



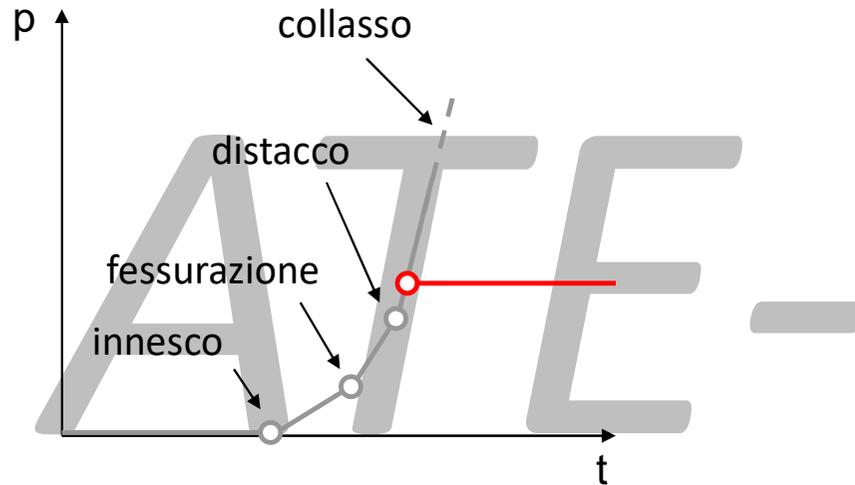
POLITECNICO
MILANO 1863

Webinar "La prevenzione della corrosione nel calcestruzzo"
**Protezioni aggiuntive: rivestimenti del calcestruzzo, inibitori di corrosione,
prevenzione catodica**
Prof.ssa Elena Redaelli (mCD)



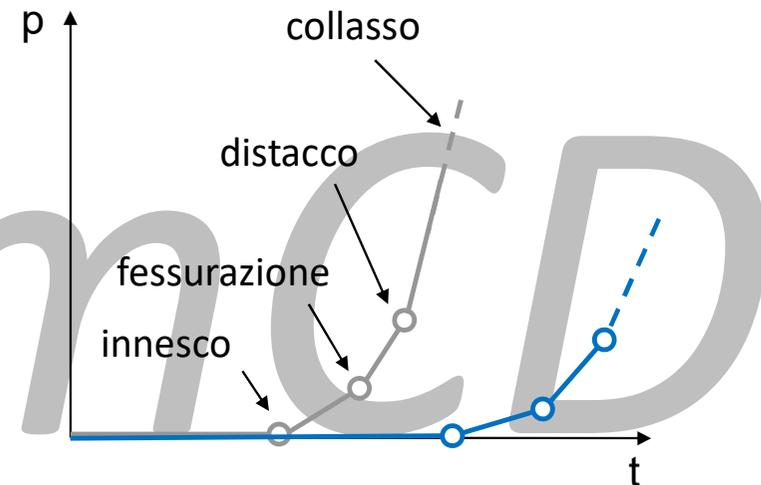
Protezione e prevenzione

Protezione & riparazione (strutture esistenti)



- Interrompere la propagazione
- Ripristinare sicurezza e funzionalità

Prevenzione (strutture nuove)



- Evitare o ritardare l'innesco
- Ridurre la (futura) propagazione

Prevenzione della corrosione e del degrado

- Progetto della struttura
- Realizzazione della struttura
- Ispezione, monitoraggio e manutenzione

"Regola del 5" di *De Sitter*: 1 € speso per progettare e realizzare correttamente una struttura equivale a:

- 5 € quando la struttura è stata costruita ma la corrosione non si è ancora innescata,
- 25 € quando la corrosione si è innescata in alcuni punti,
- 125 € quando la corrosione è estesa.

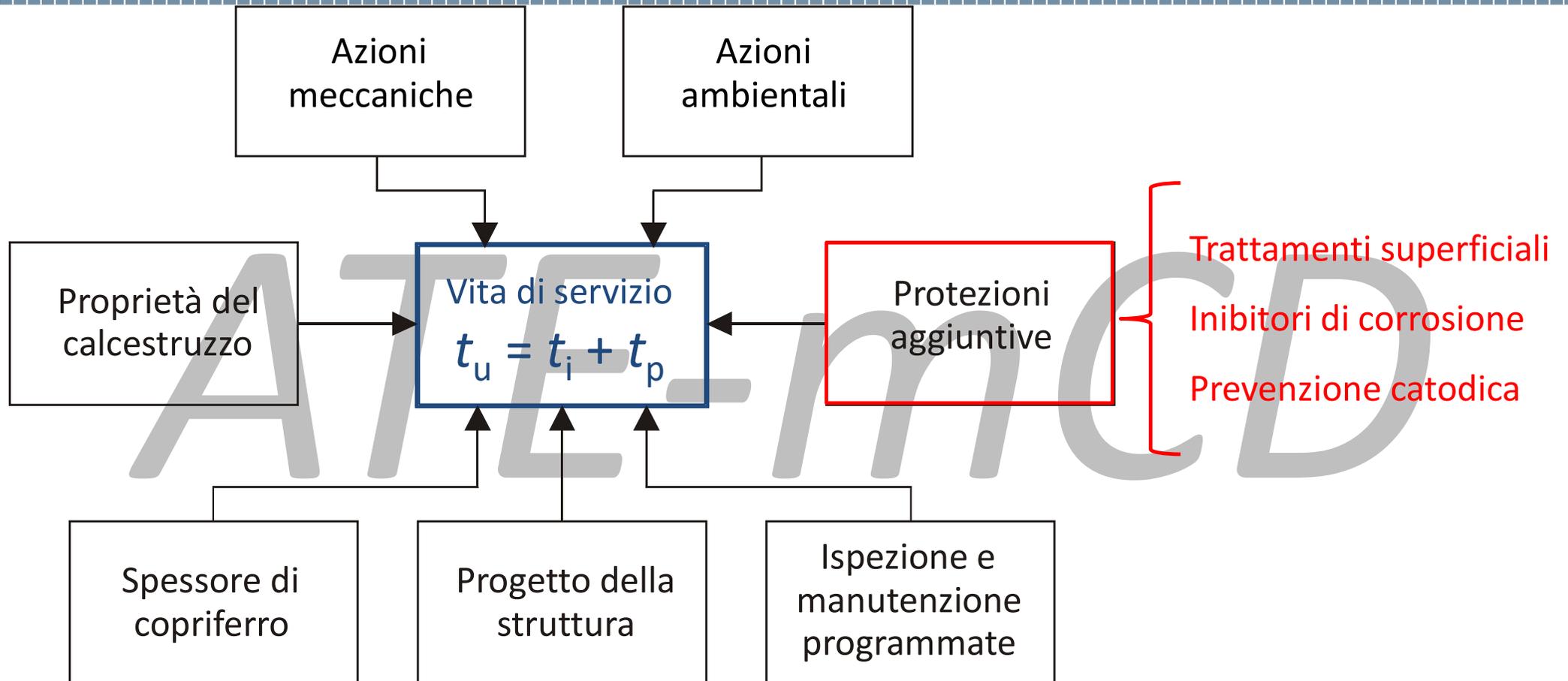
DURABILITÀ



SOSTENIBILITÀ

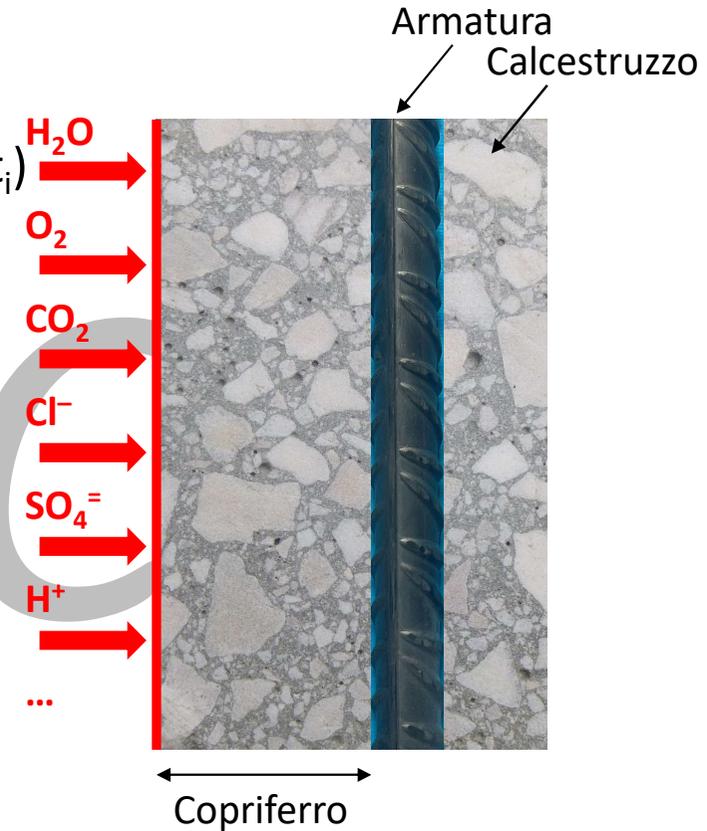
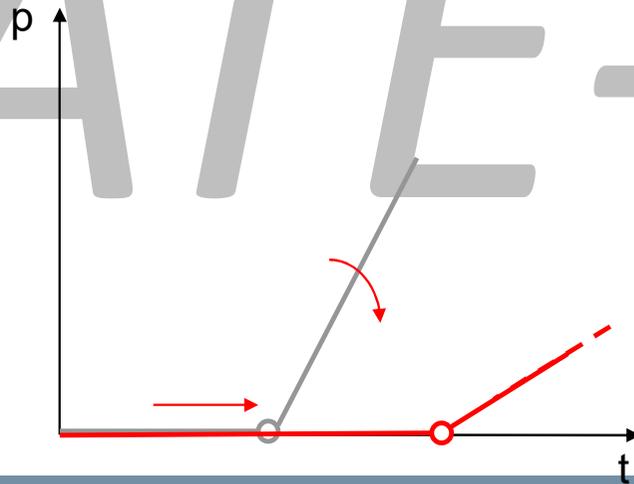


Progetto della durabilità: fattori



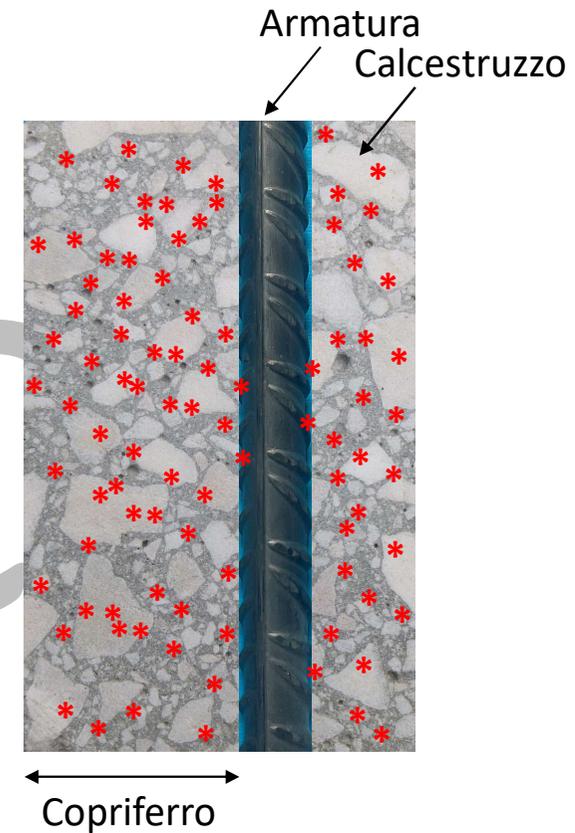
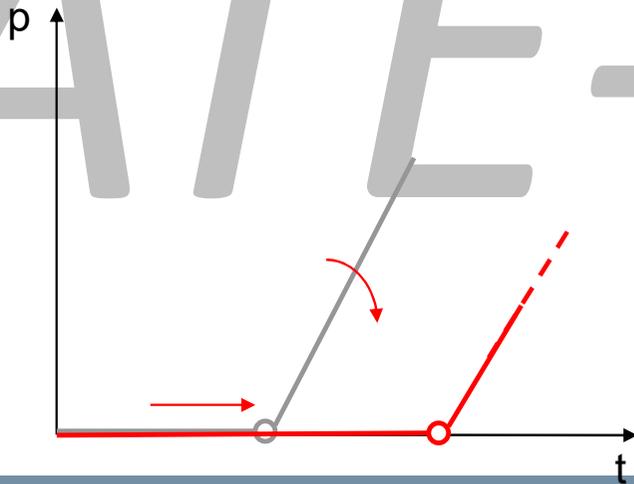
Protezione superficiale del calcestruzzo

- Rivestimenti superficiali del calcestruzzo
- Protezione vs. ingresso di specie aggressive nel calcestruzzo ($\uparrow t_i$)
- Riduzione contenuto di umidità del calcestruzzo ($\uparrow t_p$)
- Corrosione da carbonatazione e da cloruri
- Densità \leftrightarrow Apertura



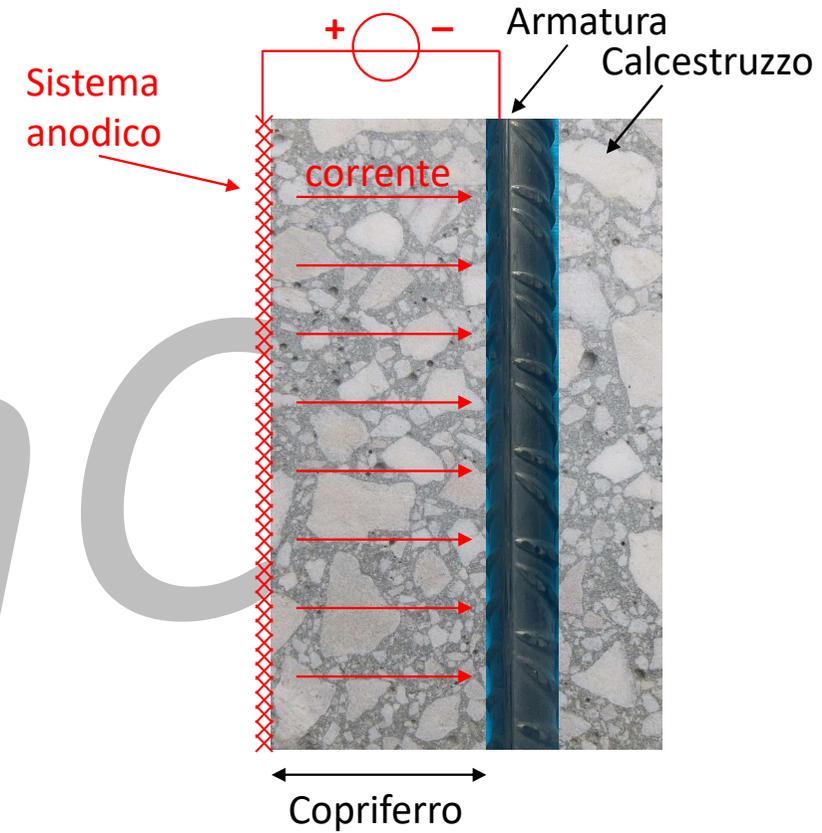
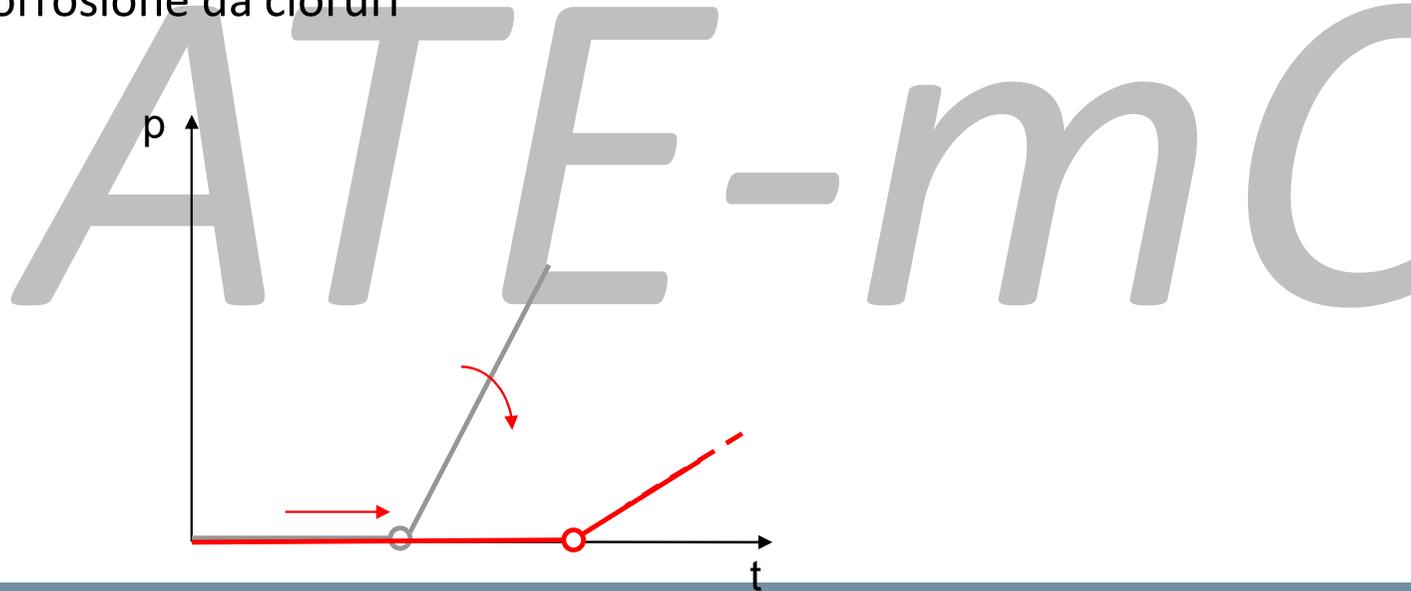
Inibitori di corrosione *mixed-in*

- Additivi aggiunti al calcestruzzo durante la miscelazione
- Aumento della resistenza alla corrosione dell'acciaio ($\uparrow t_i$)
- Riduzione della penetrazione di cloruri nel calcestruzzo ($\uparrow t_i$)
- Corrosione da cloruri



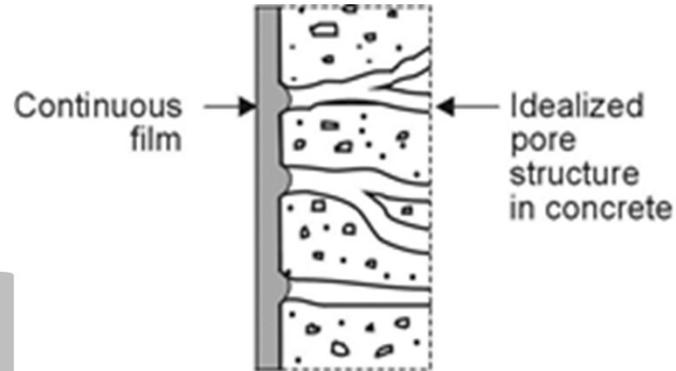
Prevenzione catodica

- Metodo elettrochimico
- Applicazione di una corrente catodica
- Aumento del tenore critico di cloruri ($\uparrow t_i$)
- Corrosione da cloruri

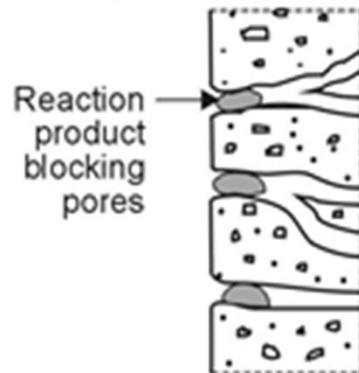


Trattamenti superficiali del calcestruzzo: Tipi

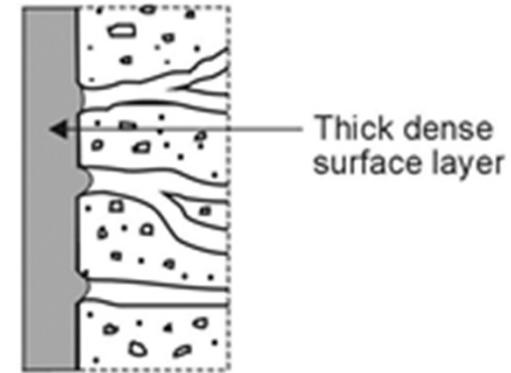
Rivestimenti organici



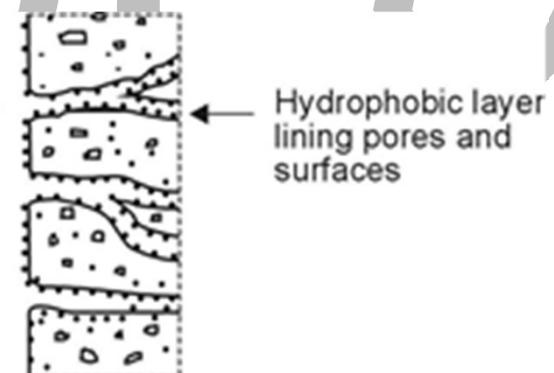
Trattamenti di sigillatura dei pori



Rivestimenti cementizi



Trattamenti idrorepellenti



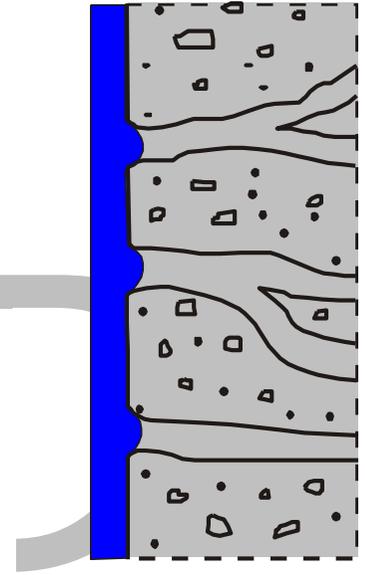
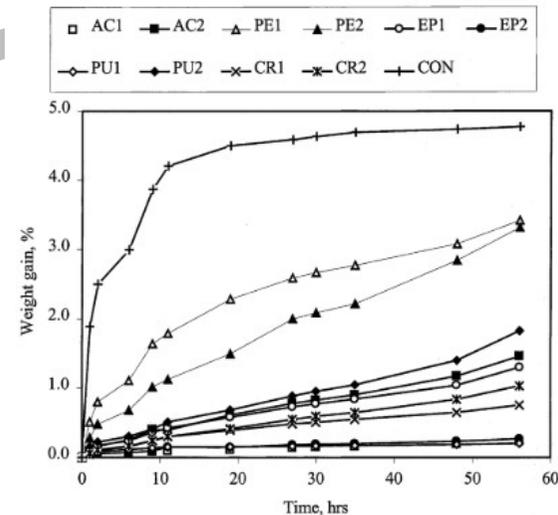
Rivestimenti organici

- Sostanze polimeriche che esercitano un effetto barriera
- Polimeri termoplastici (es. acrilici) o resine termoindurenti (es. epossidiche)
- Spessore 100-300 μm
- Ostacolano la penetrazione di acqua e sostanze gassose
- Capacità di *crack-bridging*

Chloride diffusion coefficients for the coated and uncoated concrete specimens

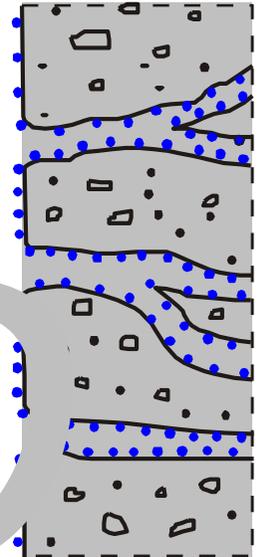
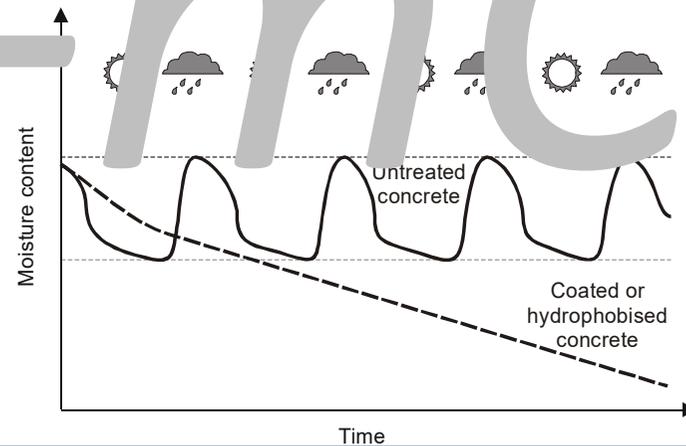
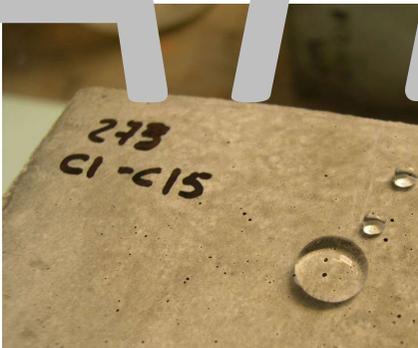
Coating	Coefficient of chloride diffusion ($10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)
Acrylic coating, AC1	2.08
Acrylic coating, AC2	3.49
Polymer emulsion coating, PE1	8.40
Polymer emulsion coating, PE2	15.94
Epoxy coating, EP1	7.67
Epoxy coating, EP2	2.59
Polyurethane coating, PU1	1.83
Polyurethane coating, PU2	0.70
Chlorinated rubber coating, CR1	9.56
Chlorinated rubber coating, CR2	8.40
None	19.18

(A.A. Almusallam et al., 2003).



Trattamenti idrorepellenti

- Rendono idrofoba la superficie del calcestruzzo (silani e silossani)
- Ostacolano la penetrazione di acqua e delle sostanze in essa disciolte (cloruri)
- Consentono il trasporto di vapore e gas nei pori
- Strutture esposte a cloruri: rallentano la penetrazione
- Strutture esposte a carbonatazione: dati contrastanti
- Non alterano la superficie



Sistemi di protezione del calcestruzzo secondo la UNI EN 1504

UNI EN 1504 – Prodotti e sistemi per la protezione e riparazione delle strutture di calcestruzzo. Definizioni, requisiti, controllo di qualità e valutazione della conformità.

1. Definizioni
2. Sistemi di protezione della superficie del calcestruzzo
3. Riparazione strutturale e non strutturale
4. Incollaggio strutturale
5. Iniezione del calcestruzzo
6. Ancoraggio dell'armatura di acciaio
7. Protezione contro la corrosione dell'armatura
8. Controllo di qualità e valutazione della conformità
9. Principi generali per l'utilizzo dei prodotti e dei sistemi
10. Applicazione in opera di prodotti e sistemi e controllo di qualità dei lavori

UNI EN 1504 Parte 9: Principi generali per l'utilizzo dei prodotti e dei sistemi

Definisce i principi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo che hanno subito o potrebbero subire danni o deterioramenti e offre una guida alla scelta dei prodotti e sistemi appropriati all'impiego previsto.

La protezione delle strutture di calcestruzzo parte dalla definizione di:

1. **Opzioni** (strategie di gestione)
2. **Principi** (obiettivi)
3. **Metodi** (tecniche specifiche)

Opzioni

- Monitoraggio senza alcun intervento per un certo periodo
- Valutazione della capacità strutturale ed eventuale declassamento
- Prevenzione o riduzione del deterioramento
- Ricostruzione o demolizione (totale o parziale) della struttura di calcestruzzo

Fattori da considerare:

- Prestazioni richieste e vita di servizio della struttura
- Prestazioni a lungo termine dei lavori di protezione
- Possibilità e conseguenze dei lavori di protezione
- Costo dei lavori di protezione e costo dei cicli di riparazione
- Aspetto della struttura protetta e riparata
- Conseguenze su salute e sicurezza

UNI EN 1504 Parte 2: Sistemi di protezione della superficie del calcestruzzo (1)

- *Impregnazione idrofobica (H)*: trattamento del calcestruzzo che produce una superficie idrofoba. I pori e capillari sono rivestiti internamente, ma non riempiti. Non c'è rivestimento sulla superficie del calcestruzzo e il suo aspetto è praticamente inalterato.
- *Impregnazione (I)*: trattamento del calcestruzzo che riduce la porosità superficiale e rafforza la superficie. I pori e capillari sono parzialmente o completamente riempiti.
- *Rivestimento (C)*: trattamento che produce uno strato continuo protettivo sulla superficie del calcestruzzo.



UNI EN 1504 Parte 2: Sistemi di protezione della superficie del calcestruzzo (2)

I sistemi di protezione superficiale sono *metodi* che consentono di aumentare la durabilità del calcestruzzo e calcestruzzo armato (anche per strutture nuove) attraverso i seguenti *principi*:

- Protezione contro l'ingresso (PI): **H, I, C**
- Controllo dell'umidità (MC): **H, C**
- Aumento della resistenza fisica (PR): **C, I**
- Resistenza ai prodotti chimici (RC): **C**
- Aumento della resistività (IR): **H, C**

La norma definisce le caratteristiche obbligatorie (*basic compulsory characteristics for all intended uses* ■) e quelle richieste per alcune applicazioni (*for certain intended uses* □). Riporta inoltre i requisiti prestazionali dei prodotti e richiama le norme che descrivono le prove.

UNI EN 1504 Parte 2: Sistemi di protezione della superficie del calcestruzzo (3)

Table 1 — Performance characteristics for surface protection products and systems related to the “principles” and “methods” defined in ENV 1504-9

No.	Test methods defined in	Principles	1. Ingress protection			2. Moisture control		5. Physical Resistance		6. Chemical Resistance	8. Increasing resistivity	
			Performance Characteristics	Methods	1.1 (H)	1.2 (I)	1.3 (C)	2.1 (H)	2.2 (C)	5.1(C)	5.2(I)	6.1 (C)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	EN 12617-1	Linear shrinkage			☐		☐	☐		☐		☐
2	EN 12190	Compressive strength						☐		☐		
3	EN 1770	Coefficient of thermal expansion			☐		☐	☐		☐		☐
4	EN ISO 5470-1	Abrasion resistance						■	■			
5	EN ISO 2409	Adhesion by cross-cut test ^a			☐		☐	☐		☐		☐
6	EN 1062-6	Permeability to CO ₂			■							
7	EN ISO 7783-1 EN ISO 7783-2	Permeability to water vapour		☐	■		■					■
8	EN 1062-3	Capillary absorption and permeability to water		■	■		■	■	■	☐		■
9		Adhesion after thermal compatibility										
	EN 13687-1	Freeze-thaw cycling with de-icing salt immersion		☐	☐		☐	☐	☐	☐		☐
	EN 13687-2	Thunder-shower cycling (thermal shock)		☐	☐		☐	☐	☐	☐		☐
	EN 13687-3	Thermal cycling without de-icing salt impact		☐	☐		☐	☐	☐	☐		☐
	EN 1062-11:2002	4.1: Aging: 7 days at 70 °C		☐	☐		☐	☐	☐	☐		☐
10	EN 13687-5	Resistance to thermal shock			☐			☐		☐		
11	EN ISO 2812-1	Chemical resistance		☐	☐							
12	EN 13529	Resistance to severe chemical attack								■		
13	EN 1062-7	Crack bridging ability			☐		☐	☐		☐		☐
14	EN ISO 6272-1	Impact resistance						■	■			
15	EN 1542	Adhesion strength by pull-off test		☐	■		■	■	■	■		■
16	EN 13501-1	Fire classification of construction products and building elements — Part 1: Classification using test data from reaction to fire test		☐	☐		☐	☐	☐	☐		☐
17	EN 13581	Resistance against freeze-thaw salt stress of impregnated hydrophobic concrete (Determination of loss of mass)	☐				☐				☐	

Proprietà di alcuni rivestimenti continui e valori tipici

	ACRILICI	EPOSSIDICI	MALTE POLIMERO-CEMENTO
• <i>Pot life</i>	~60min	~45min	~60min
• Spessore	200μm	400μm	2mm
• Adesione al calcestruzzo	~3MPa	~3.5MPa	~1MPa
• Permeabilità alla CO ₂ (S _d CO ₂)	~100m	~600m	~100m
• Permeabilità al vapore (S _d vapore)	~0.5m	~6.5m	~1m
• Assorbimento d'acqua per capillarità	~0.1kg/m ² h ^{0.5}	~0.001kg/m ² h ^{0.5}	~0.01kg/m ² h ^{0.5}
• Capacità di <i>crack-bridging</i>	~200μm	~200μm	~1mm
• Conservazione della superficie	Ottima	Scarsa	Bassa

Valori indicativi misurati su prodotti commerciali confrontati in (Coffetti et al., 2021).

Inibitori di corrosione *mixed-in*: Tipi

Sono sostanze che aggiunte all'impasto di calcestruzzo consentono di aumentare il tempo di innesco della corrosione, in quanto fanno aumentare il tenore critico di cloruri.

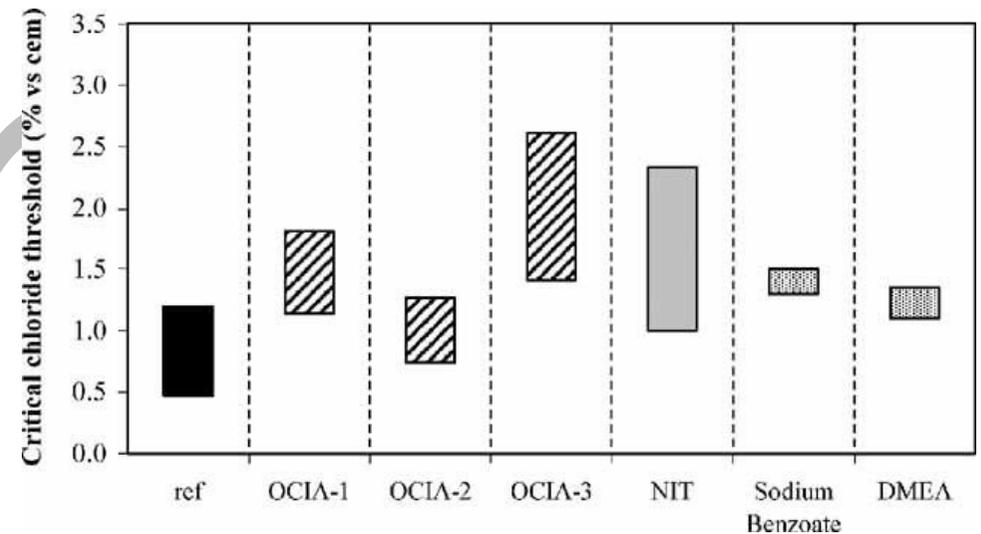
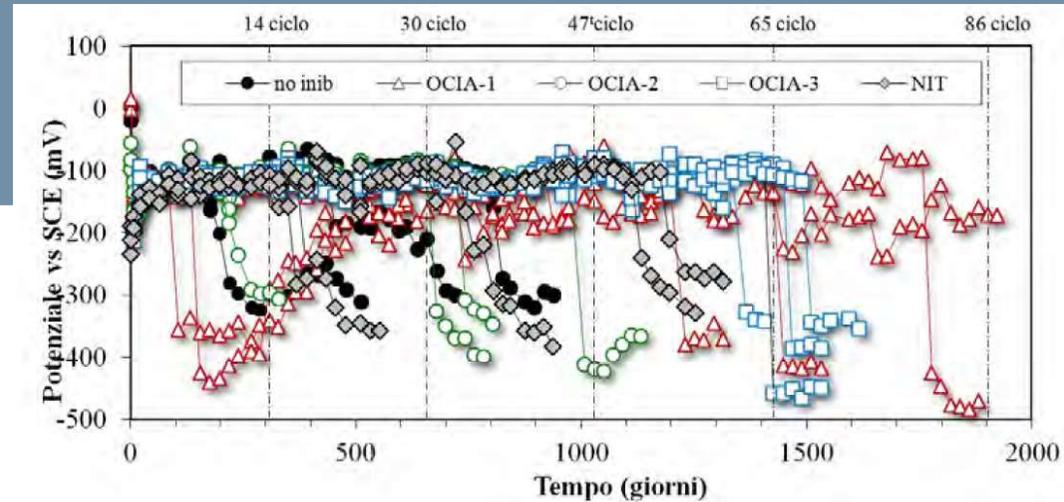
- **Nitrito di calcio**: passivante+ossidante, $[\text{NO}_2^-]/[\text{Cl}^-] > 0.5-1$, rischio per dosaggio insufficiente o dilavamento, usato da >40 anni
- **Miscela di ammine/alcanolammine**: azione filmante, prodotti commerciali
- **Inibitori "green"**: non tossici, a basso impatto ambientale, in fase di sperimentazione

Gli inibitori *mixed-in* aggiunti in quantità adeguata possono anche ridurre la velocità di diffusione dei cloruri nel calcestruzzo, mentre non hanno effetto sulla velocità di corrosione in seguito all'innesco.

Inibitori di corrosione: Prove in laboratorio

Prove di corrosione su provini sottoposti a cicli di *ponding* con cloruri contenenti diversi inibitori hanno mostrato che:

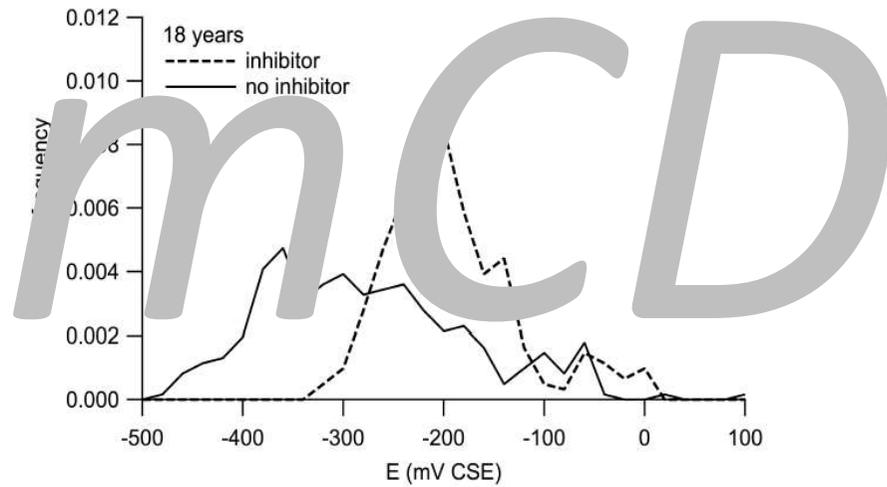
- l'aumento del tempo di innesco è l'effetto preponderante rispetto all'aumento del tempo di propagazione;
- nei calcestruzzi contenenti l'inibitore, si è osservata una riduzione del coefficiente di diffusione e un aumento del tenore critico di cloruri;
- tutte le prove hanno mostrato una grande variabilità.



Potenziale dell'armatura (*alto*) e tenore critico di cloruri (*basso*) in calcestruzzi con diversi inibitori di corrosione (Bolzoni et al., 2015).

Inibitori di corrosione: Prove in campo

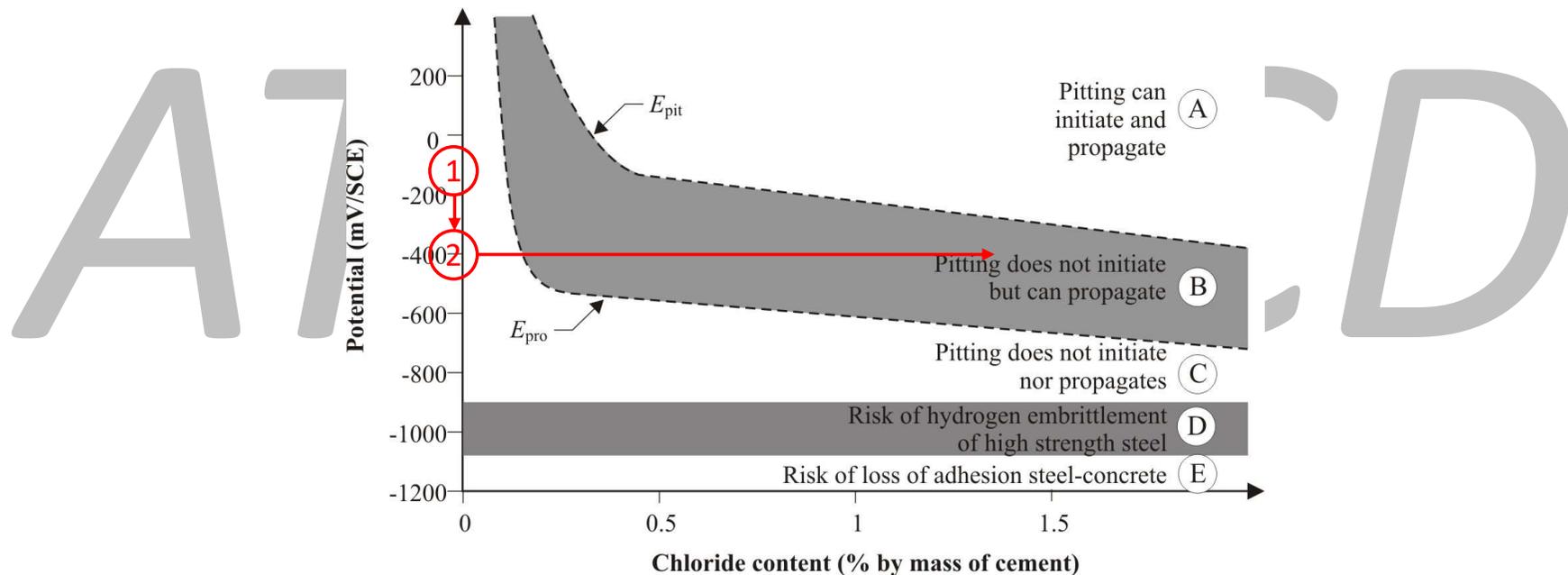
Inibitore commerciale a base di alcanolammine aggiunto a calcestruzzo con $a/c = 0.45$. Per un copriferro $c = 15$ mm, il tempo di innesco della corrosione è passato da 8-9 anni (senza inibitore) a >18 anni (con inibitore).



Pannelli in c.a. esposti alla zona degli spruzzi in presenza di sali antigelo (sx) e distribuzione del potenziale dell'armatura dopo 18 anni in calcestruzzo con e senza inibitore (dx) (Elsener et al., 2017).

Prevenzione catodica (UNI EN ISO 12696: Protezione catodica dell'acciaio nel calcestruzzo)

È un metodo elettrochimico che, grazie all'applicazione di una **piccola corrente** catodica, consente di **aumentare il tenore critico** e quindi il tempo di innesco della corrosione per *pitting* per strutture esposte ad ambienti con **cloruri**. Fu inventata da P. Pedferri nel 1992.



Effetti della prevenzione catodica: Provini in c.a. esposti a cicli di *ponding* con cloruri, dopo 5 anni

Controllo



2.5% corr. area
1.5 mm max attacco
0.8 mA/m²

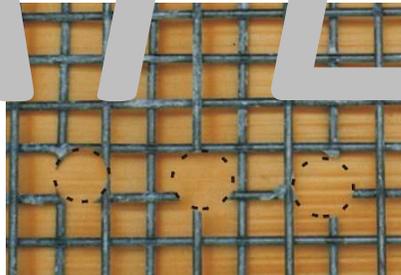


0.7% corr. area
0.8 mm max attacco

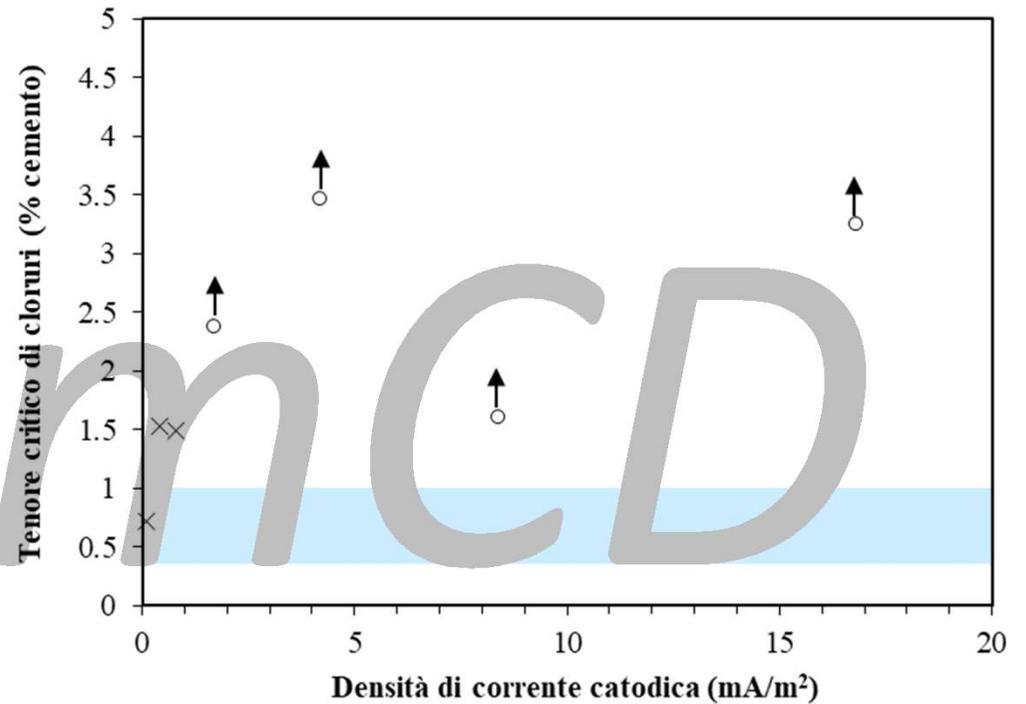
0.4 mA/m²



0.7% corr. area
1 mm max attacco
1.7 mA/m² o p



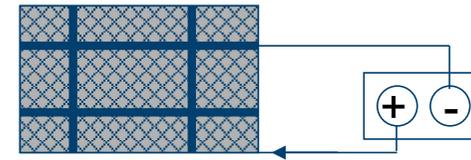
0% corr. area
no attacchi



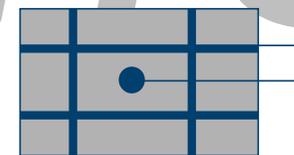
(Bertolini et al., 2009)

Sistemi anodici

- Corrente impressa da un generatore
- Anodo distribuito (reti, nastri, fili) di titanio attivato
- Applicato sulla superficie e inglobato in malta
- Elevata durabilità



- Anodi galvanici
- Elementi di zinco (cilindri, strisce, fogli)
- Inseriti nel calcestruzzo e collegati all'armatura
- Durabilità dipende dalla massa dell'anodo



Requisiti e vantaggi della prevenzione catodica

- Continuità elettrica dell'armatura
- Progetto (distribuzione di corrente)
- Necessità di monitoraggio

La bassa densità di corrente ($< 5 \text{ mA/m}^2$) garantisce:

- Nessun rischio di fragilimento da idrogeno
- Ridotti effetti collaterali della corrente (e.g. ASR, acidificazione anodica)
- Elevata durata dei sistemi anodici a corrente impressa

Esempi di applicazione della prevenzione catodica



Sydney Opera House



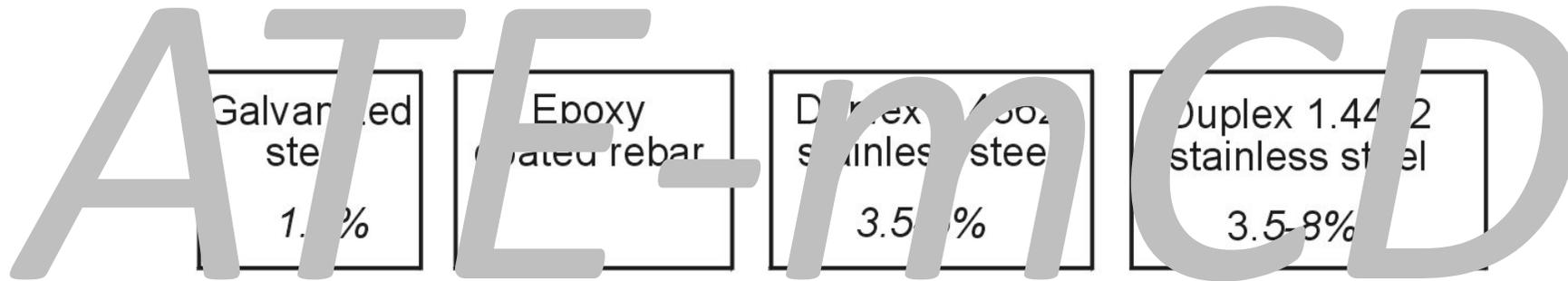
Zhongshan Bay Bridge



Abu Dhabi Louvre Museum

Confronto

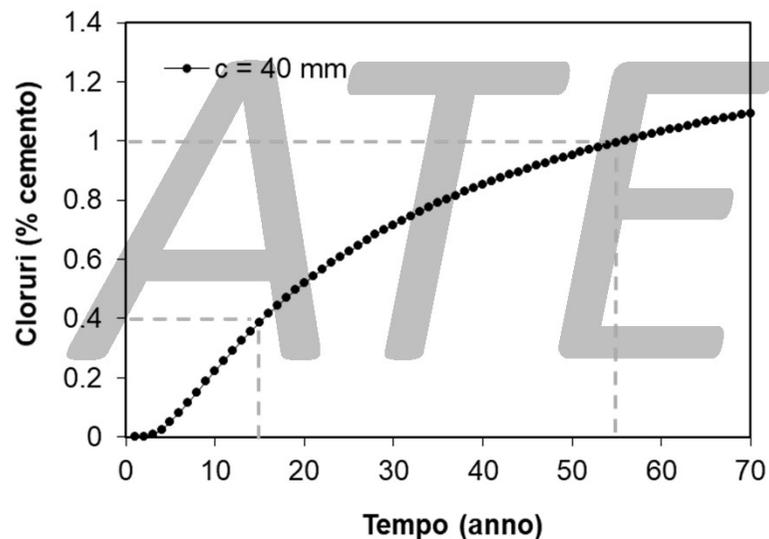
Carbon steel 0.4%	Corrosion inhibitor <i>depending on %NO₂⁻</i> 1-3%	Stainless steel 1.4301 3.5-5%	Stainless steel 1.4401 3.5-8%	Cathodic prevention <i>All practical contents</i>
----------------------	--	----------------------------------	----------------------------------	--



Chloride content (% by mass of cement) →

Stima del tempo di innesco della corrosione

Al crescere del tenore critico, aumenta il tempo di innesco della corrosione. Applicando l'equazione dell'*erf*, è possibile quantificare i benefici legati all'aumento del tenore critico. Per esempio:



se $C_s = 2\%$ cem e $D = 1.0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

- $\text{Cl}_{\text{cr}} = 0.4\% \rightarrow t_i = 15 \text{ anni}$
- $\text{Cl}_{\text{cr}} = 1.0\% \rightarrow t_i = 55 \text{ anni}$

Alcune considerazioni conclusive

- La protezione delle strutture di calcestruzzo richiede un complesso lavoro di progettazione, che non può prescindere dalla conoscenza della struttura e dalla scelta di una strategia di gestione.
- È possibile combinare diversi metodi di prevenzione e protezione aggiuntiva purché non interferiscano negativamente uno con l'altro.
- Nessun metodo di protezione aggiuntiva può essere considerato come una giustificazione di una ridotta cura nel progetto e nell'esecuzione della struttura, in particolare in relazione alla qualità del calcestruzzo e allo spessore di copriferro.
- Un corretto monitoraggio e manutenzione dei lavori di protezione comporta un allungamento della vita di servizio della struttura.

Grazie dell'attenzione

elena.redaelli@polimi.it



CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI



ASSOCIAZIONE
TECNOLOGI
PER L'EDILIZIA



Riferimenti bibliografici

- E. Redaelli, *Protezioni aggiuntive: trattamenti superficiali del calcestruzzo e inibitori di corrosione*, Structural, n° 191, Ottobre 2014, p. 1-8. DOI: 10.12917/Stru191.25.
- M. Ormellese, S. Beretta, A. Brenna, M.V. Diamanti, MP. Pedefferri, F. Bolzoni, *Additional protection systems to control reinforcement corrosion*, Structural, n° 218, Luglio-Agosto 2018, p. 1-10. DOI: 10.12917/Stru218.19.
- M. Gastaldi, *Protezione catodica e prevenzione catodica*, Structural, n° 195, Aprile 2015, p. 1-11. DOI: 10.12917/Stru195.09.