n. 53 - settembre 2013
www.apce.it

Periodico registrato presso il tribunale di Roma al n. 67 in data 17.02.98 e nella versione telematica al n. 19/2012 in data 26.01.2012- Spedizione in abbonamento postale 70% - Roma

notizie APCE

ASSOCIAZIONE PER LA PROTEZIONE DALLE CORROSIONI ELETTROLITICHE

Protezione catodica di strutture in calcestruzzo

INGEGNERIA DELLA CORROSIONE E PROTEZIONE CATODICA.

L'integrità delle strutture civili e industriali deve essere assicurata lungo l'intero arco della loro vita.

La corrosione rappresenta il principale fattore di compromissione dell'integrità e della durabilità.

Cescor offre ai suoi Clienti una comprovata esperienza ingegneristica nel settore dei materiali, del controllo della corrosione e della protezione catodica. Questo per contribuire ad assicurare l'integrità e la durabilità dei loro asset, nella prospettiva della sicurezza, del rispetto dell'ambiente e del risparmio energetico.

We care about your expectations.

cescor

CESCOR Srl Via Maniago 12, 20134 Milano +39 0226412538 www.cescor.it

Le notizie e le opinioni negli articoli non impegnano la redazione ma esprimono soltanto quelle degli autori.

n° 53 - settembre 2013

NEWS 4

EDITORIALE 7

CONVEGNO
Pietro Pedeferri e la scuola di corrosione e protezione dei materiali al Politecnico di Milano 8

CONVEGNO
Metodi elettrochimici temporanei 10

CONVEGNO
Prevenzione catodica delle armature nel calcestruzzo: il panorama internazionale 18

CONVEGNO
Cathodic protection of steel in concrete - 25 years of experience in the Netherlands 32

SPAZIO CIG
Dal 1° luglio 2013 in vigore il Regolamento europeo sui prodotti da costruzione (CPR) 36

APCE - CALENDARIO FORMAZIONE ED EVENTI 2014 38

ESERCIZI 40

APCE NOTIZIE Periodico trimestrale

Direttore responsabile
Vincenzo Mauro Cannizzo (Snam Rete Gas)

Promozione e sviluppo
Lucio Francesco Venturini
c/o Snam Rete Gas S.p.A.
Largo F. Rismondo, 8
35131 Padova
tel. 049 8209246
fax 049 8209331
lucio.venturini@apce.it

Consulenza editoriale e impaginazione
Massimiliano Medei - m.medei@gimax.eu
Santa Marinella (RM)

Stampa
GIMAX - Santa Marinella (RM)
Via Valdambrini, 22
Tel. 0766 511.644
info@gimax.eu

Redazione
PoliLaPP
c/o Dipartimento di Chimica Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta"
Politecnico di Milano
Via Mancinelli, 7
20131 Milano
Tel. 022 399 3152
Fax 022 399 3180
polilapp@chem.polimi.it

Comitato di redazione
Luciano Lazzari (Politecnico di Milano)
Marco Ormellese (Politecnico di Milano)
MariaPia Pedeferri (Politecnico di Milano)
Fabio Brugnetti (APCE-UCEMI)
Lucio Francesco Venturini (Snam Rete Gas)

Comitato editoriale
Sergio Orsini (Snam Rete Gas)
Umberto Lebruto (RFI)
Alvaro Fumi (RFI)
Massimo Tiberi (GEA)
Georgios Chlaputakis (Enel Rete Gas)
Giuseppe Maiello (NAPOLETANAGAS)
Paolo Del Gaudio (IRIDE)

Comitato scientifico
Fabio Bolzoni (Politecnico di Milano)
Fabio Brugnetti (Snam Rete Gas)
Vincenzo Mauro Cannizzo (Snam Rete Gas)
Tiziana Cheldi (ENI E&P)
Georgios Chlaputakis (Enel Rete Gas)
Lorenzo Fedrizzi (Università di Udine)
Romeo Fratesi (Univ. Politecnica delle Marche)
Alvaro Fumi (RFI)
Luciano Lazzari (Politecnico di Milano)
Tommaso Pastore (Università di Bergamo)
Stefano Trasatti (NACE Italia, Università degli Studi di Milano)

NEWS

PROTEZIONE CATODICA DELLE RETI IDRICHE: VALUTAZIONI TECNICO-ECONOMICHE, ESPERIENZE E PROSPETTIVE

Politecnico di Milano (26 novembre 2013)

APCE, in collaborazione con PoliLaPP, organizza presso il Politecnico di Milano, il Convegno sulla *"Protezione Catodica delle reti idriche: valutazioni tecnico-economiche, esperienze e prospettive"*, per una sensibilizzazione delle problematiche legate alla corrosione, protezione e preservazione di tali reti. La manifestazione è indirizzata a tutti gli operatori del settore idrico, tecnici, associazioni-società di settore e mondo universitario. Il programma di massima prevede una descrizione dello stato delle reti idriche in Italia (stato dell'arte, scenari di sviluppo e di normazione), per poi affrontare i problemi di corrosione e i sistemi di protezione (rivestimenti, protezione catodica). La giornata si concluderà fornendo alcuni esempi di esperienze di campo e discutendo quelle che saranno le prospettive future in questo settore.

L'iscrizione al Convegno è gratuita. Si raccoglieranno le adesione sino a raggiungimento dei 150 posti disponibili. Per iscriversi è obbligatorio contattare la Segreteria del Convegno (polilapp@chem.polimi.it – Ing. Silvia Beretta)

EUROCORR – EUROPEAN CORROSION CONGRESS

Estoril (Portogallo) (1-5 settembre 2013)

Si è svolto in Portogallo il congresso EUROCORR, l'evento più importante in Europa e un punto di riferimento in tutto il mondo sui temi della corrosione e della protezione. Il convegno, che ha visto la partecipazione di quasi 800 delegati, aveva come tema centrale "*strategie innovative anti-corrosione per i materiali nei sistemi di produzione di energia*". Per informazioni http://www.eurocorr2013.org.

L'edizione 2014 del convegno EUROCORR si svolgerà in Italia, a Pisa, dall'8 al 12 settembre. Per informazioni http://www.eurocorr2014.org.

CORSI DI PROTEZIONE CATODICA IN ACQUA DI MARE E NEL CALCESTRUZZO ARMATO

Visto il successo, anche nel 2014 saranno organizzati i corsi per la certificazione del personale addetto alla protezione catodica di Livello 2 nel settori acqua di mare e calcestruzzo. Come tradizione, il corso dedicato alle opere in calcestruzzo armato sarà svolto in lingua inglese, per rispondere alle richieste arrivate da varie parti d'Europa.

Le date sono le seguenti:

- Acqua di mare 23-27 giugno (con esame di certificazione il 28 giugno)
- Calcestruzzo 14-18 luglio (con esame di certificazione il 19 luglio)

Per informazioni consultare il sito APCE (www.apce.it) o contattare la Segreteria dei Corsi (polilapp@chem.polimi.it – Ing. Silvia Beretta)

RIUNIONI DI FINE ANNO DEGLI ORGANI DIRETTIVI APCE: 116° CTC E 119MA ASSEMBLEA DEI SOCI, TORINO 20/11/2013

Le prossime Riunioni degli Organi Direttivi di APCE, il 116° Comitato Tecnico Centrale e la 119a Assemblea dei Soci, sono fissate per mercoledì 20/11/2013 presso AES – Azienda Energia e Servizi Torino S.p.A., Corso Regina Margherita 52 – 10153 TORINO (TO), a partire dalle ore 11.45, con le due Riunioni consecutive. Gli aventi diritto riceveranno con congruo anticipo la Convocazione alle due Riunioni con gli Ordini del Giorno e gli altri dettagli organizzativi. Si prega di confermare la partecipazione alla Segreteria APCE.

APCE

Associazione per la protezione dalle corrosioni elettrolitiche

in collaborazione con i Comitati Tecnici Territoriali (CTT) presenta:

1° Edizione 2013 - Giornata di studio "Protezione catodica di strutture metalliche interrate gas e acqua"

Scopo della giornata

L'APCE, associazione a carattere culturale / scientifico, è da sempre attiva su tutto il territorio nazionale con un'organizzazione articolata in Comitati Tecnici Territoriali (CTT) i cui esperti si riuniscono periodicamente per collaborare nella risoluzione dei problemi connessi con la protezione dalle corrosioni elettrolitiche che possono interessare le strutture metalliche. Il Comitato Tecnico Centrale (CTC), l'organo che coordina le attività dell'associazione, ha accolto la richiesta dei CTT sulla necessità di effettuare su tutto il territorio nazionale delle giornate di studio. Esse si terranno nel corso del 2013 per aggiornare tecnici e operatori sui criteri di protezione catodica ai sensi della normativa di ultima / prossima emissione.

Questa tematica è ritenuta elemento fondamentale per raggiungere l'efficacia della protezione catodica, per ridurre i costi di gestione dei sistemi di protezione catodica e per contenere le mutue interferenze elettriche tra strutture coesistenti protette catodicamente.

Chi partecipa

La giornata di aggiornamento è aperta sia ai soci APCE che ai non soci APCE, al personale deputato alle attività di protezione catodica non certificato UNI EN 15257, agli addetti di protezione catodica certificati LIV 1 - LIV 2 - LIV 3 UNI EN 15257.

I singoli eventi sono organizzati dai Comitati Tecnici Territoriali (CTT) di Bologna, Milano, Torino, Genova, Roma, Bari, Catania, Venezia, Firenze, Napoli.

Programma Tecnico

Gli argomenti trattati nella giornata di studio "PROTEZIONE CATODICA DI STRUTTURE METALLICHE INTERRATE – GAS E ACQUA " sono i seguenti:

- principi della corrosione elettrolitica,
- criterio di protezione catodica secondo normativa,
- attuazione di un sistema di protezione catodica,
- collaudo di un sistema di protezione catodica,
- criteri di verifica e manutenzione di un sistema di protezione catodica.

Orario di Lavoro:

- 8.30 benvenuto ai partecipanti alla giornata di studio
- 8.45 inizio lavori
- 10.30 ÷ 10.45 pausa caffè
- 12.15 ÷ 13.30 pausa pranzo
- 15.00 ÷ 15.15 pausa caffè
- 16.30 termine lavori

Docenza

La docenza è garantita da esperti del settore certificati 3° LIV EN 15257.

Calendario e indicazione Referenti CTT

Le giornate di studio "PROTEZIONE CATODICA DI STRUTTURE METALLICHE INTERRATE – GAS E ACQUA" sono state prefissate nelle seguenti giornate, riportate in ordine di data con indicazione dei CTT organizzatori e relativi referenti:

- **CTT Bologna, 28 marzo 2013**
  Sig. Stefano Sbarzagli - s.sbarzagli@rfi.it - Tel. 051 2586670
- **CTT Milano, 14 maggio 2013**
  Sig. Fabio Brugnetti - fabio.brugnetti@apce.it
  Tel. 02 37039408 cell. 346 6821564
- **CTT Torino, 21 maggio 2013**
  Sig. Claudio Gianolio -claudio.gianolio@mail.italgas.it
  Tel. 011 2394485
- **CTT Genova, 11 giugno 2013**
  Sig. Riccardo Tomelleri - riccardo.tomelleri@genovaretigas.it
  Tel. 010 5586723
- **CTT Roma, 18 giugno 2013**
  Sig. Claudio Spalvieri - c.spalvieri@rfi.it - Tel. 06 44105678
- **CTT Bari, 24 settembre 2013**
  Sig. Mario Dicuonzo - mario.dicuonzo@snamretegas.it
  Tel. 080 5919288
- **CTT Catania, 25 settembre 2013**
  Sig. Francesco Tasco - francesco.tasco@snamretegas.it
  Tel. 095 7574319
- **CTT Venezia, 8 ottobre 2013**
  Sig. Pietro Sartori - pietro.sartori@mail.italgas.it
  Tel. 041 3945088
- **CTT Firenze, 5 novembre 2013**
  Sig. Massimo Tiberi - tiberi@geaspa.com - Tel. 056 4453686
- **CTT Napoli, 3 dicembre 2013**
  Sig. Luigi Pollio - luigi.pollio@napoletanagas.it
  Tel. 081 5831726

sponsors

SILCA · byautoma · ECONORMA S.a.s. Prodotti e Tecnologie per l'Ambiente · ELETTROTECNICA ADRIATICA Divisione Protezione Catodica · TELEMAGNETICA Milano · cescor

Per maggiori informazioni clicca il link:

http://www.apce.it/news/1-edizione-2013-giornate-di-studio-apce/

APCE
Service S.r.l.

- FORMAZIONE PROFESSIONALE
- ORGANIZZAZIONE DI CONFERENZE, SEMINARI E CONVEGNI
- SERVIZI EDITORIALI E PUBBLICITARI
- RICERCA, SVILUPPO E CONSULENZA NEL CAMPO DELLA PROTEZIONE CATODICA

APCE Service S.r.l. - Società a Responsabilità Limitata con Socio Unico
Direzione e coordinamento di APCE
Associazione per la Protezione dalle Corrosioni Elettrolitiche

Uffici di Amministrazione Unica e Segreteria
APCE Service S.r.l c/o Snam Rete Gas S.p.A. - Largo F. Rismondo, 8 - 35131 Padova - Italy
Tel. +39 049 8209111 - Fax +39 049 8209331
E-mail info@apceservice.it

L'EDITORIALE
DI VINCENZO MAURO CANNIZZO

Nell'ambito del 150° dalla fondazione del Politecnico di Milano, a fine settembre si è tenuto il convegno "Pietro Pedeferri e la scuola di corrosione e protezione dei materiali". Una delle due giornate è stata in gran parte dedicata alle problematiche legate alle armature del calcestruzzo. Si sono considerati fondamentalmente due approcci: la prevenzione e gli interventi per arrestare o eliminare i danni derivanti dalla corrosione.

Il primo approccio si riferisce alla cosiddetta "prevenzione catodica", ideata negli anni '80 da Pedeferri ed ormai giunta a maturazione. Pedeferri introdusse l'innovativo concetto che si poteva proteggere il materiale (acciaio al carbonio) operando nella zona della "passività imperfetta", col vantaggio di utilizzare basse correnti. L'utilizzo di questa tecnica si traduce in un aumento dei tempi di vita delle infrastrutture (ponti, porti, viadotti) e soprattutto in un abbattimento dei costi altrimenti necessari per manutenzionarle: ormai queste opere possono essere quindi progettate con vite medie dell'ordine dei 50 anni.

Il secondo approccio riguarda invece i possibili interventi per conservare il calcestruzzo armato e ridurne l'alterazione della superficie: stiamo parlando dei "metodi elettrochimici temporanei". Si tratta di una vera e propria bonifica di durata limitata (al massimo poche settimane) ma con l'utilizzo di correnti molto più alte rispetto a quelle della classica protezione catodica.

Questo numero è quindi dedicato a tali tecniche il cui successo e diffusione sono in costante aumento in tutto il mondo.

Voglio infine fare un breve accenno al prossimo evento organizzato da APCE presso il Politecnico di Milano: il 26 novembre infatti si terrà il workshop "Protezione delle reti idriche dalla corrosione". E' la prima volta che si tenta di fare il punto sulle tecniche di protezione dalla corrosione applicate al mondo dell'acqua. Vogliamo mettere insieme le esperienze maturate nelle varie aziende del settore, il mondo della regolazione e quello della normazione tecnica: siamo infatti convinti che è possibile incamminarsi in un percorso virtuoso dove si incontrino i vari interessi, tutti legittimi, ed APCE vuole dare il suo contributo.

Buona lettura!

V. Mauro Cannizzo
Presidente APCE

POLITECNICO DI MILANO 150°

PIETRO PEDEFERRI E LA SCUOLA DI CORROSIONE E PROTEZIONE DEI MATERIALI

Nell'ambito delle celebrazioni per il 150° del Politecnico di Milano, **PoliLaPP** (Laboratorio di Corrosione dei Materiali "Pietro Pedeferri") ha organizzato il Convegno **"Pietro Pedeferri e la scuola di corrosione e protezione dei materiali al Politecnico di Milano"** che si è svolto presso il Politecnico di Milano il 26 e 27 settembre 2013.

L'iniziativa ha voluto ricordare il contributo che il Politecnico di Milano ha dato allo studio della corrosione e protezione dei materiali, ripercorrendo il lavoro svolto da scienziati come Roberto Piontelli, Giuseppe Bianchi, Bruno Mazza, Dany Sinigaglia e Pietro Pedeferri. Quest'ultimo, che ha tenuto il primo corso in Italia di Corrosione e Protezione dei Materiali Metallici a partire dal nel 1968, ha contribuito alla nascita di una vera e propria Scuola di corrosione divulgando la cultura della corrosione e protezione dei materiali anche a livello internazionale.

Il Convegno ha ripercorso i principali contributi di Pietro Pedeferri sia in ambito scientifico (in particolare per quello che riguarda la durabilità delle strutture in calcestruzzo armato, con particolare riferimento alla prevenzione catodica, tecnica proposta da Pedeferri negli anni '80, l'utilizzo della protezione catodica per strutture off-shore, la corrosione localizzata degli acciai inossidabili, la corrosione nel mondo dei beni culturali) che artistico (l'ossidazione anodica del titanio). In relazione a quest'ultimo tema, nei giorni del Convegno è stata allestita una mostra in cui sono state esposte 35 opere su titanio realizzate da Pietro Pedeferri a partire dagli anni '80 fino al 2008. Sempre nell'area mostra è stato possibile consultare i 35 libri scritti da Pedeferri, sia quelli scientifici, che quelli legati alla colorazione del titanio, e prendere visione degli 11 poster in cui sono state ripercorse le principali tappe del percorso scientifico e artistico di Pietro Pedeferri, tra cui si ricorda ovviamente la colorazione su titanio, le scoperte nell'ambito della protezione delle armature nel calcestruzzo, i contributi nel campo della protezione catodica delle strutture offshore e nella conservazione die beni culturali.

La prima giornata del Convegno si è aperta con i saluti della autorità: sono intervenuti il prof. Giulio Ballio (rettore del Politecnico di Milano dal 2002 al 2010), il prof. Maurizio Masi (attuale Direttore del Dipartimento Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta") e

il prof. Luciano Lazzari (Responsabile di PoliLaPP).
Sono quindi seguite le memorie presentate da ben 38 relatori, di cui 3 stranieri, provenienti da Svizzera, Spagna e Olanda.
Nella prima mattinata si sono ripercorse le tappe storiche di Pietro Pedeferri scienziato, ingegnere, didatta e artista. Il Prof. Lazzari ha ricordato i momenti più importanti della vita di Pedeferri, dai suoi studi a Pavia, fino ai primi anni al Politecnico di Milano e alle sue esperienze all'estero, tra cui si ricorda il periodo a Cambridge e quello in Somalia. Lazzari ha anche ricordato come Pedeferri sia stato capace di essere un *"maestro"*, creando appunto a Milano la scuola di corrosione. Parallelamente all'attività scientifica, Pedeferri si era da sempre dedicato alla colorazione anodica del titanio: MariaPia Pedeferri, Giancarlo Consonni e Angelo Stella hanno illustrato con chiarezza come da una semplice lastra di titanio metallico Pedeferri sia stato in grado di ottenere colori, forme, apparenze e movimenti, citando più volte gli stessi testi che Pietro Pedeferri aveva scritto a riguardo.
Infine meritano di essere citati gli interventi del prof. Alberto Cigada (Politecnico di Milano) e dell'Ing. Bruno Bazzoni (Cescor srl): il primo ha ricordato con simpatia le collaborazioni scientifiche con Pedeferri nel campo dei biomateriali, il secondo invece ha illustrato i contributi di Pedeferri nel settore dell'*ingegneria della corrosione*, non tralasciando anche le doti *didattiche* di Pedeferri. Chi ha avuto la fortuna di averlo come docente, di sicuro non dimentica le sue lezioni!
Nel pomeriggio sono iniziate le sessioni scientifiche. Sono stati presentati 12 lavori sui seguenti temi: la corrosione localizzata degli acciai inossidabili, la corrosione nel campo petrolifero, la corrosione negli impianti geotermici, l'efficacia dei rivestimenti nella prevenzione della corrosione, la conservazione dei beni culturali.
La sessione mattutina di venerdì 27 settembre è stata dedicata alla durabilità delle strutture in calcestruzzo, settore in cui Pedeferri ha aperto a partire dalla fine degli anni '80 una vera e propria scuola riconosciuta ormai a livello internazionale. Sono state presentate 11 memorie dedicate sia alla corrosione delle armature nel calcestruzzo (confrontando il comportamento di barre in acciaio al carboni, zincate o in acciaio inossidabile) sia alla tecniche elettrochimiche nel calcestruzzo, con particolare rifermento alla **prevenzione catodica,** tecnica *"inventata"* dallo stesso Pedeferri e citata nella normativa europea di settore, dove è presente l'ormai ben noto **Diagramma Pedeferri** che illustra le condizioni di protezione (in particolare il potenziale di protezione) in funzione del tenore di cloruri presente nel calcestruzzo. In questa sessione sono intervenuti tre relatori stranieri: il prof. Bernhard Elsener (ETH di Zurigo), la prof.ssa Carmen Andrade (CSIDEM di Madrid) e il prof. Rob Polder (TNO di Delft).
Infine la giornata si è conclusa con le 6 memorie dell'ultima sessione dedicata alle proprietà fotocataliche del biossido di titanio nanostrutturato, accresciuto sia su titanio metallico che applicato su altri materiali.

Il convegno si è concluso con i saluti da parte del prof. Luciano Lazzari. Innanzitutto sono state ringraziate le società che hanno sponsorizzato l'evento (MAPEI SpA, Cescor srl, PIZ Gruppo Zecca, Loterios, Fondazione Oronzio de Nora, APCE) e le Associazioni che lo hanno patrocinato (ATE, AIMAT, AIM, SCI - Divisione di Elettrochimica, AICAP, Centro Inox, Istituto Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, INSTM e NACE Italia): la buona riuscita delle due giornate è anche legata al loro contributo.
Infine Lazzari ha sottolineato la buona riuscita del convegno. Nelle due giornate hanno partecipato circa 280 delegati: tecnici e specialisti che operano nel settore della corrosione e protezione dei materiali, tra cui numerosi amici di Pedeferri che hanno avuto modo nella loro vita di conoscere le sue capacità scientifiche e le sue doti umane. Ma ancor più importante è stata la presenza di delegati provenienti da tutte le università italiane in cui è presente un gruppo di ricerca di corrosione e dalle principali università dove è presente un gruppo di ricerca legato alla durabilità del calcestruzzo.
È per questo, conclude Lazzari, che forse il titolo più corretto del Convegno sarebbe dovuto essere **Pietro Pedeferri e la scuola ITALIANA di corrosione e protezione dei materiali**.

Metodi elettrochimici temporanei

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

di

E. Redaelli,
M. Carsana,
M. Gastaldi,
F. Lollini,
L. Bertolini
Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta"
Politecnico di Milano

Questa nota tratta dei metodi elettrochimici temporanei utilizzati come trattamenti di bonifica del calcestruzzo armato. La rimozione elettrochimica dei cloruri e la rialcalinizzazione elettrochimica sono considerati metodi consolidati, essendo stati introdotti da diversi decenni, e hanno gli obiettivi, rispettivamente, di rimuovere i cloruri e ripristinare l'alcalinità del calcestruzzo, ricreando così un ambiente favorevole alla ripassivazione dell'armatura. Di questi metodi si descrivono gli effetti, le modalità di applicazione e gli sviluppi recenti. Si riportano inoltre i principali risultati ottenuti dalle ricerche e dalle applicazioni in campo della rialcalinizzazione effettuate nei nostri laboratori. Si accenna poi ai metodi elettrochimici temporanei innovativi, che sfruttano la corrente applicata per iniettare varie sostanze contenute nell'elettrolita (ad esempio inibitori di corrosione e nanoparticelle) con l'obiettivo di migliorare le proprietà del calcestruzzo e la sua capacità di proteggere le armature dalla corrosione.

INTRODUZIONE

I metodi elettrochimici temporanei sono trattamenti di durata limitata (da pochi giorni a poche settimane) che hanno l'obiettivo di modificare la composizione del calcestruzzo sfruttando gli effetti della corrente applicata, in modo da migliorare alcune proprietà del calcestruzzo e ripristinarne le caratteristiche protettive nei confronti dell'armatura. Questi metodi operano con correnti molto più elevate rispetto a quelle utilizzate nella protezione catodica, in modo da enfatizzare le conseguenze in termini, ad esempio, di fenomeni di trasporto e di produzione di alcalinità, e con l'obiettivo di estendere gli effetti all'intero spessore del copriferro, in modo permanente e duraturo, anche in seguito alla interruzione della corrente.

Esistono vari tipi di metodi elettrochimici temporanei per il calcestruzzo. La rimozione dei cloruri e la rialcalinizzazone sono considerati metodi consolidati, essendo stati introdotti negli anni '80, sebbene come si vedrà nel seguito alcuni aspetti legati alla loro applicazione non siano ancora del tutto chiariti. Accanto a questi metodi "tradizionali", sono stati recentemente proposti nuovi metodi che sfruttano la corrente applicata per favorire la penetrazione di sostanze contenute nell'elettrolita anodico, come ad esempio inibitori di corrosione e nanoparticelle, che esplicano ulteriori effetti benefici sul calcestruzzo e sulle armature. Attualmente questi metodi "innovativi" sono per lo più in fase sperimentale.

Rispetto ai metodi di intervento convenzionali, i metodi elettrochimici hanno il vantaggio di non richiedere la rimozione del calcestruzzo non protettivo che quindi, se meccanicamente integro, può essere conservato. I metodi elettrochimici temporanei, inoltre, non richiedono un sistema anodico permanente e pertanto consentono di conservare la superficie del calcestruzzo. L'esigenza di non alterare la tessitura e il colore della superficie è

spesso determinante nella scelta della tecnica di intervento nel caso di edifici e opere di valore storico o architettonico.
Questa nota tratta dei metodi elettrochimici temporanei tradizionali e innovativi, le modalità di applicazione e gli effetti sulla durabilità del calcestruzzo e delle armature. Inoltre, riporta l'attività sperimentale e le esperienze effettuate e attualmente in corso in questo campo presso il Laboratorio mCD (Materiali Cementizi e Durabilità) del Politecnico di Milano.

METODI ELETTROCHIMICI "TRADIZIONALI"

Rimozione dei cloruri

La rimozione dei cloruri dal calcestruzzo mediante un processo elettrochimico fu introdotta negli USA negli anni '70 utilizzando un elettrolita liquido e tensioni molto elevate; in Europa il trattamento venne brevettato dalla Noteby negli anni '80 utilizzando polpa di cellulosa o *shotcrete* imbevuti di idrossido di calcio o acqua potabile e voltaggi moderati (inferiori a 40 V) [1,2]. Dagli anni '90, numerosi articoli scientifici sono stati pubblicati su questo argomento. Non esiste una normativa per la rimozione dei cloruri, ma è stata pubblicata una specifica tecnica [3].
La rimozione dei cloruri prevede l'applicazione di una corrente continua tra un anodo temporaneo, solitamente posto sulla superficie del calcestruzzo, e l'armatura (Figura 1). L'anodo è costituito da una rete di titanio attivato o di acciaio a contatto con acqua o soluzioni di idrossido di calcio saturo contenute in vasche orizzontali o verticali oppure inserita in paste che possono essere spruzzate su superfici orizzontali o verticali. La corrente applicata, che è dell'ordine di 1-2 A/m^2 rispetto alla superficie dell'armatura, forza gli ioni cloruro a migrare dall'armatura (catodo) verso l'anodo. La durata del trattamento è di qualche settimana (6-10); al termine di questo periodo, l'anodo e l'elettrolita anodico contenente i cloruri vengono rimossi.
La polarizzazione dovuta alla corrente applicata è tale da portare il potenziale dell'acciaio a valori più negativi di –1 V/SCE e l'elettrolisi dell'acqua può produrre idrogeno gassoso alla superficie dell'acciaio; gli ioni ossidrile (OH^-) prodotti aumentano il pH alla superficie dell'acciaio e questo effetto, combinato con la riduzione della concentrazione degli ioni cloruro, porta alla ripassivazione dell'armatura. Gli ioni cloruro sono trasportati verso il sistema anodico, dove sono ossidati a cloro gassoso oppure rimossi insieme all'elettrolita anodico (a seconda del pH). I potenziali fortemente negativi e lo sviluppo di idrogeno comportano il rischio di infragilimento da idrogeno sugli acciai ad alta resistenza. Per questo motivo, la rimozione dei cloruri è una tecnica sconsigliata nel caso di strutture in calcestruzzo armato precompresso [4].
Secondo la specifica [3] il trattamento si può considerare concluso se il contenuto residuo di cloruri alla superficie delle armature è dell'ordine di 0.4% rispetto alla massa di cemento, se la carica circolata è compresa tra 1000 e 2000 Ah/m^2 rispetto alla superficie dell'armatura e se la mappatura di potenziale effettuata dopo 4-6 mesi dalla fine del trattamento indica l'assenza di macrocoppie.

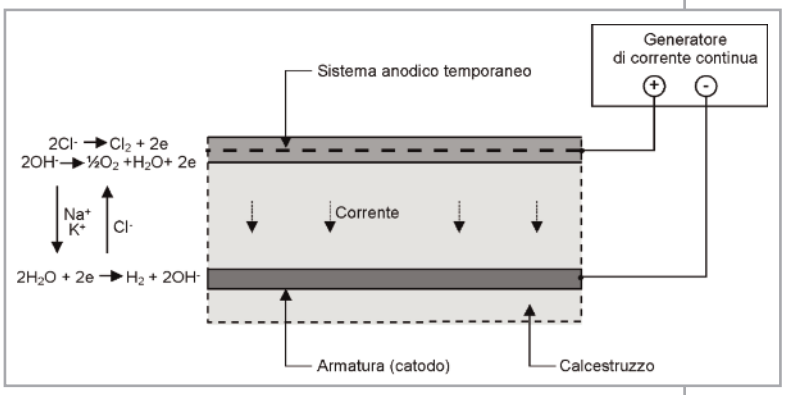


Figura 1 - *Schematizzazione della applicazione del trattamento di rimozione dei cloruri.*

La quantità di cloruri rimossa dipende dalla loro concentrazione iniziale e dalla carica totale circolata. La durata del trattamento deve essere la minima possibile, così come la densità di corrente applicata, al fine di limitare i possibili effetti collaterali.
I cloruri contribuiscono solo in parte al trasporto della corrente, la restante parte è trasportata da altri ioni (principalmente ioni ossidrile). Inoltre, al diminuire della loro concentrazione, diminuisce anche la frazione di corrente trasportata; per questo motivo l'efficienza della rimozione diminuisce al procedere del trattamento. In generale, l'efficienza di rimozione dipende dal contenuto iniziale di cloruri e dalla sua distribuzione, dalla velocità di rilascio dei cloruri legati, dalla presenza di altri ioni e dalla geometria dell'armatura che determina la distribuzione della corrente. L'efficienza attesa è dell'ordine di 0.1-0.3 con punte massime di 0.5-0.7. Se i cloruri non sono penetrati dall'esterno, ma sono stati aggiunti all'impasto (tramite gli aggregati o l'acqua di impasto), l'efficienza della rimozione è molto bassa.
In genere, gli effetti del trattamento vengono valutati misurando il contenuto di cloruri totali. Tuttavia, sono i cloruri "liberi" disciolti nella pasta cementizia ad essere rimossi dalla corrente. Recentemente è stato dimostrato che i cloruri liberi sono rimossi con relativa facilità, e successivamente si instaura un nuovo equilibrio tra cloruri liberi e cloruri legati (mediante dissoluzione di questi ultimi). La scarsa efficienza di rimozione è

La rimozione elettrochimica dei cloruri prevede l'applicazione di una corrente continua tra un anodo temporaneo e le armature

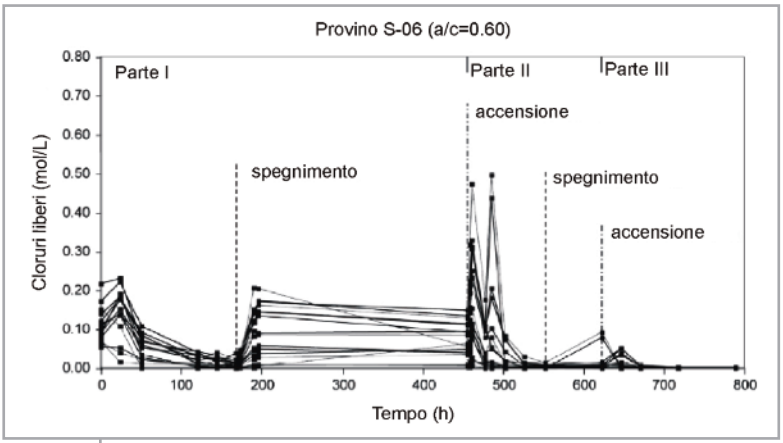


Figura 2 - *Andamento della concentrazione di cloruri liberi nel calcestruzzo in funzione del tempo (ripreso con modifiche da [5]).*

dovuta alla bassa velocità di rilascio dei cloruri legati rispetto alla velocità di rimozione. L'efficienza può essere notevolmente migliorata se invece di applicare una corrente continua e costante si introducono periodi di spegnimento della corrente, durante i quali si instaura l'equilibrio tra cloruri liberi e cloruri legati. In questo modo si riduce la carica totale circolata e le sue possibili conseguenze negative. La Figura 2 riporta l'andamento della concentrazione dei cloruri liberi durante l'applicazione del trattamento; l'aumento del tenore di cloruri osservato in seguito alla accensione della corrente è stato attribuito al rilascio dei cloruri adsorbiti fisicamente sulla superficie dei pori [5].

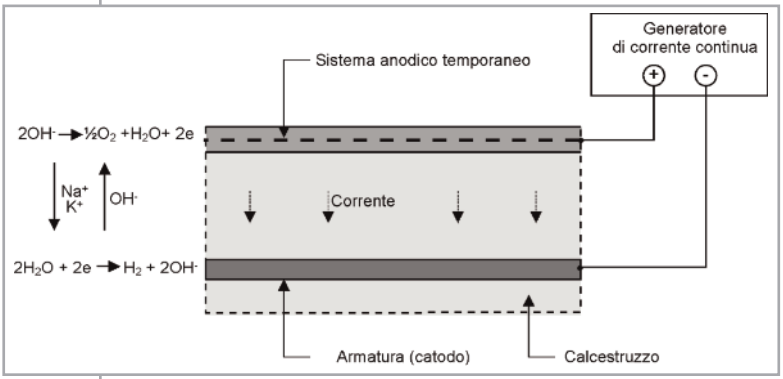


Figura 3 - *Schematizzazione della applicazione del trattamento di rialcalinizzazione.*

Affinché l'efficacia del trattamento sia mantenuta nel tempo, è necessario che la quantità di cloruri che resta nel calcestruzzo non sia tale da innescare la corrosione delle armature per un certo periodo di tempo. Per stabilire se questa condizione si può considerare verificata, in genere si prelevano campioni di calcestruzzo prima, durante e al termine del trattamento per stabilire l'evoluzione dei profili di concentrazione. Si ritiene che il trattamento abbia avuto buon esito e possa essere considerato durevole se la quantità di cloruri alla superficie dell'acciaio non supera 0.4% rispetto alla massa di cemento (purché l'ulteriore penetrazione di cloruri sia prevenuta mediante applicazione di un rivestimento o di un trattamento idrorepellente).

Il trattamento di rimozione dei cloruri richiede il monitoraggio del sistema di erogazione della corrente, in termini ad esempio di corrente circolante e tensione di alimentazione. È, inoltre, auspicabile che gli effetti del trattamento siano monitorati anche in seguito, ad esempio mediante mappature del potenziale. Infine, possibili effetti collaterali legati alla applicazione della elevata corrente catodica, come ad esempio la reazione alcali-aggregati, la perdita di aderenza tra armatura e calcestruzzo e l'infragilimento delle barre ad alta resistenza devono essere accuratamente presi in considerazione prima della scelta di questa tecnica di intervento, ed eventualmente valutati in via preliminare mediante applicazione su piccole aree della struttura da trattare.

RIALCALINIZZAZIONE

Il trattamento di rialcalinizzazione del calcestruzzo fu introdotto dalla Noteby negli anni '80 e prevede l'uso di una rete di acciaio inglobata in polpa di cellulosa imbevuta con una soluzione di carbonato di sodio come sistema anodico. Recentemente è stato proposto anche l'utilizzo di anodi galvanici [6]. Non esiste una normativa per la rialcalinizzazione, ma è stata pubblicata una specifica tecnica [7].

L'applicazione della rialcalinizzazione è analoga a quella della rimozione dei cloruri e prevede l'applicazione di una corrente continua tra un sistema anodico temporaneo e l'armatura (Figura 3). L'anodo è costituito da una rete di titanio attivato o di acciaio a contatto con soluzioni di carbonato (tipicamente di sodio). La corrente applicata, che è dell'ordine di 1-2 A/m^2, è in grado di rialcalinizzare spessori di calcestruzzo di diversi centimetri. La durata del trattamento varia da qualche giorno a qualche settimana; al termine di questo periodo, il sistema anodico viene rimosso.

Alla superficie dell'armatura sono prodotti ioni ossidrile, una parte dei quali migra verso l'anodo; contemporaneamente, ioni carbonato penetrano dal sistema anodico verso l'interno del calcestruzzo, attraverso diversi meccanismi (elettroosmosi, diffusione, assorbimento capillare). I due fronti di rialcalinizzazione avanzano (Figura 4) e quando si incontrano il copriferro risulta completamente alcalino. Per determinare la durata del trattamento si utilizza spesso un criterio empirico secondo il quale la rialcalinizzazione del copriferro si ottiene con una carica circolata di 200-450 Ah/m^2 (a seconda del tipo di cemento e della composizione del calcestruzzo). Tuttavia, questo non indica

necessariamente l'avvenuta ripassivazione della armatura. La determinazione della fine del trattamento viene effettuata analizzando il contenuto di sodio nel calcestruzzo (prelevato mediante carotaggio durante il trattamento) oppure mediante indicatori di pH (a questo proposito, la timolftaleina, avendo punto di viraggio a pH circa 10, è considerata più indicata rispetto alla fenolftaleina che ha punto di viraggio a pH di circa 9). L'effettiva ripassivazione dell'armatura può essere studiata mediante metodi elettrochimici, anche se la loro interpretazione può essere più difficoltosa rispetto alle normali condizioni di corrosione libera: ad esempio, il potenziale può richiedere tempi lunghi prima che gli effetti della polarizzazione catodica si annullino, mentre la velocità di corrosione misurata con il metodo della polarizzazione lineare presenta qualche incongruenza, come si vedrà meglio nel seguito.

Come già visto per la rimozione dei cloruri, anche per la rialcalinizzazione occorre considerare la durabilità del trattamento, cioè la possibilità di mantenere condizioni di passività sulla armatura per tempi sufficientemente lunghi, eventualmente ricorrendo a rivestimenti superficiali che impediscano la diffusione della anidride carbonica nel calcestruzzo. Visti i valori di carica circolata, sensibilmente inferiori a quelli usati nella rimozione dei cloruri, in genere gli effetti collaterali legati alla applicazione del trattamento possono essere trascurati o prevenuti: ad esempio, il rischio di reazione alcali-aggregati può essere mitigato usando elettroliti a base di litio, la perdita di aderenza tra acciaio e calcestruzzo non è mai stata osservata. Permangono, invece, i rischi di infragilimento da idrogeno su armature ad alta resistenza.

ESPERIENZE AL LABORATORIO *mCD*

In seguito alle prime ricerche effettuate da P. Pedeferri alla fine degli anni '80 [8], diversi aspetti riguardanti i metodi elettrochimici nel calcestruzzo sono stati studiati presso il Laboratorio *mCD* del Politecnico di Milano. I prossimi paragrafi riassumono brevemente i risultati più significativi ottenuti relativamente al metodo della rialcalinizzazione elettrochimica.

Prove sperimentali sulla rialcalinizzazione

Diverse ricerche hanno studiato, mediante prove di laboratorio, il trattamento di rialcalinizzazione, in relazione sia al ripristino della alcalinità del calcestruzzo, sia alle condizioni di corrosione delle armature. La rialcalinizzazione del calcestruzzo dipende, oltre che dalla densità di carica circolata, anche dal rapporto acqua/cemento del calcestruzzo (a/c), dal tipo di cemento e dal contenuto di cloruri. Ad esempio, la Figura 5 confronta l'avanzamento della rialcalinizzazione nel copriferro di provini cilindrici di calcestruzzo (con l'armatura posta lungo l'asse), aventi diversa composizione in termini di tipo di cemento, rapporto a/c e contenuto di cloruri. Lo spessore alcalino intorno all'armatura è maggiore per il calcestruzzo con a/c di 0.7 rispetto al calcestruzzo con a/c di 0.55. Poiché la quantità di alcalinità prodotta è la stessa nei due casi, si deduce che la maggiore porosità facilita il trasporto di ioni ossidrile. Anche se l'indicatore fenolftaleina non consente di discernere tra diversi valori di pH, si può supporre che il pH sia inferiore nel caso di calcestruzzo più poroso in quanto gli ioni ossidrile sono più "diluiti" nella soluzione dei pori. Nella Figura 5 si osserva che anche il contributo alla rialcalinizzazione dovuto alla penetrazione dell'elettrolita alcalino risente della porosità del calcestruzzo. Un altro fattore è il tipo di cemento: il calcestruzzo preparato con cemento d'altoforno (CEM III/B) mostra spessori alcalini intorno all'armatura inferiori rispetto a quelli di un calcestruzzo preparato con cemento portland al calcare (CEM II/A-LL). La presenza di cloruri, anche in piccoli tenori, riduce lo spessore di rialcalinizzazione, a causa del contributo dei cloruri al trasporto della corrente (che è benefico in quanto allontana i cloruri dall'armatura, tuttavia riduce la quantità di ioni ossidrile trasportata dalla corrente) [10].

L'alcalinità del calcestruzzo in seguito al trattamento, rilevata mediante prova alla fenolftaleina, non indica necessariamente condizioni di passività sull'armatura, che devono essere verificate. Considerato che un pH di 11.5 è necessario per passivare l'acciaio, e che questo valore viene ottenuto nel calcestruzzo a contatto con l'armatura in seguito alla applicazione del trattamento, è stato spesso assunto a priori che l'armatura sia ripassivata. Tuttavia è stato evidenziato che il comportamento alla corrosione dell'acciaio nel calcestruzzo rialcalinizzato presenta delle differenze rispetto a quello dell'acciaio nel calcestruzzo inizialmente alcalino. In particolare, a questo riguardo, sembra essere determinante lo stato di corrosione delle arma-

Figura 4 - *Avanzamento dei fronti di rialcalinizzazione durante il trattamento.*

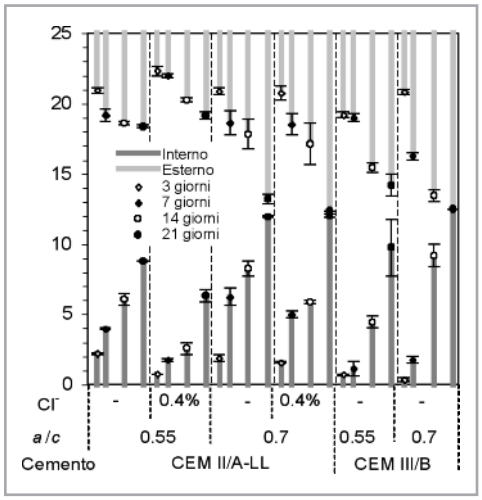


Figura 5 - *Posizione del fronte di rialcalinizzazione nel copriferro di provini con diversa composizione [9].*

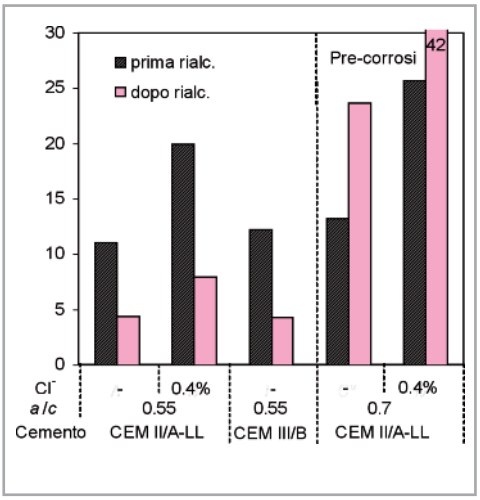


Figura 6 - *Velocità di corrosione prima e dopo il trattamento, su provini con diversa composizione esposti in ambiente umido.*

ture prima della applicazione del trattamento: ad esempio, la Figura 6 mostra la velocità di corrosione misurata con la tecnica della polarizzazione lineare prima e dopo l'applicazione del trattamento. I provini sui quali il trattamento è stato applicato dopo pochi mesi di esposizione a un ambiente umido, e quindi in seguito ad un breve periodo di propagazione della corrosione, hanno mostrato una diminuzione della velocità di corrosione. Invece, i provini sui quali il trattamento è stato applicato dopo un anno di esposizione all'ambiente umido (provini precorrosi), durante il quale la corrosione è propagata attivamente (senza però fessurare il copriferro), hanno addirittura mostrato un incremento della velocità di corrosione. Questo è stato osservato su calcestruzzi di diversa composizione e in diversi ambienti; è interessante osservare che il potenziale dell'armatura è sempre aumentato in seguito al trattamento [10]. L'incremento della velocità di corrosione è stato osservato anche da altri ricercatori [11]. Sono in corso ulteriori prove per meglio comprendere questo fenomeno [12].

Applicazioni in campo

In campo sono stati eseguiti due interventi di applicazione del trattamento di rialcalinizzazione. In entrambi i casi l'applicazione dell'intervento è stata preceduta da indagini dettagliate, effettuate mediante prove distruttive e non distruttive, volte a stabilire le cause, l'estensione e l'evoluzione del degrado da corrosione.

Il primo caso è relativo alle colonne del campanile della Chiesa di Sant'Antonio abate a Valmadrera (LC), costruita negli anni 1926-1930 [13]. Le colonne si trovano alla sommità del campanile a sostegno della cupola, sono alte 8 metri e sono cave; lo spessore della parete di calcestruzzo è di 55-78 millimetri. Le colonne presentano danneggiamenti dovuti alla corrosione da carbonatazione dell'armatura. In questo caso si è optato per l'intervento di rialcalinizzazione in quanto gli esigui spessori della parete delle colonne non avrebbero consentito la corretta esecuzione dell'intervento convenzionale (che prevede la rimozione di tutto il calcestruzzo non protettivo). Dopo una applicazione di prova su piccole zone di due colonne, si è deciso di applicare il trattamento a tutte le colonne utilizzando una densità di corrente di 0.8 A/m^2 per 21 giorni. La Figura 7 mostra il potenziale dell'armatura delle colonne misurato durante e in seguito alla applicazione della corrente. Durante il trattamento si sono raggiunti potenziali molto negativi, compresi tra –1 e –2 V/CSE; in seguito, il potenziale è aumentato e si è portato a valori di –0.35 V/CSE. I saggi alla fenolftaleina effettuati su campioni di calcestruzzo prelevati dalle colonne hanno indicato l'effettiva rialcalinizzazione del calcestruzzo, dovuta principalmente alla produzione di

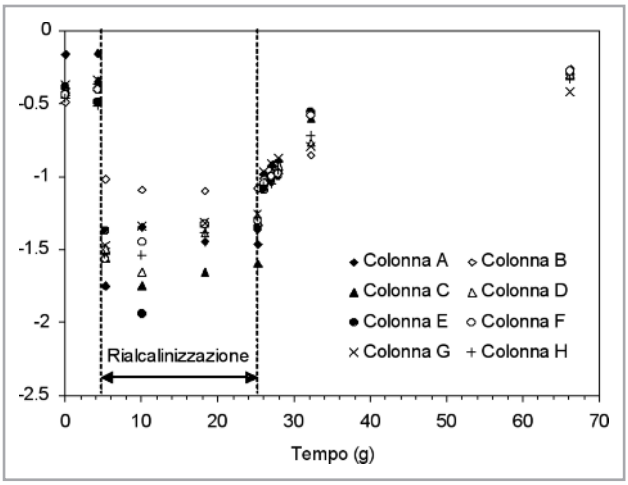


Figura 7 - *Potenziale dell'armatura misurato sulle colonne prima, durante e dopo il trattamento di rialcalinizzazione [13].*

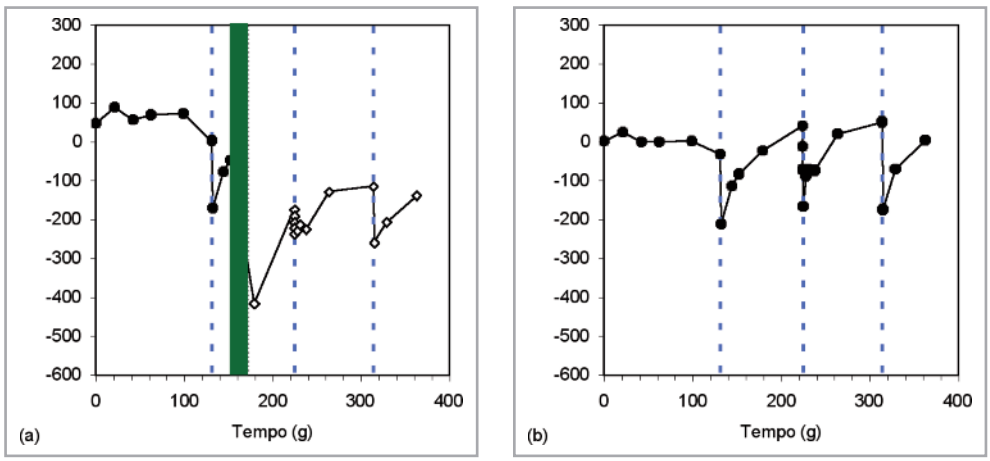


Figura 8 - *Potenziale dell'armatura nella zona rialcalinizzata (a) e di controllo (b). Linee tratteggiate = bagnature. Banda ombreggiata = trattamento di rialcalinizzazione [14]*

alcalinità alla superficie dell'armatura (il contributo legato alla penetrazione dell'elettrolita alcalino è risultato trascurabile).
Il secondo caso è relativo ai pilastri della Chiesa di Santa Maria dell'Annunciata all'ospedale San Carlo Borromeo di Milano, progettata da Gio Ponti e costruita negli anni 1964-1967 [14]. I pilastri in c.a. si trovano in un avanzato stato di degrado a causa della corrosione da carbonatazione delle armature. In questo caso l'esigenza di conservare il calcestruzzo è derivata dalla necessità di conservare il "faccia a vista" originale dei pilastri. Il trattamento di rialcalinizzazione è stato applicato in via preliminare su porzioni di due pilastri (1 A/m^2 per 21 giorni); per confronto si sono considerate porzioni di riferimento lasciate tal quali. L'effetto del trattamento è stato studiato con le consuete misure di potenziale e con il prelievo di campioni di calcestruzzo; inoltre, al termine del trattamento si sono effettuate periodiche bagnature del calcestruzzo per valutare le condizioni di corrosione dell'armatura in condizioni simili a quelle reali (i pilastri erano temporaneamente protetti dalla pioggia dal ponteggio). La Figura 8 mostra l'andamento del potenziale dell'armatura nella zona soggetta a rialcalinizzazione (a) e in quella di controllo (b). Si osserva che nella zona di controllo il potenziale è maggiore rispetto alla zona rialcalinizzata, tuttavia l'abbassamento del potenziale che si verifica in seguito alla bagnatura del calcestruzzo è più contenuto per la zona rialcalinizzata, indicando quindi un minore effetto della umidità, coerente con la ripassivazione dell'acciaio.

METODI ELETTROCHIMICI "INNOVATIVI"

I recenti sviluppi legati ai metodi elettrochimici temporanei sono relativi alla combinazione del trattamento (rimozione dei cloruri o rialcalinizzazione) con l'iniezione di sostanze contenute nell'elettrolita anodico, come inibitori di corrosione e nanoparticelle, con l'obiettivo di migliorare alcune specifiche proprietà del calcestruzzo e di prolungare gli effetti del trattamento nel tempo.

I metodi elettrochimici innovativi prevedono anche l'iniezione di sostanze trasportate dalla corrente: inibitori, nano particelle, sigillanti.

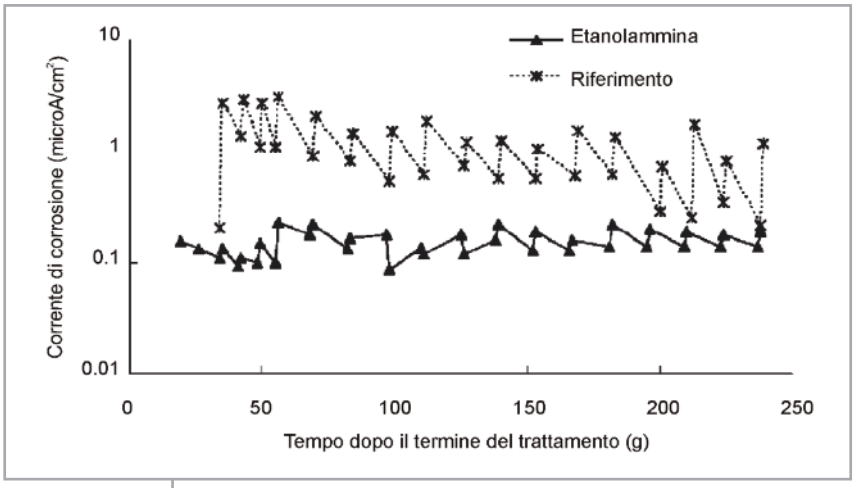


Figura 9 - *Velocità di corrosione dell'armatura in seguito al trattamento di iniezione elettrochimica di inibitore (5 A/m2 per 7 giorni) e per confronto in un provino di controllo carbonatato (ripreso con modifiche da [11]).*

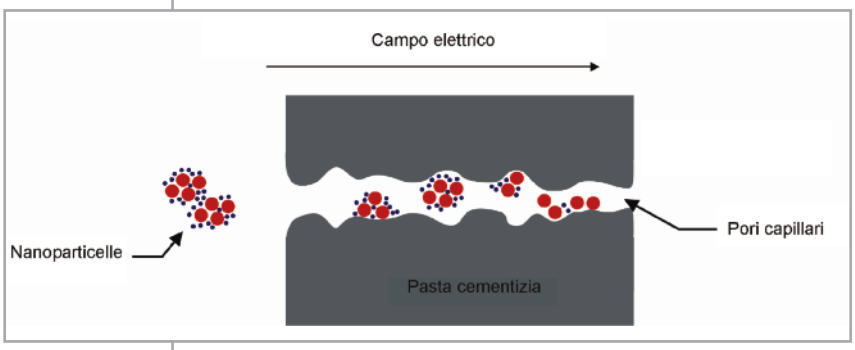


Figura 10 - *Schematizzazione del meccanismo di iniezione di nanoparticelle cariche positivamente.*

L'iniezione di inibitori di corrosione è stata proposta sia per calcestruzzo carbonatato [11] sia per calcestruzzo contaminato da cloruri [15]. Ad esempio, la Figura 9 mostra l'andamento della velocità di corrosione in un provino carbonatato soggetto alla iniezione di etanolammina e, per confronto, del provino di controllo, in condizioni cicliche di asciutto e bagnato. La velocità di corrosione è risultata più bassa rispetto ai provini di controllo carbonatati e anche rispetto ai provini soggetti al solo trattamento di rialcalinizzazione. Questo trattamento è stato recentemente applicato su una struttura reale [16].

Per quanto riguarda l'iniezione di nanoparticelle, che è schematizzata in Figura 10, alcune pubblicazioni riportano la possibilità di forzarne l'ingresso mediante l'applicazione di corrente, aumentando la durabilità del calcestruzzo, sia in relazione a fenomeni di degrado come l'attacco solfatico e il dilavamento, sia in relazione alla corrosione delle armature [17]. Gli effetti della aggiunta di nanoparticelle sulle proprietà del calcestruzzo hanno ricevuto grande attenzione negli ultimi anni; il meccanismo di iniezione consentirebbe di sfruttare i benefici legati alle nanoparticelle anche su strutture in calcestruzzo esistenti. Questo metodo merita ulteriori approfondimenti prima di essere considerato praticabile [18]. A questo riguardo, nei nostri laboratori è attualmente in corso una ricerca sperimentale volta allo studio degli effetti di alcuni tipi di nanoparticelle (nanosilice e nanoallumina) sul calcestruzzo. Le nanoparticelle vengono aggiunte inizialmente al getto oppure iniettate nel calcestruzzo mediante una corrente; oltre alla verifica del meccanismo di iniezione, la ricerca si propone di studiare gli effetti delle nanoparticelle sulle proprietà del calcestruzzo legate alla sua durabilità (carbonatazione, penetrazione di cloruri, porosità). La ricerca è svolta nell'ambito di un progetto europeo di collaborazione tra università europee (University of Plymouth, Chalmers University of Technology, Politecnico di Milano) e cinesi (Zhejiang University, Shenzhen University).

CONCLUSIONI

I metodi elettrochimici temporanei possono costituire una valida alternativa non solo rispetto al metodo convenzionale, ma anche rispetto ai metodi elettrochimici permanenti (come la protezione catodica), in quanto consentono di conservare il calcestruzzo strutturalmente sano e di ridurre l'alterazione della superficie.

L'applicazione dei metodi elettrochimici temporanei richiede una valutazione preliminare dei possibili effetti collaterali della corrente applicata, come ad esempio il rischio di infragilimento da idrogeno in presenza di armature ad alta resistenza o la reazione alcali-aggregati. Inoltre, è opportuno prevedere delle forme di monitoraggio degli effetti dei trattamenti anche in seguito alla loro applicazione per verificare le condizioni di corrosione dell'armatura.

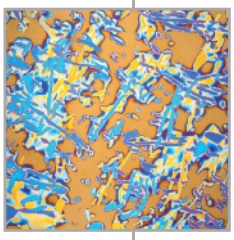
Accanto ai metodi elettrochimici temporanei "tradizionali" sono in fase di sviluppo metodi "innovativi" che sfruttano la corrente per iniettare nel calcestruzzo sostanze con possibili effetti benefici sul calcestruzzo e sulle armature. Questi metodi sono attualmente per lo più in fase sperimentale, e richiedono ulteriori indagini per chiarire il meccanismo di iniezione e il mantenimento dei suoi effetti nel tempo.

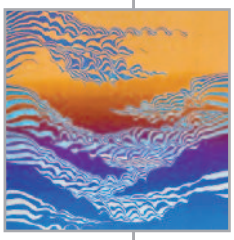
RINGRAZIAMENTI

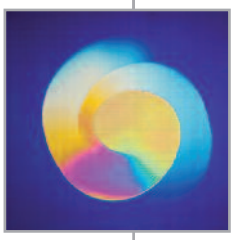
Questa nota è dedicata con grande affetto alla memoria di Pietro Pedeferri, come riconoscimento per i suoi contributi allo studio dei metodi elettrochimici nel calcestruzzo.

RIFERIMENTI

[1] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedeferri, E. Redaelli, R. Polder, Corrosion of steel in concrete. Prevention, diagnosis, repair, 2nd ed., Wiley-VCH, Weinheim (2013).
[2] R.B. Polder, H.J. Van den Hondel, Electrochemical realkalisation and chloride removal of concrete. State of the art, laboratory and field experience, RILEM International Conference on Rehabilitation of Concrete Structures, Melbourne, Australia (1992).
[3] CEN/TS 14038-2, Electrochemical realkalisation and chloride extraction for reinforced concrete. Part 2: Chloride extraction (2004).
[4] COST Action 534, New materials, systems, methods and concepts for prestressed concrete structures. Final Report (2009).
[5] B. Elsener, U. Angst, Corrosion Science, Vol. 49, n. 12 (2007) 4504.
[6] V. Pollet, R. Guerin, C. Tourneur, H. Mahouche, A. Raharinaivo, Concrete realkalisation using sacrificial anode, Eurocorr, Trondheim, Norway (1997).
[7] CEN/TS 14038-1, Electrochemical realkalisation and chloride extraction for reinforced concrete. Part 1: Realkalisation (2004).
[8] L. Bertolini, F. Bolzoni, B. Elsener, P. Pedeferri, L'Edilizia, Novembre (1993) 73.
[9] E. Redaelli, M. Carsana, M. Gastaldi, F. Lollini, L. Bertolini, Corrosion Reviews, Vol. 29, n. 5-6 (2011) 179.
[10] E. Redaelli, L. Bertolini, Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 41, n. 7 (2011) 817.
[11] J. Kubo, S. Sawada, C.L. Page, M.M. Page, Materials and Corrosion, Vol. 59, n. 2 (2008) 107.
[12] E. Redaelli, A. Della Pergola, L. Bertolini, Rialcalinizzazione elettrochimica del calcestruzzo carbonatato: studio del comportamento anodico in soluzione di armature in acciaio al carbonio, Giornate Nazionali AIM, Napoli (2013).
[13] L. Bertolini, M. Carsana, E. Redaelli, Journal of Cultural Heritage, Vol. 9, n. 4 (2008) 376.
[14] L. Bertolini, E. Redaelli, D. Lattanzi, M. Mapelli, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 14, n. 4 (2010) 411.
[15] Y. Liu, X. Shi, Corrosion Reviews, Vol. 27, n. 1-2 (2009) 53.
[16] J. Kubo, Y. Tanaka, C.L. Page, M.M. Page, Construction and Building Materials, Vol. 39 (2013) 2.
[17] H.E. Cardenas, Nanomaterials in concrete. Advances in protection, repair, and upgrade, DEStech Publications Inc (2012).
[18] M. Sánchez-Moreno, M.C. Alonso, I. Diaz, R. González, Improvement of hardened concrete durability by nanosilica electromigration, ICSHM (2013) 70.







Prevenzione catodica delle armature nel calcestruzzo: il panorama internazionale

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

di

S. Tremolada
Industrie De Nora S.p.A.
20134 Milano

La fondamentale applicazione della "prevenzione catodica" delle armature nel calcestruzzo è stata ideata e sviluppata dal Professor Pietro Pedeferri. 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 Pedeferri 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], Pedeferri 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 Pedeferri" 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_{pitt} 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_{pitt} e quindi impedisce l'innesco della corrosione anche per alti tenori di cloruri.

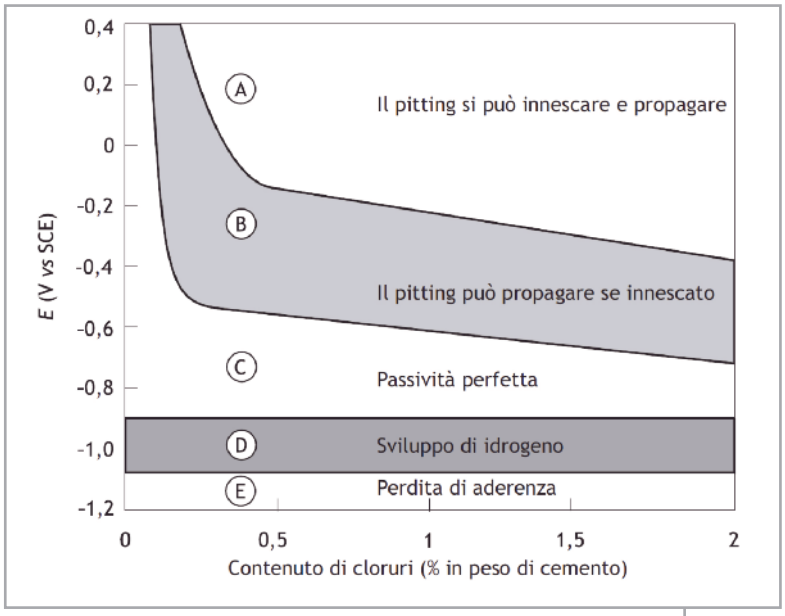


Figura 1 - *Il primo "Diagramma Pedeferri" che rappresenta le condizioni di corrosione delle armature del calcestruzzo in funzione del potenziale e del contenuto di cloruri.*

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 antigelo 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/m^2 per l'installazione e 0,002 GJ/m^2 all'anno per l'alimentazione, è superiore a quello di un comune coating cementizio o acrilico (rispettivamente 0,015 GJ/m^2 e 0,025 GJ/m^2), che hanno però ha 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. Pedeferri 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 antigelo 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 m^2. 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:

a) 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/m^2. 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.
b) le zone anodiche sono state definite di ridotte dimensioni (circa 100 m^2) 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.
c) 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.
d) 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/m^2. Il voltaggio del trasformatore fu

La prevenzione catodica della armature nel calcestruzzo – tecnica inventata e messa a punto da Pietro Pedeferri – 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 m^2 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/m^2, riferita alla superficie dell'acciaio. La massima densità di corrente di progetto ammessa nel cemento è 110 mA/m^2.
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/m^2. 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®[1] 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 m^2 per una corrente di progetto di 10 A adottando una densità di corrente di progetto di 10 mA/m^2. 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:

1 - LIDA® è un marchio registrato di Industrie De Nora.

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

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.*

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 parabordo 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 parabordo nei punti di ancoraggio 1 e 2, lungo circa 500 m, erano pesantemente contaminate da cloruri con molti fenomeni di fessurazione e scheggiatura. Il parabordo è collocato circa mezzo metro al di

sopra del livello dell'alta marea. Era necessario installare un nuovo sistema parabordo 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/m^2 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.*

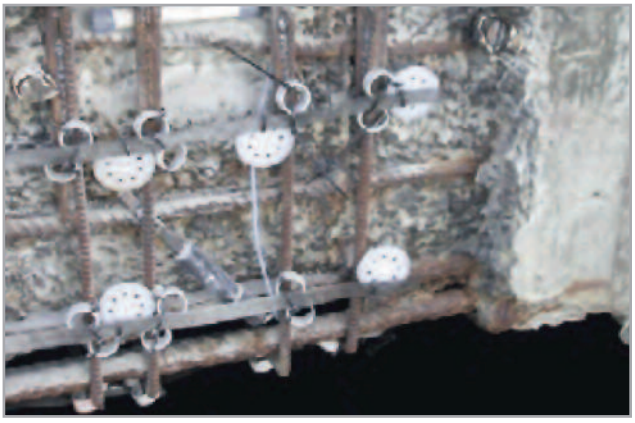


Figura 5 - *La parte finale della sezione da 3,5 m con un elettrodo di riferimento impiantato a 0,5 m dalla base*

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 riferimento, 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 raggiungo 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 addizionali. 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 soluzione 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/m2*
Densità di corrente anodica Max	*110 mA/m2*
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 all'interno della soletta del ponte che sono esposte all'acqua o all'atmosfera; le sezioni

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

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 costituire 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 (Figure 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 addizionale 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, applicati 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 m^2. 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 Pedeferri 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.

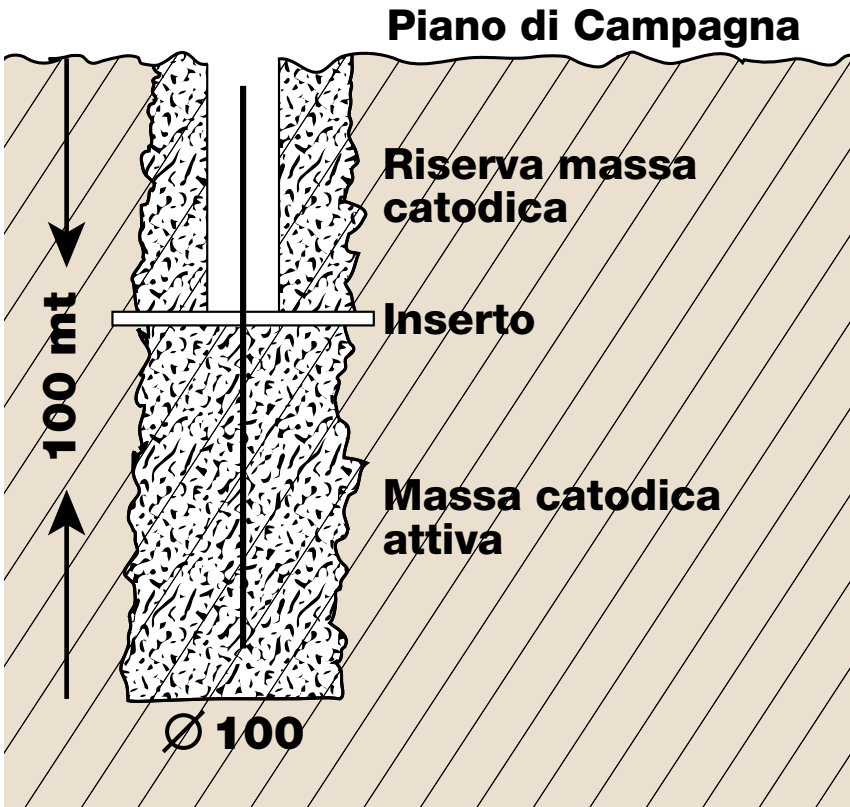
Sydney Opera House

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

[1] L. Lazzari, M. Ormellese, *La prevenzione catodica dei materiali attivo - passivi (un omaggio a Pietro Pedeferri)*, 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. Pedeferri, M. Ormellese, Protezione Catodica, Polipress – Politecnico di Milano, 2006
[5] C. Atkins, L. Buckley & P. Lambert, *Sustainability and Repair*, Concrete Communication Conference , University College Londond, 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. Pedeferri, 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. Pedeferri, 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

Dispersore Verticale Ricaricabile

- Una prima ed unica perforazione
- Niente autorizzazioni
- Niente disagi per i cittadini
- Niente rifiuti
- Velocità di esecuzione



Procormet

Via G. Cardano, 33
80055 Portici (Na)
procormet@libero.it

Cerchiamo partner

APCE
ASSOCIAZIONE PER LA PROTEZIONE DALLE CORROSIONI ELETTROLITICHE
www.apce.it - info@apce.it

in collaborazione con

POLITECNICO DI MILANO
PoliLaPP
Laboratorio di Corrosione dei Materiali "Pietro Pedeferri"

ENERGIAMEDIA

organizza

programma del Workshop

Protezione delle Reti Idriche dalla Corrosione

valutazioni tecnico-economiche esperienze e prospettive

26 novembre 2013 - Aula Beltrami
Politecnico di Milano
Piazza Leonardo da Vinci, 32 - 20133 Milano
Edificio 5 (piano terra)

Programma della giornata

08.45 – 09.15 Registrazione

Sessione mattutina (coordina L. Lazzari – Politecnico di Milano)
09.15 – 09.30 Apertura dei lavori: V.M. Cannizzo (Presidente APCE)
09.30 – 09.50 Le reti idriche in Italia (a cura Università degli studi di Roma "La Sapienza")
09.50 – 10.10 Intervento Autorità AEEG
10.10 – 10.40 La corrosione "esterna" delle reti idriche metalliche (a cura PoliLaPP)

10.40 – 11.10 *Coffee Break*

11.10 – 11.40 I metodi di protezione delle tubazioni interrate (a cura APCE)
11.40 – 12.10 Valutazione tecnico-economica dei metodi di protezione (a cura PoliLaPP)
12.10 – 12.40 La prevenzione della corrosione per garantire la qualità dell'acqua (a cura Politecnico di Milano)

12.40 – 14.00 *Pausa pranzo*

Sessione pomeridiana (coordina E. Martinelli – Energia Media)
14.00 – 14.30 Formazione e Certificazione (a cura APCE)
14.30 – 15.30 Esperienze di campo
15.30 – 16.30 Tavola rotonda e conclusioni

Hanno assicurato la presenza:
UNI, Acea Ato2, Acegas-Aps, Metropolitana Milanese, Acquedotto Pugliese; Tecnosystem
Sono stati invitati:
Ministero Ambiente tutela del territorio e del mare, Ministero Salute, Federutility.

Iscrizione gratuita, ma obbligatoria entro 15-11-2013 (massima capienza 90 persone).

Segreteria del workshop

Prof. Marco Ormellese
Politecnico di Milano
PoliLaPP - Laboratorio di Corrosione dei Materiali "Pietro Pedeferri"
Dipartimento Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta"
Via Mancinelli, 7 - 20131 Milano
Tel: 02 23.99.31.18 - Fax: 02 23.99.31.80
E-mail: polilapp@chem.polimi.it

Per sponsorizzare l'evento contatta la segreteria del Workshop

SCARICA IL MODULO D'ISCRIZIONE

APCE
ASSOCIAZIONE PER LA PROTEZIONE DALLE CORROSIONI ELETTROLITICHE
www.apce.it - info@apce.it

in collaborazione con

POLITECNICO DI MILANO
PoliLaPP
Laboratorio di Corrosione dei Materiali "Pietro Pedeferri"

ENERGIAMEDIA

organizza

modulo d'iscrizione al Workshop

Protezione delle Reti Idriche dalla Corrosione

valutazioni tecnico-economiche esperienze e prospettive

26 novembre 2013 - Politecnico di Milano

Cognome.....

Nome.....

Società o Ente.....

Indirizzo..... Cap.....

Città..... Prov.....

Tel..... Fax .....

e-mail.....

Data..... Firma.....

Da restituire alla segreteria del Workshop entro 15 novembre 2013

La partecipazione al Workshop È GRATUITA

Informazioni e Segreteria del Workshop

Prof. Marco Ormellese
Politecnico di Milano
PoliLaPP - Laboratorio di Corrosione dei Materiali "Pietro Pedeferri"
Dipartimento Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica "G. Natta"
Via Mancinelli, 7 - 20131 Milano (MI) - Italy
Tel: 02 23.99.31.18 - Fax: 02 23.99.31.80
E-mail: polilapp@chem.polimi.it

PROGRAMMA WORKSHOP

www.apce.it/news/programma-reti-idriche/

Cathodic protection of steel in concrete - 25 years of experience in the Netherlands

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

Rob B. Polder
TNO Technical Sciences, Delft, The Netherlands
2 Delft University of Technology, Delft, The Netherlands

Willy H.A. Peelen
TNO Technical Sciences, Delft, The Netherlands

This paper reviews 25 years of experience with cathodic protection of steel in concrete in The Netherlands. Three phases are distinguished from the late 1980s until present: pioneering, development and maturity. Technical and non-technical developments are highlighted and an outlook of the future is presented.

INTRODUCTION

Corrosion of reinforcing steel in concrete structures may occur, either due to penetration of chloride ions from de-icing salts or sea water spray or due to chloride ions having been mixed in as a set accelerator [1]. Reinforcement corrosion causes concrete cracking, spalling of the cover and steel diameter reduction, eventually resulting in loss of safety. Conventional repair involves heavy, labour intensive and costly work. Competition pressure works against the required quality and quantity levels (cleaning of reinforcement, removal of contaminated concrete). Consequently, conventional repair is short lived in many cases. Corrosion reappears quickly and structures need to be repaired again after a relatively short time, further increasing their life-cycle cost. In a European study it was found that repairs had a short life in practice [2] and a Dutch review presented a similar picture [3]. A completely different situation exists for cathodic protection (CP) as a corrosion protection method. Cathodic protection of reinforcing steel has been applied to concrete structures with corrosion damage in Europe for over 25 years and slightly longer in the US [4, 5, 6, 7, 8]. A recent study reports on long term performance of CP systems in UK motorway structures [9]. This paper presents experience with CP of concrete in The Netherlands with reference to developments abroad.

PIONEERING PHASE 1987-1995

In the 1970s corrosion of steel in concrete developed on a large scale in the US. Early experiments with CP by Stratfull [10] showed the effectiveness of the principle. In the mid-1980s American technology was introduced in Europe. The first CP system in The Netherlands was installed in 1986/7 on a cycle lane of a bridge, the Stadium Viaduct in Rotterdam [6]. The anode was made up of carbon filled polymer cables with a copper wire core. This marked the start of the pioneering period of CP in The Netherlands. Subsequently, a few projects were made with this anode. Next, activated titanium anodes were introduced and used in a precast concrete façade. Titanium strips were placed in holes drilled longitudinally in 2500 precast cantilever beams with mixed in chloride in two apartment buildings in 1990. It appeared that repair of precast concrete with mixed in chloride was a major problem area in the country, that was not solved effectively by

conventional repair: within a few years corrosion and concrete cracking reappeared in many cases. On the other hand, CP showed to be effective and durable. Carbon based conductive coatings were introduced as anode material and applied to several buildings. Considering that uniform current distribution was important and would be mainly determined by electrical resistivity of the concrete, it was considered that the resistivity of materials used for repairs associated with CP should be similar to that of the parent concrete. CP companies and knowledge institutes worked together to draw up a CUR Recommendation published in 1996 [11]. It addressed curative application to reinforced concrete and had the character of a guideline including technical considerations and limiting values. In this period, a total of 16 structures had been provided with CP, mainly buildings with mixed in chloride.

DEVELOPMENTAL PHASE 1996-2004

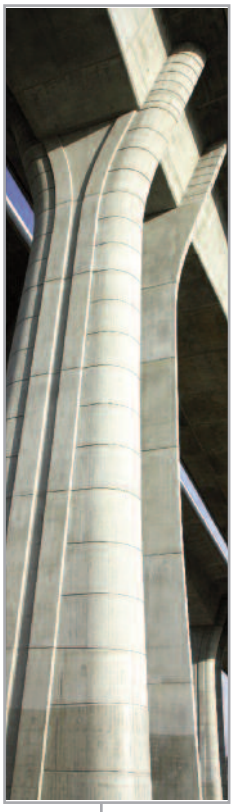
In the next phase, application of CP to bridges and other infrastructure was developed. In one project, drilled in titanium strip anodes were foreseen in a thick wall of a basement of a bridge where corrosion induced delamination of the cover was widespread. However, reinforcing bars were not positioned at regular intervals as expected and many additional holes had to be drilled to avoid short circuiting between anode strips and bars. It also appeared impossible to install a regular maintenance contract between the managing organisation and the CP company. In another bridge corrosion had developed in the edge beam of a bridge deck above the abutments adjacent to leaking joints. The complication was that the deck was post-tensioned and concern existed for overprotection, causing hydrogen evolution and possibly hydrogen embrittlement of the prestressing steel. The problem was solved following a consult of Pietro Pedeferri, who made clear that monitoring the potential of the prestressing and maintaining it above a safe value would exclude hydrogen evolution [12]. This approach and the safe value was later adopted in the European Standard EN 12696, that was published in 2000 [13]. In addition to allowing CP of prestressed concrete, it also included preventive application, Cathodic Prevention, which had been introduced by Pedeferri [12]. The Standard had a performance based approach (rather than a technical guideline). In this period galvanic anodes were introduced for CP in concrete, based on the sacrificial action of zinc. Zinc sheet with an ion conductive adhesive was applied to both buildings and bridges. In this period, a total of 74 structures were provided with CP, comprised of buildings with mixed in chloride, bridges and parking structures.

MATURITY PHASE 2005-PRESENT

In this period, CP has become a well-accepted method for long term protection of corroding structures. Involved companies, although relatively small and with economic ups and downs, joined in sponsoring a collective research project by TNO. It included setting up a database of CP systems in the country and further developing numerical modelling of CP (as follow up to previous work in collaboration with Politecnico Milano and in EU project ARCHES). These items will briefly be related here.

Ultimo 2010, a total of 150 concrete structures had CP installed, comprised of 105 buildings (dwellings, offices, parking and industrial buildings) and 45 bridges and other infrastructure, with a total of 85,000 square meters of protected concrete surface [14]. These figures do not include 65,000 m2 of ground floor elements with mixed in chloride provided with CP. Out of 150 CP systems, 65 had conductive coating anodes, 50 activated titanium and 35 galvanic anodes. For 105 good documentation was provided; 50 documented cases had been operating for ten years or more and 55 cases for less than ten years. The remaining 45 cases were not documented and/or not monitored. The survey and subsequent analysis showed a mixed picture of some weak details and an overall low rate of system degradation. Weak details included accelerated corrosion of poorly insulated anode-copper connections; and some degradation of primary anodes in coating systems, in particular in older systems. Companies had improved most of these weak points, as was borne out by later systems. Very low numbers of overall anode degradation were found. However, local degradation of conductive coatings due to water leakage from overlying parts was an important cause of the need for (some) maintenance. In particular conductive coating anodes on buildings with relatively sheltered facades may last as long as 15 to 20 years. Activated titanium systems perform well over at least 20 years in documented cases; working lives of 25 and more years seem very well possible.

Numerical modelling of CP can be attractive in the design phase for



minimising anode material while guaranteeing good protection where needed including in depth (throwing power). Such models are a combination of finite element modelling of steel and concrete geometry and electrochemical input parameters for steel, concrete and anode. First attempts were based on numerical modelling of corrosion [15] and showed a reasonable agreement with practical cases for preventive effects in a 2-dimensional scheme [16]. Recent work allows full 3-dimensional modelling of sizeable elements (up to 1 m3). However, further work is needed on time dependent effects, although their influence may be rather small beyond a few days or weeks [17]. Importantly, the polarisation of prestressing steel can be predicted, which facilitates safe application to prestressed structures.

CHANGING EXTERNAL CONDITIONS

The good experience with CP of concrete structures has been well known to a small group of scientists, engineers and companies involved in CP of concrete. It is becoming of much wider interest for the construction industry, however, as a consequence of the aging of concrete infrastructure. Aging means in many cases degradation, in particular due to penetration of de-icing salts. From a survey of concrete motorway bridges in The Netherlands it has been found that at an age of 40 years about 5% of these bridges have developed (chloride induced) corrosion related concrete damage, and 50% has such damage after 70 years of service [18].

The majority of Dutch concrete bridges has been built between 1960 and 1980. Combining with data on repair life mentioned above and assuming a total number of bridges in the country of 40,000 (i.e. ten times the c. 4000 motorway bridges), further analysis has predicted the amount of bridges with corrosion damage [19]. For a repair life of ten years, the analysis shows that in 2012 about 500 bridges need repair; in 2024 some 1000 bridges need repair and in 2040 about 2100. A significant number of these repairs involve repair of old repairs! These repairs would involve considerable costs and significant effects on traffic flow. Using CP with an assumed but not unrealistic mean life of 25 years, these numbers would reduce to roughly half. Consequently, large sums of money and societal impact can be saved by applying CP instead of conventional repair.

On another level, a significant development is that organisations responsible for infrastructure employ less and less technical experts. Risk and responsibility for maintaining infrastructure are more and more transferred to contracting companies, who traditionally have a focus on new construction. Contractors thus are facing responsibility for long-term maintenance of road networks including existing structures, for periods between 20 and 50 years. This poses challenges and opportunities: general contractors are usually not very experienced in concrete repair; yet, a method like CP with a proven track record may very well fit in their business philosophy. Moreover, CP monitoring provides unequivocal data of good performance (absence of corrosion); which usually is the criterion for evaluation of such contracts.

In 2012 and 2013, CP is installed on 29 motorway bridges on a total of 1300 corroding (prestressed) beam heads due to joint leakage. Maintenance is organised in a 20 year contract.

In some cases, owners have realised that corrosion can have expensive consequences. After a number of cases with corrosion induced damage due to leaking joints, the Province of Groningen now has decided on a pro-active policy. In the half-joints of a number of new bridges they install cathodic prevention (CPre)! As shown by Pedeferri in the 1990s, a low current suffices to prevent corrosion, which allows economical systems to be installed with simple monitoring [12].

CONCLUSIONS

The experience of the last 25 years or so have shown that CP is a reliable and dependable method to halt corrosion of reinforcement in concrete structures. Lessons have been learned from previous projects, resulting in improved materials and details. Critical design issues can be addressed by numerical modelling. Overall confidence has grown with both CP companies and owners. Unit prices have decreased due to increased (long term) confidence and improved techniques. At the same time, prices for proper conventional repairs have increased. Based on the market in The Netherlands CP prices for protection of infrastructural works are competitive. CP systems work for a very long time and their good performance is systematically shown by measurements. It is expected that the market for CP of concrete will increase considerably in the next few years up to a decade, in particular in infrastructure.

REFERENCES

[1] L. Bertolini, B. Elsener, P. Pedeferri, E. Redaelli, R.B.. Polder, Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair, 2nd Edition, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, ISBN 3-527-33146-8, 414 pp. (2013).

[2] G.P. Tilly, J. Jacobs, Concrete repairs – performance in service and current practice, Bracknell: IHS BRE Press (2007).

[3] J.H.M. Visser, Q. van Zon, Performance and service life of repairs of concrete structures in The Netherlands, International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III, Alexander et al. (eds.), Taylor & Francis, London, ISBN 978-0-415-89952-9 (2012).

[4] K. Grefstad, Cathodic protection applied on Norwegian concrete bridges. Experience and recommendations. Eurocorr05, Lisboa (2005).

[5] O.C.N. Nerland J. Eri, K.A. Grefstad, Ø. Vennesland, 18 years of Cathodic Protection of Reinforced Concrete Structures in Norway – facts and figures from 162 installations. Eurocorr07, Freiburg (2007).

[6] R.B.Polder, Cathodic protection of reinforced concrete structures in The Netherlands - experience and developments. HERON 1998;43(1):3-14.

[7] F. Wenk, D. Oberhänsli, Long-term experience with cathodic protection of reinforced concrete structures, Eurocorr07, Freiburg (2007).

[8] J.S. Tinnea, C.B. Cryer, Corrosion control of Pacific coast reinforced concrete structures: A Summary of 25 years experience. In: 1st International Conference on Heritage and Construction in Coastal and Marine Environment MEDACHS08, Portugal (2008).

[9] C. Christodoulou, G.K. Glass, J. Webb, S. Austin, C. Goodier, Assessing the long term benefits of impressed current cathodic protection. Corrosion Science Vol. 52: (2010) 2671-2697.

[10] R. F. Stratfull, "Cathodic protection of a bridge deck", Materials Performance, Vol. 13 n. 4, (1974) 24.

[11] CUR Aanbeveling 45 Kathodische bescherming van wapening in betonconstructies, Cathodic protection of reinforcement in concrete structures, in Dutch, CUR, Gouda (1996).

[12] P. Pedeferri, Cathodic Protection and Cathodic Prevention, Construction and Building Materials, Vol. 10, No. 5, (1996) 391-402.

[13] CEN. Cathodic protection of steel in concrete. EN 12696 (2000).

[14] R.B. Polder, G. Leegwater, D. Worm, W. Courage, Service life and life cycle cost modelling of Cathodic Protection systems for Concrete Structures, Cement and Concrete Composites (2012) online

[15] E. Redaelli, L. Bertolini, W. Peelen, R. Polder, FEM-models for the propagation of chloride induced reinforcement corrosion, Materials and Corrosion, Vol. 57 n. 8, (2006) 628-635.

[16] R. Polder, W. Peelen, F. Lollini, E. Redaelli, L. Bertolini, Numerical design for Cathodic Protection systems for concrete, Materials and Corrosion, Vol. 60 n. 2, (2009) 130-136.

[17] R. Polder, W. Peelen, B. Stoop, E. Neeft, Early stage beneficial effects of cathodic protection in concrete structures, Materials and Corrosion, Vol. 62 n. 2 (2011) 105-110.

[18] G.C.M. Gaal, Prediction of Deterioration of concrete bridges, Ph.D. thesis, Delft University Press, Delft, Netherlands (2004).

[19] R. Polder, W. Peelen, W. Courage, Non-traditional assessment and maintenance methods for aging concrete structures - Technical and non-technical issues, Materials and Corrosion, Vol. 63 n.12, (2012) 1147-1153

Dal 1° luglio 2013 in vigore il Regolamento europeo sui prodotti da costruzione (CPR)

Dal 1° luglio 2013 è entrato totalmente in vigore il **Regolamento UE n. 305/2011** che fissa le condizioni di armonizzazione per la commercializzazione dei **prodotti da costruzione** e sostituisce per abrogazione la Direttiva 89/106/CEE.
Viene mantenuta la condizione dell'esistenza delle specifiche norme armonizzate a cui ci si deve riferire obbligatoriamente.
A partire da questa data, **per essere immessi sul mercato**, i prodotti da costruzione ricadenti nell'ambito di applicazione di una norma armonizzata, o conformi a un benestare tecnico europeo, dovranno essere accompagnati oltre che dalla **marcatura CE**, anche da una **dichiarazione di prestazione**, secondo le nuove regole introdotte dal regolamento.
L'elenco delle norme armonizzate è consultabile dai periodici estratti della Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea e sul sistema NANDO (New Approach Notified and Designated Organisations Information System); link http://ec.europa.eu/enterprise/newapproach/nando/ .
Sono fatti salvi, in quanto **ritenuti conformi al Regolamento**, i prodotti immessi sul mercato ai sensi della Direttiva 89/106/CEE antecedentemente al 1° luglio 2013, con la relativa documentazione.
Il Regolamento introduce diverse novità rispetto alla Direttiva, principalmente riguardanti le modalità con cui le caratteristiche essenziali dei prodotti vengono dichiarate.
L'attestato di conformità previsto dalla precedente, abrogata Direttiva – che poteva consistere, a seconda della classe di rischio del prodotto, in una dichiarazione di conformità del fabbricante oppure in un certificato di conformità rilasciato da un organismo riconosciuto – **è stato sostituito dalla dichiarazione di prestazione**, che, per qualsiasi tipologia di prodotto, è il risultato del processo di valutazione e verifica della costanza di prestazione del prodotto medesimo ed è fornita dal fabbricante in una copia per ciascun elemento commercializzato.
La dichiarazione di prestazione descrive la prestazione dei prodotti da costruzione in relazione alle loro caratteristiche essenziali, conformemente alle pertinenti specifiche tecniche armonizzate. I contenuti della dichiarazione di prestazione sono riportati nell'Allegato III al Regolamento e comprendono, tra l'altro:

- il riferimento del prodotto-tipo;
- il sistema di valutazione delle prestazioni (1+, 1, 2+, 2, 3 o 4) e i riferimenti delle norme tecniche (norme armonizzate applicabili;
- l'uso previsto del prodotto;
- l'elenco delle caratteristiche essenziali, di cui almeno una deve essere dichiarata;
- le lettere NPD laddove la prestazione non sia determinata.

La dichiarazione di prestazione è accompagnata dalla marcatura CE, l'unica marcatura che attesta la conformità del prodotto da costruzione alla prestazione dichiarata in relazione ai requisiti essenziali.
La marcatura CE deve essere apposta in modo visibile, leggibile e indelebile sul prodotto, su

un'etichetta ad esso applicata, oppure, se ciò fosse impossibile o ingiustificato a causa della natura del prodotto, sull'imballaggio o sui documenti di accompagnamento.
Essa è seguita da:

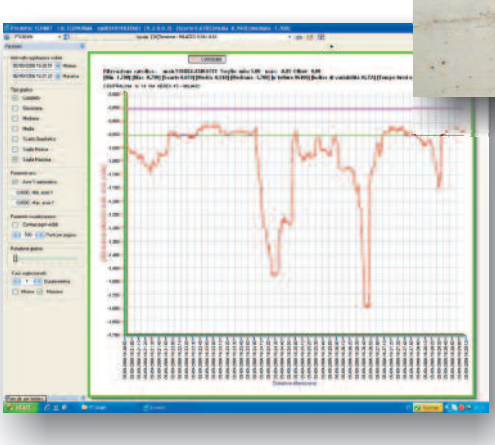
- ultime due cifre dell'anno in cui è stata apposta per la prima volta;
- nome e indirizzo del fabbricante;
- riferimento del prodotto-tipo;
- numero di riferimento della dichiarazione di prestazione;
- livello o classe della prestazione dichiarata;
- riferimento alla specifica tecnica armonizzata applicata;
- numero di identificazione dell'organismo notificato, se del caso;
- uso previsto del prodotto.

Il Regolamento prevede delle **deroghe alla dichiarazione di prestazione**.
Tali deroghe, riportate all'articolo 5, intervengono quando un prodotto è fabbricato in esemplare unico o su misura in un processo non di serie, su ordine specifico di un committente, ed è installato in un'opera singola ed identificata; oppure quando un prodotto è fabbricato sul cantiere dell'opera cui è destinato; oppure ancora quando il prodotto è fabbricato con metodi tradizionali o con metodi atti alla conservazione del patrimonio storico-architettonico e mediante un processo non industriale per il restauro di opere di rilevanza storica o architettonica.
Per i prodotti da costruzione per i quali era già stato emanato un decreto di attuazione della Direttiva, ovvero:

- Accessori per serramenti (D.M. 5 marzo 2007)
- Isolanti termici (D.M. 5 marzo 2007)
- Aggregati (D.M. 11 aprile 2007)
- Appoggi strutturali (D.M. 11 aprile 2007 e D.M. 16 novembre 2009)
- Geotessili e prodotti affini (D.M. 11 aprile 2007)
- Aggregati per conglomerati bituminosi (D.M. 16 novembre 2009)

si deve intendere che rimane valido l'elenco delle caratteristiche essenziali da dichiarare obbligatoriamente, specificato per ciascun prodotto nel corrispondente decreto (per le caratteristiche essenziali non obbligatorie il fabbricante può riportare la dicitura NPD).
Per chi volesse maggiormente approfondire la questione, oltre al sito Nando, si consiglia la consultazione in internet dei numerosi siti dedicati, con particolare apprezzamento per i documenti prodotti da ANCE.

ECONORMA s.a.s.



DATA LOGGER serie FT-100/MV

MODELLI DISPONIBILI
FT-100/MV range: -5,00 / +5,00 Volt
Risoluzione 0,01 Precisone +/-0,01 Volt
FT-100/MV-H range: -10,00 / +10,00 Volt
Risoluzione 0,01 Precisione +/-0,02 Volt
Partenza ritardata - Memorizzazione **131.000 letture**
Valore medio di n. 100 letture in un secondo
Alimentazione con batteria al Litio sostituibile

E' disponibile il software di elaborazione grafica con selezione dei dati **FT-Graph-2** con cui si può possono graficare e stampare tutti i file relativi alle letture del data logger serie FT-100/MV, con la possibilità di scegliere fra i seguenti modelli matematici: **Media - Mediana - Scarto quadratico medio**, **gaussiana**. Due ulteriori importanti possibilità del software sono la funzione " DURATA TOTALE DEI FUORI SOGLIA" e quella relativa al " **INDICE DI VARIABILITA' (Bassa, Media, Alta)**. Nella parte inferiore del report è riportata la sommatoria del tempo complessivo per "intervalli di tempo" selezionabili. Si può inoltre stampare il report per "Cronologia", "Ordinato per durata" oppure "Ordinato per tipologia".

ECONORMA S.a.s.
31020 SAN VENDEMIANO - TV - Via Olivera 52
Tel. 0438.409049 E-mail: info@econorma.com
www.econorma.com

APCE

Accosiazione per la Protezione dalle Corrosioni Elettrolitiche

APCE Service S.r.l.

CALENDARIO FORMAZIONE ED EVENTI 2014

www.apce.it

Insieme per la sicurezza e la qualità delle strutture metalliche

T1 • *Corso:* **25° Corso UNI EN 15257 - CORPORATE EDITION AD HOC SRG**
17-21 febbraio 2014 *Durata:* 40 ore *Sede dell'evento:* Napoli
Obiettivo: Corso destinato alla certificazione del personale - Settore T
Modalità di Iscrizione: CORPORATE EDITION - CLOSED

Costo Soci APCE (IVA esclusa) € 1.300,00
Costo non Soci APCE (IVA esclusa) € 1.600,00
iscrizioni BLOCCATE

T1 • *Corso:* **26° Corso UNI EN 15257**
3-7 marzo 2014 *Durata:* 40 ore *Sede dell'evento:* Prato
Obiettivo: Corso destinato alla certificazione del personale - Settore T
Modalità di Iscrizione: iscrizione on-line

Costo Soci APCE (IVA esclusa) € 1.300,00
Costo non Soci APCE (IVA esclusa) € 1.600,00
corso COMPLETO

T2 • **23° Corso UNI EN 15257**
24-28 marzo 2014 *Durata:* 40 ore *Sede dell'evento:* Prato
Obiettivo: Corso destinato alla certificazione del personale - Settore T
Modalità di Iscrizione: iscrizione on-line

Costo Soci APCE (IVA esclusa) € 1.400,00
Costo non Soci APCE (IVA esclusa) € 1.700,00
corso COMPLETO

T1-2 • **18° Corso di Aggiornamento UNI EN 15257**
22-23 aprile 2014 *Durata:* 16 ore *Sede dell'evento:* Politecnico Milano
Obiettivo: Corso destinato al rinnovo del Certificato o alla ricertificazione
Modalità di Iscrizione: iscrizione on-line

Costo Soci APCE (IVA esclusa) € 700,00
Costo non Soci APCE (IVA esclusa) € 850,00

T1-2 • **ESAME CERTIFICAZIONE - RICERTIFICAZIONE UNI EN 15257**
24 aprile 2014 *Sede dell'evento:* Politecnico Milano
Modalità di Iscrizione: vedi organismo di certificazione

T1 • *Corso:* **27° Corso UNI EN 15257**
5-9 maggio 2014 *Durata:* 40 ore *Sede dell'evento:* Marghera (VE)
Obiettivo: Corso destinato alla certificazione del personale - Settore T
Modalità di Iscrizione: iscrizione on-line

Costo Soci APCE (IVA esclusa) € 1.300,00
Costo non Soci APCE (IVA esclusa) € 1.600,00
corso COMPLETO

T2 • *Corso:* **24° Corso UNI EN 15257**
9-13 giugno 2014 *Durata:* 40 ore *Sede dell'evento:* Marghera (VE)
Obiettivo: Corso destinato alla certificazione del personale - Settore T
Modalità di Iscrizione: iscrizione on-line

Costo Soci APCE (IVA esclusa) € 1.400,00
Costo non Soci APCE (IVA esclusa) € 1.700,00
corso COMPLETO

T1-2 • **ESAME CERTIFICAZIONE - RICERTIFICAZIONE UNI EN 15257**
16-18 giugno 2014 *Sede dell'evento:* Marghera (VE)
Modalità di Iscrizione: vedi organismo di certificazione

T1 • *Corso:* **28° Corso UNI EN 15257**
8-12 settembre 2014 *Durata:* 40 ore *Sede dell'evento:* Perugia
Obiettivo: Corso destinato alla certificazione del personale - Settore T
Modalità di Iscrizione: iscrizione on-line

Costo Soci APCE (IVA esclusa) € 1.300,00
Costo non Soci APCE (IVA esclusa) € 1.600,00
corso COMPLETO

T1 • *Corso:* **29° Corso UNI EN 15257**
6-10 ottobre 2014 *Durata:* 40 ore *Sede dell'evento:* Perugia
Obiettivo: Corso destinato alla certificazione del personale - Settore T
Modalità di Iscrizione: iscrizione on-line

Costo Soci APCE (IVA esclusa) € 1.300,00
Costo non Soci APCE (IVA esclusa) € 1.600,00

T2 • *Corso:* **25° Corso UNI EN 15257**
20-24 ottobre 2014 *Durata:* 40 ore *Sede dell'evento:* Perugia
Obiettivo: Corso destinato alla certificazione del personale - Settore T
Modalità di Iscrizione: iscrizione on-line

Costo Soci APCE (IVA esclusa) € 1.400,00
Costo non Soci APCE (IVA esclusa) € 1.700,00

T2 • *Corso:* **26° Corso UNI EN 15257 - CORPORATE EDITION AD HOC SRG**
3-7 novembre 2014 *Durata:* 40 ore *Sede dell'evento:* Napoli
Obiettivo: Corso destinato alla certificazione del personale - Settore T
Modalità di Iscrizione: CORPORATE EDITION - CLOSED

Costo Soci APCE (IVA esclusa) € 1.400,00
Costo non Soci APCE (IVA esclusa) € 1.700,00
iscrizioni BLOCCATE

T1-2 • *Corso:* **19° Corso di Aggiornamento UNI EN 15257**
17-18 novembre 2014 *Durata:* 16 ore *Sede dell'evento:* Milano
Obiettivo: Corso destinato al rinnovo del Certificato o alla ricertificazione
Modalità di Iscrizione: iscrizione on-line

Costo Soci APCE (IVA esclusa) € 700,00
Costo non Soci APCE (IVA esclusa) € 850,00

T1-2 • **ESAME CERTIFICAZIONE - RICERTIFICAZIONE UNI EN 15257**
19 novembre 2014 *Sede dell'evento:* Milano
20-21 novembre 2014 *Sede dell'evento:* Milano
Modalità di Iscrizione: vedi organismo di certificazione

APCE
Sede Legale
c/o Italgas
Via del Commercio, 11
00154 Roma

Uffici di Presidenza
e Segreteria APCE
c/o Snam Rete Gas S.p.A.
Largo F. Rismondo, 8
35131 Padova
Tel. 049 82209111
Fax 049 8209331
E-mail: info@apce.it

APCE Service S.r.l. - Formazione e Consulenza
Direzione e coordinamento di APCE
Associazione per la Protezione dalle Corrosioni Elettrolitiche
Sede Legale
c/o Studio Commercialisti
Viale Gozzadini,11 - 40124 Bologna
Uffici di Amministrazione Unica e Segreteria APCE Service S.r.l
c/o Snam Rete Gas S.p.A.
Largo F. Rismondo, 8
35131 Padova
Tel. +39 049 8209111
Fax +39 049 8209331
E-mail info@apceservice.it

ESERCIZI

Continua la rubrica dedicata alla risoluzione di esercizi numerici di corrosione e protezione catodica, alla discussione dei criteri di protezione e alla presentazione di alcuni casi pratici di corrosione.
Di seguito troverete la soluzione ai due esercizi proposti nel numero 52 e due nuovi esercizi non risolti…
Se siete incuriositi dall'esercizio e volete proporre una soluzione, scrivete a polilapp@chem.polimi.it. Sarete immediatamente contattati …

a cura di

PoliLaPP
Laboratorio di Corrosione dei Materiali "Pietro Pedeferri"
Politecnico di Milano

Esercizi risolti...

Un palo interrato (o una puntazza di terra) dove si corrode per aerazione differenziale? Stimare e giustificare una velocità di corrosione

Nella corrosione per **aerazione differenziale** la superficie catodica è quella in cui la disponibilità di ossigeno è più elevata. La geometria del caso in esame è tale per cui è facile prevedere che la zona del palo sulla quale può arrivare l'ossigeno è quella appena interrata mentre le zone più profonde sono oggetto di un limitato ricambio di ossigeno. Si può pertanto ipotizzare una sequenza di fasi:

- *una prima fase* in cui l'ossigeno si consuma in modo uniforme su tutta al superficie interrata (tempo previsto qualche mese, in cui si consuma l'ossigeno contenuto nello strato di diffusione)
- *una seconda fase* in cui l'ossigeno continua ad arrivare nelle zone prossime alla superficie del terreno, mentre di fatto non arriva (o arriva in misura molto minore) nelle zone più profonde
- *una terza fase* in cui si attiva la corrente di macrocoppia.

La velocità di corrosione attesa è circa il doppio della corrente limite di ossigeno, per cui si può stimare una velocità di corrosione nell'intervallo 100 – 200 µm/anno. La stima del raddoppio della velocità di corrosione è stata fatta sulla base del rapporto tra le aree attive (catodica, quella più superficiale e anodica appena sotto) e una resistività medio-bassa (per esempio 10 – 50 Ωm).
Dal punto di vista analitico, la velocità di corrosione è data dalla relazione:

$$i_{corr} = i_L \frac{S_C}{S_A} \qquad (1)$$

dove i_{corr} è la velocità di corrosione, i_L è la corrente limite di diffusione dell'ossigeno sulla superficie catodica.
La superficie dell'area catodica S_C dipende dal potere penetrante, *L*, ed è stimata con la seguente relazione:

$$Sc = \pi \cdot \Phi \cdot L \qquad (2)$$

dove φ è il diametro del palo.
Il potere penetrante, cioè la massima distanza a cui arriva la corrente di macrocoppia, è calcolato come segue

$$L = \frac{\Delta E}{2\rho i_L} \qquad (3)$$

dove ΔE è il lavoro motore, ossia la differenza di potenziale tra catodo e anodo, ρ è la resistività del terreno e i_L è la densità di corrente limite di diffusione dell'ossigeno sulla superficie catodica.
Supponendo una estensione dell'attacco, H, di 5 cm, la superficie anodica è:

$$S_A \cong \pi\ \varphi\ H \cong 0{,}05\ \pi\ \varphi \qquad (4)$$

Considerando le equazioni (2) e (4), la velocità di corrosione è pari a:

$$i_{corr} = 10\ \frac{\Delta E}{\rho}$$

Se ΔE = 200 mV (valore massimo per una macrocoppia da aerazione differenziale), ρ = 20 Ωm resistività del terreno la velocità di corrosione, i_{corr}, è pari a 100 μm/anno.

Qual è la corrente di protezione necessaria per proteggere in acqua di mare i seguenti materiali: ferro, rame, alluminio, zinco? (si considerino condizioni stagnanti).

La densità di corrente di protezione nelle acque, e quindi anche nell'acqua di mare, coincide con la densità di corrente limite di diffusione dell'ossigeno, la quale è espressa, in condizioni stazionarie, dalla legge di Fick.
I fattori che definiscono la legge di Fick sono fisici e dipendenti solo dalle condizioni ambientali e non dal metallo; se ne deduce che se la reazione catodica è solo quella della riduzione di ossigeno, come accade nelle acque e nei terreni (il cui pH è neutro o debolmente alcalino) la densità di corrente di protezione è indipendente dal metallo e quindi è una caratteristica dell'ambiente. Per essere più precisi, finché il potenziale permane nella zona di diffusione (cioè a un potenziale più positivo di circa –0,95 V CSE) la corrente di protezione non dipende dal metallo, ma dall'ambiente e dalla formazione del deposito calcareo.
Potremmo, ora, fare qualche distinguo in relazione a ciascuno dei metalli considerati.
Per **ferro** e **alluminio**, il cui potenziale di protezione è per entrambi intorno a –0,9 V CSE, la densità di corrente di protezione è la stessa, almeno quella iniziale, perché a seguito della formazione del deposito calcareo, che si forma più favorevolmente sul ferro, si ha una diminuzione sostanziale su questo ma non sull'alluminio.
Nel caso del **rame**, il potenziale di protezione è molto più nobile e cade nella zona dei potenziali relativi alla sovratensione di attivazione; la densità di corrente di protezione è perciò inferiore alla densità di corrente di limite di diffusione dell'ossigeno. Tuttavia, se il potenziale è abbassato al valore di protezione dell'acciaio, la densità di corrente di protezione ridiventa quella limite di diffusione dell'ossigeno.
Il caso dello **zinco** presenta qualche problematicità. Il suo potenziale di equilibrio (e quindi di protezione) si trova nel campo dei potenziali in cui si sviluppa idrogeno, la cui velocità è bassa a causa delle alte sovratensioni (lo zinco è un metallo alto fondente). Si può concludere che la densità di corrente di protezione è in pratica ancora la densità di corrente limite di riduzione di ossigeno.
Va aggiunto che l'alcalinizzazione può produrre dissoluzione anfotera dello zinco, anche se in misura molto minore rispetto all'alluminio.

… e da risolvere !!!

- **Stimare perché per strutture in acciaio al carbonio il lavoro motore degli anodi di Al, Zn e Mg è pari a 300 mV, 250 mV e 800 mV, rispettivamente.**
- **Il rischio di corrosione per interferenza da correnti vaganti è maggiore per tubazioni che corrono perpendicolarmente a un binario, oppure quelle poste parallelamente? Perché?**

EUROCORR 2014
EUROPEAN CORROSION CONGRESS

8-12 September 2014
Pisa • Italy

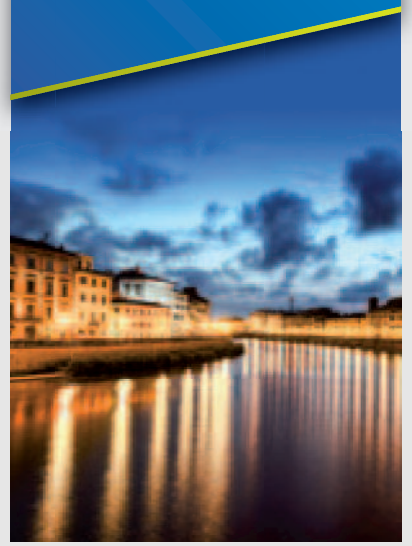
www.eurocorr2014.org

Contacts:
EUROCORR 2014
ASSOCIAZIONE ITALIANA DI METALLURGIA

P.le R. Morandi, 2
20121 Milano, Italy
phone +39 0276021132
fax +39 0276020551
e-mail: eurocorr2014@aimnet.it

European Federation of Corrosion
Event nr. 364

INVITATION FOR EUROCORR 2014



AIM - Associazione Italiana di Metallurgia invites you to join EUROCORR 2014 in Pisa. AIM has in fact been designated by the EFC (European Federation of Corrosion) as the organizer of the **EUROCORR 2014** which will be held in **Pisa, Italy, from 8 to 12 September 2014**. The Congress will be staged at the Palazzo dei Congressi located a few steps away from the historical city center. The city of Pisa plays host to treasures of priceless value, making it one of Italy's most important cities of art: Piazza dei Miracoli, with its world-famous Leaning Tower, is the hub of the prized artistic and architectural offerings.Following the prestigious tradition of the previous congresses of the series, for EUROCORR 2014, AIM intends to build on the past success and to reconfirm the European Corrosion Congress as the premier forum in the field of corrosion science and engineering. Scope of the Congress is to foster the transfer of information and experiences among delegates with academic and industrial backgrounds and to yield information on recent developments in all areas of corrosion protection. The main theme of EUROCORR 2014 will be **"Improving materials durability: from cultural heritage to industrial applications"** and it will aim at asserting the critical role of corrosion science, technology and engineering in **extending** the life of materials. The scientific program will comprise plenary meetings, keynote lectures, workshops and oral and poster presentations articulated into sessions based around the themes of the 19 EFC Working Par-ties. The Congress will be accompanied by an **exhibition** situated within the Palazzo dei Congressi at which companies, institutes and other concerns dealing with corrosion prevention will have a unique opportunity to showcase products and services.Finally, the Congress will offer a rich **social program** designed to give delegates pleasurable opportunities to meet informally and to enjoy the very attractive city of Pisa and the charmed surrounding region of Tuscany, offering many important tourist destinations. The EUROCORR Local Organizing Committee and the Congress Chairmen Lorenzo Fedrizzi and Luciano Lazzari invite perspective authors to submit contributions and look forward to welcoming EUROCORR 2014 in Pisa.

Important deadlines:
Submission of abstracts:
January 13, 2014
Notification of acceptance to authors: March 31, 2014
Submission of full manuscripts:
May 30, 2014