



POLITECNICO
MILANO 1863

La corrosione nel calcestruzzo

Sistemi di protezione dalla corrosione

Prof. Marco Ormellese

PoliLaPP – Laboratorio di Corrosione dei Materiali “P. Pedferri”

La corrosione

- La **corrosione** è il deterioramento di un **materiale metallico** (acciaio, alluminio, zinco, ...) a causa dell'interazione con un **ambiente** (terreno, atmosfera, acque, calcestruzzo, ...)
- La corrosione può essere di due tipi
 - ✓ **a umido (in presenza di acqua)**
 - ✓ **a secco (gas ad alta temperatura)**

- P. Pedferri, **Corrosione e protezione dei materiali metallici**, 2 volumi, Polipress, Milano, 2007
- P. Pedferri, **Corrosion science and engineering**, Springer, 2018



Ferro + Acqua + Ossigeno = Ruggine

È un processo ELETTROCHIMICO, con 4 processi parziali



✓ Trasporto di corrente nel metallo

✓ Circolazione di corrente nell'ambiente

**Gli elettroni «richiesti» dalla reazione catodica
sono “liberati” dalla reazione anodica**

Corrosione nel calcestruzzo

- **Calcestruzzo** = acqua + cemento + aggregati
 - ✓ Materiale solido poroso
- Contiene nei pori una **soluzione alcalina**
 - ✓ pH = 13 - 14 (cemento Portland)
 - ✓ pH = 12,6 - 13 (cemento di miscela)
- **In ambiente alcalino non inquinato da cloruri l'acciaio al carbonio è passivo**
 - ✓ Comportamento simile all'acciaio inossidabile AISI 304 in acque neutre
 - ✓ La corrosione è ingegneristicamente trascurabile ($V_{cor} < 2 \mu\text{m}/\text{anno}$)

- La corrosione si innesca quando lo **strato passivo viene distrutto**, e propaga solo se sulle armature sono presenti **acqua e ossigeno**

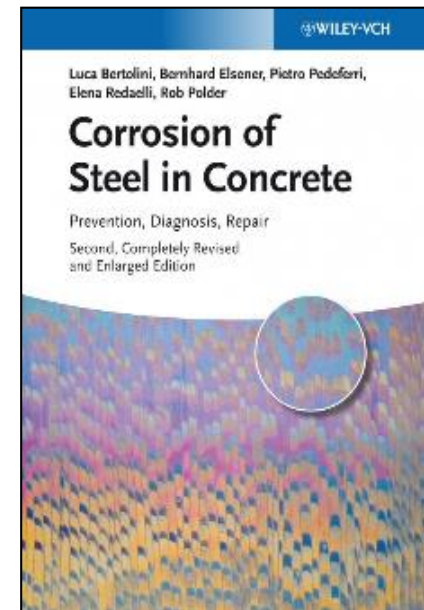
Cause di corrosione

- La corrosione si innesca quando lo **strato passivo viene distrutto**, e propaga solo se sulle armature sono presenti **acqua e ossigeno**
- **Principali cause di rottura del film passivo**
 - ✓ Carbonatazione del calcestruzzo
 - ✓ Penetrazione dei cloruri
 - ✓ Infragilimento da idrogeno
 - ✓ Interferenze elettriche
 - ✓ Macro-coppie

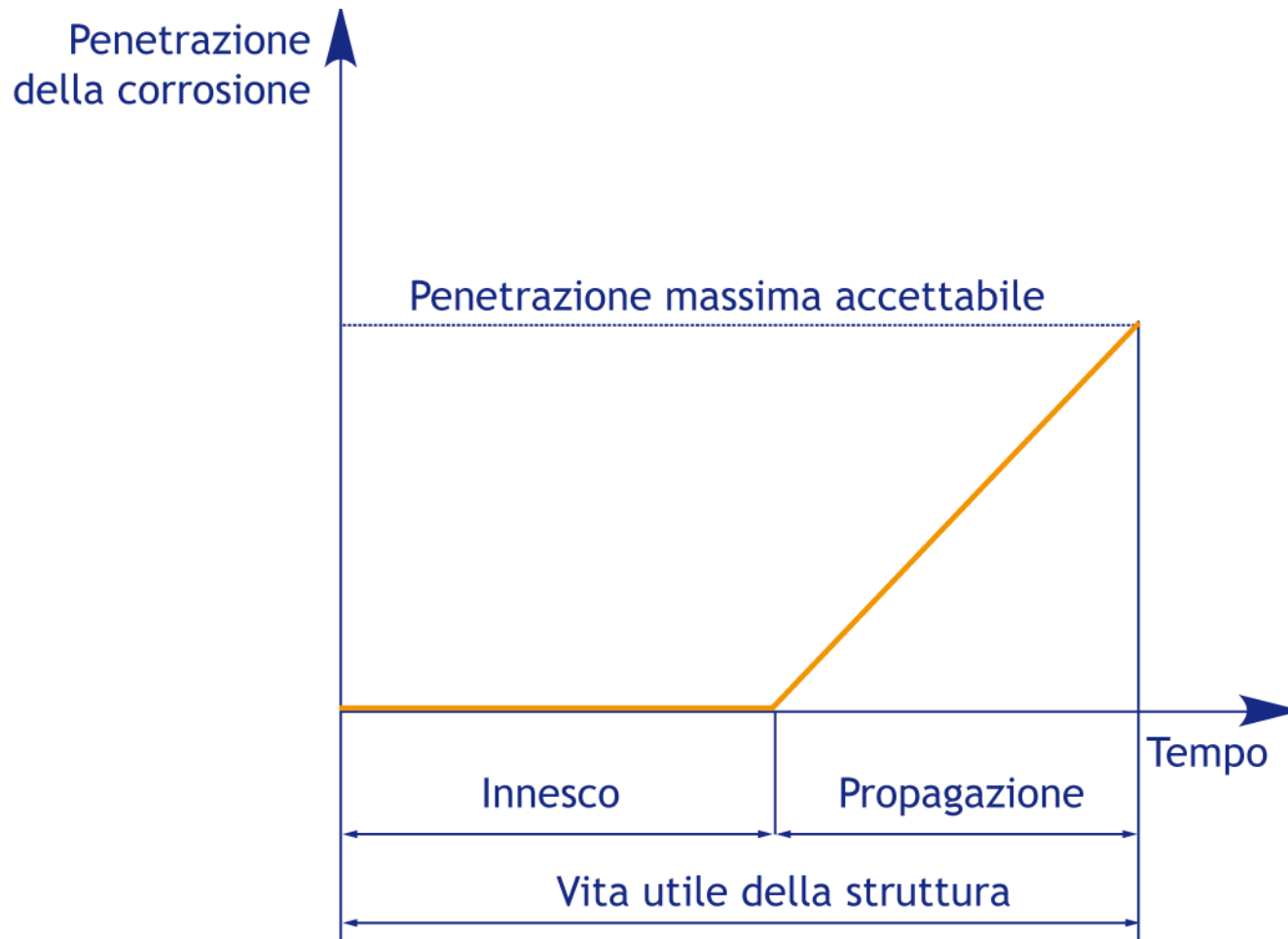
Cause di corrosione

- La corrosione si innesca quando lo **strato passivo viene distrutto**, e propaga solo se sulle armature sono presenti **acqua e ossigeno**
- **Principali cause di rottura del film passivo**
 - ✓ Carbonatazione del calcestruzzo
 - ✓ Penetrazione dei cloruri
 - ✓ Infragilimento da idrogeno
 - ✓ Interferenze elettriche
 - ✓ Macro-coppie

– L. Bertolini, B. Elsener, E. Redaelli P. Pedefferri, R. Polder, **Corrosion of steel in concrete – Prevention, Diagnosis, Repair**, Wiley-VCH, 2016



Innesco e propagazione



Norme di riferimento

- **UNI EN 206** - Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità
- **Eurocodice 2** – Progettazione delle strutture di calcestruzzo
- **NTC 2018** - Norme tecniche per le costruzioni 2018

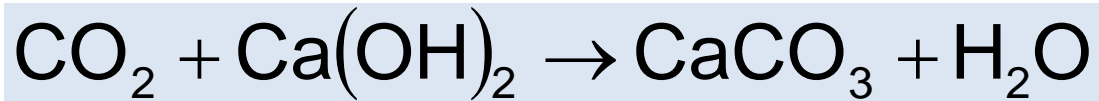
- **Calcestruzzo**

- ✓ Rapporto A/C
- ✓ Stagionatura del calcestruzzo
- ✓ Copriferro
- ✓ Presenza di fessure
- ✓ Tipo di cemento

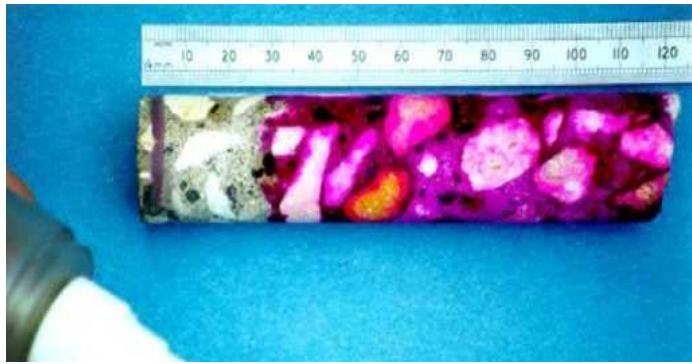
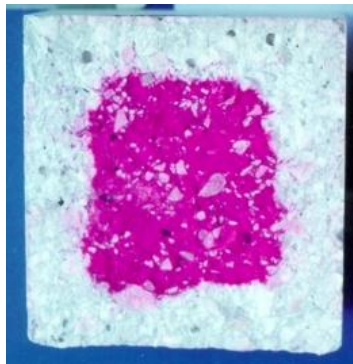
- **Ambiente**

- ✓ Contenuto di CO₂
- ✓ Contenuto di cloruri
- ✓ Esposizione ambientale
- ✓ Umidità relativa (cicli umido-secco)
- ✓ Temperatura

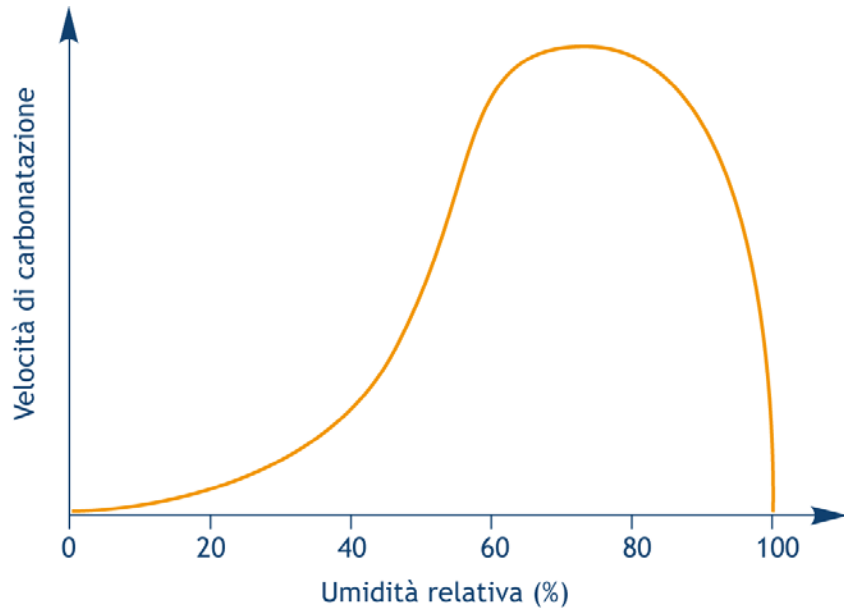
Corrosione da carbonatazione



- Ingresso CO₂ nel calcestruzzo – legge di avanzamento parabolica
- Riduzione del pH da 13 a 9
- Rottura generalizzata del film passivo
- Velocità di corrosione massima **100 µm/anno**
- Effetti: distacco del copriferro



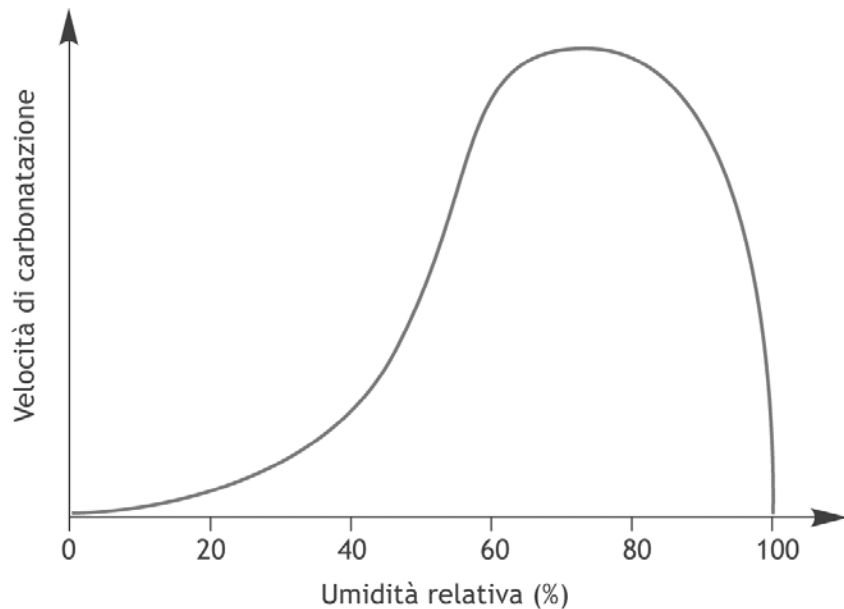
Corrosione da carbonatazione



Fase di innesco

- Ingresso CO_2 ($s = K \cdot t^{1/2}$)
- UR 60-70%
- Qualità cls (A/C – stagionatura)

Corrosione da carbonatazione

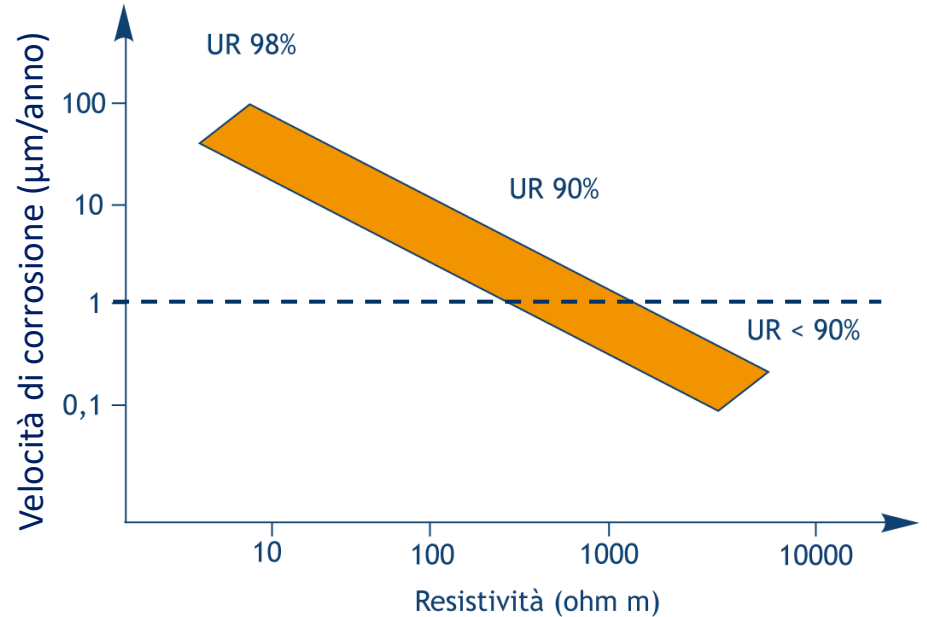


Fase di innesco

- Ingresso CO_2 ($s = K \cdot t^{1/2}$)
- UR 60-70%
- Qualità cls (A/C – stagionatura)

Fase di propagazione

- Ossigeno
- Resistività cls
- UR > 90%



Corrosione da carbonatazione



LA NAVE
Politecnico di Milano
1965-2006

Corrosione da carbonatazione



Corrosione da carbonatazione



**Autodromo
Nazionale Monza**

Ingresso Mirabello



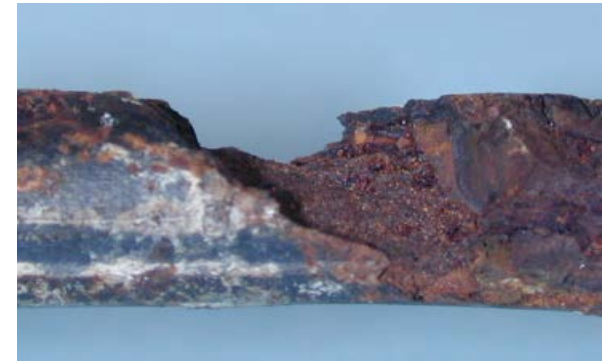
Milano: casa popolare del 1974



(2006)

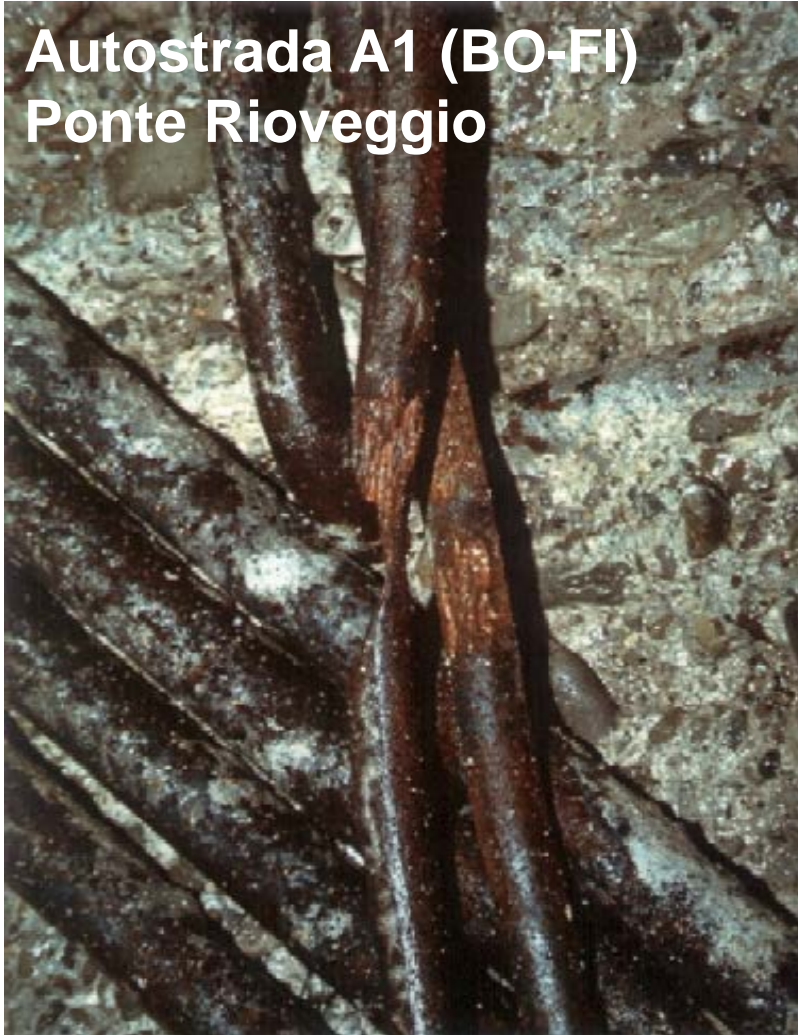
Corrosione da cloruri

- La corrosione si innesca quando si raggiunge un **tenore critico di cloruri** a livello delle armature
 - ✓ Acciaio al carbonio $0,4 \div 1\%$ vs cem
 - ✓ Acciaio zincato $1 \div 1.5\%$ vs cem
 - ✓ Acciai inossidabili $3.5 \div 8\%$ vs cem
- Rottura **localizzata** del film passivo
- Velocità di corrosione anche **1 mm/anno**



Corrosione da cloruri

**Autostrada A1 (BO-FI)
Ponte Rioveggio**



**Milano
Sovrappasso Monte Ceneri**

... a 40 anni dalla costruzione



Corrosione da cloruri

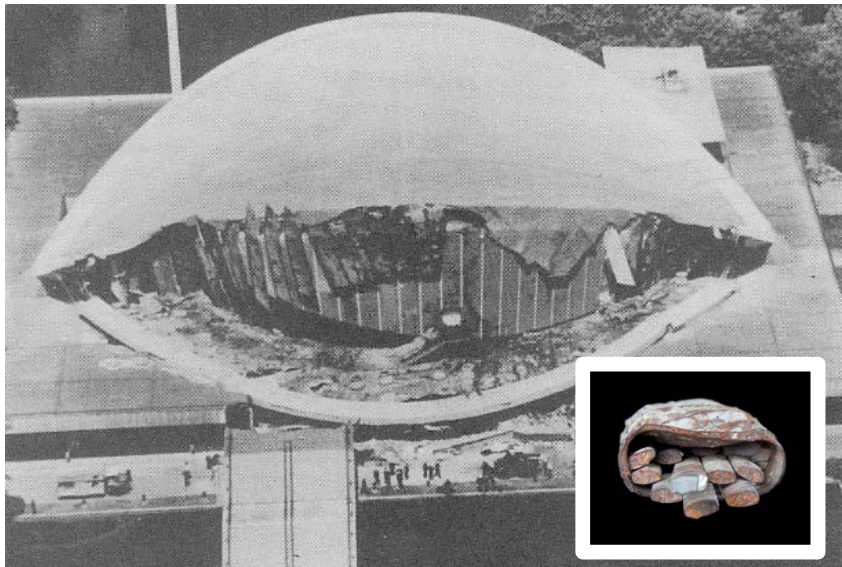
Autostrada A15 (CISA)
1975 (2005)



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

- Le conseguenze della corrosione possono essere molto gravi per strutture in **calcestruzzo armato precompresso** o **post-teso**
- Barre, trefoli, armature da precompressione possono essere soggette a **infragilimento da idrogeno**
 - ✓ Suscettibilità degli acciai ad alta resistenza ($R > 1000$ MPa)
 - ✓ Microstruttura acciaio
 - Acciai temperati (martensite) = **più sensibili**
 - Acciai laminati a caldo
 - Acciai trafilati a freddo = **meno sensibili**
 - ✓ Presenza di idrogeno atomico
 - Processi corrosivi in atto (attacco da cloruri)
 - Reazione catodiche di sviluppo di idrogeno (PC)

Infragilimento da idrogeno



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

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

Ponte in c.a.p (Stoccarda, Germania)



Porto di Manfredonia, 1979



Acquedotto pugliese



Scoppio nel 1988

- **Qualità del calcestruzzo**

- ✓ Rapporto A/C
- ✓ Stagionatura
- ✓ Copriferro
- ✓ Tipo di cemento
- ✓ ...

Sistemi di prevenzione e protezione

- Qualità del calcestruzzo
- **Armature resistenti a corrosione**
- **Rivestimenti sul calcestruzzo**
- **Inibitori di corrosione**
- **Protezione o prevenzione catodica**

Acciaio zincato

- Le proprietà **dipendono dal pH del calcestruzzo** durante il getto e dalla presenza di uno strato di zinco puro sulla superficie esterna
- **Buon comportamento nel calcestruzzo carbonato**
- **Aumento moderato del contenuto critico di cloruri**
 - ✓ 1-1,5% in peso di cemento



- **Costo:** 1.5 volte l'acciaio al carbonio
- **Problemi**
 - ✓ Difetti nella zincatura
 - ✓ Accoppiamento con armature in acciaio al carbonio
 - ✓ Aderenza armature – calcestruzzo per possibile sviluppo di H₂ nelle prime ore dopo il getto

Grande Moschea Roma (1995)



Armature rivestite con resina epossidica

- **ASTM A775**

- ✓ Spessore del coating: 100-300 μm
- ✓ Meccanismo di azione: *barrier fisica*



Great Belt link – ponte tra Danimarca e Svezia



Acciaio con resina epossidica

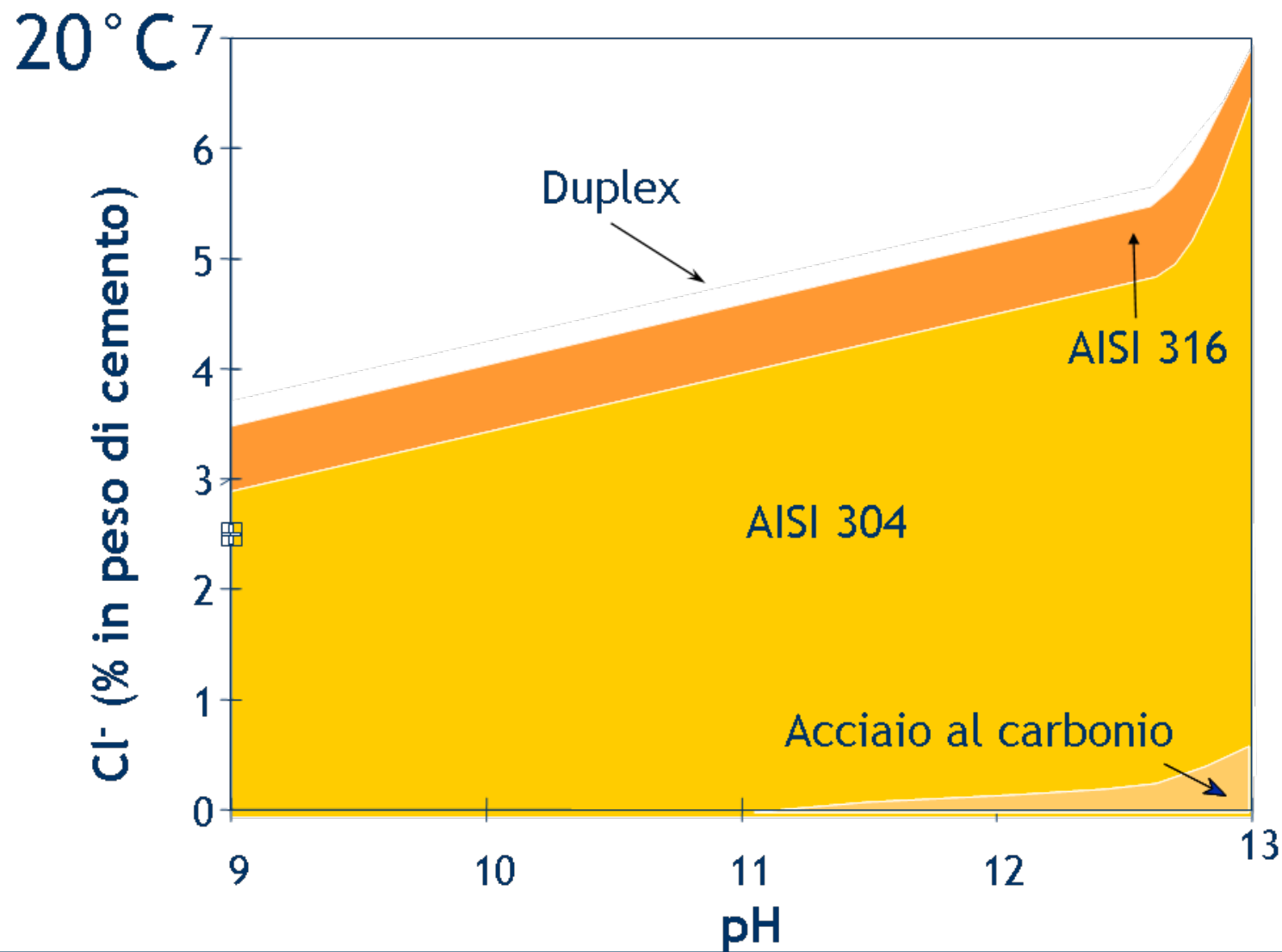
- **Costo:** 1.5 volte l'acciaio al carbonio
- **Problemi**
 - ✓ Difetti nel coating
 - ✓ Adesione coating – calcestruzzo
 - ✓ Lavorabilità a flessione

Acciai inossidabili - Pontile Progreso (1937-1941)

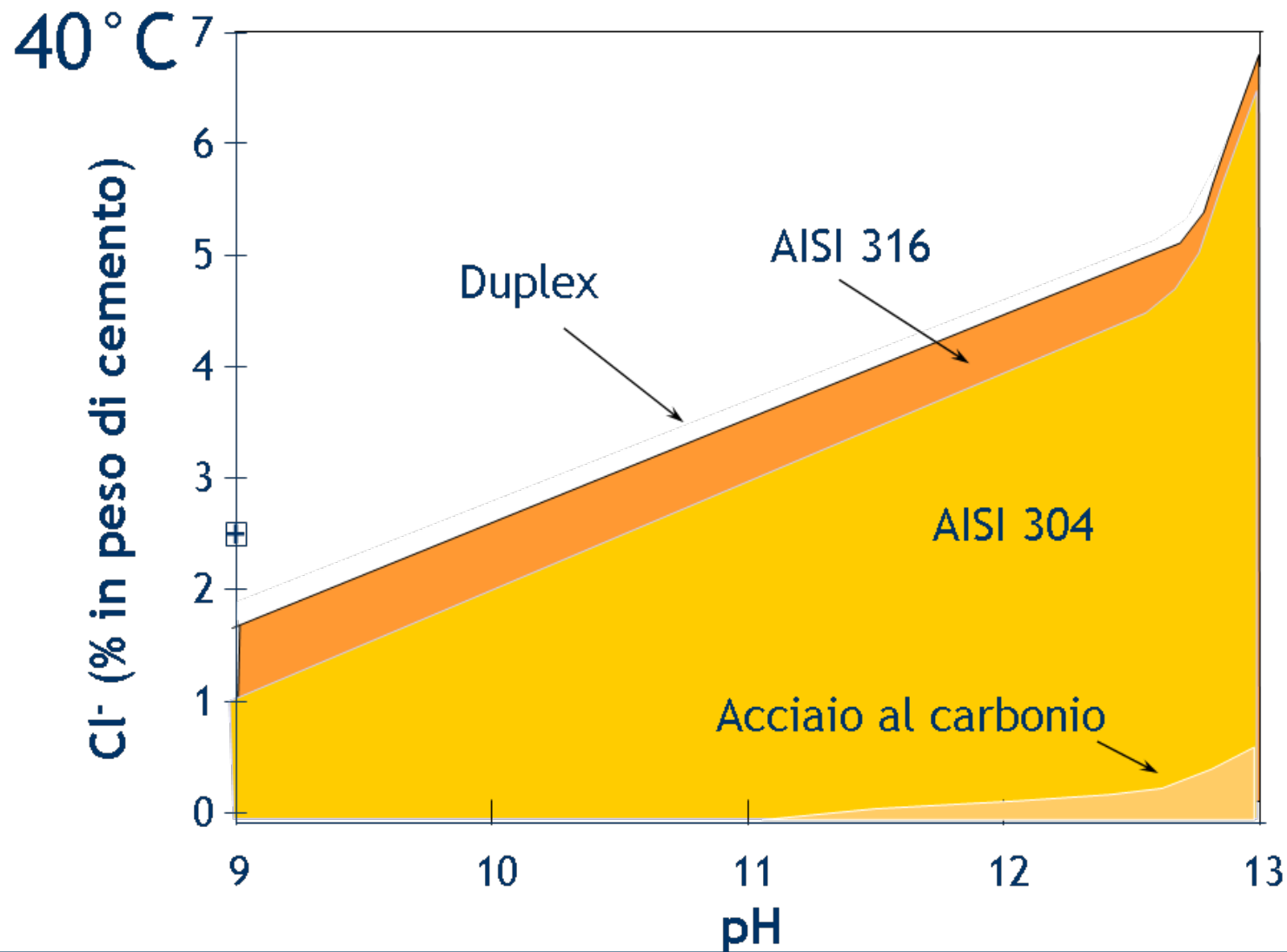


(2002)

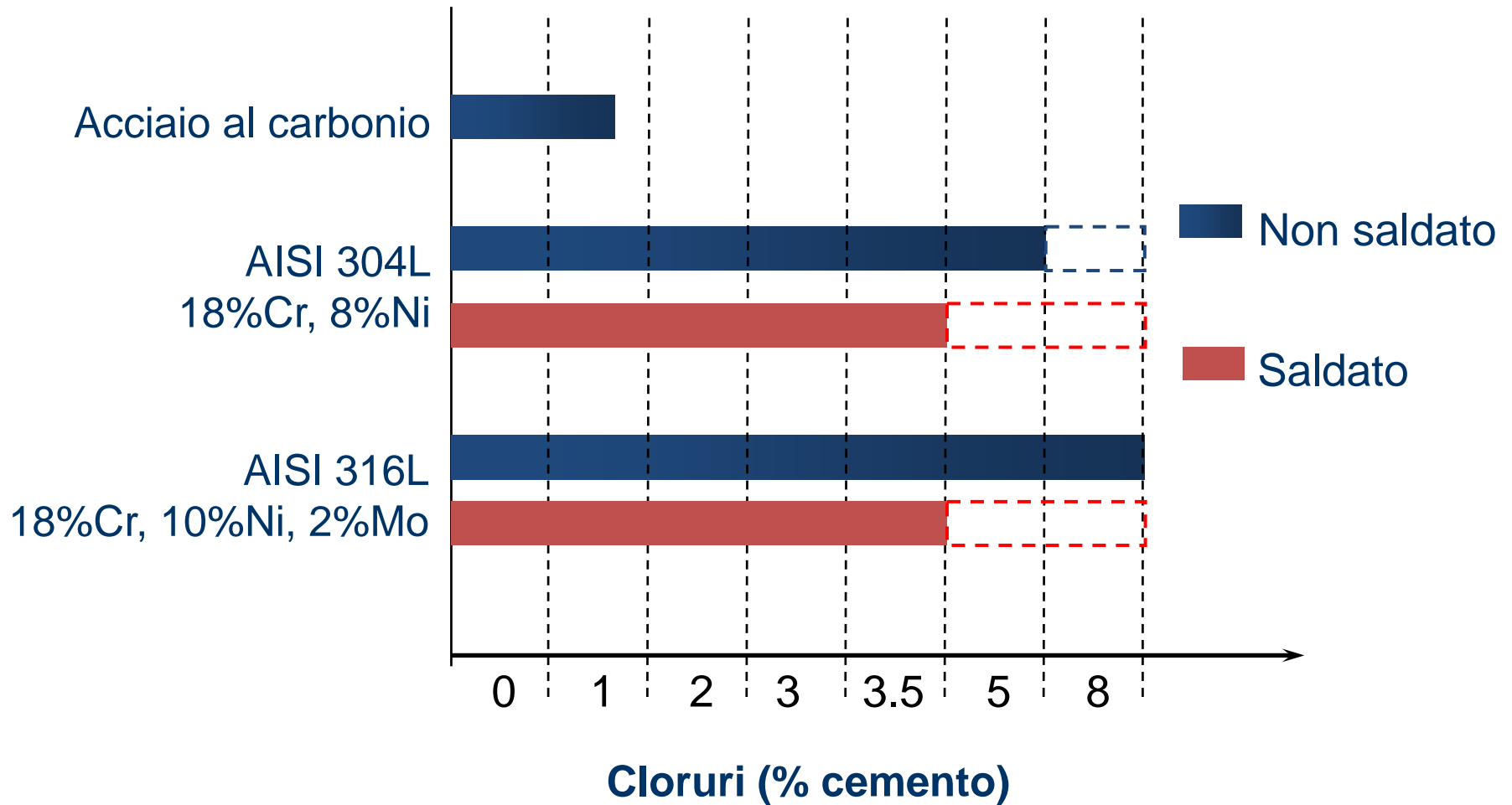
Acciai inossidabili: Cl⁻ vs pH (20°C)



Acciai inossidabili: Cl⁻ vs pH (40°C)



Effetto delle saldature



Guild Hall Yard East (Londra). Via utile: 750 anni



Ponte di Sciaffusa (Svizzera)



**AISI 304L
Duplex 22-05**

Accoppiamento: inox e acciaio al C

- Non è un problema
- I due materiali hanno un potenziale di corrosione simile
 - ✓ Sono entrambe passivi
- È quindi possibile utilizzare inox solo per le armature di pelle

Acciaio con resina epossidica

- **Costo:** 5-10 volte l'acciaio al carbonio
- **Problemi**
 - ✓ Pitting
 - ✓ Saldature
- Possibile applicazione limitata alle aree più critiche

- **Inibitori da impasto** (prevenzione)
 - ✓ Aumentare il tempo di corrosione
 - ✓ Ridurre il tasso di corrosione

- **Inibitori migranti applicati su calcestruzzo indurito**
 - ✓ Aumentare il tempo alla corrosione (prevenzione)
 - ✓ Ridurre il tasso di corrosione (protezione)

- **Nitrito di calcio**

- ✓ Passivante + ossidante
- ✓ Efficace se: $[\text{NO}_2^-] / [\text{Cl}^-] > 0,5-1$
- ✓ Tenore critico di cloruri = 3% cem
- ✓ Alto rischio se dosaggio insufficiente, lisciviazione
- ✓ Usato dagli anni '50 (Russia) e brevettato negli anni '70

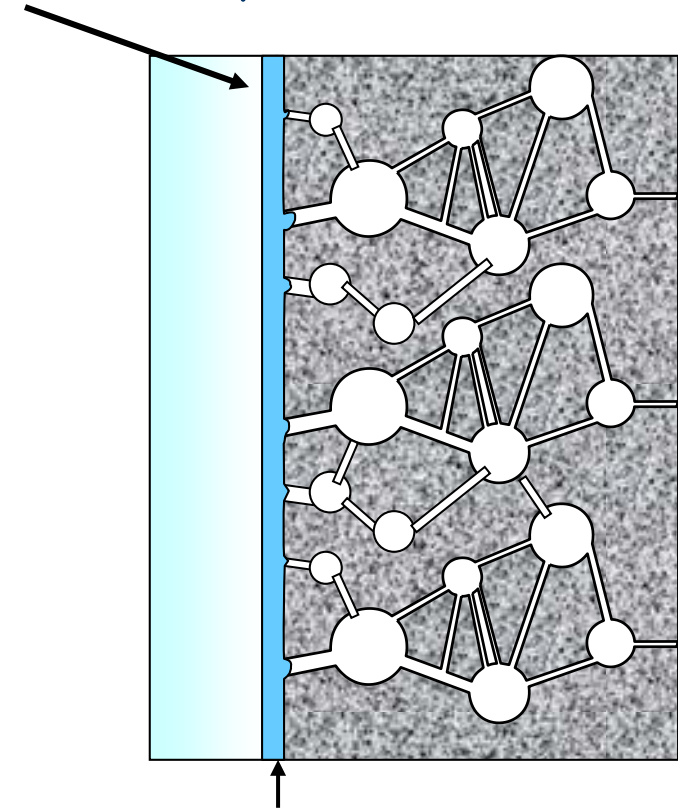
- **Organici: ammina, alcanolammina, carbossilato, estere**

- ✓ Inibitori filmanti
- ✓ Tenore critico di cloruri = 1-1,5% cem

Rivestimenti sul calcestruzzo

- **Rivestimenti organici a film continuo**
- Rivestimenti cementizi
- Trattamenti idrofobici
- Trattamenti di sigillatura dei pori

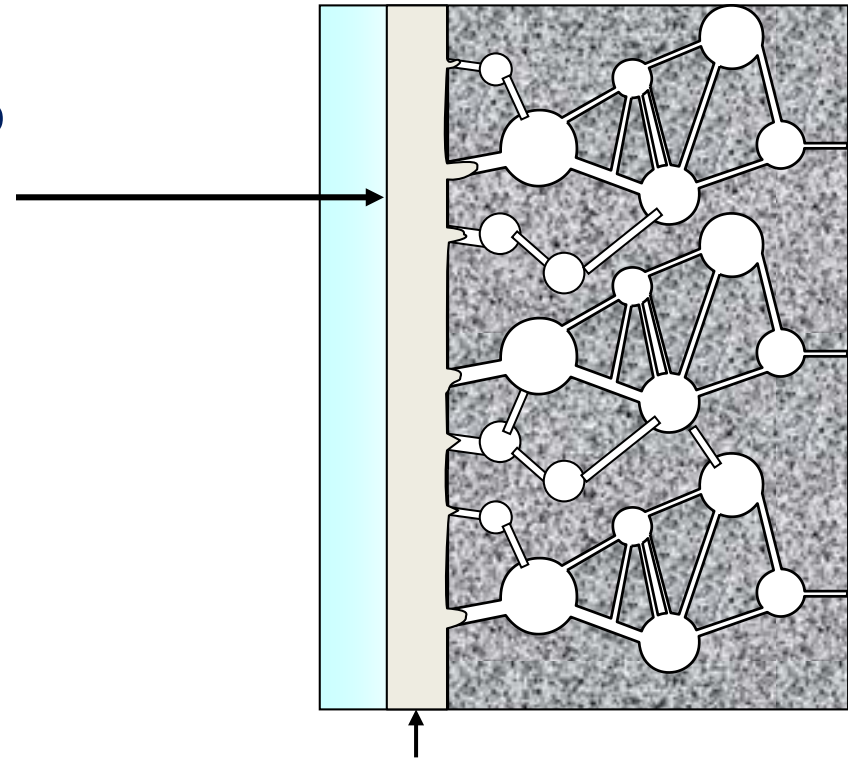
Spessore 100-300 μm



Resine epossidiche, poliuretaniche, poliesteri

Rivestimenti sul calcestruzzo

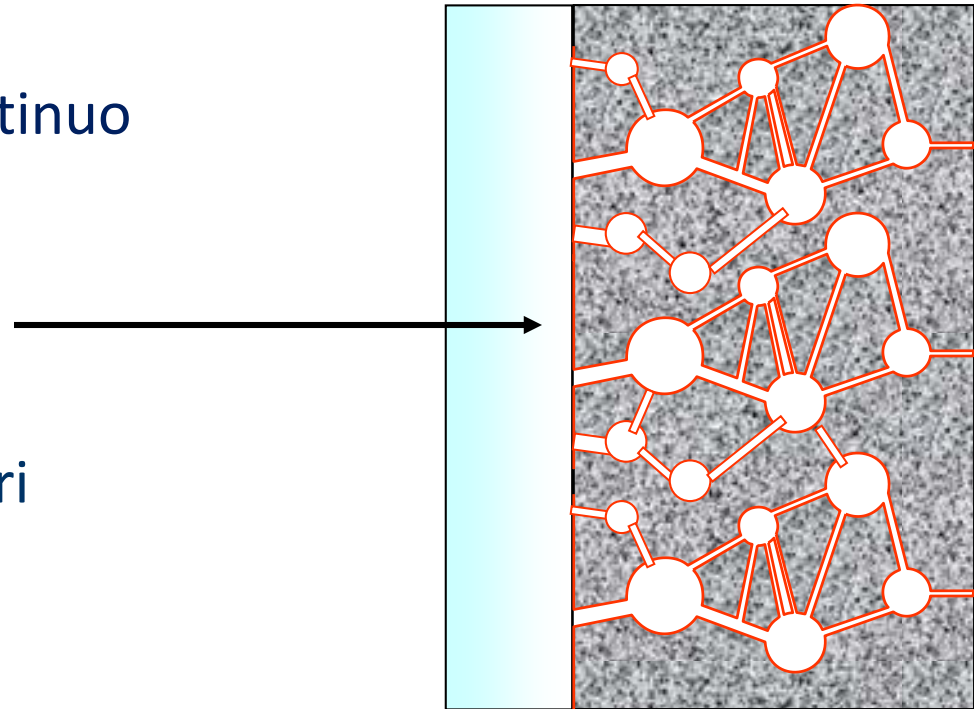
- Rivestimenti organici a film continuo
- **Rivestimenti cementizi**
- Trattamenti idrofobici
- Trattamenti di sigillatura dei pori



Malte a bassa porosità,
additate con polimeri

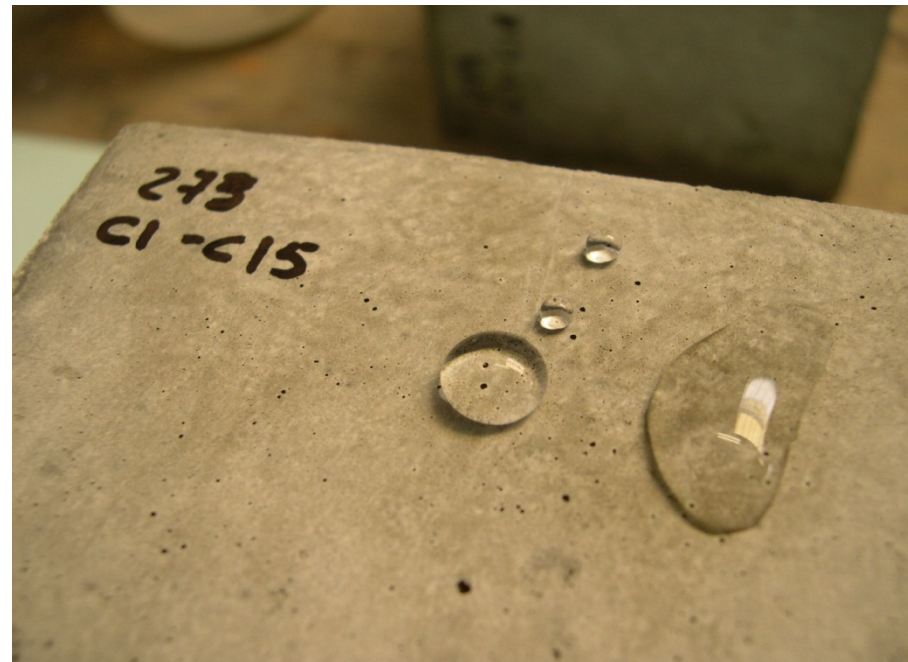
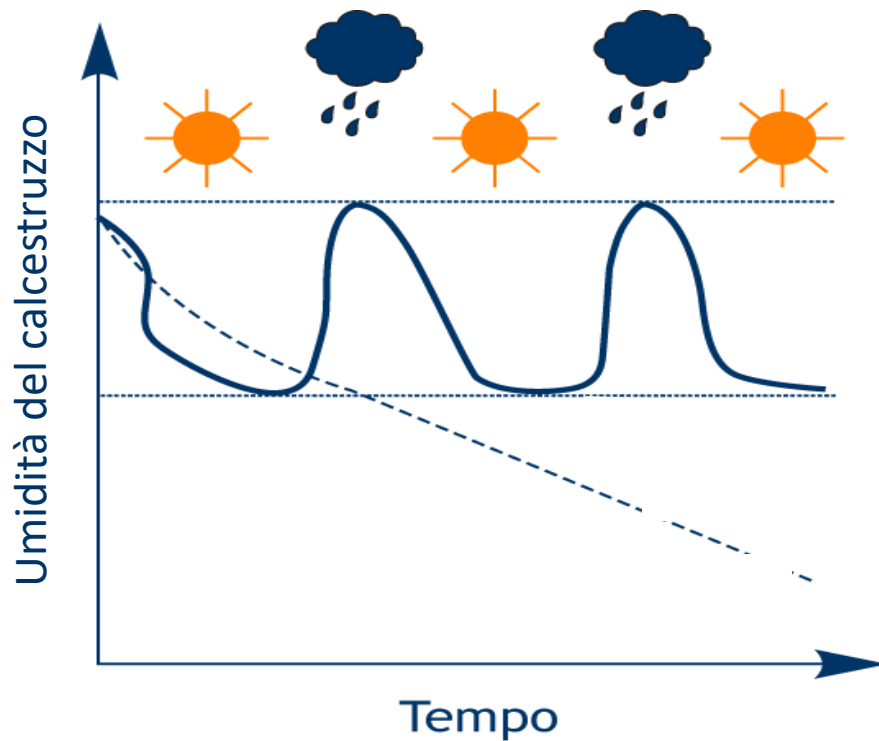
Trattamenti di superficie sul calcestruzzo

- Rivestimenti organici a film continuo
- Rivestimenti cementizi
- **Trattamenti idrofobici**
- Trattamenti di sigillatura dei pori



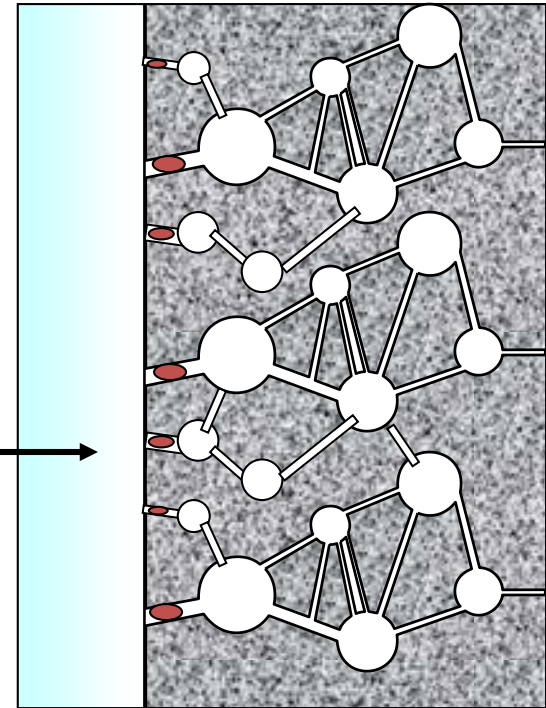
Trattamenti idrofobici

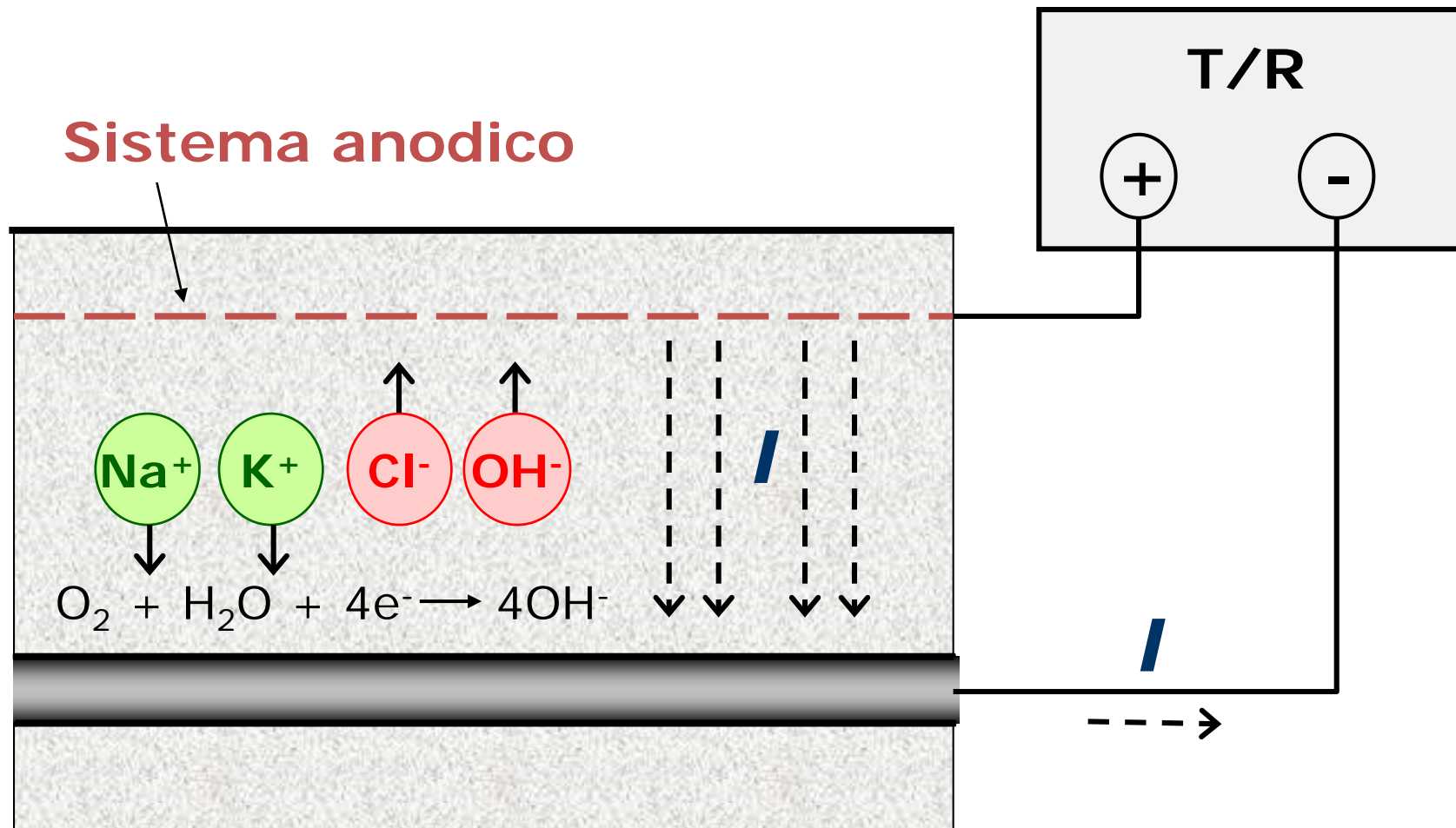
- Possono ridurre il contenuto di acqua del 90%
- Durata 5 anni



Trattamenti di superficie sul calcestruzzo

- Rivestimenti organici a film continuo
- Rivestimenti cementizi
- Trattamenti idrofobici
- **Trattamenti di sigillatura dei pori**





Effetto sistemi di protezione/prevenzione sui cloruri

Acciaio al carbonio <i>0.4-1%</i>	Inibitori <i>1-3%</i>	AISI 304L <i>3.5-5%</i>	AISI 316L <i>3.5-8%</i>	Prevenzione catodica <i>Nessuna soglia</i>
--------------------------------------	--------------------------	----------------------------	----------------------------	--

Acciaio zincato <i>1-1.5%</i>	Barre con resina epossidica	Duplex 22-05 <i>3.5-5%</i>	Inox alto legati <i>alto %Cr , % Mo</i>
----------------------------------	-----------------------------	-------------------------------	--



Tenore critico di cloruri