

Prevenzione catodica delle armature nel calcestruzzo: il panorama internazionale

Questa memoria è stata presentata al convegno: Pietro Pedefferri e la scuola di corrosione e protezione dei materiali al Politecnico di Milano Milano, 26-27 settembre 2013

La fondamentale applicazione della "prevenzione catodica" delle armature nel calcestruzzo è stata ideata e sviluppata dal Professor Pietro Pedefferri. Venne applicata con successo fin dal 1989 in Italia nel Viadotto San Nicola I della Roma - L'Aquila - Teramo e nel 1996 nella passerella occidentale della Sidney Opera House. Negli ultimi 20 anni si è diffusa nel mondo ed in particolare in Nord Europa, Medio Oriente ed Australia venendo riconosciuta come la più affidabile tecnica di lotta alla corrosione per nuove costruzioni e infrastrutture in calcestruzzo armato esposte a possibile contaminazione da cloruri. Questa memoria è una rassegna di alcuni dei più significativi casi industriali riportati nella letteratura internazionale. Durrat Al Bahrain ed il cantiere navale di NAKILAT in Qatar sono due recenti opere realizzate in Medio Oriente. La Prevenzione Catodica del Swanson Dock West a Melbourne è stato il più grosso progetto completato in Australia nell'ultimo decennio. Altre significative esperienze in Cina e Nord Africa sono un segno di vitalità di questa tecnica nei paesi emergenti.

INTRODUZIONE

La "prevenzione catodica" è stata ideata dal Prof. Pietro Pedefferri nel corso degli anni '80 ed ha costituito una fondamentale novità per la protezione delle armature di acciaio al carbonio nel calcestruzzo [1]. Mentre Stratfull, pioniere dell'applicazione della protezione catodica alle armature del calcestruzzo armato negli anni '50, portava l'acciaio in condizioni di immunità termodinamica e Marcel Pourbaix nel 1972 introdusse il concetto di "protezione per passività perfetta" [2,3], Pedefferri realizzò che si poteva portare e mantenere il materiale passivo ad operare nella zona della "passività imperfetta" già definita dallo stesso Pourbaix.

L'acciaio al carbonio nel calcestruzzo in ambiente a pH superiore a 11 si trova in condizioni di passività. Le cause che possono portare a corrosione sono l'abbassamento del pH per effetto della carbonatazione o la presenza di cloruri liberi in tenori superiori mediamente a 600 ppm che distrugge il film di passività e causa condizioni favorevoli all'innesco di corrosione per pitting. Le condizioni di corrosione e protezione sono riassunte in Figura 1, il celebre "Diagramma Pedefferri" che prende il nome dal suo inventore [4].

Se le condizioni di potenziale e contenuto di cloruri ricadono nella zona (A) si ha innesco e propagazione di pitting (se è possibile il processo catodico di riduzione dell'ossigeno); la protezione è possibile nella zona (B) se il pitting non è iniziato e in quella (C) per bloccare il pitting già innescato.

La corrosione non si innesca finché il potenziale, E , è mantenuto al di sotto di E_{pit} che è la soglia di potenziale oltre la quale il pitting si innesca. Mediante la circolazione di una piccola corrente catodica, la prevenzione catodica (PrevC) mantiene il potenziale delle armature passive al di sotto di E_{pit} e quindi impedisce l'innesco della corrosione anche per alti tenori di cloruri.

di

S. Tremolada

Industrie De Nora S.p.A.
20134 Milano

Figura 1 - Il primo "Diagramma Pedeferrì" che rappresenta le condizioni di corrosione delle armature del calcestruzzo in funzione del potenziale e del contenuto di cloruri.

Nella PrevC le armature passive sono polarizzate catodicamente fin dalla loro messa in opera di modo che la struttura risulti protetta anche se i cloruri raggiungono concentrazioni elevate alla superficie delle armature nel corso della vita della struttura. Questo può accadere ad esempio sulle solette dei ponti dove sono sparsi sali anti-gelo o nella zona degli spruzzi di una struttura marina.

La PrevC consente di applicare una piccola quantità di corrente catodica e risulta essere la soluzione più ecocompatibile per la manutenzione preventiva di strutture nuove in calcestruzzo armato soggette a potenziale contaminazione da cloruri. Infatti il quantitativo di energia utilizzato, 0,04 GJ/m² per l'installazione e 0,002 GJ/m² all'anno per l'alimentazione, è superiore a quello di un comune coating cementizio o acrilico (rispettivamente 0,015 GJ/m² e 0,025 GJ/m²), che hanno però una durata molto inferiore e richiedono periodici lavori di manutenzione [5].

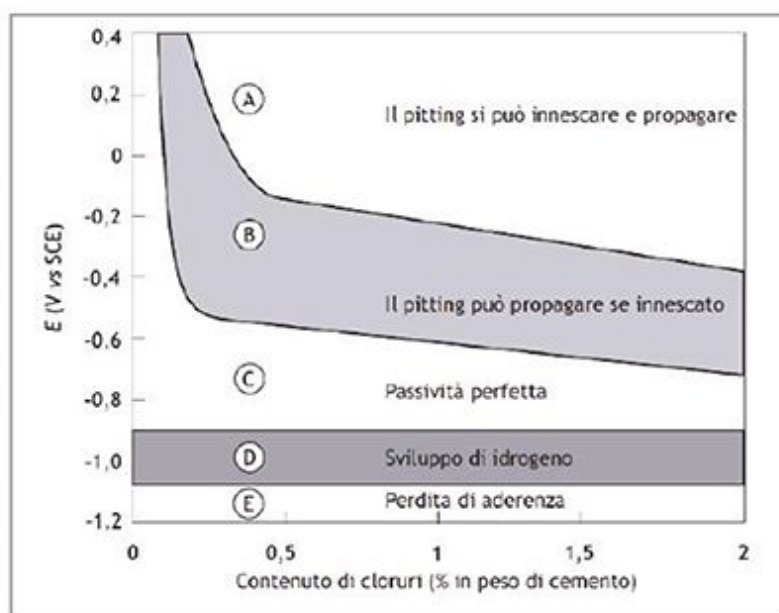
Dal 2000 è disponibile uno standard europeo che nel 2012 è stato revisionato e pubblicato come norma ISO 12696:2012 [6] valida a livello mondiale, nel cui ANNEX A "Principles of cathodic protection and its application to steel in concrete" si fa ampio riferimento ai lavori del Prof. Pedeferrì ed al concetto di prevenzione catodica.

PRIME APPLICAZIONI IN ITALIA

Viadotto San Nicola I

Questa tecnica fu applicata per la prima volta in Italia nel 1989. Il sistema fu installato sulla carreggiata sinistra del viadotto San Nicola I sull'autostrada Roma - L'Aquila - Teramo (A24) [7]. Dal momento che si trova nelle vicinanze della catena montuosa del Gran Sasso è soggetto a contaminazione da cloruri per le grandi quantità di sali anti-gelo utilizzate.

Il viadotto è una struttura continua composta da 11 campate per una lunghezza totale di 447,2 m. L'ampiezza della carreggiata sinistra è di 12,5 metri. La superficie totale di cemento da proteggere era di 5600 m². La soletta del ponte è composta di segmenti di cemento prefabbricato post-tensionato con cavi di acciaio ad alta resistenza. La presenza di acciaio ad alta resistenza, suscettibile ad infragilimento da idrogeno, ha reso necessario particolari cautele per la realizzazione della prevenzione catodica. Il potenziale dell'acciaio non doveva essere in nessun punto più negativo di -900 mV (SCE) dal



momento che in ambienti alcalini (pH > 12) l'evoluzione di idrogeno può avvenire solo a potenziali più negativi di -950 mV (SCE). Questo ha reso la progettazione ed il monitoraggio molto importanti e strettamente dipendenti dalla struttura al fine di ottenere e verificare una distribuzione di corrente il più possibile uniforme.

In particolare sono stati adottati alcuni accorgimenti:

- la determinazione della quantità di rete di titanio attivata con ossidi di metalli misti usata come anodo fu basata sulla necessità di proteggere le armature ad una profondità di 40 cm assumendo una densità di corrente di protezione richiesta di 10 mA/m². Dal momento che la distribuzione delle armature nel cemento non è in genere omogenea vennero usate combinazioni di rete singola, doppia e tripla per adattare l'erogazione di corrente anodica alla densità delle armature.
- le zone anodiche sono state definite di ridotte dimensioni (circa 100 m²) per controllare la corrente su piccole aree della struttura. La rete anodica in ogni zona è stata saldata con 4 distributori di corrente (solitamente se ne usano 2) per ridurre la caduta ohmica nell'anodo a meno di 50 mV e favorire uniformità di erogazione di corrente anodica.
- Sono state installate celle di riferimento affidabili e stabili, titanio attivato e argento/cloruro d'argento, vicino ai cavi di acciaio e alle armature con la distribuzione di corrente più critica.
- È stato installato un sistema di controllo remoto in grado di regolare la corrente e di registrare i dati operativi.

Il sistema fu energizzato nel luglio del 1990 con una densità di corrente media di 6 mA/m². Il voltaggio del trasformatore fu

La prevenzione catodica delle armature nel calcestruzzo - tecnica inventata e messa a punto da Pietro Pedefferri - fu applicata per la prima volta in Italia nel 1989 sul viadotto San Nicola I sull'autostrada A24 Roma - L'Aquila - Teramo

circa 0,7/0,8 Volt dopo 24 ore. Le cadute ohmiche in ogni zona non superarono i 50 mV alla massima corrente di progetto con una polarizzazione media di 200 mV. I cavi tensionati avevano potenziali molto più positivi di -900 mV (SCE).

Viadotti A32 Torino-Bardonecchia-Frejus

Nei primi anni '90 la prevenzione catodica fu applicata su entrambe le carreggiate di otto viadotti post-tensionati dell'autostrada A32 Torino-Bardonecchia-Frejus per un totale di 100000 m² di superficie [8]. L'autostrada si trova sul versante italiano delle Alpi Occidentali ed in quest'area i sali antigelo vengono usati copiosamente durante la stagione invernale. La prevenzione catodica fu installata per prevenire corrosione indotta da cloruri sui ponti e sugli spartitraffico "New Jersey".

I principi fondamentali della progettazione furono fissati come segue:

- Prevenire la corrosione delle armature del ponte fino ad una profondità massima di 400 mm;
- Evitare la sovra protezione dei tiranti in acciaio ad alta resistenza;
- Ottenere una vita di progetto di 50 anni.

I sistemi anodici selezionati per questo progetto furono le reti e i nastri di rete in titanio attivato. Gli anodi furono installati principalmente in cantiere durante la costruzione dei segmenti prefabbricati e parzialmente sulla soletta del ponte dopo la costruzione. Il sistema di alimentazione venne progettato per fornire una densità di corrente di protezione massima di circa 10 mA/m², riferita alla superficie dell'acciaio. La massima densità di corrente di progetto ammessa nel cemento è 110 mA/m².

In coincidenza con l'apertura al traffico autostradale il sistema di prevenzione catodica fu energizzato nella primavera del 1993 con una densità di corrente di protezione iniziale di 2 mA/m². L'efficacia della prevenzione catodica è stata verificata con il criterio della depolarizzazione catodica di 100 mV in 4 h (mentre per ottenere la completa depolarizzazione in caso di protezione catodica sono necessarie 24 ore). In realtà trattandosi di strutture nuove sono state ottenute depolarizzazioni superiori ai 150 mV in 4 h. Il potenziale misurato con le sonde argento/cloruro d'argento è sempre stato rilevato di 500 mV superiore alla soglia critica per l'evoluzione di idrogeno. In fase di progetto le cadute ohmiche nelle reti di titanio sono state mantenute sotto i 100 mV alla massima corrente di alimentazione per evitare locali condizioni di sovra protezione.

PROGETTI IN AUSTRALIA

In Australia la prevenzione catodica è stata utilizzata principalmente per proteggere dalla corrosione elementi strutturali di ponti e infrastrutture localizzati nella zona delle maree o in quella degli spruzzi.

Sydney Opera House

Il più celebre di questi progetti di prevenzione catodica riguarda la passerella occidentale della Sydney Opera House [9]. La corrosione delle armature indotta da cloruri aveva causato problemi di deterioramento di alcuni elementi della sottostruttura. Nell'ambito di un ambizioso programma di ristrutturazione nel 1996 fu installato il primo sistema di prevenzione catodica nel territorio australiano per bloccare la corrosione degli elementi strutturali (moli e intradosso) e per migliorare la resistenza alla corrosione delle armature dei nuovi elementi in cemento prefabbricato che avrebbero potuto essere interessati da futura contaminazione da cloruri.

La struttura fu suddivisa in 68 zone separate elettricamente sulla base della geometria degli elementi e delle diverse condizioni ambientali di esposizione: zona delle maree, sommersa e atmosferica. Questa minuziosa suddivisione si rese necessaria per garantire uniforme distribuzione di corrente, evitare correnti vaganti e assicurare che eventuali corto circuiti potessero essere facilmente individuati ed eliminati durante la fase di costruzione. Il materiale anodico più appropriato fu ritenuto il LIDA® GRID per la flessibilità che consente nella progettazione ed installazione con spaziature differenti per soddisfare le diverse densità di corrente di protezione richieste nella struttura. Per la protezione degli elementi sommersi furono utilizzati tondi di titanio attivati con ossidi di metalli misti immersi in acqua.

L'area totale di applicazione della prevenzione catodica (elementi in cemento prefabbricato) fu di 742 m² per una corrente di progetto di 10 A adottando una densità di corrente di progetto di 10 mA/m². Le armature furono saldate per assicurare continuità elettrica e l'assieme di anodo e distanziatori in cemento fu fissato alla gabbia delle armature usando delle fascette di plastica con una spaziatura di 250 mm. Per ogni elemento di cemento prefabbricato i distributori di corrente in titanio furono saldati a punti agli anodi e vennero realizzate le connessioni dei cavi alle armature. Gli elettrodi di riferimento furono fissati alle armature per mezzo di fasce di plastica. Furono condotte prove di continuità sulle armature e test per accertare l'assenza di corto circuiti prima, durante e dopo la colata di cemento. Il sistema di monitoraggio conteneva un totale di 80 elettrodi di riferimento:

argento/argento cloruro e elettrodi di titanio attivato nel cemento; elettrodi di zinco nell'acqua di mare. Per le zone atmosferica e degli spruzzi fu utilizzato come criterio di protezione il criterio dei 100 mV: "le armature immerse nel calcestruzzo sono da ritenere protette se il loro potenziale subisce una variazione nelle prime 24 h di almeno 100 mV, a partire dal valore misurato nell'istante dell'interruzione di corrente" (come descritto nello standard ISO [6]).

Per gli anodi immersi in acqua fu utilizzato il criterio di un potenziale con corrente applicata dell'acciaio più negativo di -900 mV e superiore ai -1100 mV (rispetto a $Ag/AgCl/0,5M\ KCl$) secondo lo standard AS2832.5 [10].

Il sistema computerizzato di controllo era in grado di limitare la corrente ed il voltaggio massimi per ogni zona e di regolarli in continuo per ottenere il potenziale off istantaneo desiderato.

Il sistema di prevenzione catodica fu attivato nel maggio del 1996. I dati di funzionamento dopo 30 mesi dimostrarono che il sistema funzionava molto efficacemente mantenendo tutte le strutture in condizioni di protezione e con potenziali molto lontani dalle condizioni di sovra protezione nei telai a forma di A (dove era installato dell'acciaio post-tensionato). Nel 2004-2005 fu effettuata un'accurata ispezione del sistema a quasi 10 anni dall'installazione [11] incrociando i dati registrati ogni 6 mesi dal sistema di monitoraggio con rilevazioni manuali con una sonda portatile $Cu/CuSO_4$. Non è stato riscontrato deterioramento visibile del sistema, scheggiatura o delaminazione del cemento negli elementi dove la prevenzione catodica è installata. Le letture con la sonda portatile hanno confermato che ogni elemento prefabbricato riceveva corrente di protezione. Tutti i componenti del sistema erano ancora in buono stato e funzionanti inclusi i trasformatori che hanno richiesto la sostituzione di alcune schede elettroniche. Solo il 17% delle celle di riferimento, soprattutto $Ag/AgCl$, sono state trovate instabili e sono state escluse dai test futuri. I potenziali off istantanei rilevati erano al di sotto del livello a cui può avvenire l'evoluzione di idrogeno. Gli alimentatori sono sempre stati utilizzati a voltaggio costante. Questa è la modalità più sicura per utilizzare la prevenzione catodica con strutture contenenti acciaio pre-tensionato in quanto è possibile limitare il voltaggio operativo massimo.

La densità di corrente operativa effettiva è risultata essere compresa tra 2 e 5 mA/m^2 .

Swanson Dock West Melbourne

Swanson dock è il principale porto container di Melbourne con due banchine, East e West, ciascuna lunga circa 1 km [12]. Swanson Dock West fu costruito in diversi stadi tra il 1974 e il 1988 con posti d'anco-



Figura 2 - Swanson Dock West ha 4 posti di ancoraggio ed è lungo circa 1 km.



Figura 3 - Le due banchine West (a sinistra) e East (a destra) del porto container di Melbourne.

raggio molto differenti fra loro per il tipo di costruzione e le condizioni ambientali.

A Swanson Dock Melbourne sono stati installati tre principali sistemi di protezione catodica nel 2008-2009:

- Travi trasversali nella zona delle maree nei punti di ancoraggio 3 e 4, utilizzando anodi interni in zone che proteggono la sezione della trave esposta alla marea e all'atmosfera;
- Sezioni delle travi del nuovo sistema parabordò nei punti di ancoraggio 1 e 2 utilizzando come anodi nastro di rete di titanio attivato con ossidi di metalli misti;
- Sistema da 3500 A con anodi immersi in acqua per proteggere le travi in cemento nella zona delle maree e le palificazioni in acciaio sommerse.

La tecnica della prevenzione catodica è stata applicata nel secondo sistema dove è stato approntato un impianto pilota al fine di validare o modificare il progetto prima dell'installazione su larga scala. Le sezioni delle travi del parabordò nei punti di ancoraggio 1 e 2, lungo circa 500 m, erano pesantemente contaminate da cloruri con molti fenomeni di fessurazione e scheggiatura. Il parabordò è collocato circa mezzo metro al di

sopra del livello dell'alta marea. Era necessario installare un nuovo sistema parabordi per le navi e per questa ragione era necessario rinforzare le travi per sopportare i relativi carichi. Nel procedere ad un'opera di ricostruzione delle travi si decise di incorporare un sistema di prevenzione catodica. A causa dei limitati stanziamenti economici si decise di procedere alla ricostruzione solo in 30 punti, ciascuno di una lunghezza di 3,5 m, proteggendo fino ad un'altezza di 0,5 m dalla base della trave.

Il progetto preliminare prevedeva di utilizzare come anodi nastri di titanio attivato con ossidi di metalli misti installati su distanziatori isolanti, le cui quantità sono state calcolate assumendo conservativamente una densità di corrente di protezione di 20 mA/m² di acciaio. Gli anodi sono stati installati per tutta la lunghezza della sezione (3,5 m), due anodi su ogni lato e tre sulla base per proteggere la trave dalla base ad un'altezza di 0,5 m. Il primo dei 30 punti è stato usato come impianto pilota (Figure 4 e 5).



Figura 4 - Il progetto iniziale prevedeva due anodi installati longitudinalmente per ogni lato della trave.

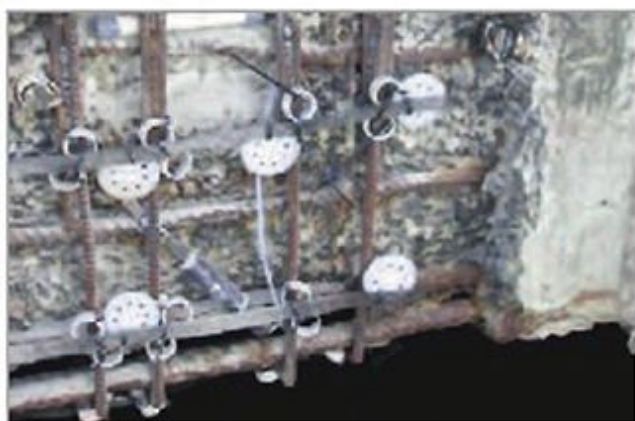


Figura 5 - La parte finale della sezione da 3,5 m con un elettrodo di riferimento impiantato a 0,5 m dalla base

La sezione è stata riparata con gunite applicata con aria compressa ed il cemento ha subito una maturazione di 28 giorni prima dell'avviamento del sistema di prevenzione catodica. Il monitoraggio è stato completato impiantando nel cemento due celle di riferi-

mento, una posta al livello di 0,5 m dalla base. È stata anche eseguita una mappatura di potenziale con una sonda esterna nei punti di una griglia di lato 250 mm.

Dopo aver energizzato il sistema per tre giorni alla massima corrente di progetto di 132 mA è stato eseguito un test di depolarizzazione per 24 ore. L'impianto pilota non ha raggiunto il criterio dei 100 mV con una depolarizzazione media di circa 55 mV e con depolarizzazioni di 35 mV e 64 mV rispettivamente per i due elettrodi di riferimento incorporati nel calcestruzzo. Essendo i risultati chiaramente insoddisfacenti l'impianto è stato nuovamente energizzato per un periodo di 10 giorni con i risultati seguenti:

- In 24 ore solo il 40% dei punti della griglia ha raggiunto i 100 mV di depolarizzazione con il 58% dei punti che hanno realizzato più di 90 mV.
- La variazione di potenziale negativa dal potenziale naturale risultava essere molto soddisfacente con più del 97% dei punti che avevano una variazione superiore ai 150 mV.
- Approssimativamente il 50% dei punti della griglia ha raggiunto il criterio di potenziale assoluto (inferiore a -720 mV Ag/AgCl/ 0,5 M KCl come previsto dallo standard ISO [6]). Alle estremità della zona da proteggere non è stato soddisfatto questo criterio.
- Dopo una polarizzazione di 72 ore il 90% dei punti della griglia aveva raggiunto una depolarizzazione di 100 mV ma in generale non alle estremità della zona da proteggere. Questo criterio esteso è previsto dallo standard australiano per la protezione catodica dell'acciaio nel calcestruzzo AS 2832.5 2008 [10]

Risultò chiaro che la velocità di depolarizzazione era molto lenta nella trave di cemento ricostruita, probabilmente a causa della gunite densa e secca e del fatto che il cemento era stato applicato da meno di due mesi. Tuttavia anche considerando il periodo di depolarizzazione esteso a 72 h, circa il 10% dei punti della griglia e uno degli elettrodi di riferimento incorporati nel calcestruzzo non hanno soddisfatto il criterio dei 100 mV di depolarizzazione. Si è inoltre notato che le aree non protette erano alle estremità della zona, alla fine della trave lunga 3,5 m e nella parte più alta (a 0,5 m di quota dalla base).

Fu pertanto deciso di modificare il progetto aggiungendo anodi aggiuntivi. Fu aggiunto un nastro di titanio attivato a base di ossidi di metalli misti per ogni lato della trave, a 500 mm dalla base ed un anodo trasversale ad ogni estremità della sezione lunga 3,5 m.

Con questo nuovo progetto vennero installati gli anodi in tutte e 30 le aree da ricostruire. Le aree furono raggruppate in zone

a gruppi di cinque, per un totale di sei zone. La capacità totale risultò essere di 30 A e fu prevista una possibile espansione del sistema ad altre sezioni. Il sistema di prevenzione catodica fu messo in funzione nel 2009 con sufficiente polarizzazione delle armature e soddisfacendo pienamente il criterio della polarizzazione dei 100 mV.

PROGETTI IN MEDIO ORIENTE

Durrat Al Bahrain

Durrat Al Bahrain, la Perla Nascente, è una lussuosa città costruita su tredici isole artificiali nel mare prospiciente la costa meridionale del Bahrain (Figura 6). Sulle isole sono in costruzione più di 2000 ville, 3000 appartamenti, hotel di lusso e ristoranti. Le isole sono collegate fra loro da 13 ponti per una lunghezza totale di 3,5 km. I ponti furono progettati in origine con armature in acciaio inossidabile, ma per motivi economici si è preferito optare per normale acciaio al carbonio, utilizzando la prevenzione catodica come tecnica per aumentare la durabilità delle strutture [13]. Infatti a causa dell'alta temperatura, dell'umidità e dei cloruri trasportati dall'aria il clima del Bahrain costituisce uno degli ambienti più corrosivi del pianeta per le armature del calcestruzzo. I ponti sono stati costruiti solo 2 m al di sopra delle acque calde ed estremamente saline (37-39 g/L) del Golfo Persico con una vita di progetto di 50 anni. Per raggiungere questo traguardo sia l'acciaio inossidabile che l'uso di armature convenzionali con l'applicazione della prevenzione catodica sono considerati adeguati, ma la seconda soluzio-

ne ha portato ad una notevole riduzione dei costi, in quanto il costo dell'intero sistema di prevenzione catodica è stato stimato in 2130000 USD, contro un incremento di costi previsto per l'utilizzo di acciaio inossidabile pari a oltre 22 Milioni di dollari americani.

I parametri di progetto del sistema di prevenzione catodica sono riportati in Tabella 1.

Vita attesa di progetto	50 anni
Tipo di anodo	Nastro di titanio attivato MMO
Densità di corrente catodica	5 mA/m ²
Densità di corrente anodica Max	110 mA/m ²
Criterio Protezione	Depolarizzazione 100 mV o -720 mV vs. Ag/AgCl
Max dimensione zona	3°
Sistema di controllo	Completamente sorvegliato e controllato da remoto

Il sistema di prevenzione catodica fu basato su nastri di titanio attivati con ossidi di metalli misti installati nella gabbia d'armatura prima della colata di cemento. I ponti che andavano protetti sono riportati in Tabella 2. Per ogni ponte sono state considerate per la protezione le aree seguenti: le armature

Nome	Lunghezza	Totale N°
Atoll Bridges	162 m	6
Hotel Bridge	680 m	1
Ring bridges	518 m	2
Ring bridges	210 m	4

Tabella 2

all'interno della soletta del ponte che sono esposte all'acqua o all'atmosfera; le sezioni



Figura 6 - Durrat Al Bahrain

delle spalle esposte all'atmosfera; l'area esposta dei piloni che si estende tra le fondazioni in acciaio e la travatura.

Le gabbie di armatura costituiscono la parte negativa, catodica del circuito del sistema di prevenzione catodica a corrente impressa installato, i nastri di rete di titanio attivato la parte positiva, anodica. Le connessioni al negativo sono state fatte mediante saldatura mentre gli anodi sono stati saldati ad un conduttore di titanio piatto a sua volta saldato ad un filo di titanio. Gli elettrodi di riferimento sono di due tipi: Argento/Argento Cloruro e filo di titanio attivato con ossidi di metalli misti annegato nel cemento.

Considerando i parametri di progetto e la densità dell'acciaio è stata definita una spaziatura massima fra gli anodi pari a 300 mm. Ogni zona da 3 A è stata alimentata e controllata autonomamente. La zona è stata definita considerando il limite di corrente combinando elementi strutturali attigui. I requisiti di corrente di protezione per ogni elemento strutturale erano quelli riportati in Tabella 3.

Elemento	Corrente di protezione
Soletta prefabbricata	662 mA
Sezione delle spalle	287 mA
Piloni (zona esposta)	31 mA

Tabella 3

La maggior parte delle zone era costituita da 4 solette prefabbricate e da 4 o 6 piloni. Solo alle estremità del ponte le zone erano costituite da 1 spalla, 2 piloni e 2 o 4 solette prefabbricate.

Durante la prefabbricazione delle gabbie di armatura per realizzare il sistema di prevenzione catodica sono stati installati in sequenza:

1. Spaziatori in cemento
2. Barre sul fondo
3. Fermagli di plastica
4. Lavorazione delle armature
5. Anodi e distributore di corrente saldati a punti
6. Cavi di alimentazione
7. Connessioni al negativo saldate ad arco

Durante l'installazione dei vari componenti del sistema nelle gabbie d'armatura (Figura 7) e prima della colata del cemento sono stati eseguiti costantemente controlli sulla correttezza dell'installazione ponendo particolare attenzione ad evitare cortocircuiti tra gli anodi e le armature e verificando il posizionamento dei componenti in conformità ai disegni di progetto. Durante la colata del cemento il sistema è stato controllato da ingegneri qualificati in protezione catodica.

I pilastri sono stati costruiti colando calcestruzzo in un involucro di acciaio e la pre-



Figura 7 - Gabbia d'armatura con prevenzione catodica installata prima della colata in cantiere.

venzione catodica è stata applicata alla testa del pilastro in quanto esposta all'atmosfera. L'anodo è stato installato nella gabbia d'armatura della testa del pilastro con il distributore di corrente posto perpendicolarmente all'anodo. I cavi di alimentazione sono stati installati in canalette appositamente predisposte nella soletta del ponte al fine di ridurre al minimo l'impatto del sistema di prevenzione catodica sull'estetica dei ponti (Figura 8 e 9).



Figura 8 - Testa di un pilastro con sistema di prevenzione catodica installato.



Figura 9 - Il sistema di prevenzione catodica è stato installato con particolare cura per ridurre al minimo l'impatto sull'estetica dei ponti.

Non è stato possibile effettuare la messa in funzione del sistema di prevenzione catodica di Durrat Al Bahrain successivamente all'installazione in quanto non vi era ancora disponibilità di alimentazione da rete a corrente alternata. Tuttavia al fine di verificarne il funzionamento è stata usata temporanea-

mente alimentazione con batterie al piombo da 12V (di tipo automobilistico). Per questo scopo ogni zona è stata regolata per operare alla massima corrente di progetto. I potenziali degli elettrodi di riferimento sono stati registrati per un periodo di tempo da 1 a 24 ore. Sono stati registrati i potenziali off istantanei e i potenziali nativi per ricavare per differenza la polarizzazione. E' stata riscontrata una buona variazione di potenziale in un periodo di tempo molto breve (3-4 ore) in ogni zona. I dati raccolti hanno dato buone indicazioni sull'assenza di cortocircuiti e sulla bontà dell'installazione di anodi e componenti. Si è inoltre riscontrata una protezione uniforme sui diversi elementi protetti nell'ambito di una singola zona.

Nakilat

La società Qatar Gas Transport Co conosciuta anche come Nakilat gestisce la più grande flotta di navi metaniere del mondo per un totale di 54 imbarcazioni. Per la loro riparazione necessitava di un cantiere che è stato commissionato con un contratto di 610 milioni di dollari americani alla Daewoo Engineering & Construction Co. nel 2006-2007. Il cantiere di riparazione è stato costruito nel complesso industriale di Ras Laffan nel nord del Qatar dove sono presenti circa 2 km di moli e banchine (Figura 10). Questi vengono realizzati installando 54 cassoni cellulari di cemento armato di dimensione 36 m x 16 m x 11 m ciascuno del peso di 4000 tonnellate (Figura 11).

A causa delle condizioni ambientali estreme del Golfo Persico si è deciso di proteggere le armature dei cassoni con un sistema di prevenzione catodica a corrente impressa per una vita di progetto della struttura di 50 anni.

Per il sistema a corrente impressa sono stati utilizzati come anodi nastri di titanio attivati con ossidi di metalli misti per proteggere la zona degli spruzzi e la zona atmosferica. L'acciaio immerso in acqua di mare è stato protetto con un sistema di protezione catodica con anodi tubulari di titanio attivati.

Al fine di accertare le prestazioni del sistema di prevenzione catodica sono stati incorporati elettrodi di riferimento Ag/AgCl in posizioni rappresentative delle condizioni a cui è esposta l'intera struttura ed in prossimità delle armature.

L'alimentazione è stata fornita mediante trasformatori/raddrizzatori multicanale controllati da remoto e raffreddati ad aria installati in sottostazioni all'interno delle banchine. Le unità all'interno di ogni sottostazione sono state collegate via RS485 mentre tra le sottostazioni sono state realizzate connessioni a fibra ottica.



Figura 10 - Il cantiere per riparazioni navali di Nakilat, Qatar.



Figura 11 - Posa in opera dei cassoni cellulari in cemento armato presso il cantiere Nakilat.

PROGETTI NEI PAESI EMERGENTI

Porto di Tangeri, Marocco

Situato in Marocco, nella parte meridionale dello stretto di Gibilterra, il porto di Tangeri si trova a 14 km dalla Spagna in una posizione strategica sulla via di passaggio tra Asia, Europa, Nord America e Sud America. A partire dal 2004 è stato intrapreso un vasto lavoro di costruzioni e ampliamento. Il nuovo porto Tanger Med ha aperto nel luglio del 2007 il suo primo molo polifunzionale in grado di accogliere 3,5 milioni di container all'anno, mentre un secondo terminal è stato aperto nel 2008 (Figura 12). Nel corso del 2012 è iniziata la costruzione di un secondo porto, denominato "Tanger Med II", per far fronte alla crescente domanda di trasporto marittimo di container. Questa espansione include due nuovi terminal per container per una lunghezza totale di 2800 m ed una capacità aggiuntiva nominale di 5 milioni di container all'anno. Entro il 2015 il porto di Tangeri avrà pertanto una capacità di 8,5 milioni di container all'anno. Sarà il più grande porto del Mediterraneo, solo di poco inferiore al più grande porto



Figura 12 - Il porto Tanger Med.



Figura 13 - Frangiflutti del porto di Tangeri.

Europeo di Rotterdam (anche se sarà solo circa un terzo dei grandi porti asiatici di Singapore e Hong Kong). Nell'ambito della prima fase di questo grande progetto realizzato dal consorzio di costruttori Bouygues-Bymaro-Saipem sono stati realizzati frangiflutti primari e secondari a protezione del porto [14] (Figura 13).

Nella parte dove le acque sono più profonde di 20 m sono stati realizzati 40 cassoni in cemento prefabbricati sulla costa, quindi varati in mare e completati in situ con le sovrastrutture (Figura 14). Ciascun cassone ha una struttura composta da 4 cellule di dimensioni 28 m x 28 m x 35 m di altezza, del peso di 7900 tonnellate e comprende 550 tonnellate di acciaio e 3000 m³ di cemento. Questi cassoni sono stati protetti dalla corrosione indotta da cloruri nella zona delle maree ed in quella degli spruzzi con un sistema di prevenzione catodica. Il sistema è stato realizzato con il classico schema a griglia, composta da nastro di rete di titanio attivato con ossidi di metalli misti e distributore di corrente in titanio, installato nella zona delle maree e in quella degli spruzzi prima di colare il cemento. Alcune sovrastrutture esposte all'atmosfera non sono state protette e dopo pochi anni dall'installazione presentano preoccupanti

segni di deterioramento. Sono in corso prove con anodi discreti di titanio attivati con ossidi di metalli misti per dimensionare un sistema di protezione catodica adeguato.

Hangzhou Bay Bridge, Cina

La prevenzione catodica è stata applicata per la prima volta in Cina nel 2004 alle tre torri principali dell'Hangzhou Bay Bridge. Si tratta nella parte iniziale di un ponte strallato che attraversa la baia di Hangzhou in prossimità del delta del fiume Yangtze, nella costa orientale della Cina. Inaugurato il 14 giugno 2007, unisce la città di Shanghai con Ningbo nella provincia di Zhejiang. Vanta il primato di più lungo ponte oceanico al mondo, lungo 36 km (Figure 15 e 16). Il ponte è stato costruito in una zona soggetta a forti fenomeni di erosione con conseguente fessurazione e probabile contaminazione da cloruri. Per questo motivo si è reso necessario installare un sistema di prevenzione catodica nella zona degli spruzzi e delle maree dei copri pali e di alcune sezioni delle colonne.

Xia-Zhang Bridge, Cina

Nel 2013 sono stati aperti al traffico i ponti di Xia-Zhang, che sono collocati a est delle città di Xiamen e Zhangzhou, al di sopra del-



Figura 15 - Hangzhou Bay Bridge.



Figura 16 - Torri dello Hangzhou Bay Bridge.



Figura 17 - I ponti di Xia-Zhang in Cina.

La prevenzione catodica, applicata in diverse parti del Mondo, si è dimostrata una tecnica valida per arrestare la corrosione da cloruri delle opere in calcestruzzo armato.

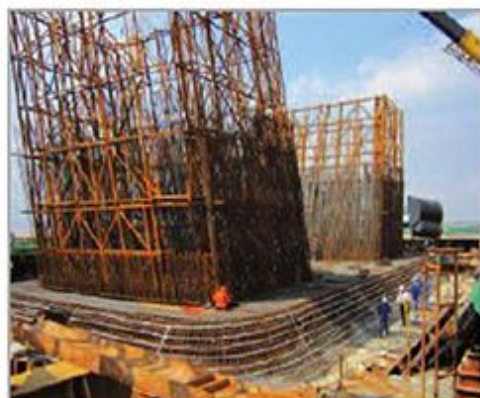


Figura 18 - Applicazione degli anodi con spaziatori di cemento per realizzare il sistema di prevenzione catodica dei piloni principali dello Xia-Zhang bridge.

l'accesso al mare del fiume Jiulong (Figura 17). Fra loro il ponte che connette Haichang e l'isola di Haimen è chiamato il North Branch Bridge ed è lungo 6392,6 m.

Questo ponte è composto da 3 parti:

- Il ponte principale strallato, costruito in acciaio e cemento della lunghezza di 1290 m e con una luce di 720 m di lunghezza;
- Il ponte di approccio settentrionale lungo 1130 m;
- Il ponte di approccio meridionale lungo 3972,6 m.

La lunghezza della luce del ponte strallato (720 m) lo colloca al sesto posto nel mondo nella sua categoria.

In fase di progetto si è deciso di proteggere i 4 piloni principali e 4 banchine nella zona delle maree e degli spruzzi con un sistema di prevenzione catodica al fine di prevenire la corrosione indotta da cloruri nel calcestruzzo armato. Il sistema di prevenzione catodica ha interessato un'area di 13100 m². Il

materiale anodico prescelto è stato il nastro di rete di titanio attivato con ossidi di metalli misti applicato sulle armature con spaziatori di cemento [15] (Figura 18).

CONCLUSIONI

La Prevenzione Catodica ideata dal Prof. Pietro Pedeferra si è dimostrata una valida tecnica per fermare la corrosione delle armature di acciaio nel calcestruzzo. Da metodo sperimentale pionieristico nella metà degli anni '80 si è evoluta nel corso di trent'anni, diventando una tecnica ben consolidata per preservare le strutture soggette a corrosione da contaminazione da cloruri. Vari aspetti della prevenzione catodica sono stati recepiti negli standard internazionali quali ISO 12696:2012 e AS2832.5-2008. La diffusione della tecnica dagli Stati Uniti ed Europa all'Australia, Medio Oriente, Cina e Nord Africa dimostra la prolificità di quest'idea nell'industria globale delle infrastrutture.



Sydney Opera House

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] L. Lazzari, M. Ormellese, *La prevenzione catodica dei materiali attivo - passivi (un omaggio a Pietro Pedefferri)*, Proc. Int. Conf. APCE Convegno Nazionale 30 anni di attività APCE, 6 ottobre 2011, Politecnico di Milano
- [2] M. Pourbaix, *Lectures on Electrochemical Corrosion*, Plenum Press, 1973
- [3] M. Pourbaix, *The Electrochemical Basis for Localized Corrosion*, Int. Corrosion Conf. Series NACE-3, 12-33, 1974
- [4] L. Lazzari, P. Pedefferri, M. Ormellese, *Protezione Catodica*, Polipress – Politecnico di Milano, 2006
- [5] C. Atkins, L. Buckley & P. Lambert, *Sustainability and Repair*, Concrete Communication Conference, University College London, September 2006
- [6] ISO 12696:2012, *Cathodic Protection of Steel in Concrete*, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland
- [7] P. Baldo, O. Mason, M. Tettamanti, J.T. Reding, *Cathodic protection of bridge viaduct in the presence of prestressed steel: an italian case history*, NACE Corrosion 91 – Cincinnati, Paper No. 119 – NACE International, Houston, TX US
- [8] A. Bazzoni, B. Bazzoni, L. Lazzari, L. Bertolini, P. Pedefferri, *Field application of cathodic prevention of reinforced concrete structures*, NACE Corrosion 96, Paper No. 312 – NACE International, Houston, TX US
- [9] M. Tettamanti, A. Rossini, A. Cheaitani, *Cathodic prevention and cathodic protection of new and existing concrete elements at the Sydney Opera House*, NACE Corrosion 97 – Paper No. 255 – NACE International, Houston, TX US
- [10] Australian Standard, AS2832.5-2008, "Cathodic Protection of Metals, Part 5: Steel in Concrete Structures", Standards Australia 2008
- [11] A. Cheaitani, P. Pedefferri, B. Bazzoni, P. Karajayli, R. Dick, *Performance of Cathodic Prevention System of Sydney Opera House Underbroadwalk after 10 Years of Operation*, NACE Corrosion 2006 – Paper No. 06342 – NACE International, Houston, TX US
- [12] I. Godson *Cathodic protection to Swanson Dock West in Melbourne*, Concrete in Australia, Vol 36 No 3 Page 45, Concrete Institute of Australia, Rhodes NSW, Australia
- [13] R. Callon, *Cathodic protection at Durrat Al Bahrain*, NACE Corrosion 2008 – Paper No. 08303 – NACE International, Houston, TX US
- [14] Tangiers-Med port (Morocco) – Overview of the project – Press visit to Tangiers, 27 and 28 september 2005 – Boygues Construction, Paris France
- [15] EP 0534392B1, *Anode structure for cathodic protection of steel reinforced concrete and relevant method of use*, Oronzio De Nora S.A., via Motta, 17 CH-6900 Lugano