



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

**Corsi di Formazione ATE-mCD – La durabilità del calcestruzzo - 12 giugno 2025**

**Sonde pre-installate e post-installate per il monitoraggio**

*Prof. Matteo Gastaldi*

**I** CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI INGEGNERI



ASSOCIAZIONE  
TECNOLOGI  
PER L'EDILIZIA





## MONITORAGGIO

Osservazione, a scopo di controllo, di una grandezza variabile eseguita mediante appositi strumenti.

[vocabolario Treccani]



## Monitoraggio della corrosione delle strutture in c.a.

Perché?

→ Incremento della sicurezza

→ Riduzione dei costi

I costi di manutenzione relativi a corrosione delle infrastrutture in Australia è recentemente stimato in 8 miliardi di dollari australiani [ACA, 2020]

I costi diretti annuali relativi alla manutenzione, riparazione e ripristino dei ponti autostradali a causa della corrosione sono stimati pari a 8.3 miliardi di dollari USA e i costi indiretti (ritardi dovuti al traffico, perdita di produzione ...) sono più di 10 volte i costi diretti [FHWA, 1998]

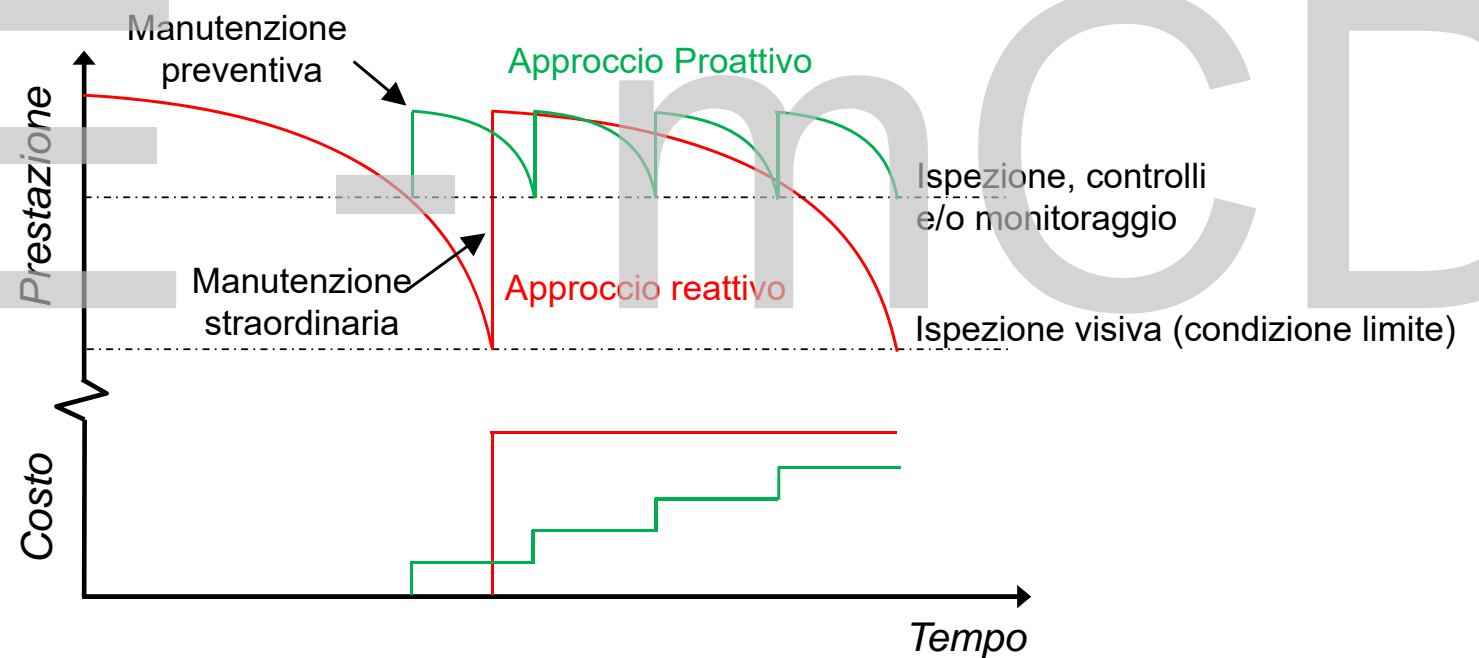
I costi annuali di riparazione delle strutture in calcestruzzo armato danneggiate dalla corrosione delle armature sono stimati in 955 milioni di euro [UK Department of Transport]

## Monitoraggio della corrosione delle strutture in c.a.

Perché?

→ Incremento della sicurezza

→ Riduzione dei costi



## Monitoraggio della corrosione delle strutture in c.a.

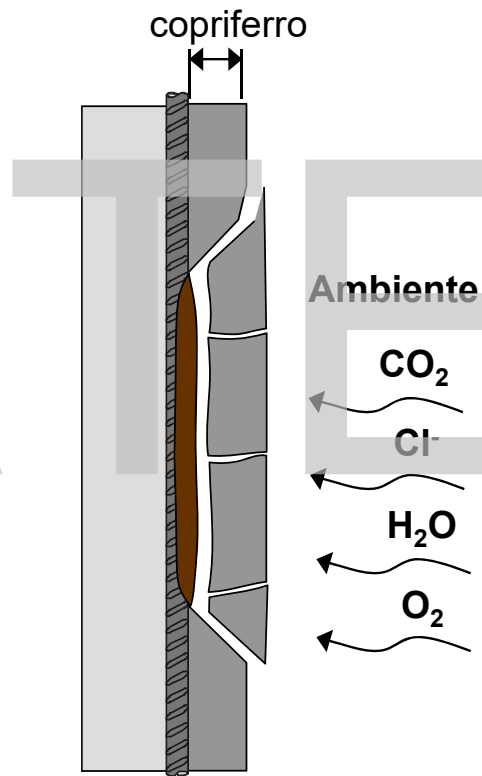
Perché?

- Incremento della sicurezza
- Riduzione dei costi
- Incremento della Durabilità (↓ consumi, impatti)



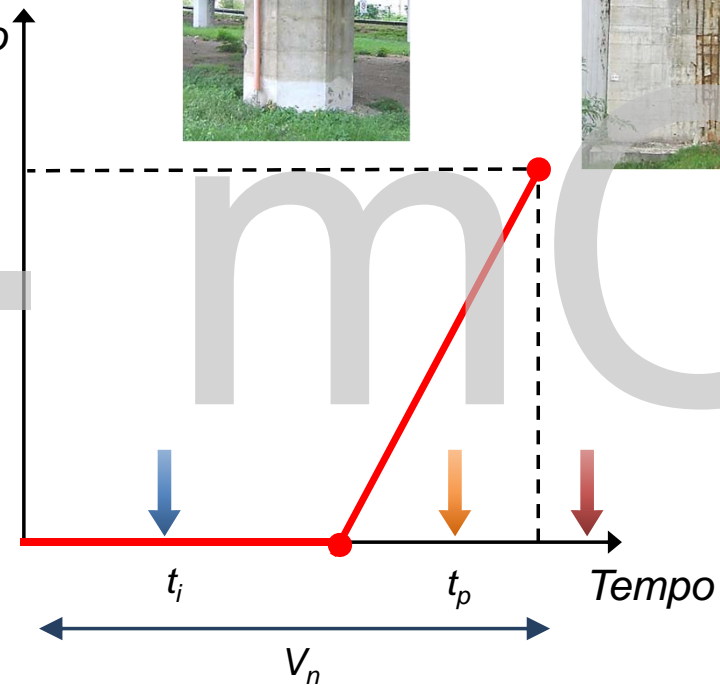
↑ *Sostenibilità*

## Degrado del c.a. - Corrosione delle armature



Penetrazione  
attacco

Condizione  
limite



## Degrado del c.a. - Corrosione delle armature

Come verificare l'evoluzione del degrado e le condizioni della struttura (diagnosi) e pianificare la manutenzione/ripristino?



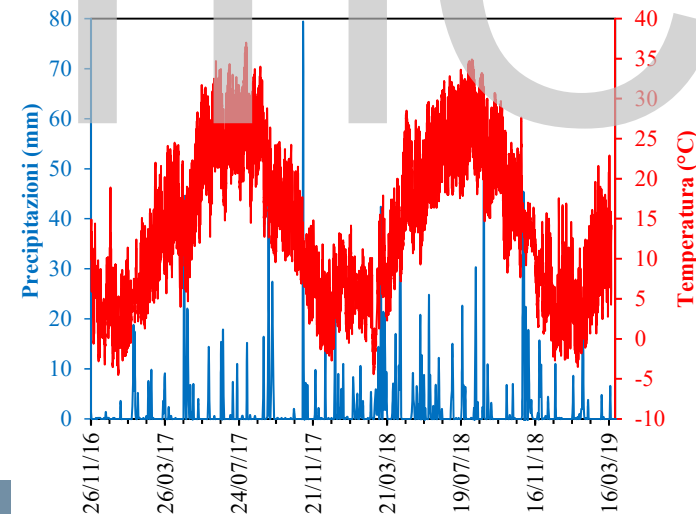
Ispezioni/controlli

LIMITE: Fotografia delle condizioni al momento dell'ispezione

Condizioni possono cambiare nel tempo  
(ad es. al variare delle condizioni  
atmosferiche)



Monitoraggio



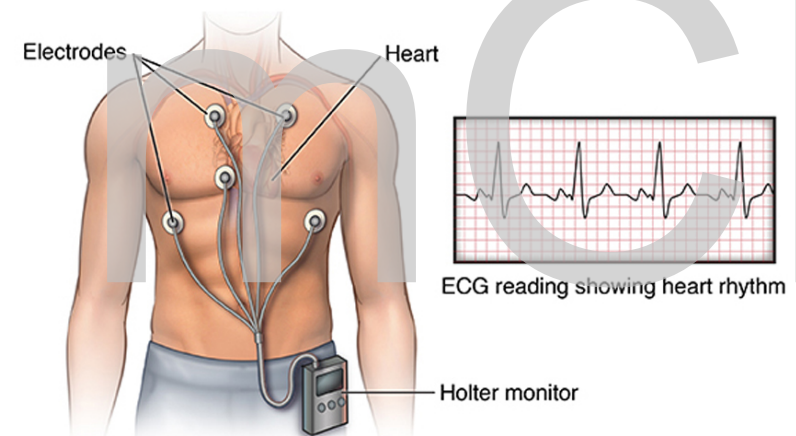
# Monitoraggio della corrosione delle strutture in c.a.

Salute dell'uomo



Strutture?

## HOLTER MONITOR





## Monitoraggio della corrosione delle strutture in c.a.

➤ Strutture nuove

→ Sonde pre-installate

➤ Strutture esistenti

→ Sonde post-installate

## STRUTTURE NUOVE

Progetto struttura



Progetto sistema di monitoraggio

Inserimento sonde per il monitoraggio prima delle fasi di getto  
(sonde direttamente a contatto con il calcestruzzo)



Progetto struttura



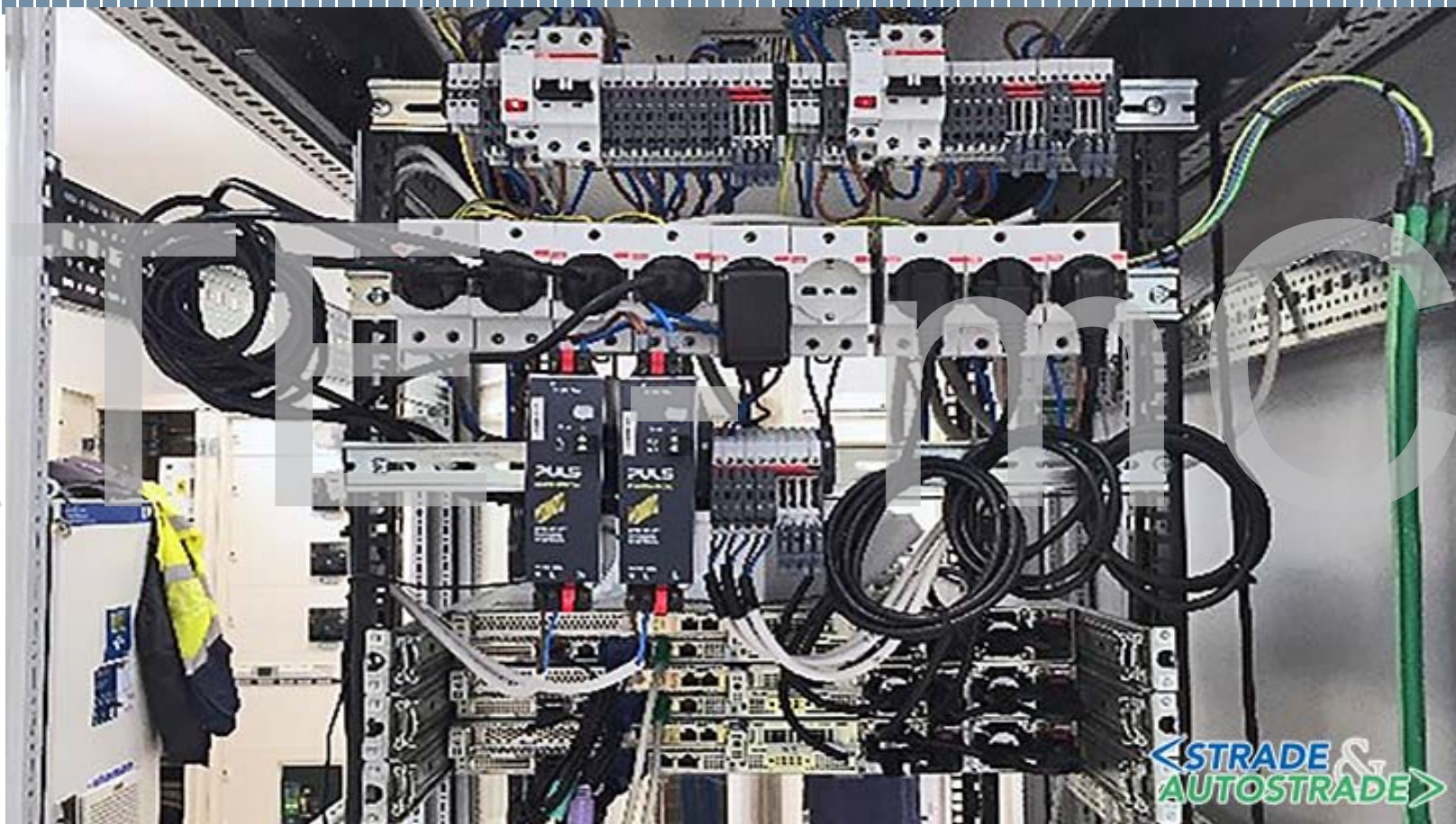
Progetto sistema di monitoraggio



Inserimento sonde per il monitoraggio prima delle fasi di getto  
(sonde direttamente a contatto con il calcestruzzo)

Realizzazione del sistema di monitoraggio durante la costruzione  
(disposizione, cablaggi, centraline, collegamenti alla rete elettrica ...)

## STRUTTURE NUOVE



<STRADE &  
AUTOSTRADE>

POLITECNICO MILANO 1863

### SCOPO:

- Valutazione penetrazione di carbonatazione e cloruri
- Valutazione innesco della corrosione
- Stima velocità di corrosione (propagazione)
- Programmazione interventi di manutenzione (↓ Costi)
- (verifica stagionatura, stima qualità del calcestruzzo ...)



## STRUTTURE ESISTENTI

Progetto sistema di monitoraggio  
complesso



Inserimento sonde per il monitoraggio in fori/demolizioni realizzati nella struttura (impiego malte per fissaggio/contatto elettrolitico) o sulla superficie



## STRUTTURE ESISTENTI

Progetto sistema di monitoraggio  
complesso



Inserimento sonde per il monitoraggio in fori/demolizioni realizzati nella struttura (impiego malte per fissaggio/contatto elettrolitico) o sulla superficie

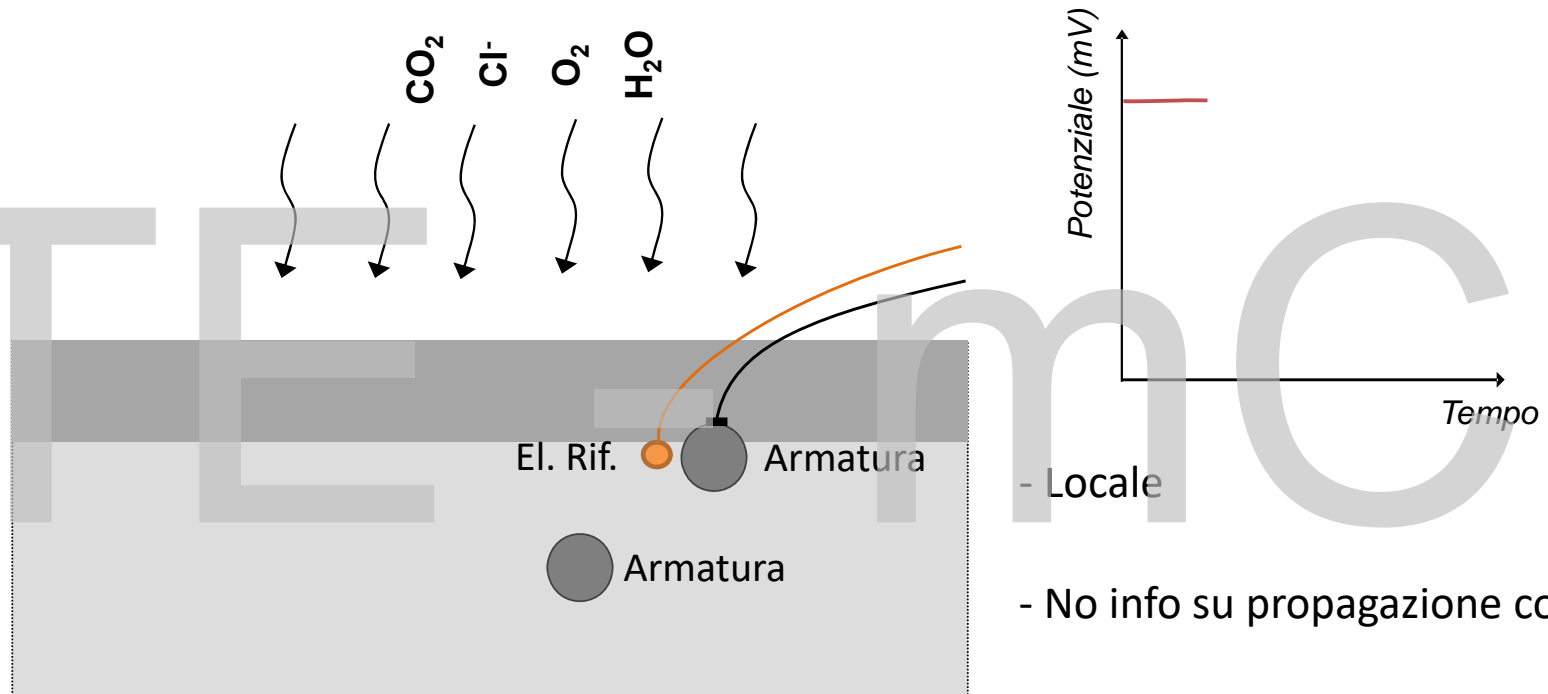
Complessità nel realizzare il sistema di monitoraggio (disposizione, cablaggi, centraline, collegamenti alla rete elettrica ...)

## STRUTTURE ESISTENTI

### SCOPO:

- Valutazione innesco della corrosione
- Stima velocità di corrosione (propagazione)
- Programmazione interventi di manutenzione (↓ Costi)
- Valutazione efficacia interventi di manutenzione/ripristino

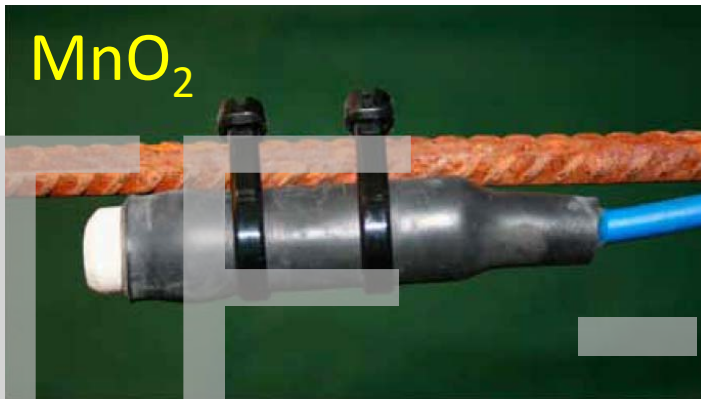
## Monitoraggio - Potenziale di corrosione delle armature



- Innesco e condizioni di corrosione
- Strutture nuove ed esistenti (pre o post-installato)

## Monitoraggio - Potenziale di corrosione delle armature

### Elettrodi di riferimento

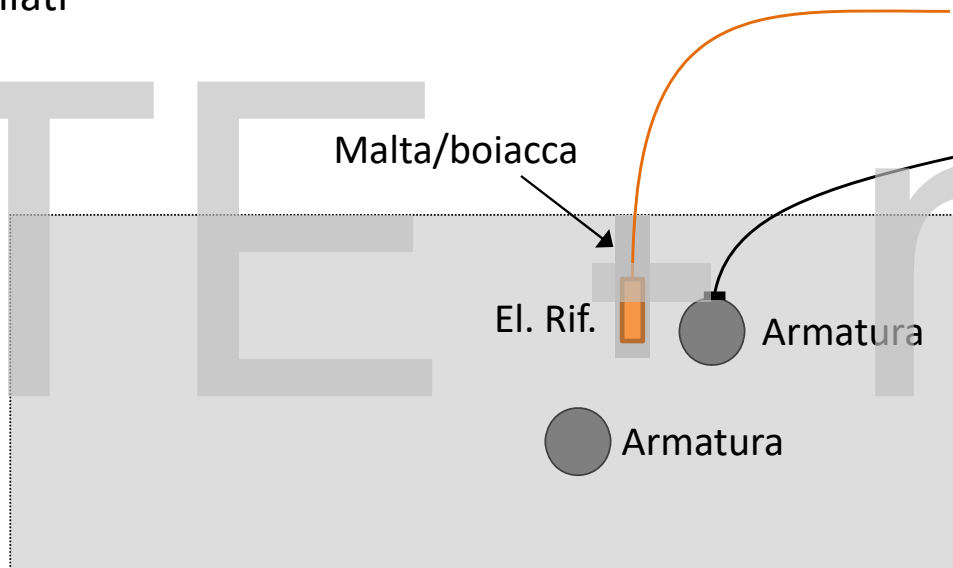




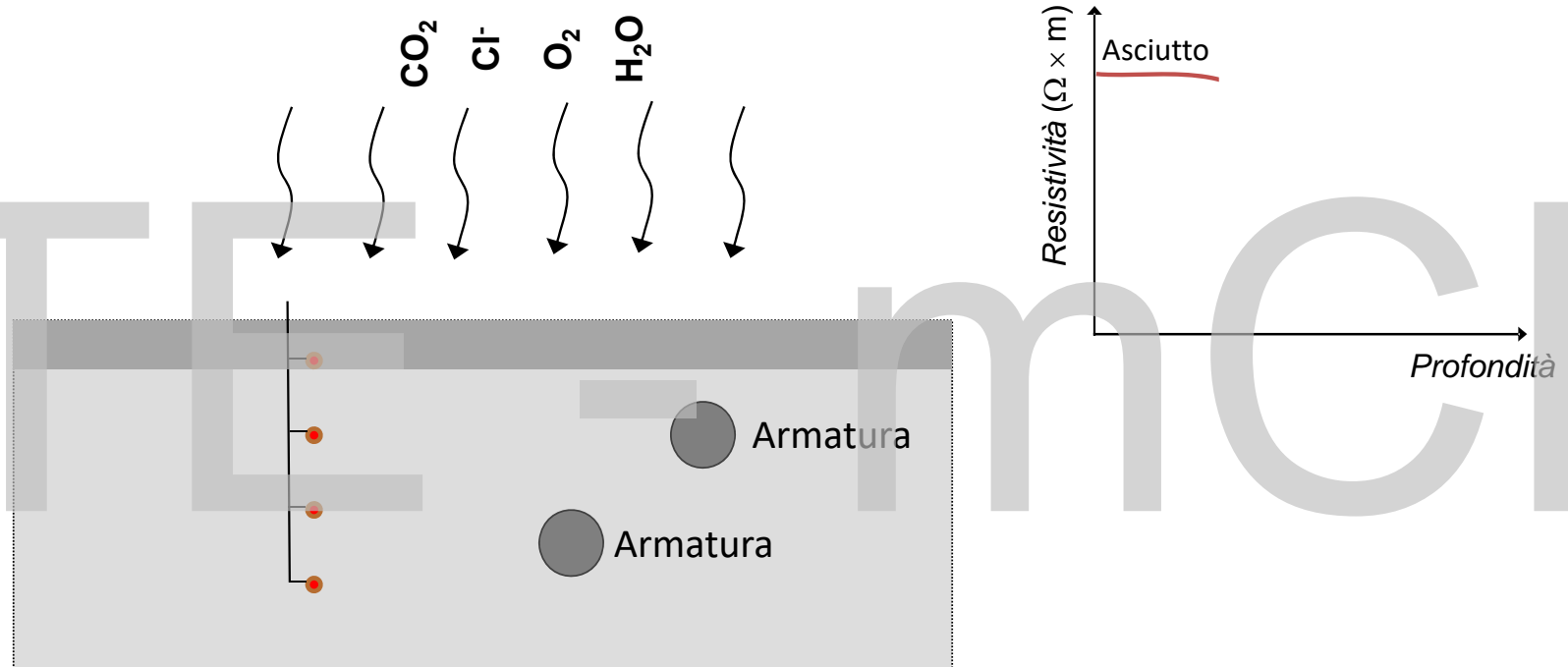
# Monitoraggio - Potenziale di corrosione delle armature

## Elettrodi di riferimento

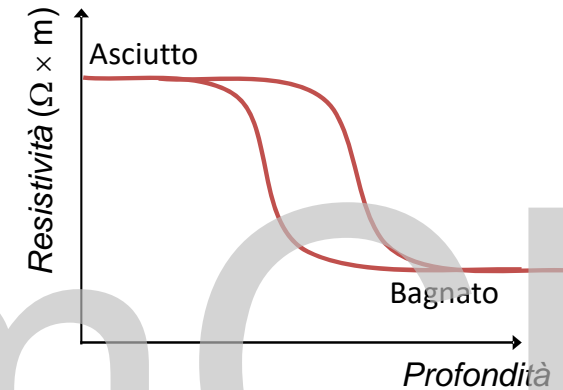
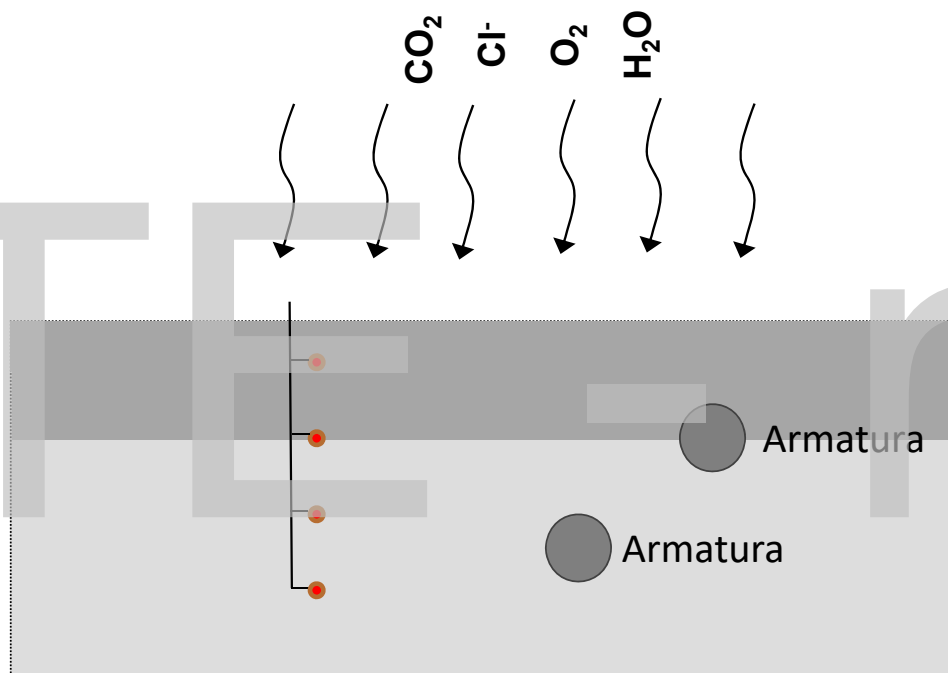
- post-installati



## Monitoraggio - Resistività elettrica del calcestruzzo



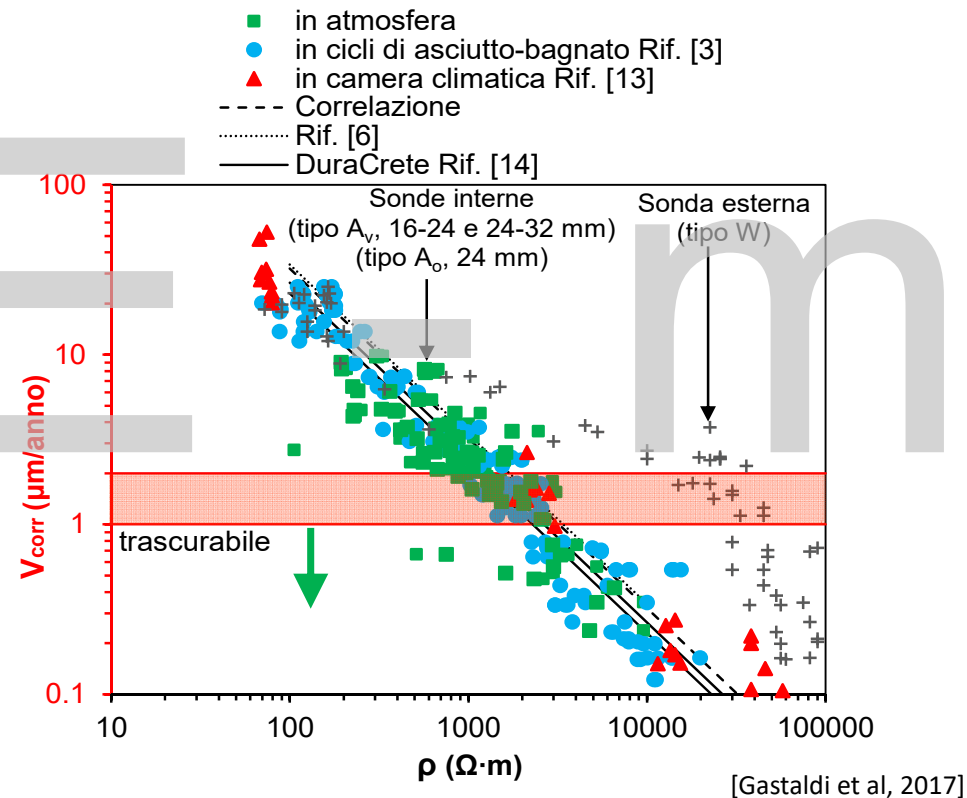
## Monitoraggio - Resistività elettrica del calcestruzzo



- Indicazioni su innesco (carbonataz.?)
- Influenza vuoti
- Stima della propagazione della corrosione (cls carbonatato)
- Strutture nuove. Strutture esistenti → pb. malta/boiacca utilizzata per l'inserimento
- Misure a differenti copriferri

# Monitoraggio - Resistività elettrica del calcestruzzo

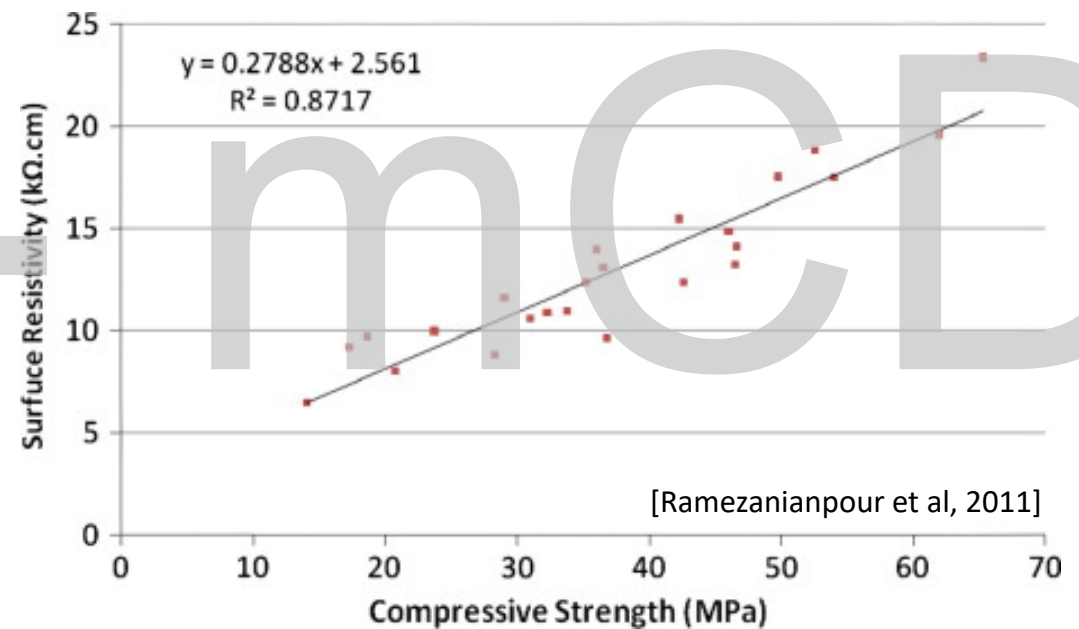
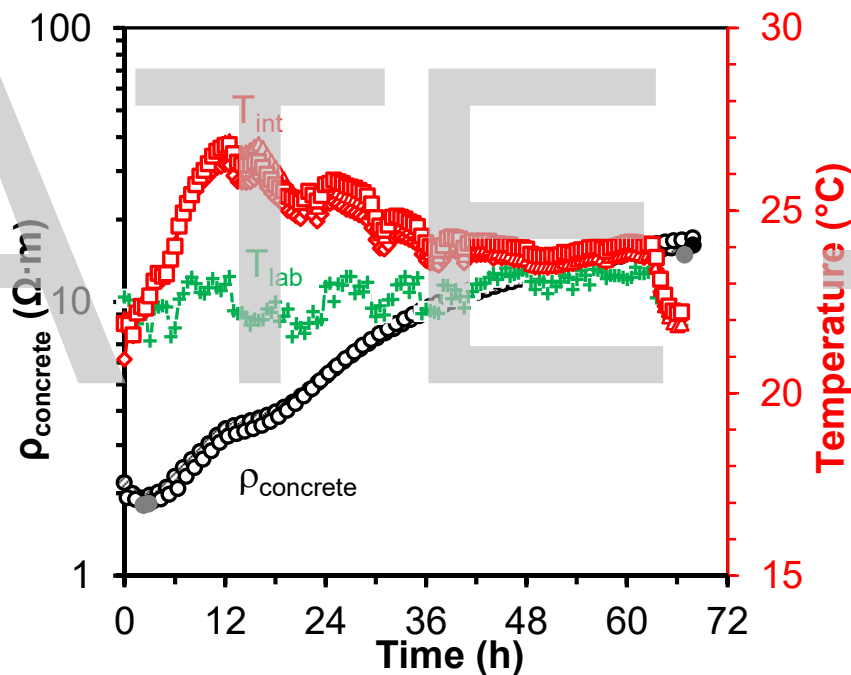
## Velocità di corrosione in calcestruzzo carbonatato (Propagazione)



# Monitoraggio - Resistività elettrica del calcestruzzo

Indicazioni su presa e indurimento  
(stagionatura)

→ Controlli in fase di esecuzione

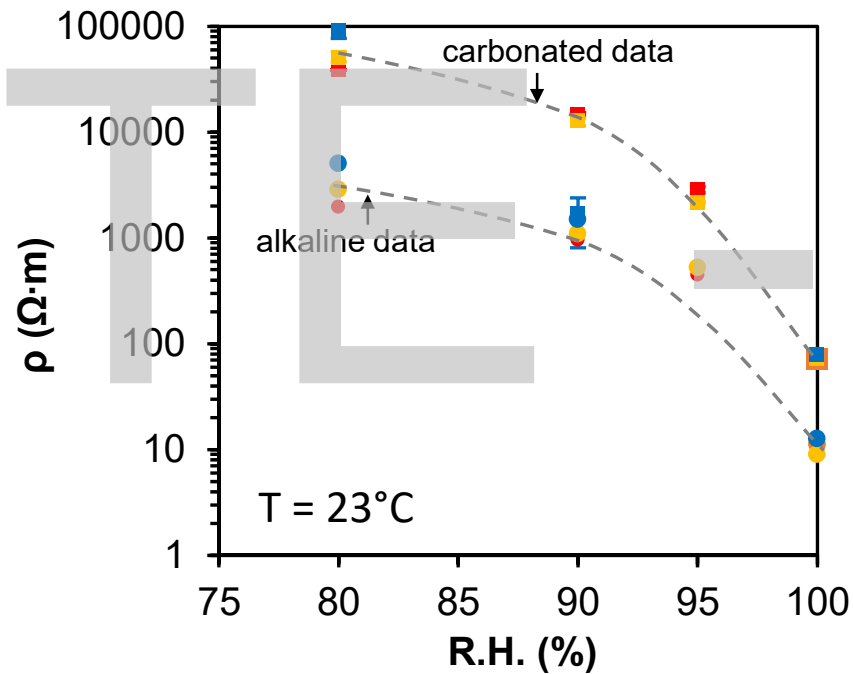


[Ramezaniapour et al, 2011]



# Monitoraggio - Resistività elettrica del calcestruzzo

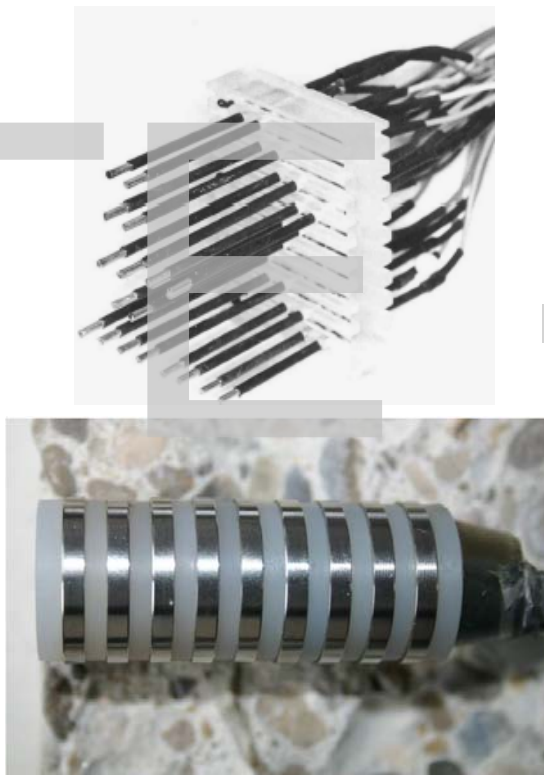
## Indicazioni su innesco



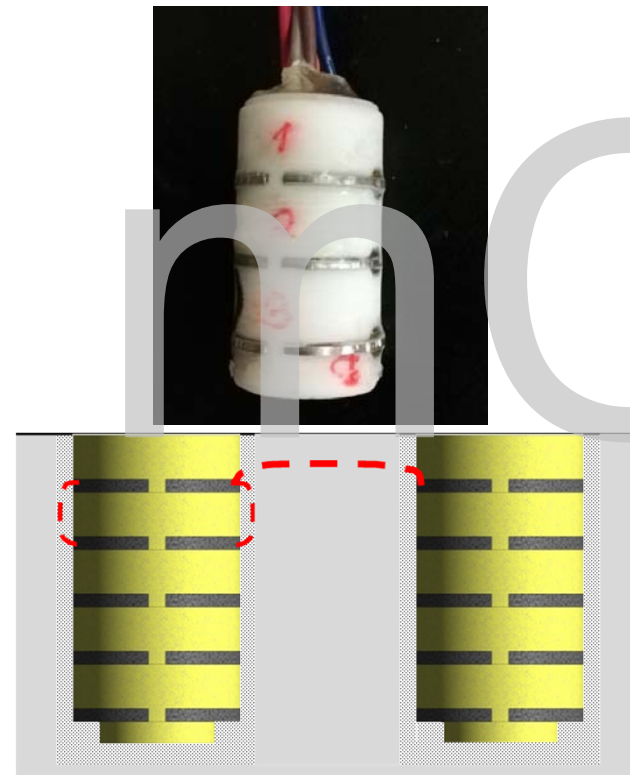
- Umidità del calcestruzzo influenza notevolmente le misure
- Resistività cambia anche al cambiare della T

## Monitoraggio - Resistività elettrica del calcestruzzo

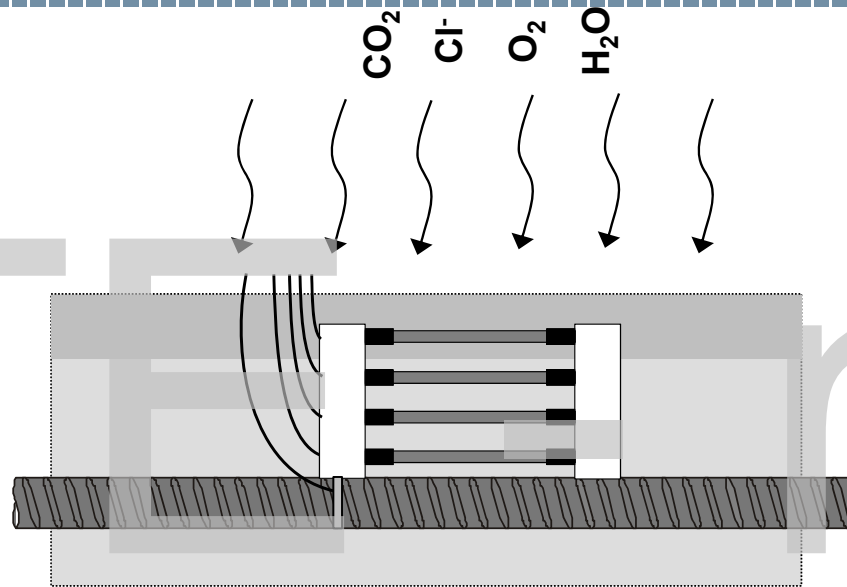
Strutture nuove



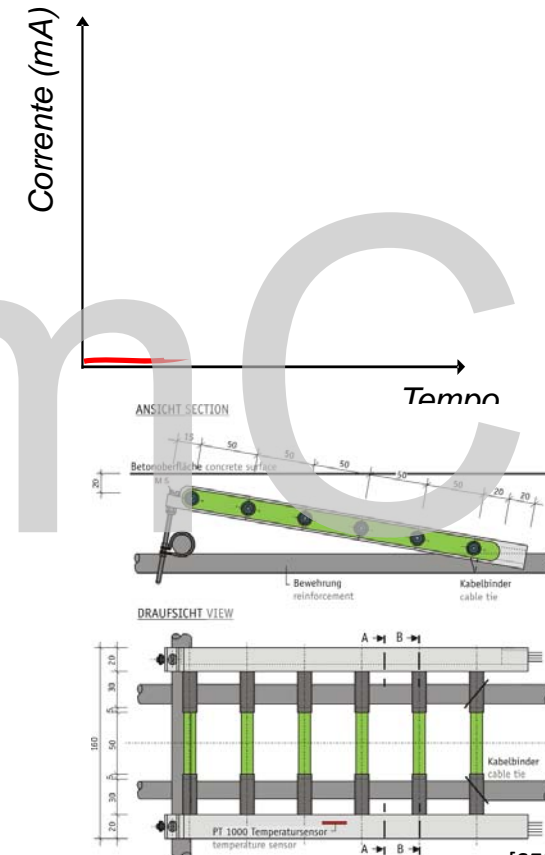
Strutture esistenti



## Monitoraggio - Sonde di macrocoppia



- Monitoraggio penetrazione carbonatazione e cloruri
- Innesco e propagazione della corrosione
- Solo in strutture nuove (o nelle malte da rispristino)

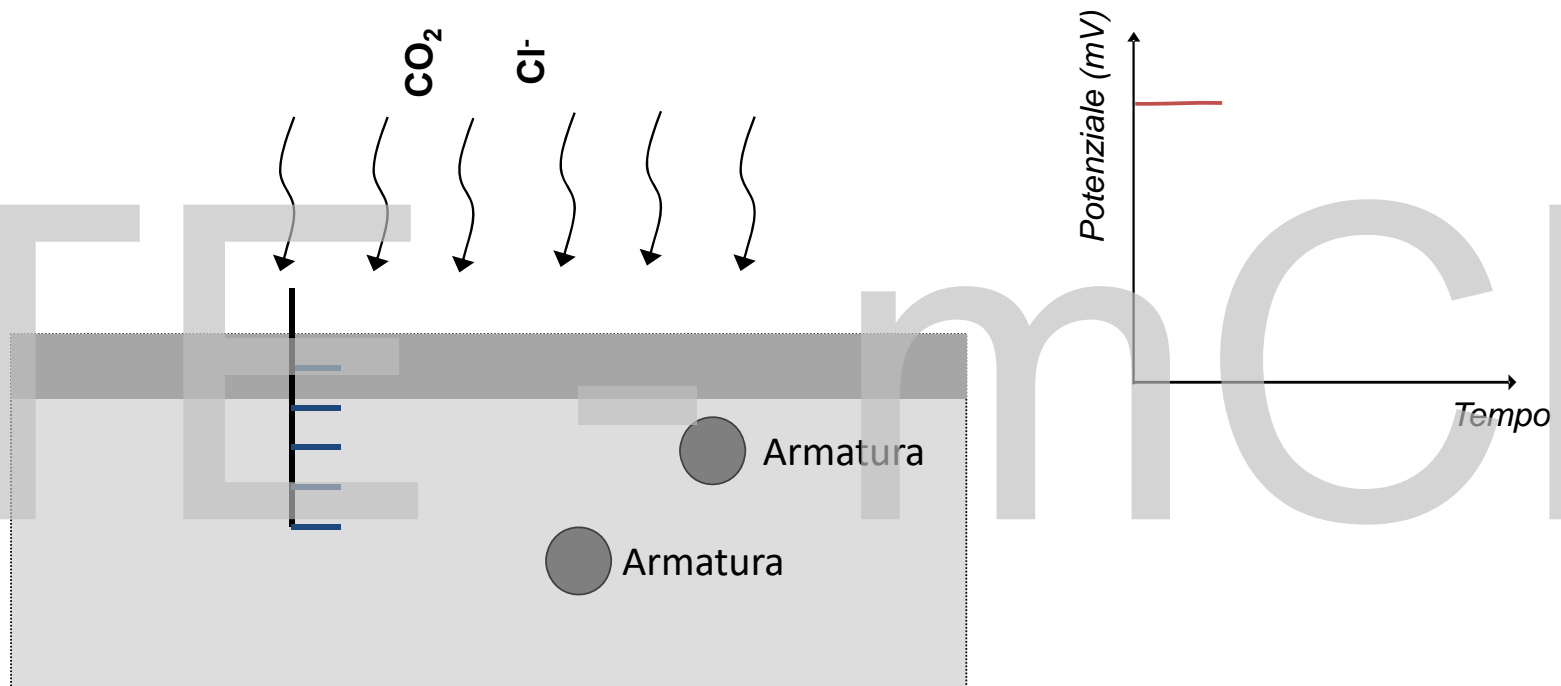


[SENSORTEC GmbH]

## Monitoraggio - Sonde di macrocoppia



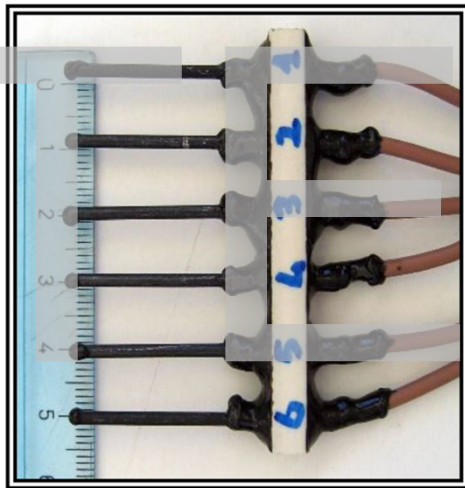
## Monitoraggio – Penetrazione della carbonatazione/ $\text{Cl}^-$



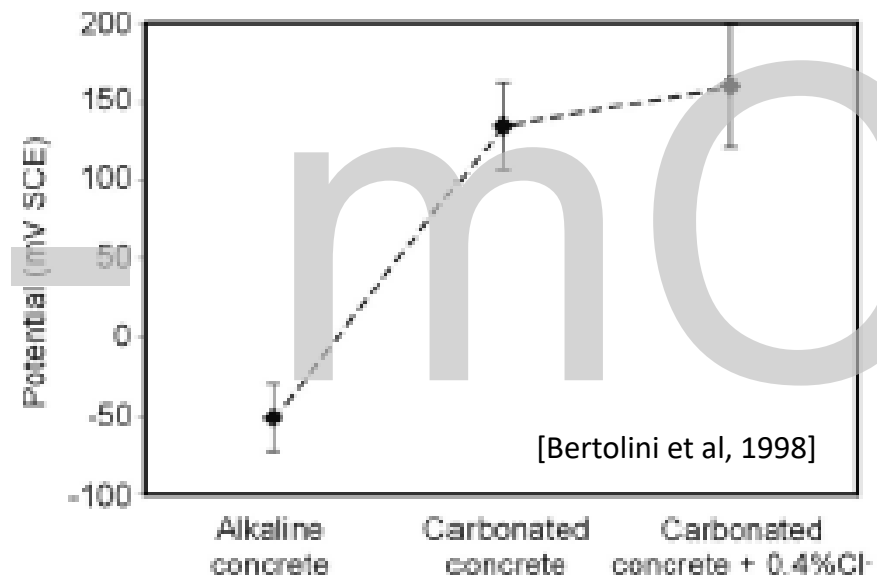
- Penetrazione carbonatazione/cloruri e innesco corrosione
- Solo in strutture nuove (o nelle malte da rispristino)

## Monitoraggio – Penetrazione della carbonatazione

El. di Titanio attivato (MMO)



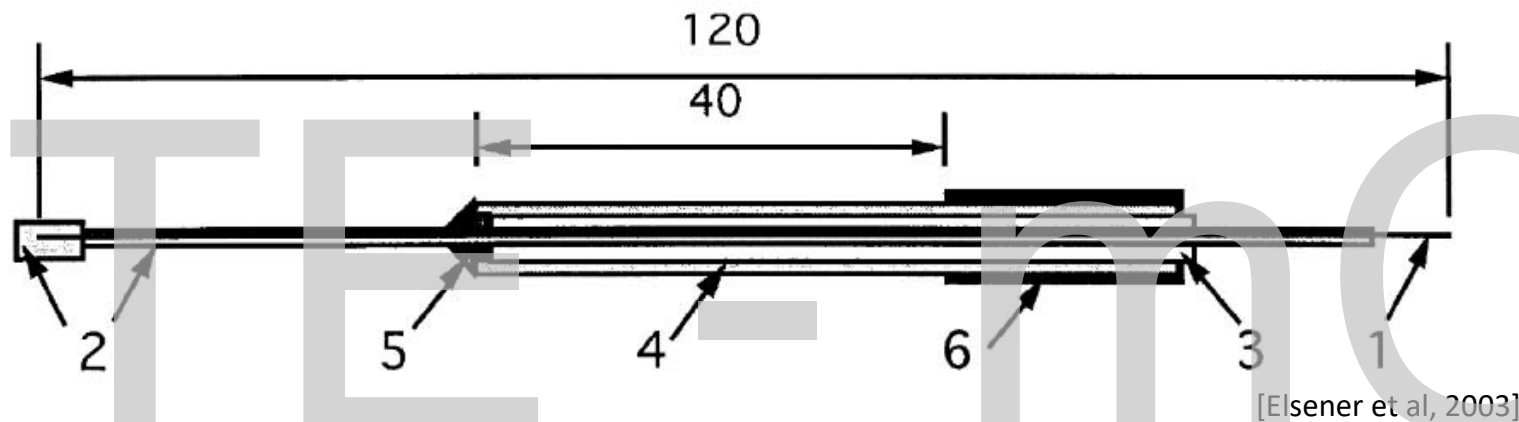
- Sensibile alle variazioni di  $O_2$





## Monitoraggio – Penetrazione dei cloruri

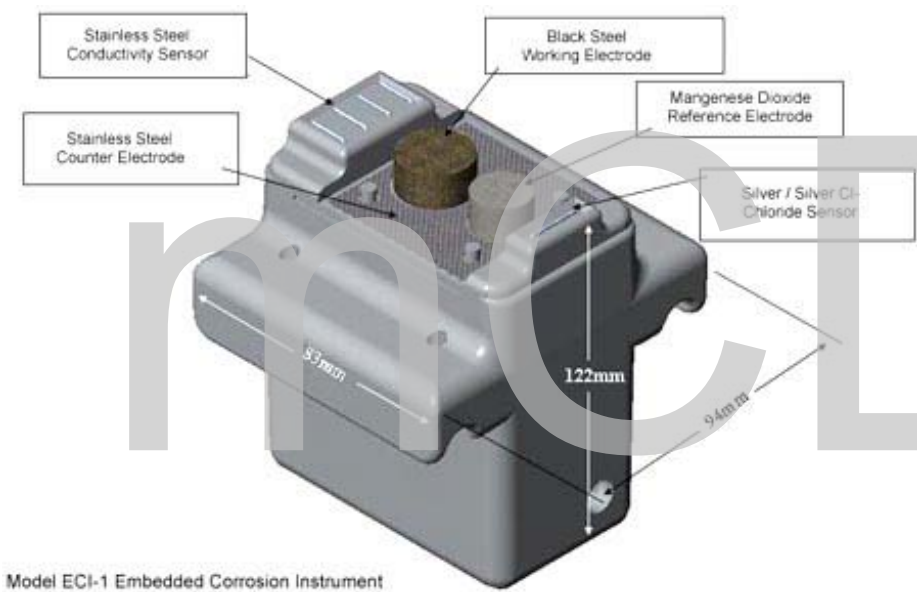
El. sensibile ai cloruri



**Fig. 1.** Combined chloride and resistivity sensor element. 1 silver wire, 2 AgCl coating, 3 teflon tube (isolation), 4 stainless steel tube (1.4301), 5 epoxy sealing, 6 insulation. Total length ca. 12 cm

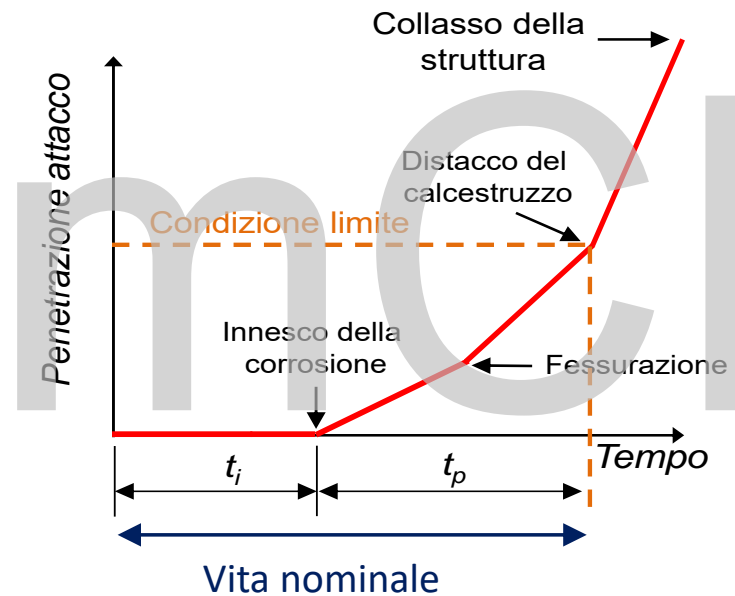
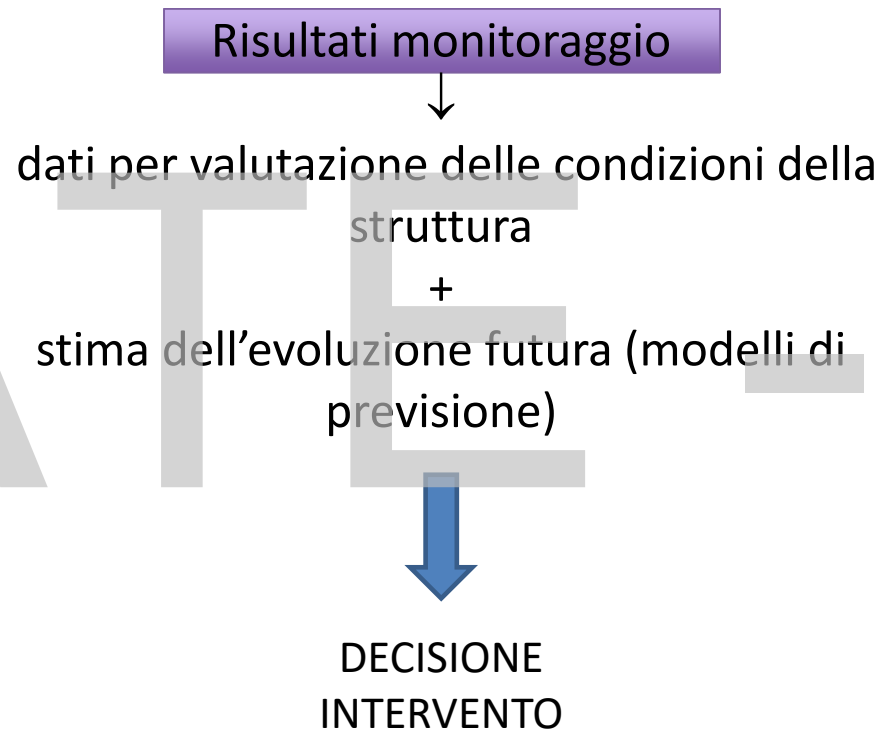
## Monitoraggio – Velocità di corrosione

### Sonde LPR e sonde multi elettrodo

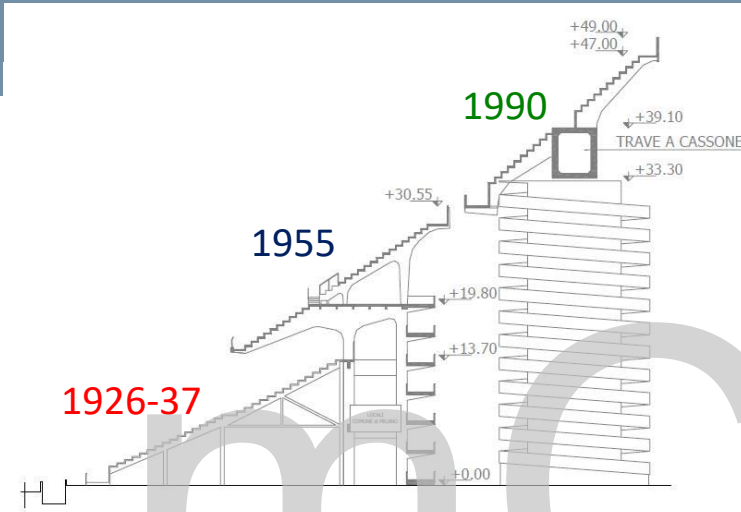


- Solo in strutture nuove (o nelle malte da rispristino)

## Diagnosi ed evoluzione futura del degrado



## Ispezione, controlli e monitoraggio - Stadio San Siro (G.Meazza)



### *Ispezioni*

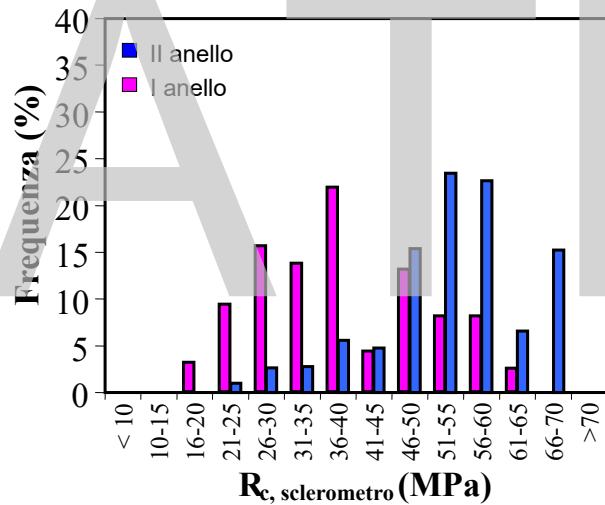
- misure sclerometriche
- misure elettrochimiche
- spessore di copriferro
- Prelievo campioni (carbonatazione)



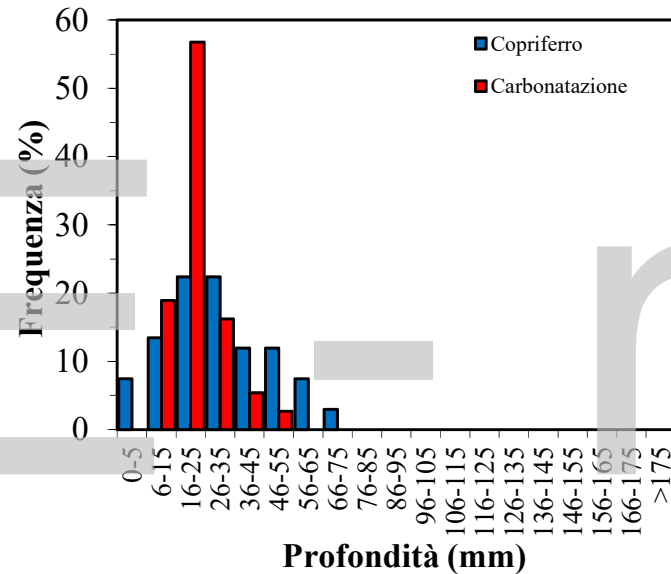
# Ispezione, controlli e monitoraggio - Stadio San Siro (G.Meazza)

## Ispezioni – Il anello (1955)

### Resistenze sclerometriche

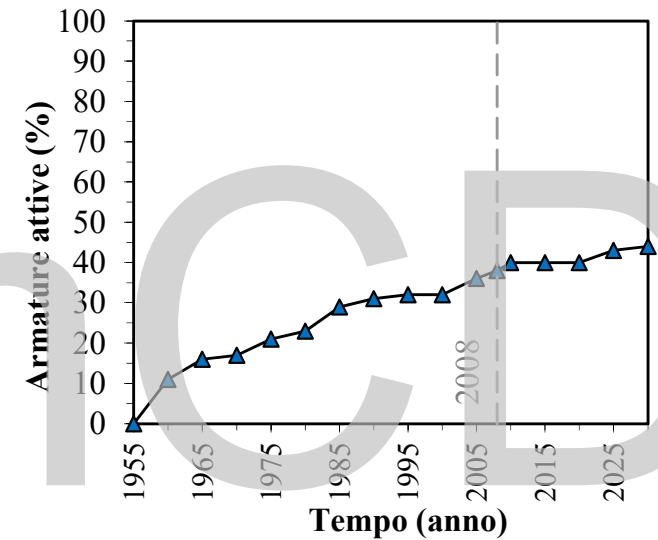


## Misure di copriferro e di carbonatazione



[Angeleri et al, 2015]

## Stima percentuale armature attive



PROPAGAZIONE

Monitoraggio



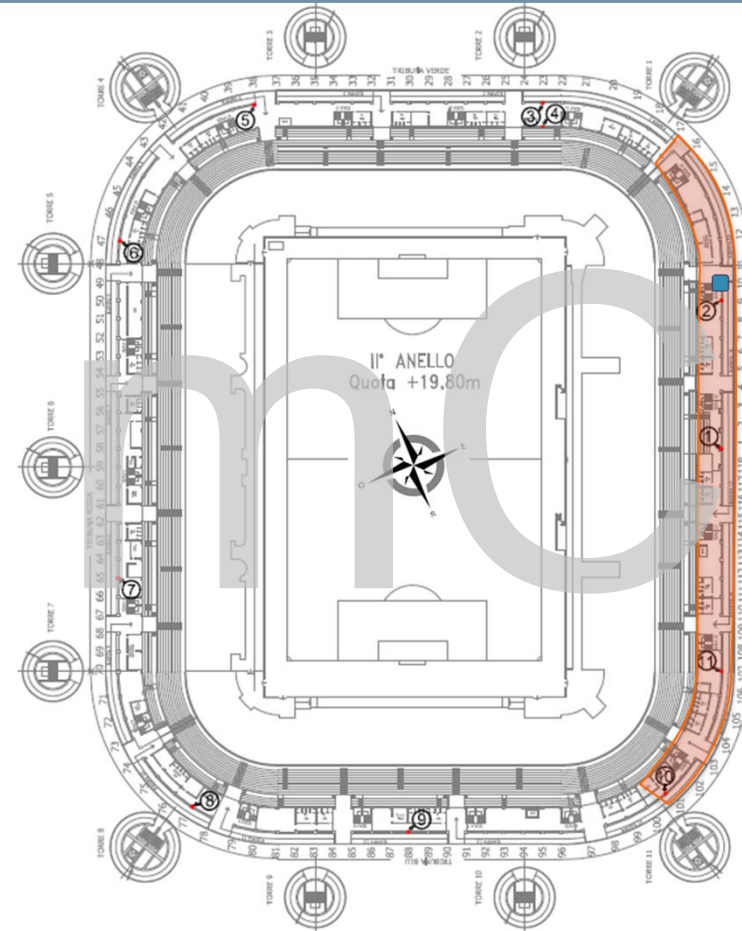


# Ispezione, controlli e monitoraggio - Stadio San Siro (G.Meazza)

## Propagazione della corrosione - Monitoraggio

### *Installazione sonde per il monitoraggio*

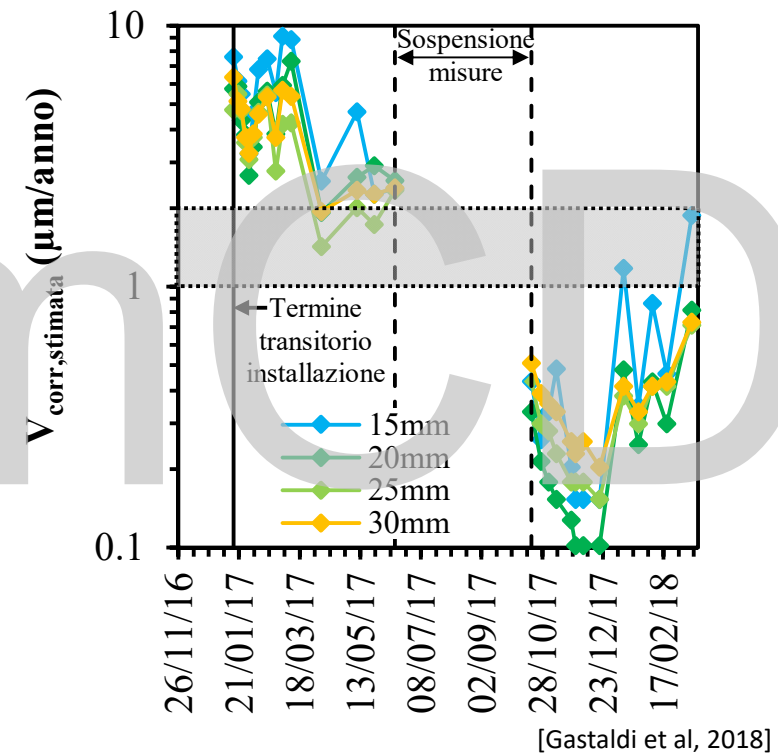
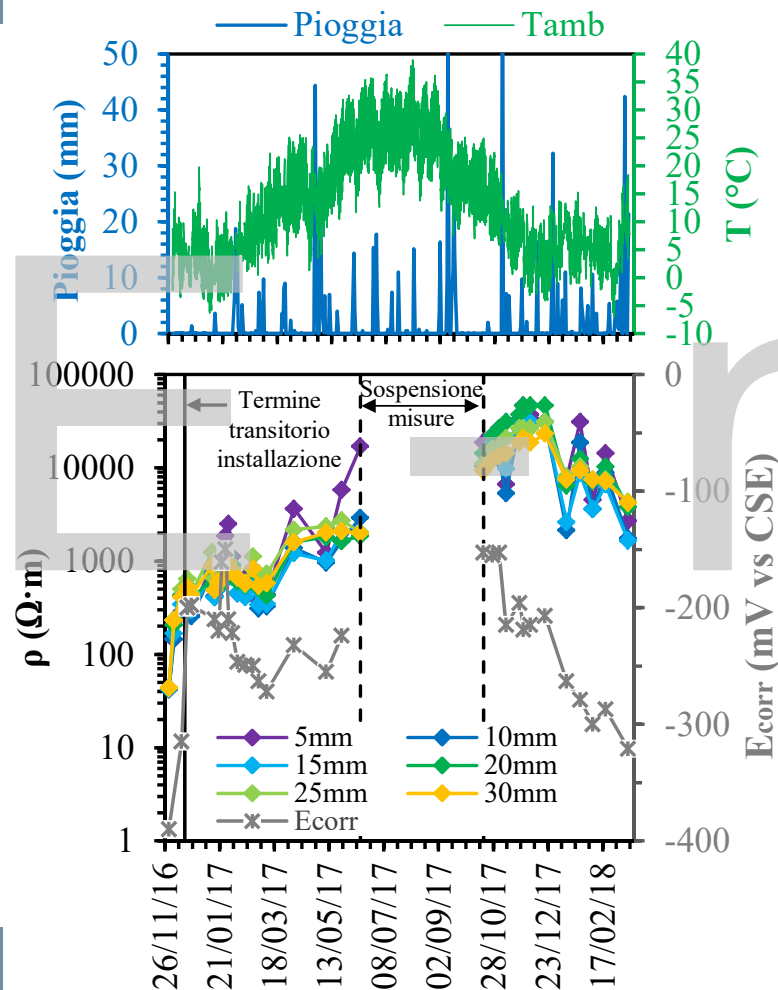
- resistività del calcestruzzo
- potenziale di corrosione delle armature





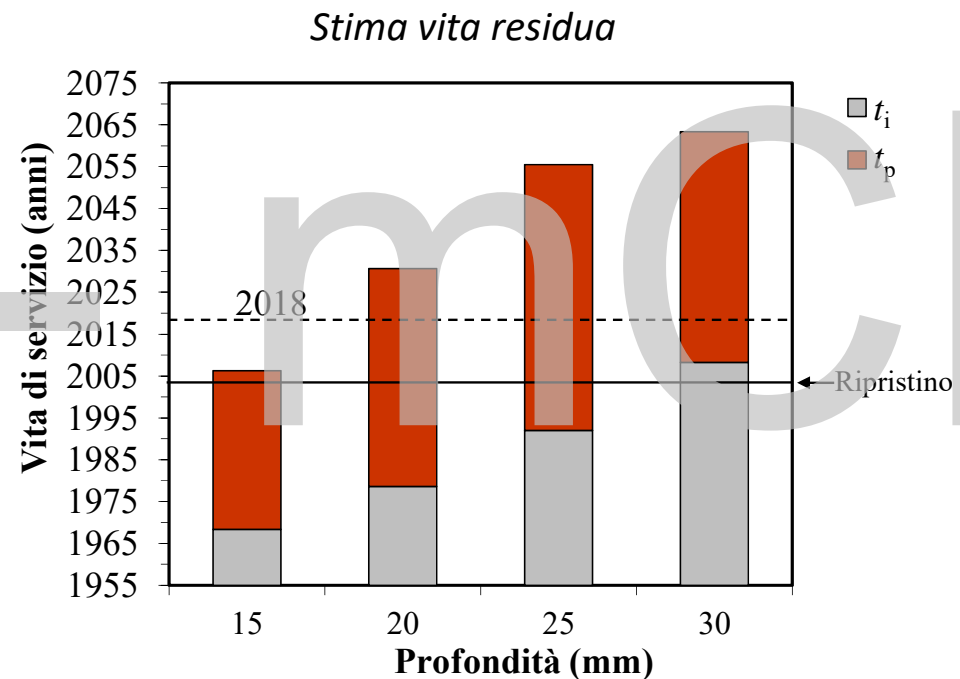
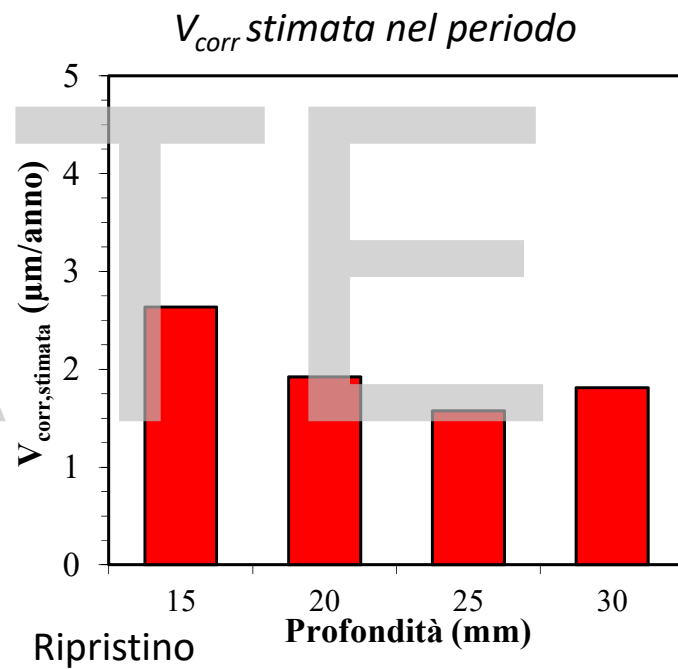
# Ispezione, controlli e monitoraggio - Stadio San Siro (G.Meazza)

## Monitoraggio e stima $V_{corr}$



## Ispezione, controlli e monitoraggio - Stadio San Siro (G.Meazza)

### Stima del tempo di propagazione e della vita residua



[Gastaldi et al, 2018]

## FUTURO – Smart structures



## Aspetti da considerare

- Quanti punti di misura prevedere per avere indicazioni sulla durabilità della struttura?
- Interpretazione dei dati (→ esperti)
- Durabilità dei componenti (cavi, connessioni, elettrodi, elettronica ...)
- Invecchiamento/innovazione tecnologica
- ...



**Manutenzione**  
(valutazione Costi/Risparmi - economici e ambientali)

Il futuro è promettente

È necessaria ancora ricerca e sperimentazione

Corsi di formazione ATE-mCD:  
La durabilità del calcestruzzo

***Grazie dell'attenzione***

**I** CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI INGEGNERI



ASSOCIAZIONE  
TECNOLOGI  
PER L'EDILIZIA



POLITECNICO MILANO 1863