



POLITECNICO
MILANO 1863

Ciclo di webinar “Ripristino di strutture in c.a. danneggiate dalla corrosione”
Tecniche elettrochimiche per il ripristino del calcestruzzo armato
Prof.ssa Elena Redaelli (mCD)



CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI



ASSOCIAZIONE
TECNOLOGI
PER L'EDILIZIA



Intervento tradizionale: Alcuni dati dal campo

Una analisi di 230 ripristini su strutture con età prevalentemente compresa tra 10 e 40 anni (max 100 anni) ha evidenziato che il principale problema era la corrosione dell'armatura che è stato affrontato con il metodo *patch repair* (60% dei casi).

Nel 50% dei casi, l'intervento non ha avuto successo, evidenziando fessurazioni, distacchi e propagazione della corrosione:

- 20% entro 5 anni;
- 55% entro 10 anni;
- 90% entro 25 anni.

Le cause sono state identificate come: errori di progetto (38%), scarsa qualità della manodopera (19%), errata diagnosi (16%), errata scelta dei materiali (15%) e altro (12%).

Ref: G. Tilly, J. Jacobs, Concrete Repairs: Observations on performance in service and current practice, CONREPNET Project Report, 2007, BRE, Watford (UK).

Intervento tradizionale: Conservazione vs. Durabilità

Intervento localizzato (*patch repair*)

- Apparentemente poco invasivo, conservativo e veloce
- Generalmente poco durevole

Intervento con sostituzione completa

- Non conservativo e molto invasivo
- Generalmente durevole



I metodi elettrochimici possono essere vantaggiosi rispetto all'intervento tradizionale, in particolare:

- in ambienti aggressivi (ad es. per presenza di cloruri)
- nei casi in cui è necessario conservare il calcestruzzo
 - per limitare la rimozione (che implica produzione di rumore, polvere e detriti, inaccessibilità edifici, ecc.)
 - per esigenze legate alla conservazione (spesso prioritarie in caso di rilevanza storica, culturale e architettonica)

Soltanto il calcestruzzo danneggiato deve essere sostituito.

La superficie del calcestruzzo può rimanere inalterata (tecniche temporanee).

1- protezione catodica, *PC*

PERMANENTI

2- prevenzione catodica, *PrevC*

3- rialcalinizzazione elettrochimica, *RE*

TEMPORANEE

4- rimozione elettrochimica dei cloruri, *REC*

Si basano tutte sulla applicazione di una corrente catodica, applicata tra un anodo e l'armatura.

Differiscono per obiettivi e modalità di applicazione.

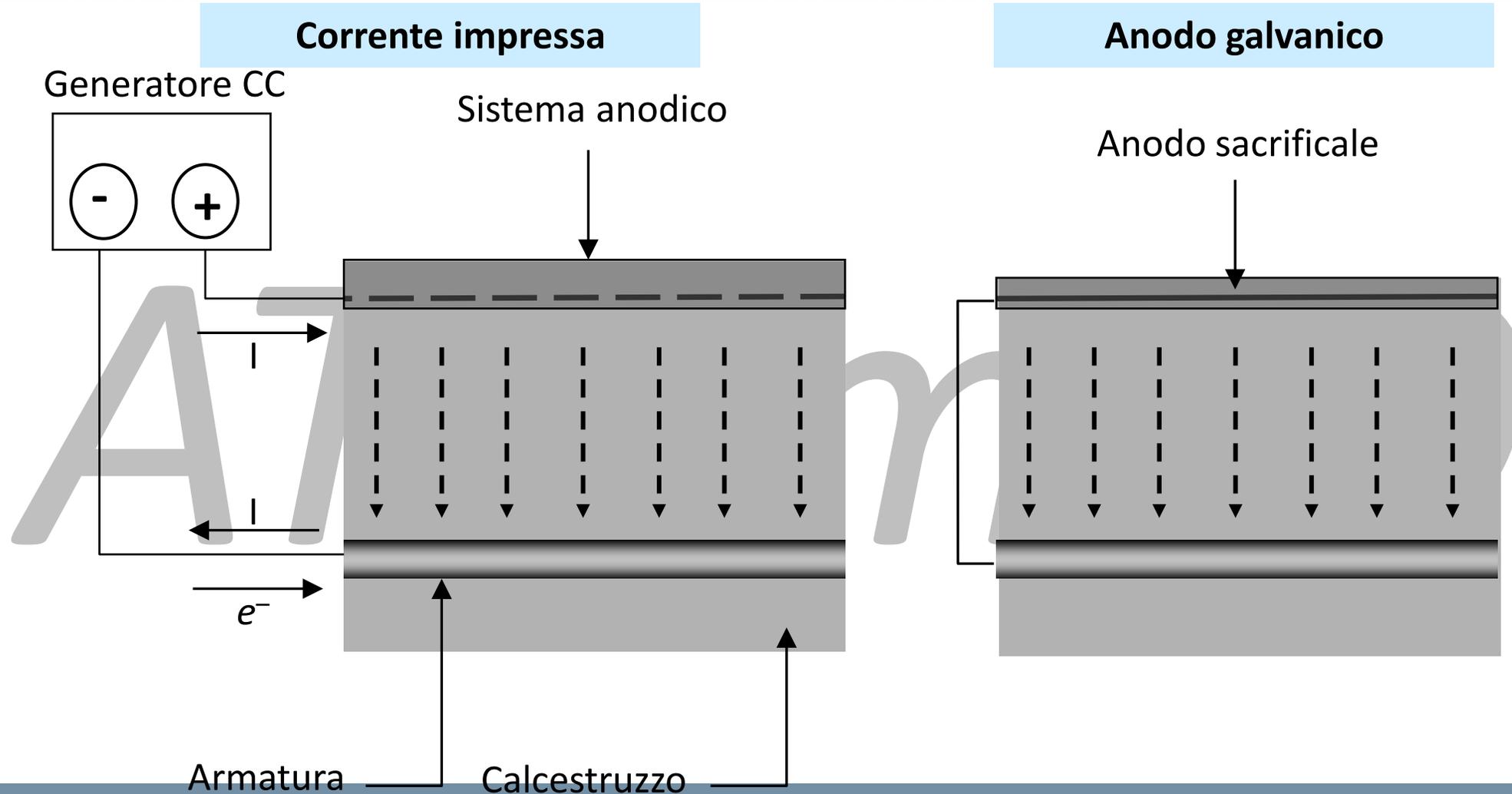
- Prevenzione della corrosione

- Caratterizzazione, monitoraggio e diagnostica

ATE-mCD

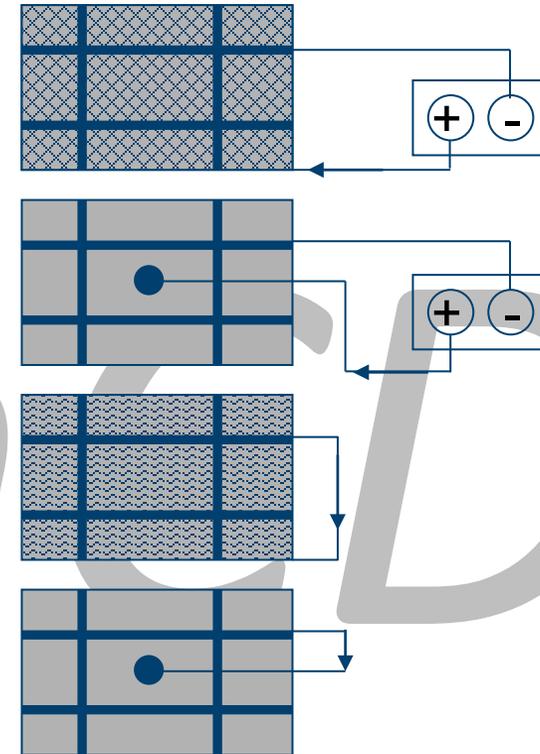
- Intervento

Applicazione delle tecniche elettrochimiche nel calcestruzzo



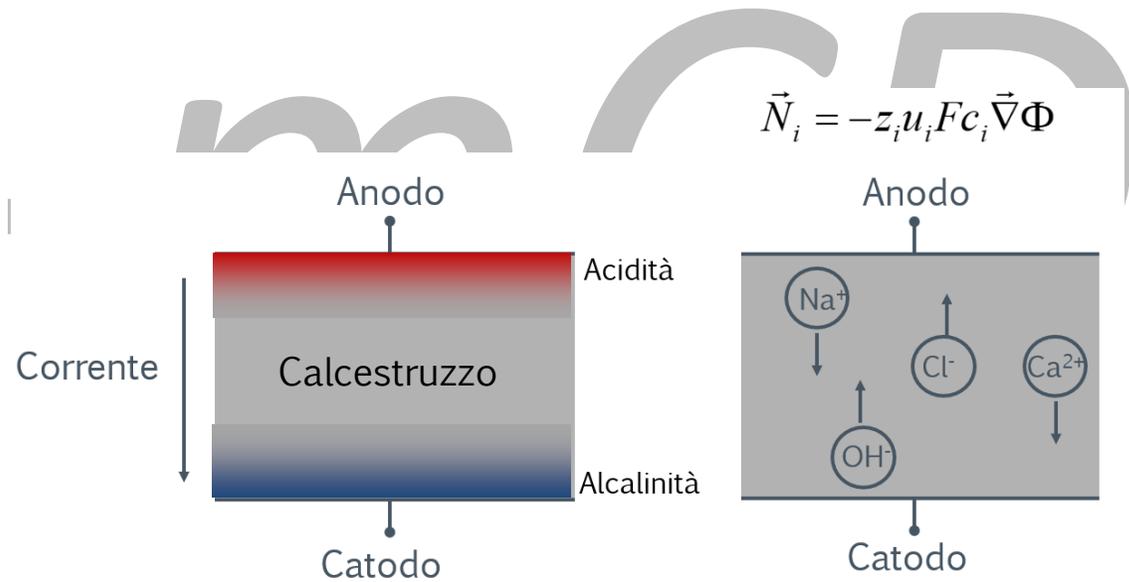
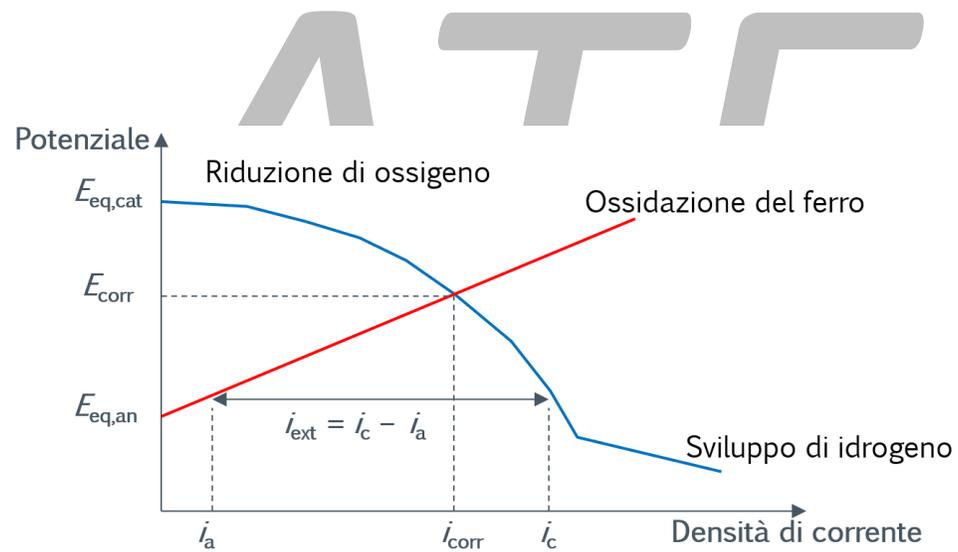
Configurazione anodica

- corrente impressa
 - anodo distribuito (rete)
 - anodo localizzato
- anodo galvanico
 - distribuito (fogli)
 - localizzato



Effetti della circolazione di corrente

- Diminuzione del potenziale e della velocità di corrosione dell'armatura
- Produzione di alcalinità
- Trasporto di corrente nel calcestruzzo (migrazione)



- Infragilimento da idrogeno: per potenziali molto negativi ($E < -950$ mV vs. SCE) sviluppo di idrogeno e rischio di infragilimento su acciai ad alta resistenza in calcestruzzo precompresso
- Perdita di aderenza acciaio-calcestruzzo: se $E < -1.1$ V vs. SCE per tempi lunghi
- Reazione alcali-aggregati: in presenza di aggregati reattivi
- Acidificazione anodica: può danneggiare i materiali cementizi a contatto con l'anodo (solo per metodi permanenti)

ATE-mCD

- Continuità elettrica dell'armatura
- Continuità elettrolitica del calcestruzzo (riparazione locale di fessure e distacchi, interventi di ripristino pregressi)
- Uniformità dello spessore di copriferro
- Accurata ispezione
- Progetto (corrente applicata, distribuzione di corrente nel caso di anodo localizzato, durata dell'anodo galvanico, ...)
- Monitoraggio del funzionamento e delle condizioni di protezione

Tecniche elettrochimiche: come funzionano

Tecniche permanenti:

- Protezione catodica (*PC*)
- Prevenzione catodica (*PrevC*)

Obiettivo: bloccare (o prevenire) la corrosione dell'armatura nel calcestruzzo carbonatato o contaminato da cloruri.

Densità di corrente 10-20 mA/m² (1-2 mA/m²)

“per sempre”

Tecniche temporanee:

- Rialcalinizzazione elettrochimica (*RE*)
- Rimozione elettrochimica dei cloruri (*REC*)

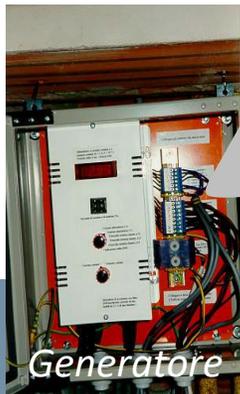
Obiettivo: ripristinare le caratteristiche protettive del calcestruzzo nei confronti dell'armatura.

Densità di corrente 1-2 A/m²

Qualche settimana – mese

Protezione catodica (ISO 12696, Cathodic protection of steel in concrete)

- obiettivo: **proteggere** le armature attraverso una corrente continua
- corrosione da **cloruri** e da carbonatazione
- sistema anodico **permanente**
- corrente impressa 10-20 mA/m² (es. titanio attivato in malta, malte conduttive)
- sistemi galvanici (anodi di zinco)
- **monitoraggio**: prove di depolarizzazione, elettrodi di riferimento fissi
- recenti sviluppi: anodi ibridi



Generatore



Rete di titanio attivato



Nastri di titanio attivato



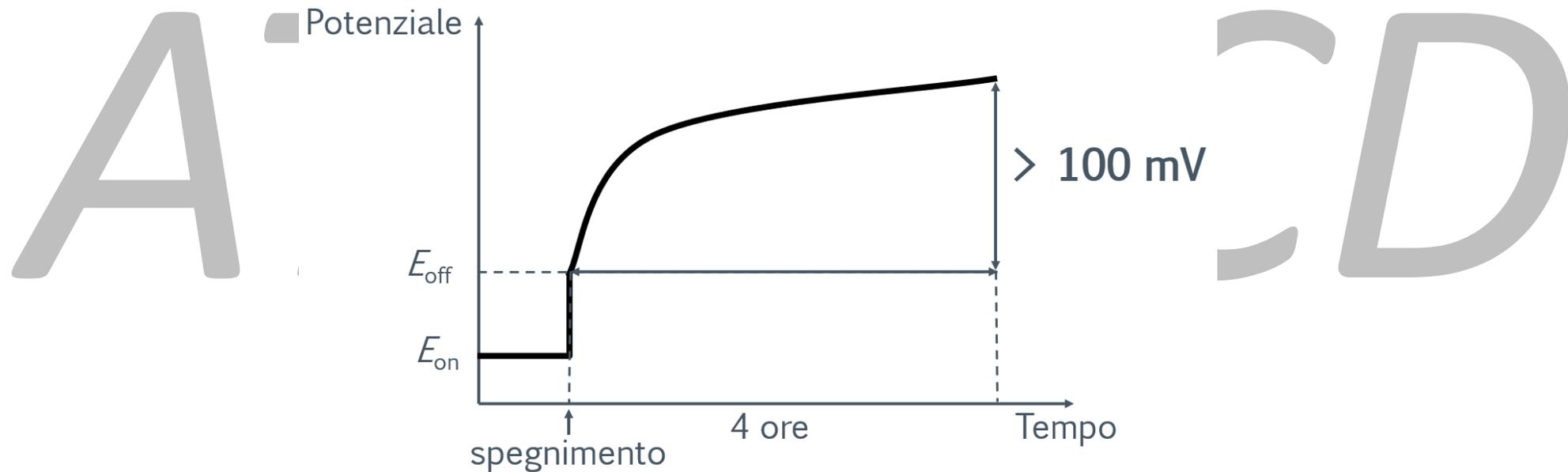
Malta cementizia conduttiva



Elettrodo di riferimento

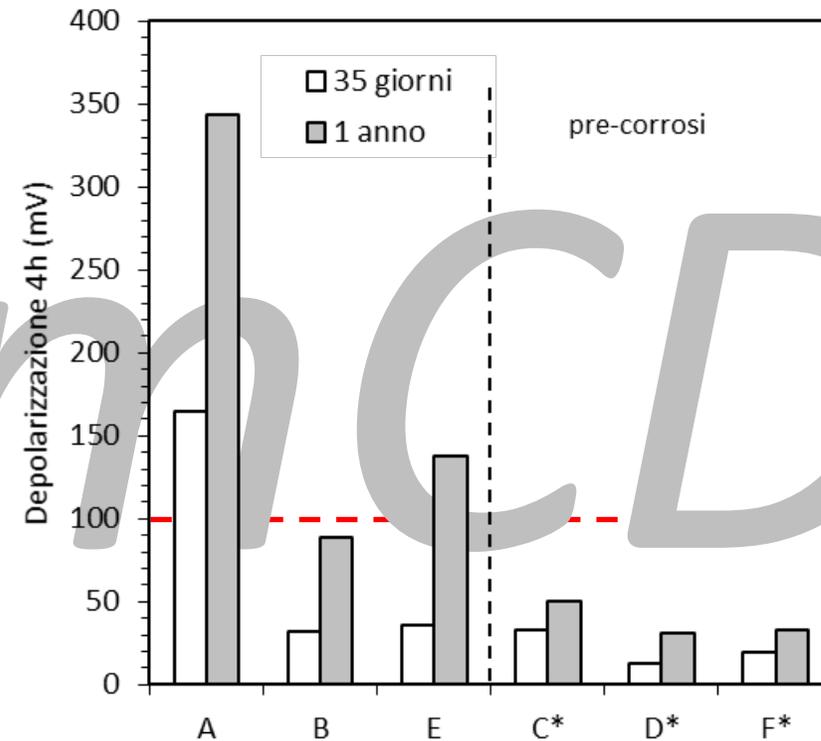
Monitoraggio della protezione catodica

- Potenziale instant-off < -720 mV vs. SSC
- Prove di depolarizzazione \rightarrow Criterio dei 100 mV: $\text{dep}(4-24\text{h}) > 100$ mV



Effetto della precorrosione dell'armatura nel calcestruzzo

Depolarizzazione a 4 ore di armature in calcestruzzi carbonatati esposti in ambiente umido



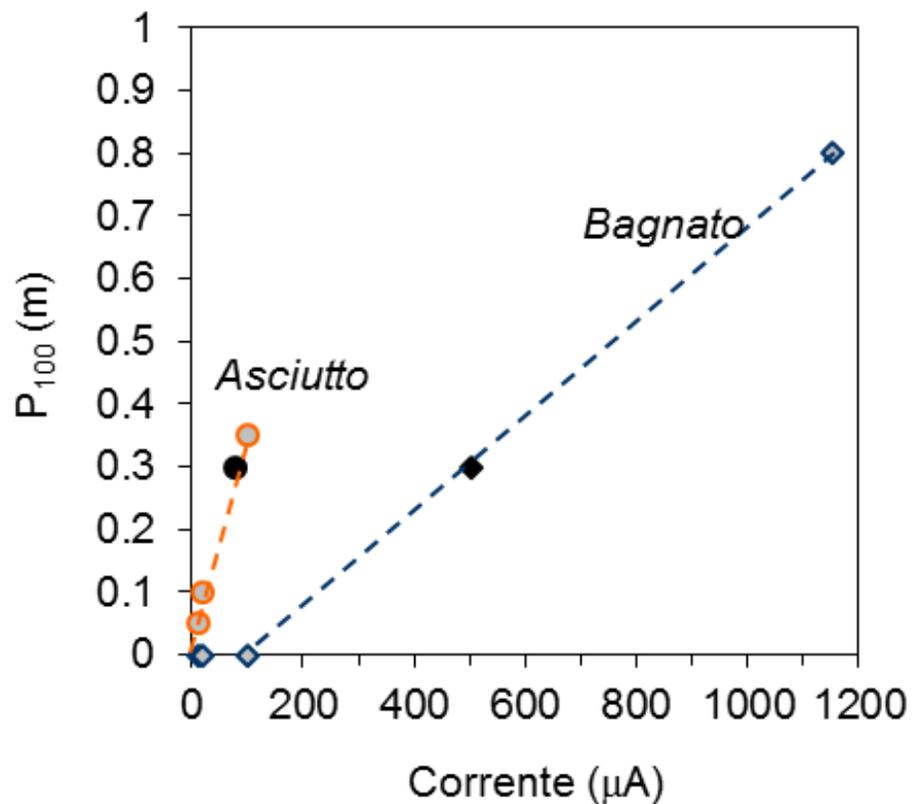
Caso studio: Pilastrini della Torre Velasca (1956-1958)

- corrosione da carbonatazione (elementi snelli)
- riportare gli elementi in condizioni di sicurezza (rischio caduta frammenti)
- preservare la forma e la superficie originali degli elementi
- garantire la continuità delle attività all'interno della Torre
- garantire una elevata durabilità e ridurre le operazioni di ispezione e monitoraggio

- prove ex-situ *PC*

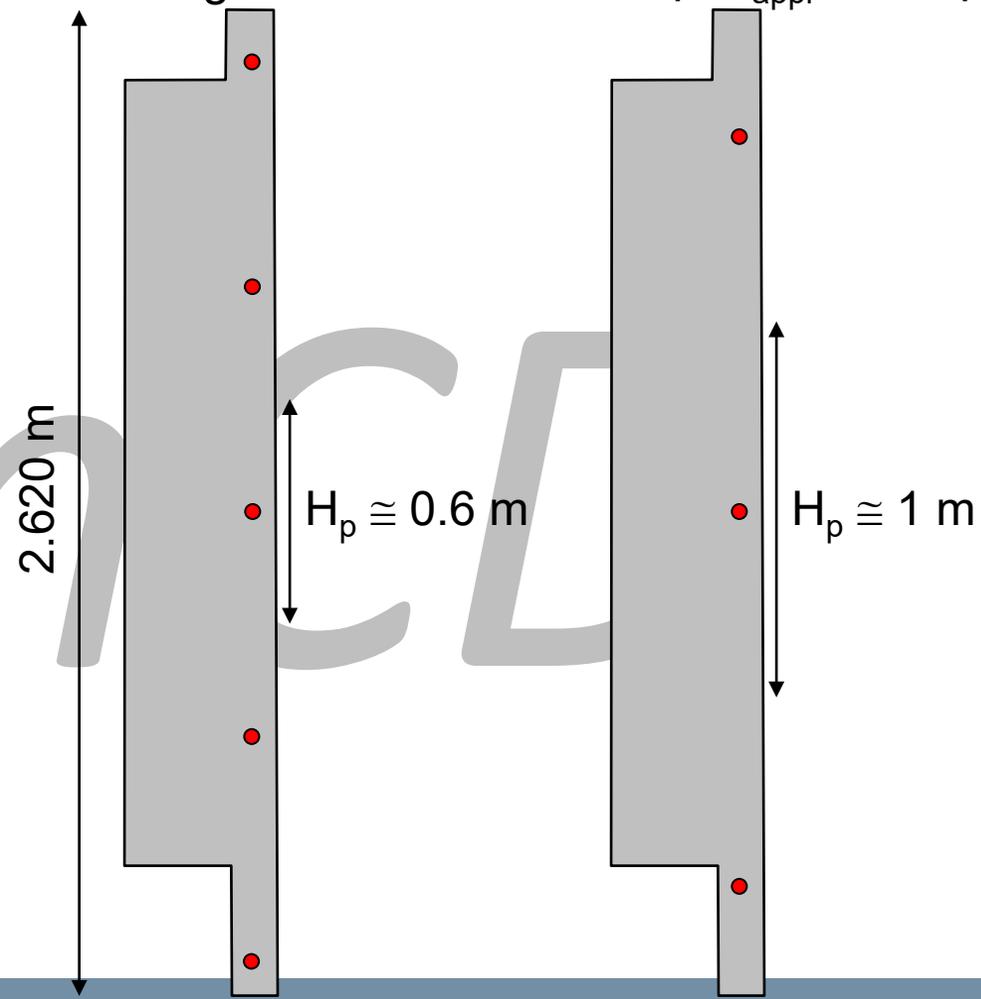


Ottimizzazione della configurazione anodica (anodi localizzati)



Anodo galvanico

Corr. impr. $I_{\text{appl}} = 800 \mu\text{A}$

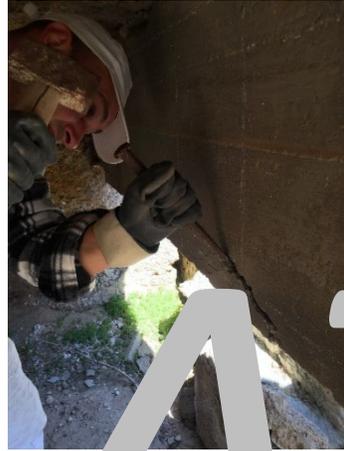


Caso studio: Elementi di sostegno nel sito archeologico di Nora a Pula (CA) (1960-1970)

- interventi di sostegno con strutture in c.a.
- avanzato stato di degrado (cloruri aggiunti all'impasto)
- esigenza di conservazione della funzione portante, evitando danni alle strutture archeologiche
- protezione catodica con corrente impressa



Applicazione della protezione catodica



Operazioni preliminari: rimozione calcestruzzo fessurato, pulizia armatura, ricostruzione copriferro, applicazione rete anodica in titanio attivato (immagini Impresa De Feo)

- corrente applicata 10 mA/m^2
- elettrodi di riferimento interni
- misure del potenziale *on/instant-off*
- prove di depolarizzazione a 4 ore

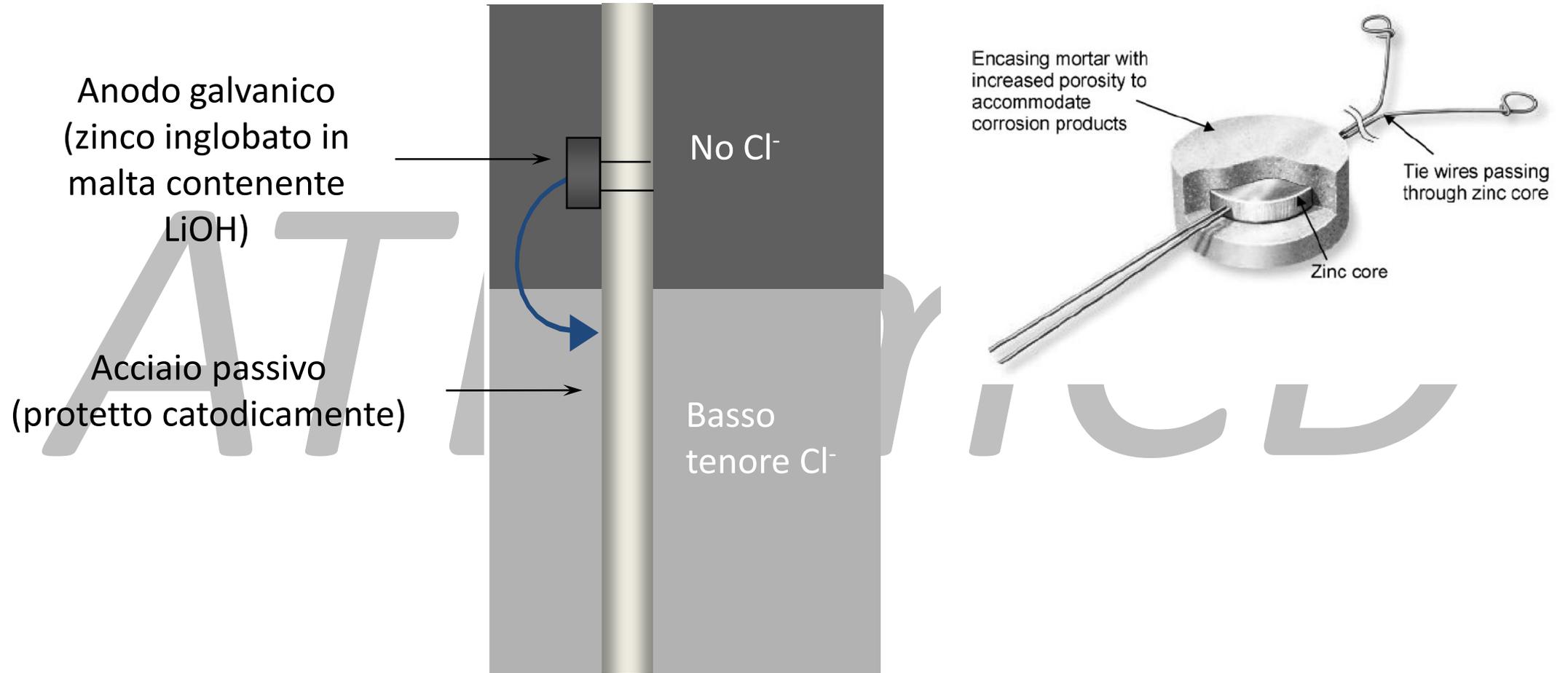


Generatore e quadro di controllo



Vista della zona protetta

Applicazioni speciali: *patch repair* con inserimento di anodo galvanico



Tecniche temporanee (EN 14038, Electrochemical realkalization and chloride extraction treatments for reinforced concrete - Part 1: Realkalization; Part 2: Chloride extraction)

- obiettivo: ripristinare le condizioni di protezione nel calcestruzzo:
 - *RE*: ripristinare l'**alcalinità** del calcestruzzo
 - *REC*: **rimuovere i cloruri** dal calcestruzzo
- corrosione da **cloruri** (*REC*) e da **carbonatazione** (*RE*)
- sistema anodico **temporaneo** (reti metalliche in polpa di cellulosa imbevuta di soluzione alcalina)
- corrente impressa 1-2 A/m² per qualche settimana – qualche mese
- al termine del trattamento il sistema anodico viene rimosso
- monitoraggio: prelievo di **campioni** durante il trattamento, misura del potenziale
- rischio di **infragilimento** da idrogeno (non adatte per strutture in c.a.p.)



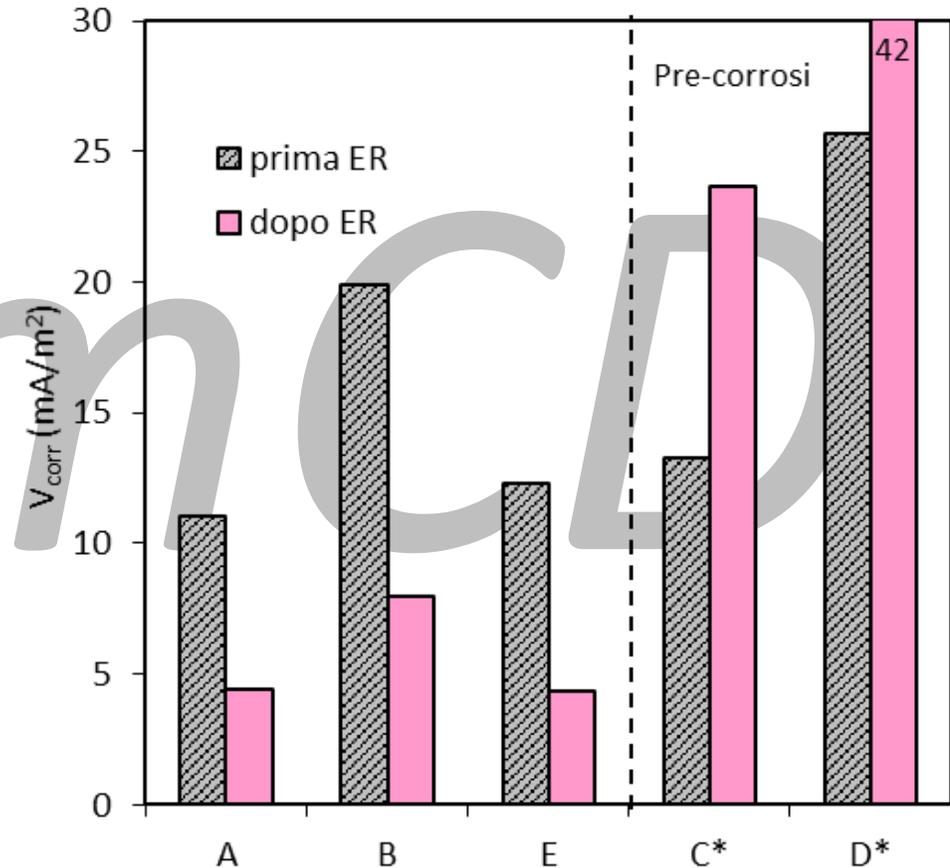
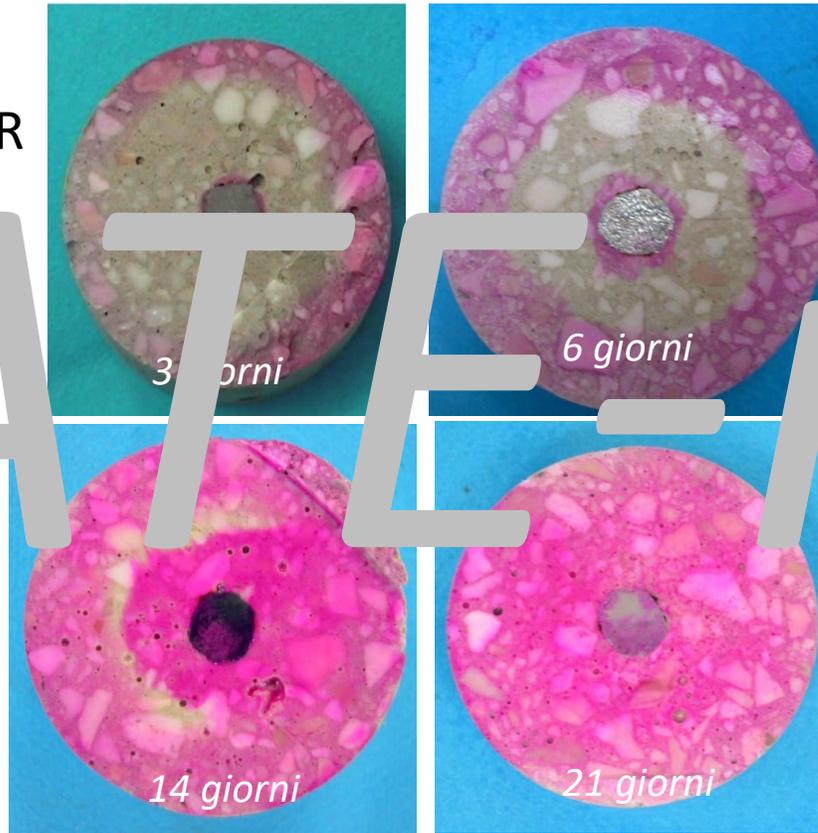
Rialcalinizzazione elettrochimica

Evoluzione della rialcalinizzazione e condizioni di corrosione dell'armatura

CEM III/B 42.5R

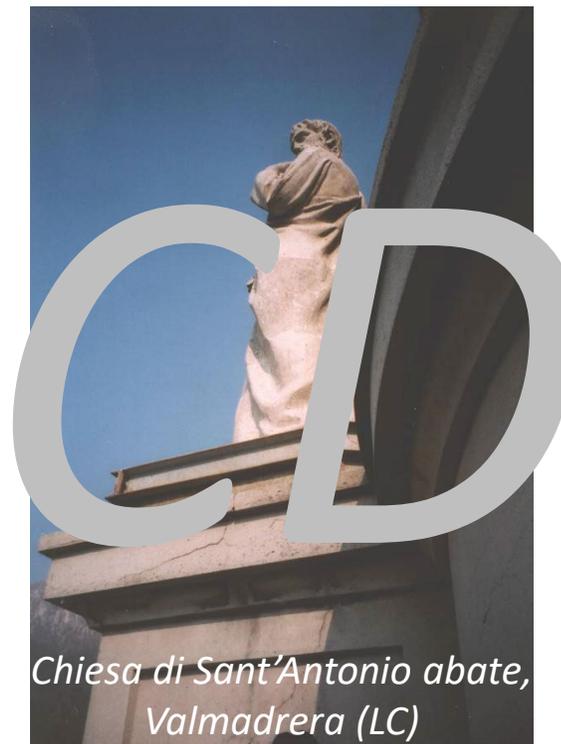
$a/c = 0.70$

1 A/m^2



Tecniche elettrochimiche temporanee nei beni culturali

Edifici di valore storico e architettonico, statue e monumenti.



Caso studio: Pilastri della Chiesa dell'Ospedale San Carlo a Milano (1964-1967)

- alti circa 22 m
- larghi 0.60-0.30 m
- c.a. faccia a vista
- corrosione da carbonatazione
- distacchi, delaminazioni, prodotti corrosione



Sperimentazione di interventi di conservazione: Ricalcinizzazione elettrochimica



*Polpa di cellulosa
imbevuta con
soluzione alcalina (1
M Na_2CO_3)*

*Rete di titanio
attivato*

*Secondo strato di
polpa di cellulosa
rivestito con pellicola*

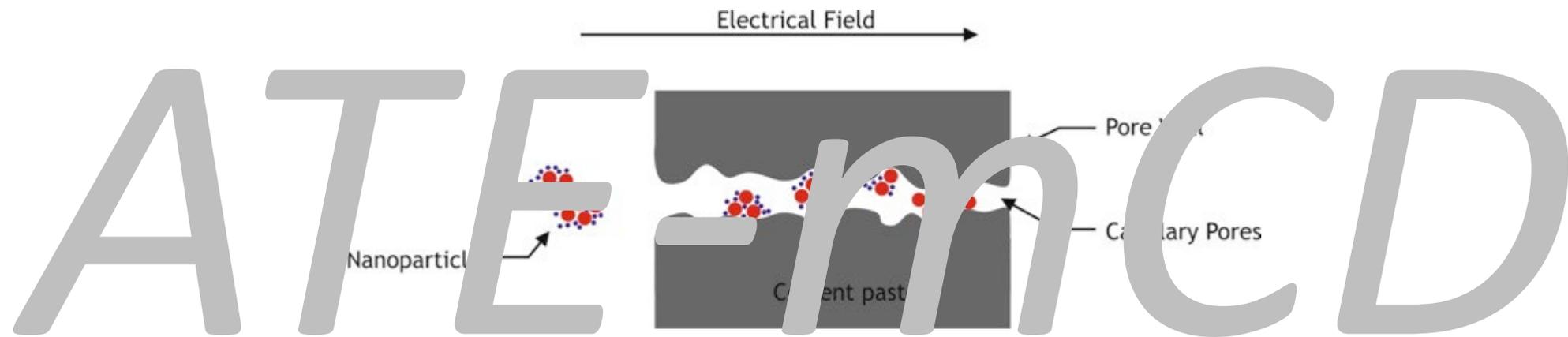
*Collegamenti
elettrici*

*Applicazione di
corrente catodica di
1 A/m² per 3
settimane*

Verifica dell'esito del trattamento



- Trasporto di nanoparticelle o altre sostanze (es. inibitori di corrosione) nel calcestruzzo indurito



- Riduzione della permeabilità
- Riparazione delle fessure
- Aumento della resistenza a compressione
- Riduzione della velocità di corrosione

???

Considerazioni finali sulle tecniche elettrochimiche

- efficaci in ambienti aggressivi e poco invasive
- richiedono una accurata progettazione e conoscenza (diagnosi)
- richiedono monitoraggio (continuo per *PC*, prelievo di campioni per *RE/REC*)
- attenzione a elementi precompressi!
- attenzione alla presenza di armature fortemente corrose!
- durabilità: RE/REC → ?? 10-15 anni ??
PC corrente impressa → >50 anni
PC galvanica → consumo dell'anodo
- il calcestruzzo danneggiato deve essere riparato



Grazie dell'attenzione

elena.redaelli@polimi.it



CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI **INGEGNERI**



ASSOCIAZIONE
TECNOLOGI
PER L'EDILIZIA

