

Monitoraggio della corrosione e della protezione catodica

Durabilità delle opere in calcestruzzo armato

Uso di sistemi di protezione catodica e altre protezioni aggiuntive

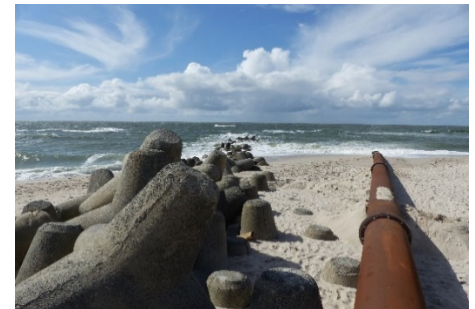
APCE - 3 Novembre 2020

Paolo Marcassoli, Cescor Srl, Milano

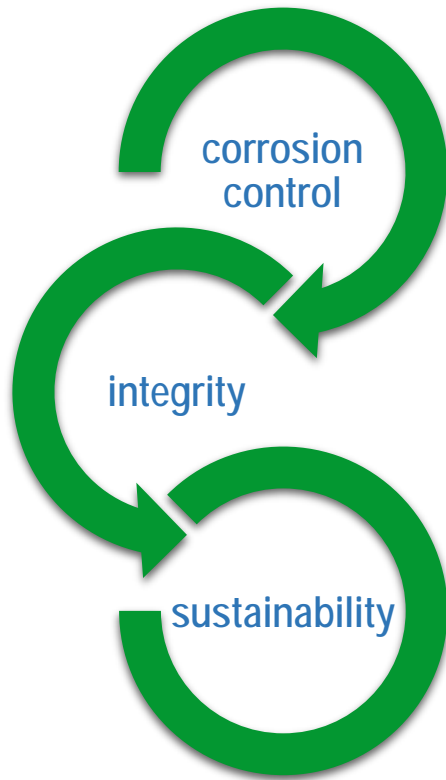


CESCOR: chi siamo

- CESCOR ha iniziato a operare nel 1988 come Studio Associato di Professionisti, e nel 1994 è stata creata CESCOR srl.
- La società è poi cresciuta regolarmente e oggi è una società di ingegneria e servizi riconosciuta, con competenze specifiche nei settori del controllo della corrosione, della scelta dei materiali, della protezione catodica e delle ispezioni, che impiega un numero significativo di specialisti qualificati in varie discipline.
- CESCOR opera principalmente nei seguenti settori industriali:
 - Petrolifero (upstream)
 - Eolico offshore
 - Civile, infrastrutture
 - Marino e offshore
 - LNG
 - Ferroviario/trasporti



Durabilità è sicurezza e sostenibilità



- L'Integrità delle strutture civili deve essere mantenuta per l'intera vita di progetto
- La corrosione rappresenta una delle principali minacce alla durabilità delle opere in c.a. e c.a.p.
- Le competenze ingegneristiche e ispettive nel campo dei materiali e del controllo della corrosione contribuiscono in modo significativo a garantire la durabilità
- Assicurare l'integrità delle strutture si traduce in
 - Sicurezza delle persone
 - Salvaguardia dell'ambiente
 - Risparmio energetico





Principali meccanismi di attacco:

- Corrosione generalizzata per carbonatazione del calcestruzzo
- Attacco localizzato per penetrazione di cloruri (aerosol marino, sali disgelanti)
- Correnti di interferenza (sistemi di trazione DC)
- Infragilimento da idrogeno



- Ispezioni e diagnostica corrosione
- Monitoraggio permanente
- Controllo dei sistemi di prevenzione/protezione catodica
 - Anodi galvanici
 - Corrente impressa

Ispezioni e diagnostica delle opere in c.a.

Gli scopi principali sono:

- Determinare l'insorgenza di fenomeni corrosivi
- Localizzare le aree corrose
- Valutare la vita residua

- Misure complesse
- Interpretazione esperta, non immediata

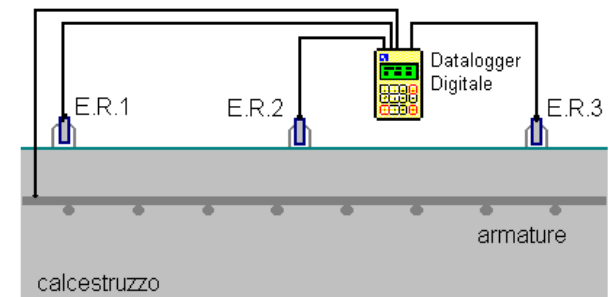
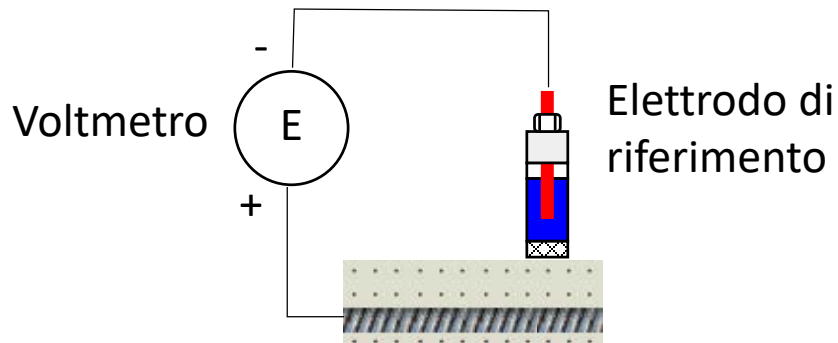
perché

- Le armature non sono visibili, se non nei casi di distacco del calcestruzzo
- Il calcestruzzo è un cattivo elettrolita
- Geometria complessa delle costruzioni

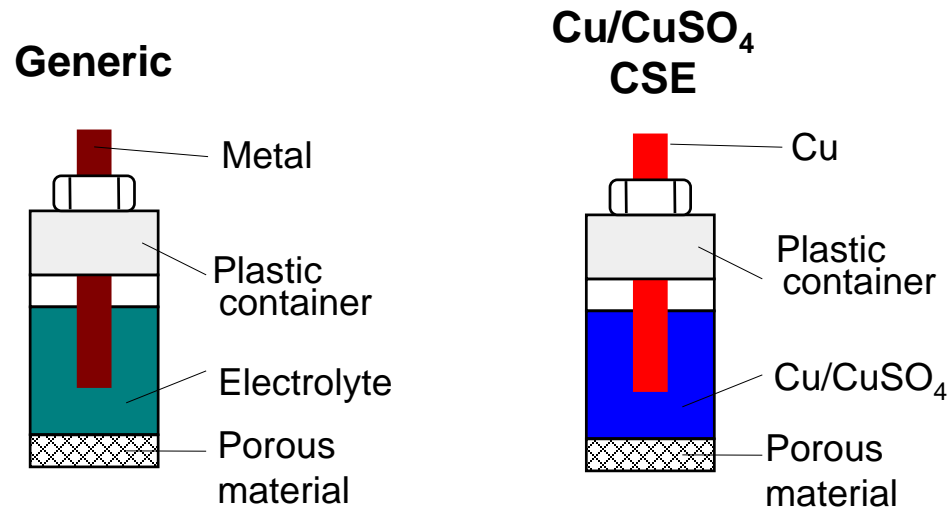


Mappatura di potenziale

- La misura del **potenziale** delle armature è la principale tecnica utilizzata sia in sede di ispezione che di monitoraggio permanente, in quanto:
 - è semplice
 - consente un primo screening di base
 - permette di riconoscere e localizzare l'innescio di fenomeni di corrosione
- Si basa sulla misura della differenza di potenziale tra l'armatura, collegata al polo positivo (rosso) di un voltmetro e un elettrodo di riferimento, collegato al polo negativo (nero)



Mappatura di potenziale. Elettrodo di riferimento



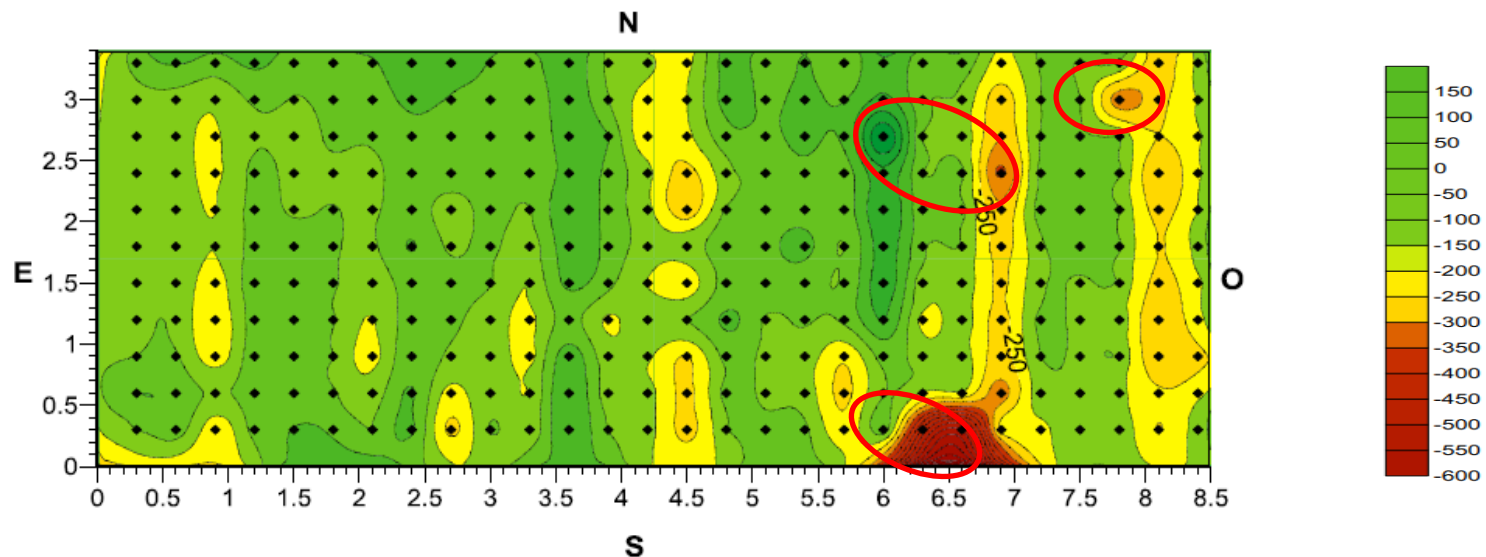
- L'elettrodo portatile comunemente utilizzato per misure su calcestruzzo è il rame/solfato di rame (CSE, Cu/CuSO₄)
- È facile da preparare, stabile
- Utilizzato con spugne bagnate per garantire un buon contatto con la superficie del calcestruzzo
- La mappatura è di solito eseguita con più elettrodi montati su supporto

Mappatura di potenziale. Elettrodo di riferimento



Mappatura di potenziale

- La mappatura, eseguita con spaziature regolari tra gli elettrodi sulla superficie del calcestruzzo, permette di ricostruire una mappa isopotenziale, con cui identificare zone di passività e basso rischio corrosivo e macrocoppie
- Le macrocoppie caratterizzano punti in cui si ha prossimità di aree anodiche e catodiche, si osserva una significativa differenza di potenziale (i.e. lavoro motore della corrosione)
- Le aree ove la corrosione è in atto sono identificate ed è possibile intervenire con opportuno ripristino (es. rimozione calcestruzzo ammalorato, sabbiatura/idropulitura, ripristino copriferro)



Mappatura di potenziale. Criteri interpretativi

- Le condizioni di pratica assenza di corrosione in strutture esposte all'atmosfera sono caratterizzate da potenziali in genere compresi tra +150 e -200 mV vs. CSE.
- La norma ASTM C876 propone i criteri di interpretazione esposti nella seguente tabella.

Tabella - Criteri di interpretazione del potenziale secondo ASTM C876.

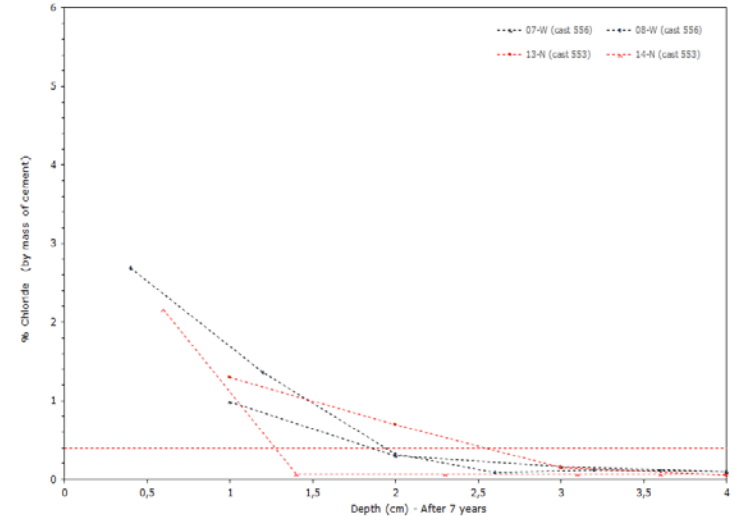
Potenziale misurato (vs. CSE)	Probabilità di corrosione
$E > -200 \text{ mV}$	$< 10\%$
$-350 < E < -200 \text{ mV}$	$\approx 50\%$
$E < -350 \text{ mV}$	$> 90\%$

Analisi chimiche. Cloruri

- Nelle aree di probabile corrosione individuate dalla mappatura del potenziale vengono effettuati prelievi di calcestruzzo per le analisi di concentrazione degli ioni cloruro.
- Tali analisi consentono di confermare la diagnosi basata sulle misure elettrochimiche e di determinare i profili di contaminazione da parte degli ioni cloruro.
- I prelievi sono fatti mediante carotaggio e le analisi chimiche sono effettuate presso laboratori qualificati, in accordo alle normativa **UNI 9944**.



- Nel caso di strutture aeree, il **rischio** di corrosione è in pratica **trascurabile** per tenori di cloruri **inferiori allo 0,4%** in peso rispetto al contenuto di cemento, e diventa **elevato** per tenori superiori all'**1%**. La concentrazione critica dei cloruri è indicativamente compresa nell'intervallo 0,4% e 0,8% in funzione del tenore di cemento.
- La prova, eseguita su calcestruzzo a differenti profondità rispetto alla superficie, permette di determinare il **profilo dei cloruri** dal quale si può valutare l'evoluzione temporale della penetrazione di questi ioni nel copriferro
- Il profilo dei cloruri consente la determinazione del coefficiente di diffusione dei cloruri e la stima della velocità di ingresso degli ioni cloruro nel copriferro.
- Dal tipo di profilo ottenuto si può anche stabilire se i cloruri sono penetrati dall'esterno (concentrazioni in diminuzione dall'esterno verso l'interno del copriferro) o se questi erano presenti nell'acqua dell'impasto o negli aggregati al momento del getto.

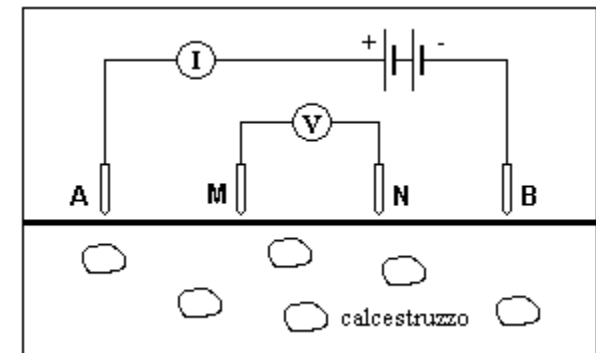


Analisi chimiche. Carbonatazione

- Lo spessore dello **strato carbonatato** può essere misurato prelevando una carota ed eseguendo il test con **fenolfataleina**.
- La fenolfataleina assume una colorazione rosa in contatto con sostanze alcaline (il calcestruzzo non ancora carbonatato) e trasparente in contatto con sostanze acide, neutre o lievemente alcaline (calcestruzzo carbonatato)
- È possibile stimare la **velocità di avanzamento** del fronte di carbonatazione nel tempo e, noto il copriferro, il **tempo residuo** prima del raggiungimento delle barre



- La resistività del calcestruzzo ha un ruolo importante nella fase di propagazione dei fenomeni di corrosione delle armature, sino a diventare, in presenza di umidità relative inferiori al 90%, il fattore controllante della loro **cinetica**.
- Nel caso delle strutture aeree, le misure di resistività elettrica del calcestruzzo contribuiscono a individuare le aree maggiormente a rischio.
- L'integrazione tra misure di resistività e mappe di potenziale può fornire una valutazione delle **correnti di macrocoppia** circolanti nella soletta per individuare le zone in cui sono in atto fenomeni di corrosione localizzata particolarmente accentuati.
- Per la misura della resistività elettrica del calcestruzzo è utilizzato il **metodo "Wenner"** a 4 contatti con diverse dimensioni, corrispondenti a diverse profondità nel calcestruzzo.



Resistenza di polarizzazione lineare (LPR)

Il principio del metodo consiste nell'imporre una **polarizzazione** delle armature $dE = 10 \text{ mV}$ facendo circolare una corrente I tra i ferri di armatura e un idoneo contro-elettrodo metallico a contatto con la superficie del calcestruzzo.

Il rapporto dE/i (dove i è la densità di corrente applicata) è detto **resistenza di polarizzazione** R_p data dalla relazione:

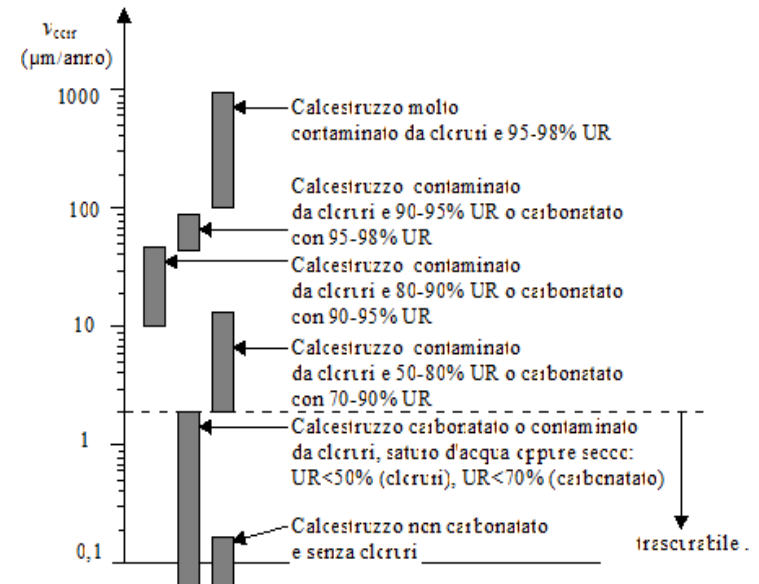
$$R_p = dE/i = (dE/I) \cdot S$$

dove S è la superficie dei ferri che scambiano corrente con il contro-elettrodo.

La **velocità di corrosione** (V_{cor}) viene quindi correlata alla resistenza di polarizzazione R_p nel modo seguente:

$$V_{corr} = C/R_p$$

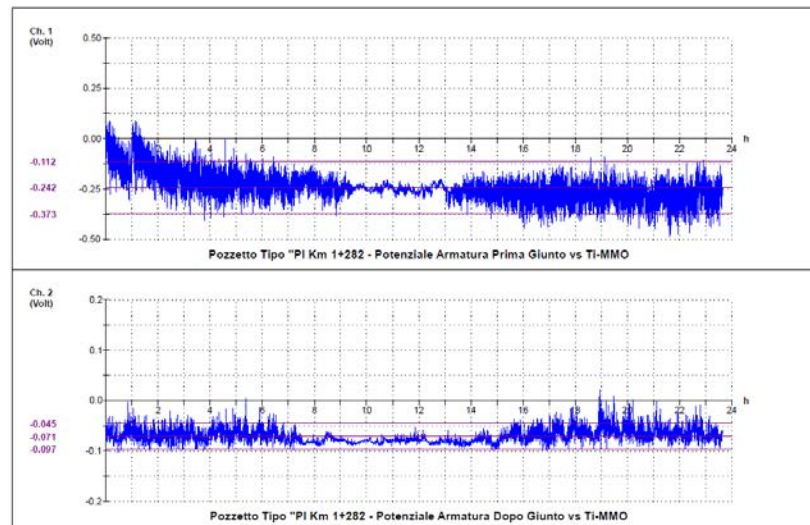
dove C è una costante, che per l'acciaio al carbonio immerso in calcestruzzo può assumere valori compresi tra 26 e 52 mV (norma UNI 10322)



Monitoraggio permanente

Elettrodi di riferimento permanenti:

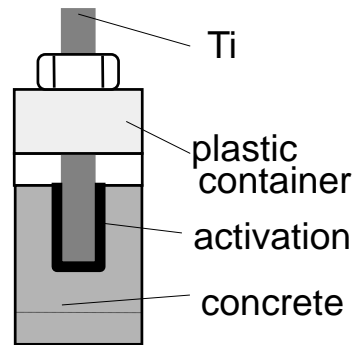
- Possibilità di misurare periodicamente il potenziale in punti significativi, in modo manuale o automatico
- Confronto con valori di riferimento per passività e rischio corrosione, confronto con criteri normati (es. 100 mv potential decay)
- Possibilità di eseguire registrazioni di 24 ore per la verifica di fenomeni di interferenza/correnti disperse



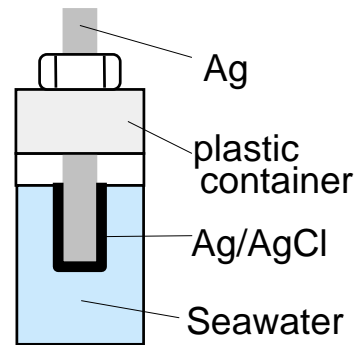
- Associati a sistemi di protezione catodica, per controllo o autoregolazione dell'erogazione

Elettrodi di riferimento permanenti

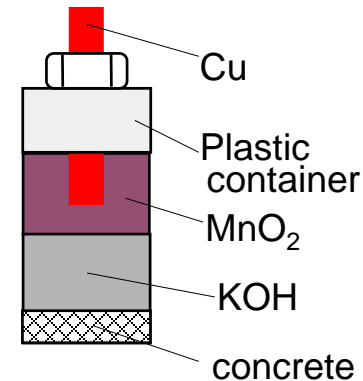
**Ti/activate
MMO**



**Ag/AgCl
AAC**



**MnO₂
MN**



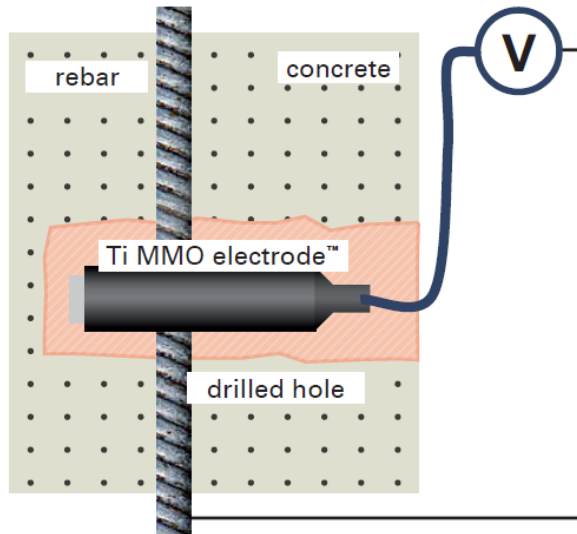
•**Silver/silver chloride:** silver wire in KCl solution (english type 3% sol. and american type saturated sol.); potential 0.2 V vs SHE

•**Manganese dioxide:** pseudo-electrode non-stoichiometric manganese dioxide with alkaline KOH solution; quite stable but pH dependent (0.37 V vs SHE at pH 13)

•**Oxide based electrodes:** rod embedded in concrete (made of stainless steel or graphite or MMO-activated Ti)

- Stainless steel depends on oxygen and pH
- Graphite is quite stable
- TiMMO is stable at 0.2-0.3 V vs SHE at constant pH

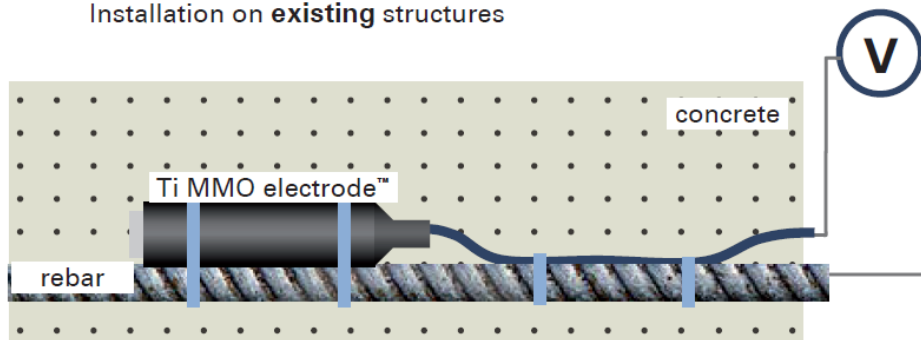
Installazione: nuovo vs esistente



Installation on **existing** structures

Elettrodi di riferimento permanenti:

Installati in punti significativi (zone critiche per esposizione ad aerosol marino, punti di possibile sovrapprotezione con sistemi ICCP, punti critici con possibili correnti disperse, etc)



Installation on **new** structures

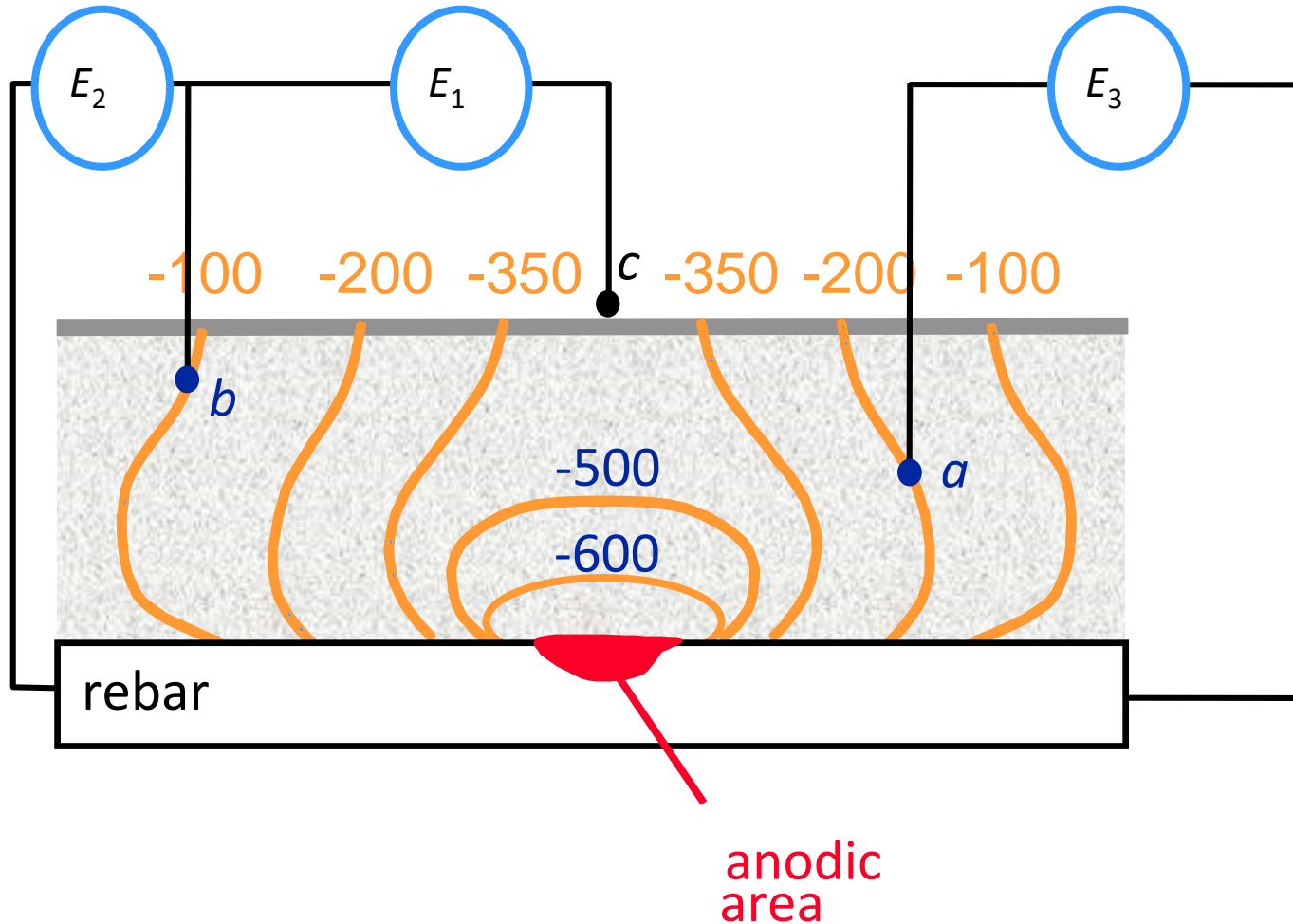
Possibilità di individuare le condizioni di corrosione su tutta la lunghezza e non in un singolo punto

Rilevazione:

- Macro Coppie e aree corrose sono localizzate
- Infragilimento da idrogeno
- Correnti disperse



Principio di base MURE: mappatura tradizionale

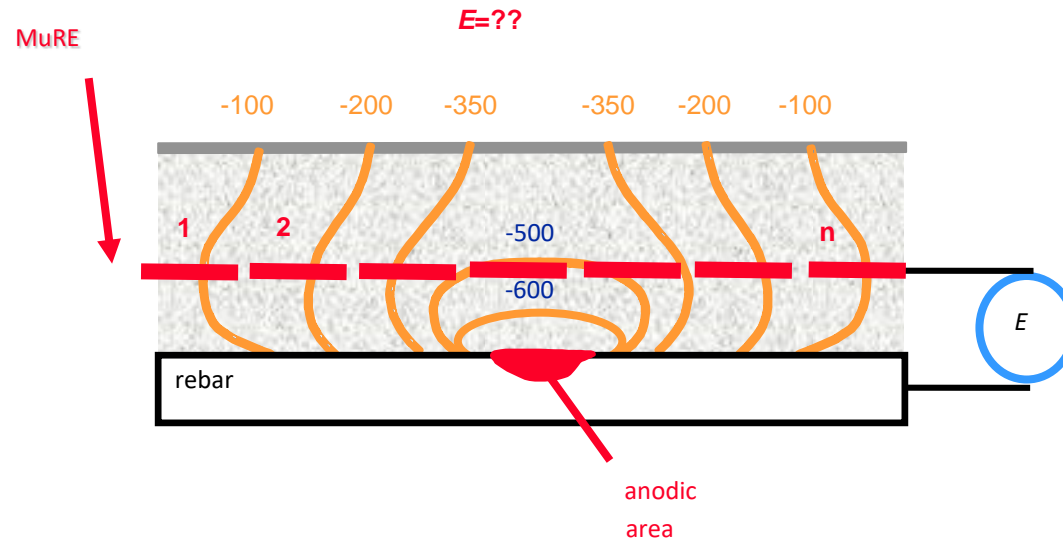
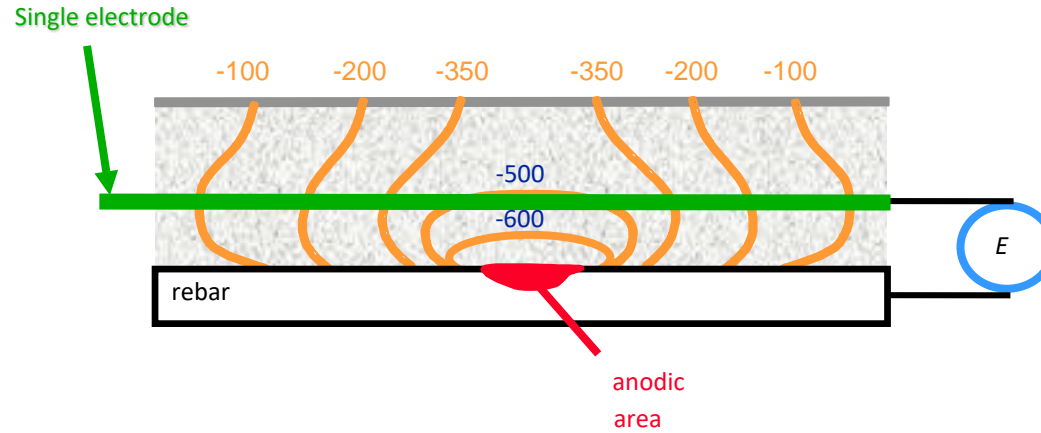


$$E_2 = -100 \text{ mV}$$

$$E_1 = -350 \text{ mV}$$

$$E_3 = -200 \text{ mV}$$

Principio di base MūRE: multielettrodo



$$E_1, E_2, \dots, E_n$$

Monitoraggio e controllo della protezione catodica – corrente impressa

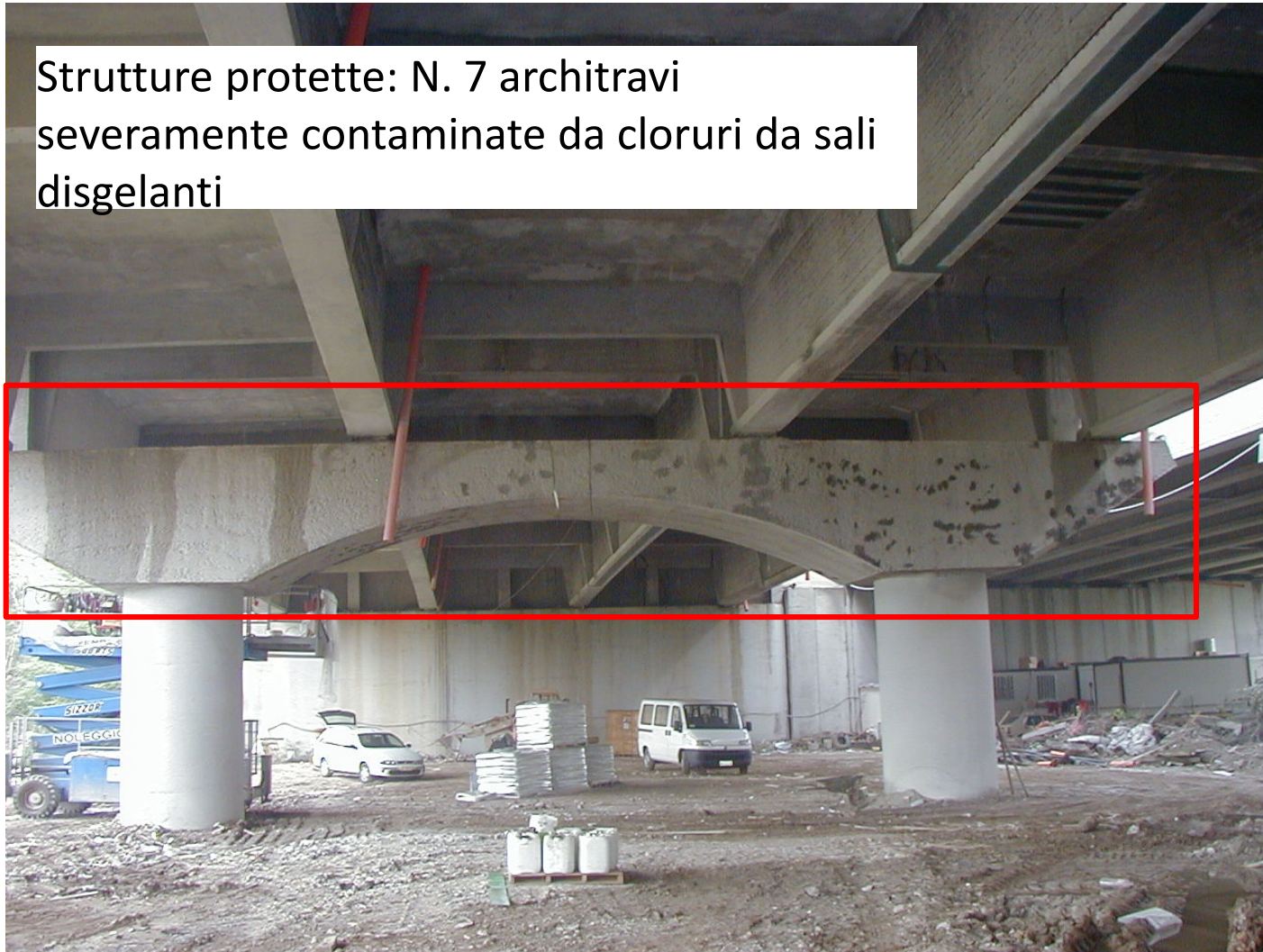
Funzioni principali

Un sistema di protezione catodica comprende dispositivi e apparecchiature per il monitoraggio del corretto funzionamento del sistema, per la regolazione automatica dei sistemi di alimentazione e per la gestione dei dati.

Le funzioni principali sono generalmente:

- misura, rispetto ad elettrodi di riferimento fissi, dei potenziali delle armature e delle strutture anodiche nelle modalità "on" e "instant off";
- misure di corrente e tensione di alimentazione;
- misure di depolarizzazione;
- elaborazione delle misure di cui sopra per la verifica di corretto funzionamento del sistema;
- regolazione automatica dei sistemi di alimentazione in base ai dati di funzionamento.

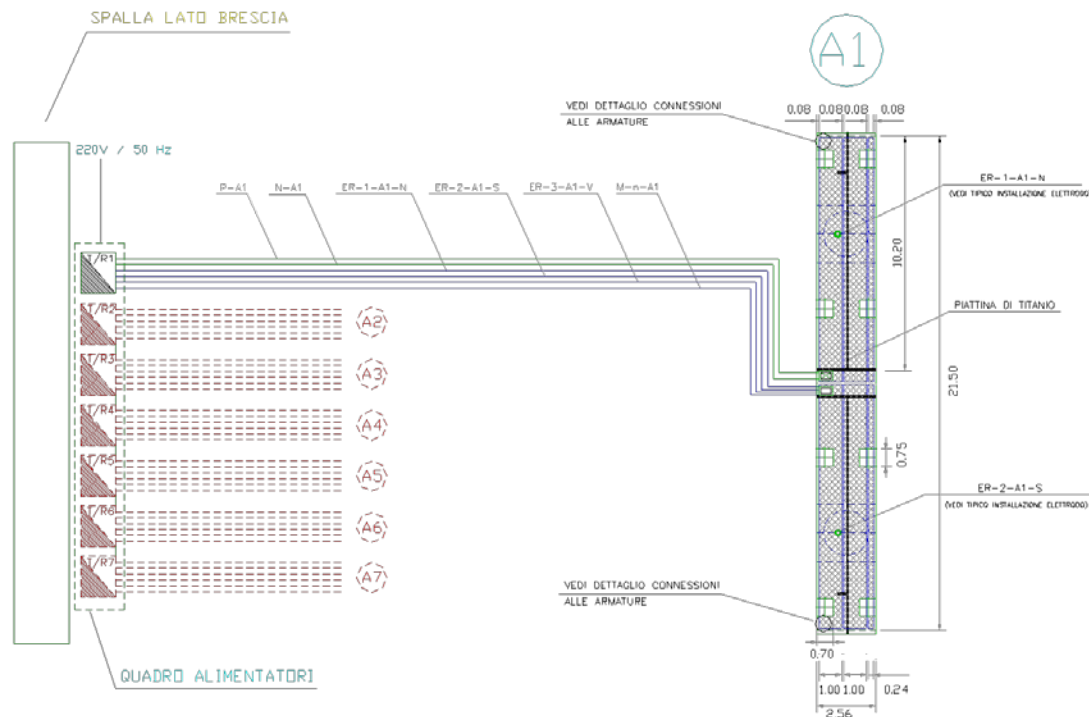
Strutture protette: N. 7 architravi
severamente contaminate da cloruri da sali
disgelanti



Circuito di misura

Il circuito di misura del potenziale è così costituito:

- elettrodo di riferimento fisso, annegato nel calcestruzzo, e relativo cavo individuale di collegamento all'unità di controllo;
- armature di rinforzo e relativo cavo individuale di collegamento all'unità di controllo. È ammesso l'impiego, per più elettrodi di riferimento, di un unico cavo di collegamento alle armature;
- strumento di lettura, parte integrante dell'unità di controllo.



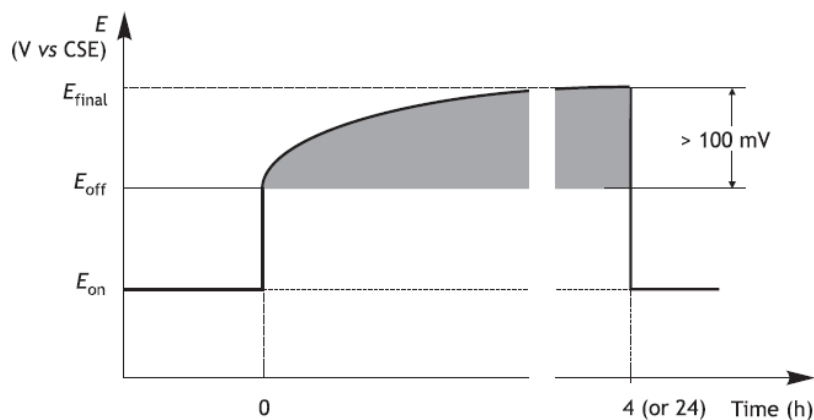
Unità di controllo

L'unità di controllo è costituita da una serie di schede a microprocessore, una per ciascuna unità di trasformatore - raddrizzatore, in grado di effettuare:

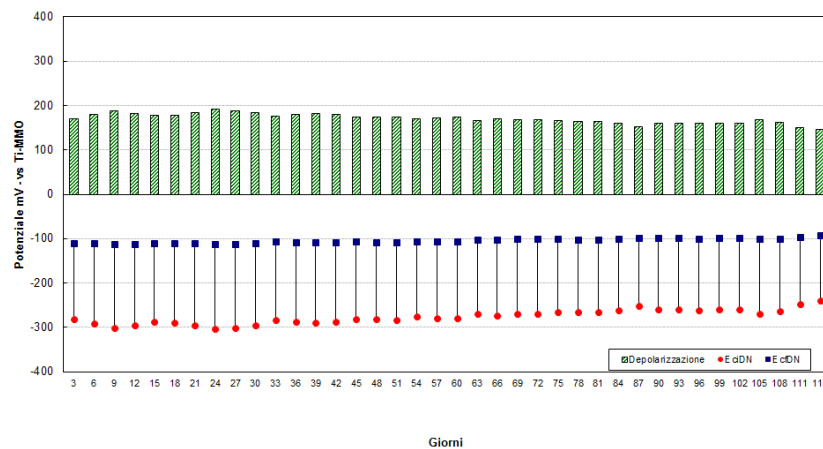
- misura, rispetto agli elettrodi di riferimento fissi, dei potenziali delle armature e delle strutture anodiche nelle modalità "on" e "instant off";
- misure di corrente e tensione di alimentazione;
- misure di depolarizzazione;
- elaborazione delle misure di cui sopra per la verifica di corretto funzionamento del sistema;
- verifica delle condizioni di sovraprotezione sulla base della misura del potenziale anodico;
- la memorizzazione delle misure effettuate e dei dati di funzionamento del T/R corrispondente;
- la regolazione automatica del T/R collegato, sulla base delle misure effettuate;
- l'interruzione dell'alimentazione in caso di superamento di valori di soglia prefissati per la tensione e la corrente di alimentazione e la conseguente attivazione di segnali di allarme;
- il collegamento ad una unità portatile per la lettura di tutti i dati acquisiti dall'unità di controllo;
- il trasferimento periodico dei dati dall'unità di controllo ad una unità portatile (data logger o personal computer).

Attività:

- Ispezione visiva del sistema di protezione catodica;
- Cablaggio cavi in arrivo al quadro di alimentazione;
- Verifica e acquisizione dei potenziali degli elettrodi prima dell'avviamento;
- Verifica dei parametri di alimentazione tensione e corrente;
- Test di instant off;
- Test di depolarizzazione.



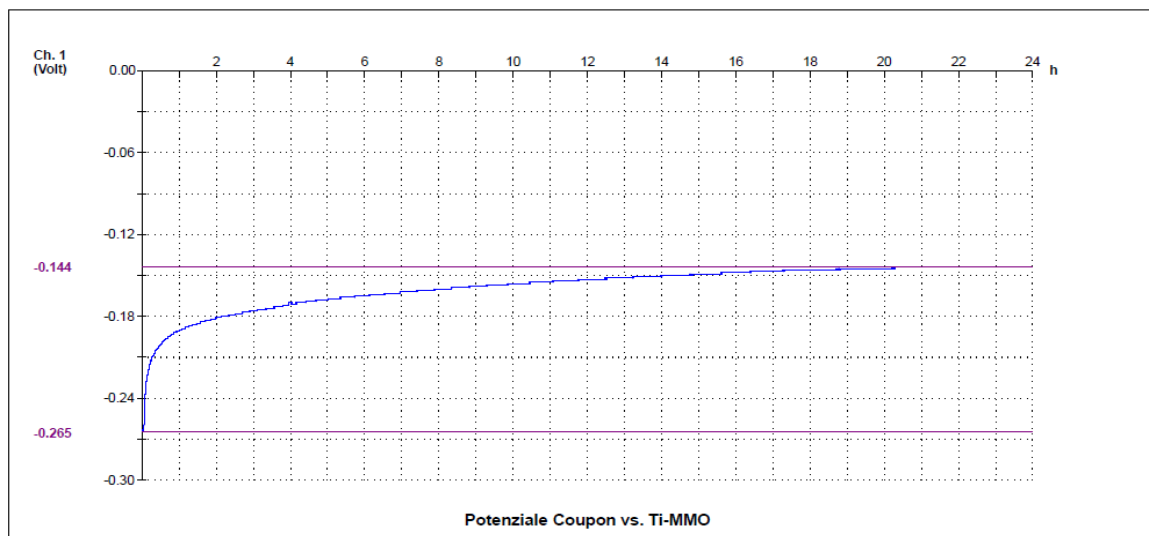
Criterio 100 mV potential decay



Potenziali instant-off "EciDN" e dopo depolarizzazione di 4 ore "EciDN"

Monitoraggio e controllo della protezione catodica – anodi galvanici

Depolarizzazione su coupon protetto da GA



Thank you for your attention!

Questions

