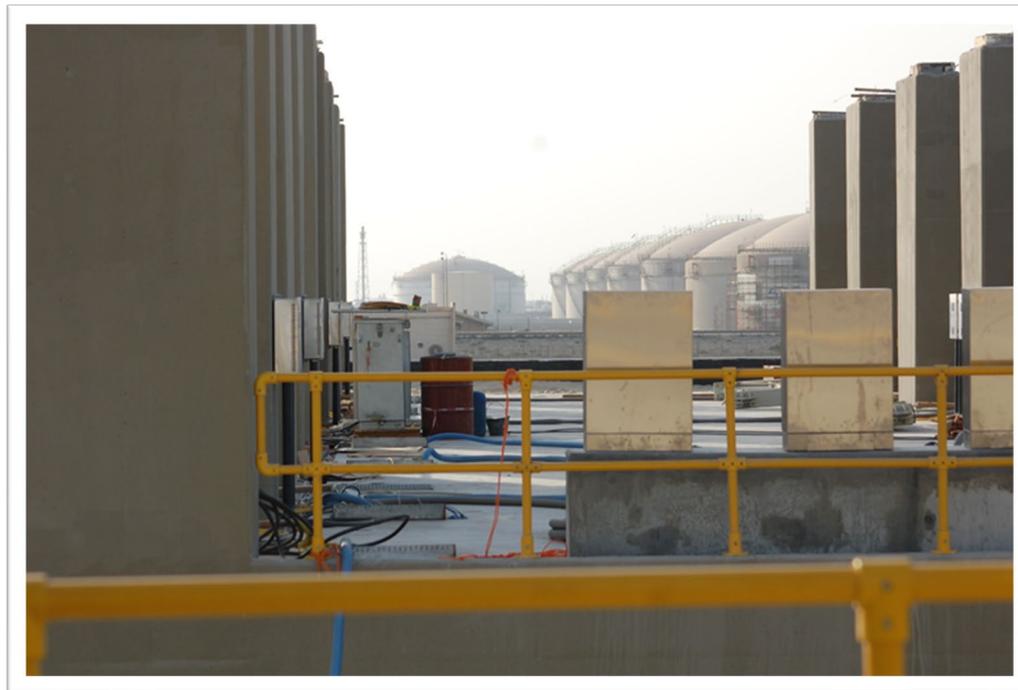




Applicazioni pratiche di Protezione Catodica nel calcestruzzo

Seminario APCE al GIC
Piacenza, 19 Aprile 2024









Protezione catodica dell'acciaio nel calcestruzzo

...L'unica tecnica di ripristino che ha dimostrato di fermare la corrosione negli impalcati di ponti contaminati da sale, indipendentemente dal contenuto di cloruro, è la protezione catodica.....

*R.A. Barnhart
Federal Highway Administration
USA, Aprile 1982*



Protezione catodica dell'acciaio nel calcestruzzo

NORMA DI RIFERIMENTO: UNI EN ISO 12696:2022

La UNI EN ISO 12696 rappresenta un documento di **valutazione dell'efficacia** di tale protezione, per la quale si prevede che sia preparato un progetto dettagliato e specifiche su materiali, installazione, messa in servizio ed esercizio **da esperti e persone con esperienza. Certificate secondo ISO 15257 o mediante altra procedura di prequalificazione equivalente**



Protezione catodica dell'acciaio nel calcestruzzo UNI EN ISO 12696:2022

Questo documento specifica i requisiti prestazionali per la **protezione catodica dell'acciaio nel calcestruzzo** a base di cemento sia in **strutture nuove** (prevenzione catodica – diagrammi del Prof. Pedferri) sia in **strutture già esistenti**. Riguarda le parti esposte all'atmosfera di edifici e strutture di ingegneria civile, sia per le **armature usuali** sia per quelle **precomprese** incorporate nel calcestruzzo. È applicabile alle **armature di acciaio senza rivestimento** e a quelle **di acciaio con rivestimento organico**.



Protezione catodica dell'acciaio nel calcestruzzo UNI EN ISO 12696:2022

Inoltre, è idoneo anche all'acciaio incorporato in elementi di edifici o in strutture esposte all'atmosfera, interrati, immersi o soggetti alla marea. Non è applicabile al cemento armato contenente fibre elettricamente conduttive (es. carbonio o acciaio). La UNI EN ISO 12696 è quindi attinente a tutto ciò che interessa la protezione catodica dell'acciaio nel calcestruzzo quando quest'ultimo è **esposto all'atmosfera, interrato o immerso**.



Protezione catodica dell'acciaio nel calcestruzzo UNI EN ISO 12696:2022

Questo documento è applicabile solo alle applicazioni di protezione catodica all'acciaio nel calcestruzzo che sono progettate con **l'intenzione di soddisfare, e si può dimostrare, di soddisfare i criteri di protezione specificati** Ciò richiede la fornitura di sufficienti **sistemi di monitoraggio** delle prestazioni in tutte le parti della struttura destinate ad essere protette, al fine di valutare se i criteri sono soddisfatti. Questo documento non si applica agli anodi galvanici o ai sistemi applicati nelle riparazioni di difetti locali per ridurre gli effetti degli “anodi incipienti”.



Quali sono i criteri di protezione?

(Non è necessario soddisfare più di un punto)

un potenziale “OFF istantaneo*” più negativo di -720 mV rispetto ad Ag/AgCl/0,5 mol/l KCl;

un potenziale di decadimento nell'arco di 24 h di almeno 100 mV da

un potenziale di decadimento per un periodo prolungato di almeno 150 mV da “OFF istantaneo*”; soggetto a decadimento continuo e utilizzo di elettrodi di riferimento (non decadimento sonde potenziale) per la misura prolungata oltre le 24 h

*= misurato tra 0,1 s e 1 s dopo l'apertura del circuito di corrente continua



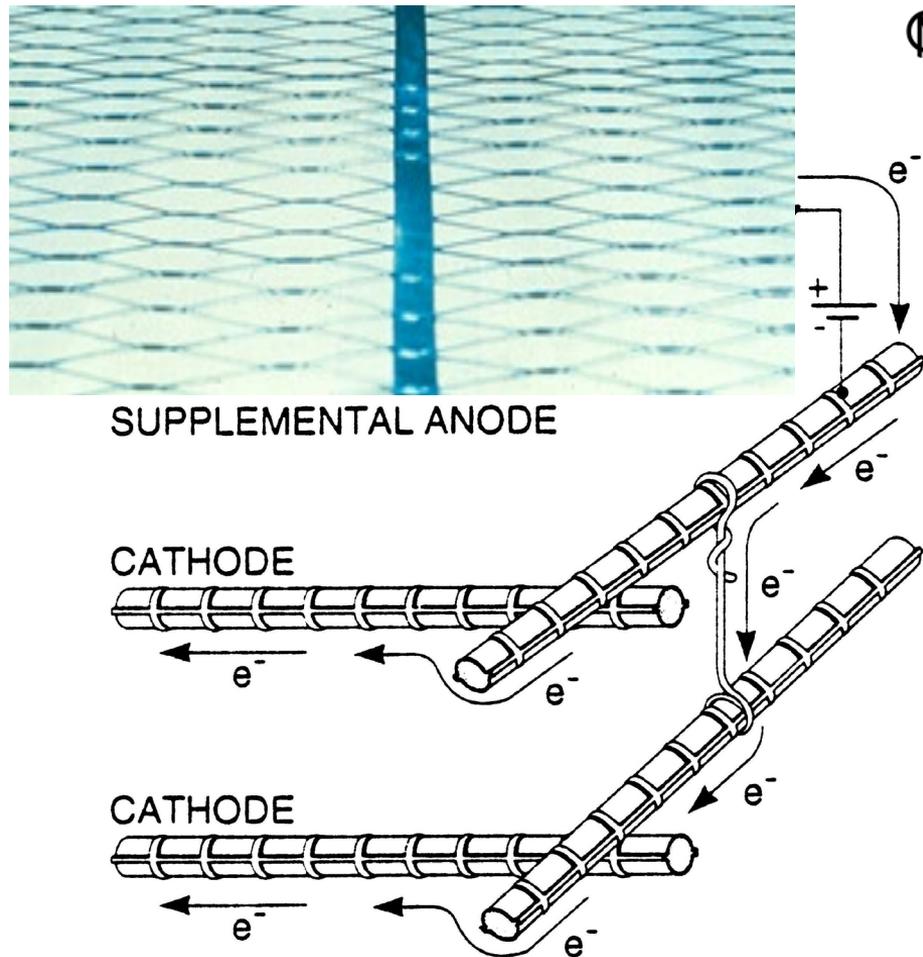
Componenti di un sistema di protezione catodica a corrente impressa:

Sistema anodico

Alimentatore esterno in corrente continua

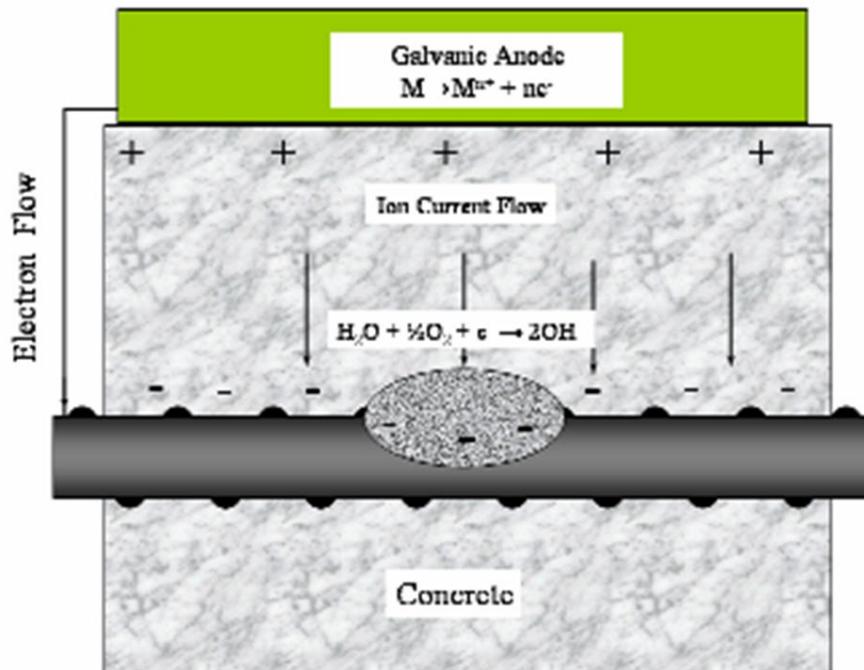
Cavi: - collegano gli anodi al polo positivo
- collegano le armature al polo negativo

Sistema di monitoraggio





Sistema di protezione catodica galvanico: contatto diretto interrompibile per il monitoraggio





Requisiti del sistema anodico secondo la norma ISO EN UNI 12696

Il sistema anodico deve essere in grado di **fornire le prestazioni richieste dal progetto: corrente di protezione, distribuzione di corrente, caduta ohmica massima.**

La **VITA** del sistema anodico deve essere **sufficiente per la vita nominale di progetto**, includendo ove necessario un piano di manutenzione o sostituzione in tempi predefiniti.

Per gli anodi a diretto contatto con il cemento la **DENSITA' di CORRENTE dell'anodo non deve eccedere i valori di progetto** per evitare una riduzione delle prestazioni: del cemento all'interfaccia anodo/cemento o dell'anodo stesso. In particolare per gli anodi incorporati o applicati alla superficie del calcestruzzo, la densità di corrente sulla superficie dell'anodo non deve superare **220 mA/m² a breve termine** e la densità di corrente massima sulla superficie dell'anodo non deve superare **110 mA/m² a lungo termine**



Requisiti del sistema anodico secondo la norma ISO EN UNI 12696

Molti sistemi anodici sono stati sviluppati e provati in applicazioni di campo di lungo termine annegati nel cemento o applicati alla superficie nella protezione catodica del cemento esposto all'atmosfera. Viene richiesta **buona resistenza ad ambienti sia alcalini** (acqua dei pori del cemento) **che acidi** (acidità generata all'interfaccia anodo/cemento).

Esiste un metodo di prova consolidato per testare la durata accelerata degli anodi di titanio rivestito di ossidi di metalli misti incorporati nel calcestruzzo, **ISO 19097-1 o NACE TM0294- 2016**. Esiste anche una procedura per i test comparativi per anodi costituiti da rivestimenti organici conduttivi **NACE TM 0105-2018**.

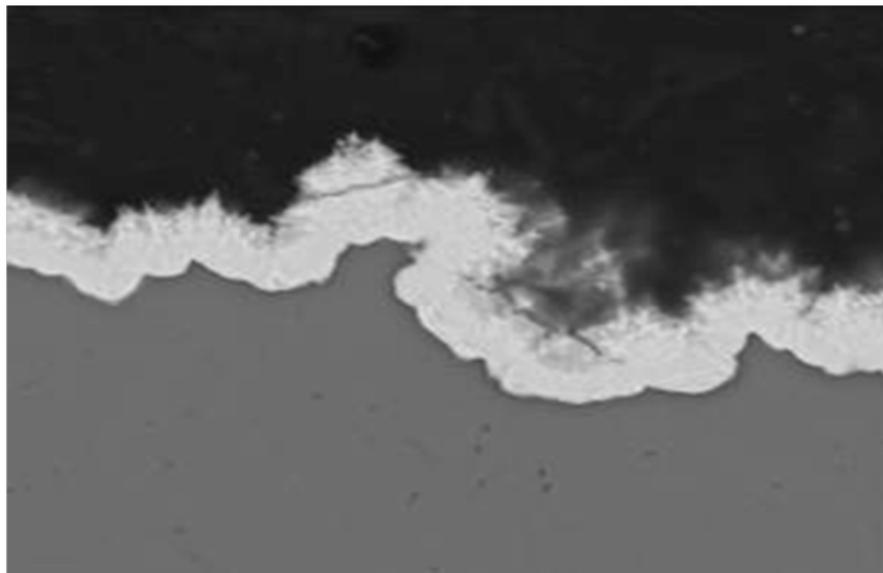
Per nuovi materiali anodici sono richieste analisi di laboratorio per la verifica delle prestazioni: test accelerati di durata + prove/progetti in campo.



Tipo di Anodo	Densità di corrente anodo lungo termine	Densità di corrente calcestruzzo lungo termine	Vita di progetto stimata dal fornitore	Impatto dimensionale e di carico	Installazione	Controllo qualità
Vernici organiche conduttive	20 mA/m ²	20 mA/m ²	15 anni solo superfici non bagnate	NO	Pittura	Test NACE TM0105
Spray di Zinco	20 mA/m ²	20 mA/m ²	25 anni (se non bagnate)	NO	Spray termico	Sicurezza applicazione
Rete di titanio attivata MMO	110 mA/m ²	15-110 mA/m ²	120 anni	SI'	25mm circa overlay	overlay NACE TM0294
Nastri di titanio attivato rete MMO	110mA/m ²	10-110 mA/m ² secondo distribuzione	120 anni	NO	Installati in buchi o solchi prima di colare	Controllare corti circuiti e continuità NACE TM0294
Anodi discreti (Ti MMO con malta cementizia o ceramica conduttiva)	800 mA/m ²	10-110 mA/m ² secondo distribuzione	50 anni	NO	Installati in buchi	Controllare continuità e corto circuito con le armature. NACE TM0294



Le reti di titanio attivate sono state introdotte in Italia e negli USA nel 1985 da C.J. Mudd, G. Mussinelli, M. Tettamanti, P. Pedefferri



Coating Metalli Nobili (MMO)
di pochi micron

Substrato di Titanio

Il Sistema è costituito da un substrato di Ti Gr. 1 ASTM B265 e da un coating contenente ossidi di metalli di transizione (Pt) come Ir, Ru e ossidi di Ti, Zr o Tantalio



Densità di corrente: limitata a un massimo di 110 mA/m². Il fattore limitante è l'attacco acido del cemento circostante con colorazione scura e perdita di consistenza del cemento. Densità di corrente fino a 220 mA/m² è consentita per brevi periodi (fase di polarizzazione iniziale e aggiustamenti entro il primo anno dall'avviamento).

Vita utile di progetto degli anodi: da 50 a 120 anni (compatibile con vita nominale di progetto di costruzioni con livelli di prestazioni ordinari ed elevati N.T.C.2018). Altri componenti del sistema richiedono una manutenzione programmata per raggiungere gli stessi obiettivi. Test accelerato elettrochimico secondo ISO 19097-1 per dimostrare la conformità a questi requisiti.

Minima distanza tra Anodo e barra di armatura: 15mm per garantire adeguata distribuzione di corrente ed evitare corto-circuiti accidentali.



Strutture esistenti

Anodi a rete applicati sulla superficie. E' necessario pretrattamento della superficie meccanicamente deteriorata e applicazione di uno strato cementizio di copertura (critico per la durata del sistema). Resistività max 50000 Ohm*cm dopo 28 gg. di maturazione.

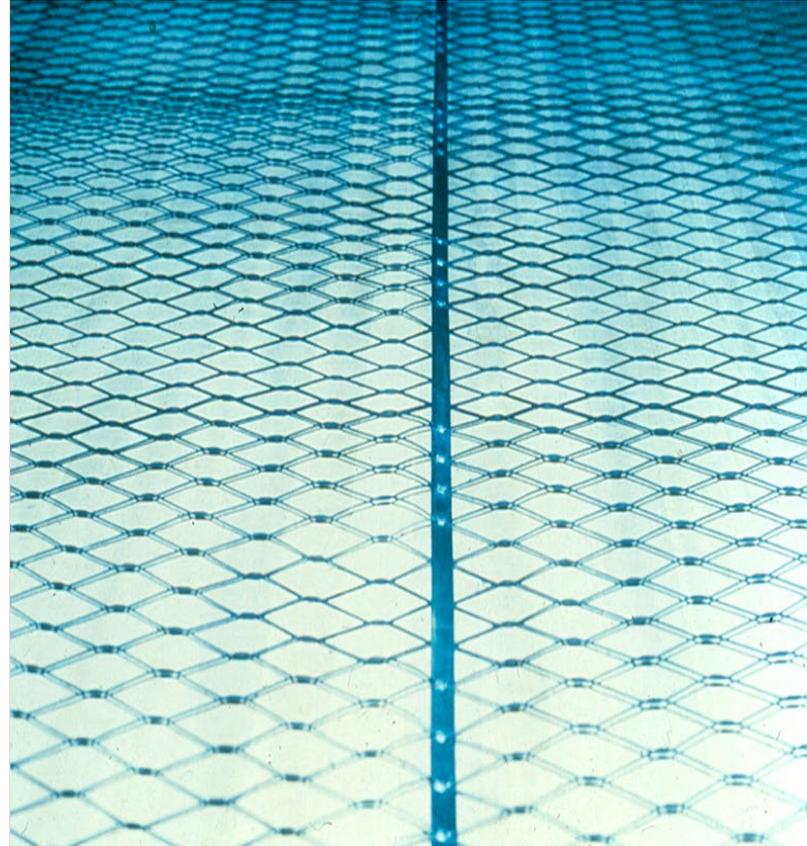
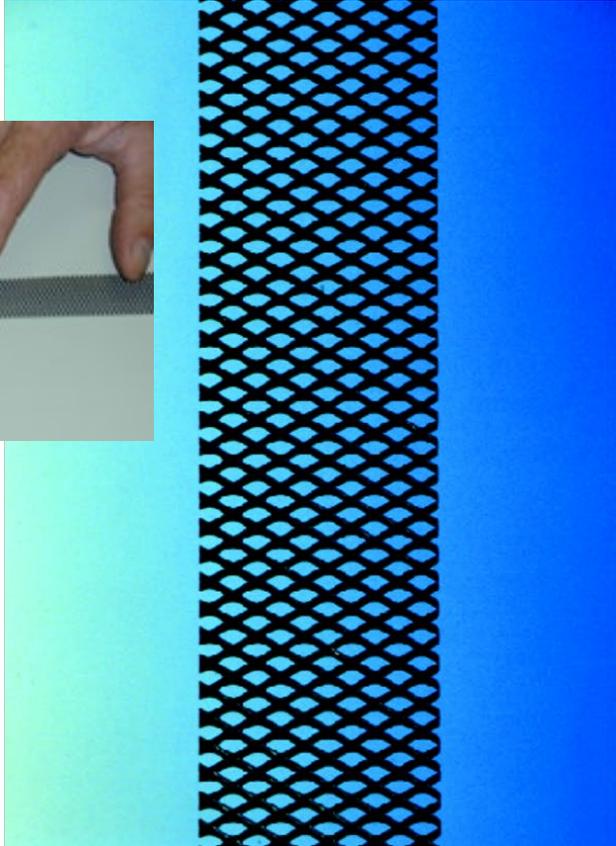
Nastri di rete annegati in malta cementizia installati in spazi intagliati nel copriferro o anodi tubolari discreti annegati in malta cementizia in fori scavati nel copriferro

Strutture nuove

Sistema a griglia «grid» nastro di rete anodica + distributore di corrente in titanio elettrosaldati installati nelle gabbie di armatura prima del getto del calcestruzzo. Installazione con sistemi di fissaggio isolante per evitare corto-circuiti (distanziatori e fascette di plastica o strisce di cemento)



ELECTRODE TECHNOLOGIES
Sistemi a base di Titanio attivato





anodi tubolari discreti annegati in malta
cementizia in fori scavati nel copriferro





ELECTRODE TECHNOLOGIES

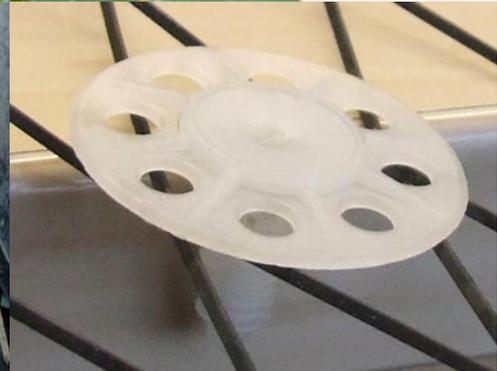
Installazione Anodi Strutture Esistenti





ELECTRODE TECHNOLOGIES

Installazione Anodi Strutture Esistenti





ELECTRODE TECHNOLOGIES

Installazione Anodi Strutture Esistenti

 DE NORA





ELECTRODE TECHNOLOGIES

Installazione Anodi Strutture Esistenti





Verifica della continuità elettrica: Prima dell'installazione è obbligatorio verificare la continuità elettrica dell'armatura in acciaio che deve comportarsi come un catodo omogeneo. La continuità tra le barre d'armatura o gli elementi di acciaio nel calcestruzzo deve essere verificata misurando la resistenza utilizzando una corrente di minimo 250 mA per un periodo minimo di 0,5 s. Criteri di accettazione per tale prova: valori stabili e una resistenza inferiore a 1,0 Ω misurata al termine dell'applicazione dell'impulso di corrente, confermato dalla tensione residua di 0 V misurata 0,1 s dopo l'interruzione della corrente applicata.

Misurazione del potenziale posizionando un elettrodo di riferimento in una posizione fissa
Misurazione del potenziale effettuando il collegamento elettrico in un punto diverso della griglia di rinforzo. **STESSO POTENZIALE (< 1mV)**. Se viene rivelato acciaio discontinuo come definito in precedenza, deve essere collegato all'armatura della sezione continua.

Il calcestruzzo contaminato da cloruri può rimanere. Il calcestruzzo scheggiato, delaminato, deteriorato e a nido d'ape, nonché le fessure di larghezza superiore a 0,5 mm devono essere rimosse mediante scavo mediante martelli scalpellatori o getto d'acqua ad alta pressione fino alla profondità dello strato di rinforzo.



Rivestimento anodico: deve estendersi su tutta l'area coperta dagli anodi di protezione catodica per fornire protezione fisica e un percorso di corrente ionica tra il materiale dell'anodo e l'armatura. Resistività MAX: 50000 Ohm-cm dopo 28 giorni di indurimento con acqua potabile (ombreggiatura vs. luce solare diretta). Adesione completa senza delaminazione per 50 anni.

Superfici orizzontali dell'impalcato: miscela di calcestruzzo colato. L'impasto colato dovrà essere esente da additivi polimerici. Pre-bagnatura con acqua potabile per 24 ore prima dell'applicazione; si possono adottare schermature o teli di polietilene ($T > 30^{\circ}\text{C}$). 20 min MAX tra la miscelazione e l'applicazione del materiale di rivestimento.

Superfici verticali e sopraelevate: applicazioni in calcestruzzo spruzzato come calcestruzzo proiettato o gunite o materiale preconfezionato proprietario come specificato.



Tutti i materiali e i metodi di applicazione devono essere conformi alla norma EN 1504 (tutte le parti). La forza del legame tra il calcestruzzo esistente e il rivestimento deve essere testato secondo la norma EN 1542. È necessario eseguire serie di tre prove singole. La forza di adesione media deve essere superiore a 1,5 MPa per tutte prove e maggiore di 1,0 MPa per tutte le singole prove.

La resistività elettrica dell'overlayer può superare significativamente quella del calcestruzzo principale in modo che l'anodo sia in grado di far passare la corrente di progetto alla tensione di progetto in tutte le condizioni atmosferiche ed espositive applicabili alla struttura.

Le membrane polimeriche devono essere rimosse dal calcestruzzo/substrato o dovranno essere sufficientemente degradate da evitare di influenzare negativamente le prestazioni del sistema di protezione catodica.

Il potenziale tra l'anodo e il rinforzo/acciaio (catodo) deve essere monitorato per rilevare cortocircuiti.



ELECTRODE TECHNOLOGIES

Installazione Anodi Strutture Esistenti

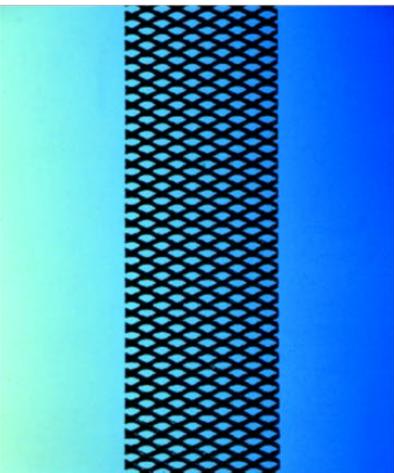




ELECTRODE TECHNOLOGIES

Installazione Anodi Strutture Esistenti

DE NORA





ELECTRODE TECHNOLOGIES

Installazione Anodi Strutture Esistenti





ELECTRODE TECHNOLOGIES
SYDNEY OPERA HOUSE (1996)







- ❑ Sistemi di protezione catodica a corrente impressa sono stati installati su otto ponti autostradali a Cleveland, Ohio, tra il 1985 e il 1994. Tutti questi sistemi incorporavano un anodo a rete di titanio attivato (MMO).
- ❑ L'anodo era fissato alla superficie superiore degli impalcati del ponte e ricoperto con una superficie cementizia densa con additivi super plastificanti.
- ❑ È stato installato un raddrizzatore-controllore e un alimentatore per imprimere corrente continua tra l'anodo e l'acciaio di armatura in modo da consentire al potenziale della superficie dell'acciaio di essere polarizzato nella direzione catodica.
- ❑ Linee guida internazionali NACE consentono di affermare che se l'acciaio è polarizzato ad almeno 100 millivolt (mV) catodici, l'acciaio sarà effettivamente protetto contro la corrosione (NACE SP 0290-2019)



Il Columbia Road Bridge sull'Interstate Hwy 90, struttura numero 1810421, è stato costruito nel 1977. Il sistema di protezione catodica a corrente impressa è stato installato come parte della riabilitazione nel settembre 1986.

È stato installato un anodo MMO di rete espansa su 10.600 piedi quadrati (985 mq) della superficie del ponte in due zone controllate separatamente e il sistema ha funzionato ininterrottamente dall'installazione.

Questo ponte è interessante poiché le corsie del ponte in direzione sud erano protette e le corsie del ponte in direzione nord furono lasciate non protette come controllo. Le due metà sono separate da un giunto aperto.

Nel 2009 (23 anni dopo) è stata condotta un'ispezione e la superficie di usura dell'impalcato su entrambi i lati del ponte non ha mostrato alcun segno visibile di danneggiamento. I componenti interni dell'alimentatore mostravano una significativa corrosione, ma l'alimentazione stava funzionando correttamente.



Le correnti e le tensioni ICCP rilevate il 1 ottobre 2009 sono mostrate nella Tabella 6

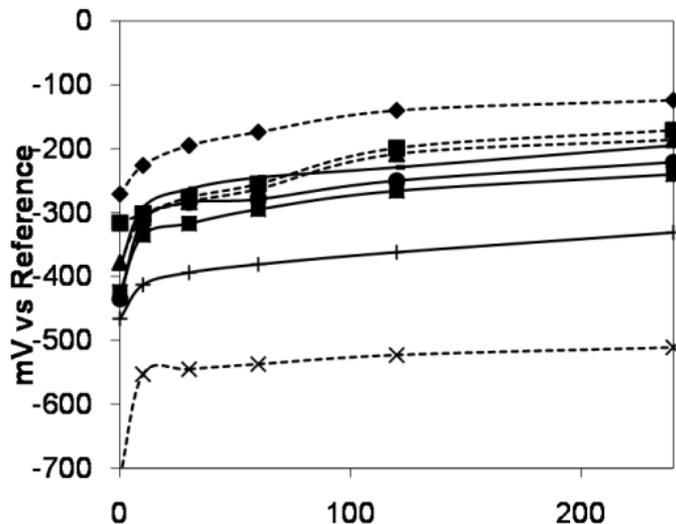
Table 6: Power Supply Data for Westway Bridge

	Current	Voltage	Ref. 1	Ref. 2
Zone 1	2.96 A	3.23 V	-631 mV	-815 mV
Zone 2	1.75 A	3.33 V	-554 mV	-894 mV

Le correnti indicate nella Tabella 6, pari a 0,56 e 0,33 mA/ft² (6,0 e 3,6 mA/m²) per le zone n. 1 e n. 2, rispettivamente, sono considerati valori tipici. Anche le tensioni per entrambe le zone sono considerate tipiche. I potenziali registrati da tutti e quattro gli elettrodi di riferimento sembrano essere normali.



Le polarizzazioni al Columbia Road Bridge sono state determinate utilizzando gli elettrodi di riferimento incorporati nelle zone n. 1 e n. 2 e in quattro punti di prova situati sulla superficie del calcestruzzo lungo il cordolo ovest con elettrodo portatile SCE



I potenziali di decadimento registrati con elettrodi di riferimento Ag/AgCl incorporati sono mostrati come linee tratteggiate e i potenziali di decadimento registrati nei punti di test della superficie utilizzando elettrodi di riferimento SCE sono mostrati come linee continue



Table 7: Potential Decays at Columbia Road

Test Point	Decay
Zone 1, Reference #1	147 mV
Zone 1, Reference #2	145 mV
Zone 2, Reference #1	192 mV
Zone 2, Reference #2	204 mV
Deck, 30 ft from North End	184 mV
Deck, 60 ft from North End	214 mV
Deck, 30 ft from South End	135 mV
Deck, 60 ft from South End	190 mV

I potenziali di decadimento misurati presso il Columbia Road Bridge indicano una protezione conforme ai criteri di progettazione in tutti i punti di prova. Il potenziale decadimento medio era di 176 mV.



Figure 6: Columbia Road Median Curb



- ❑ L'ispezione visiva ha rivelato che il cordolo adiacente al ponte protetto di Columbia Road presentava pochissimi danni a causa della corrosione, mentre il cordolo adiacente all'impalcato non protetto ha mostrato ingenti danni, anche se queste aree non erano direttamente protette.
- ❑ Ulteriori test sulle aree del cordolo hanno dimostrato che il cordolo adiacente all'impalcato protetto stava ricevendo corrente protettiva. I dati dell'indagine di potenziale, della velocità di corrosione e delle analisi del cloruro hanno confermato che il sistema a corrente impressa aveva protetto il cordolo dai danni dovuti alla corrosione.



Prevenzione Catodica installata su tutte le superfici esposte del calcestruzzo armato delle sottostrutture fino ad un'Altezza di +3.45m



Verifica della continuità elettrica: come visto in precedenza. Se viene rivelato acciaio discontinuo come definito in precedenza, deve essere collegato all'armatura della sezione continua.

Installazione dell'anodo: anodo a rete a nastro in titanio MMO in rotoli con barra CD in titanio. La distanza tra l'anodo e l'acciaio di rinforzo nella struttura deve essere di almeno 10 mm per evitare cortocircuiti fino a 15 mm per avere una corretta distribuzione della corrente di protezione.

L'anodo dovrà essere fissato saldamente all'acciaio d'armatura utilizzando fermagli per armature in plastica e fascette per cavi in plastica, in modo che l'attività di costruzione associata al getto di calcestruzzo non causi lo spostamento dell'anodo o il contatto con qualsiasi parte dell'insieme strutturale in acciaio



Particolare attenzione dovrà essere prestata per garantire che nessuna parte dell'anodo o del sistema di connessione venga in contatto con l'armatura durante l'installazione e che il sistema sia sufficientemente rigido da garantire che il posizionamento del calcestruzzo non causi alcun movimento del sistema anodico.

Tipo di spaziatore	PRO	CONTRO
Cementizio	Elimina efficacemente corti circuiti. Omogeneità con calcestruzzo	Scarsa flessibilità. Difficile reperibilità
Plastico continuo	Elimina efficacemente corti circuiti. Facilmente reperibile.	Possibile mascheramento corrente anodica
Plastico discontinuo	Facilmente reperibile, basso costo.	Rischio corti circuiti tra uno spaziatore e l'altro

Tutti i collegamenti tra l'anodo e la barra conduttrice devono essere costituiti da legami metallurgici (saldatura a punti di titanio). I nastri di titanio devono essere fissate alla barra conduttrice mediante saldatura a punti di titanio.

È strettamente necessaria la supervisione durante il getto del calcestruzzo.





ELECTRODE TECHNOLOGIES

Spaziatore plastico continuo

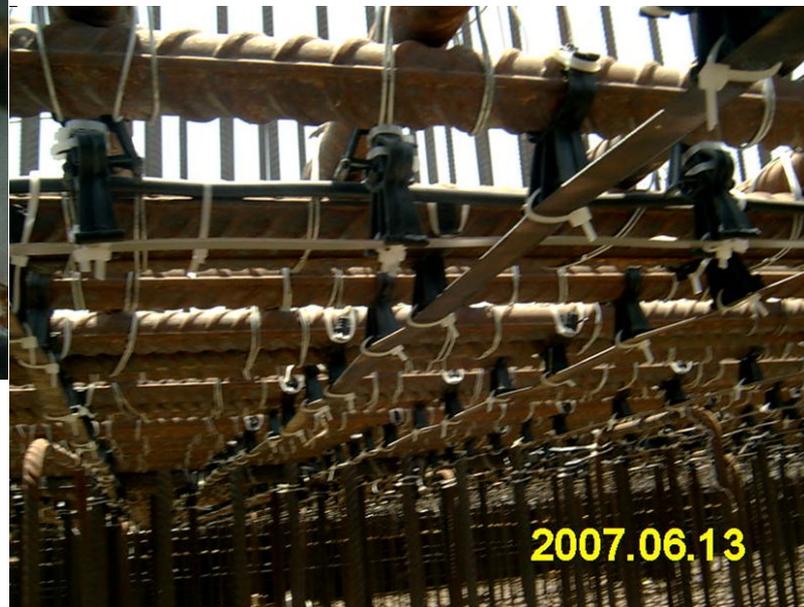
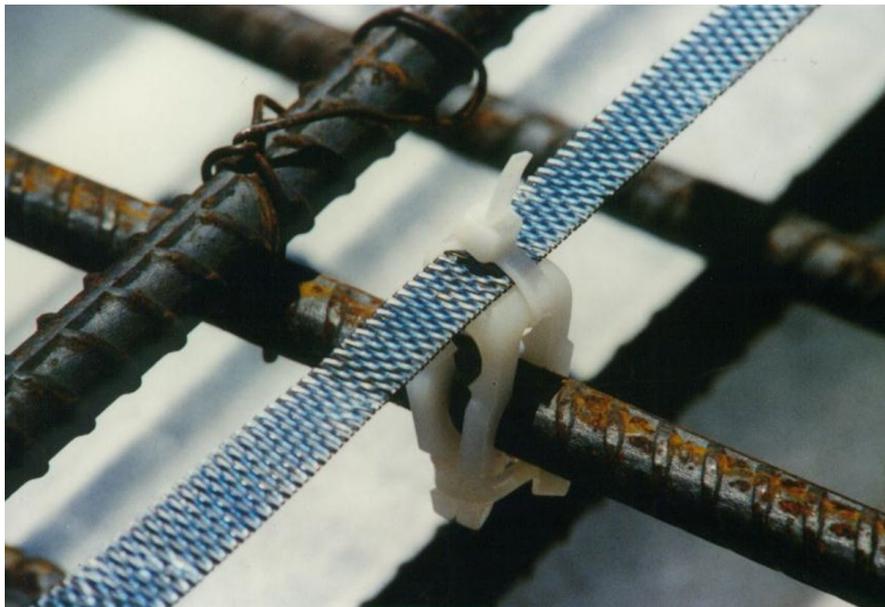




ELECTRODE TECHNOLOGIES

Spaziatore plastic discontinuo

DE NORA



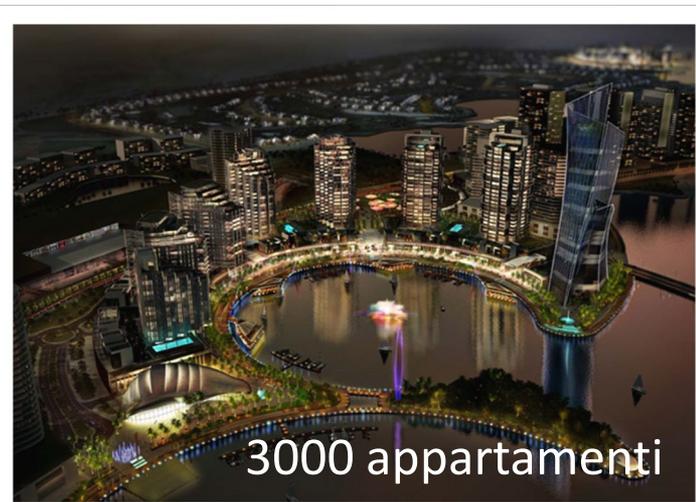


ELECTRODE TECHNOLOGIES
DURRAT AL BAHRAIN (2007)





ELECTRODE TECHNOLOGIES
DURRAT AL BAHRAIN (2007)





T acque :50°C

Salinità: 37-39g/l

Altezza ponti: 2m

Durata: 50 anni

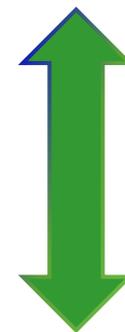


Corrosione
armature per
contaminazione
cloruri



© Hussam Qasem

Costo PrevC:
2.130.000 USD



Costo Acciaio
inox (304)
22 Milioni USD



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	3A
Sistema di controllo	Completamente sorvegliato e controllato da remoto



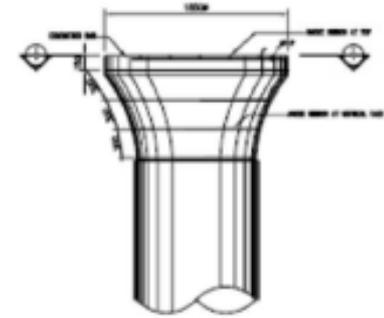
Nome	Lunghezza	Totale N°
Atoll Bridges	162 m	6
Hotel Bridge	680 m	1
Ring bridges	518 m	2
Ring bridges	210 m	4



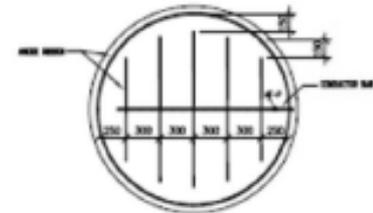
- Max Dimensione Zona: 3A

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

- 4 solette prefabbricate+ 4/6 piloni
- 1 spalla, 2 piloni + 2/4 solette prefabbricate



TYPICAL PILE INSTALLATION



PILE PLAN
ANODE INSTALLATION AT PILE



Elettrodi di riferimento:
Ag/AgCl

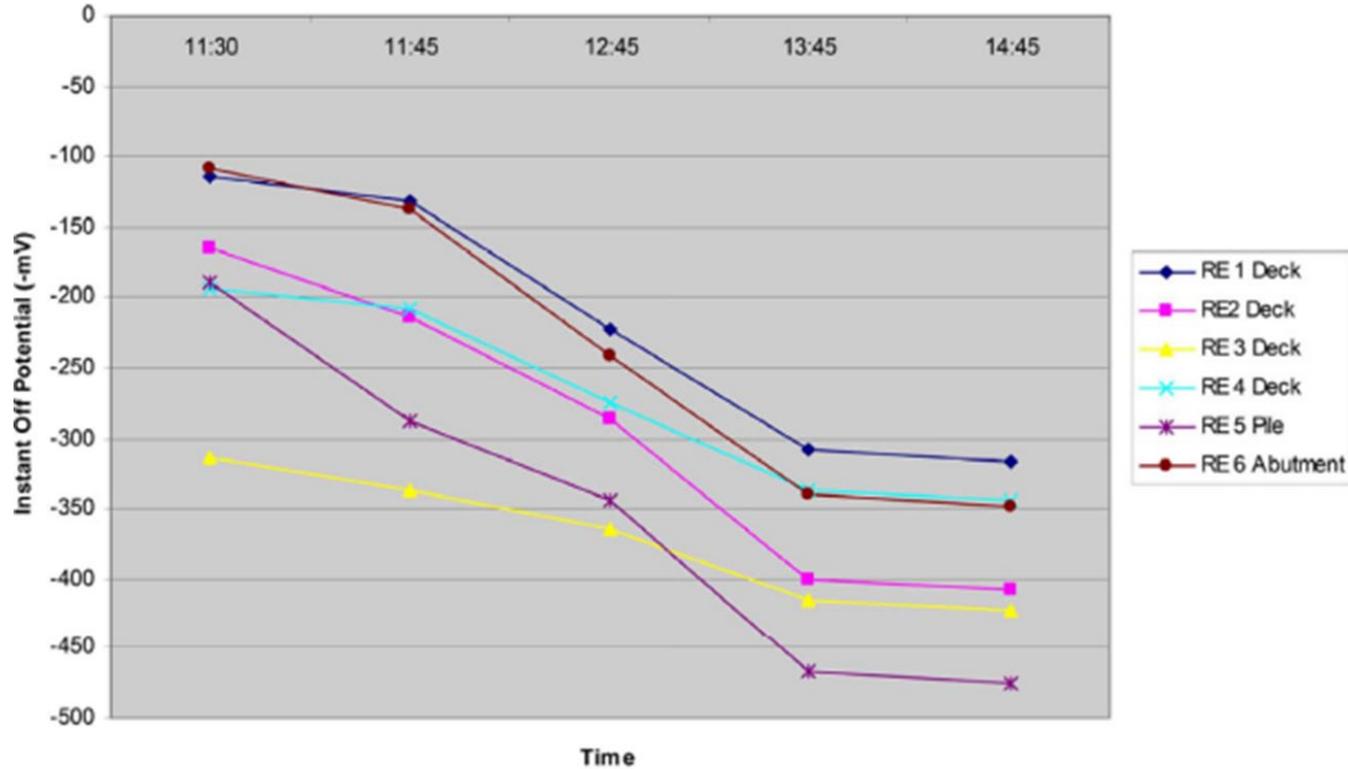
Registrazione potenziali E_{off}
istantanei e nativi da 1h a
24h

3-4 ore per sufficiente
polarizzazione

Omogeneità protezione



B15 DO1 Zone 1 Reference Cells





DE NORA

discover more

