



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

# Protezione catodica nel calcestruzzo: principi, criteri, applicazioni

Prof. Marco Ormellese

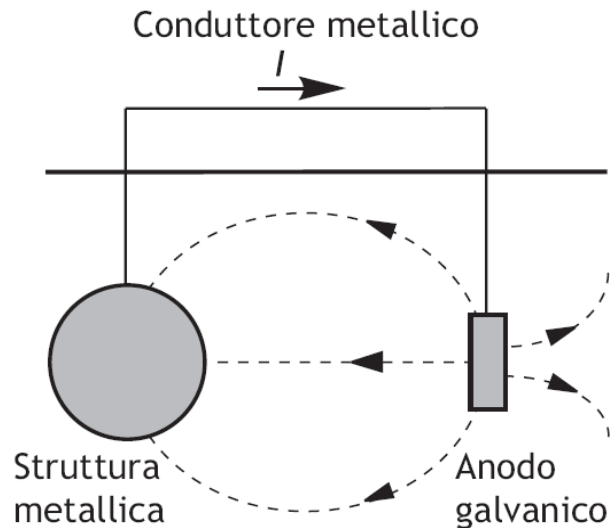
PoliLaPP – Laboratorio di Corrosione dei Materiali “P. Pedferri”

# Protezione catodica

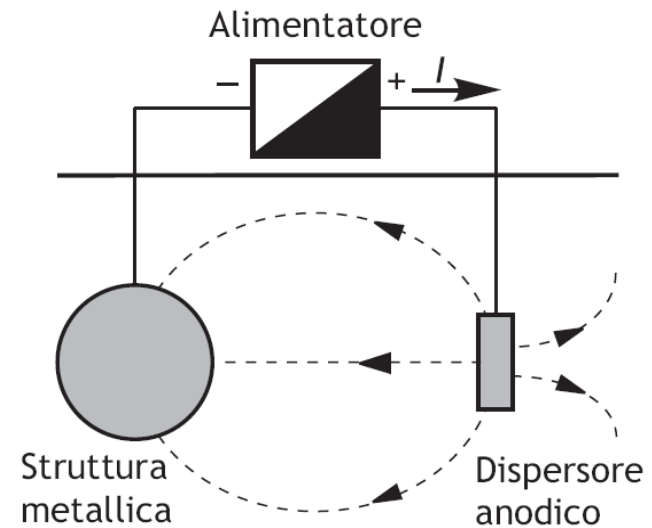
- La **PC** è una **tecnica elettrochimica** per prevenire e controllare la corrosione attraverso la **diminuzione del potenziale** di una struttura metallica (il catodo) mediante l'applicazione di una **corrente continua catodica**
- Strutture interrate
- Opere in acqua di mare
- Superfici interne
- **Opere in calcestruzzo armato**
- NON applicabile ad opera in atmosfera

# Protezione catodica

- La **PC** è una **tecnica elettrochimica** per prevenire e controllare la corrosione attraverso la **diminuzione del potenziale** di una struttura metallica (il catodo) mediante l'applicazione di una **corrente continua catodica**



**Anodo galvanico**



**Corrente impressa**

- **Processo di corrosione**



- Per prevenire la dissoluzione del ferro, basta **“pompate” un numero di elettroni pari a quello richiesto dall’ossigeno**

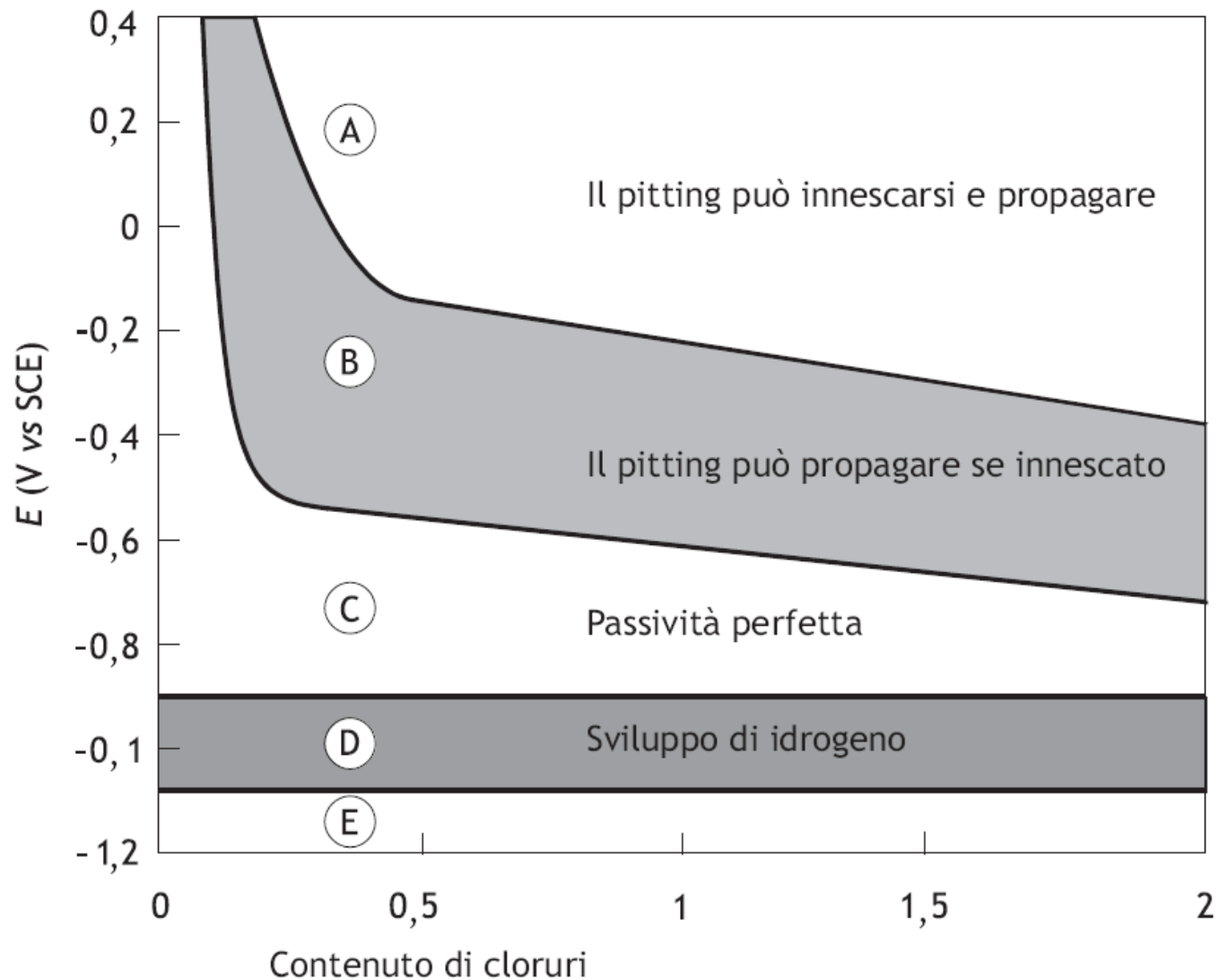
- **Effetto termodinamico della PC**

- ✓ La PC riduce o annulla il lavoro motore del processo di corrosione
  - PC per immunità
  - PC per quasi immunità

- **Effetto cinetico della PC**

- ✓ La PC provoca un aumento delle resistenza di reazione anodica (su metalli attivo-passivi)
  - **PC per passività**

# PC passività: diagramma Pedefferri



# Potenziale di protezione

Metalli	Terreno	Acqua di mare	
	V vs CSE	V vs AAC	V vs ZN*
Acciaio al carbonio:			
- condizioni normali	-0,85	-0,80	+0,25
- condizioni anaerobiche	-0,95	-0,90	+0,15
- nel calcestruzzo	-0,75	-0,70	+0,35
Rame e sue leghe	-0,45/-0,60	-0,50	+0,55
Piombo	-0,50/-0,65	-0,45/-0,60	+0,60
Zinco	-1,00	-1,05	0
Alluminio	-0,80	-0,90	+0,15
Acciaio inossidabile	-0,40	-0,50	+0,55

# Tecniche elettrochimiche nel calcestruzzo

1 – Protezione catodica, *CP*

***PERMANENTI***

2 – Prevenzione catodica, *CPrev*

3 – *ri-alkalinizzazione elettrochimica*

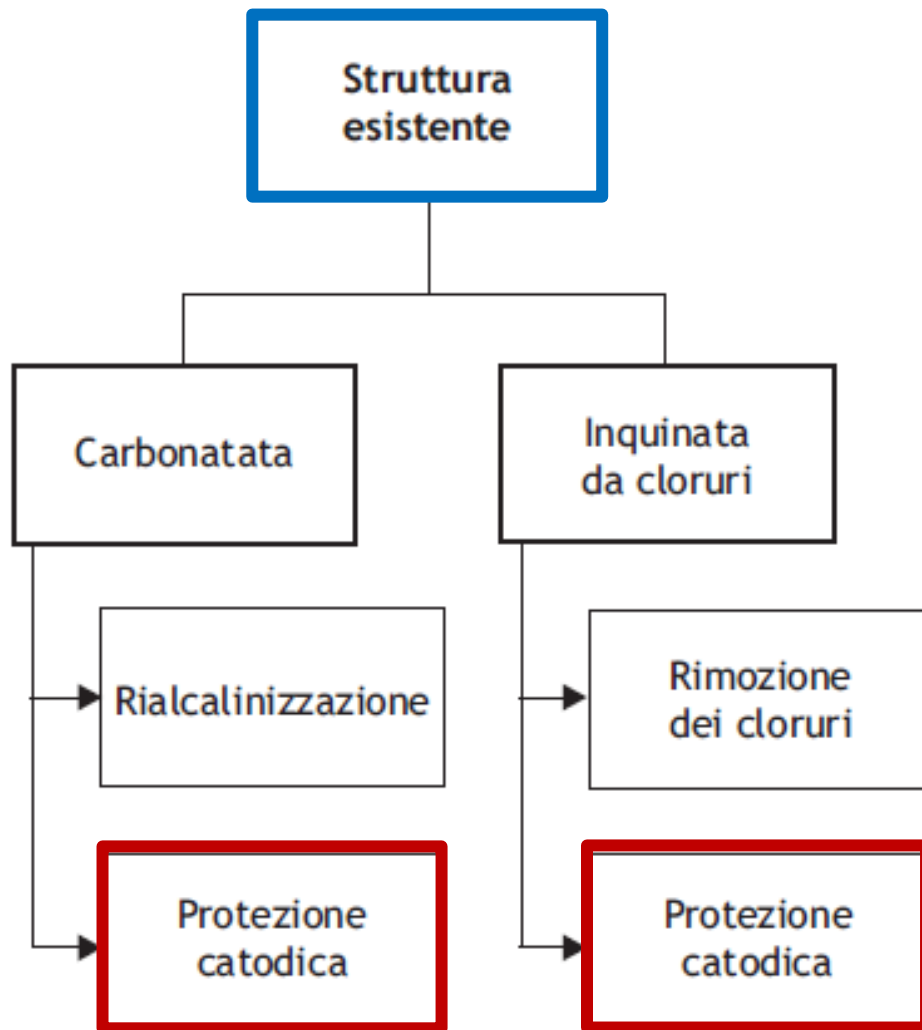
***TEMPORANEE***

4 – *rimozione elettrochimica di cloruri*

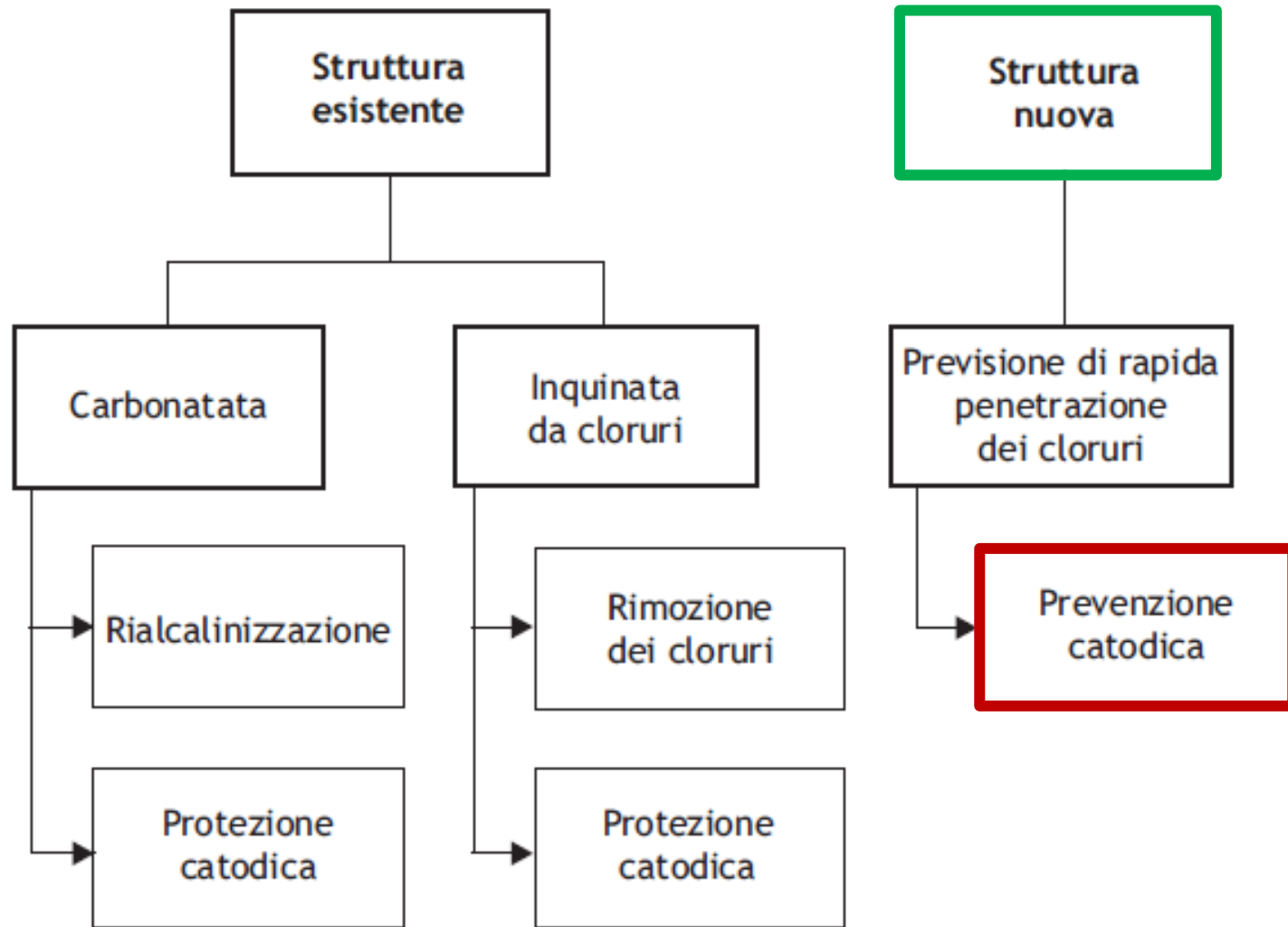
Si basano tutti sull'applicazione di una corrente catodica

Tuttavia, i loro obiettivi e le modalità di applicazione sono diversi

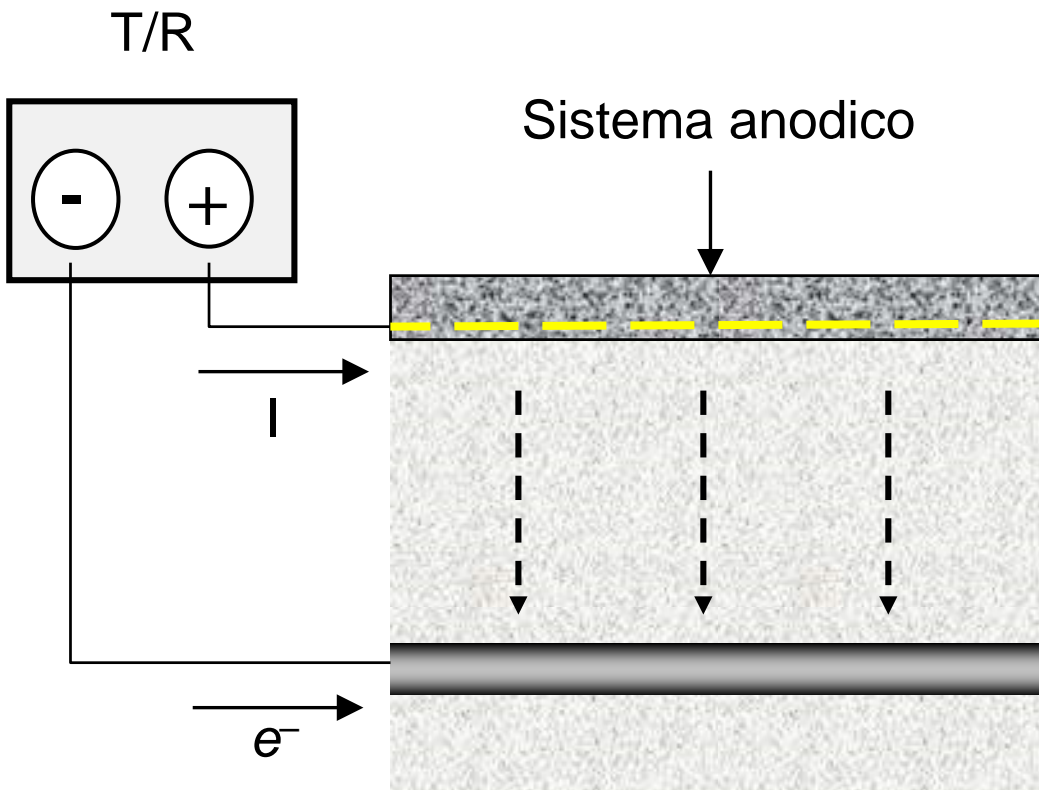
# Tecniche elettrochimiche nel calcestruzzo



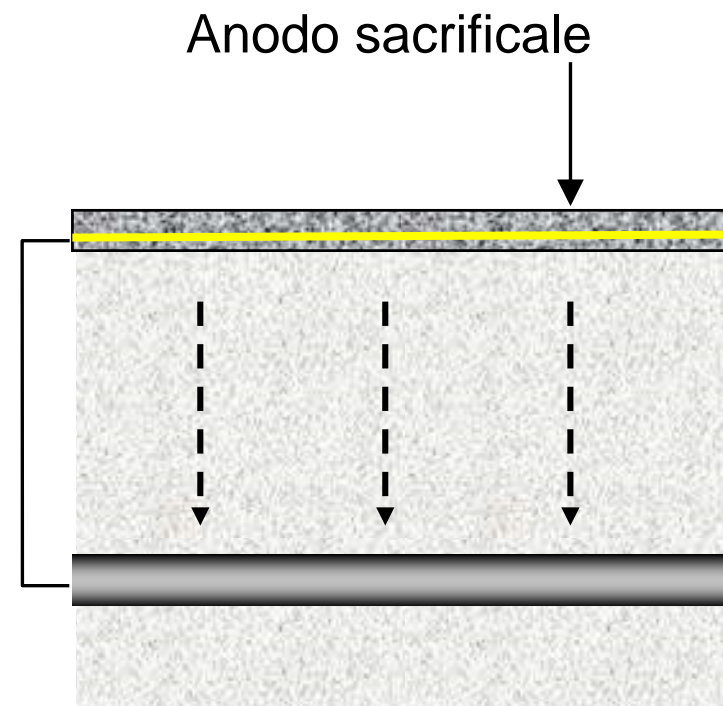
# Tecniche elettrochimiche nel calcestruzzo



# Tecniche elettrochimiche nel calcestruzzo



**Corrente impressa**



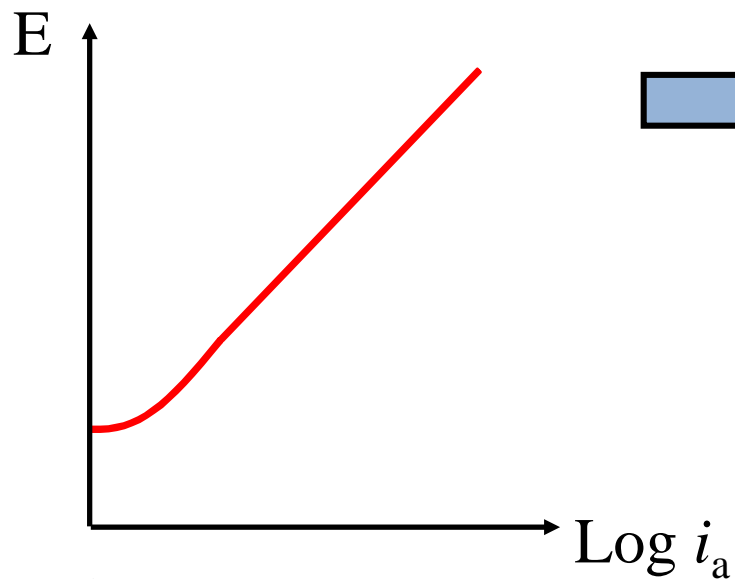
**Anodo galvanico**

- **Catodo (armatura)**

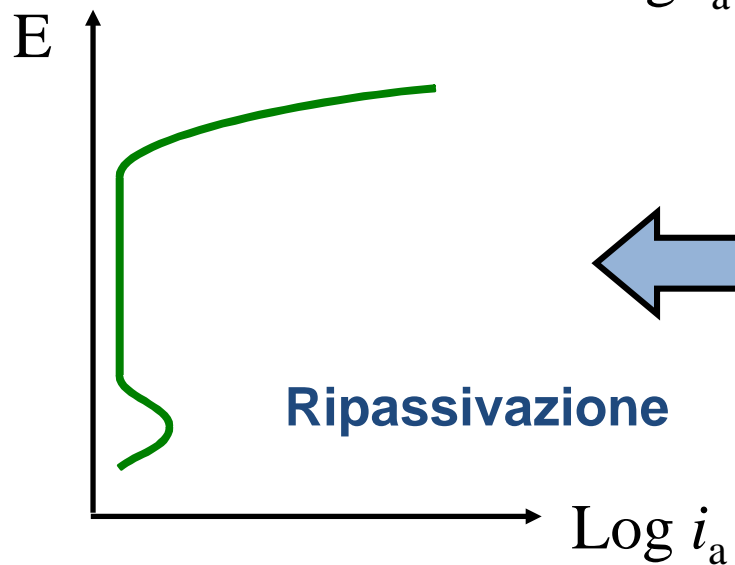


- Produzione di alcalinità
- Possibile ripassivazione

# Reazioni elettrochimiche: alcalinizzazione



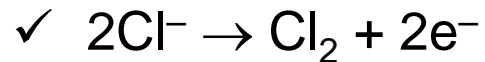
**Protezione catodica**



- **Anodo**



*sviluppo di ossigeno*



*sviluppo di cloro*

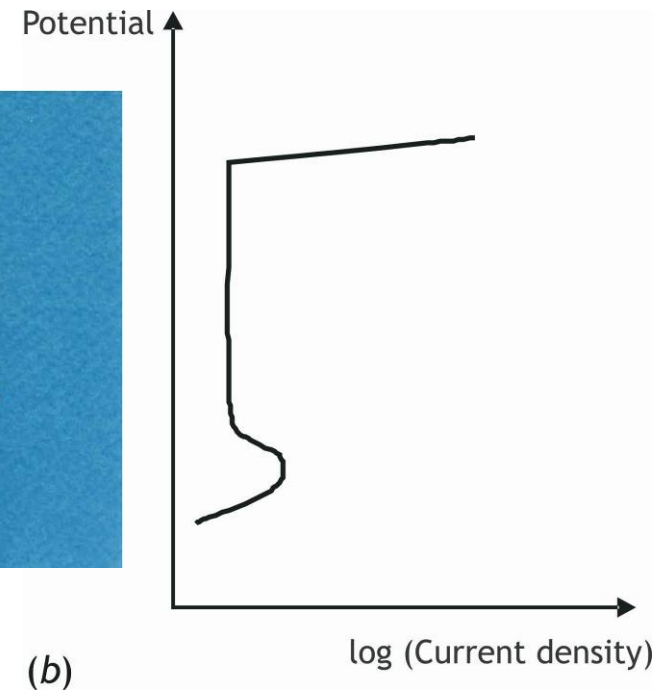
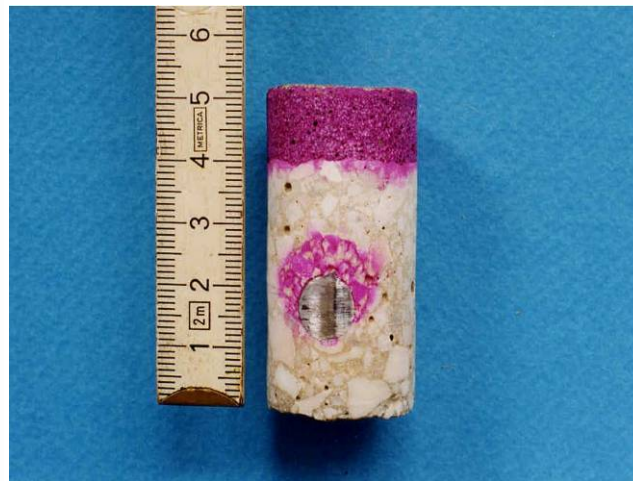
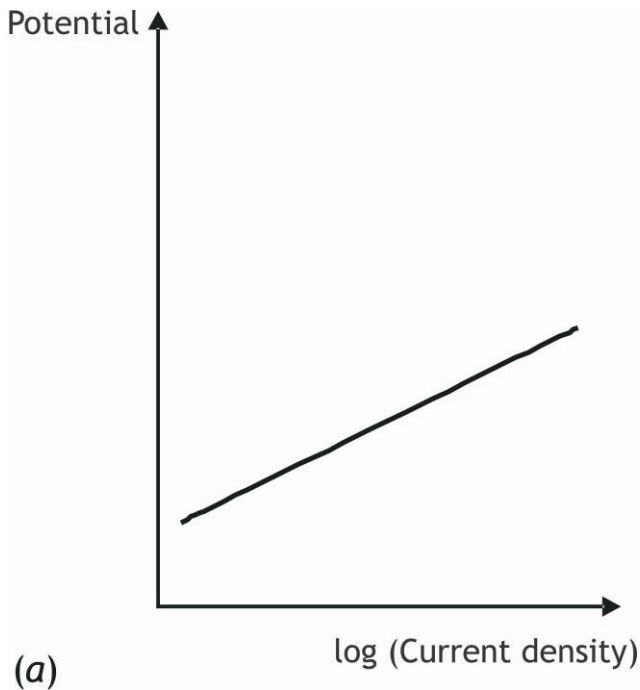


*consumo anodo*

- **Infragilimento da idrogeno**
  - ✓ evoluzione dell'idrogeno per  $E < -950$  mV CSE
  - ✓ acciai alto-resistenziali in calcestruzzo precompresso
- **Reazione alcali-aggregato**
- **Perdita di aderenza acciaio / calcestruzzo**
  - ✓  $E < -1,1$  V CSE a lungo termine
- **Acidificazione anodica**
  - ✓ può favorire il deterioramento dei materiali cementizi a contatto con la rete anodica (solo per tecniche permanenti)
  - ✓ Per anodi in Ti-MMO  $i_{an} < 100$  mA/m<sup>2</sup>

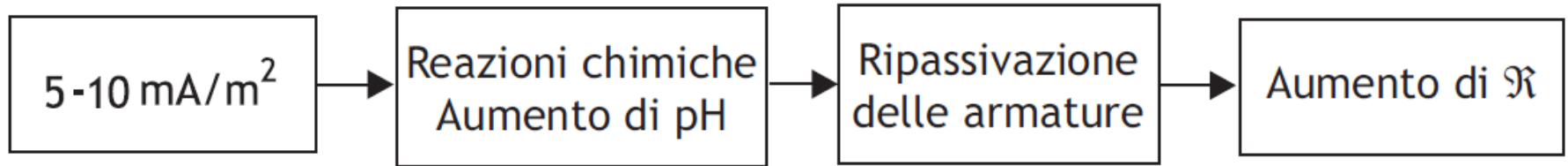
# PC per strutture soggette a carbonatazione

- **Scopo:** bloccare la propagazione della corrosione

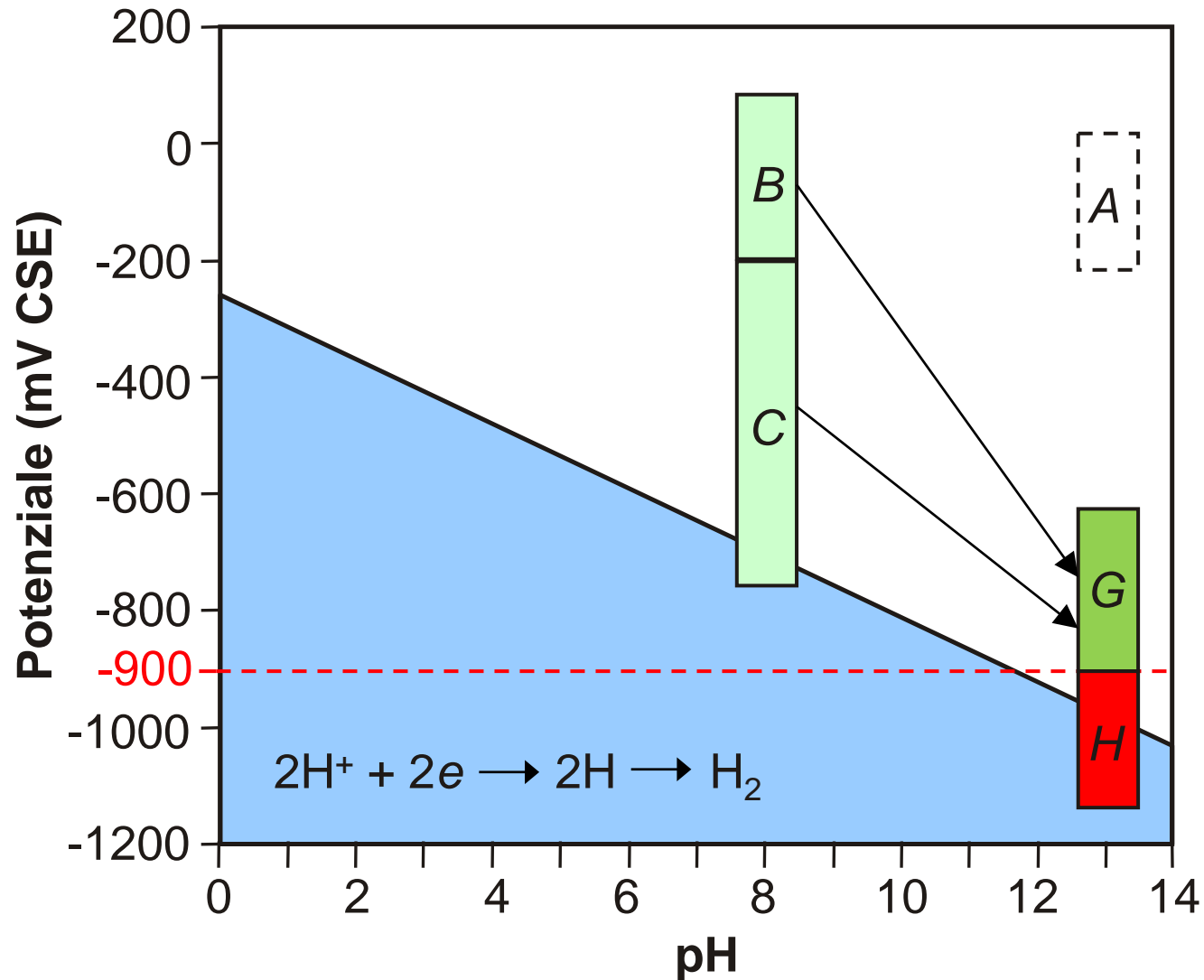


**Ripassivazione**

# PC per strutture soggette a carbonatazione

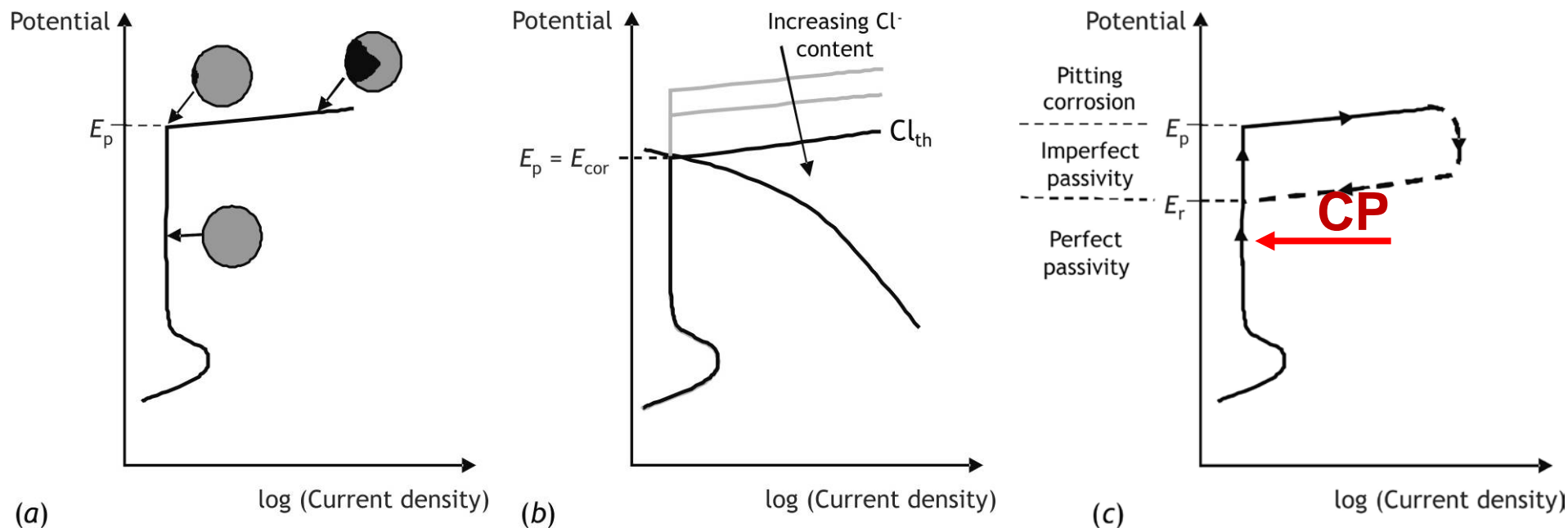


# PC per strutture soggette a carbonatazione



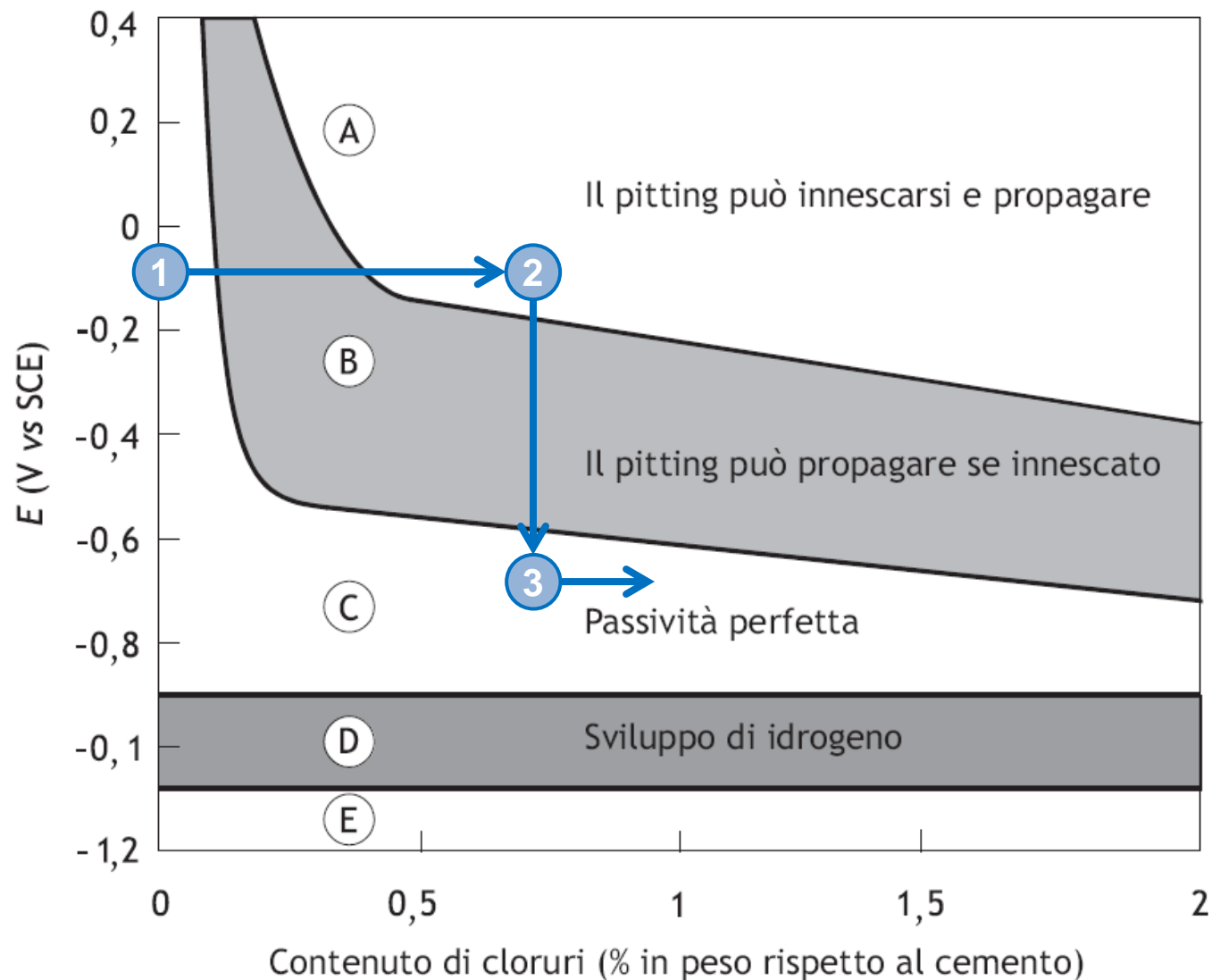
# PC per strutture soggette a corrosione da cloruri

- **Scopo:** bloccare la propagazione di un attacco localizzato già innescato

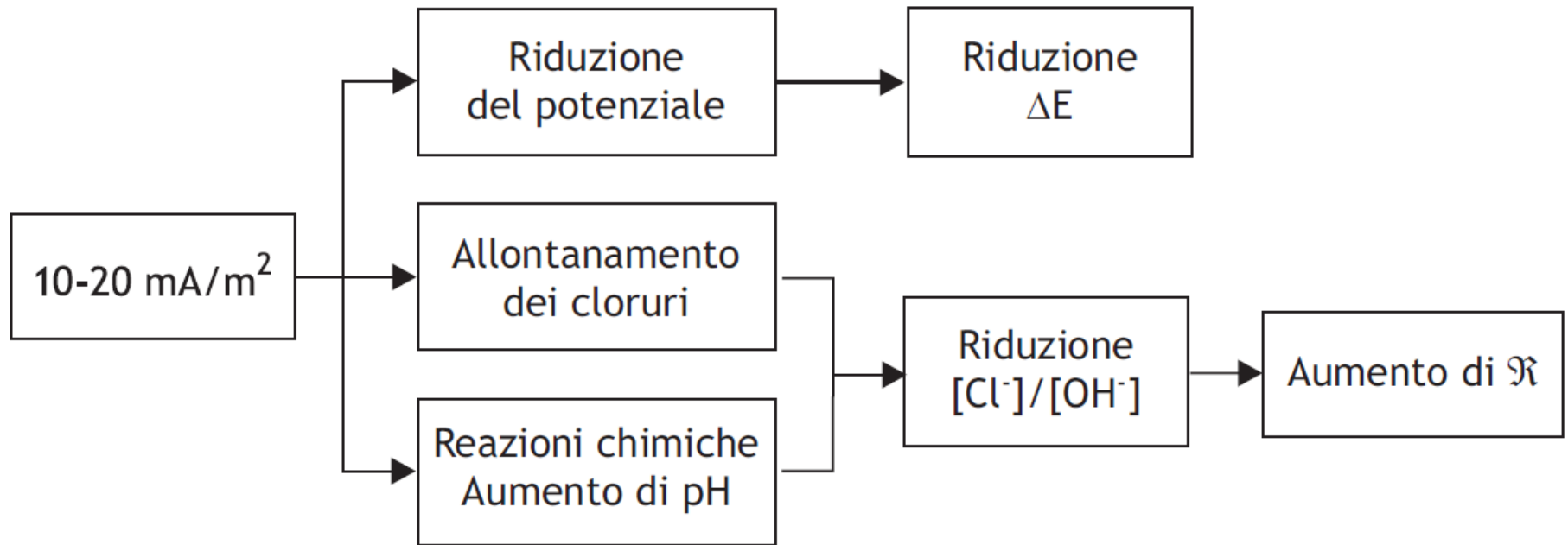


Passività perfetta

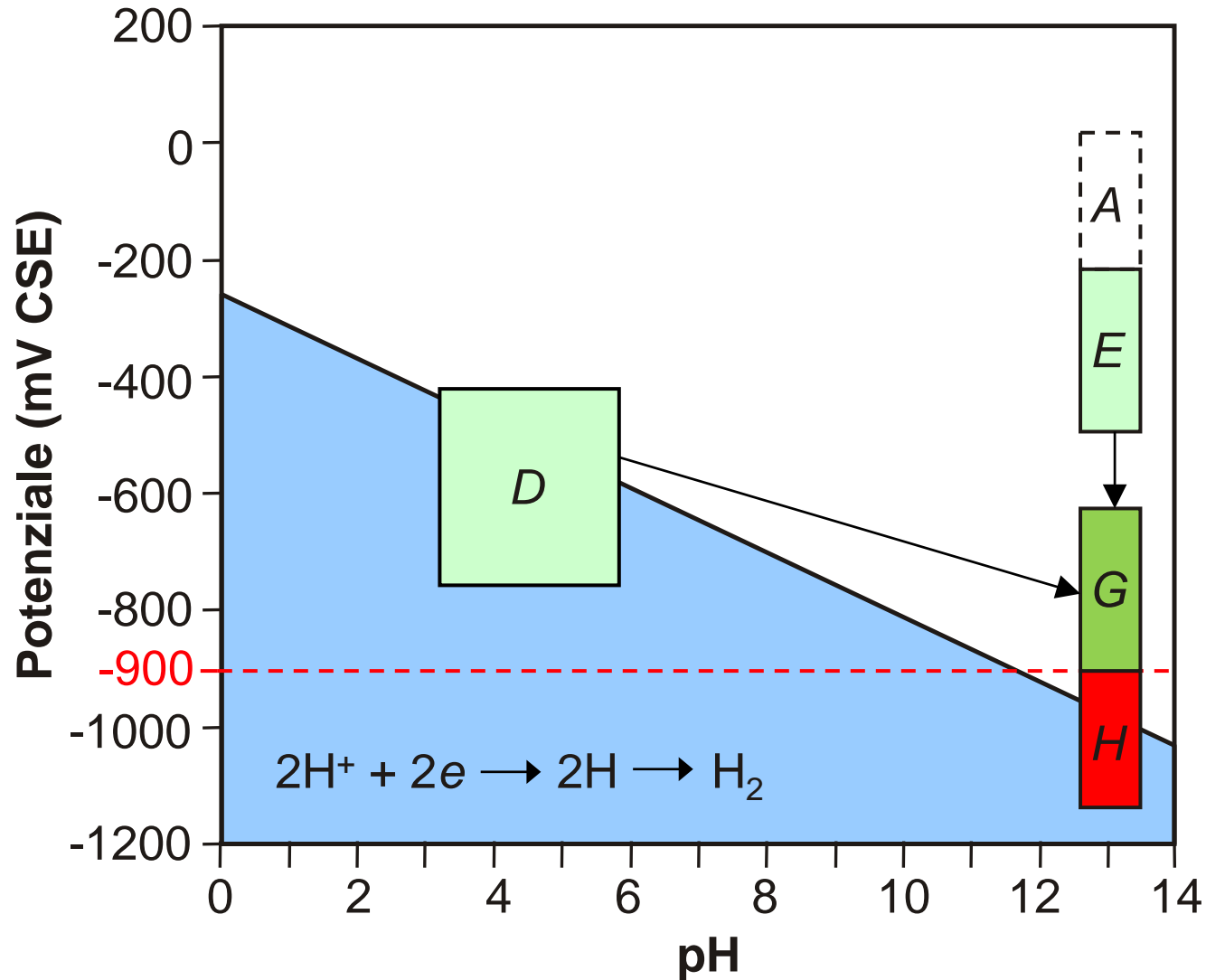
# PC per strutture soggette a corrosione da cloruri



# PC per strutture soggette a corrosione da cloruri



# PC per strutture soggette a corrosione da cloruri



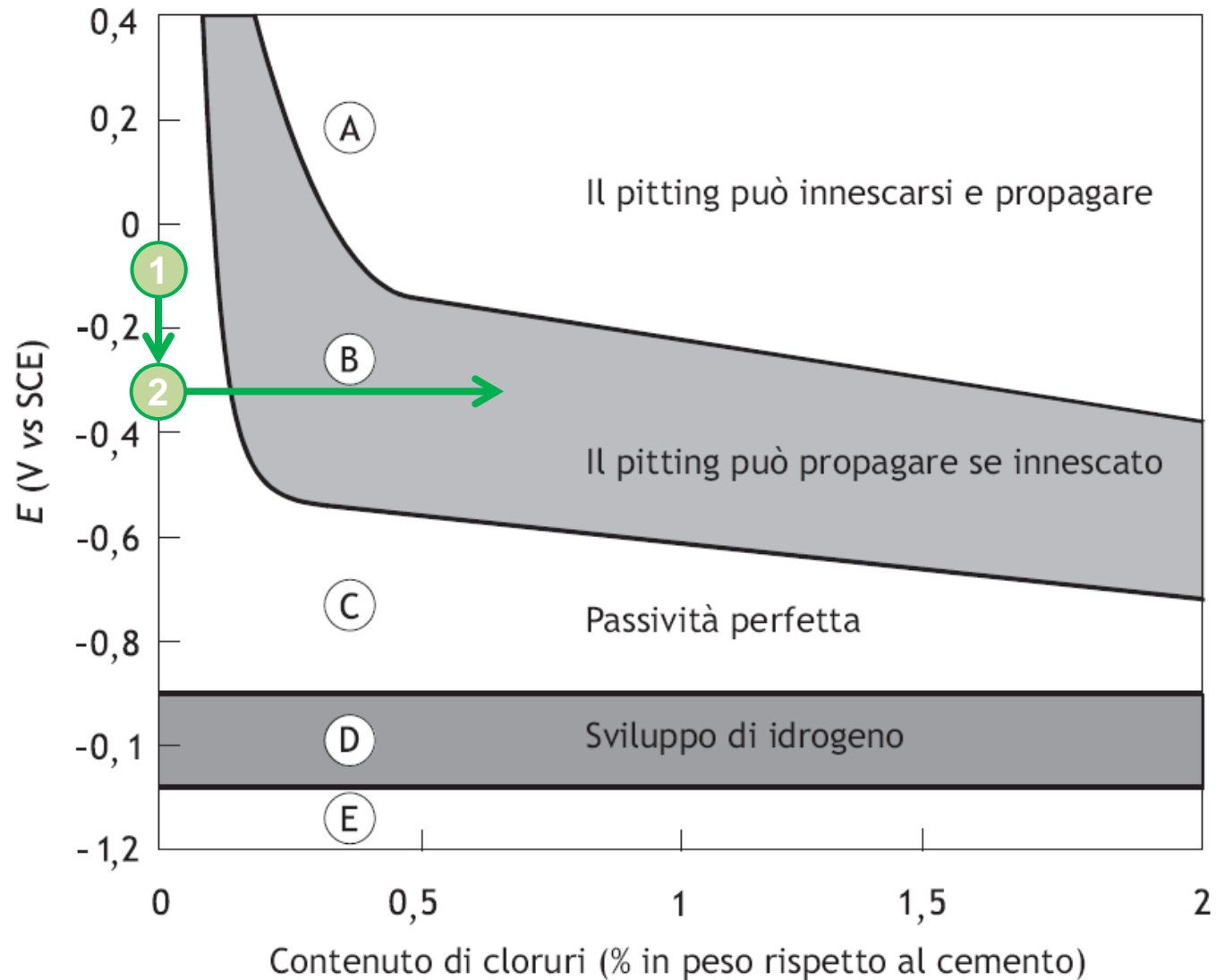
## Applicata sulle opera nuove

**Pietro PEDEFERRI** scrisse ('80 & '90) ...

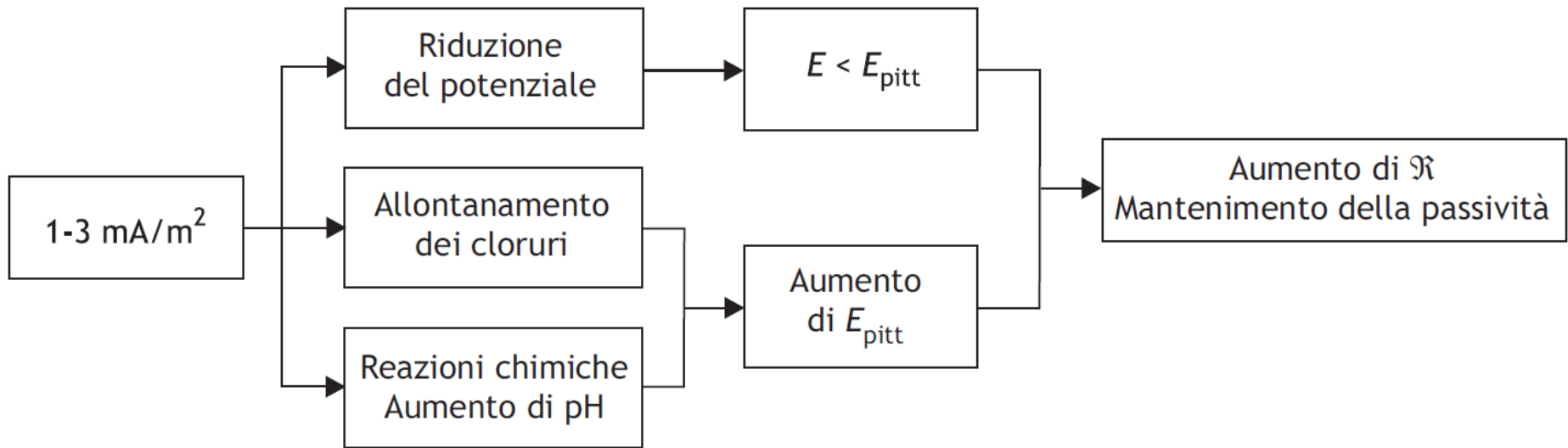
*... un metodo di manutenzione preventiva di nuove strutture che dovrebbero essere interessate dalla contaminazione da cloruri in futuro ...*

*... obiettivi, condizioni operative, potere penetrante ed effetti (in particolare quelli riguardanti l'infragilimento da idrogeno) della prevenzione catodica, nonché molti degli aspetti ingegneristici ed economici della progettazione, costruzione, monitoraggio e manutenzione della prevenzione catodica **sono diversi da quelli della normale prevenzione catodica protezione...***

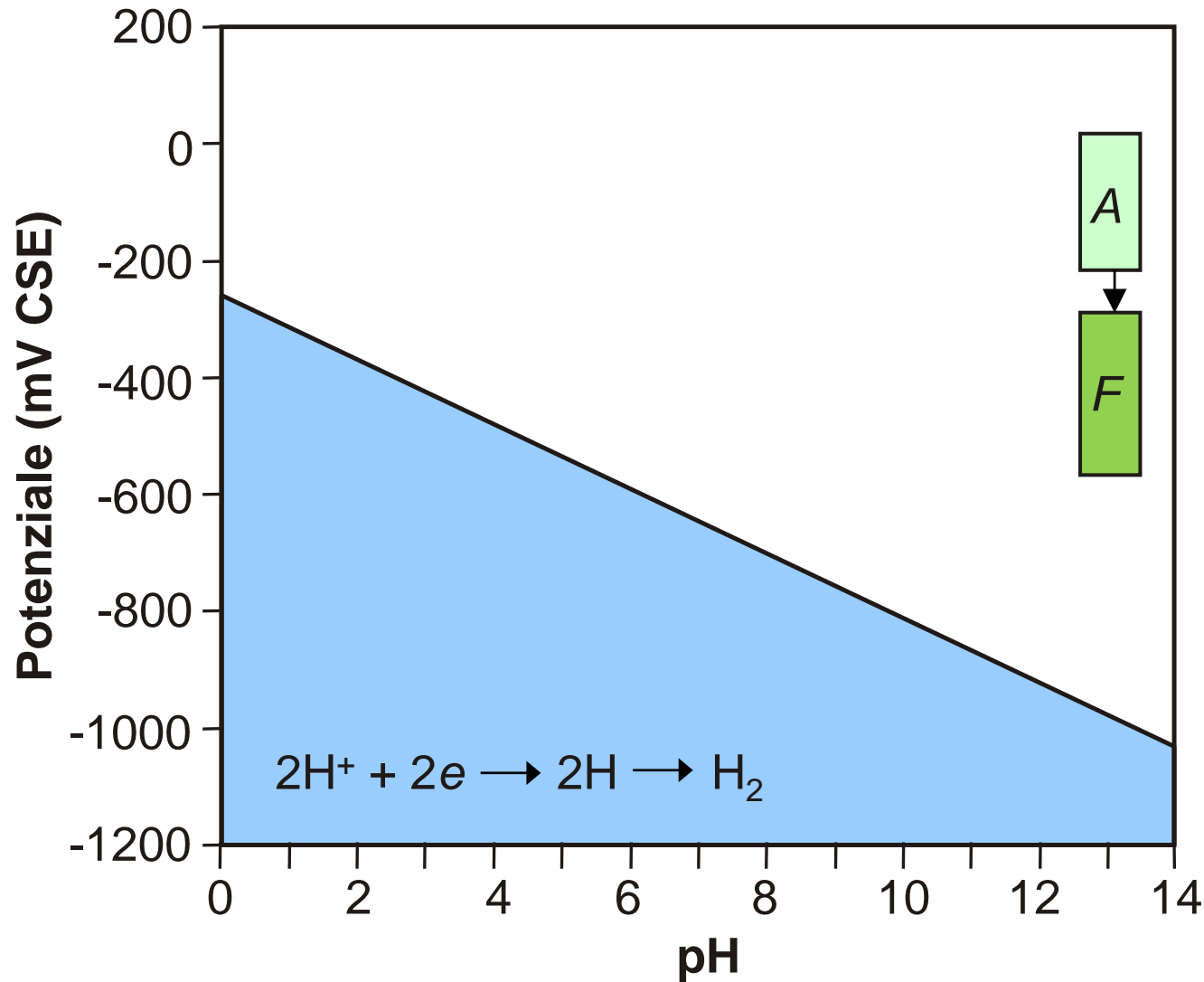
# Prevenzione catodica



# Prevenzione catodica



# Prevenzione Catodica



**CPre**



**Sicura per  
opere in cls  
pre-  
compresso  
o post-teso**

- **Continuità elettrolitica del calcestruzzo**
  - ✓ ispezione e riparazione accurate
  - ✓ uniformità del copriferro
  - ✓ riparazione locale di crepe e scheggiature
- **Continuità elettrica delle armature**
  - ✓ Misure di potenziale

- **Collegamenti all'acciaio nel calcestruzzo**
  - ✓ Ciascuna zona deve essere provvista di minimo 2 connessioni negative all'armatura per l'erogazione della corrente e di minimo una connessione per la misura di potenziale

- **Preparazione della superficie per l'installazione dell'anodo**
  - ✓ Le superfici in calcestruzzo destinate a ricevere l'installazione del materiale anodico devono essere preparate in modo da presentare, come minimo, una superficie pulita e non friabile
- **Installazione dell'anodo**
  - ✓ Ciascuna zona deve essere dotata di più connessioni al sistema anodico in modo tale che il guasto di qualsiasi connessione non comprometta in modo significativo le prestazioni del sistema CP in quella zona
  - ✓ Il guasto di qualsiasi connessione in una zona non dovrebbe ridurre la densità di corrente anodica oltre il 10% della densità di corrente anodica nominale in qualsiasi posizione all'interno della zona

- **Monitoraggio**

- ✓ Ciascuna zona deve essere attrezzata per monitorare i seguenti parametri
  - Tensione di alimentazione
  - Corrente di protezione
  - Potenziale di protezione (minimo 2 elettrodi di riferimento incorporati nel calcestruzzo)

- **Ispezione visiva**

- ✓ Deve essere eseguita un'ispezione del 100% del sistema anodico, inclusi tutti i cavi correlati e le connessioni dei cavi, prima dell'applicazione di qualsiasi rivestimento

- **Misurazioni pre-accensione impianto**

- ✓ Verificare il cortocircuito delle armature e l'isolamento con il sistema anodico
- ✓ Potenziale armatura rispetto agli elettrodi di riferimento permanenti
- ✓ Potenziale dell'acciaio rispetto agli elettrodi di riferimento portatili
- ✓ Potenziale acciaio rispetto al sistema anodico

- **Accensione impianto**
  - ✓ Inizialmente a bassa corrente
  - ✓ 10-20% della corrente di progetto totale
  - ✓ Regolazione dei sistemi di corrente impressa
  - ✓ Valutazione iniziale delle prestazioni
- **Criteri di protezione**
  - ✓ Interpretazione dei dati di valutazione delle prestazioni
  - ✓ Misura del potenziale
  - ✓ 100 mV decay (in 4 h o 24 h)
- **Regolazione della corrente di protezione**

# Componenti di un impianto (ISO 12696)

- **Sistemi a corrente impressa**

- ✓ Sistema anodico
- ✓ Alimentatore DC (T/R)
- ✓ Cavi di connessione positive all'anodo
- ✓ Cavi di connessione negativa alla gabbia di armature

- **Sistemi ad anodi galvanici**

- ✓ Materiale anodico
- ✓ Connessione permanente anodo – armature

- **Sistema di monitoraggio**

# Sistema anodico corrente impressa

- Sono stati **sviluppati diversi sistemi anodici**, che hanno mostrato buone performance in applicazioni sul campo a lungo termine
- Posso essere **inglobati nel calcestruzzo** o **applicati sulla sua superficie**
- Il sistema anodico è in contatto con un materiale ad alto pH
- In esercizio, il sistema anodico prova una **locale acidificazione**

# Sistemi anodici

Materiale	Erogazione (mA/m <sup>2</sup> )	Vita di servizio (y)	Processo anodico
Anodi di titanio attivato	100	50	Sviluppo di O <sub>2</sub>
Polimeri (con filler di grafite)	50	15	Sviluppo di O <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>
Pitture conduttive (con filler di carbone)	20	10	Sviluppo di O <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub>
Overlay conduttivi (con fibre di carbonio rivestite con Ni)	50	10-20	Sviluppo di O <sub>2</sub>
Zinco (spruzzato a caldo)	20	10	Corrosione dello zinco
Zinco/idrogel (anodo galvanico)	5	10	Corrosione dello zinco

## Densità di corrente

- massimo 110 mA/m<sup>2</sup> a lungo termine
  - attacco acido del calcestruzzo (imbrunimento)
- fino a 220 mA/m<sup>2</sup> per brevi periodi
- sono stati progettati anodi discreti per funzionare a densità di corrente anodica fino a 800 mA/m<sup>2</sup>, ma non continuamente

**Distanza minima anodo-armatura:** 15 mm

**Vita di servizio:** 50 – 120 anni

**NACE TM 0294** per dimostrare la conformità

## Strutture esistenti

- La **rete in titanio attivato** e gli **anodi a griglia** montati in superficie richiedono rivestimenti cementizi e la preparazione della superficie
- La progettazione e l'applicazione del rivestimento cementizio è fondamentale per la prestazione totale del sistema (distacco del rivestimento)
- **Nastri (ribbon)** inseriti in fessure intagliate nel calcestruzzo
- **Anodi tubolari** discreti gettati nella malta in fori praticati
- **Strisce nei giunti** di edifici storici (edifici con struttura in acciaio rivestita in muratura)

## Nuove strutture

- Sistemi a griglia con anodo a rete a nastro + barraporta-corrente in titanio applicata prima del getto di calcestruzzo
- Fissaggi non metallici per facilitare l'installazione sulle armature prima del getto del calcestruzzo

## Distribuzione di corrente

- I connettori in titanio devono essere saldati a punti alla rete o alla griglia per distribuire la corrente a tutte le parti componenti dell'anodo

# Titanio attivato



# Titanio attivato

## Anodo discreto

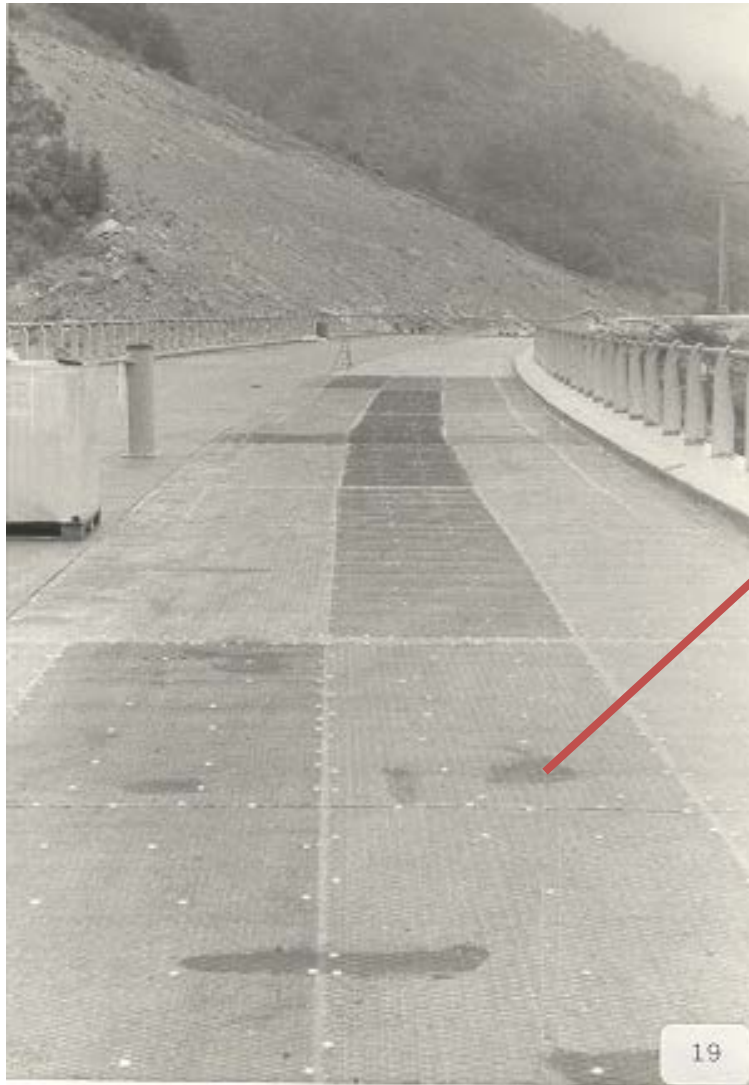


# Titanio attivato

## Rete



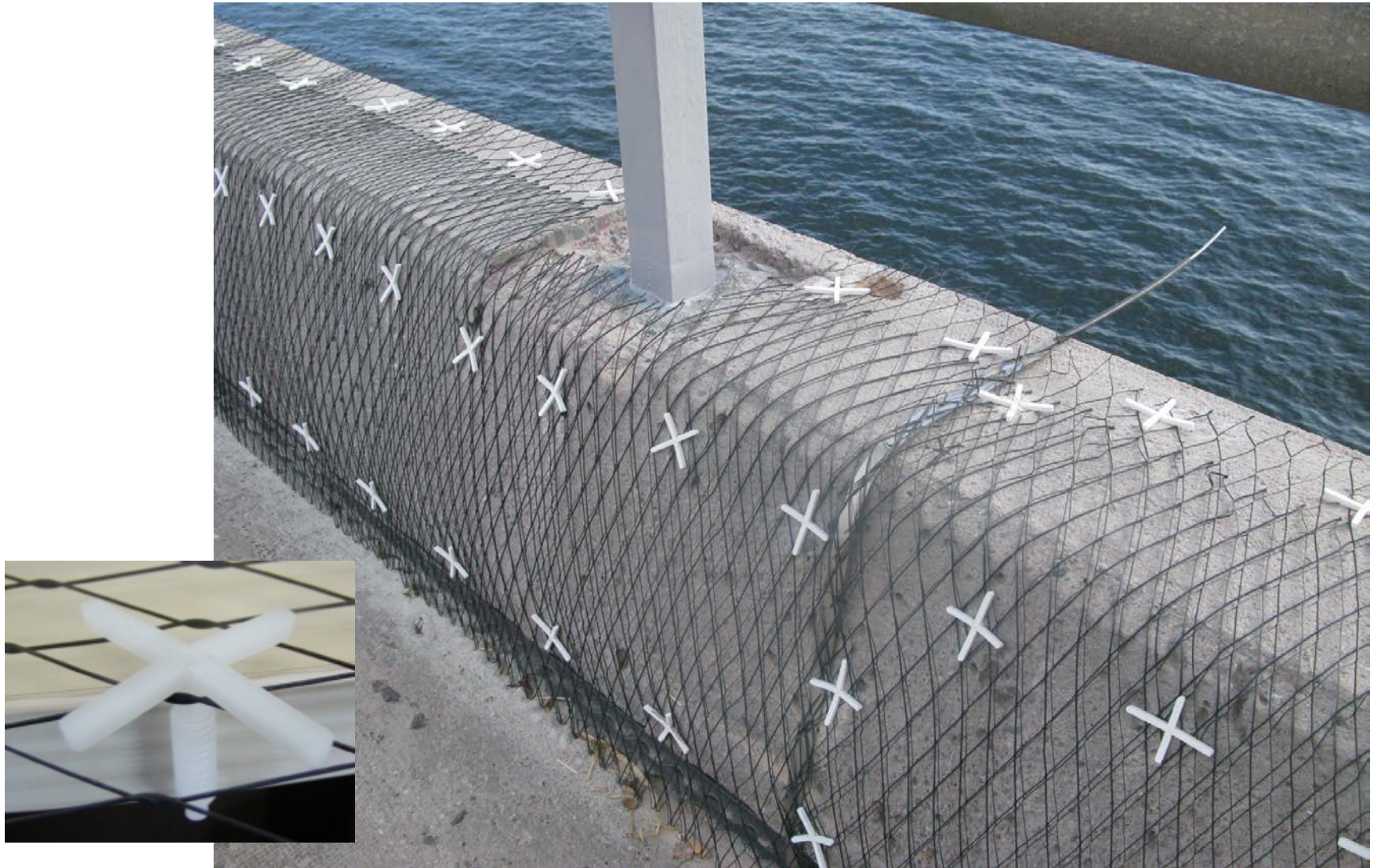
# Titanio attivato



Rete

Conduttore  
primario

# Titanio attivato



- **Anodi di zinco discreti**

- ✓ Disco di zinco racchiuso in una malta attivante (LiOH) con connessione per armatura
- ✓ Attaccato direttamente all'armatura
- ✓ L'anodo si corroderà e fornirà corrente

- **Montati in superficie**

- ✓ Reti di zinco immerse in overlay cementizi
  - splash and tidal zone
- ✓ Nastri di zinco adesivi
  - un sistema anodico «incollato» direttamente sulla superficie in calcestruzzo
  - Adesivo: idrogel.
  - Anodo fornito in rotoli da attaccare alla struttura in calcestruzzo

# Anodi discreti

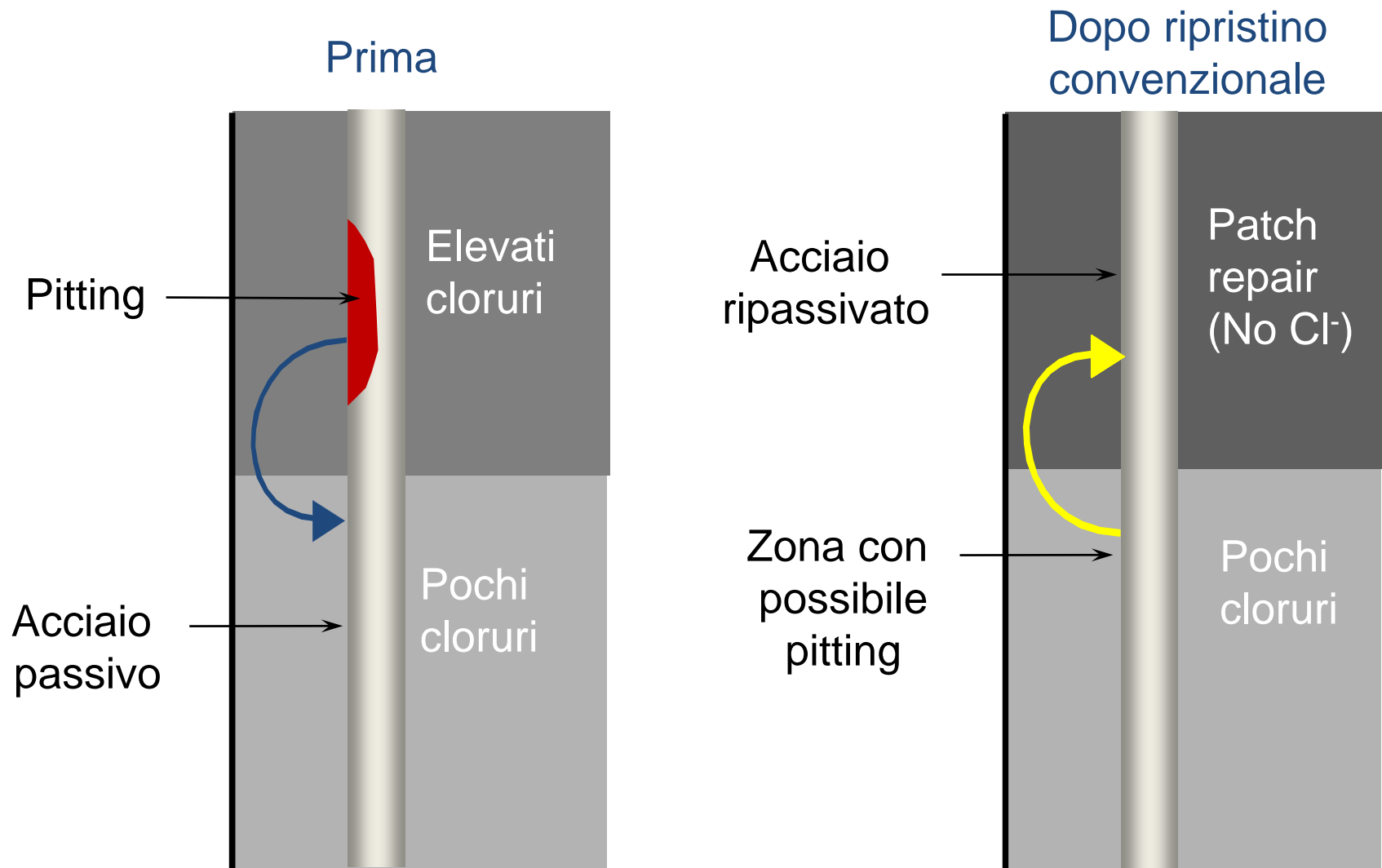


# Anodi discreti

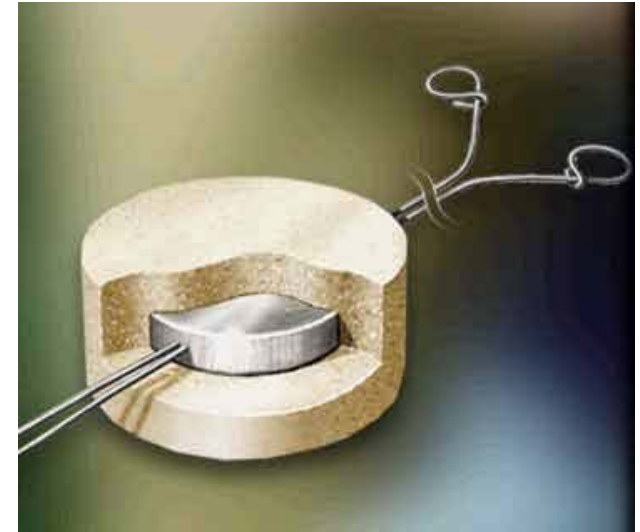
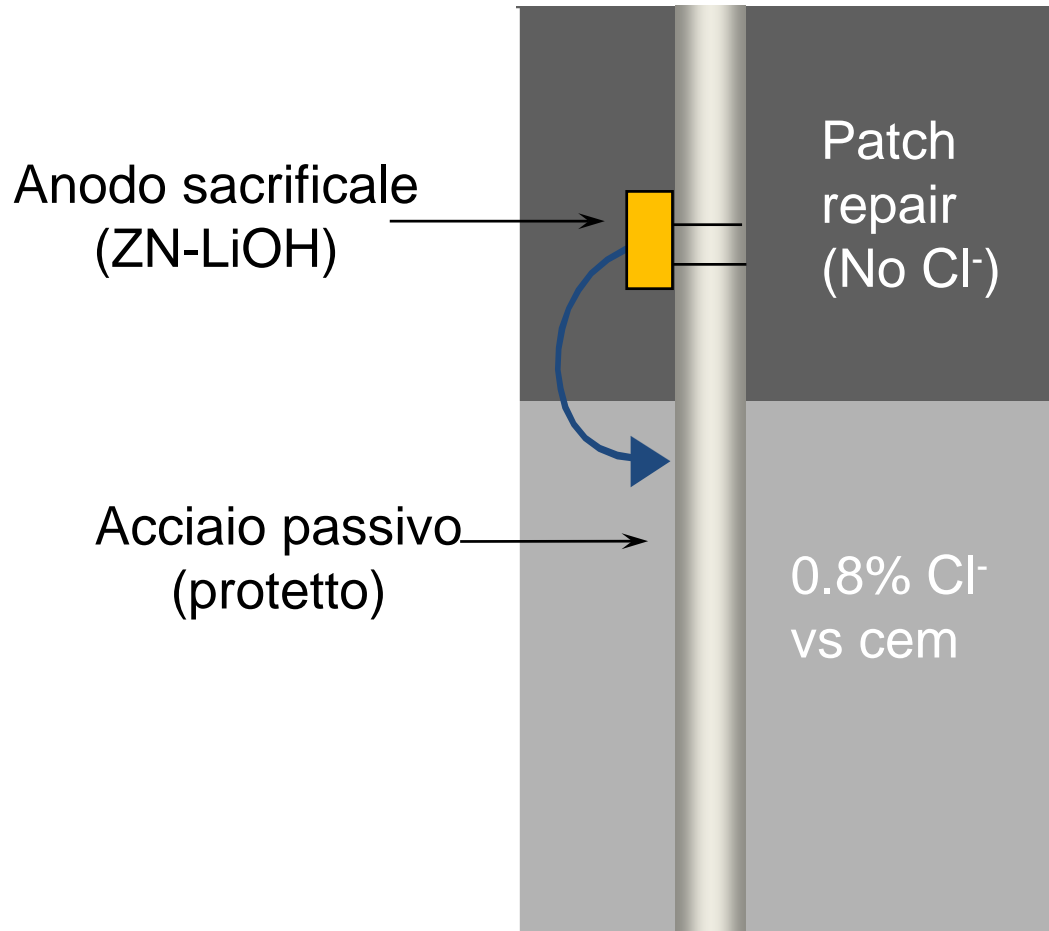


Zn + Li(OH)

# Patch repair in calcestruzzo inquinato da cloruri

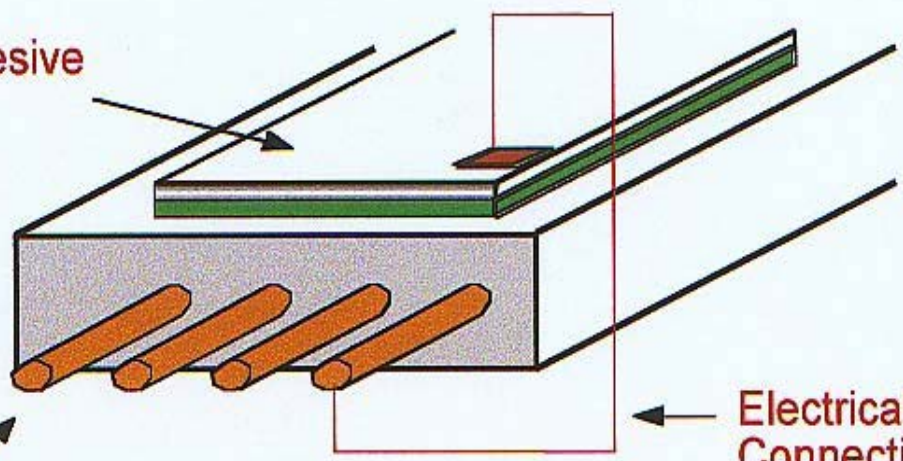


# Patch repair in calcestruzzo inquinato da cloruri



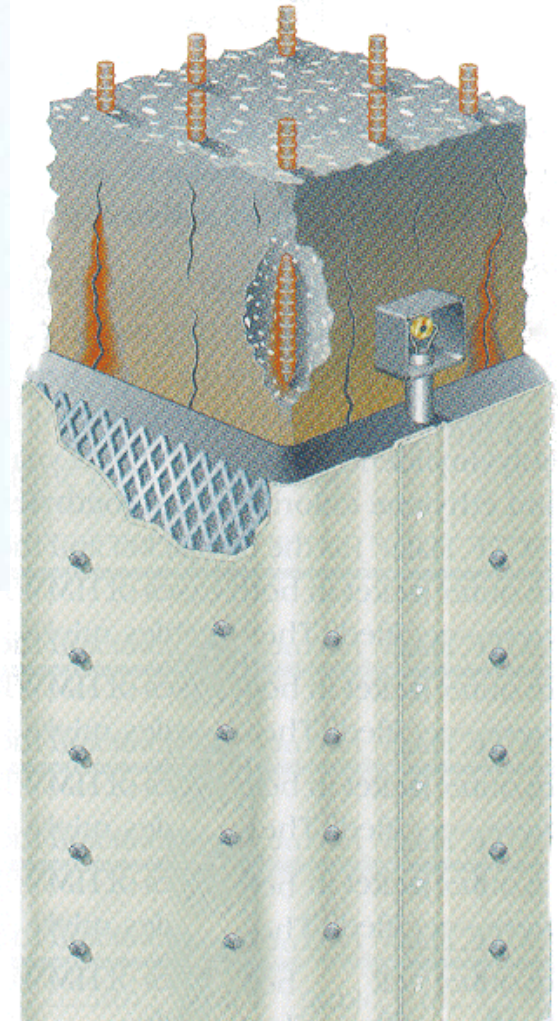
# Zinc-Mesh

Zinc/Adhesive



Rebar

Electrical Connection



# Sistemi di monitoraggio

- Misure delicate
- Attenzione all'interpretazione
- Le armature NON sono visibili
- Il calcestruzzo è un elettrolita poco conduttivo
- Influenza della geometria delle strutture



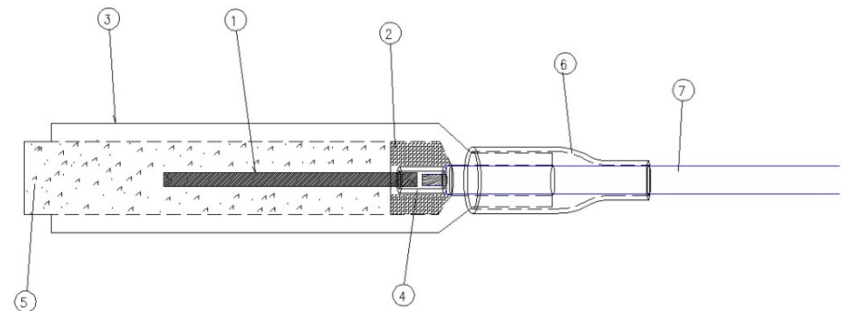
- Verificare, direttamente o indirettamente, il livello di protezione
- Il livello di protezione dipende da condizioni locali, non dai valori macroscopici dei parametri influenzanti (in primis la resistività)
- **Parametri da monitorare**
  - ✓ Potenziale di protezione
  - ✓ Corrente
  - ✓ *Integrità del copriferro o dei coating (overlay)*

- **Elettrodo di riferimento portatile**
- **Elettrodo di riferimento fisso**
  - ✓ Posizionato in aree critiche: zone potenzialmente over-protette, esposizione all'ambiente marino, applicazioni influenzate da correnti vaganti
- **Elettrodi di riferimento**
  - ✓ Ag/AgCl
  - ✓ CSE
  - ✓ MnO<sub>2</sub>
  - ✓ Ti-MMO (titanio attivato)

# Elettrodi di riferimento

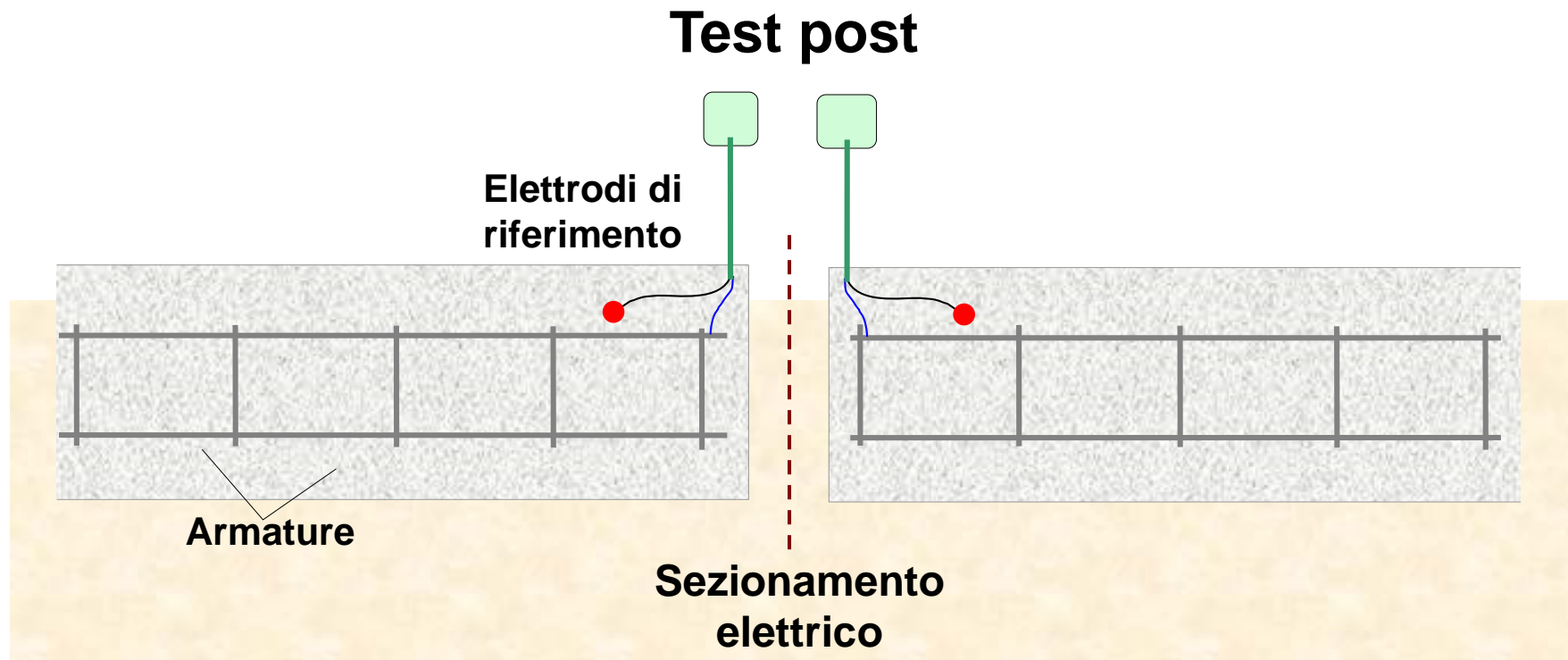


**CSE**

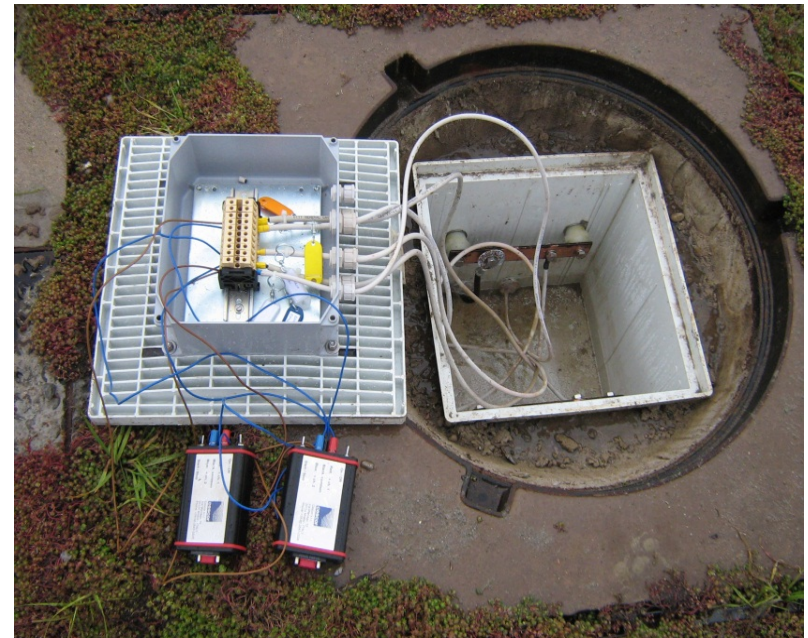
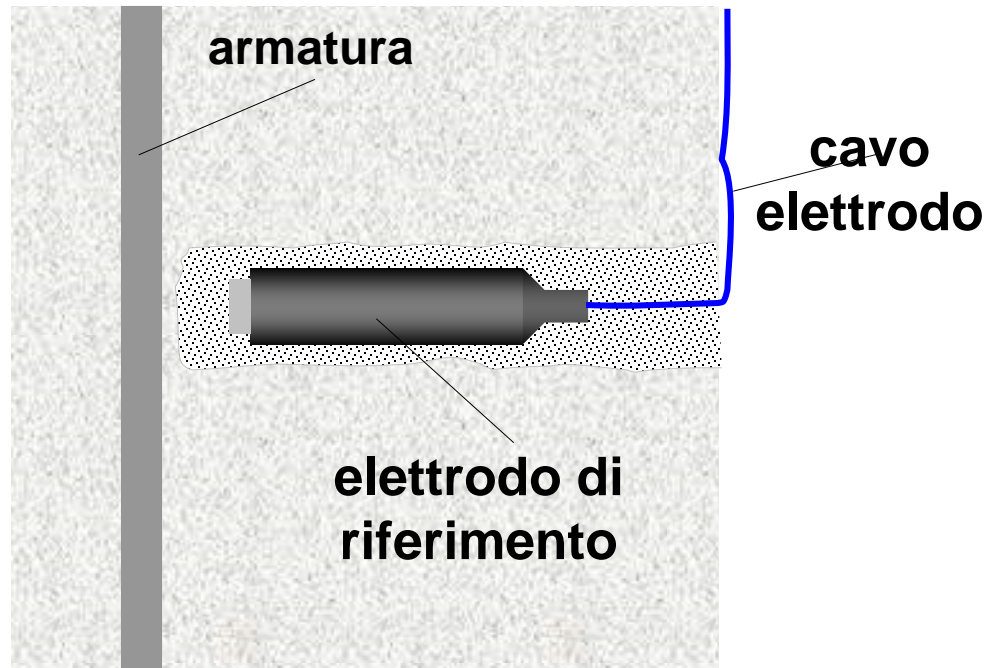


**Ti-MMO or  $MnO_2$**

# Potential survey

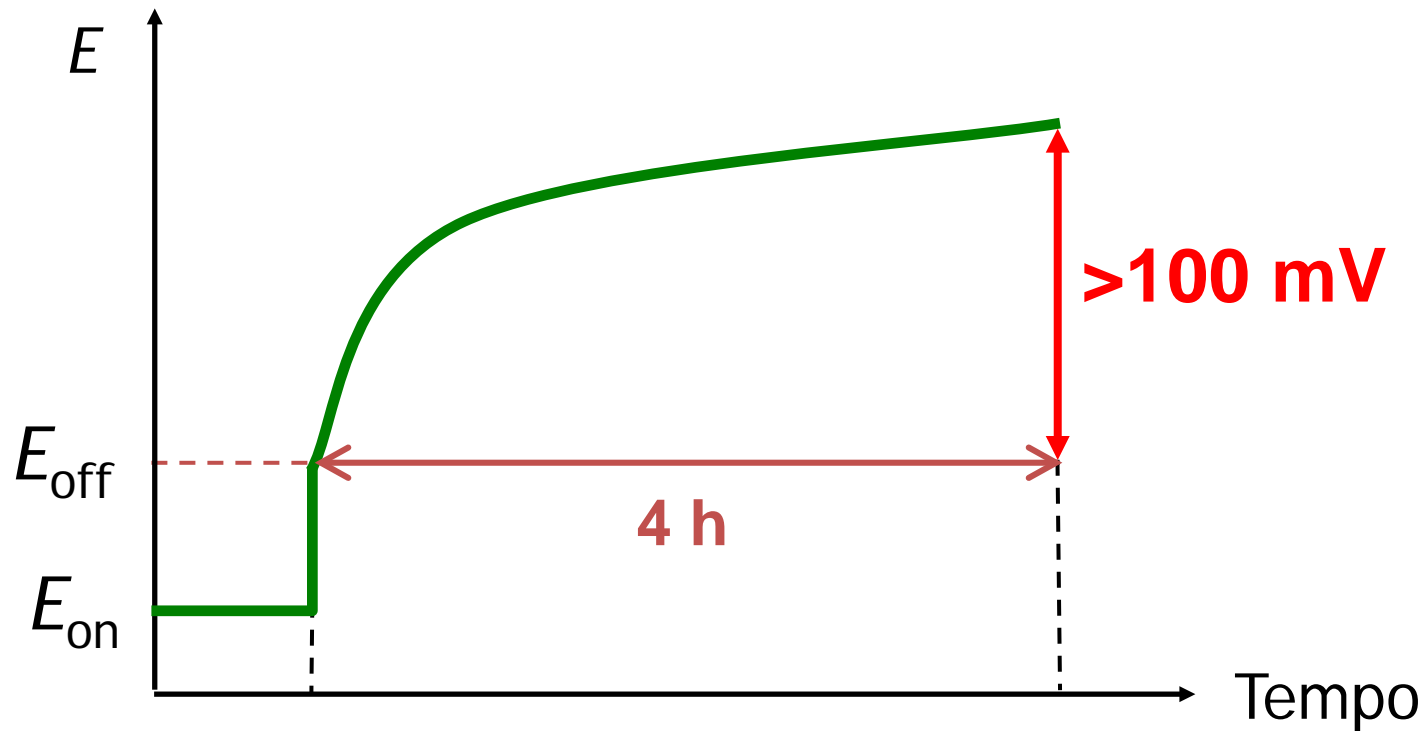


# Potential survey



# Criterio di protezione: 100 mV decay (ISO 12696)

- Instant-off potential  $< -0.75$  V CSE
- 4h-decay  $> 100$  mV



## Altre misure ...

- Misure della **velocità di corrosione** per mezzo di sonde che consentono di determinare la resistenza di polarizzazione
- Misure di **distribuzione di corrente** con sonde di corrente
- Verifiche dell'efficienza del sistema per mezzo di **sonde a macrocoppia** ottenute collegando due elettrodi, uno passivo e uno attivo, a contatto con calcestruzzo contaminato da cloruri: quando la corrente di macrocoppia si annulla il sistema di PC è efficiente