

## Protezione catodica del cemento armato, chiave di volta della durabilità delle opere d'arte

*Le opere in cemento armato richiedono una continua manutenzione per non ridurre la loro affidabilità. La protezione catodica può eliminare questo inconveniente; altre soluzioni sempre più avanzate sono nell'agenda della ricerca italiana.*

**(Ing. Eleonora Cesolini)**

### DURABILITÀ DELLE OPERE

Nel passato i materiali ed i tipi di struttura, specialmente quelli impiegati nelle opere pubbliche, avevano raggiunto una elevata durabilità alle azioni di degradazione legate agli agenti più comuni (pioggia, vento, azioni del gelo/disgelo e simili).

Già all'epoca degli antichi romani anche la durabilità ai sismi era elevata. In quanto l'uso sapiente delle strutture ad arco e l'esperienza dei costruttori avevano aumentato le resistenze a queste azioni; l'uso di materiali a comportamento idraulico, come le malte di calce e pozzolana e la protezione particolare dei manufatti (quali i rivestimenti in travertino ed altre pietre durevoli i tetti in cotto ed i collegamenti speciali in bronzo o in piombo) avevano in pratica ridotto al minimo o eliminato i problemi del degrado.

Le opere antiche "cessavano di resistere" o si degradavano per azione dell'uomo stesso: riferendosi ai saccheggi dei materiali delle strutture degli antichi per costruire nuovi palazzi.

Altri degradi avvenivano per terremoti di rilevante energia o per azioni violente quali le piene scalzanti alcune fondazioni di ponti, per non parlare delle guerre moderne e di fatti consimili.

Il punto di forza di queste strutture era l'arco e quest'ultimo resiste per azione della sua pietra di sommità, la "chiave di volta" che, completando l'arco, permette il funzionamento ottimale dei materiali costituenti tutti lavoranti in compressione.

La tecnica italiana più avanzata ha individuato quella che oggi può essere definita in senso figurato la "chiave di volta" della durabilità delle strutture moderne: le possibili protezioni catodiche degli acciai, quell'accorgimento che ne garantisce la durabilità nel tempo.

Le strutture moderne infatti, segnatamente quelle in cemento armato, ma anche quelle in acciaio, hanno proprio in quest'ultimo, che ne permette le prestazioni più ardite, il loro tallone di Achille. L'acciaio infatti come materiale a microstruttura ad energia elevata è soggetto a due fenomeni di deterioramento peculiari:

- la fatica
- la corrosione nelle diverse forme con cui si manifesta.

La fatica si può impedire con opportuni sovradimensionamenti che ne impediscano l'insorgere; Per la corrosione la protezione più nota è quella legata alla verniciatura con film passivanti o altre tecniche simili che impediscono le perdite di materiale per corrosione, ma tutte hanno una loro validità solo se ripetute nel tempo e solo per strutture interamente in acciaio. Per il cemento armato si è creduto per anni di aver risolto il problema con la protezione offerta dalla alcalinità della pasta di cemento, ma quest'ultima si è rivelata non sempre totale e comunque non durevole nel tempo per i noti fenomeni di carbonatazione.

Una soluzione al problema è stata individuata in Italia ed ha già percorso un buon cammino evolutivo specialmente nel campo della terotecnologia di strutture esistenti.

## LA PROTEZIONE CATODICA (PC)

La protezione catodica è una tecnica basata su regole elettrochimiche abbastanza semplici<sup>1</sup> e serve a prevenire la corrosione delle strutture metalliche in qualsiasi ambiente che possa definirsi "elettrolitico" quali l'acqua di mare, il terreno o anche una pasta di cemento che avvolge l'acciaio; essa si può ottenere imprimendo una corrente continua tra un elettrodo, definito anodo ed il metallo che si vuole proteggere, definito catodo. Questo circuito genera l'abbassamento del potenziale dell'elemento metallico e ne riduce o annulla la velocità di corrosione.

Il processo può essere generato in due diverse condizioni:

- se la corrosione è già in atto, la PC ha lo scopo di ridurre l'attività corrosiva fino al suo arresto;
- se la corrosione non è ancora iniziata si può definire una PC preventiva, che ne impedisce l'innesco.

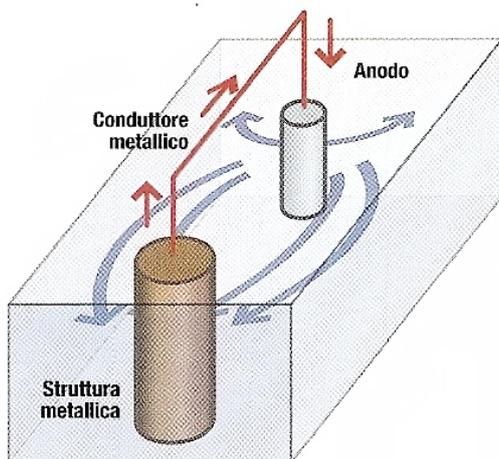


Fig. 1

La protezione catodica può essere attuata in due modi principali:

- sistema a corrente impressa (detta PC attiva<sup>2</sup> – Fig. 1): il metallo da proteggere è portato ad un potenziale elettrico di sicurezza mediante una corrente impressa

<sup>1</sup> Non è una invenzione recente, fu inventata dallo scozzese sir [Humphry Davy](#), che conobbe Alessandro Volta nel 1813 ed i suoi studi gli ispirarono nel 1824 l'installazione di blocchi di ferro alla copertura in rame di una nave, nel primo tentativo di [protezione catodica](#). Il successo fu ampio nella prevenzione della corrosione del rame.

<sup>2</sup> Questa parola può portare a confusioni prestandosi ad equivoci nei confronti della protezione "passiva" ottenuta, come ho detto, con vernici o con altri sistemi di isolamento esterni; in effetti la stessa protezione catodica che abbiamo chiamato PC, può essere di tipo attivo – a correnti impresse – e passivo - di tipo galvanico come spiegato nel testo.

da una Forza elettromotrice (f.e.m.). Il collegamento deve essere tale che il metallo da proteggere si comporti da catodo mentre l'anodo è una diversa parte metallica generalmente destinata a consumarsi (in genere è un anodo insolubile quali ghisa, titanio attivato ecc); nella pratica la f.e.m. è generalmente fornita da un alimentatore in corrente continua adeguato allo scopo (può essere usato anche un pannello ad energia solare);

- accoppiamento galvanico (detta PC passiva - Fig. 2): il metallo da proteggere (che deve sempre assumere la funzione di catodo) è collegato ad un metallo di tipo diverso e più elettronegativo che funga spontaneamente da anodo sacrificale (seguendo questa tecnica, il ferro da proteggere deve essere collegato con l'alluminio, lo zinco o il magnesio); ambedue sono immersi nell'elettrolita. L'anodo sacrificale è destinato al progressivo consumo nel tempo e può essere necessaria la sua sostituzione periodica.

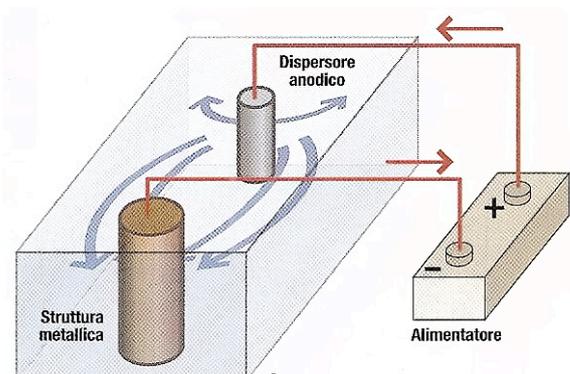


Fig. 2

Le applicazioni della protezione catodica non sono solo di uso recente; come abbiamo accennato sono ampiamente in uso però in campi diversi da quello edilizio. Si applica correntemente per strutture di alto pregio o soggette ad azioni di degrado "pericolose" come oleodotti o piattaforme off shore, ma anche ad opere minori, quasi sempre in acciaio.

Un' applicazione tradizionale della protezione catodica è quella per le superfici esterne di tubazioni o cisterne in acciaio interrate o immerse in acqua di mare.

La PC ancorché nota, risulta una novità nel settore del cemento armato di ponti e viadotti.

Malgrado ciò, come sempre l'Italia è stata antesignana nel settore per le applicazioni sui ponti e questo in due tempi, nel recente passato con applicazioni di PC attiva ed oggi con lo sviluppo di sistemi di PC passiva estremamente efficienti.

### PC ATTIVA AD ANODO DIFFUSO

Le azioni sono cominciate negli anni '90 applicare questo tipo di protezioni a scopo sperimentale su due tipi di opere che coprivano la gamma delle tipologie di ponte da proteggere in uso in Italia:

- alcune opere esistenti, già con processi corrosivi in atto e presenza di correnti vaganti;
- opere nuove da proteggere dagli inneschi, con forte presenza di parti precomprese.

Occorre ricordare che un importante parametro (ma non l'unico e non necessariamente il più rilevante) strettamente legato all'aggressività dell'ambiente di posa è la resistività elettrica (un parametro che informa sulla difficoltà o meno con cui le cariche migrano nell'ambiente elettrolitico). Un ambiente a minore resistività è in genere più aggressivo. Il costo complessivo di una soluzione di protezione catodica attiva nel calcestruzzo avrebbe potuto all'epoca sembrare non conveniente, visto che in Europa si operava su strutture già protette (vedi Fig. 3a). La forte protezione passiva (da isolanti) delle strutture europee specialmente nelle solette facevano pensare questo in rapporto alla maggior convenienza dei ponti USA dove le protezioni tradizionali erano al minimo (Fig. 3b) e che avevano già sviluppato protezioni catodiche attive (nonché le reti al titanio attivate<sup>3</sup>, all'epoca prodotte solo in quel paese vedi Fig. 4).

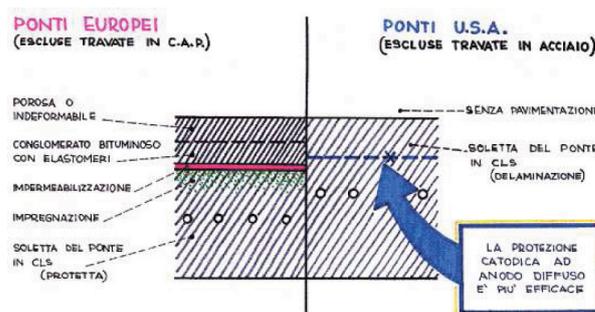


Fig. 3a

Fig. 3b

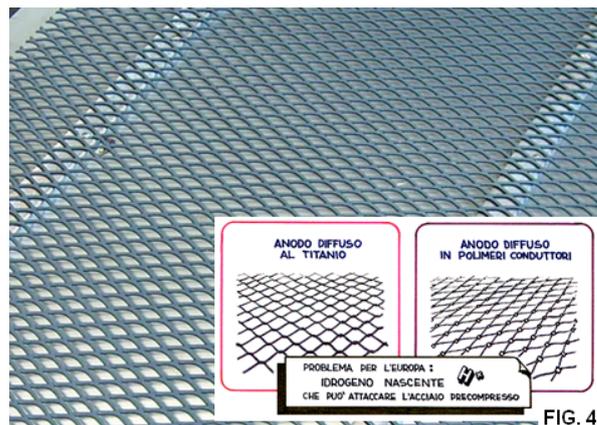


FIG. 4

Un adeguato rivestimento isolante riduce infatti sensibilmente l'esposizione della superficie all'aggressività dell'ambiente. Il rivestimento, costituito da materiale dielettrico, ha anche l'importante proprietà di aumentare l'isolamento elettrico complessivo della struttura rispetto all'ambiente, riducendo la corrente necessaria per rendere catodica la struttura e, conseguentemente, i costi di esercizio della protezione. Pertanto, in generale la protezione catodica sembrava utile, su strutture già dotate di protezione passiva, solo per inibire fenomeni corrosivi in corrispondenza dei difetti del rivestimento, dove il metallo è direttamente esposto all'ambiente.

La scelta dell'epoca superò queste posizioni perché, nel caso di ponti esistenti sull'A1 la PC attiva permise di interrompere il processo di corrosione già in atto e quindi rese conveniente comunque la protezione perché le verniciature non possono dar luogo a questi effetti.

Nel caso di opere nuove il problema tecnologico era diverso e richiedeva minori energie per la protezione. Nella struttura del ponte erano presenti molte parti precomprese e la PC attiva può dar luogo a

<sup>3</sup> L'attivazione dell'anodo in titanio consiste in un sottile film di rivestimento applicato sul supporto di titanio che ne assicura una lunga durata. Una variante moderna è quella dell'ossido ceramico di metallo (MMO) espressamente formulato per ciascun tipo di impiego e provato per lungo tempo a densità di corrente particolarmente elevate per assicurare un prodotto di alta qualità. Questo tipo di rivestimento ceramico ottenuto da ossidi metallici di iridio, tantalio e titanio, consente all'anodo una ottimale percentuale di dissoluzione tra le più alte oggi disponibili.

produzione eccessiva di idrogeno nascente  $H^+$  che può infragilire l'acciaio sotto tensione dei precompressi (sempre Fig. 4). Per questo motivo il sistema di protezione (vedi Fig. 5) è stato dotato di un circuito di protezione che interrompe il processo solo se ci sono sovra produzioni di  $H^+$ . In questo modo era nata in Italia la PC per le strutture in cemento armato precompresso.

#### PC PASSIVA CON ANODO DI SACRIFICIO

Oggi la tecnica italiana ha raggiunto una maggior semplicità e per questo si sta diffondendo. Si tratta della PC passiva o galvanica; come si è visto si tratta di polarizzare catodicamente le armature accoppiando i ferri di armatura con degli anodi sacrificali per esempio di zinco, che grazie al loro potenziale più negativo proteggono i ferri lasciandoli liberi dai prodotti della corrosione. Nel caso di strutture inquinate da cloruri, la corrente provoca anche un aumento di pH e l'allontanamento dei cloruri eventualmente giunti ai ferri, favorendo la formazione del film passivo. Nel caso di calcestruzzo carbonatato che è il più frequente in opere ben fatte, ma che hanno più di 30 anni di età, la corrente provoca semplicemente l'aumento del pH che può essere portato da 9 (condizione di carbonatazione) a 12-13, valori che permettono il passaggio delle armature da uno stato di perdita di ioni, a uno di passività. Ciò che cambia nei due casi è la densità di corrente necessaria per la protezione/prevenzione catodica.

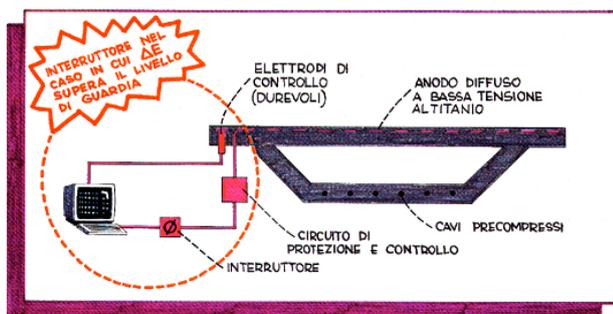


Fig. 5

Per strutture vecchie e degradate, questa è compresa tra 5 e 20  $\text{mA}/\text{m}^2$ , mentre quella per la prevenzione di strutture nuove tra 0,2 e 2  $\text{mA}/\text{m}^2$ . Nel primo caso,

essendo le armature molto attive, ci sarà una domanda di corrente iniziale ai valori più elevati che si riduce ad erogazioni più contenute e costanti (nell'ordine di 4-5  $\text{mA}/\text{m}^2$ ), non appena raggiunto uno stato di passività (dopo alcuni mesi dal momento dell'installazione).

Questo significa che un grande vantaggio della protezione catodica galvanica è quello di autoregolarsi a seconda della reale necessità di corrente che richiede l'armatura nel tempo.

La durata degli elettrodi sacrificali nel caso di opere molto danneggiate è dell'ordine di una ventina di anni. Naturalmente per opere nuove dove il fenomeno di corrosione o di carbonatazione non è innescato le correnti necessarie scendono e la durata degli elettrodi aumenta fino a più di 40 anni.

Questo "inconveniente" della durata limitata nel tempo è ovviabile in quanto la protezione può essere rinnovata senza sforzi eccessivi; del resto anche nella protezione attiva l'anodo ha una sua durata, in relazione alla corrente che lo percorre.

Questa Protezione Catodica passiva è quindi la più promettente in quanto di semplicità estrema e senza controindicazioni in quanto si basa, negli usi sviluppati e con una base di esperienze, sull'impiego di anodi di Zinco puro rivestiti da una pasta conduttiva, da collegare alle strutture in acciaio dell'opera sia per il ciclo di ripristino (Fig. 6) ma anche per prevenire il problema nelle strutture di nuova realizzazione (Fig. 7).



FIG. 6

Gli elettrodi sono semplici e facili da installare, assicurano protezione di lunga durata e comunque l'intervento può essere dimensionato secondo esigenze tecniche ed economiche, con la possibilità di interventi selettivi in aree particolarmente a rischio di corrosione.



FIG. 7 ANODO ALLO ZINCO OPERE NUOVE

Gli anodi sacrificali possono anche essere forniti in lamine autoadesive da applicare all'esterno della massa di calcestruzzo. Un esempio di applicazione su vasta scala è costituito dalle pile del viadotto Sfalassà sulla Salerno Reggio Calabria (Fig. 8).



FIG. 8 PILA VIADOTTO SFALASSA'

## CONCLUSIONI

Ad oggi per le strutture in cemento armato la protezione attiva non è molto praticata, mentre quella passiva sta avanzando presso le amministrazioni più lungimiranti.

In effetti la protezione catodica attiva richiede obiettivamente una organizzazione scientifica e manutentiva delle aziende di gestione della strada abbastanza elevata ed attenta. Quella di tipo passivo o galvanico invece è molto più semplice.

La sua diffusione è quindi un punto di forza qualificante per chi voglia incidere sull'affidabilità delle strutture come testimoniano le prime applicazioni importanti (Viadotto Sfalassà).

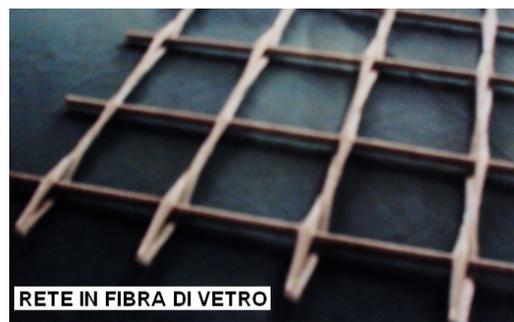
Naturalmente l'applicazione sistematica delle protezioni catodiche anche alle strutture di proprietà diretta degli enti stradali darebbe, con una spesa molto contenuta tranquillità e affidabilità nel tempo molto superiore all'attuale.

Intendiamoci, non è che con la PC tutto è risolto, la manutenzione non morirà mai perché permangono sempre le "distruzioni" collaterali a quelle della corrosione e poi c'è sempre in agguato l'obsolescenza funzionale, ma con la PC ci si potrebbe concentrare su di esse, tranquilli che la struttura non cederà.

## FUTURO

Intanto si avanza, per le opere future, un'altra soluzione di "eccellenza": le armature del cemento armato in fibra di vetro. Questi "ferri", incorruttibili rendono inutile la protezione catodica ed inesistente la corrosione tradizionale. Tra l'altro il vetro ha come materia prima la silice che è qualcosa di molto diffuso in natura.

I tempi sono maturi e le nuove barre, già usate per l'armatura dei conci di rivestimento delle gallerie idrauliche e metropolitane, stanno superando le analisi più critiche: quelle dalla duttilità, necessaria per resistere alle azioni dinamiche dei terremoti. Siamo a buon punto e probabilmente ne parleremo come realtà diffusa al prossimo Congresso Mondiale della Strada.



RETE IN FIBRA DI VETRO

Fig. 9