



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

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

## Metodi non distruttivi di ispezione. Misure elettrochimiche

### Prof.ssa Federica Lollini



CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI INGEGNERI



ASSOCIAZIONE  
TECNOLOGI  
PER L'EDILIZIA





# Obiettivi dell'ispezione

- Identificare le cause del degrado (diagnosi)
- Prevedere l'evoluzione del degrado (vita residua)
- Supportare le decisioni sulle strategie di intervento



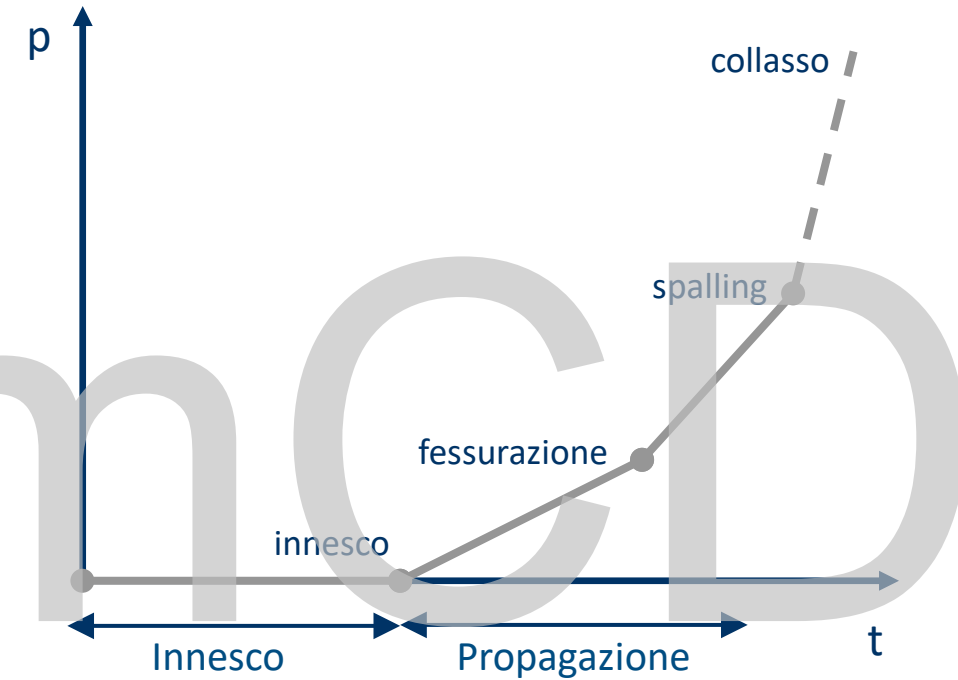
fessurazione



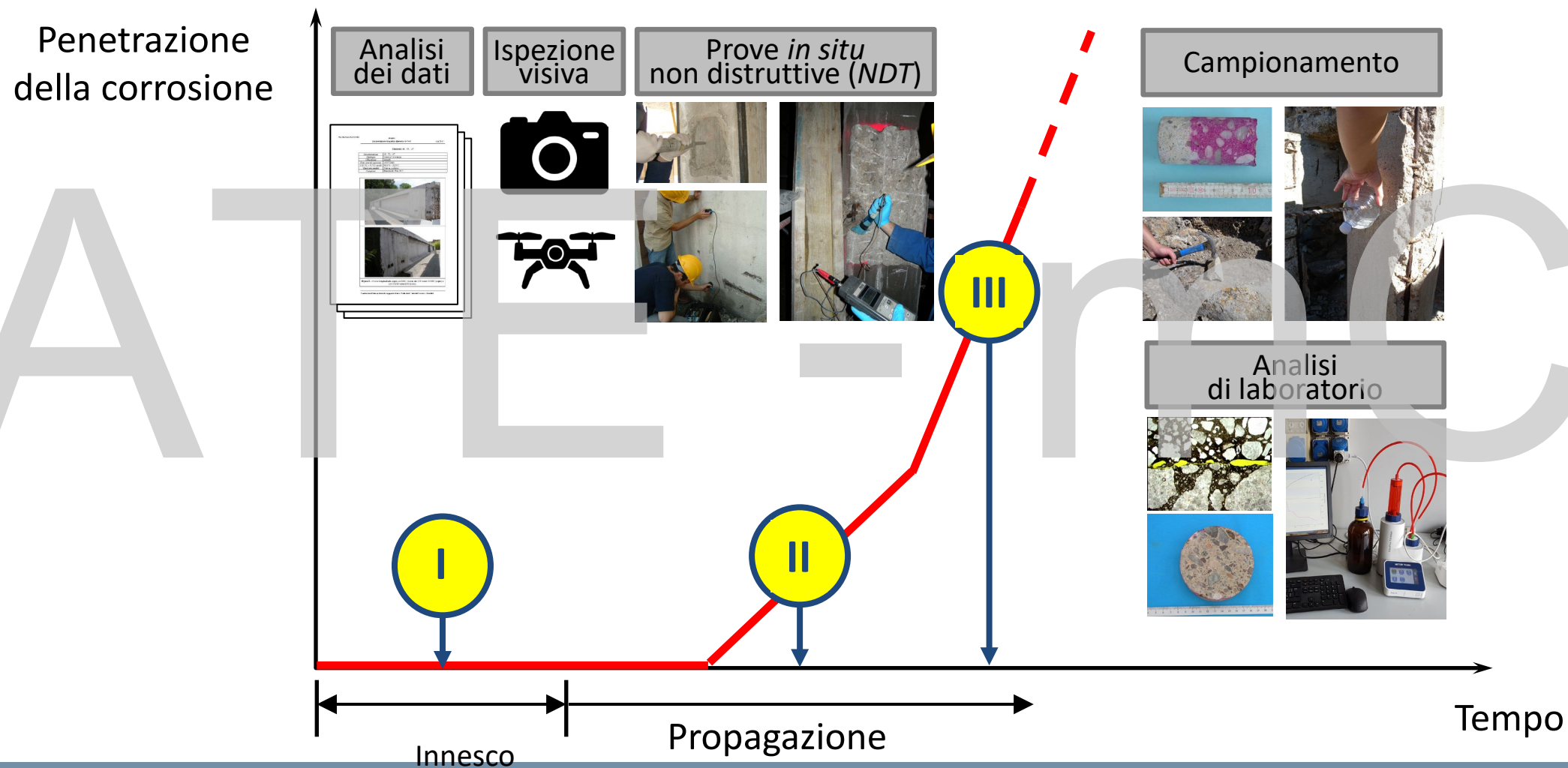
spalling



collasso



# Condizioni di corrosione



Raccolta di informazioni riguardanti:

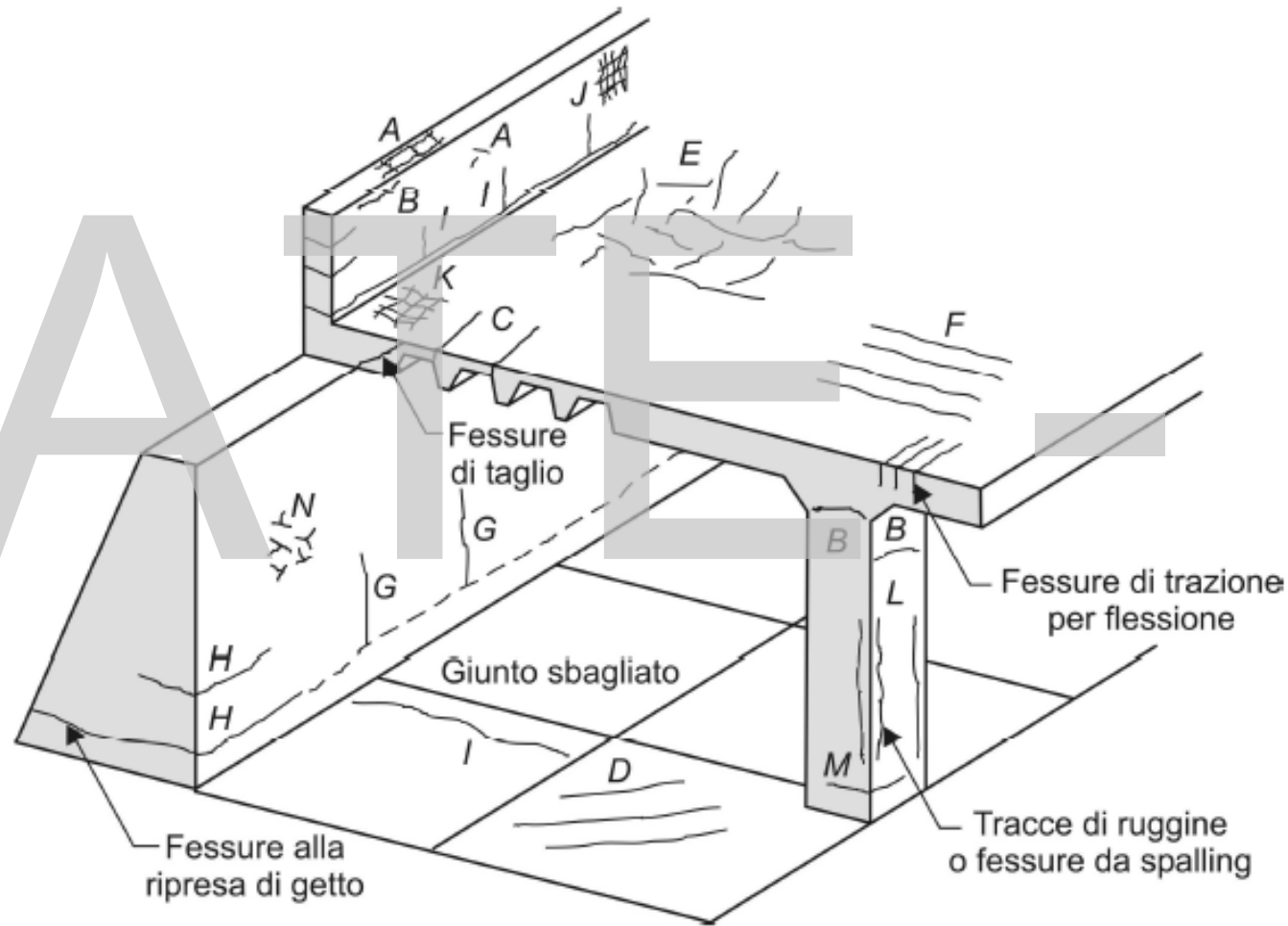
- Epoca di costruzione
- Tecnologie costruttive
- Caratteristiche del calcestruzzo (composizione,  $R_c$ , ...)
- Condizioni di esposizione (clima, T/UR, cloruri, ...)
- Storia (es. eventi accidentali)
- Interventi pregressi

- Fenomeni di degrado visibili
- Difetti costruttivi
- Materiali
- Condizioni di esposizione (interno/esterno, microclima)
- Formulazione di ipotesi delle cause di degrado



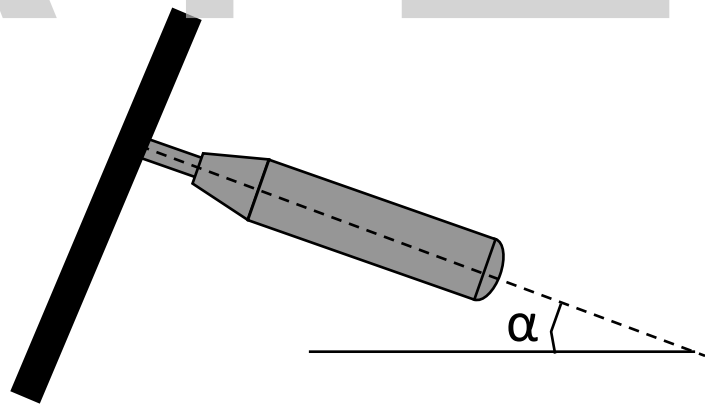


# Ispezione visiva - fessure

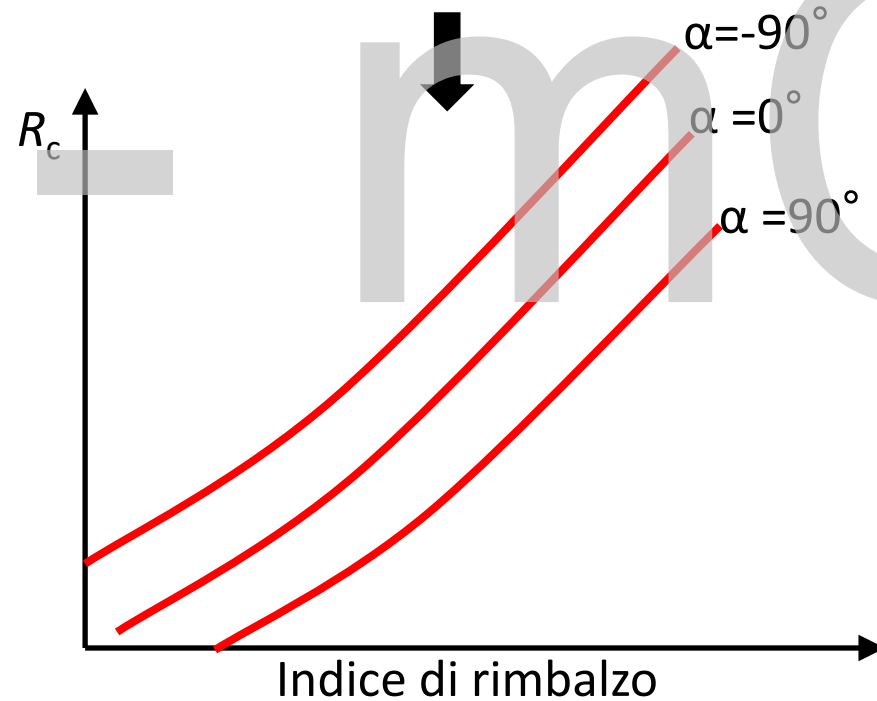


Tipo di fessurazione	Suddivisione	Posizione più probabile	Fattore principale	Fattori secondari	Tempo di comparsa
Assestamento plastico	A	sopra le armature	notevole bleeding	rapida evaporazione	da 10 minuti a 3 ore
	B	volte			
	C	variazione spessore			
	D	diagonali			
Ritiro plastico	E	casuali	essiccamento rapido	bassa velocità di bleeding	da 30 minuti a 6 ore
	F	sopra le armature	essiccamento rapido, basso copriferro		
Contrazioni termiche premature	G	vincoli esterni	elevato calore di idratazione	raffreddamento rapido	da 1 giorno a 3 settimane
	H	vincoli interni	elevata differenza di temperatura		
Ritiro igrometrico	I	muri e solette sottili	giunti inefficaci	forte ritiro, insufficiente stagionatura	diverse settimane o mesi
Microfessure	J	contro la cassaforma	casseforme impermeabili	miscela ricca di cemento cattiva stagionatura	1-7 giorni talvolta molto dopo
	K	calcestr. segregato	solette		
Corrosione delle armature	L	naturale	pilastri e travi	scarso copriferro	dopo più di 2 anni
	M	cloruro di calcio	opere pre-fabbricate	eccesso di $\text{CaCl}_2$	
Reazione alcali-aggr.	N	zone umide	aggregati reattivi elevato contenuto di quantità di alcali		dopo più di 5 anni

## Analisi sclerometriche (Schmidt hammer)



Il rimbalzo della massa è legato alla durezza della superficie  
(N.B.: finitura, carbonatazione, ecc.)

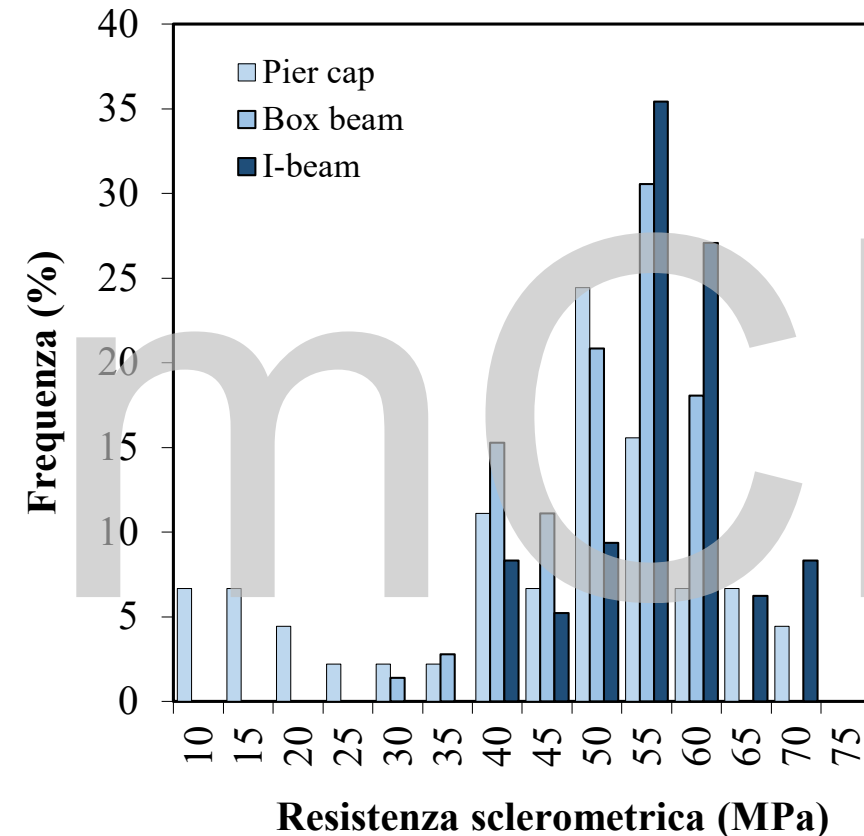
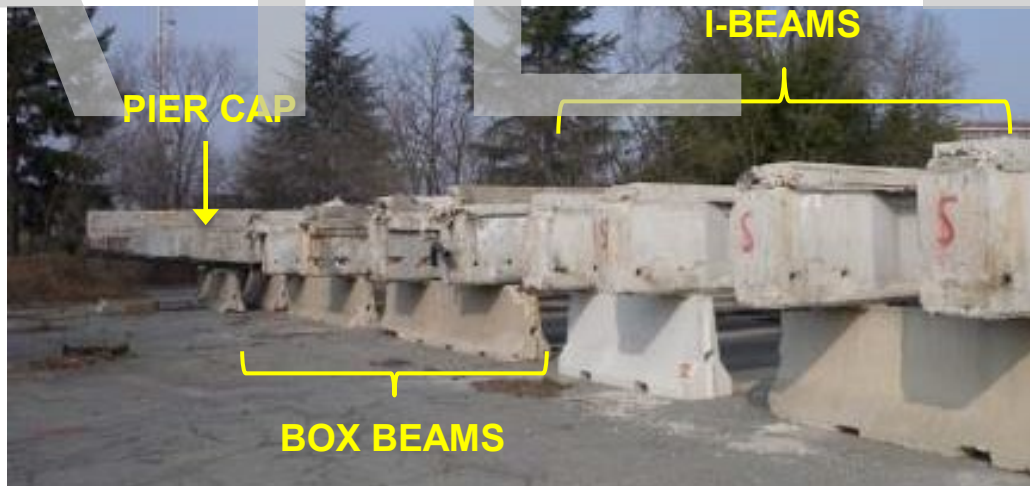


# Prove non distruttive – indagini sul calcestruzzo

## Analisi sclerometriche (Schmidt hammer)

Analisi statistica delle misure (almeno una decina di battute per ogni zona di misura 30x30 cm<sup>2</sup>)

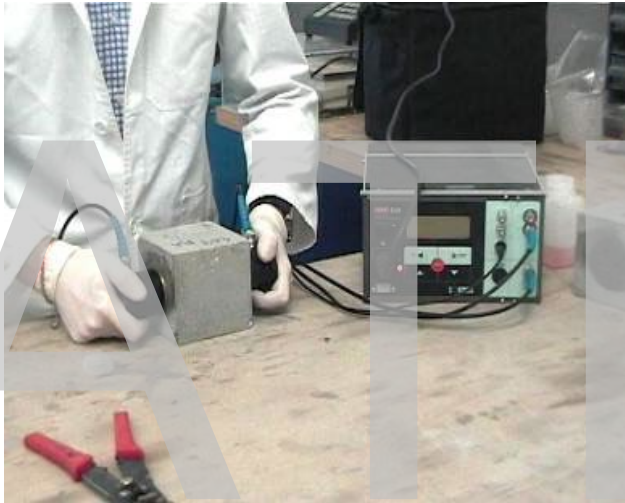
Controllo omogeneità del calcestruzzo



M. Carsana, F. Biondini, E. Redaelli, Diagnostic procedure for corrosion assessment of existing concrete bridges: Experimental case study, Structure and infrastructure Engineering, 1-17



## Velocità di transito degli ultrasuoni



Misura diretta:  $v = L / t$

$t$  = tempo di transito (ms)

$L$  = distanza tra le sonde (m)

a) modulo elastico dinamico:

$d_i$  = densità cls;  $v$  = velocità di transito,  $\delta$  = modulo di Poisson

$$E_d = \frac{d_i \cdot (1 + \delta) \cdot (1 - 2\delta) \cdot v^2}{(1 - \delta) \cdot 10^{-9}}$$

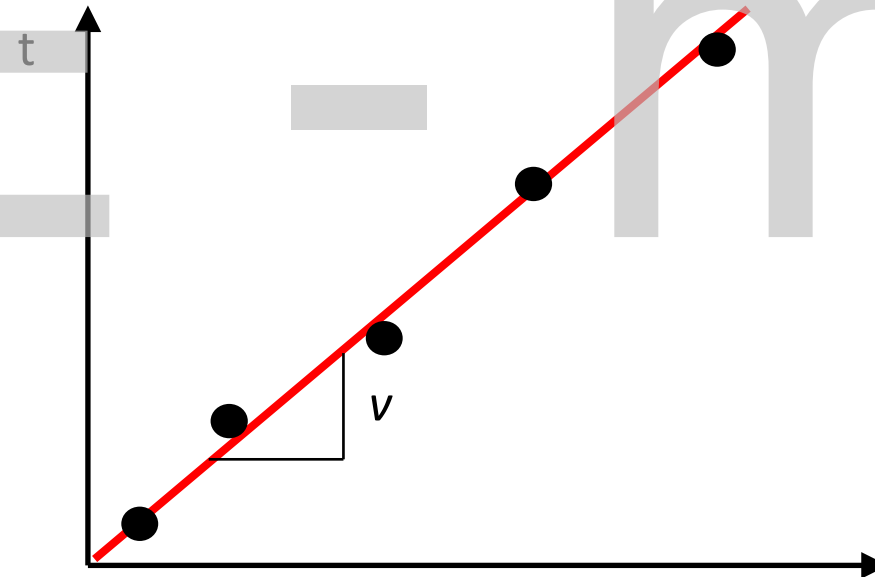
b) ricerca di difetti (vuoti, fessure, vespai, ecc.)

# Prove non distruttive – indagini sul calcestruzzo

## Velocità di transito degli ultrasuoni

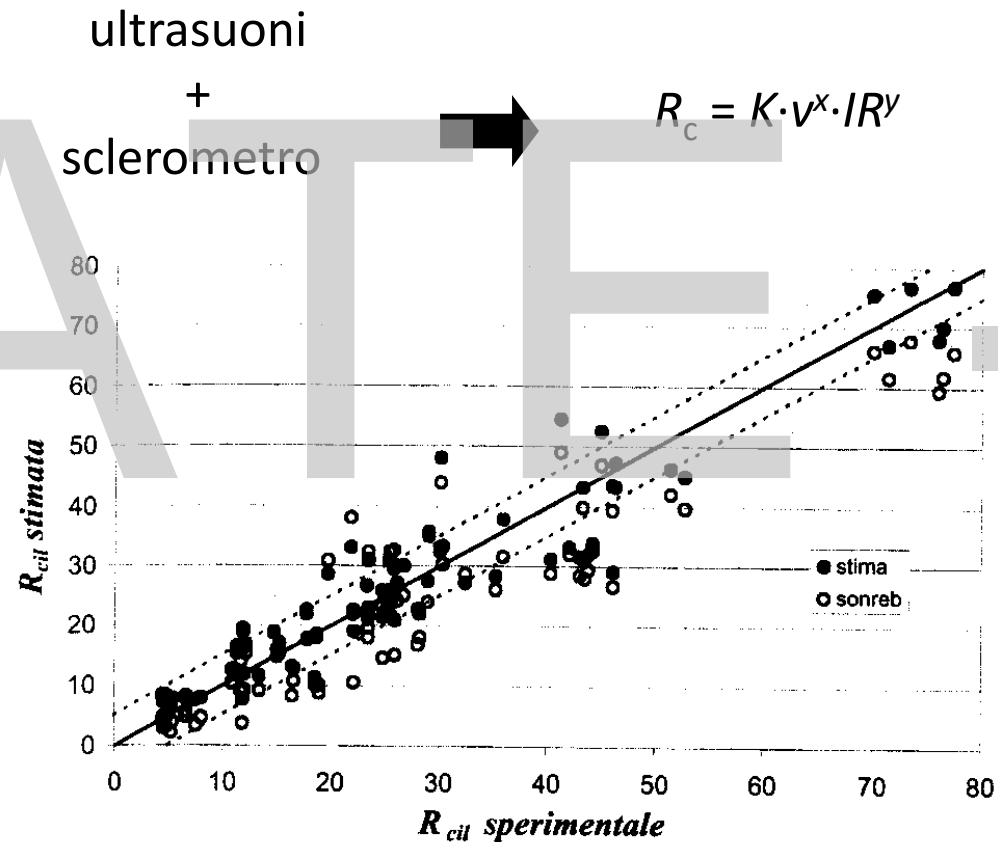


Misura indiretta



# Prove non distruttive – indagini sul calcestruzzo

## Metodi combinati (correlazioni sperimentali)

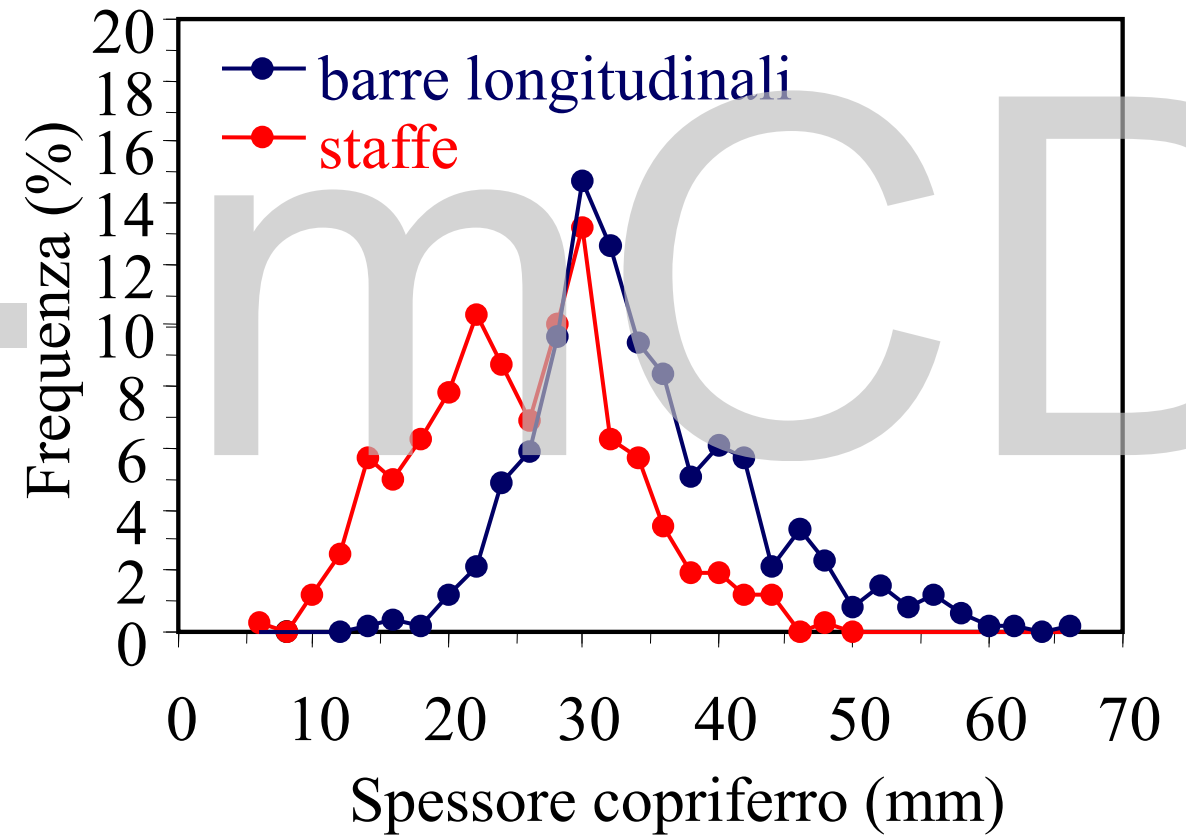


$IR$  = indice sclerometro  
 $v$  = velocità ultrasuoni  
 $K, x, y$  = sono parametri  
determinati con correlazioni  
sperimentali



# Prove non distruttive – posizione delle armature e spessore di copriferro

## Rilievo con strumento magnetico



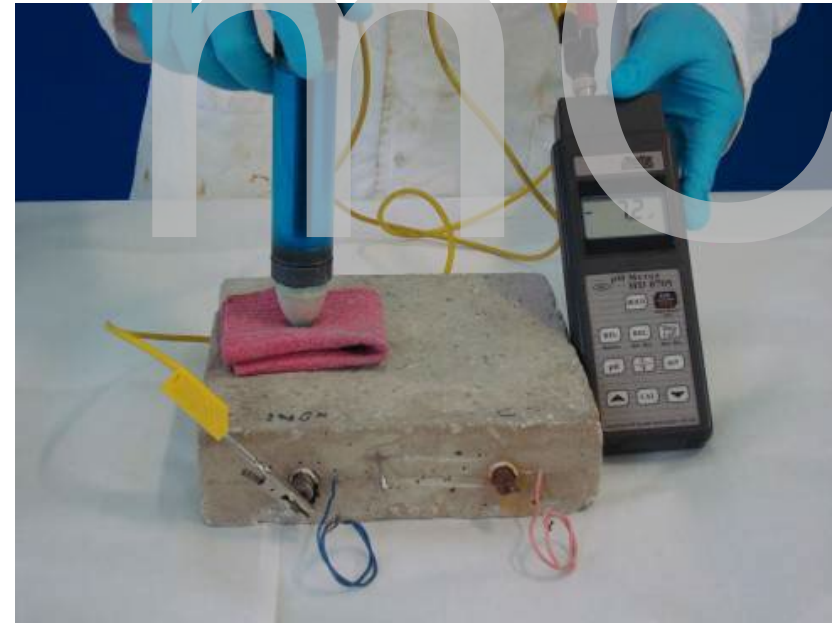
# Misure elettrochimiche – potenziale di corrosione

Condizioni di corrosione delle armature al momento in cui si effettua la misura

## Potenziale di corrosione

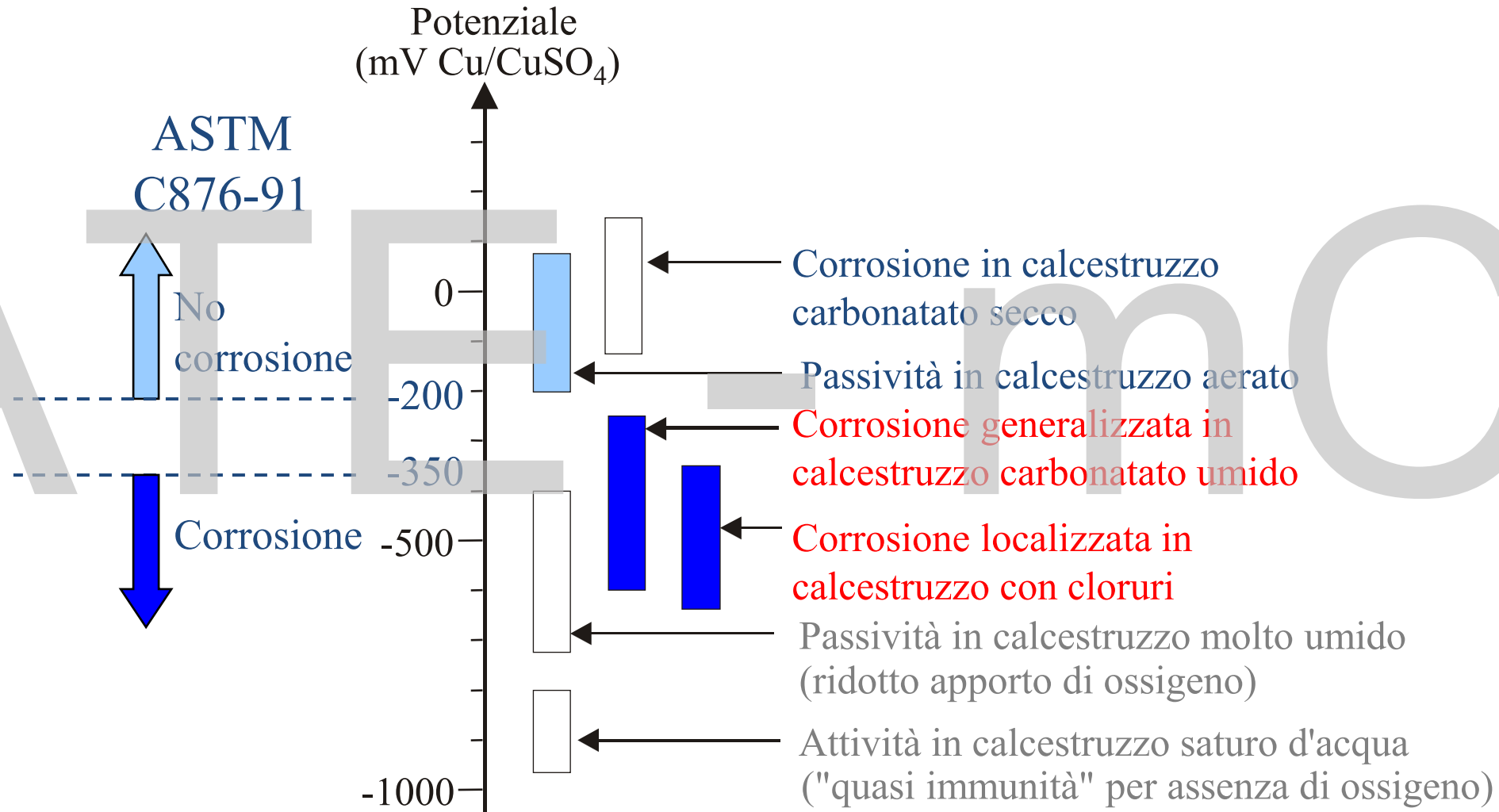


In campo



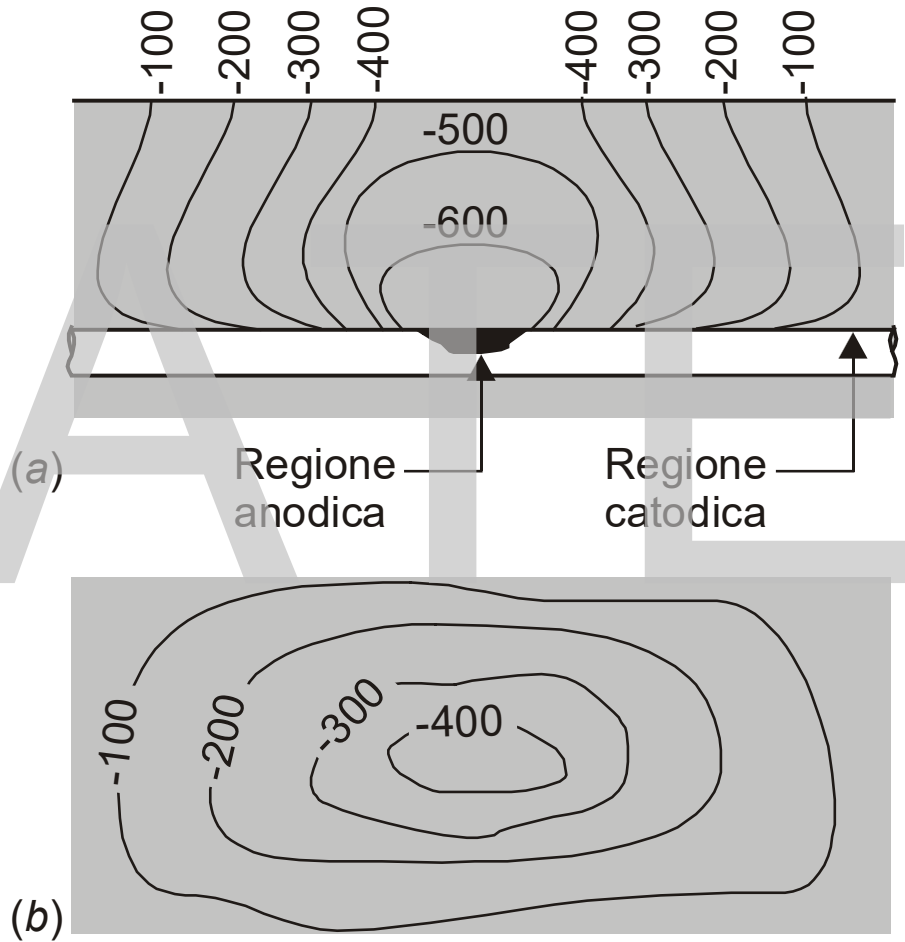
In laboratorio




# Misure elettrochimiche – potenziale di corrosione





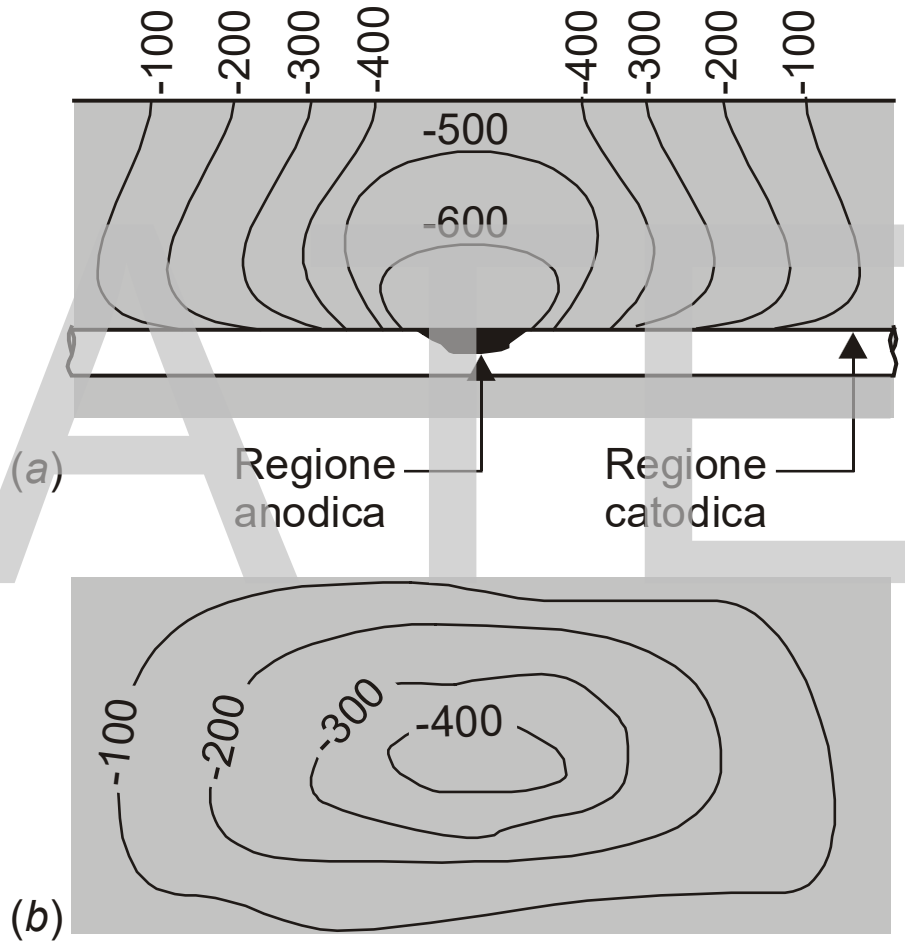
# Misure elettrochimiche – potenziale di corrosione



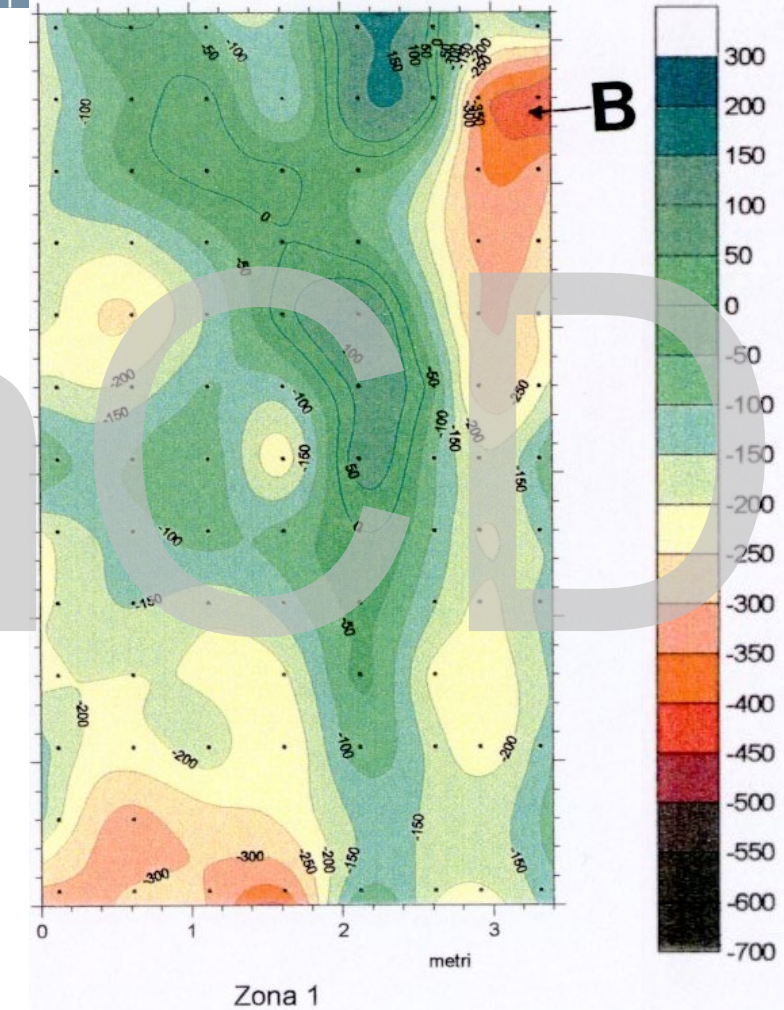
  $E_{\text{corr}} > -200 \text{ mV vs CSE}$    $-350 \leq E_{\text{corr}} < -200 \text{ mV vs CSE}$    $E_{\text{corr}} \leq -350 \text{ mV vs CSE}$

M. Carsana, F. Biondini, E. Redaelli, Diagnostic procedure for corrosion assessment of existing concrete bridges: Experimental case study, Structure and infrastructure Engineering, 1-17

# Misure elettrochimiche – potenziale di corrosione

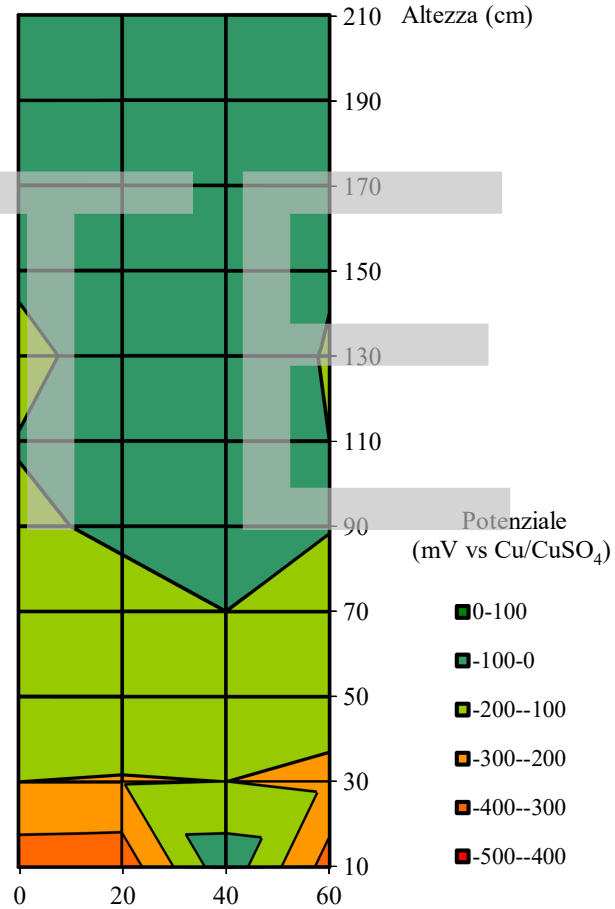


*Mappatura di potenziale  
di solette di  
ponti autostradali*

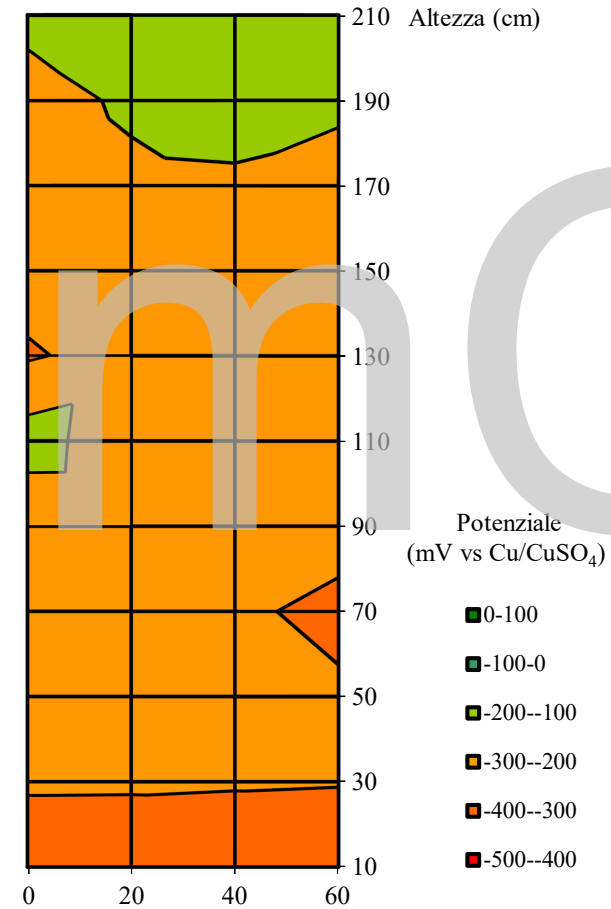


# Misure elettrochimiche – potenziale di corrosione

*Oggi...*



*...domani*



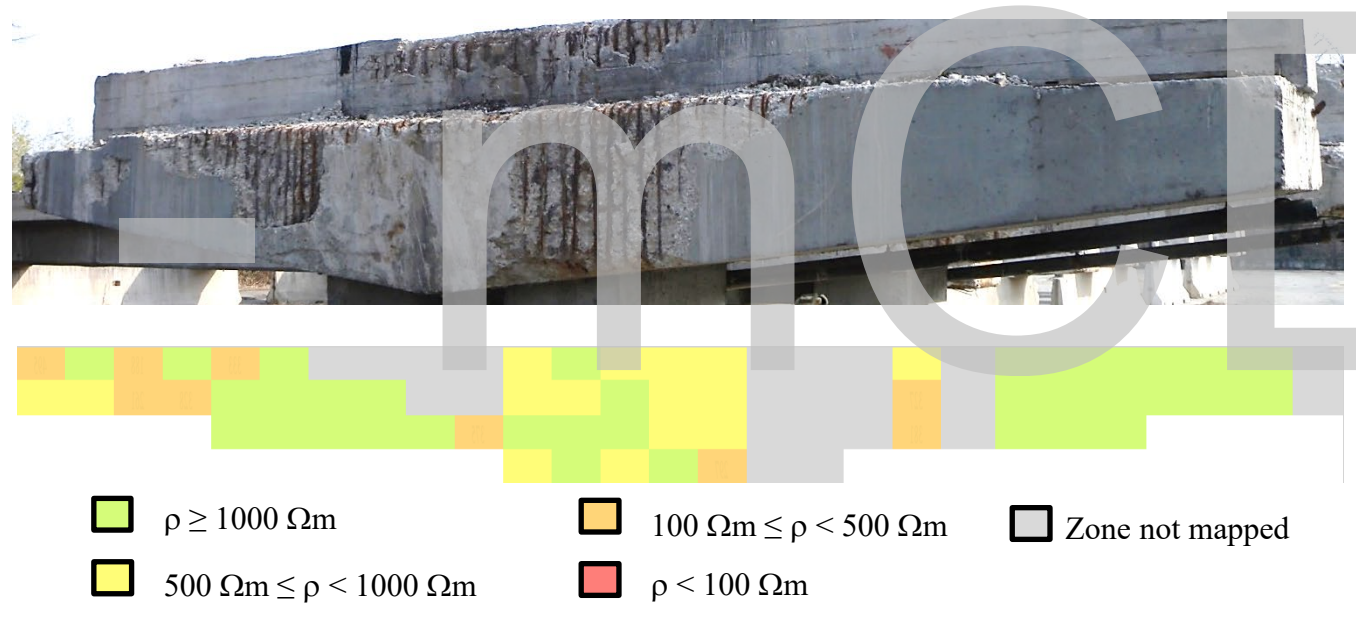




## Correlazione empirica:

$\rho$	$V_{\text{corr}}$
$>1000 \Omega\text{m}$	$\Rightarrow$ trascurab.
$500-1000 \Omega\text{m}$	$\Rightarrow$ bassa
$100-500 \Omega\text{m}$	$\Rightarrow$ moderata
$<100 \Omega\text{m}$	$\Rightarrow$ alta

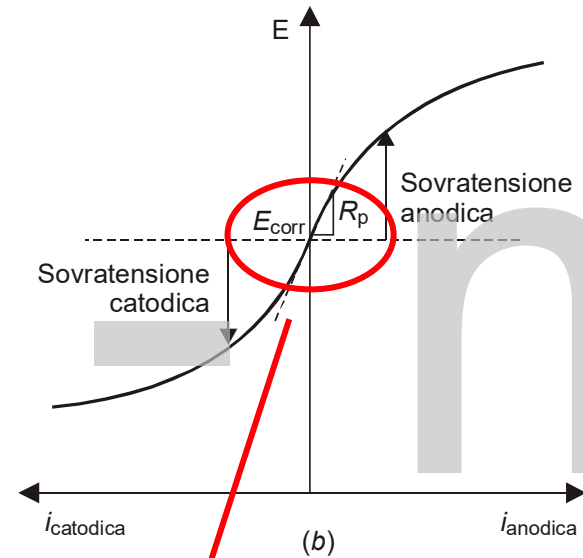
# Misure elettrochimiche – resistività elettrica



M. Carsana, F. Biondini, E. Redaelli, Diagnostic procedure for corrosion assessment of existing concrete bridges: Experimental case study, Structure and Infrastructure Engineering, 1-17



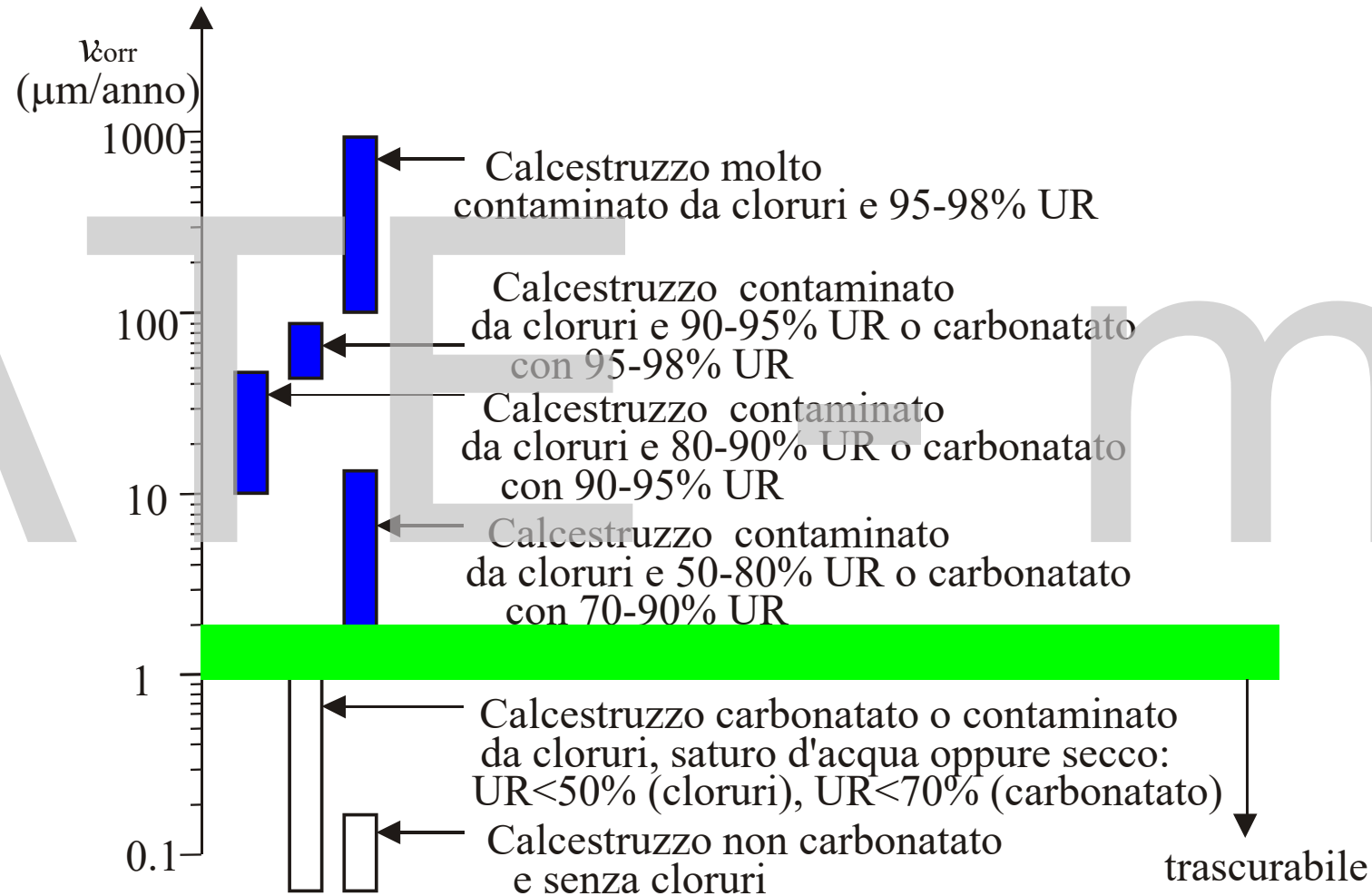
## Metodo della polarizzazione lineare



$$i_{\text{corr}} [\text{mA/m}^2] = B [\text{mV}] / R_p [\Omega \cdot \text{m}^2] \quad (\text{Stern-Geary})$$

$$v_{\text{corr}} [\mu\text{m/anno}] = K \cdot i_{\text{corr}} \quad (\text{legge di Faraday})$$

# Misure elettrochimiche – velocità di corrosione





# *Grazie dell'attenzione*



CONSIGLIO NAZIONALE  
DEGLI INGEGNERI



ASSOCIAZIONE  
TECNOLOGI  
PER L'EDILIZIA

