

PROTEZIONE CATODICA GALVANICA DELLE ARMATURE NEL CALCESTRUZZO

Le strutture in calcestruzzo armato presentano una vita di servizio che dipende, nella maggior parte dei casi, dallo stato delle armature. In un calcestruzzo nuovo o non contaminato i ferri si trovano in un ambiente alcalino che permette la formazione di un sottile film di ossido, che li protegge dalla corrosione: questa condizione prende il nome di passività. Purtroppo, nel tempo, le armature possono perdere questa caratteristica ed ossidare a seguito di:

- carbonatazione: l'anidride carbonica presente nell'atmosfera penetra nel calcestruzzo, abbassando il suo pH. Il film di ossido si rompe e le armature perdono il loro stato di passività;
- contaminazione da cloruri: i cloruri penetrano nel calcestruzzo, provocando la rottura localizzata del film protettivo dei ferri.

Il grafico di Figura 1 rappresenta la vita utile di una struttura misurata in base al fenomeno della corrosione nel tempo; come rappresentato la si può dividere in due fasi distinte:

- fase d'innescò: tempo di diffusione degli agenti inquinanti all'interno del copriferro con conseguente innescò del processo di corrosione;
- fase di propagazione: la corrosione, ormai innescata, procede nel tempo fino a raggiungere la condizione limite fissata.

Come è facile intuire, la prima fase può essere incrementata mediante l'utilizzo di un corretto copriferro o con una protezione superficiale che rallenti il processo di penetrazione dell'agente aggressivo all'interno della struttura. Oppure, può essere significativamente incrementata mediante l'applicazione di sistemi protettivi specifici da applicare alle armature, che ne evitano il precoce degrado e che quindi ritardino il più possibile la fase di propagazione.

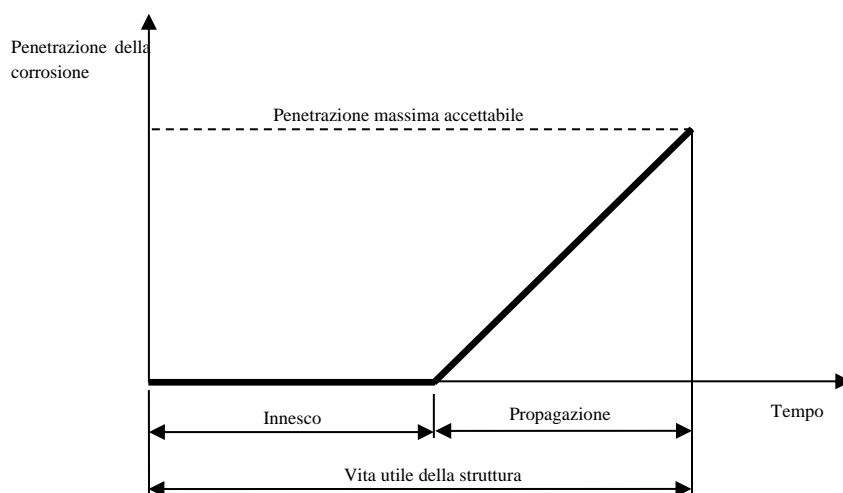


Figura 1: modello di Tuutti per la vita utile di una struttura in funzione della corrosione delle sue armature.

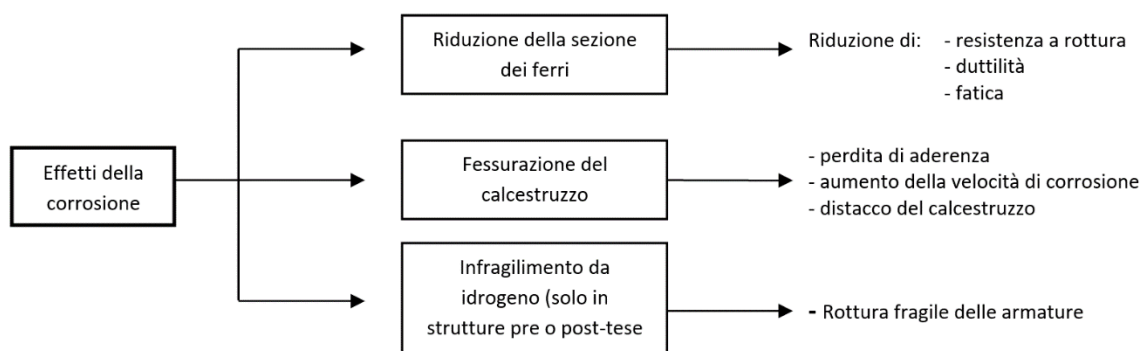


Figura 2: effetti della corrosione sulle strutture in calcestruzzo armato.

I principali effetti della corrosione delle armature sulle strutture in calcestruzzo armato possono essere riassunti attraverso lo schema di Figura 2.

Per evitare una precoce corrosione dei ferri di armatura in un ambiente aggressivo, una vantaggiosa soluzione consiste nell'utilizzare un sistema "catodico galvanico".

Il sistema di protezione "catodico galvanico" mediante l'utilizzo di anodi sacrificali

Il sistema ad anodi galvanici (o sacrificali) ha il principale vantaggio di non necessitare né di cablaggi né di alcun alimentatore di energia esterno che comporterebbe una continua manutenzione lungo tutto l'arco di vita della struttura. Questa tecnica si basa sull'accoppiamento di due metalli: l'acciaio al carbonio di cui sono costituite le barre di armatura e lo zinco degli anodi. Collegando elettricamente i due metalli, grazie alla funzione di elettrolita svolta dal calcestruzzo, si genera una corrente continua, che consente di abbassare il potenziale elettrico dell'acciaio e di proteggerlo dalla corrosione. Il metallo con il potenziale elettrico più negativo ossida (anodo), proteggendo il metallo con il potenziale meno negativo (catodo), che rimane protetto. Lo zinco degli anodi sacrificali ossida nel tempo, sacrificandosi in favore delle armature all'interno del calcestruzzo, ritardando così l'innesco del processo di corrosione.

In Figura 4 è riportato uno schema semplificato che illustra il concetto della cella (o pila) galvanica: sistema su cui si basa la protezione catodica mediante anodi galvanici.

I metalli si possono classificare a seconda della loro nobiltà, cioè a seconda della loro attitudine a cedere elettroni. Più un metallo è nobile più difficile sarà la cessione e quindi l'ossidazione. Tenendo presente la scala rappresentata in Figura 3, possiamo comprendere il funzionamento della cella galvanica. L'anodo sacrificale è destinato al progressivo consumo nel tempo.

Sulla base di queste considerazioni si può affermare che la protezione offerta da questo sistema innovativo può permettere di aumentare notevolmente la durabilità dell'opera, in quanto ritarda l'innesco del processo di corrosione sulle barre di armatura.

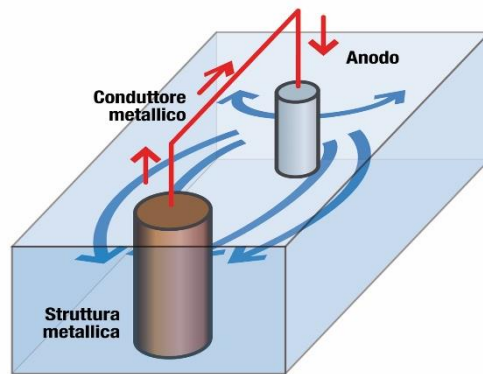


Figura 4: schematizzazione di una cella galvanica

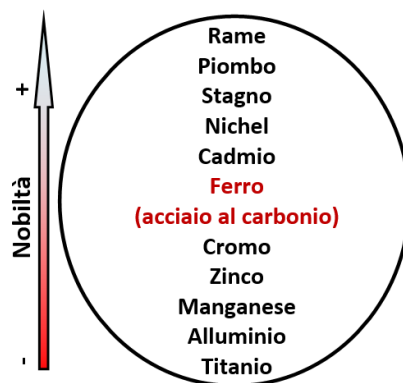


Figura 3: scala di nobiltà di alcuni metalli

Progettazione del sistema di protezione catodica

Secondo il rapporto della *Federal High Way Administration*, la protezione catodica (CP) è l'unica tecnica di riabilitazione che si è dimostrata in grado di arrestare la corrosione nelle strutture in calcestruzzo contaminate dai cloruri, indipendentemente dalla loro concentrazione [1]. Applicando la CP, il potenziale di corrosione viene spostato nella zona di immunità e, da un punto di vista pratico, la corrosione viene arrestata.

La progettazione di un sistema CP per acciaio nel calcestruzzo dipende da due variabili critiche: la densità di corrente richiesta e la distribuzione uniforme di tale corrente. Oltre a questi aspetti critici, il processo di progettazione deve tenere conto di una serie di fattori aggiuntivi come il costo, le condizioni ambientali, le interferenze, l'aumento di tensione, il peso degli anodi, la durata, l'estetica, il monitoraggio, la manutenzione e altro ancora.

Tutti i componenti di un sistema di protezione catodica hanno una durata limitata. Gli anodi sacrificali vengono consumati nel processo di produzione della corrente. La capacità, espressa in termini di mperre-ora (con il fattore di efficienza per il materiale anodico impiegato) ci permette di determinare il peso di metallo anodico (zinco) necessario per fornire la quantità di corrente richiesta. Come minimo, nella stima della durata di un sistema di protezione catodica galvanica si devono considerare i seguenti elementi:

- corrente richiesta;
- resistenza del circuito anodico;

- resistenza del circuito della struttura;
- numero di anodi necessari (progettazione in base alla richiesta di corrente ed in base al peso di zinco richiesto);
- tensione totale di esercizio, compresa la polarizzazione del catodo e dell'anodo.

Per una tipica progettazione, il numero di anodi necessario per la protezione deve soddisfare tre diversi requisiti: devono essere sufficienti per polarizzare inizialmente la struttura (densità di corrente iniziale); devono produrre la giusta quantità di corrente durante la vita utile della struttura (approccio basato sul peso); devono produrre la quantità di corrente sufficiente a mantenere la protezione fino alla fine della vita utile della struttura (fattore di invecchiamento).

Uno dei fattori più importanti per la progettazione di un sistema di protezione catodica galvanica per l'acciaio nel calcestruzzo è la densità di corrente richiesta. La richiesta di corrente è stimata in base al contenuto di cloruri nel calcestruzzo e può variare in un intervallo compreso tra 2 mA/m² e 20 mA/m² (in base alla norma ISO 12696:2022 [2]). In assenza di informazioni dirette sulla struttura, la densità di corrente richiesta può essere stimata in base al grafico di Figura 5. Nella scelta della densità di corrente media richiesta, si considerano anche le condizioni ambientali in cui si trova la struttura e la temperatura media dell'ambiente. La determinazione della superficie catodica (superficie dei ferri di armatura) è inoltre necessaria per calcolare la corrente catodica richiesta per mitigare il processo di corrosione.

Gli anodi galvanici per il calcestruzzo esposto all'atmosfera sono tipicamente realizzati in zinco puro. Pertanto, la massa totale di zinco necessaria viene calcolata utilizzando la legge di Faraday (Equazione 1) che prende in considerazione anche il fattore di utilizzo e di efficienza:

$$W = \frac{ARC \cdot CR \cdot L}{E \cdot U} \quad (1)$$

dove si è indicato con: W peso di zinco richiesto (weight); ARC corrente media richiesta (average required current); CR tasso di consumo dello zinco (consumption rate of anode) 11,2 Kg/A/anno; L durata del sistema di protezione (designed life time); E fattore di efficienza (efficiency) 0,9; U fattore di utilizzo (utilization factor) 0,85.

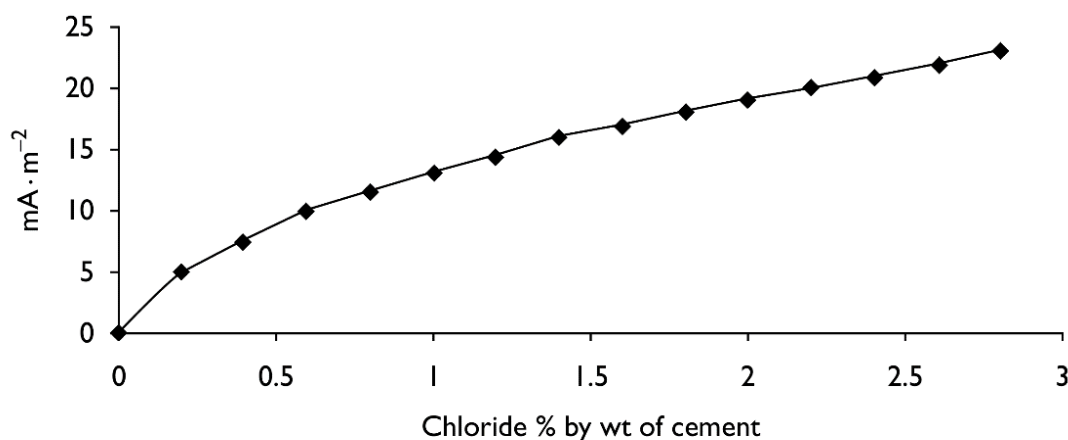


Figura 5: domanda di corrente di protezione catodica rispetto al contenuto di cloruri alla profondità dell'armatura [3].

Infine, il valore ottimale deve essere determinato considerando il numero di anodi, che viene determinato sia con l'approccio basato sulla corrente che con quello basato sul peso. Questi approcci aiutano a garantire che il sistema di protezione catodica fornisca una protezione adeguata, ottimizzando l'uso delle risorse e minimizzando i costi.

Per la progettazione del sistema di protezione catodica galvanica, MAPEI ha sviluppato internamente un software di facile utilizzo, in linea con le specifiche dei prodotti della linea **MAPESHIELD**. Il programma è liberamente utilizzabile per stimare il numero ed il tipo di anodi necessari in base a una serie di dati di input, seguendo la procedura sopra descritta. Tuttavia, il nostro servizio di Assistenza Tecnica ed i nostri esperti specialisti ed ingegneri certificati in protezione catodica sono pronti a fornire qualsiasi supporto tecnico in questo campo.

Il sistema di protezione “catodico galvanico” mediante gli anodi **MAPESHIELD**

Gli anodi della linea **MAPESHIELD**, opportunamente posizionati, consentono di proteggere efficacemente l'armatura metallica da una precoce corrosione. In questo modo è possibile incrementare la durabilità di una struttura aumentandone la sua vita utile. Ogni anodo è in grado di creare un campo di azione all'interno del quale le armature metalliche sono protette.

MAPESHIELD I

Gli anodi **MAPESHIELD I** sono anodi da inserire all'interno del calcestruzzo o della malta da riparazione e sono composti da un'anima di zinco multistrato che garantisce un'elevata superficie di zinco attiva, ricoperta da una speciale pasta conduttiva, che la mantiene attiva ed efficiente nel tempo. È importante sottolineare che l'area superficiale di zinco è un parametro molto importante per il funzionamento del sistema: anodi di piccola dimensione, in termini di superficie di zinco, non sono infatti in grado di polarizzare efficacemente le armature e quindi di proteggerle. Per questo motivo gli anodi **MAPESHIELD I** sono studiati con un'anima multistrato e non con una singola massa di zinco al loro interno. In questo modo è facile dimostrare che a parità di massa di zinco, un'anima multistrato può triplicare o più la superficie attiva rispetto ad una singola massa.

Un altro aspetto che caratterizza ed incrementa il funzionamento degli anodi **MAPESHIELD I** è la pasta di cui sono rivestiti, che è un materiale elettrolitico formato da leganti acrilici a base acquosa, ioni conduttivi, un regolatore di pH ed un materiale riempitivo inerte. Questo materiale innovativo garantisce il funzionamento dell'anodo in ambienti con scarsa umidità ma anche in ambienti alcalini, come il calcestruzzo, in quanto evita la passivazione dello zinco e quindi il malfunzionamento dell'anodo.

Come già accennato, la protezione con anodi galvanici si basa su alcune semplici considerazioni. Nel caso di strutture nuove, è sufficiente applicare una leggera polarizzazione catodica all'interfaccia acciaio/calcestruzzo immediatamente all'inizio della vita di servizio della struttura. In queste condizioni è possibile realizzare una prevenzione dalla corrosione in maniera semplice ed efficace, poiché sono necessarie piccole densità di corrente (pochi anodi da inserire in fase di costruzione).

MAPESHIELD E

Gli anodi **MAPESHIELD E** sono lamine di zinco autoadesivo da applicare direttamente sulla superficie del calcestruzzo nuovo o da recuperare. L'applicazione è semplice e veloce: è sufficiente rimuovere il film di protezione del gel conduttivo e comprimere la lamina sulla superficie di calcestruzzo.

Ogni lamina deve essere collegata mediante connessioni elettriche alle armature metalliche da proteggere.



La sostenibilità di un intervento mediante l'utilizzo di MAPESHIELD.

Al fine di valutare l'impatto ambientale del sistema **MAPESHIELD** è stato effettuato uno studio utilizzando la metodologia LCA (Life Cycle Assessment). Questo metodo permette di valutare l'impatto di un prodotto non solo in funzione del suo utilizzo, ma tenendo conto anche di tutte le sue fasi di vita a partire dall'estrazione delle materie prime necessarie alla sua produzione fino al raggiungimento del suo fine vita, dove il prodotto può essere smaltito in discarica oppure riciclato.

Utilizzando uno specifico software di calcolo che tiene conto dei dati relativi alle fasi di vita, è stato stimato l'impatto sull'ambiente in termini di emissioni di CO₂ equivalente, sia nel caso di interventi di ripristino che di nuove costruzioni.

Nel caso di un intervento di riparazione sono stati posti a confronto due cicli di ripristino, il primo che comprende: l'idroscarifica, la passivazione dei ferri di armatura ed il ripristino con una malta strutturale (Ciclo Rif.1); ed il secondo che prevede, oltre alle fasi già descritte, l'utilizzo di **MAPESHIELD** in alternativa alla tradizionale passivazione dei ferri di armatura (Ciclo 1).

Dal confronto dei risultati, ottenuti tramite apposito programma di calcolo, in termini emissioni di kg di CO₂ equivalente annua, si può affermare che, grazie al notevole incremento di durabilità offerto da **MAPESHIELD** si riduce anche l'impatto ambientale. Infatti, ipotizzando un aumento della vita utile di 15 anni rispetto ad un intervento che non prevede l'applicazione degli anodi sacrificali si ha una riduzione in termini di emissioni di CO₂ equivalente del 27% come mostrato in Figura 6.

Lo studio è stato effettuato anche per le nuove costruzioni andando a confrontare l'impatto derivante da 1 m³ di calcestruzzo armato con Rck 50 (Ciclo Rif.2) privo di qualsiasi tipo di protezione con quello prodotto dal medesimo calcestruzzo protetto attraverso l'applicazione di **MAPESHIELD** (Ciclo 2).

Confrontando i risultati ottenuti dal calcolo per i cicli di nuova costruzione è emerso che allungando la vita del manufatto con l'utilizzo della protezione catodica galvanica si ha una riduzione dell'impatto ambientale. Infatti, ipotizzando un aumento della vita utile di 35 anni rispetto alla realizzazione di un manufatto senza alcun protettivo si ha una riduzione in termini di emissioni di CO₂ equivalente del 41% (Figura 7).

In conclusione, si può affermare che durabilità e sostenibilità sono strettamente correlate, più un intervento è durevole e più è sostenibile. Sia nel caso di un intervento di ripristino, sia nel caso di una nuova costruzione,

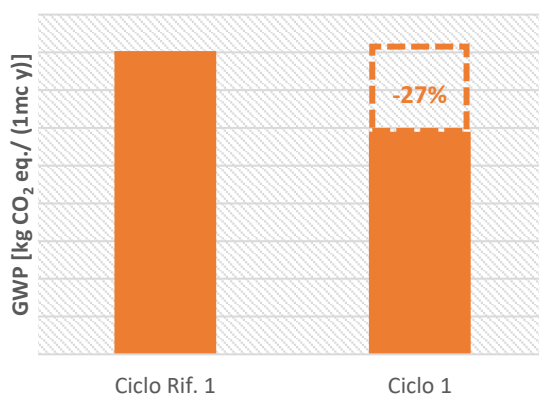


Figura 6: emissioni di kg di CO₂ equivalente per un ciclo di ripristino standard ed uno in cui sono previsti anodi sacrificali.

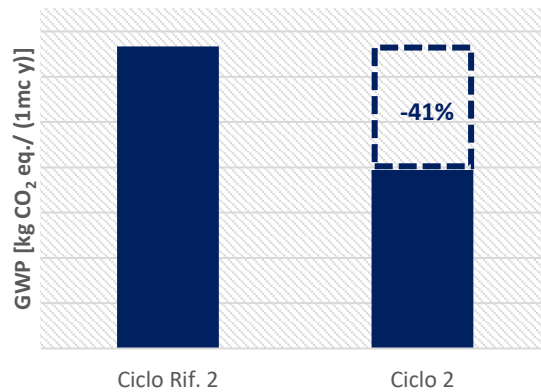


Figura 7: emissioni di CO₂ equivalente per una nuova costruzione senza nessun tipo di protezione e per una struttura in cui è previsto l'impiego di MAPESHIELD.

potendo incrementare la durabilità mediante l'utilizzo di **MAPESHIELD**, si avrà un minore impatto ambientale in termini di kg di CO₂ equivalente annua e di conseguenza una maggiore sostenibilità dell'opera.

Bibliografia

- [1] Scheffy, C. F. (1981). Bridge deck deterioration - A 1981 perspective. FHWA Memorandum, Federal Highway Administration Office of Research.
- [2] ISO, B. (2022). 12696 -2022. Cathodic protection of steel in concrete.
- [3] Broomfield, J. P. (2003). Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair. CRC Press.