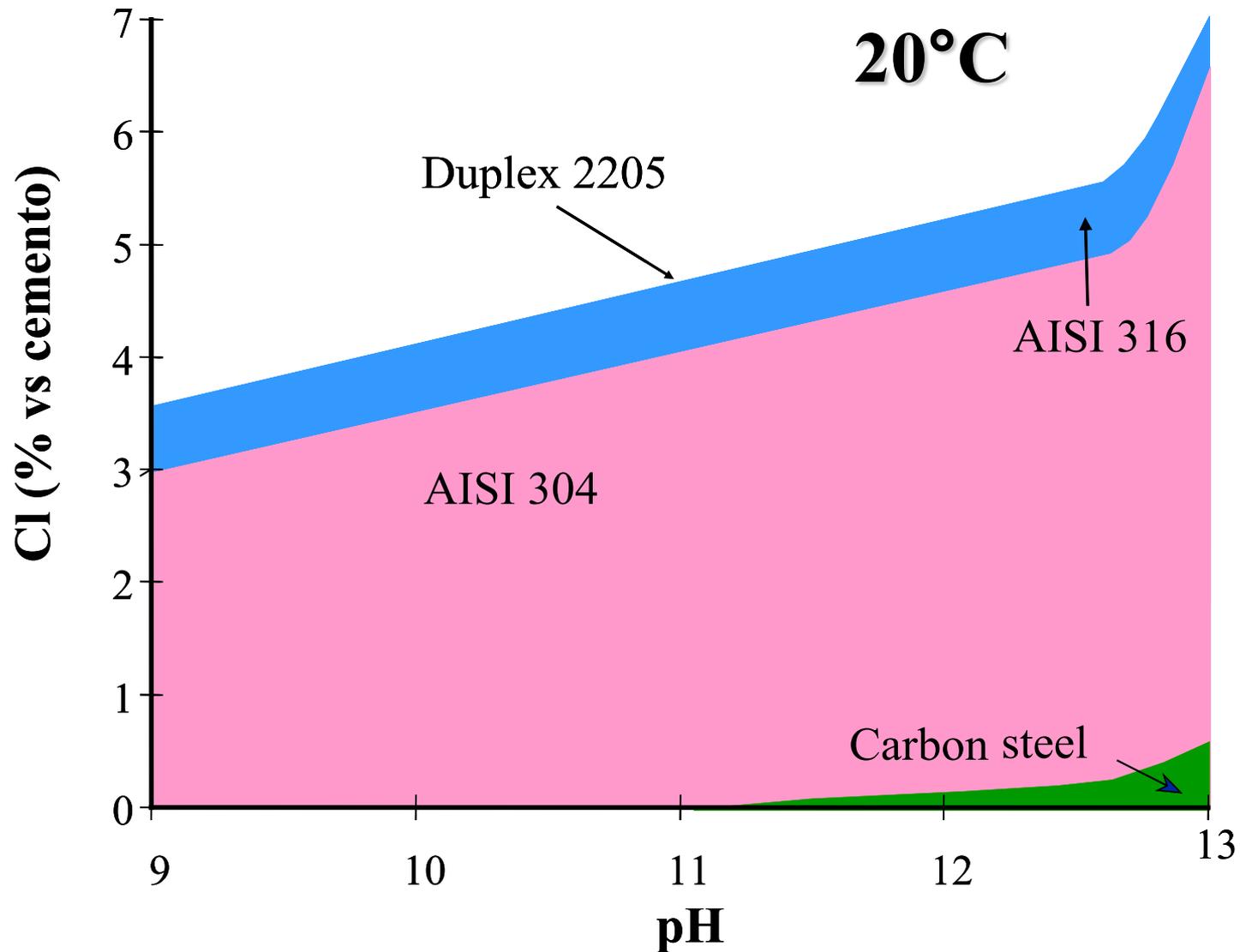
Non soffrono

- corrosione generalizzata
- corrosione intergranulare
- corrosione sotto sforzo

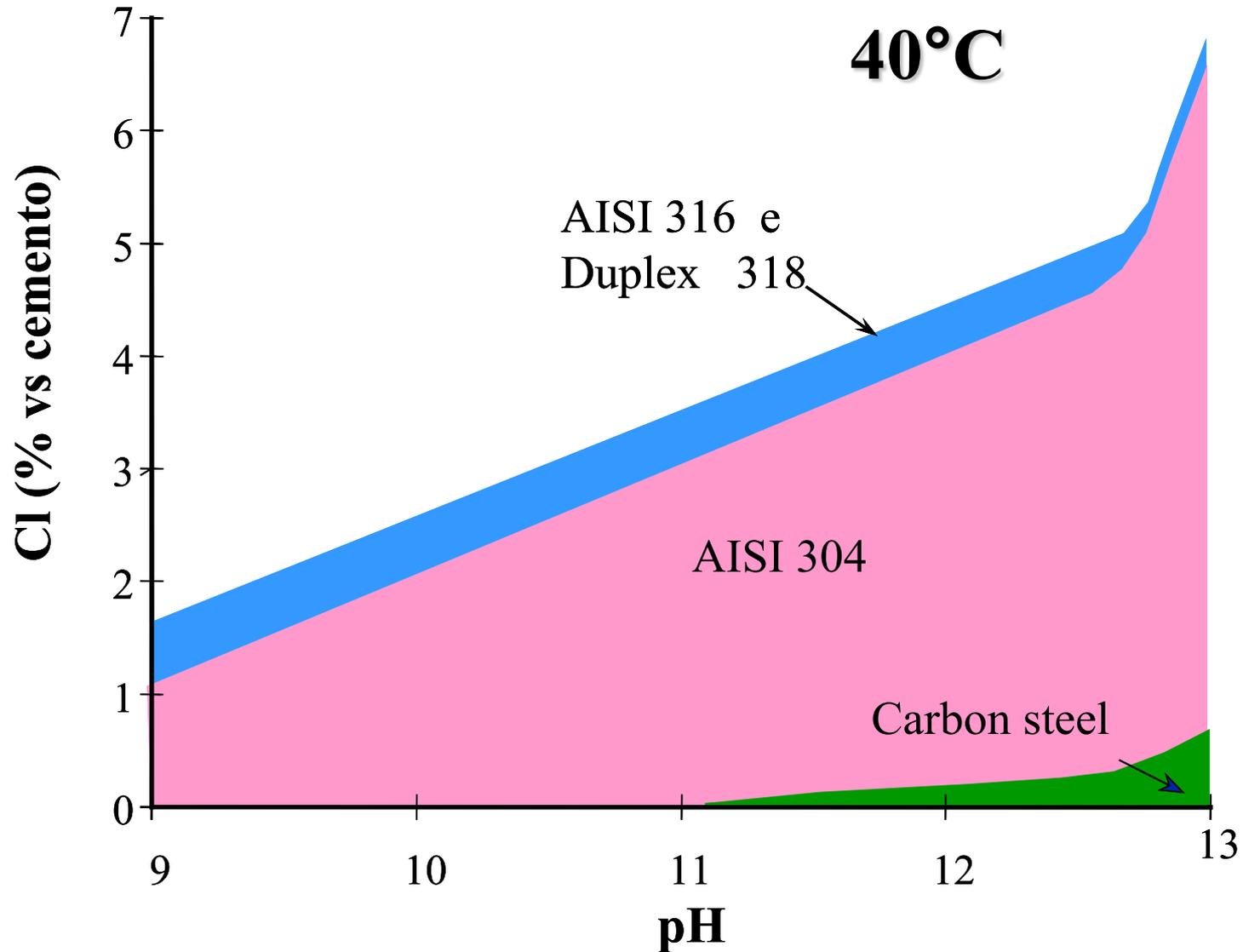
Soffrono

Corrosione per pitting in presenza di cloruri quando il loro tenore supera un valore critico

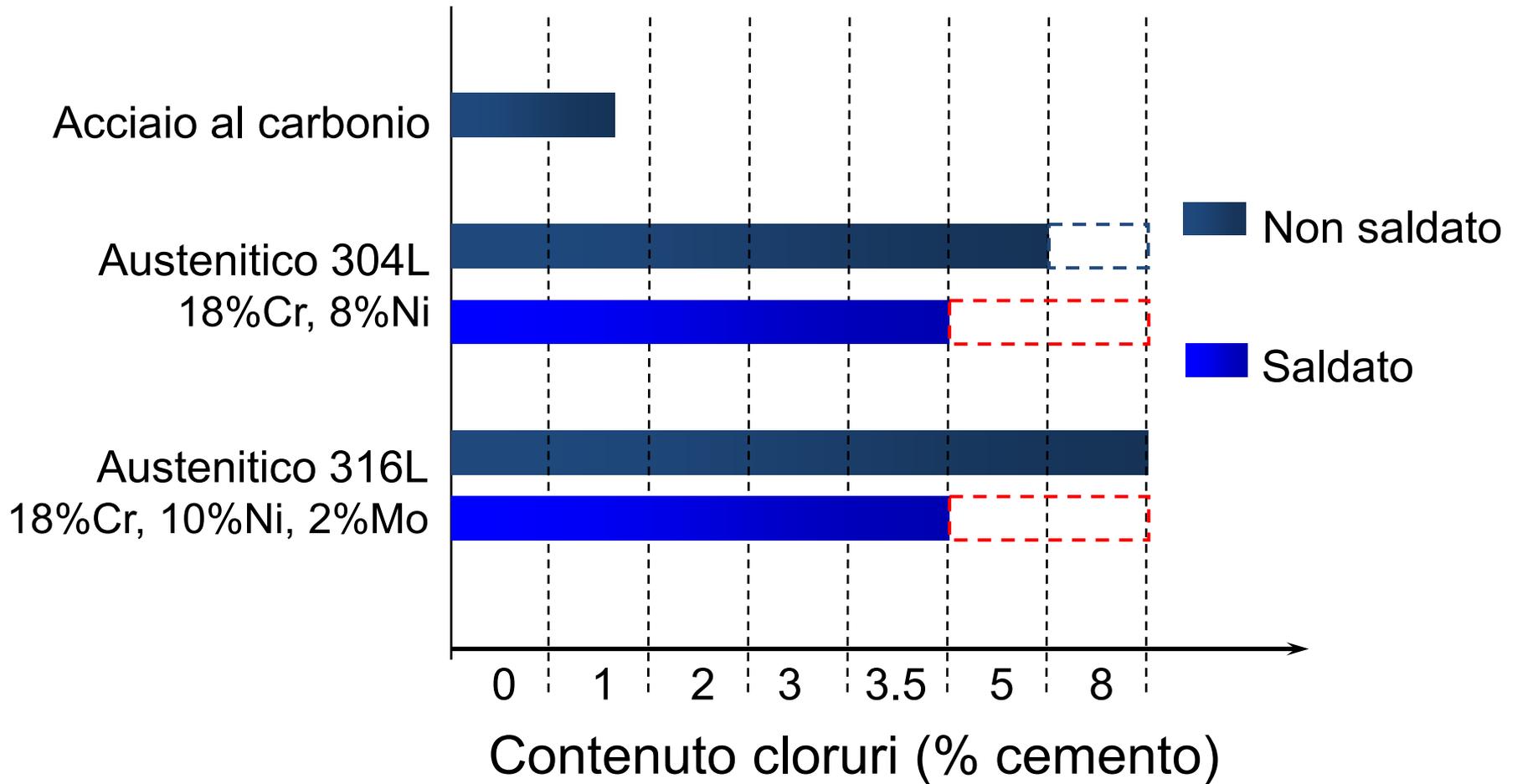
Armature in acciaio inossidabile



Armature in acciaio inossidabile

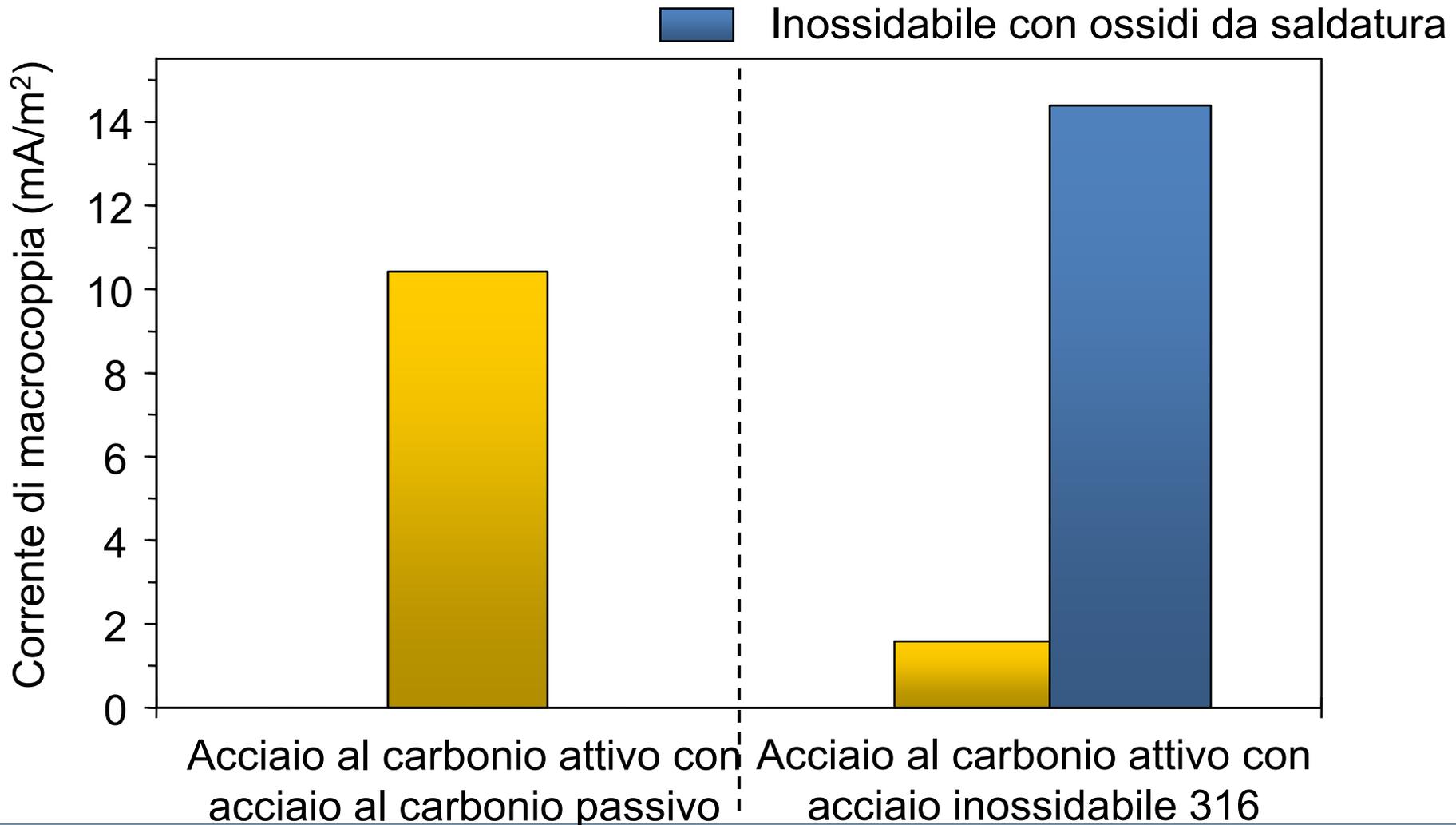


Armature in acciaio inossidabile



Armature in acciaio inossidabile

Accoppiamento galvanico



Armature in acciaio inossidabile

Costo = acciaio al carbonio · 6-9

È possibile l'impiego degli inox solo nelle zone di particolare aggressività quali:

- giunti
- zona degli spruzzi
- armature di pelle

Life cycle cost

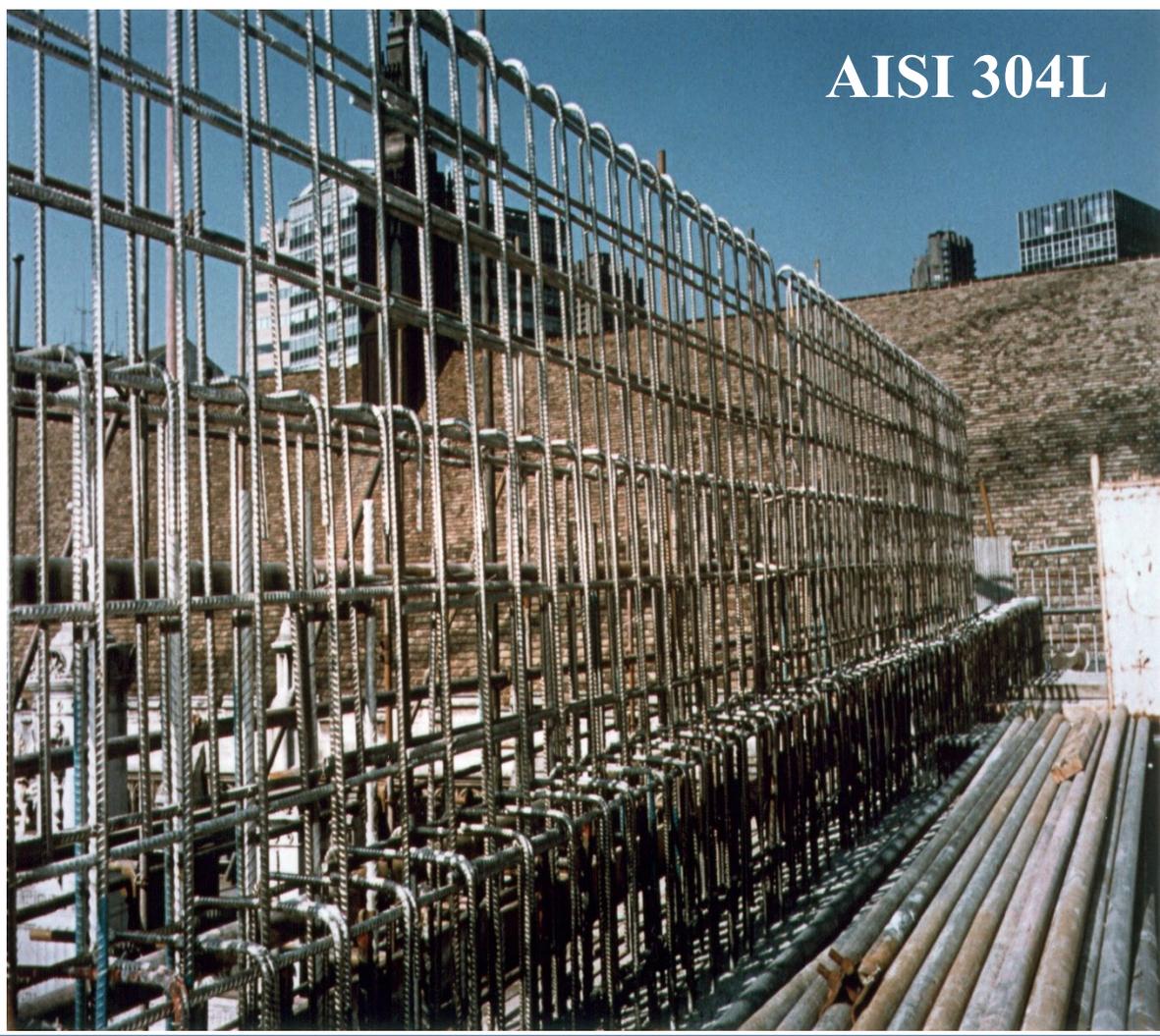
Armature in acciaio inossidabile

Chiesa “Dives in Misericordia” Roma (Meier, 2003)



Armature in acciaio inossidabile

Guild Hall Yard East (Londra) - Vita di progetto: 750 anni



Armature in acciaio inossidabile

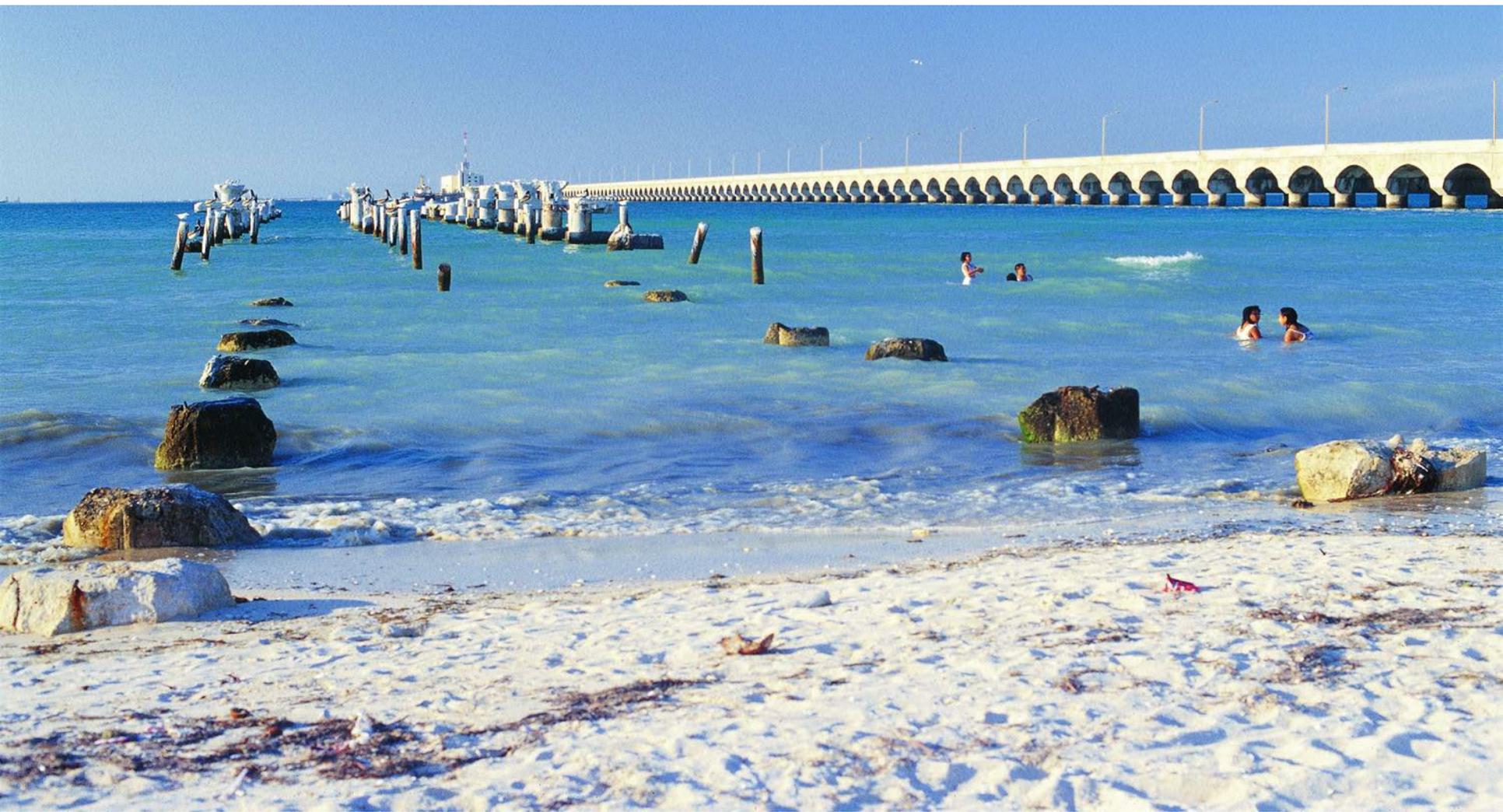
Ponte di Schaffhausen (Svizzera)

**AISI 304L
Duplex 22-05**

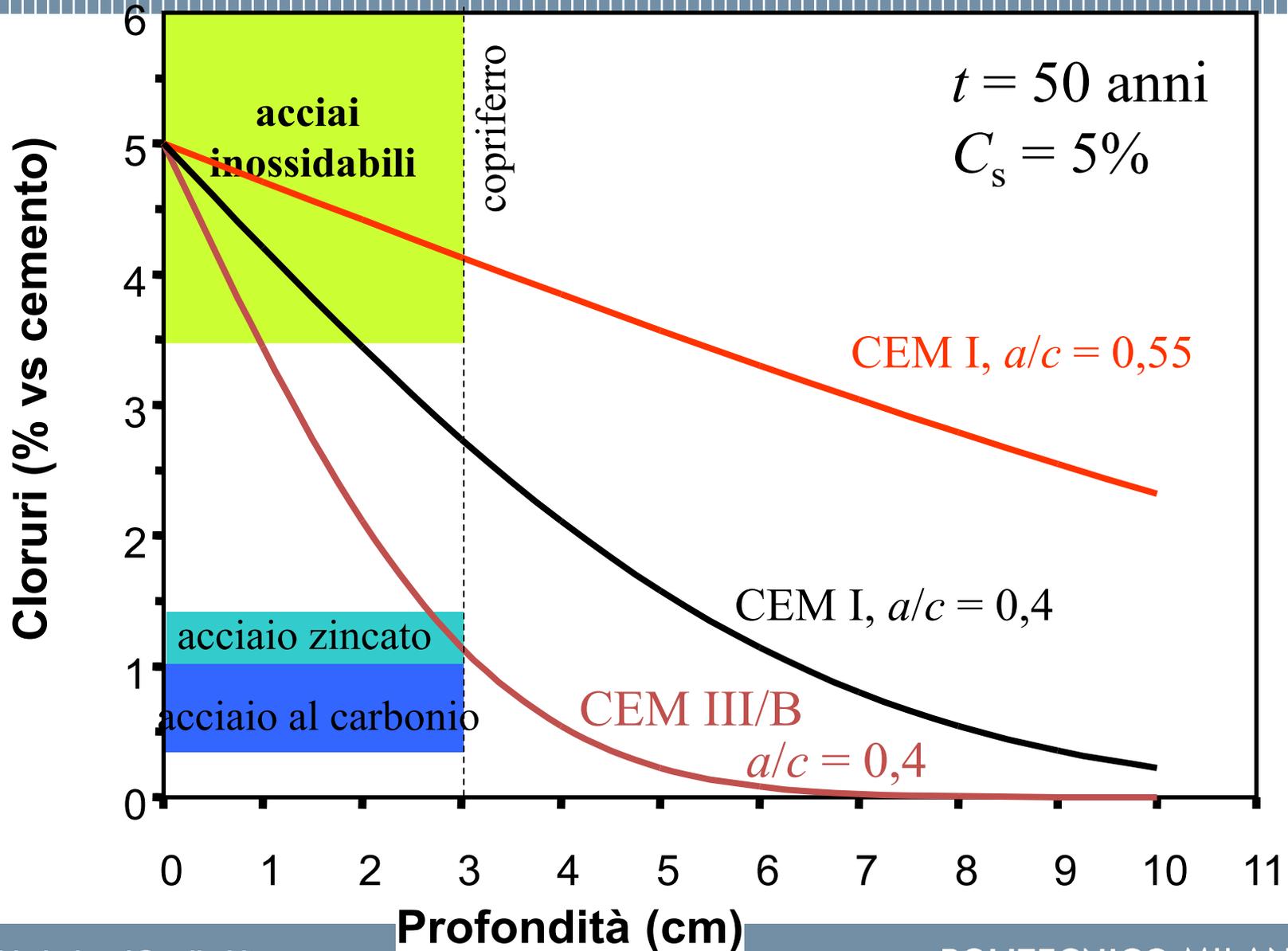


Armature in acciaio inossidabile

Pontile marino, Progreso, Yucatan (Messico), costruito nel 1937-41



Armature resistenti a corrosione



Inibitori aggiunti nel getto (**prevenzione**)

- ✓ per aumentare il tempo di innesco
- ✓ per ridurre la velocità di propagazione

Inibitori applicati sulla superficie (“**migranti**”)

- ✓ per aumentare il tempo di innesco (prevenzione)
- ✓ per ridurre la velocità di propagazione (protezione)

Inibitori di corrosione

Nitrito di calcio

- passivante + ossidante
- efficace se: $[\text{NO}_2^-]/[\text{Cl}^-] > 0.5-1$. Max $\text{Cl}_{\text{crit}} = 3\%$ cem
- rischi per dosaggio insufficiente, dilavamento
- utilizzato da più di 30 anni

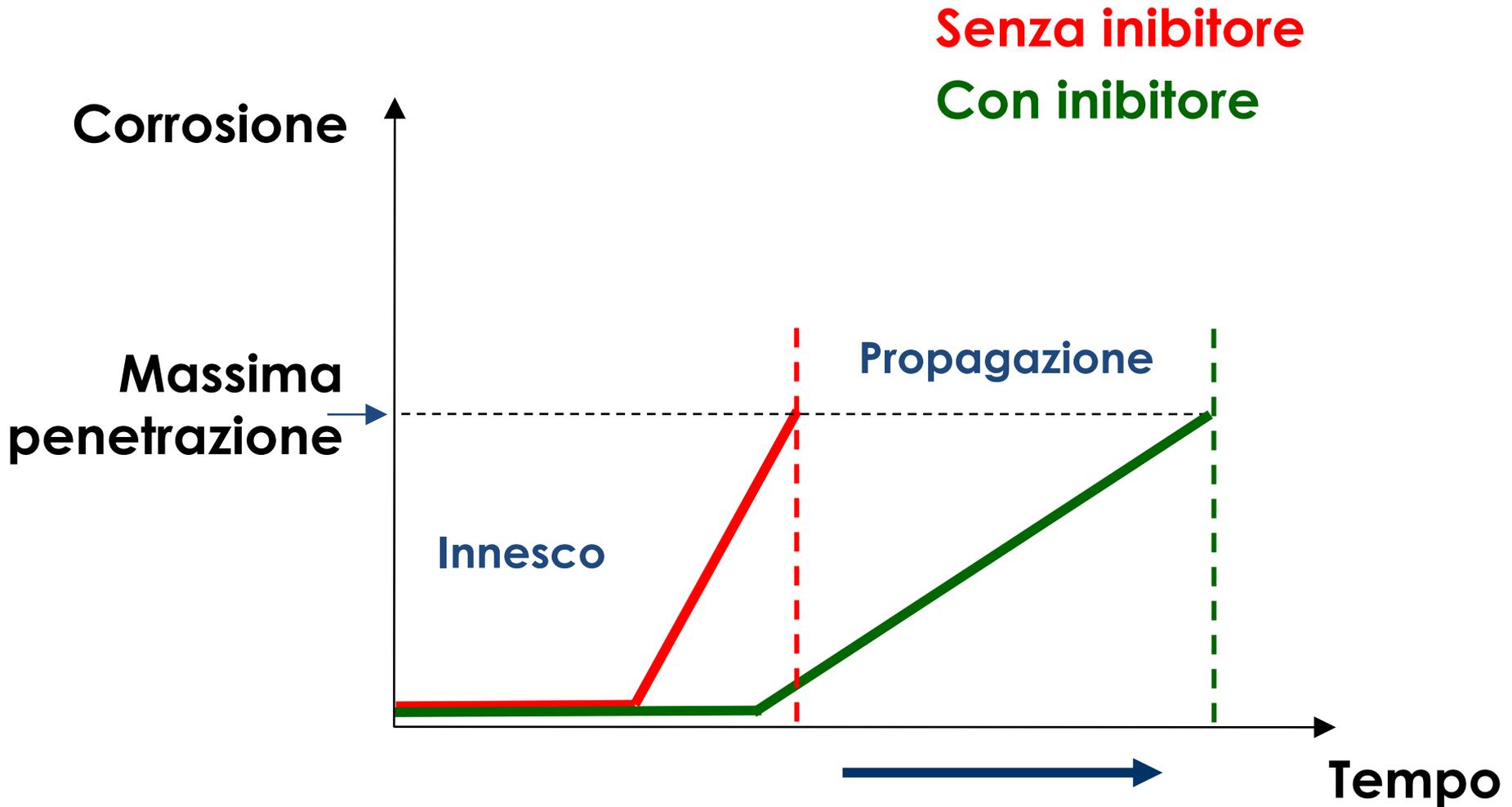
Monofluorofosfato di sodio

- applicato in superficie
- efficace se: $[\text{MFP}]/[\text{Cl}^-] > 1$
- penetrazione fino all'armatura

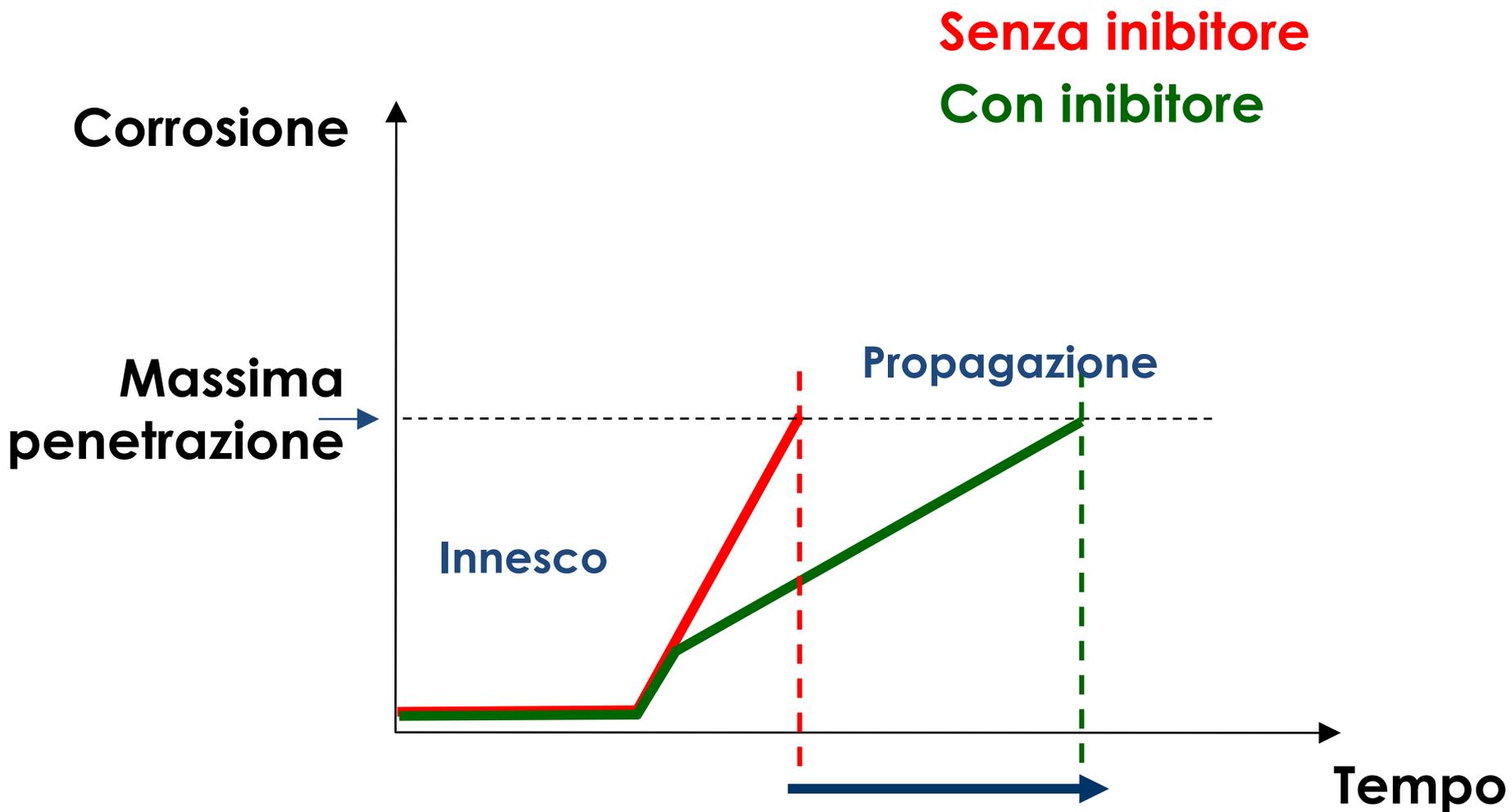
Miscele con ammine/alcanolammine

- miscele commerciali
- azione filmante
- tenore critico 1-1.5% cem

Inibitori di corrosione: prevenzione



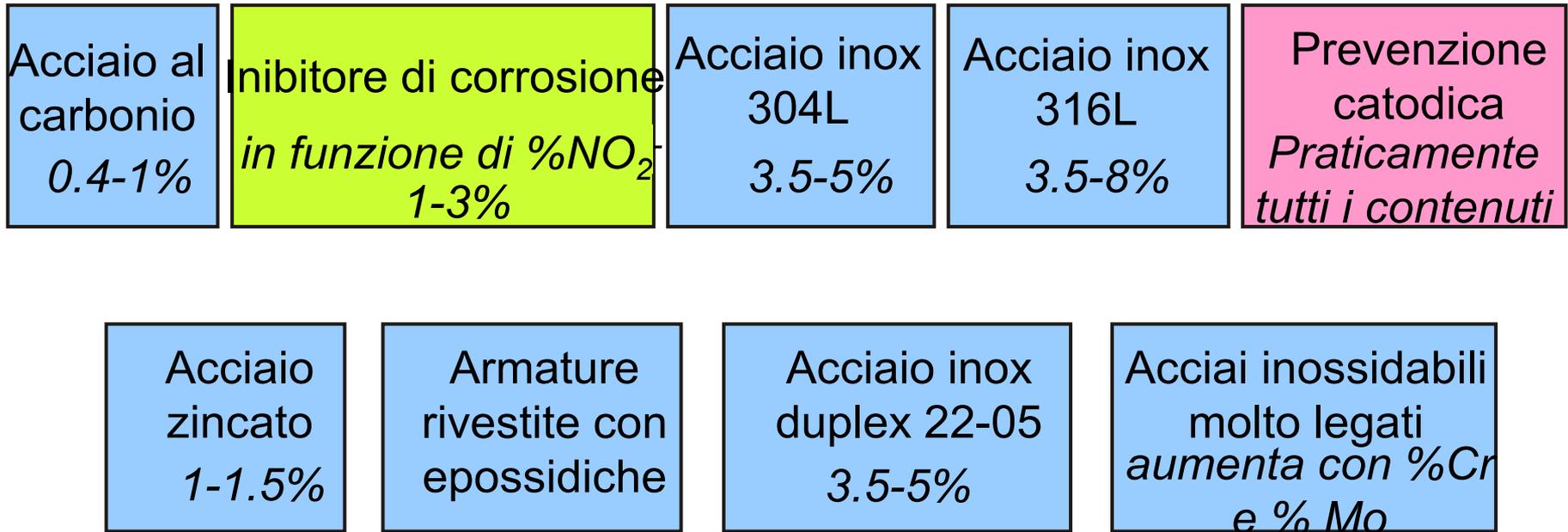
Inibitori di corrosione: ripristino



Inibitori di corrosione: requisiti

- ✓ **Compatibilità con il calcestruzzo**
 - ↪ Non alterare la presa e l'indurimento
 - ↪ Non ridurre le proprietà meccaniche (R_c)
 - ↪ Non reagire con i componenti
- ✓ **Solubilità in acqua**
- ✓ **Presenza in concentrazione adeguata**
- ✓ **Bassa tossicità e inquinamento**
- ✓ **Rapporto costo/efficacia competitivo**

Protezioni aggiuntive



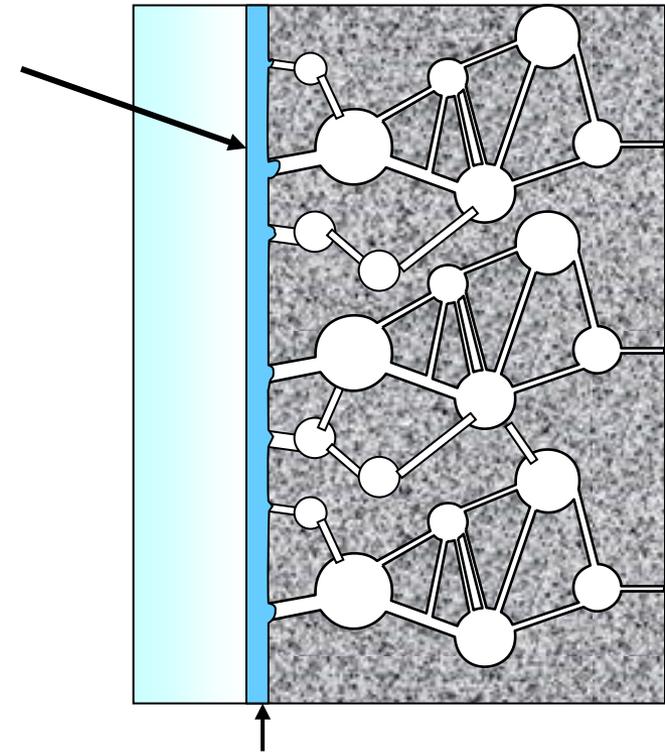
Contenuto di cloruri (% in peso rispetto al cemento)



Rivestimenti del calcestruzzo

- **Rivestimenti organici a film continuo**
- Rivestimenti a base cementizia
- Trattamenti idrorepellenti
- Trattamenti sigillanti

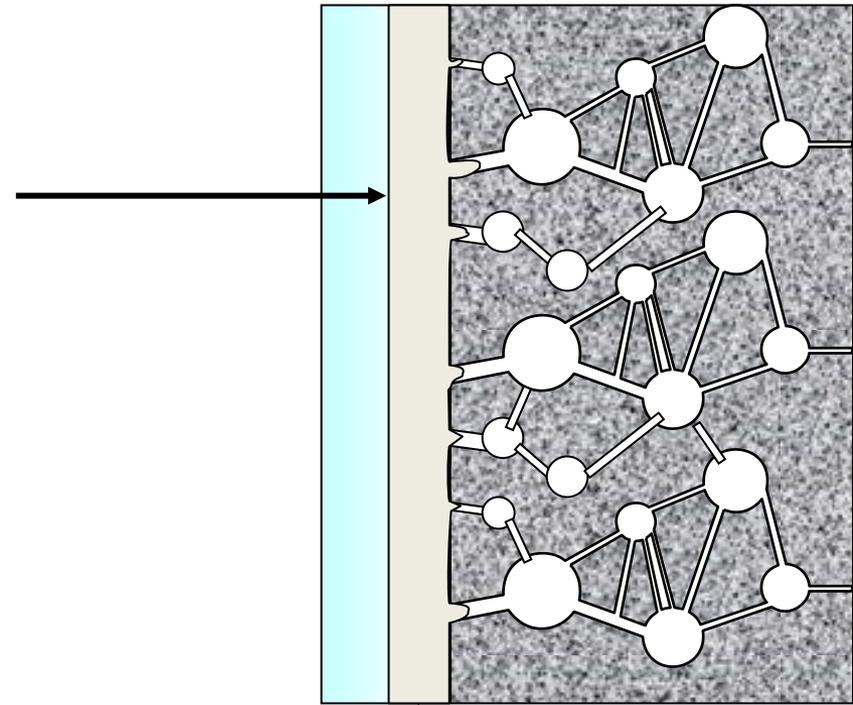
spessore 100-300 μm



Resine epossidiche,
poliuretaniche, poliesteri,
gomma clorurata

Rivestimenti a BASE CEMENTIZIA

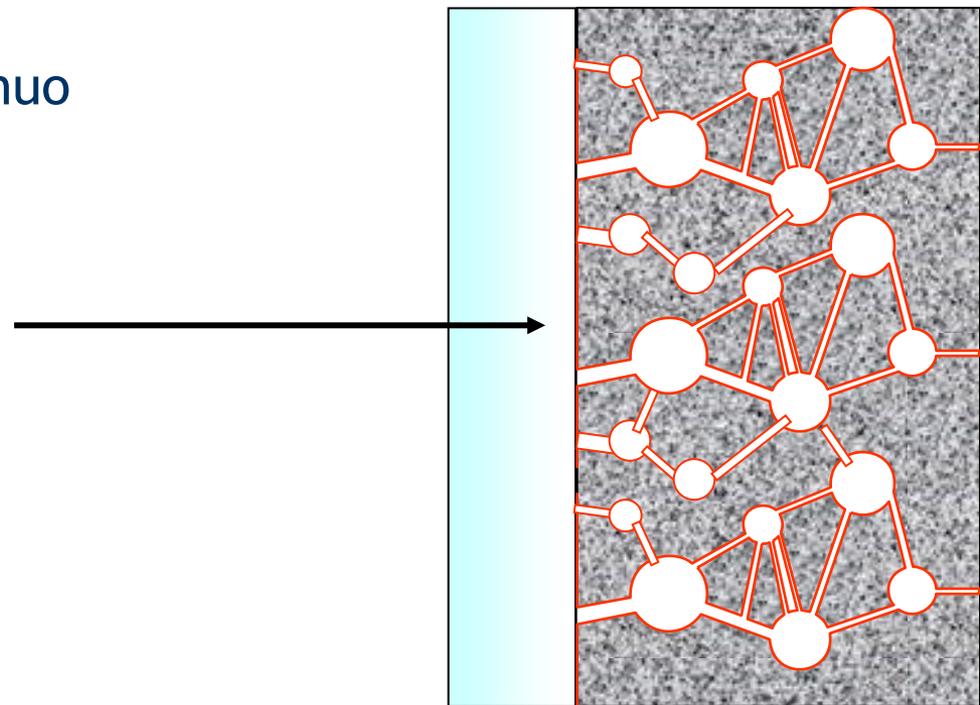
- Rivestimenti organici a film continuo
- **Rivestimenti a base cementizia**
- Trattamenti idrorepellenti
- Trattamenti sigillanti



Malte cementizie a bassa porosità o modificate con polimero

Rivestimenti IDROPELLENTI

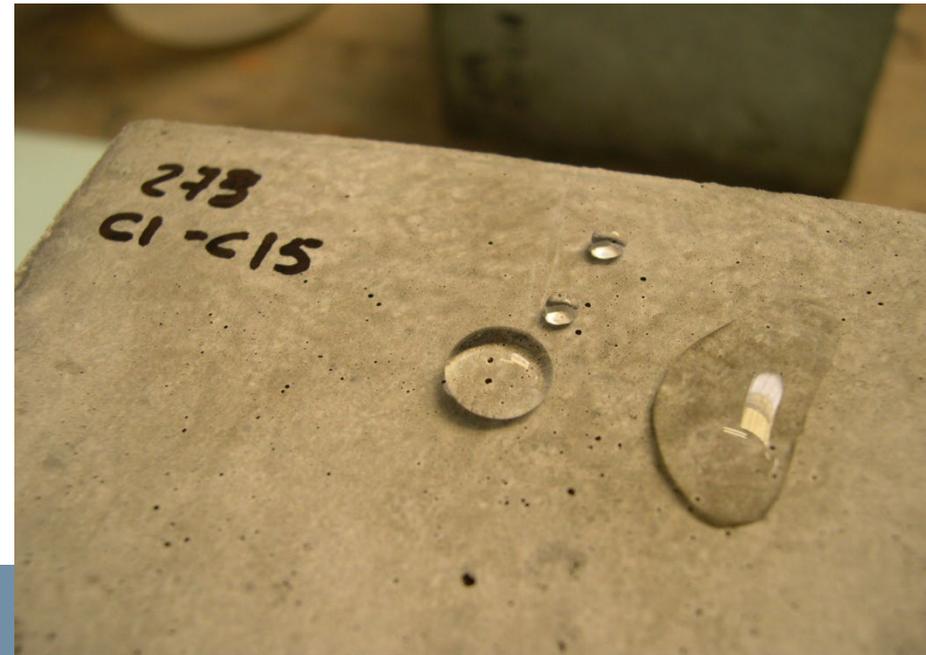
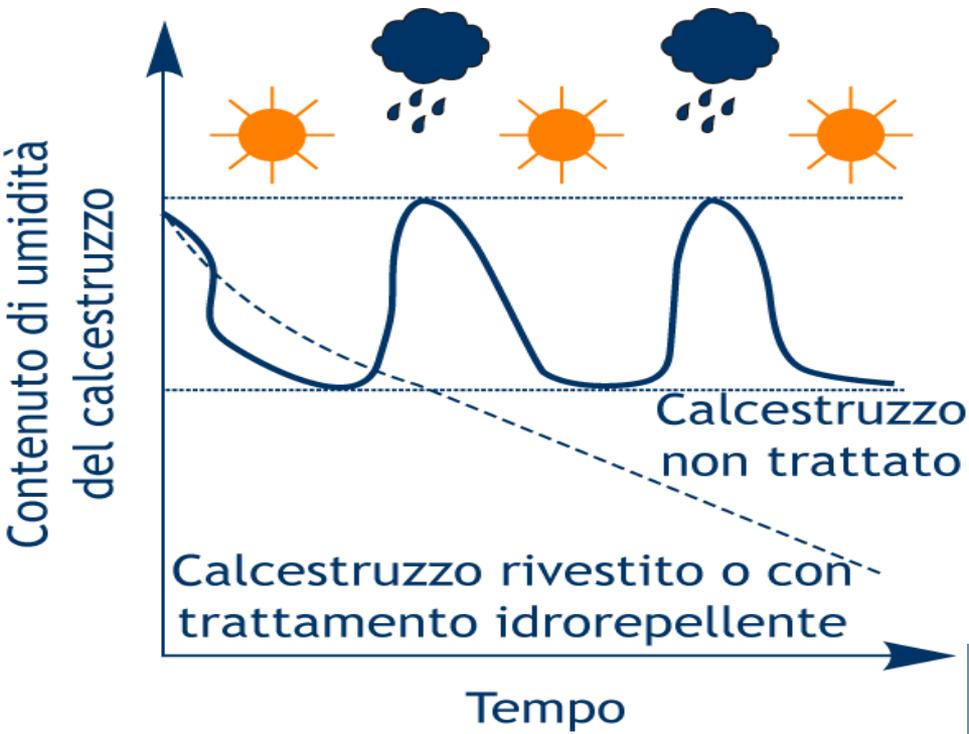
- Rivestimenti organici a film continuo
- Rivestimenti a base cementizia
- **Trattamenti idrorepellenti**
- Trattamenti sigillanti



↑
silani, silossani
stearati, siliconati

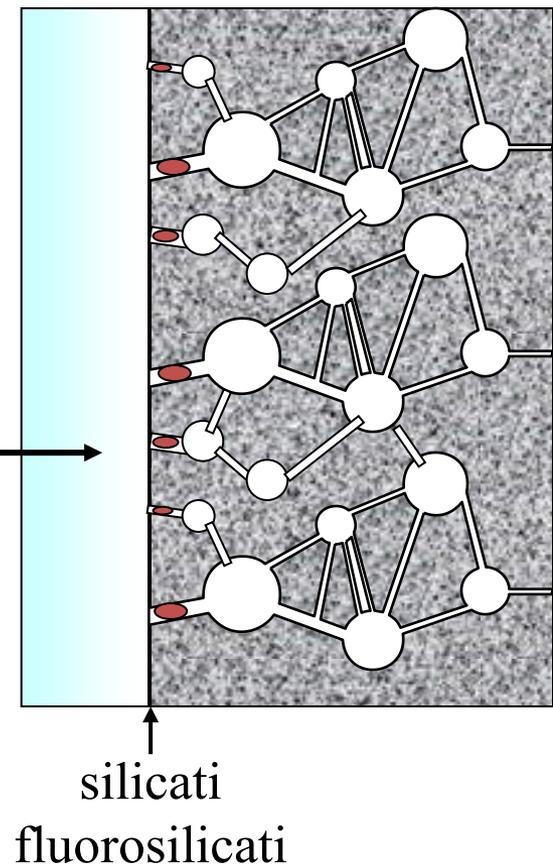
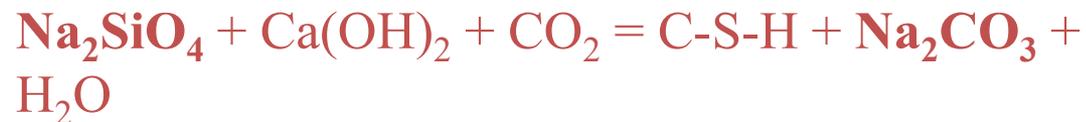
Rivestimenti IDROREPELLENTI

- aumenta con le dimensioni e la ramificazione del gruppo funzionale R
- può ridurre del 90% l'assorbimento di acqua
- può mantenersi per tempi lunghi (oltre 5 anni soprattutto nel caso di sostanze che penetrano nel calcestruzzo)

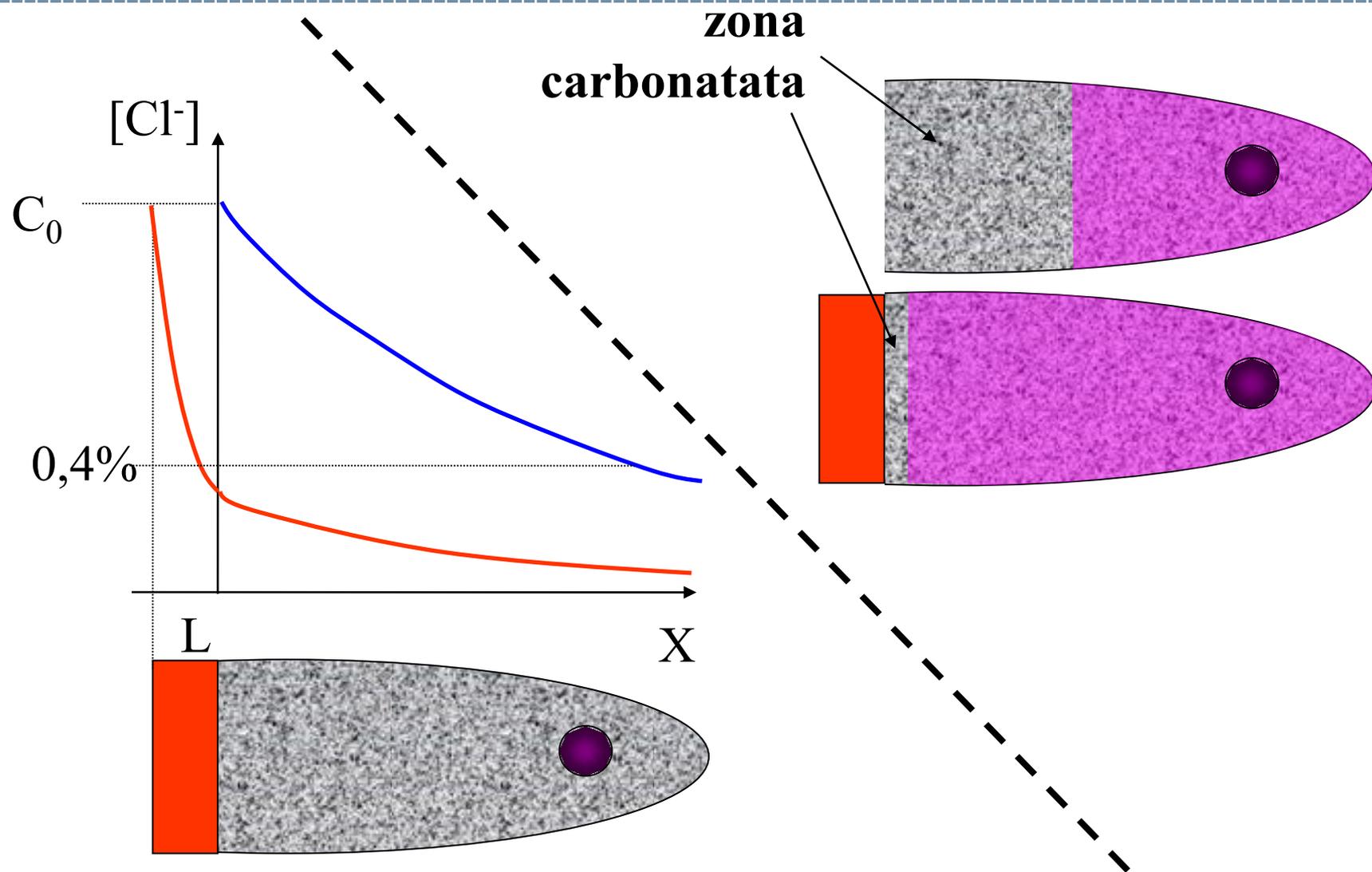


Rivestimenti SIGILLANTI

- Rivestimenti organici a film continuo
- Rivestimenti a base cementizia
- Trattamenti idrorepellenti
- **Trattamenti sigillanti**



Rivestimenti: meccanismo di azione



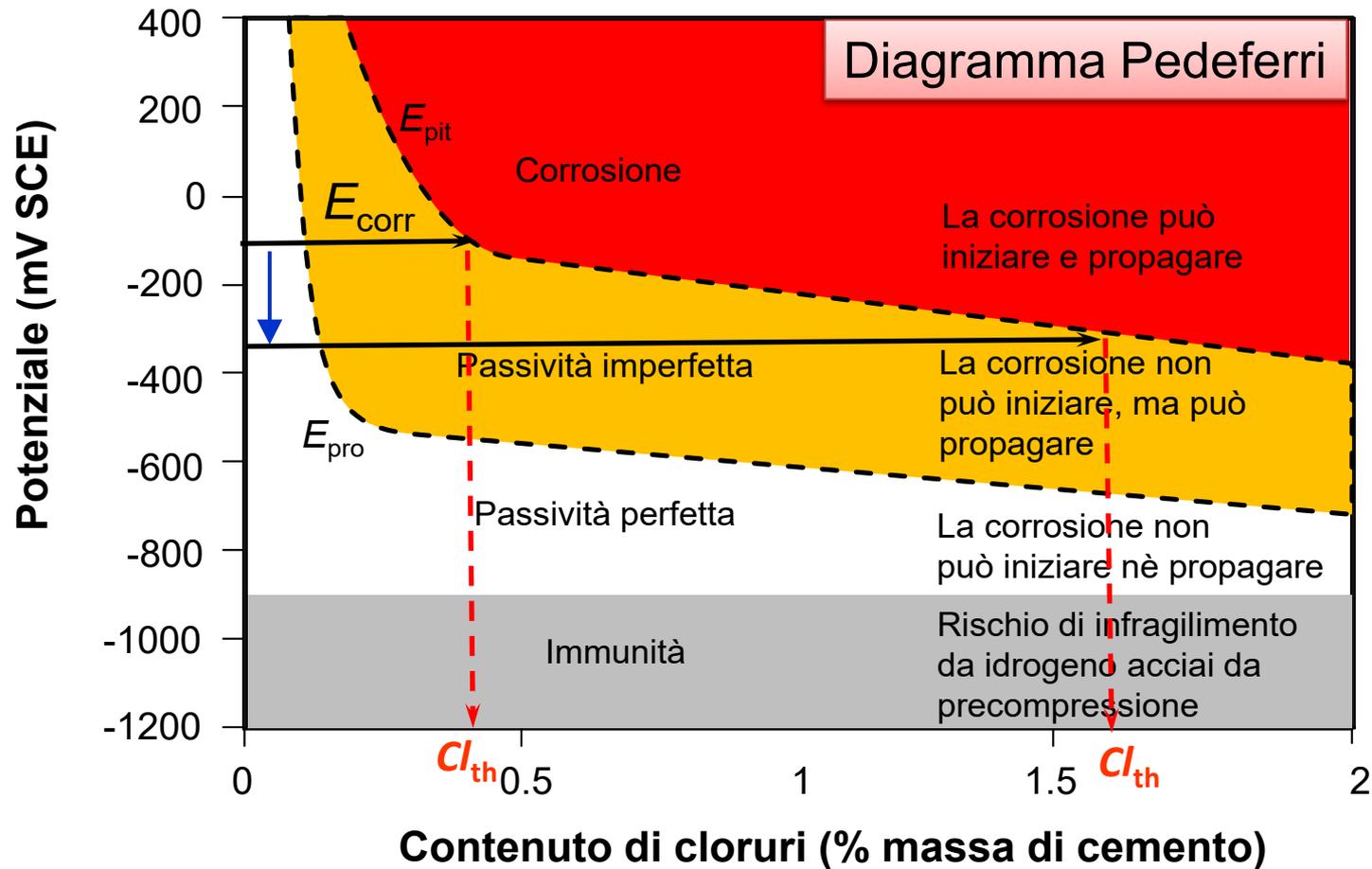
Efficacia e durata della protezione

- ✓ Possono agire sia sul **periodo di innesco** (rallentano la penetrazione degli agenti aggressivi) sia **di propagazione** (ostacolano l'ingresso dell'acqua)
- ✓ **Qualità** dei materiali utilizzati per il rivestimento
- ✓ **Modalità applicative**
 - preparazione superficiale (calcestruzzo pulito, coerente, non fessurato)
 - condizioni di umidità del supporto
 - applicazioni in più mani
- ✓ **Manutenzione** del rivestimento

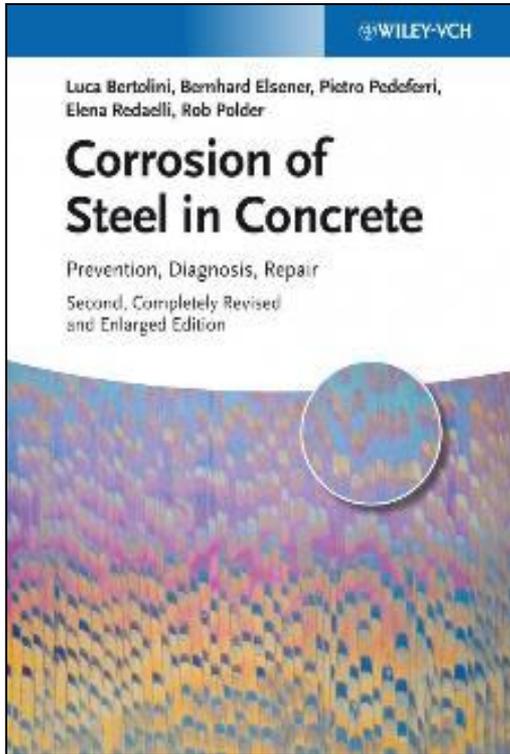
Prevenzione catodica

Introdotta da Pietro Pedefferri nel 1992

[P. Pedefferri, "Cathodic protection of new concrete construction", 1992]

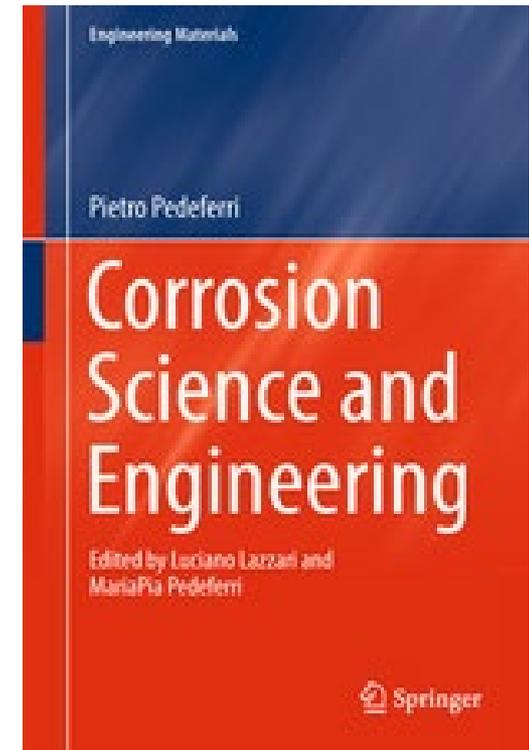


Testi di riferimento



L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedferri, E. Redaelli, R. Polder, **Corrosion of steel in concrete – Prevention, Diagnosis, Repair**, Wiley-VCH, 2013

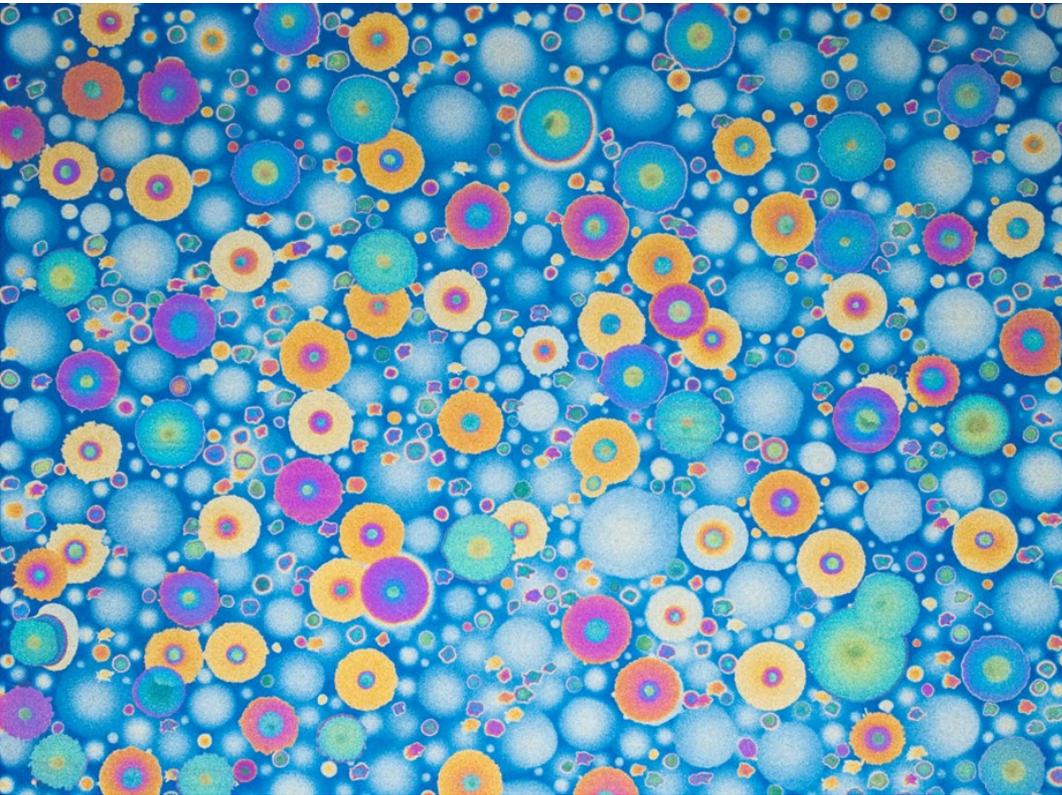
P. Pedferri, **Corrosion science and engineering**, Springer, 2018



Altri riferimenti

- “Durable Concrete Structures”, CEB Bulletin n. 148 (1st ed.) 1982; n. 182 (2nd ed.) 1989;
- Pedferri P., Bertolini L., “La durabilità del calcestruzzo armato”, McGraw-Hill, Milano, 2000.
- EN 1992-1-1, “Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General Rules and Rules for Buildings”.
- EN 206-1, “Concrete – Part 1. Specification, Performance, Production and Conformity”.
- «Model Code for service life design”, International Federation for Structural Concrete, FIB, Bulletin n. 34; 2006

Grazie per l'attenzione



<http://polilapp.chem.polimi.it>
<http://mcd.chem.polimi.it>

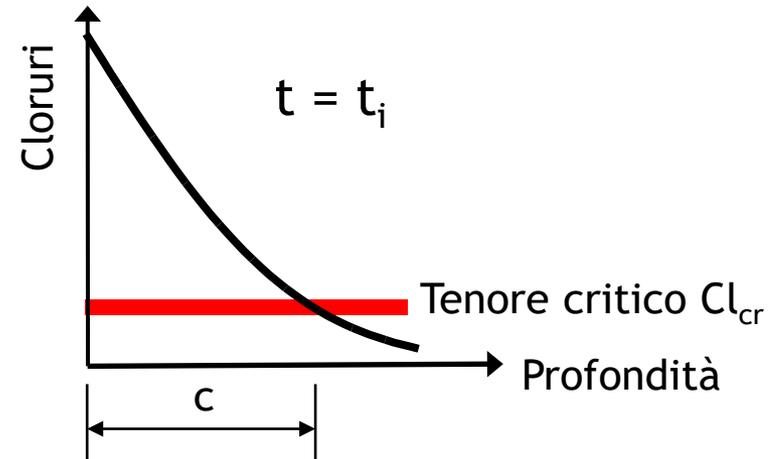
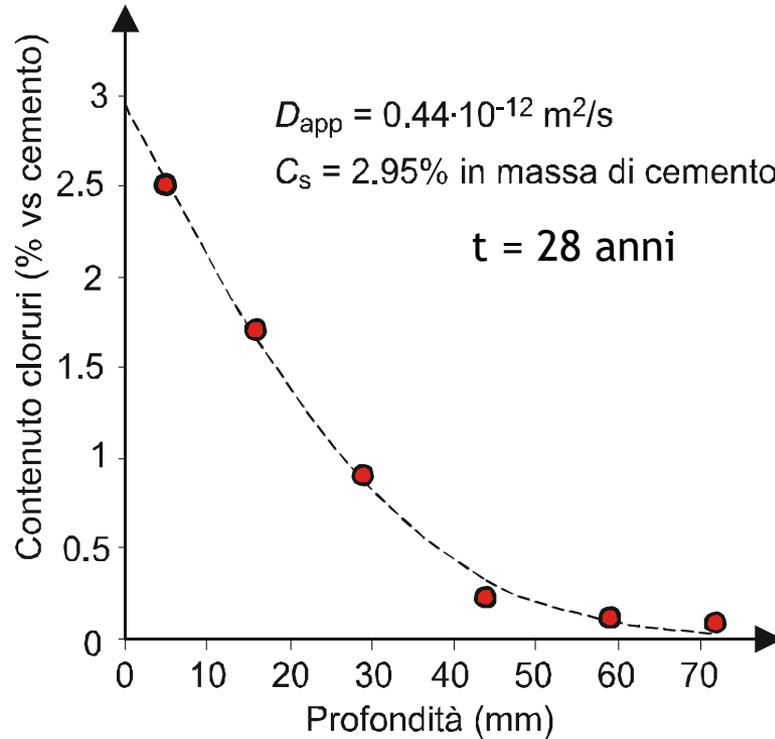




Il degrado è generalmente dovuto all'ingresso di specie aggressive attraverso la porosità. Il movimento di queste ultime può avvenire con differenti meccanismi:

- assorbimento capillare
- permeazione (differenza di pressione)
- diffusione (gradiente di concentrazione)
- migrazione elettroforetica

Corrosione da cloruri

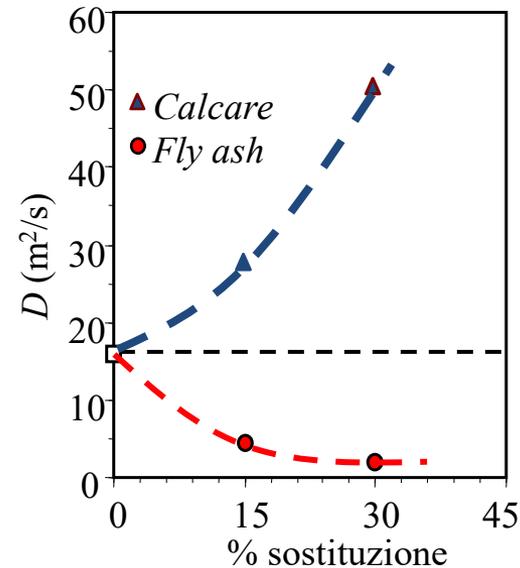


Il legge di Fick: $\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \rightarrow C(x, t) = C_s \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]$

Progetto della durabilità

Proprietà del calcestruzzo

- Rapporto a/c
- Stagionatura
- Tipo di cemento / aggiunte
- Contenuto di cemento
- Additivi
- Lavorabilità
- Posa in opera
- Resistenza a compressione
- Calcestruzzi speciali (SCC, HPC, ...)



Progetto della durabilità

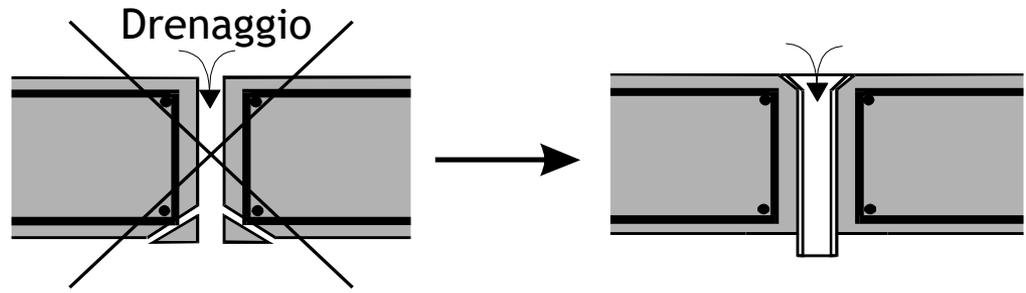
Proprietà del calcestruzzo

- Rapporto a/c
- Stagionatura
- Tipo di cemento / aggiunte
- Contenuto di cemento
- Additivi
- Lavorabilità
- Posa in opera
- Resistenza a compressione
- Calcestruzzi speciali (SCC, HPC, ...)

Proprietà effettive
del calcestruzzo
in opera
↓
controlli

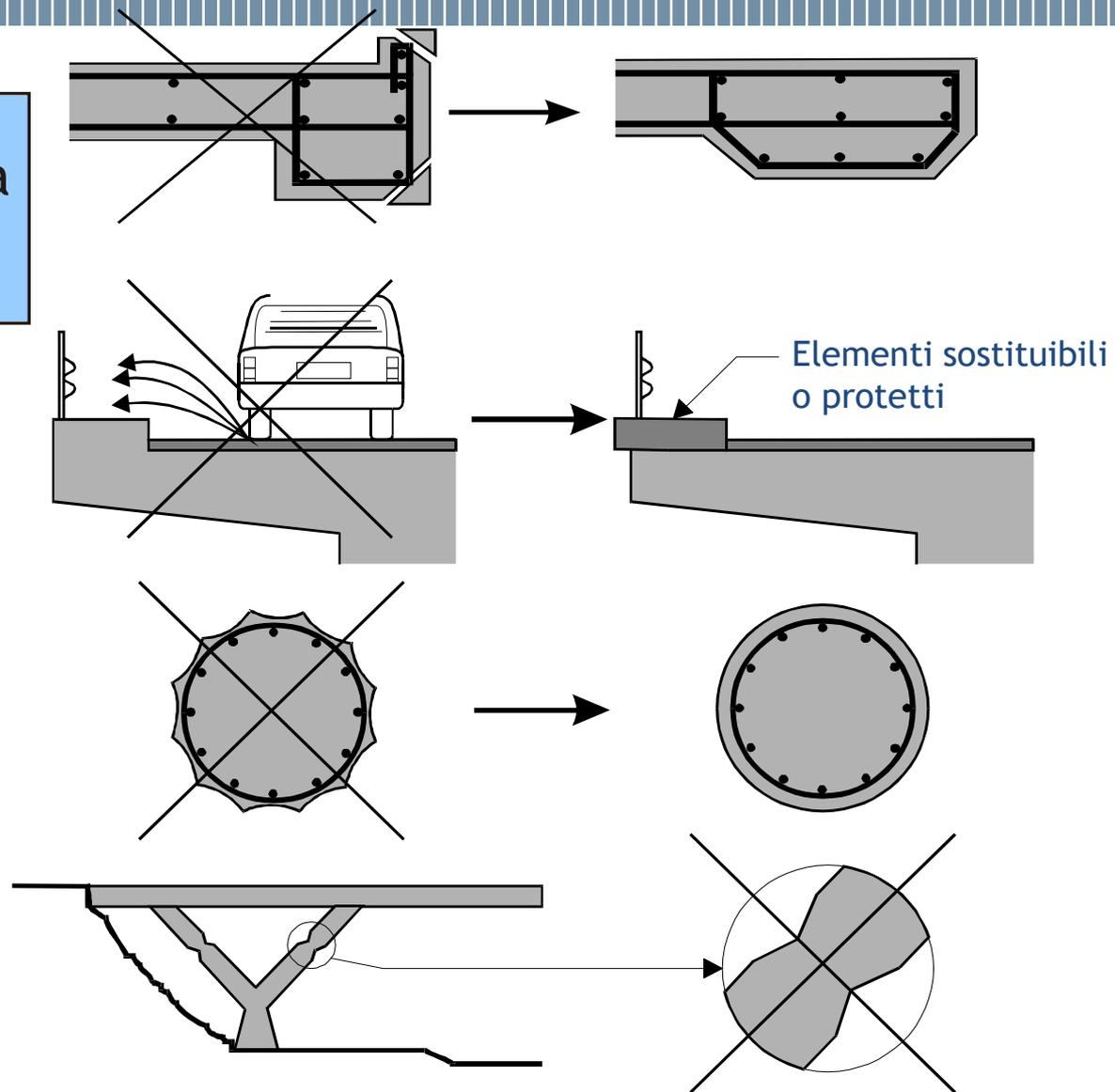
Progetto della durabilità

Progetto della
struttura

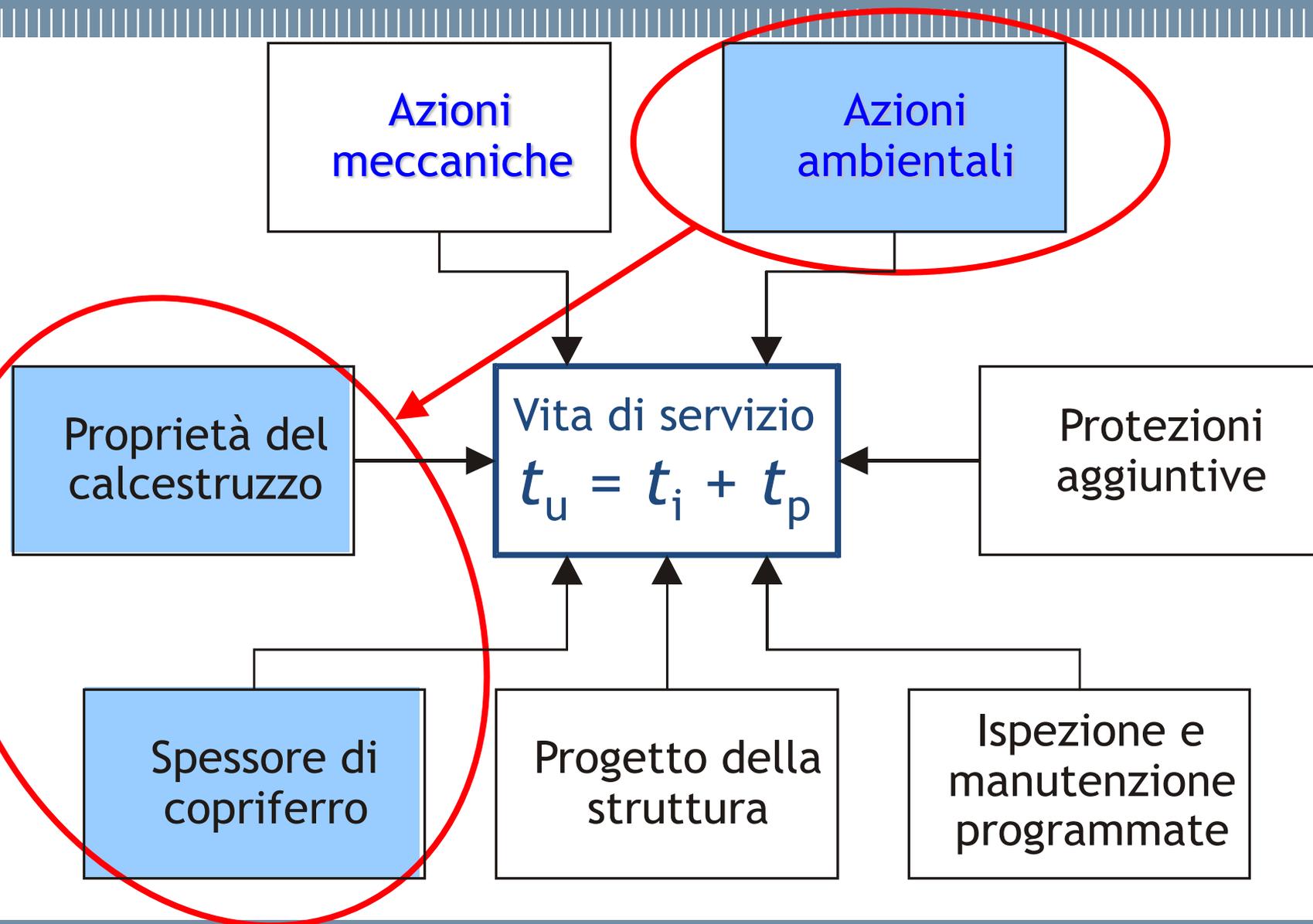


Progetto della durabilità

Progetto della struttura



Prevenzione della corrosione



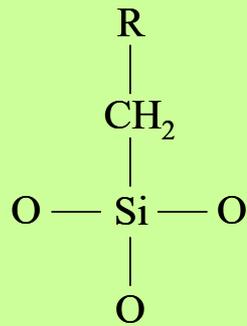
Rivestimenti a FILM CONTINUO

- rivestimenti organici compatibili con il calcestruzzo
- spessore 100-300 μm
- resistenza alla fessurazione

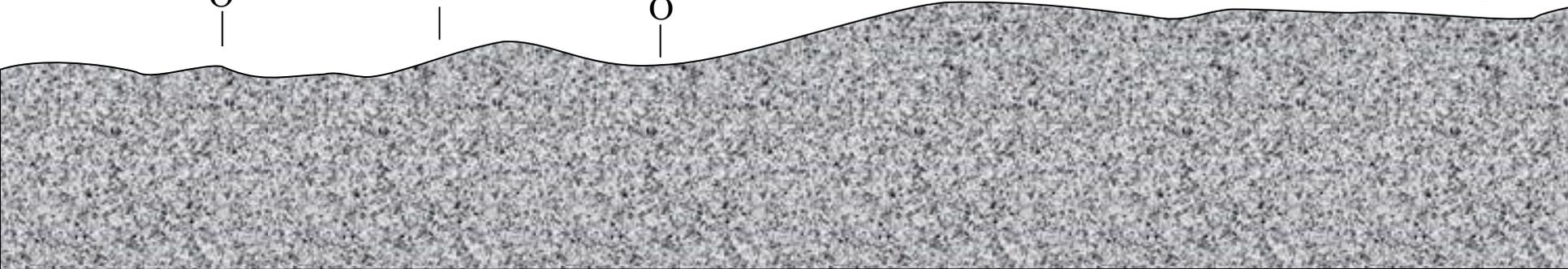
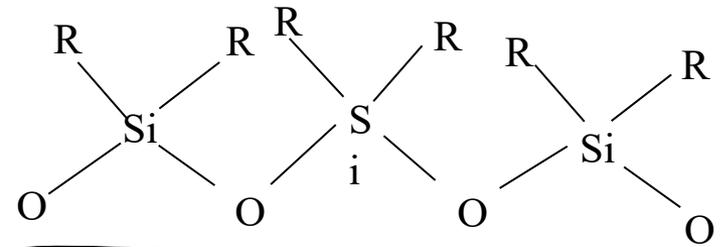
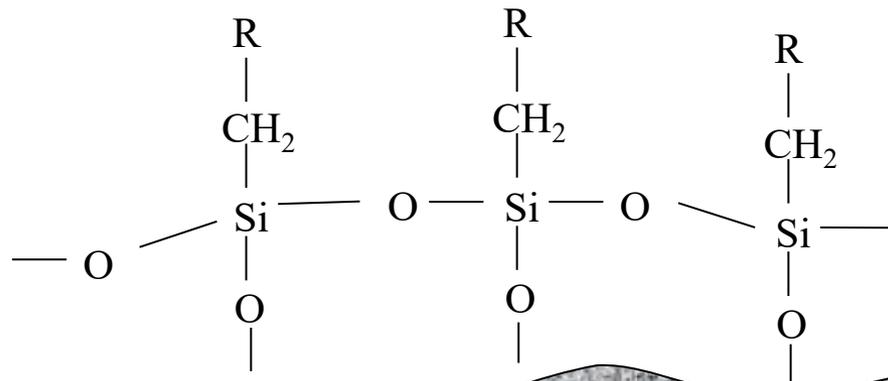
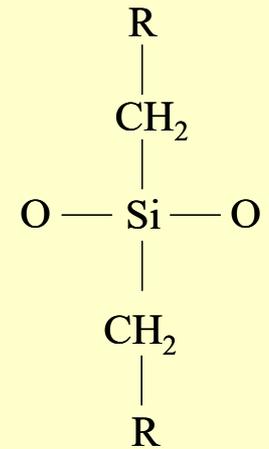
1. Rivestimenti termoplastici o a base di gomma sintetica (acrilici, vinilici, gomma clorurata, poliuretanic monocomponenti)
2. Resine termoindurenti (epossidiche, poliuretaniche, poliesteri)
3. Bitumi, oleoresine

Rivestimenti a IDROREPELLENTI

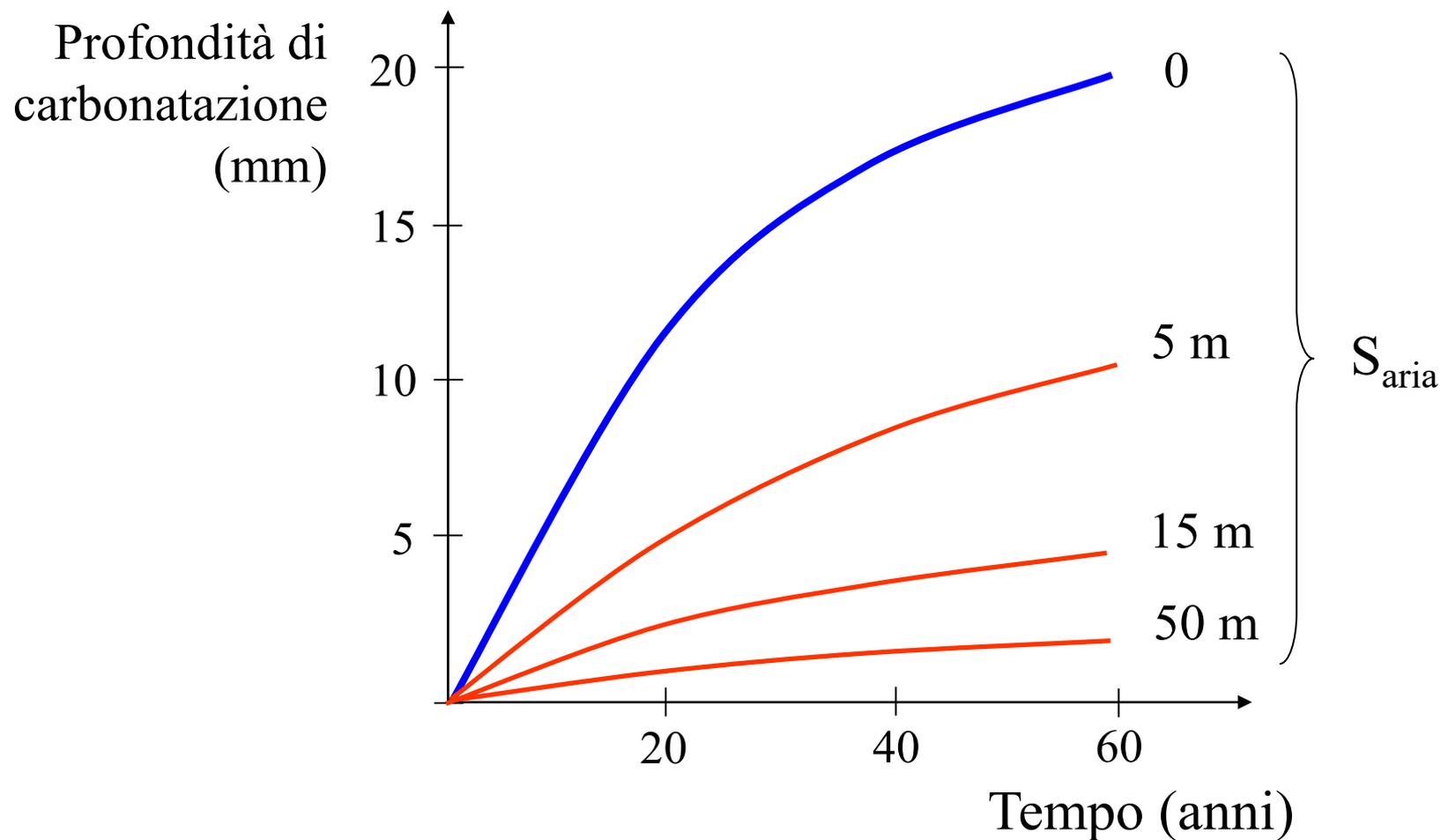
Silani, Silossani,
Siliconati



Siliconi



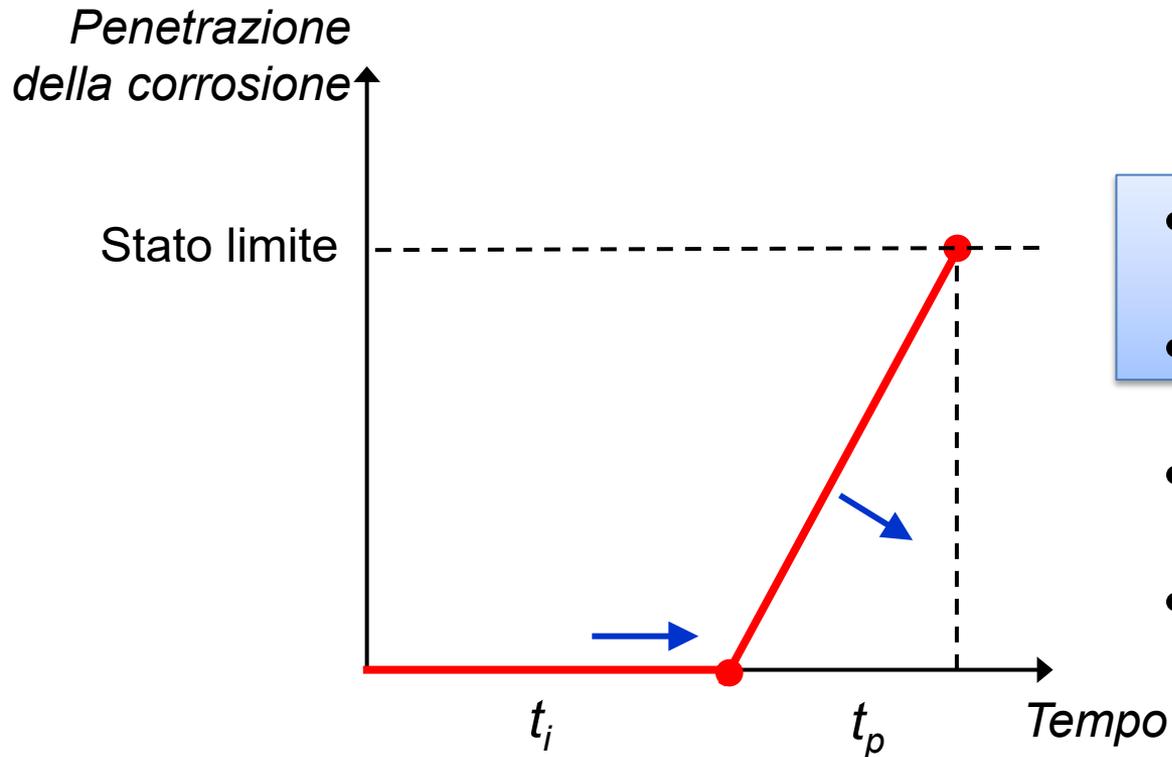
Rivestimenti: barriera alla CO₂





Metodi di prevenzione / protezione aggiuntiva

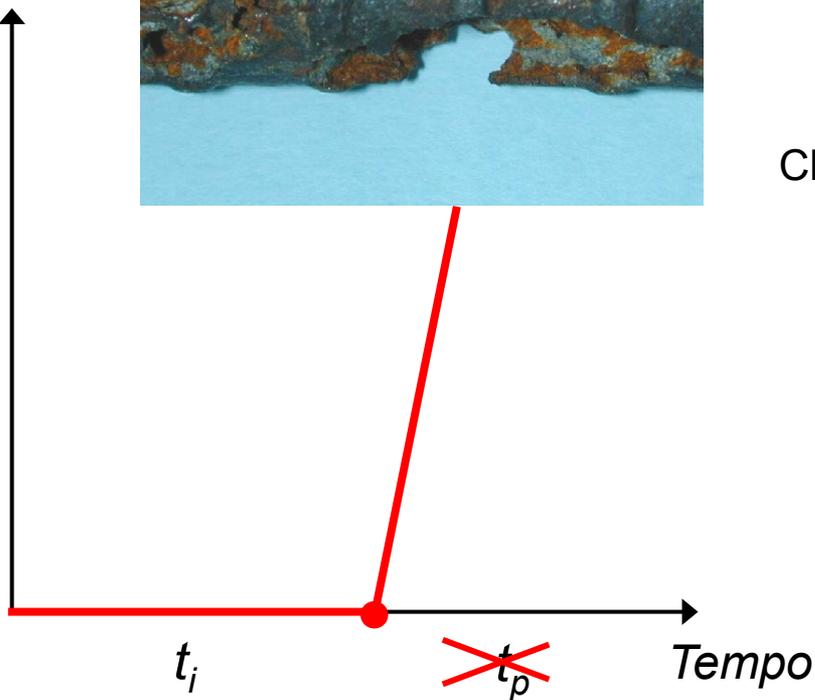
Vita nominale



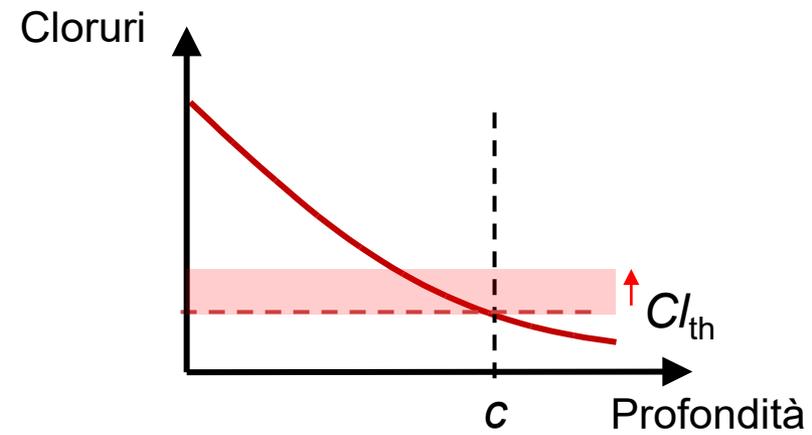
- Prevenzione catodica
- Armature in acciaio inossidabile
- Inibitori di corrosione
- Trattamenti superficiali del calcestruzzo

Corrosione da cloruri

Penetrazione
della corrosione



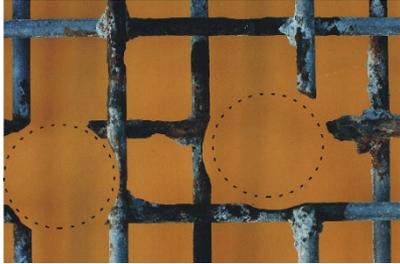
Innesco della corrosione



Prevenzione catodica - C_{th}

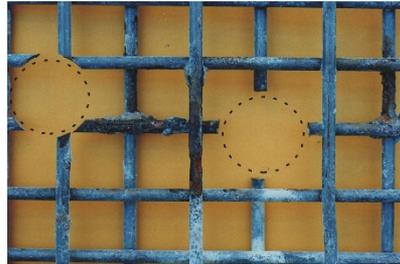
5 anni di prove

Controllo



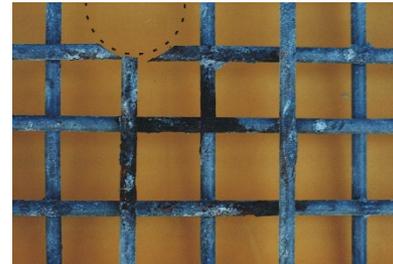
2.5% area corr.
1.5 mm max attacco

0.4 mA/m²



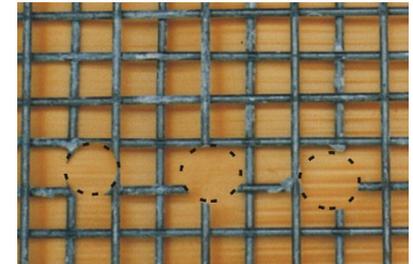
0.7% corr. area
1 mm max attacco

0.8 mA/m²

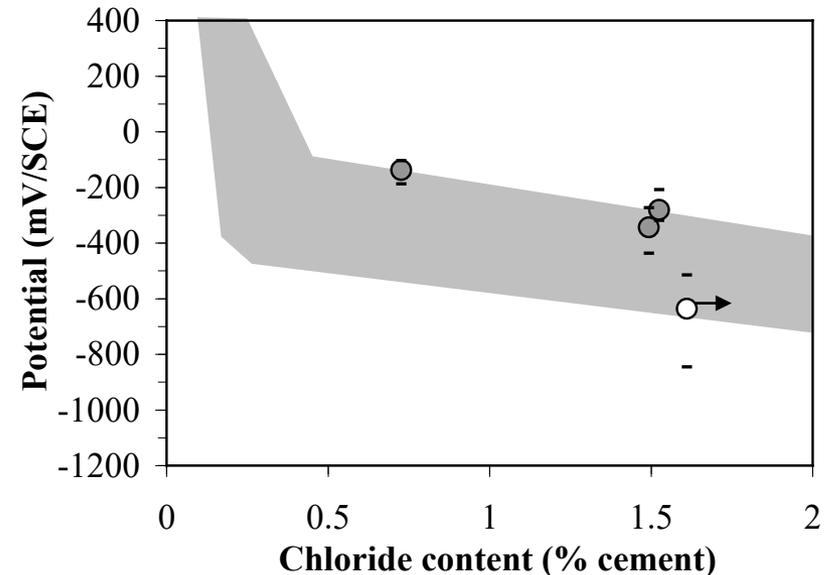
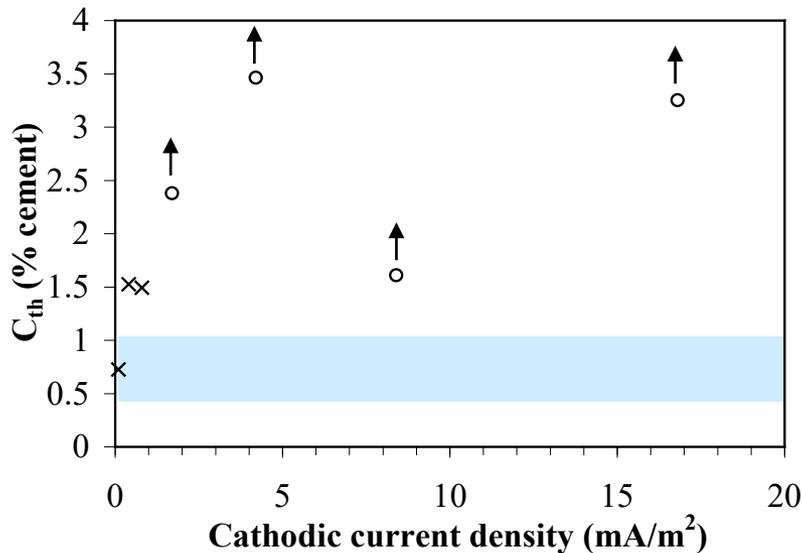


0.7% corr. area
0.8 mm max attacco

1.7 mA/m² o >



0% corr. area
No attacchi



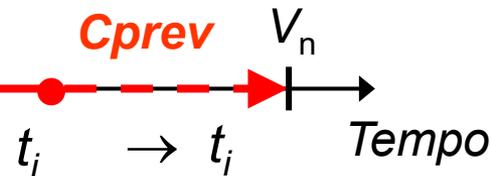
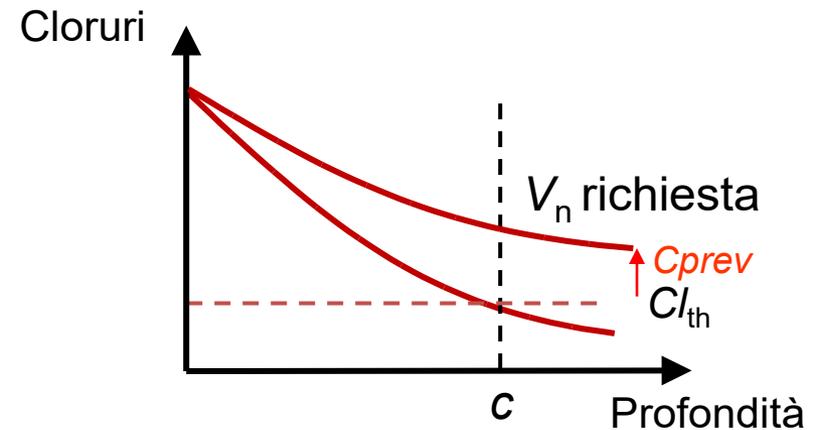
[L.Bertolini, F.Bolzoni, M.Gastaldi, T.Pastore, P.Pedefferri, E.Redaeli, Electrochimica Acta 54(5), 2009]

Prevenzione catodica - Progetto della Durabilità

Corrosione da cloruri

Penetrazione
della corrosione

Innesco della corrosione



Armature in acciaio inossidabile - Cl_{th}

Prove accelerate (cloruri aggiunti al getto)

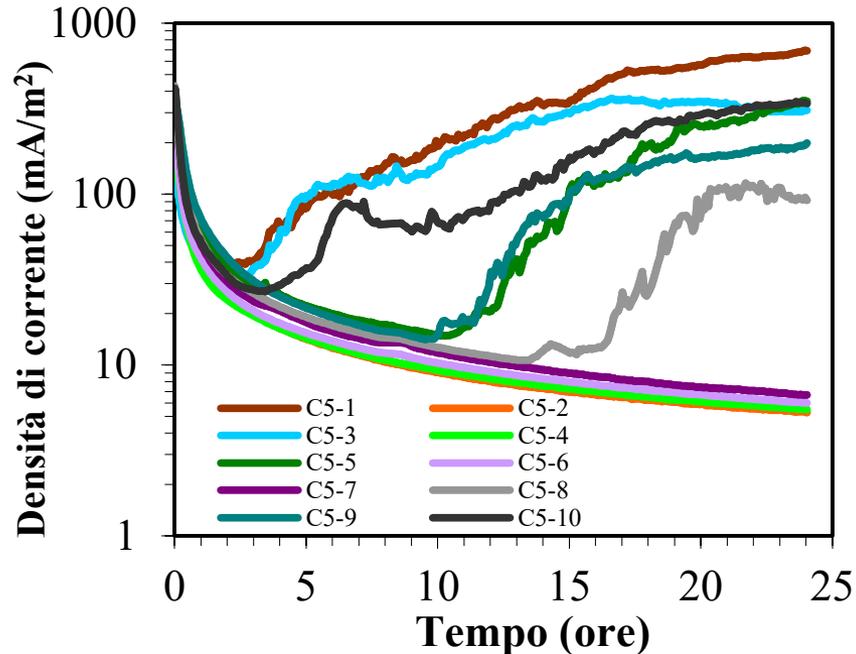


Prove di polarizzazione
potenziostatica

(+200 mV vs SCE - 24h)

Calcestruzzo: a/c = 0.5; 5% Cl vs cem

Acciaio inossidabile: 1.4362 (23-04)



prEN 10370

Steel for reinforcement of
concrete

“Corrosion test method”

Stainless Steel

(proposta prof. Luca Bertolini, gruppo mCD)



Armature in acciaio inossidabile - Cl_{th}

Prove accelerate (cloruri aggiunti al getto)

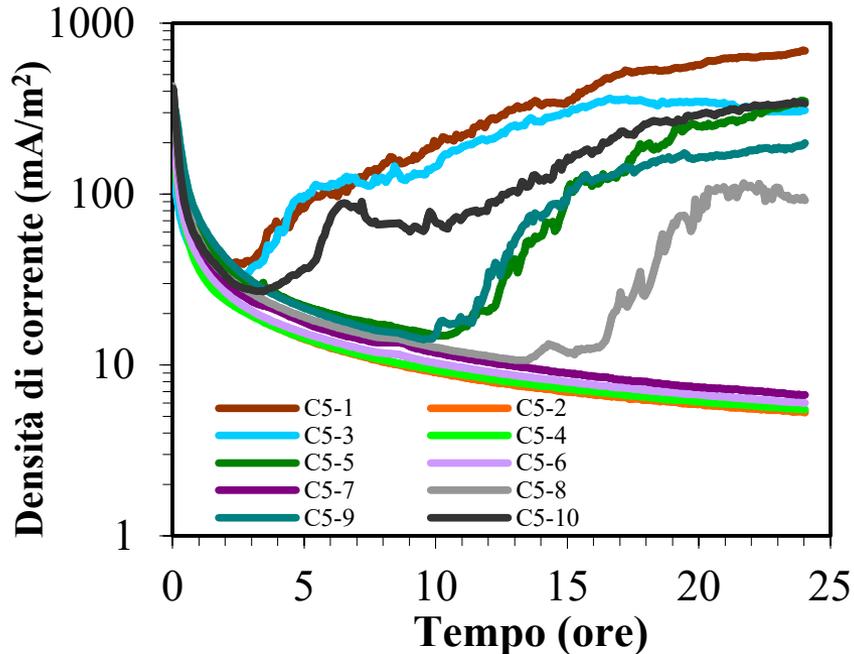


Prove di polarizzazione
potenziostatica

(+200 mV vs SCE - 24h)

Calcestruzzo: a/c = 0.5; 5% Cl vs cem

Acciaio inossidabile: 1.4362 (23-04)



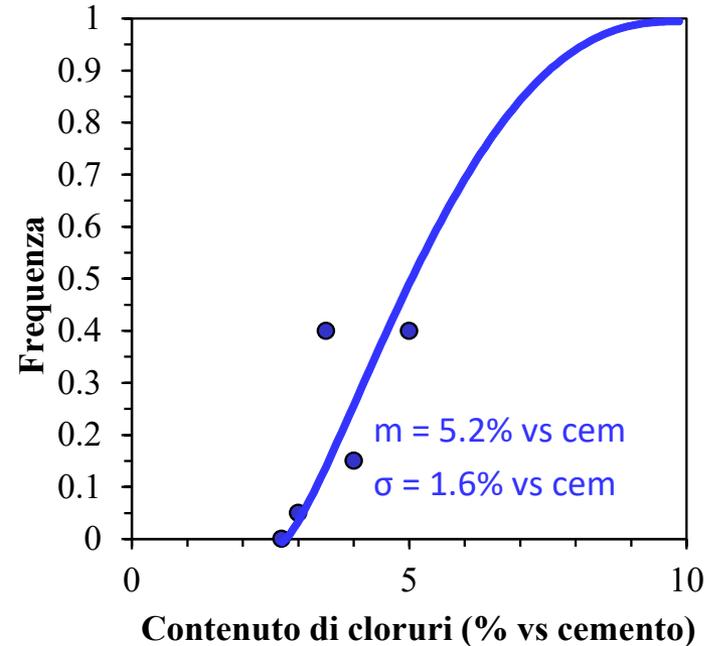
prEN 10370

Steel for reinforcement of
concrete

“Corrosion test method”

Stainless Steel

(proposta prof. Luca Bertolini, gruppo mCD)



$Cl_{th, test}$

Armature in acciaio inossidabile - Cl_{th}

$$Cl_{th,test} \rightarrow Cl_{th,real} = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n \cdot Cl_{th,test}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{amb} = \text{effetto ambiente} \\ k_T = \text{effetto temperatura} \\ k_{cem} = \text{effetto cemento} \\ k_{compattazione} = \text{effetto compattazione cls} \\ \dots \end{array} \right.$$

[M.Gastaldi, F.Lollini, L.Bertolini, Performance-based durability design of concrete structures reinforced with stainless steel bars, The new boundaries of structural concrete, 2013]

[L.Bertolini, M.Gastaldi, F.Lollini, Tecnograph srl, 2014]

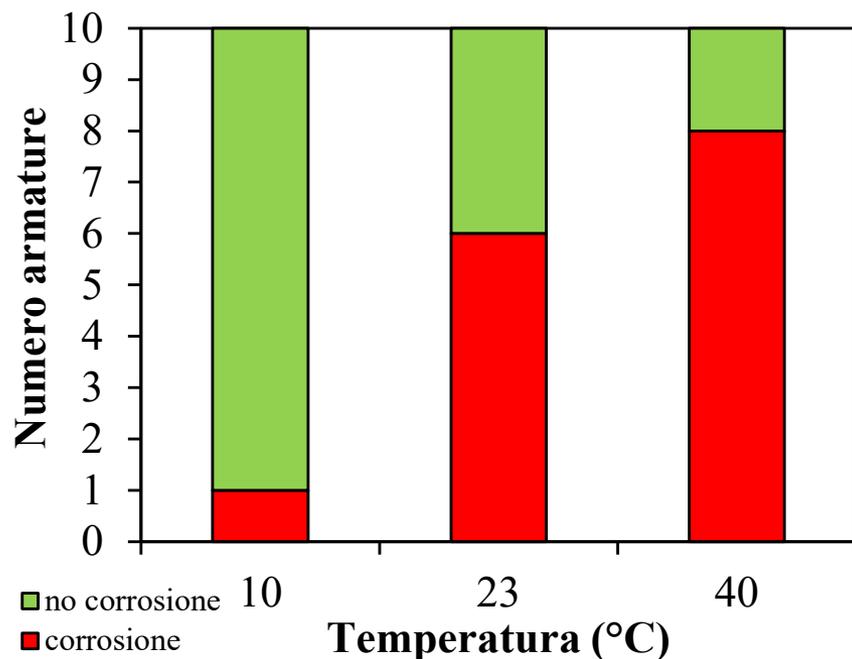
[M.Gastaldi, F.Lollini, L.Bertolini, La Metallurgia Italiana 106 (7-8), 2014]

Armature in acciaio inossidabile - Cl_{th}

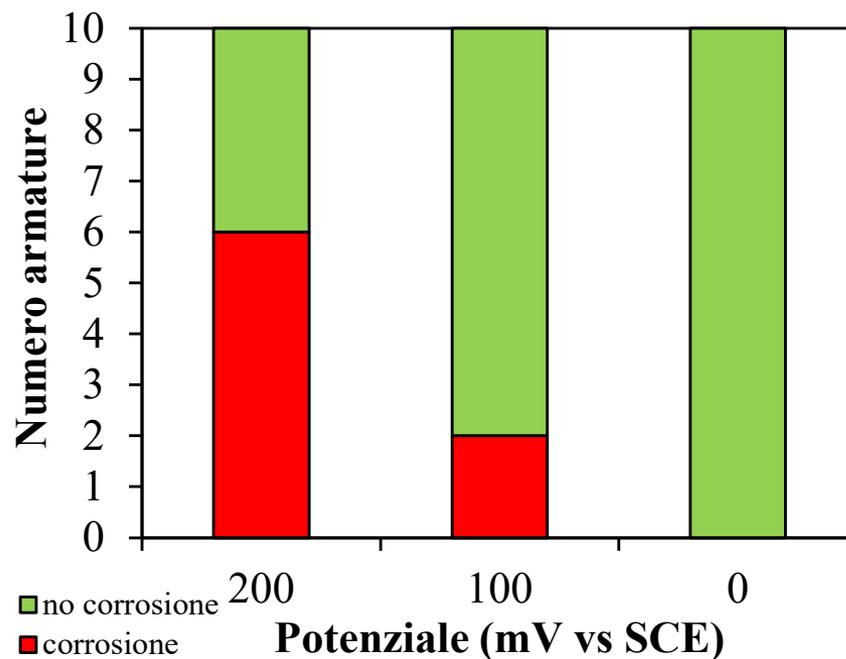
Calcestruzzo: $a/c = 0.5$; 5% Cl vs cem

Acciaio inossidabile: 1.4362 (23-04)

EFFETTO DELLA TEMPERATURA



EFFETTO DEL POTENZIALE

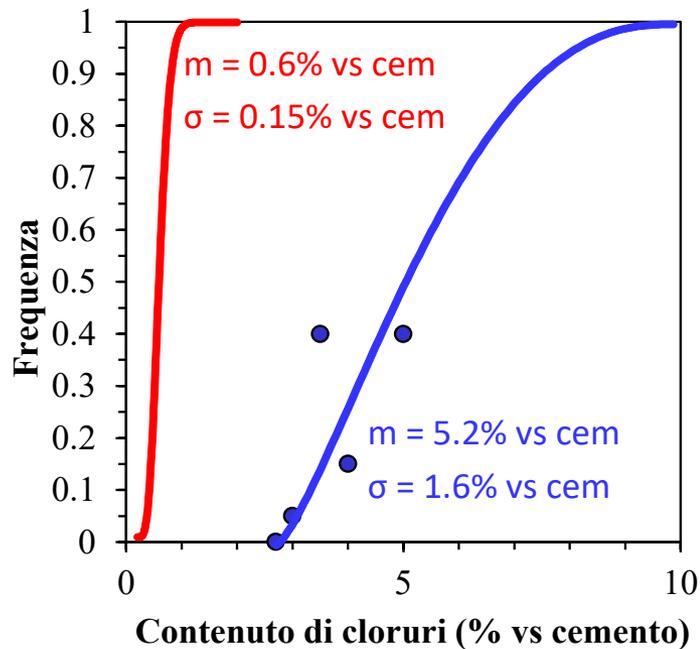


[L.Bertolini, M.Gastaldi, F.Lollini, Tecnograph srl, 2014]

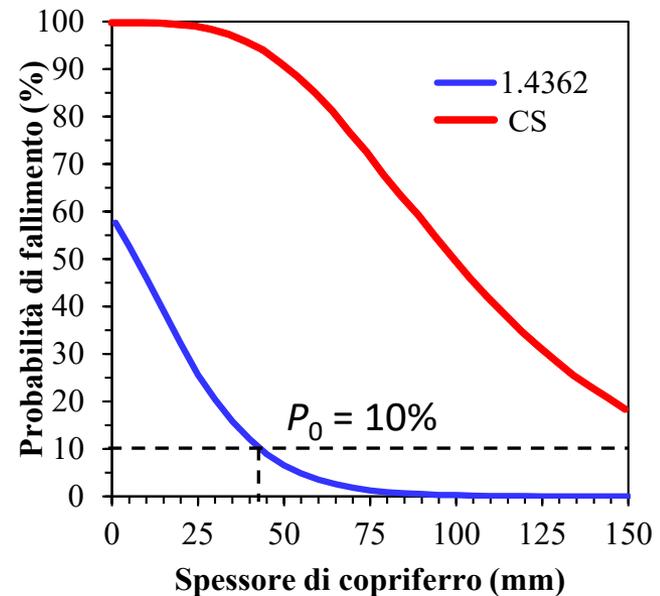
Armature in acciaio inossidabile - Progetto della Durabilità



→ Zona degli spruzzi
 $V_n = 50$ anni



Performance-based approach



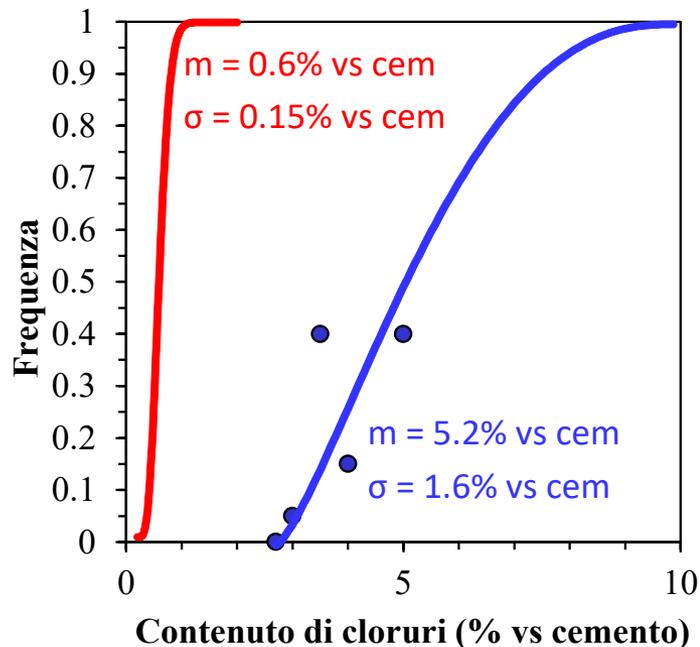
[M.Gastaldi, F.Lollini, L.Bertolini, Performance-based durability design of concrete structures reinforced with stainless steel bars, The new boundaries of structural concrete, 2013]

[M.Gastaldi, F.Lollini, L.Bertolini, La Metallurgia Italiana 106 (7-8), 2014]

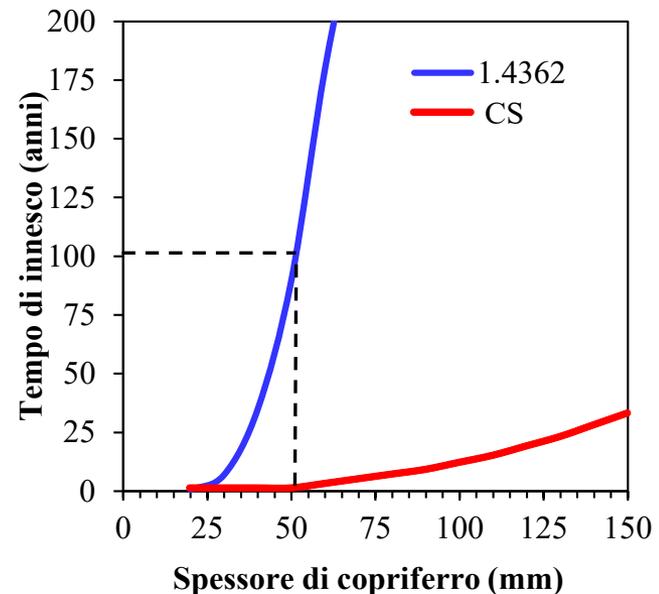
Armature in acciaio inossidabile - Progetto della Durabilità



→ Zona degli spruzzi
 $V_n = 50$ anni



Performance-based approach



[M.Gastaldi, F.Lollini, L.Bertolini, Performance-based durability design of concrete structures reinforced with stainless steel bars, The new boundaries of structural concrete, 2013]

[M.Gastaldi, F.Lollini, L.Bertolini, La Metallurgia Italiana 106 (7-8), 2014]

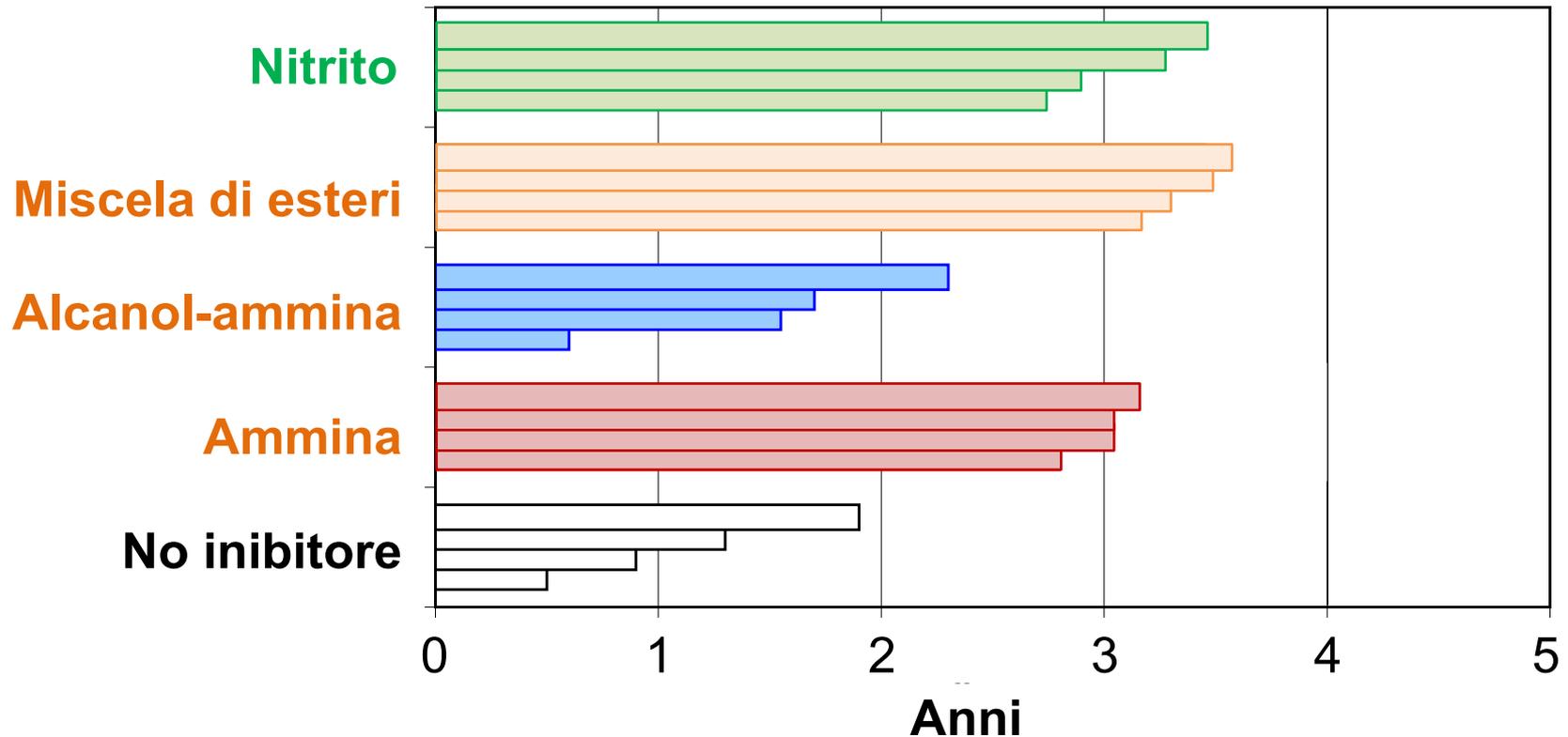
- **Prevenzione: additivi da impasto**
- **Ripristino: inibitori migranti**
- Prodotti *solubili in acqua* e compatibili con il calcestruzzo (no effetti su presa, indurimento, proprietà meccaniche)
- **Ritardano l'innesco della corrosione**
 - ✓ Aumento del tenore critico di cloruri
 - ✓ Riducono la penetrazione dei cloruri (effetto secondario)

- **Prove a medio-lungo termine per caratterizzare l'efficacia inibente nei confronti dei cloruri**
 - ✓ CEM II A/L, a/c 0.5-0.6, copriferro 20 mm
 - ✓ **Prodotti commerciali**
 - Nitrito di calcio
 - Tre prodotti organici
 - ✓ **Sostanze organiche**
 - Circa 100 composti puri
 - Ammine
 - Amminoacidi
 - Carbossilati
- Dal 1997 al 2010



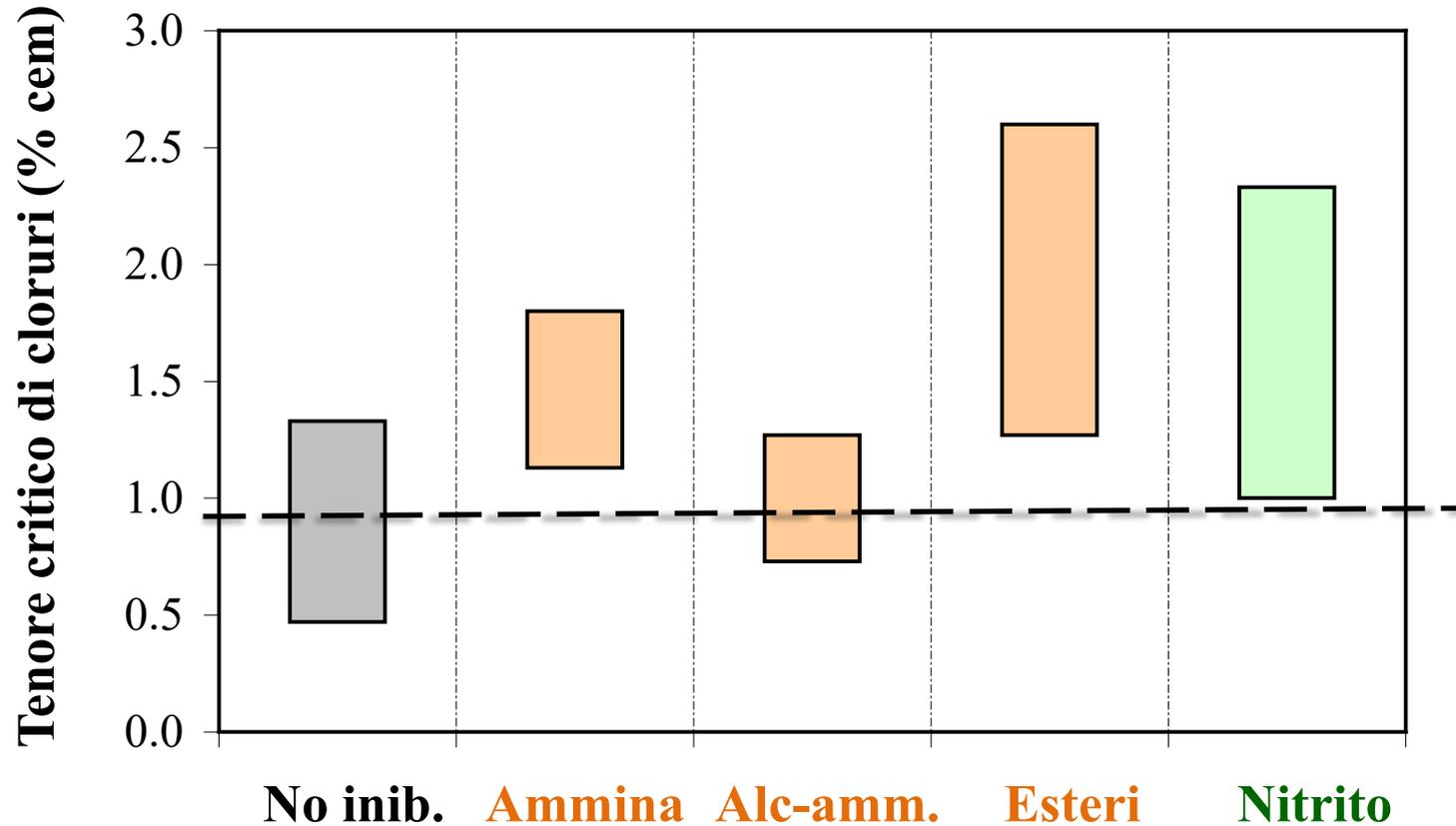
Prodotti commerciali: tempo di innesco

- Diminuzione del potenziale e aumento della velocità di corrosione



[M. Ormellese, M. Berra, F. Bolzoni, T. Pastore, Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion in reinforced concrete structures, Cement and Concrete Research, 36, (2006) 536–547]

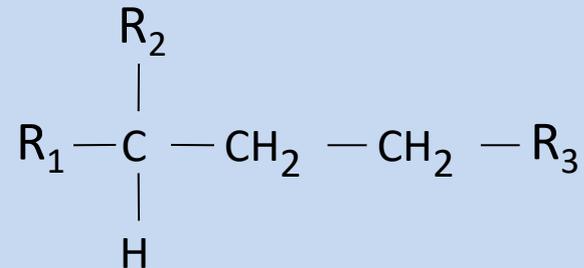
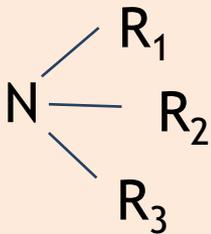
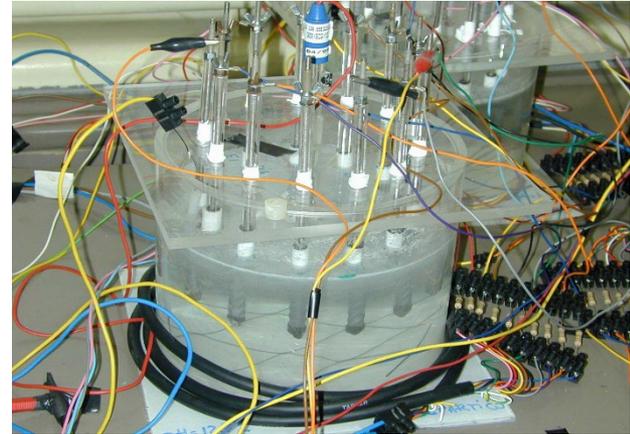
Tenore critico di cloruri



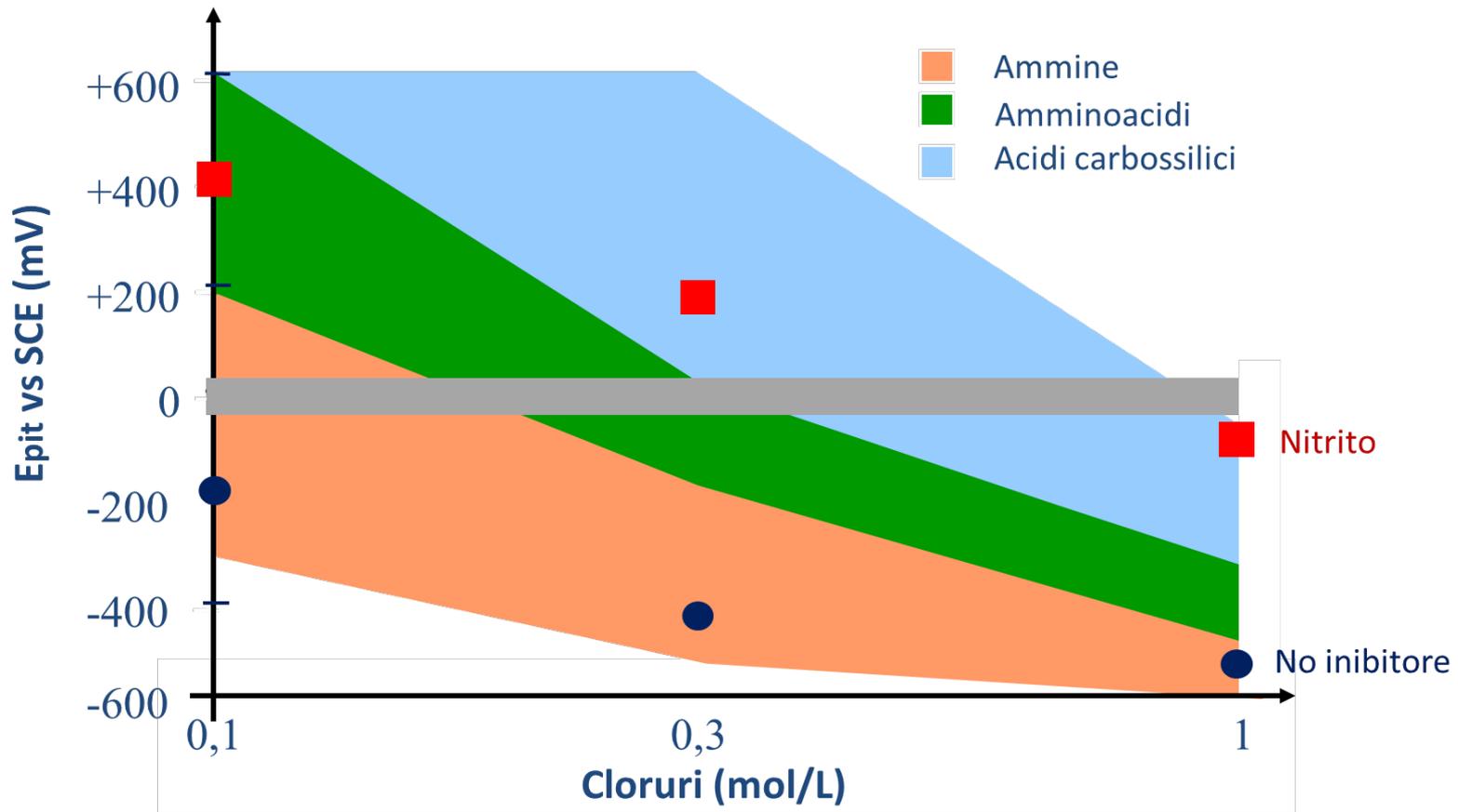
[F. Bolzoni, A. Brenna, G. Fumagalli, S. Goidanich, L. Lazzari, M. Ormellese, M. Pedferri, Experiences on corrosion inhibitors for reinforced concrete, Int. J. Corros. Scale Inhib., 3, no. 4 (2014) 254–278.]

Prodotti organici puri

- Testate circa 100 sostanze (potenziodinamiche in soluzione)
 - ✓ **Ammine**
 - ✓ **Alcanol-ammine**
 - ✓ **Amminoacidi**
 - ✓ **Mono-carbossilati**
 - ✓ **Poli-carbossilati**

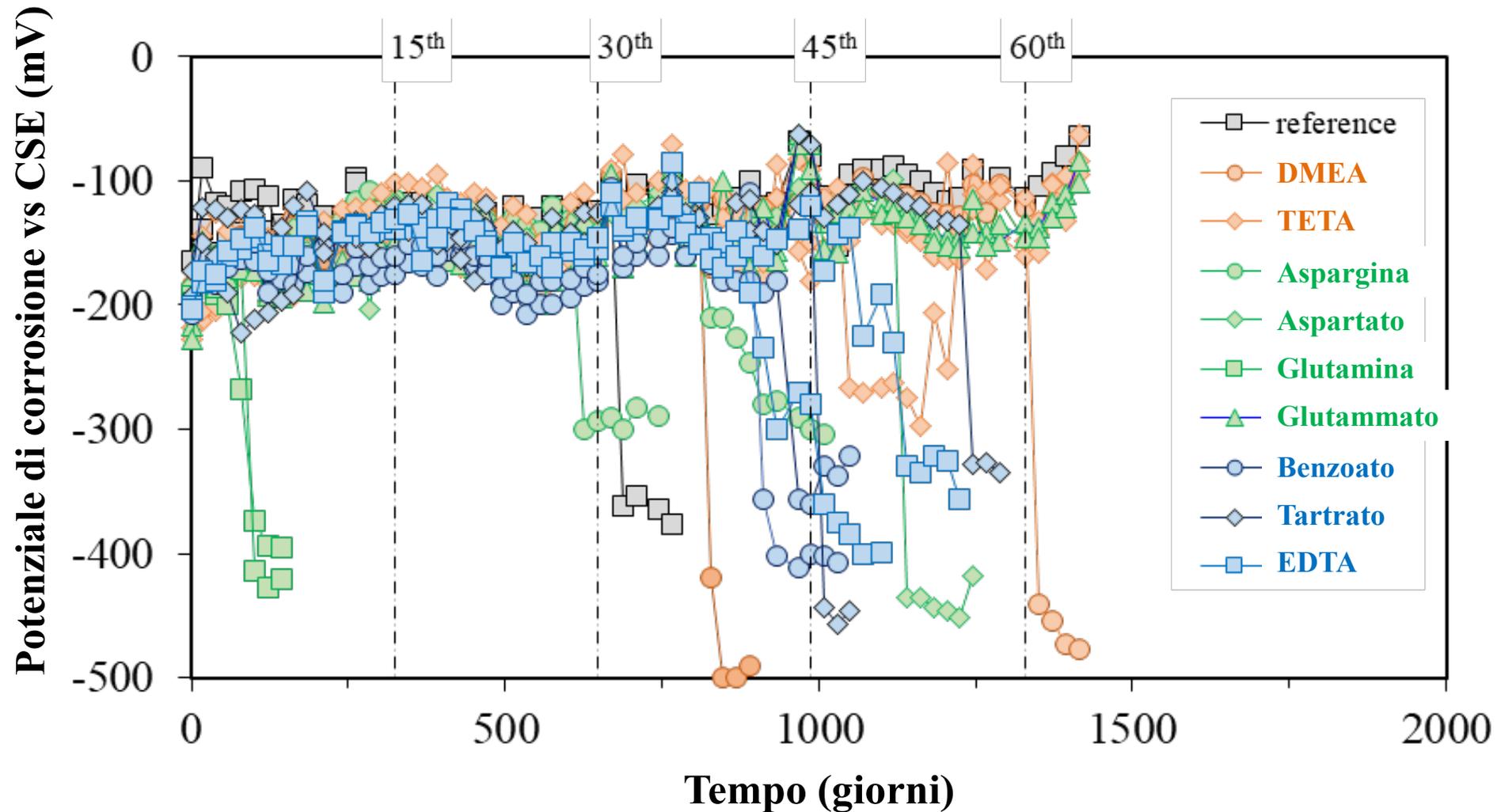


Effetto sul potenziale di pitting



[M. Ormellese, L. Lazzari, S. Goidanich, G. Fumagalli, A. Brenna, A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete, Corrosion Science, 51, 12 (2009) 2959–2968]

Prodotti organici puri: prove in calcestruzzo



Sostanze candidate

Ammine (N-)	Dimetiletanolammina (<i>DMEA</i>)	$N - R_1R_2R_3$
	Trietilentetrammina (TETA)	<i>Complessante del Fe</i>
Aminoacidi (N- & COO-)	Aspargina	$R_1R_2 - C_2H_3 - R_3$
	Aspartato di sodio	
	Glutammina	$R_1R_2 - C_3H_5 - R_3$
	Glutammato di sodio	
Carbossilati (COO-)	Benzoato di sodio	$R - (COOH)$
	Tartrato di sodio	$R - (COOH)_2$
	EDTA	$R - (COOH)_4$

Considerazione finali su inibitori di corrosione

- **Inibitori da impasto**

- ✓ Possono aumentare il tempo di innesco della corrosione da cloruri
 - Influenza sul tenore critico di cloruri
- ✓ Non si osservano significative riduzioni della velocità di corrosione

- **Inibitori migranti**

- ✓ Effetti solo se applicati prima dell'innesco della corrosione

- **Composti organici**

- ✓ Alcune sostanze hanno mostrato risultati promettenti

[F. Bolzoni, A. Brenna, G. Fumagalli, S. Goidanich, L. Lazzari, M. Ormellese, MP. Pedferri, Inibitori di corrosione per calcestruzzo armato: 15 anni di sperimentazione @PoliLaPP, La Metallurgia Italiana, 107, (2015) 53-60]

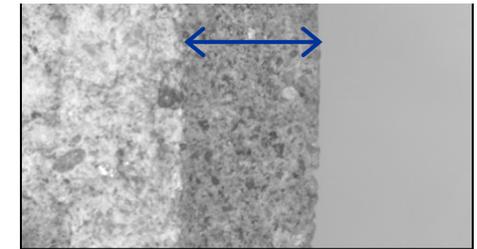
Rivestimenti a base cementizia: studio sperimentale

- **Comportamento a lungo termine di malte cementizie modificate con polimeri**

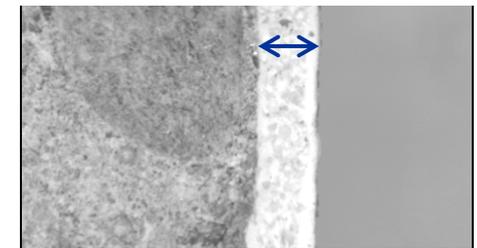
- ✓ CEM II A/L, a/c 0.5-0.6, copriferro 20 mm
- ✓ Corrosione da cloruri (ponding)
- ✓ Corrosione da carbonatazione
- ✓ **Malte modificate con polimeri acrilici**
 - Spessore 2÷3 mm
 - Rapporto P/C = 0,35 – 0,55
- ✓ **Rivestimento acrilico**
 - Spessore 0,4-0,6 mm
- ✓ **Pittura acrilica**
 - Spessore 0,2-0,3 mm

- Dal 1997 al 2015

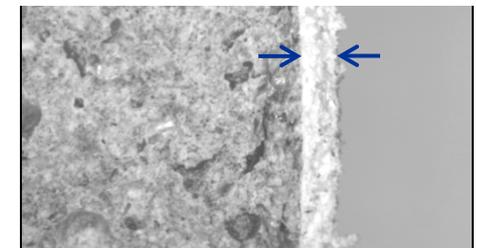
2.33 mm



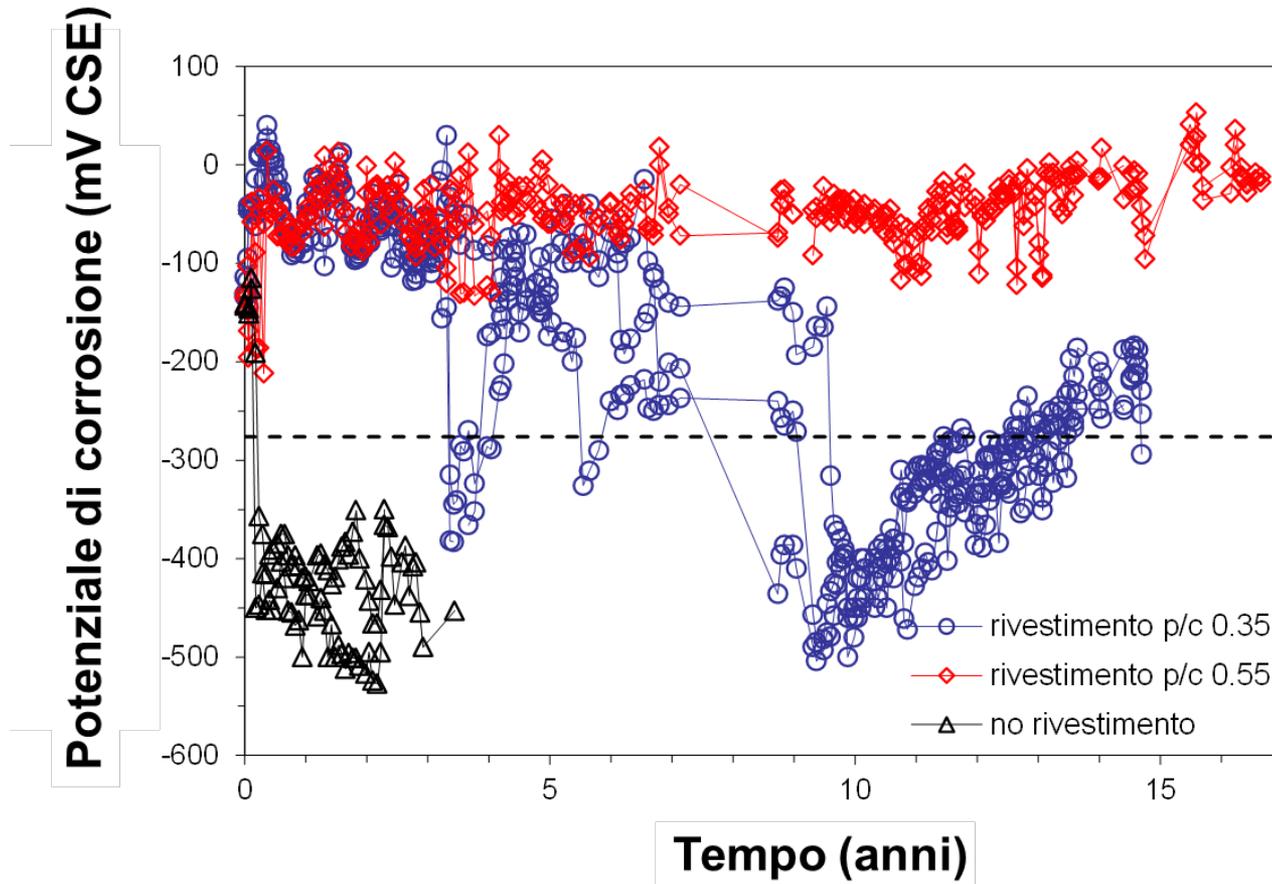
0.51 mm



0.29 mm

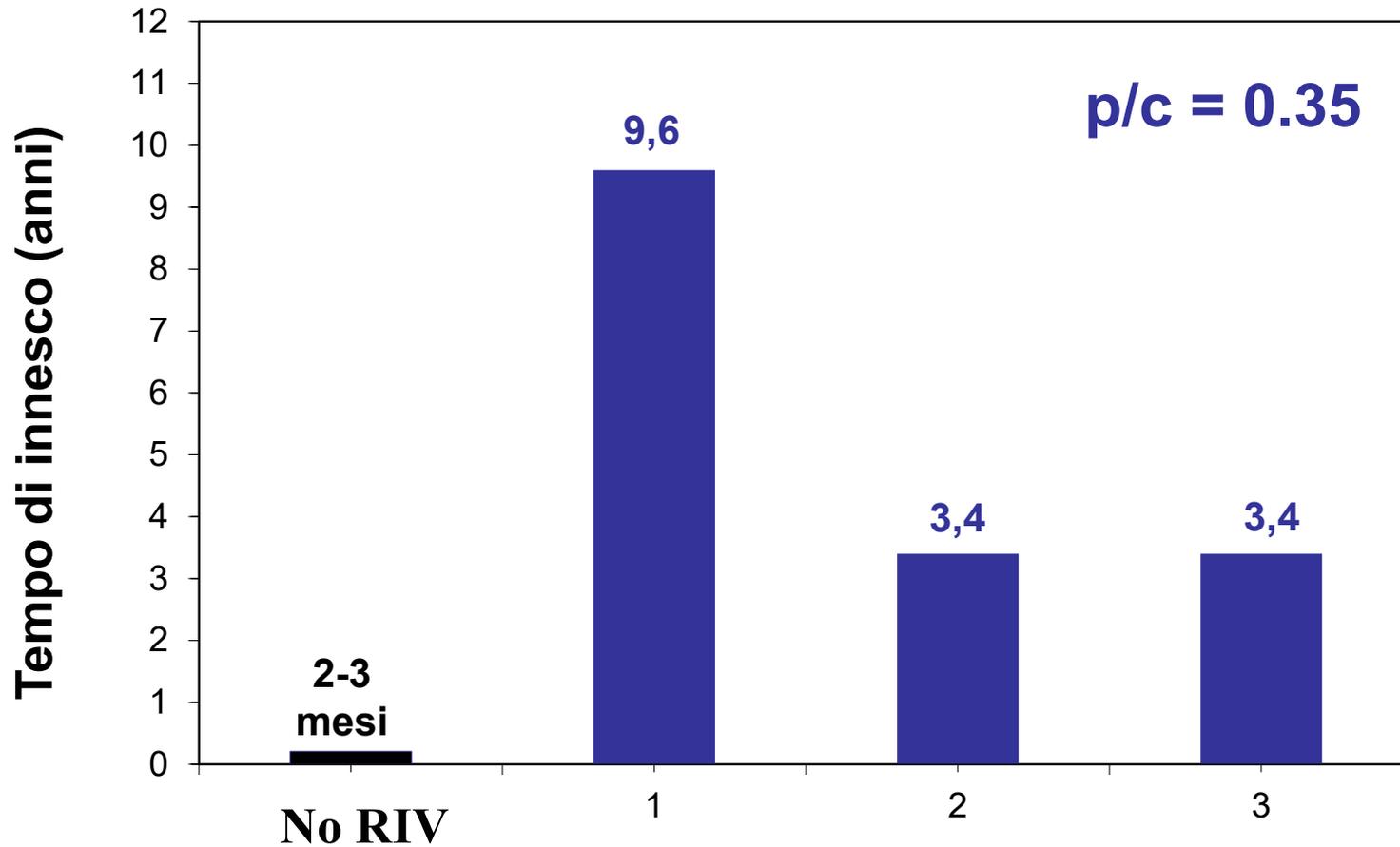


Monitoraggio del potenziale per 17 anni



[A. Brenna, F. Bolzoni, S. Beretta, M. Ormellese, Long-term chloride-induced corrosion monitoring of reinforced concrete coated with commercial polymer-modified mortar and polymeric coatings, Construction and Building Materials 48 (2013) 734–744]

Tempo di innesco della corrosione da cloruri



$p/c = 0.55$ Armature passive dopo 17 anni di misure

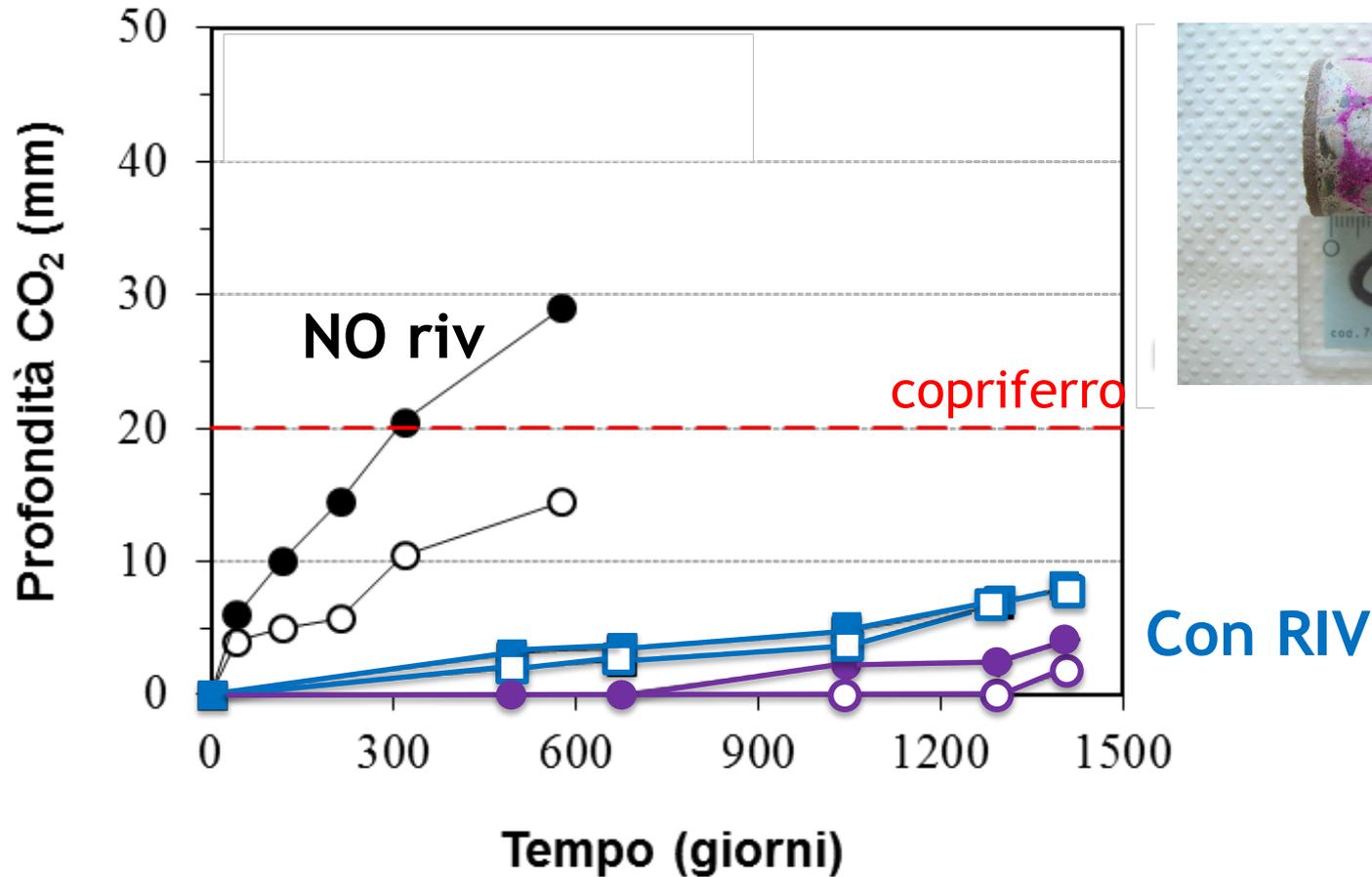
Coefficiente di diffusione - Tenore critico di cloruri

	Coefficiente di diffusione (10^{-8} cm ² /s)	Tenore critico cloruri (% vs cem.)
No rivestimento	15	0,5 – 0,6
Rivestimento (p/c 0,35)	1 – 5	0,6 – 0,7
Pitture acriliche	2 – 8	0,5 – 0,7

Il rivestimento cementizio è più porosa della pittura acrilica, ma si comporta meglio perché ha un maggior spessore

[M.V. Diamanti, A. Brenna, F. Bolzoni, M. Berra, T. Pastore, M. Ormellese, Effect of polymer modified cementitious coatings on water and chloride permeability in concrete, Construction and Building Materials 49 (2013) 720–728]

Profondità di carbonatazione – camera CO₂



Profondità di carbonatazione – atmosfera Milano

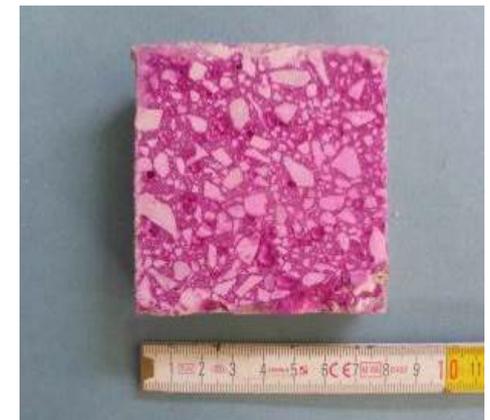
- Inizio prove 1997
- Misura CO₂
- Tempo trascorso **17 anni**

Rivestimento	A/C	Profondità (mm)
Assente	0,50	5
	0,65	10
Riv. P/C 0.55	0,50	0
Pitture acriliche	0,65	2-3

Non rivestito



Rivestito

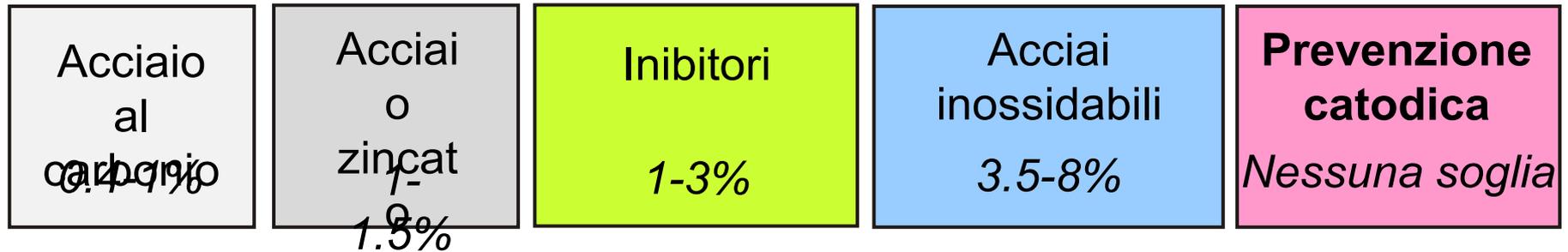


Considerazioni finali sui rivestimenti

- **Considerevole aumento del tempo di innesco**
 - ✓ Riduzione della penetrazione dei cloruri
 - No effetto sul tenore critico (come ovvio attendersi)
 - ✓ Riduzione dell'avanzamento carbonatazione
 - Coefficiente di carbonatazione 10 volte inferiore
- **Effetto di riduzione anche sulla velocità di corrosione**
 - ✓ Bassa presenza di acqua nel calcestruzzo
 - ✓ Alta resistività del calcestruzzo
- L'effetto protettivo aumenta all'aumentare del rapporto P/C

[A. Brenna, S. Beretta, M. Berra, M.V. Diamanti, M. Ormellese, T. Pastore, M. Pedefferri, F. Bolzoni, Effect of polymer modified cementitious coatings on chloride induced corrosion of steel in concrete, Structural Concrete, (2019) 1-13]

Effetto sistemi di protezione/prevenzione sui cloruri



Tenore critico di cloruri