

# INIBITORI DI CORROSIONE PER STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO

INHIBITOR C10 / INHIBITOR C11 / INHIBITOR SKIN C10





# VITA UTILE E DEGRADO DELLE STRUTTURE

Come indicato nelle Norme Tecniche per le Costruzioni emanate con D.M. 17-01-2018 (NTC 2018), ogni struttura deve essere adeguatamente progettata in modo da garantire il corretto funzionamento per tutta la sua *vita nominale*, che dipende dal tipo e dalla importanza dell'opera.

In Tabella 1 viene riproposto il contenuto della Tabella 2.4.I delle NTC 2018.

Tabella 1

Tipi di costruzione		Vita Nominale $V_N$ (in anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	$\leq 10$
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	$\geq 50$
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	$\geq 100$

L'introduzione del concetto di vita nominale pone in primo piano il progetto della **durabilità strutturale**.

*«Un adeguato livello di durabilità può essere garantito progettando la costruzione, e la specifica manutenzione, in modo tale che il degrado della struttura, che si dovesse verificare durante la sua vita nominale di progetto, non riduca le prestazioni della costruzione al di sotto del livello previsto.*

*Tale requisito può essere soddisfatto attraverso l'adozione di appropriati provvedimenti stabiliti tenendo conto delle previste condizioni ambientali e di manutenzione ed in base alle peculiarità del singolo progetto, tra cui la scelta opportuna dei materiali, il dimensionamento opportuno delle strutture, la scelta dei dettagli costruttivi, l'applicazione di sostanze o ricoprimenti protettivi dei materiali, soprattutto nei punti non più visibili o difficilmente ispezionabili ad opera completata.» (Punto 2.2.4 delle NTC 2018).*

I molteplici meccanismi di degrado di una struttura in conglomerato cementizio armato, ordinario (c.a.) o precompresso (c.a.p.) sono contemplati in diverse normative, nazionali ed internazionali (Europee, Americane ed altro). In generale, trattandosi di un materiale composito, il degrado del c.a. e del c.a.p. può dipendere da quello del conglomerato cementizio, dell'armatura in esso contenuta o di entrambi.

Nei casi più comuni, il fenomeno che determina la perdita di funzionalità di un'opera ed il mancato raggiungimento della sua vita nominale è quello della **corrosione delle armature**.

# VITA UTILE E DEGRADO DELLE STRUTTURE

Nella vita delle strutture in calcestruzzo armato possono distinguersi due fasi (Figura 1):

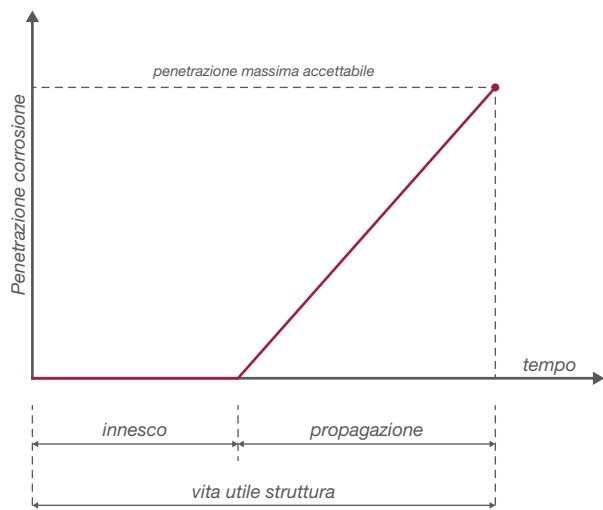


Figura 1

- ✓ **fase di innesco** della corrosione, nella quale si realizzano le condizioni che portano l'armatura a divenire potenzialmente aggredibile dagli agenti ossidanti (perdita delle condizioni di passività).
- ✓ **fase di propagazione** della corrosione, nella quale la corrosione avanza più o meno rapidamente fino ad arrivare ad uno stato limite non più accettabile.

Sia che si tratti di carbonatazione che di aggressione da cloruri, le principali **conseguenze della corrosione** delle armature sono:



- ✓ Riduzione della sezione resistente delle armature con conseguente riduzione della resistenza delle sezioni in c.a. o c.a.p..
- ✓ Riduzione dell'aderenza acciaio-calcestruzzo a causa del deperimento della parte superficiale delle armature.
- ✓ Incremento dei fenomeni fessurativi con conseguente penalizzazione della funzionalità delle opere e della loro vita utile.
- ✓ Degrado delle strutture.

Figura 2

Pericolose riduzioni delle sezioni resistenti ad opera della corrosione.

# PRINCIPALI CAUSE DI CORROSIONE DELLE BARRE D'ARMATURA NELLE STRUTTURE IN C.A. E C.A.P.

In soluzioni con  $\text{pH} > 11,5$  ed in assenza di cloruri, le barre di armatura si ricoprono di una pellicola superficiale protettiva costituita da un film di ossido e si pongono in una condizione detta di **passività** che determina una velocità di corrosione praticamente nulla.

All'interno del calcestruzzo, grazie all'ambiente fortemente alcalino (valori di pH generalmente compresi tra 13 e 13,8) determinato dalla soluzione contenuta nei suoi pori, si verificano tali condizioni e le armature possono considerarsi protette nei confronti della corrosione.

Purtroppo nel tempo il conglomerato cementizio può perdere questa capacità di protezione e consentire l'aggressione dell'acciaio da parte di agenti ossidanti quali l'ossigeno e l'acqua.

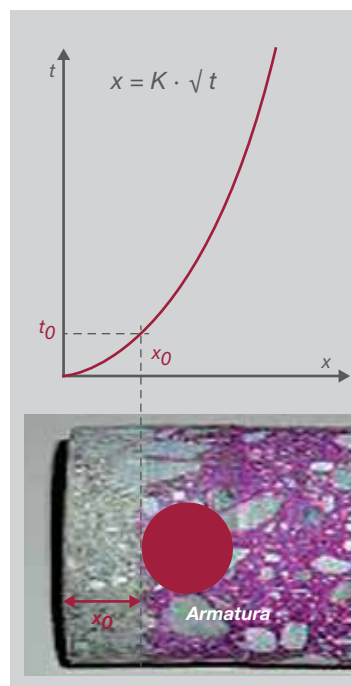
Le cause che possono determinare questa situazione sono sostanzialmente due:

- fenomeno della *carbonatazione*;
- l'ingresso di *cloruri*.

La **carbonatazione** (Figura 3) consiste nella neutralizzazione dell'alcalinità propria del calcestruzzo da parte dell'anidride carbonica presente nell'aria. Questa infatti, grazie ad un fenomeno di diffusione, partendo dagli strati più esterni, penetra, nel tempo, in quelli più interni. Man mano che il fronte di penetrazione avanza, nel calcestruzzo interessato dal contatto con la  $\text{CO}_2$  il valore del pH diminuisce fino a scendere sotto il valore di 9. Il processo di diffusione dell'anidride carbonica nel calcestruzzo può essere descritto dalla seguente semplice espressione:

$$x = K \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

dove  $x$  è lo spessore di copriferro penetrato dalla  $\text{CO}_2$ ,  $t$  è il tempo e  $K$  una costante che dipende sostanzialmente dalla porosità del calcestruzzo.



**Figura 3**

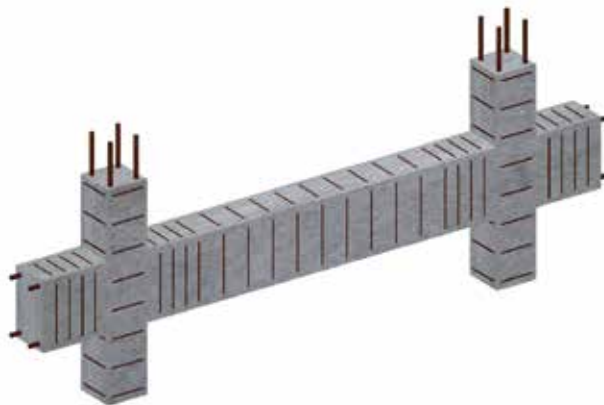
Quando la profondità di carbonatazione raggiunge le armature (**tempo di innesco**  $t_0$ ), queste subiscono la **depassivazione** e risultano potenzialmente aggredibili dagli **agenti ossidanti** ( $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ ). La profondità del fronte di carbonatazione viene determinata con la prova colorimetrica con l'utilizzo di **fenoftaleina**. Dopo il trattamento con tale sostanza, le zone rimaste in colore sono da considerarsi carbonatate.

# PRINCIPALI CAUSE DI CORROSIONE DELLE BARRE D'ARMATURA NELLE STRUTTURE IN C.A. E C.A.P.

Quando l'anidride carbonica giunge a ridosso delle armature (**tempo di innesco**  $t_0$  in Figura 3) ed il pH si riduce ai valori appena citati, vengono meno le condizioni di alcalinità necessarie alla stabilità del film protettivo che si distrugge (**depassivazione**).

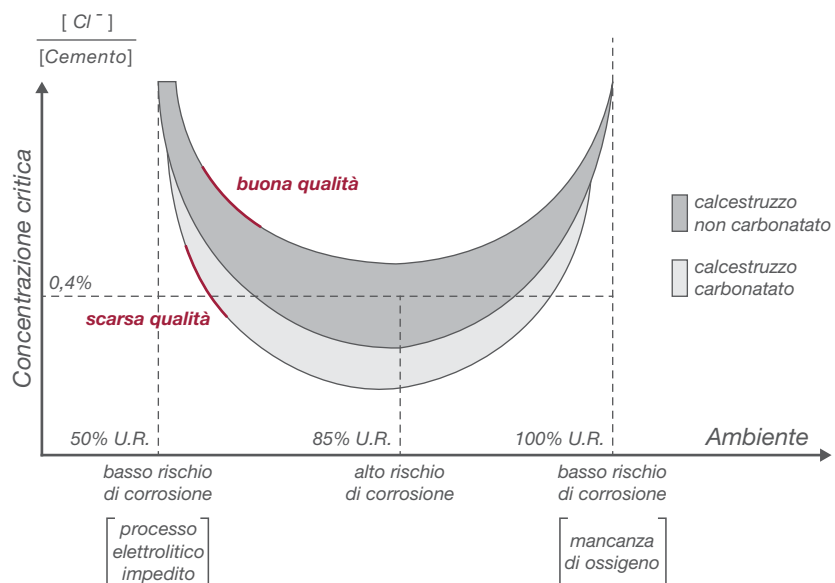
A partire da questo momento, l'eventuale ingresso di acqua ed ossigeno nel calcestruzzo fino alla profondità delle armature ne determinerebbe la corrosione.

**Figura 4**  
La corrosione da carbonatazione, diffusa in modo omogeneo sulle armature, determina l'**espulsione del copriferro** prima in corrispondenza delle staffe (armature più esterne).



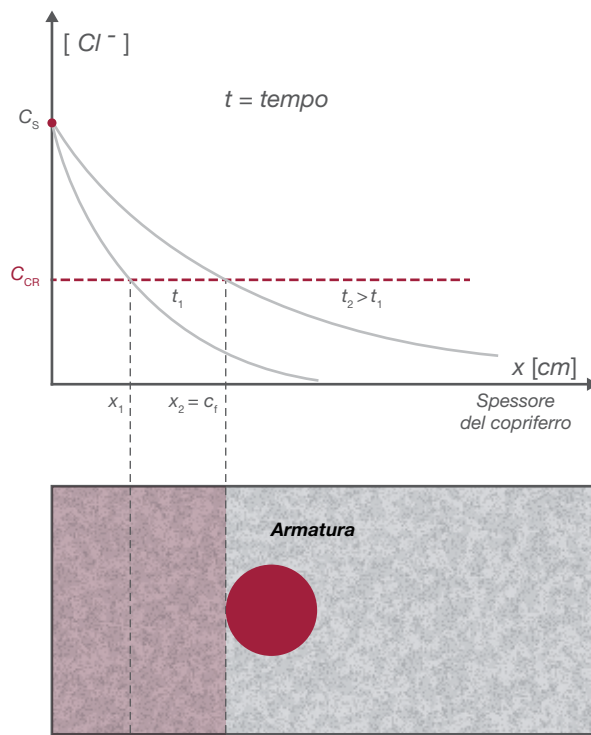
Analogamente, la penetrazione dei **cloruri** nel copriferro ed il loro accumulo sulla superficie delle armature può determinare, nel caso venga raggiunta una **concentrazione critica**, la distruzione localizzata del film protettivo. La concentrazione critica di cloruri che determina la depassivazione delle armature è generalmente dell'ordine dello 0,4-1% (in massa rispetto al contenuto di cemento), tuttavia essa è fortemente legata al valore del pH del calcestruzzo (Figura 5).

**Figura 5**  
Calcestruzzi carbonatati, e quindi caratterizzati da bassi valori di pH, sono contraddistinti da bassi valori di concentrazione critica (maggiore facilità di depassivazione delle armature da cloruri). [1]



# PRINCIPALI CAUSE DI CORROSIONE DELLE BARRE D'ARMATURA NELLE STRUTTURE IN C.A. E C.A.P.

In una struttura in calcestruzzo armato sulla cui superficie sia presente una concentrazione  $C_s$  di cloruri, di origine marina o provenienti dai sali disgelanti utilizzati nelle stagioni invernali, si realizza un profilo di penetrazione, variabile nel tempo, simile a quello proposto in Figura 6.



**Figura 6**

L'armatura rimane nella condizione di passivazione fino a quando sulla sua superficie il tenore di cloruri rimane al di sotto del valore critico. Quando tale valore viene raggiunto, il film passivante viene localmente distrutto e in breve tempo, in presenza di acqua ed ossigeno, si assiste a corrosioni localizzate accompagnate da pericolose riduzioni della sezione resistente.



**Figura 7**

Prova colorimetrica di cui alla UNI 9944 per la determinazione della profondità di penetrazione dello ione cloruro nel calcestruzzo. La parte che rimane più chiara è stata penetrata dallo ione cloruro.

# PRINCIPALI CAUSE DI CORROSIONE DELLE BARRE D'ARMATURA NELLE STRUTTURE IN C.A. E C.A.P.

**Figura 8**  
Corrosione delle armature nel calcestruzzo armato.

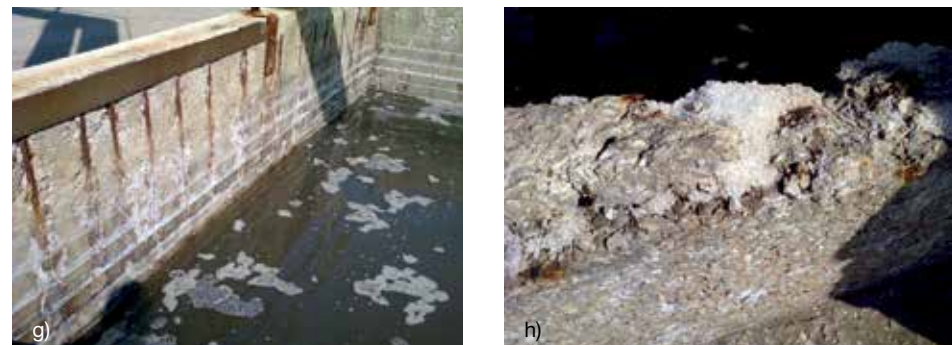
(a,b,c) causata dai cloruri di origine marina. È evidente l'estesa espulsione del copriferro e la notevole riduzione della sezione resistente delle armature (c).



(d,e,f) da carbonatazione. La corrosione appare distribuita uniformemente su tutta l'armatura.



(g,h) La presenza di sostanze che aggrediscono la matrice cementizia (solfati) può accelerare il fenomeno corrosivo a causa del degrado del copriferro.



# ADDITIVI INIBITORI DI CORROSIONE

**INHIBITOR C10, INHIBITOR C11 e INHIBITOR SKIN C10** sono particolari additivi chimici che a contatto con l'acciaio formano un film protettivo di spessore compreso tra i 20 e 100 Å (Figura 9).

L'inibitore di corrosione, aggiunto all'impasto di calcestruzzo (**INHIBITOR C10 e INHIBITOR C11**) o applicato direttamente sulla superficie di strutture esistenti (**INHIBITOR SKIN C10**), determina una benefica azione di prevenzione o ritardo della corrosione delle armature, soprattutto quella innescata dalla penetrazione dei cloruri.

L'utilizzo di questi prodotti non produce alcun effetto negativo sulle prestazioni meccaniche del calcestruzzo.

L'azione degli inibitori di corrosione della serie **INHIBITOR** si concretizza principalmente secondo le seguenti modalità:



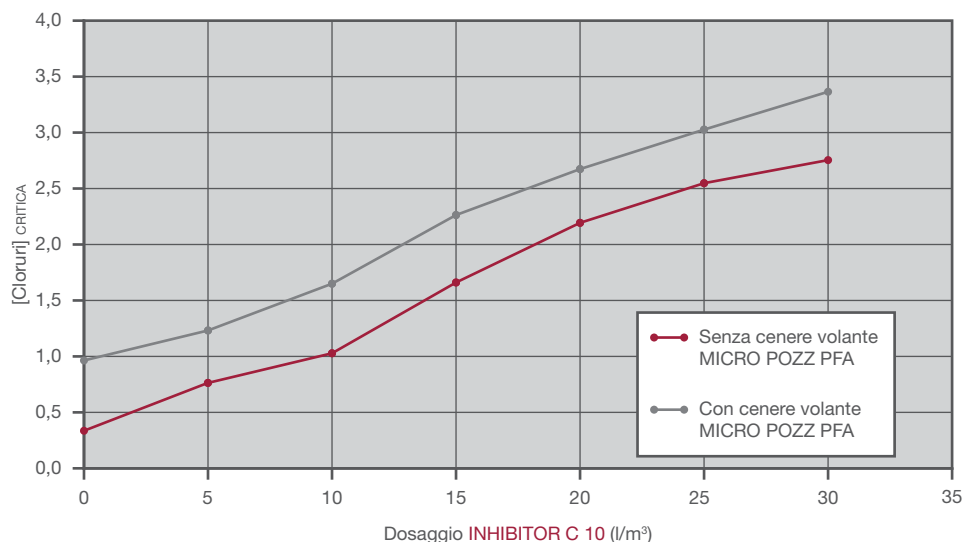
- ✓ Aumentano il tempo di innesco della corrosione grazie all'innalzamento della soglia critica di cloruri.
- ✓ Rallentano la penetrazione dei cloruri nel calcestruzzo.
- ✓ Riducono la velocità di corrosione e, conseguentemente, aumentano il tempo di propagazione una volta che le armature si sono depassivate.
- ✓ Riducono la velocità di riduzione dell'ossigeno.

**Figura 9**  
Protezione delle armature ad opera degli inibitori della serie **INHIBITOR**.

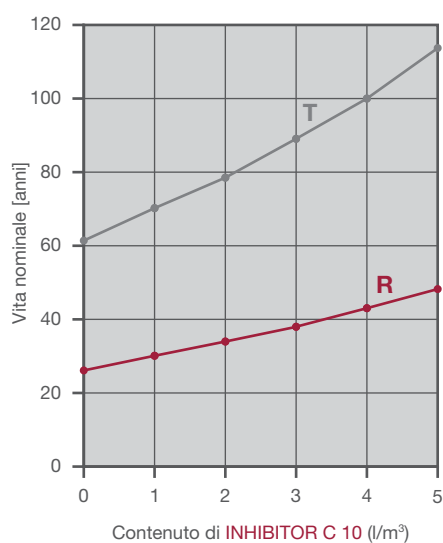
In Figura 10 è mostrato l'incremento della soglia critica di cloruri ottenibile mediante l'impiego dell'additivo **INHIBITOR C10**. È evidente come anche con dosaggi relativamente bassi sia possibile incrementare sensibilmente la resistenza delle armature all'azione depassivante esercitata dal cloruro. Con dosaggi elevati, l'incremento del tenore critico è più che proporzionale al dosaggio stesso. Sempre in Figura 10 viene messo in evidenza il ruolo benefico che la presenza di cenere volante **MICRO POZZ PFA** ha sul tenore critico di cloruri.

L'incremento del tenore critico di cloruri determina un incremento della vita nominale della struttura con conseguenti benefiche riduzioni dei suoi costi di gestione e manutenzione.

**Figura 10**  
Influenza di  
**INHIBITOR C10**  
sul tenore critico di  
cloruri che determina  
la depassivazione  
dell'armatura.



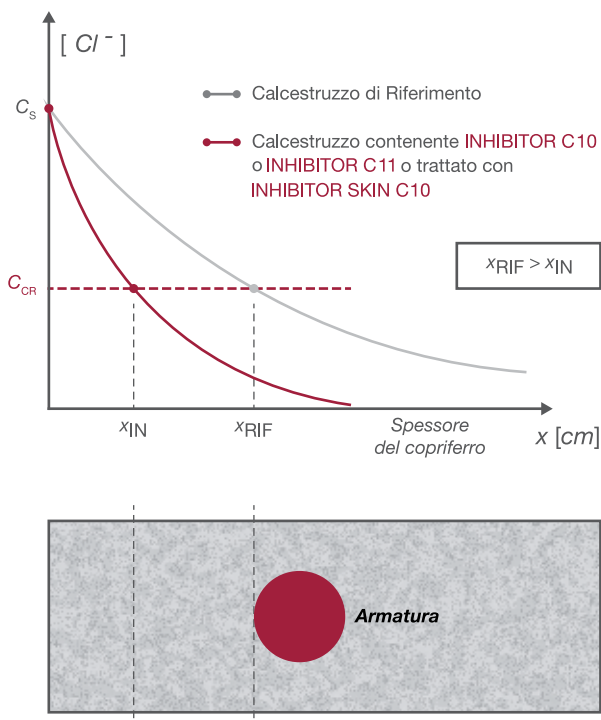
In Figura 11 è rappresentato il valore della *vita nominale* di una struttura (valutato utilizzando la seconda legge di Fick) realizzata in classe di esposizione XD3 (presenza di cloruri non marini in condizioni asciutte-bagnate) con un calcestruzzo conforme alla UNI 11104 per composizione ed alla UNI EN 1992-2 (Eurocodice 2) per quanto riguarda il valore del copriferro (45 mm).



**Figura 11**

La curva R ("Reale"), a differenza della T ("Teorica"), tiene conto della effettiva modalità di messa in opera del calcestruzzo e quindi di una sua possibile non completa compattazione e/o presenza di locali difetti (es. piccoli nidi di ghiaia o fessure) che, chiaramente, accelerano l'ingresso dei cloruri nella struttura.

## ADDITIVI INIBITORI DI CORROSIONE

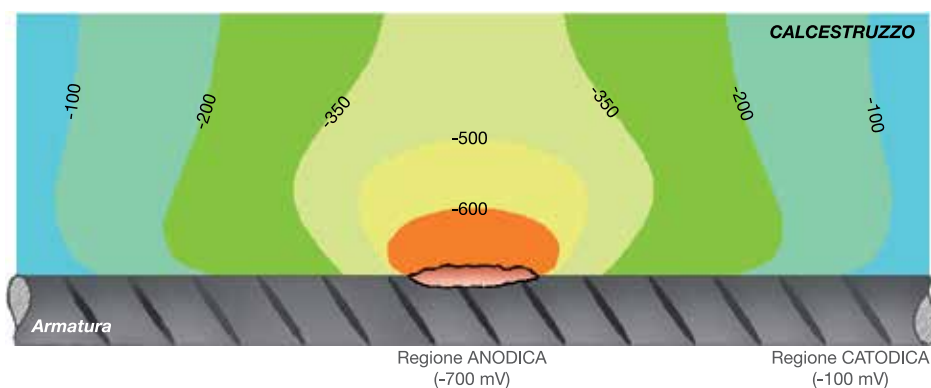


**Figura 12**

A parità di tempo di esposizione ad una determinata concentrazione superficiale  $C_s$  di cloruri, la presenza di **INHIBITOR**, introdotto in massa o applicato sulla superficie delle strutture, rallenta la penetrazione dei cloruri nel calcestruzzo, allungando il tempo di innesco della corrosione. In figura si evidenzia come, in corrispondenza della stessa concentrazione superficiale di cloruri, quando nel calcestruzzo di riferimento (senza **INHIBITOR**) viene raggiunto il tenore critico sulla superficie delle armature, nel calcestruzzo contenente **INHIBITOR** tale concentrazione, sulle barre, è ben lontana da quella critica.

Da un punto di vista elettrochimico, l'azione degli additivi **INHIBITOR C10**, **INHIBITOR C11** e **INHIBITOR SKIN C10** si concretizza attraverso una **protezione anodica** (mantenimento delle condizioni di passività della superficie delle barre di armatura) ed una **protezione catodica** (rallentamento della reazione di riduzione dell'ossigeno).

È noto come al diminuire del potenziale della zona anodica, la reazione elettrochimica di corrosione delle armature aumenti (Figura 13).

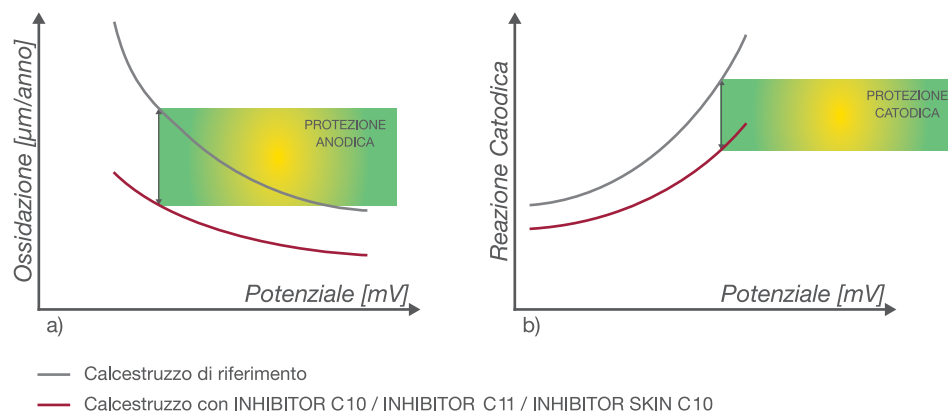


**Figura 13**

Andamento dei potenziali attorno a un'area anodica localizzata [2].

## ADDITIVI INIBITORI DI CORROSIONE

In presenza di **INHIBITOR C10 e INHIBITOR C11**, a parità di potenziale anodico la velocità di corrosione delle armature risulta inferiore (Figura 14.a). Analogamente accade nella zona catodica, dove, al contrario, la reazione di riduzione aumenta all'aumentare del potenziale catodico (Figura 14.b).

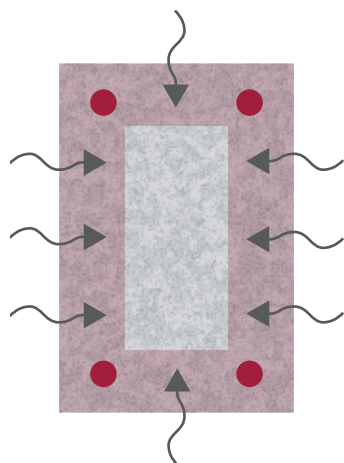


**Figura 14**  
Protezione anodica e catodica degli additivi della serie **INHIBITOR**.

Di seguito sono illustrati i risultati ottenuti attraverso l'azione migratoria di **INHIBITOR SKIN C 10**

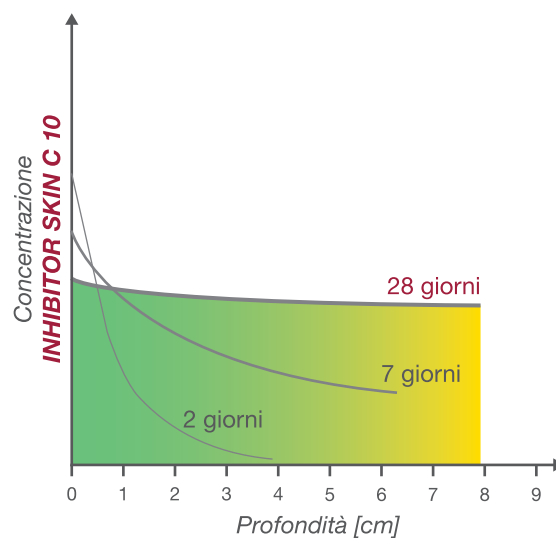
**Figura 15**  
**INHIBITOR SKIN C10**

applicato sulla superficie di strutture esistenti, è in grado di migrare all'interno del calcestruzzo diffondendosi sia attraverso le soluzioni liquide che le fasi gassose contenute nei pori del conglomerato.



**Figura 16**  
Andamento qualitativo della concentrazione di **INHIBITOR SKIN C10**

(applicato sulla superficie del calcestruzzo) nello spessore del copriferro al trascorrere del tempo.



# LCC (LIFE CYCLE COST) DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO E GLI INIBITORI DI CORROSIONE DELLA SERIE INHIBITOR

L'incremento della vita nominale conseguibile con l'utilizzo degli inibitori di corrosione della serie **INHIBITOR** ha, come diretta conseguenza, la minore necessità di interventi di manutenzione su qualsiasi struttura. Con *LCC* si intende l'insieme dei costi di un'opera relativi a tutta la sua vita nominale (*Life Cycle Cost*). E' dimostrato che l'impiego di **INHIBITOR C10**, **INHIBITOR C11** e **INHIBITOR SKIN C10** determina una notevole riduzione del costo della struttura durante il suo ciclo di vita.

In combinazione con la cenere volante **MICRO POZZ PFA** si ottiene un sistema capace di abbattere drasticamente i costi delle strutture aumentandone la durabilità.

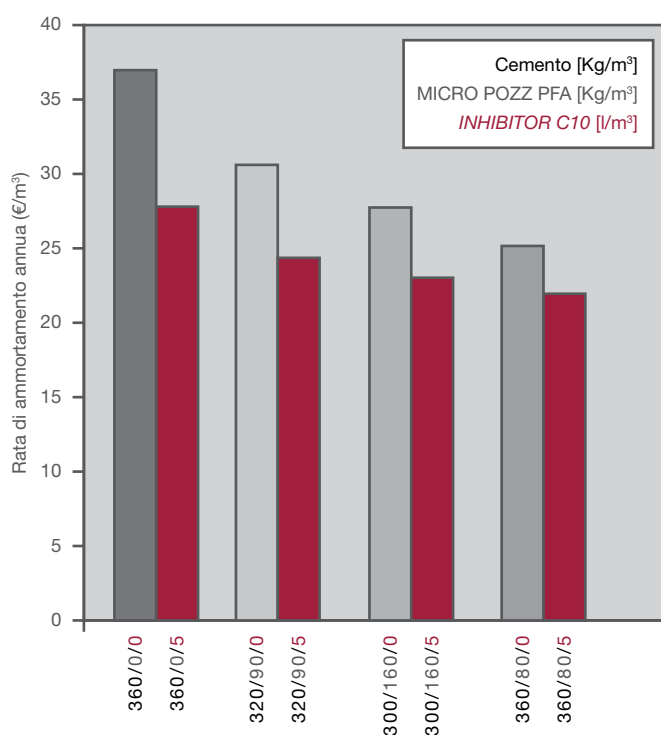


Figura 17

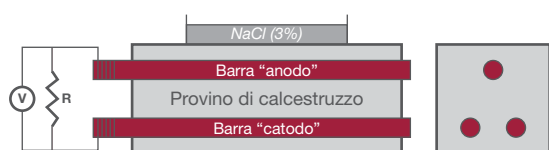
In Figura 17, la rata di ammortamento, riportata in ordinata, rappresenta il valore dell'*LCC* (Costo del Ciclo di Vita) ripartito uniformemente tra gli anni di vita nominale della struttura.

In figura é riportata la rata di ammortamento annua di una struttura in classe di esposizione XD3, espressa in € per m<sup>3</sup> di calcestruzzo messo in opera, per anno.

# VALUTAZIONE DELLA PROTEZIONE OTTENUTA

Due importanti norme americane, la **ASTM G109** [3] e la **ASTM C1202** [4], sono strettamente collegate al fenomeno della corrosione delle armature nel calcestruzzo. La prima propone un metodo utile per la valutazione degli effetti degli additivi chimici sulla corrosione delle armature nel calcestruzzo, con particolare riferimento alle strutture esposte all'aggressione dei cloruri.

La seconda, invece, riguarda indirettamente il fenomeno della corrosione delle armature, in quanto tratta di una particolare metodologia volta alla determinazione della maggiore o minore tendenza di un calcestruzzo a lasciar penetrare lo ione cloruro.



## ASTM G109

Il campione viene sottoposto a più cicli di contatto con una soluzione salina ed asciugatura, in modo da favorire le condizioni per l'attivazione della corrosione nelle barre metalliche. Ad ogni ciclo viene misurata la differenza di potenziale  $V$  tra la barra "anodo" e le barre "catodo" a cavallo di una resistenza  $R$  nota. Questo permette di determinare indirettamente l'intensità della corrente ( $I$ ) che transita tra le due barre ( $I = V/R$ ). Tanto maggiore risulta la corrente transitante e tanto più il fenomeno corrosivo in atto è rilevante. Viene inoltre monitorato il potenziale delle armature rispetto ad un elettrodo di riferimento (inserito in una soluzione al 3% di NaCl).



Figura 18



Figura 19

## VALUTAZIONE DELLA PROTEZIONE OTTENUTA

All'aumentare del numero di cicli il potenziale delle armature rispetto ad un elettrodo di riferimento rimane pressoché costante.

Anche se il potenziale delle armature rispetto all'elettrodo di riferimento è lo stesso, nei provini contenenti **INHIBITOR** si misura un minore flusso di corrente ( $\mu A$ ) tra le due barre (linee tratteggiate). Questo implica una reazione di corrosione molto più lenta (cfr. Figura 14.a – Protezione anodica). La quantità di carica totale transitata alla fine dei cicli è, nel calcestruzzo con **INHIBITOR**, molto inferiore rispetto a quella nel calcestruzzo di riferimento (linee continue).

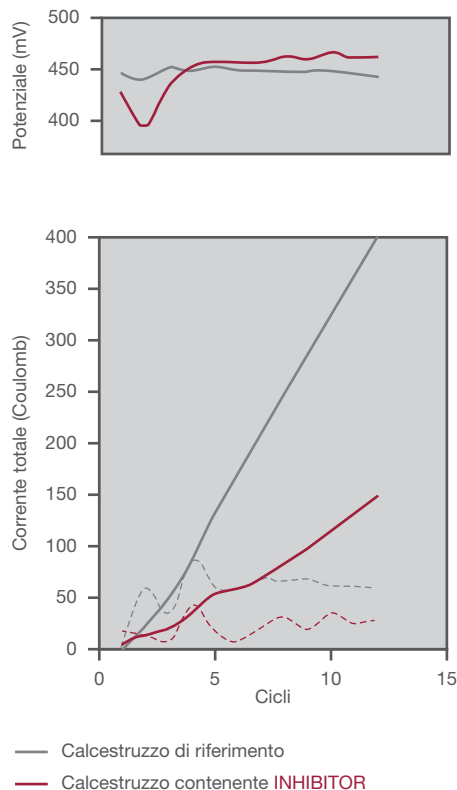


Figura 20

### ASTM G1202

Viene misurata la quantità di carica elettrica che, in un determinato intervallo di tempo, transita attraverso un campione di calcestruzzo (Figura 21).

Maggiore è la carica transitata, maggiore è la penetrabilità del campione allo ione cloruro.

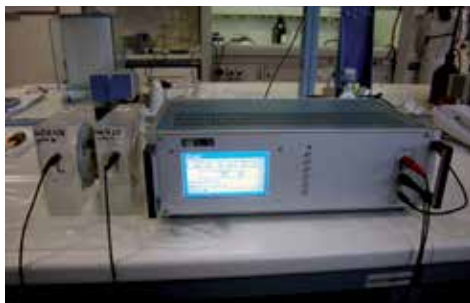


Figura 21

## VALUTAZIONE DELLA PROTEZIONE OTTENUTA

---

La stessa norma ASTM G1202 fornisce, sulla base del risultato della prova, una indicazione qualitativa sulla maggiore o minore propensione del campione a lasciar penetrare lo ione cloruro al suo interno (Tabella 2).

**Tabella 2** [4]

Carica elettrica passante (Coulomb)	Permeabilità allo ione Cloruro
>4000	alta
2000-4000	moderata
1000-2000	bassa
100-1000	molto bassa
<100	trascurabile

### Fonti e Riferimenti bibliografici

- [1] ACI 222R-01 *“Protection of Metals in concrete against corrosion”*.
- [2] P. Pedferri, L. Bartolini – *“La durabilità del calcestruzzo armato”* – McGraw-Hill editore.
- [3] ASTM G109 *“Standard Test Method for Determining Effects of Chemical Admixtures on Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments”*.
- [4] ASTM 1202 *“Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s ability to resist chloride ion penetration”*.

# PRODOTTI, APPLICAZIONI E DOSAGGI

Tabella 3

PRODOTTO	DESCRIZIONE	DOSAGGIO	CONFEZIONI	APPLICAZIONI
<b>INHIBITOR C10</b>	Inibitore di corrosione delle armature metalliche nelle strutture in c.a. e c.a.p.	1,5 ÷ 4,5 litri ogni m <sup>3</sup> di calcestruzzo	Sfuso, cisternetta da 1000 kg, fusto da 220 kg e tanica da 25 kg	Applicazione in massa nel calcestruzzo destinato a strutture armate (infrastrutture viarie, parcheggi, autorimesse, ponti)
<b>INHIBITOR C11</b>	Inibitore di corrosione delle armature metalliche nelle strutture in c.a. e c.a.p.	6,0 ÷ 8,0 litri ogni m <sup>3</sup> di calcestruzzo	Sfuso, cisternetta da 1200 kg, fusto da 300 kg e tanica da 25 kg	Applicazione in massa nel calcestruzzo destinato a strutture armate (infrastrutture viarie, parcheggi, autorimesse, ponti)
<b>INHIBITOR SKIN C10</b>	Inibitore di corrosione migratorio a protezione dell'interfaccia ferro-calcestruzzo delle strutture degradate	150 - 300 gr/m <sup>2</sup>	Cisternetta da 1000 Kg, fusto da 210 Kg e tanica da 20 Kg	Applicazione superficiale ideale nella riparazione e nel restauro di strutture ammalorate e nella prevenzione del degrado delle strutture esistenti in calcestruzzo armato

## ESEMPIO DI PRESCRIZIONE DI CAPITOLATO

### **Calcestruzzo destinato alla realizzazione di strutture in zona marina in contatto diretto con acqua di mare**

Calcestruzzo a prestazione garantita, in accordo alla UNI EN 206, per strutture aeree in zona marina in contatto diretto con l'acqua di mare, in classe di esposizione XC4 + XS3 (UNI 11104), Classe di Resistenza C35/45 (Rck 45 N/mm<sup>2</sup>), Classe di consistenza S4/S5 o slump di riferimento 230 ± 30 mm, D<sub>max</sub> 32 mm, Ci 0,4, verificato alla consegna con Controllo di accettazione di tipo A (tipo B per volumi complessivi di calcestruzzo superiori a 1500 m<sup>3</sup>).

#### **Prescrizioni per il materiale <sup>(1)</sup>:**

- √ Cemento di tipo II A 42,5 R o 32,5 R conforme alla norma UNI EN 197-1;
- √ Cenere volante tipo MICRO POZZ PFA di General Admixtures SpA conforme alla norma UNI EN 450 utilizzata in parziale sostituzione del cemento in accordo alla UNI EN 206 e UNI 11104 o utilizzata come aggiunta di tipo I conforme alla norma UNI EN 12620 o, in alternativa, fumo di silice tipo MICRO POZZ DSF di General Admixtures SpA conforme alla norma UNI EN 13263 parte 1 e 2;
- √ Additivo superfluidificante conforme ai prospetti 3.1 e 3.2 o superfluidificante ritardante conforme ai prospetti 11.1 e 11.2 della norma UNI EN 934-2, tipo serie PREMIUM RM di General Admixtures SpA;
- √ Additivo Inibitore di Corrosione tipo INHIBITOR di General Admixtures SpA;

- √ *Aggregati provvisti di marcatura CE conformi alle norme UNI EN 12620 e 8520-1 e 2. Assenza di minerali nocivi o potenzialmente reattivi agli alcali (UNI EN 932-3 e UNI 8520-2) o in alternativa aggregati con espansioni su prismi di malta, valutate con la prova accelerata e/o con la prova a lungo termine in accordo alla metodologia prevista dalla UNI 8520-22, inferiori ai valori massimi riportati nel prospetto 6 della UNI 8520 parte 2;*
- √ *Fibre polipropileniche per calcestruzzo tipo FIBERCOLL di General Admixtures SpA per il contenimento di eventuali fenomeni fessurativi in corrispondenza del copriferro;*
- √ *Acqua di impasto conforme alla UNI EN 1008.*

### **Prescrizioni per la struttura <sup>(1)</sup>:**

- √ *Copriferro minimo: 50 mm (60 per opere in c.a.p.);*
- √ *Controllo dell'esecuzione dell'opera ( $R_c$  minima in opera valutata su carote  $h/d = 2$ )  $R_{c, opera m} \geq 46,4 \text{ N/mm}^2$ ;*
- √ *Scassero oppure maturazione umida, da effettuarsi mediante ricoprimento della superficie non cassetata con geotessile bagnato ogni 24 ore o mediante applicazione superficiale di agente stagionante tipo CURING S o WF di General Admixtures Spa, per una durata complessiva di 7 giorni;*
- √ *Acciaio tipo B450C conforme al punto 11.3.2.1 del D.M. 17.01.2018 e alla normativa europea applicabile con accertamento delle proprietà meccaniche in base al punto 11.3.2.1 del medesimo decreto;*
- √ *Per strutture massive (con spessore  $\geq 70 \text{ cm}$ ), limite massimo di temperatura raggiunto nel nucleo  $70^\circ\text{C}$  e  $\Delta T \leq 20^\circ\text{C}$  (differenza di temperatura tra nucleo e parte corticale della struttura). È prescritto l'utilizzo di MICRO POZZ PFA (Genere Volante) nella miscela di calcestruzzo.*

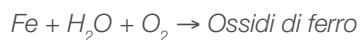
<sup>(1)</sup>: *Linee guida per la prescrizione delle opere in c.a. a cura di "Progetto Concrete" – Il Sole 24 ore editoria*

# APPROFONDIMENTO: FENOMENOLOGIA DELLA CORROSIONE

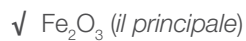
La *corrosione* è un *processo elettrochimico* risultante dal contemporaneo accadimento di due fenomeni, l'*ossidazione* e la *riduzione*, ed avviene con un trasferimento di carica elettrica (elettroni) da una specie (*sostanza riducente*) ad un'altra (*sostanza ossidante*).

La reazione di ossidazione avviene in una zona chiamata *anodo* (reazione anodica) mentre la reazione di riduzione avviene in una zona chiamata *catodo* (reazione catodica).

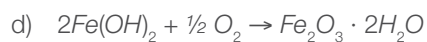
Nella fattispecie, per gli elementi in ferro o acciaio (come le barre di armatura all'interno del calcestruzzo), la corrosione è riassunta dalla seguente trasformazione:



L'espressione "ossidi di ferro" raggruppa di fatto varie tipologie di ossidi derivanti da una serie di reazioni. Infatti la "ruggine" si compone di vari ossidi, fra i quali i più importanti sono:



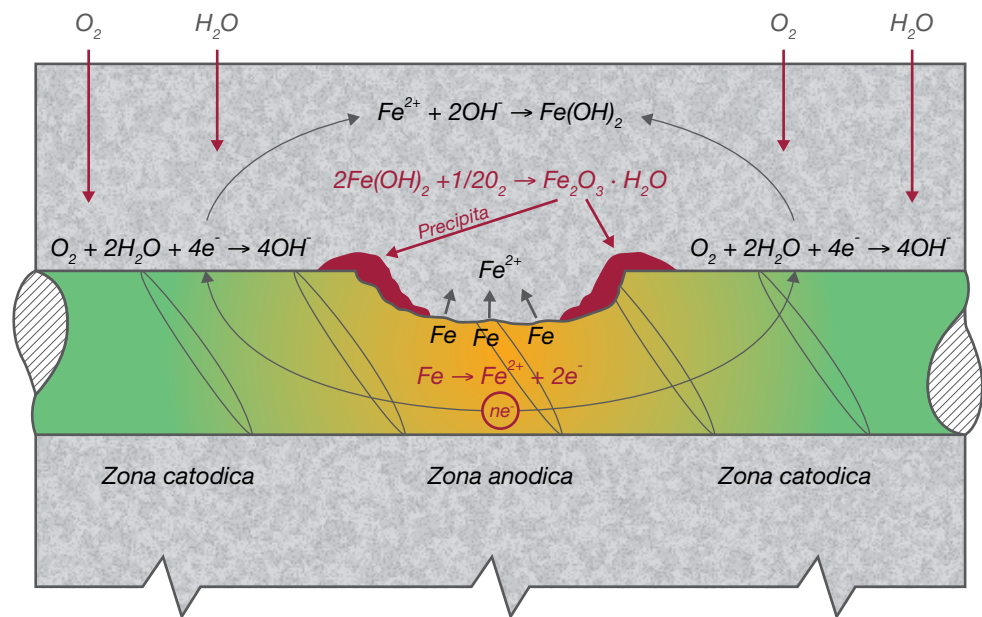
Nel dettaglio, la (2) si sviluppa nelle seguenti fasi:



Quest'ultimo precipita andando a depositarsi sull'anodo sottoforma di *ruggine*.

## APPROFONDIMENTO: FENOMENOLOGIA DELLA CORROSIONE

- √ La reazione anodica (punto a) porta ad un "consumo" del materiale ossidato (nel caso in esame del ferro): è noto infatti che la corrosione delle armature comporta una riduzione della loro sezione resistente (Figura 2).
- √ I prodotti della reazione di ossidazione sono caratterizzati da un volume molto più elevato del ferro originario.



In tutte le reazioni elettrochimiche è molto utile il concetto di **potenziale**. Per comprenderlo appieno è sufficiente considerare le reazioni elettrochimica rappresentata in Figura 23.

In essa, l'anodo (e quindi la sostanza che si ossida) è costituito dallo zinco (Zn) mentre il catodo (la sostanza che si riduce) è costituito dal rame (Cu).

I due elementi, detti anche *elettrodi*, sono collegati da un filo conduttore che serve sostanzialmente a portare gli elettroni dall'anodo, dove sono prodotti, al catodo, dove sono consumati.

Infine, la presenza di un ponte salino consente di chiudere il circuito elettrico attraverso la mobilitazione di specie ioniche.

Man mano che lo zinco si ossida e quindi passa in soluzione sottoforma di  $Zn^{2+}$ , una corrente elettrica (elettroni prodotti) arriva, attraverso il conduttore, all'elettrodo di rame. Qui, gli elettroni vengono catturati dagli ioni  $Cu^{+2}$  che si trovano in soluzione e formano ulteriore rame (Cu) che si deposita sulla barra.

## APPROFONDIMENTO: FENOMENOLOGIA DELLA CORROSIONE

Durante questo processo tende a formarsi uno squilibrio di carica: a sinistra si accumulano gli  $Zn^{+2}$  ed a destra gli  $SO_4^{-2}$ . La presenza del ponte salino fa in modo che gli ioni  $Cl^-$  vadano a sinistra a compensare gli  $Zn^{+2}$  in eccesso e che gli ioni  $K^+$  vadano a destra a compensare gli  $SO_4^{-2}$  in eccesso.

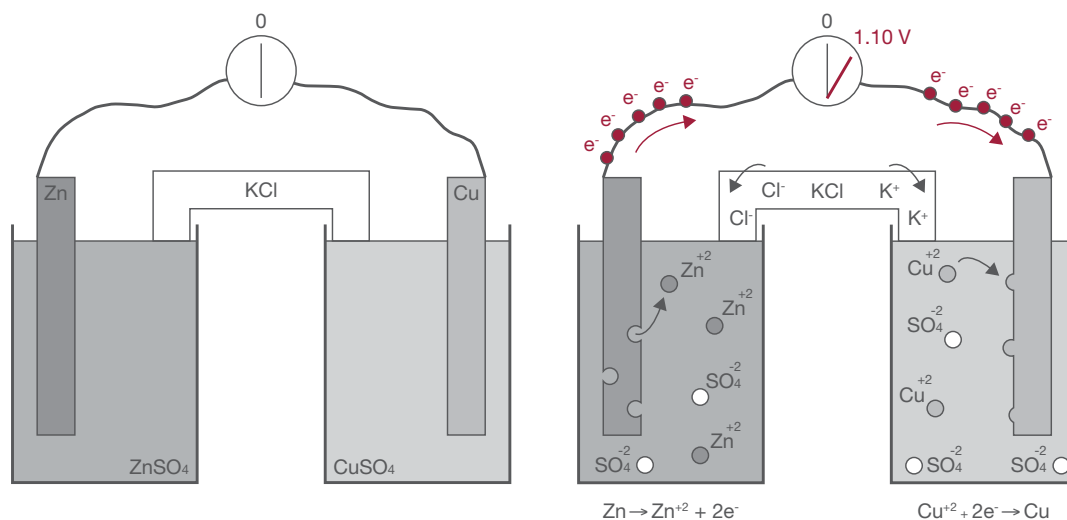


Figura 23

La misura del voltaggio della corrente che transita rappresenta il potenziale della reazione elettrochimica in questione: maggiore è il potenziale, maggiore è il flusso di corrente e maggiormente la reazione avviene.

Se si prende in considerazione un *elettrodo di riferimento* (elettrodo ad idrogeno) come anodo, è possibile associare ad ogni sostanza un proprio **potenziale standard** (indicato di seguito come  $E^\circ$ ).

Ad esempio, con riferimento all'esempio sopra riportato, realizzando un sistema nel quale il catodo sia lo zinco e l'anodo sia l'*elettrodo di riferimento*, sul voltmetro si leggerebbe la quantità  $-0,76V$  (gli elettroni vanno dallo zinco, che quindi si ossida, all'elettrodo di riferimento). Facendo lo stesso con il rame, si leggerebbe la quantità  $+0,34V$  (gli elettroni vanno dall'elettrodo di riferimento al rame il quale si riduce).

Quindi, se rispetto all'elettrodo ad idrogeno una sostanza ha un potenziale positivo, essa sarà una sostanza ossidante (cioè che si riduce) mentre se ha un potenziale negativo sarà una sostanza riducente (cioè che si ossida).

Tornando all'esempio  $Zn/Cu$ , avendo il rame un potenziale standard maggiore di quello dello zinco, accoppiandoli come nello schema sopra riportato, il primo sarà l'elettrodo che si riduce (catodo) mentre il secondo quello che si ossida (anodo) e sul voltmetro si leggerà una differenza di potenziale pari a:  $E = E^\circ(\text{catodo}) - E^\circ(\text{anodo}) = +0,34 - (-0,76) = +0,34 + 0,76 = 1,10 V$  (come indicato dal voltmetro riportato in Figura 23).



# LA NOSTRA MISSIONE

FORNIRE TECNOLOGIA E VALORE ALL'INDUSTRIA DELLE COSTRUZIONI,  
ATTRAVERSO L'INNOVAZIONE ED UN APPROCCIO DI SISTEMA.

## INNOVAZIONE

Puntare sulla qualità e innovazione dei propri prodotti, tecnologie e servizi per distinguersi e consolidare la propria immagine.

Garantire attraverso comportamenti consapevoli la sostenibilità ambientale dei propri prodotti.

## SISTEMA

Comprendere e soddisfare le esigenze del cliente attraverso l'ottimizzazione dei propri processi elevando così il livello di competitività ed espandendo le opportunità.

Adottare la cultura della prevenzione riducendo qualunque forma di rischio riferita alla qualità del prodotto o dell'inquinamento dell'ambiente.



Created by: Marketing - General Admixtures S.p.A. | Graphic design: Paolo Celotto | Photo: Archivio General Admixtures S.p.A.

REV.03 09/03/2026



Azienda certificata per la Gestione dei Sistemi Qualità e Ambiente conformi alle norme UNI EN ISO 9001 e 14001

Certified company for Quality and Environmental System Management according to standards UNI EN ISO 9001 and 14001



## **General Admixtures S.p.A.**

Via delle Industrie n. 14/16  
31050 Ponzano Veneto (TV) | ITALY  
T. + 39 0422 966911 | [info@gageneral.com](mailto:info@gageneral.com)

Unità produttiva: Via dell'Industria n. 33  
26016 Spino d'Adda (CR) | ITALY  
T. + 39 0373 980391 | [antebiago@gageneral.com](mailto:antebiago@gageneral.com)

[www.gageneral.com](http://www.gageneral.com) | [www.antebiago.it](http://www.antebiago.it)

