



POLITECNICO
MILANO 1863

Corsi di Formazione ATE-mCD "La durabilità del calcestruzzo"
Ispezione e diagnosi
Prof. Maddalena Carsana

I CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI

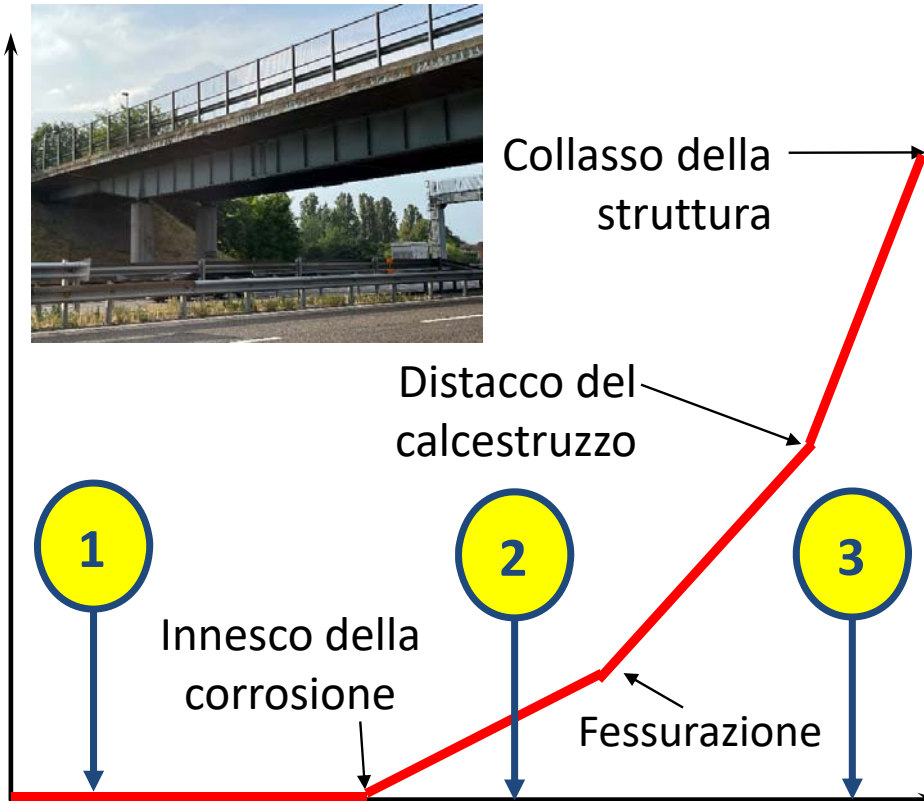


ASSOCIAZIONE
TECNOLOGI
PER L'EDILIZIA



Ispezione e diagnosi

**Penetrazione
della
corrosione**



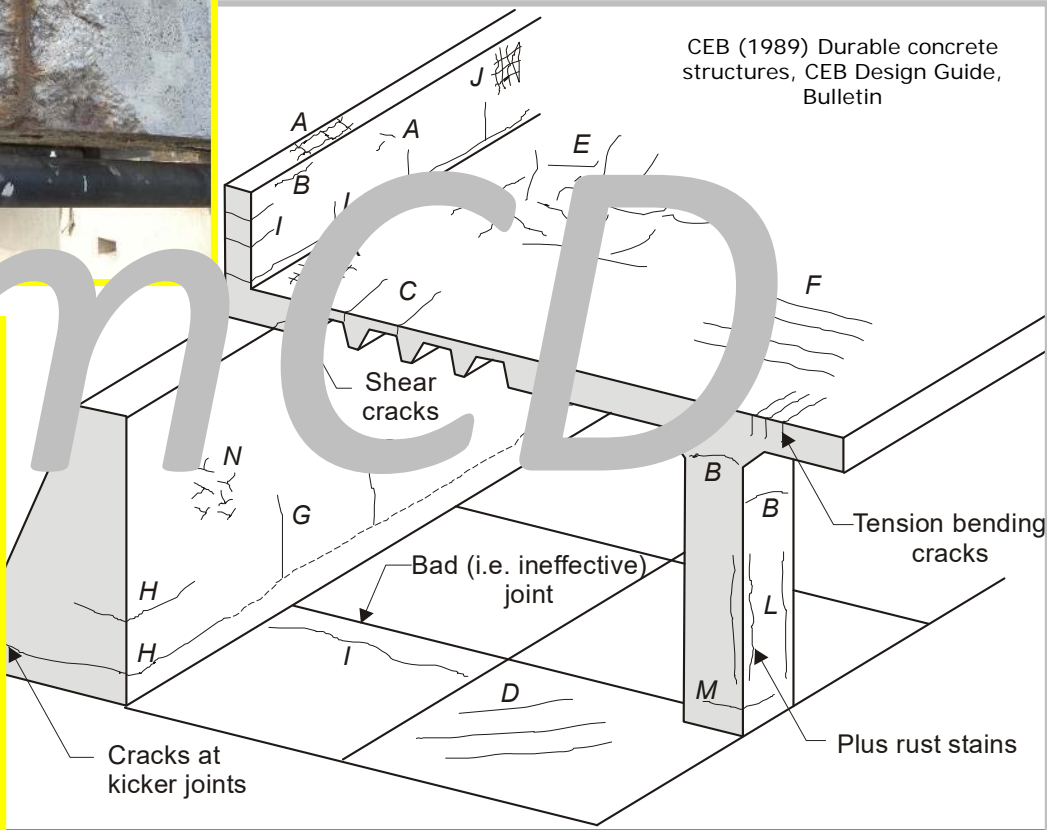
Bertolini, L. et al. 2008. Steel corrosion and service life of reinforced concrete structures. Structure and Infrastructure Engineering, 4(2), 123–137.

Analisi preliminari:

- Epoca di costruzione
- Tecnologie costruttive (c.a., c.a.p., etc.)
- Caratteristiche cls (mix, R_c , ..)
- Clima / Microclima
- “Storia”
(es. eventi accidentali)
- ecc.

Tempo

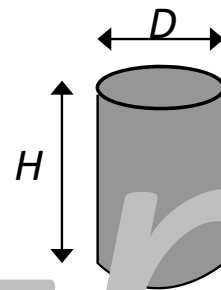
Ispezione e diagnosi – Osservazione visiva



Ispezione e diagnosi

Indagini sul calcestruzzo – Proprietà meccaniche

1. Prelievo di carote + prova di compressione



- diametro carota:
>100 mm (“ideale”)

$D > 3D_{max, aggregato}$

- rapporto H/D

- $R_{cul} \approx 1.2 R_{cilind}$

- danneggiamento della carota

- spianatura delle superfici

- umidità cls ($R_{umido} < R_{asciutto}$)

- presenza di armature (?)

- variabilità intrinseca del materiale

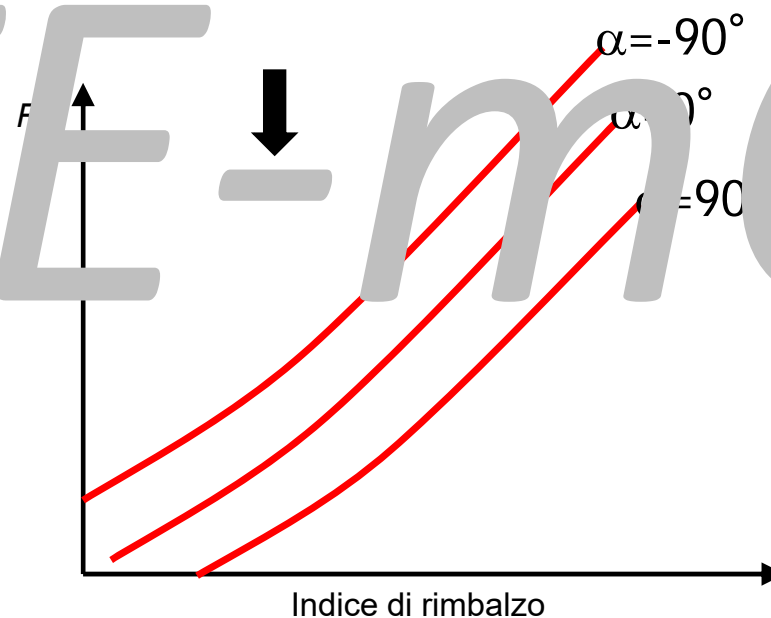
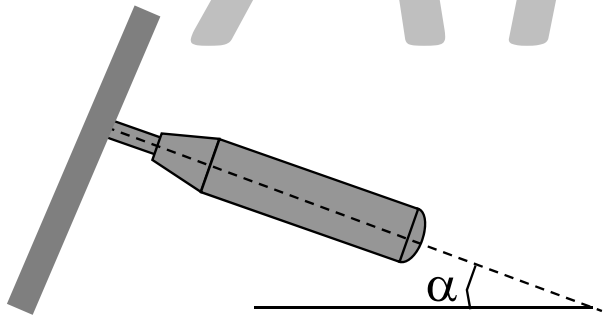


Ispezione e diagnosi Indagini sul calcestruzzo – Proprietà meccaniche

2. Analisi sclerometriche (Schmidt hammer)



Indice di rimbalzo influenzato dalla durezza della superficie (finitura, carbonatazione, fessurazione ..)

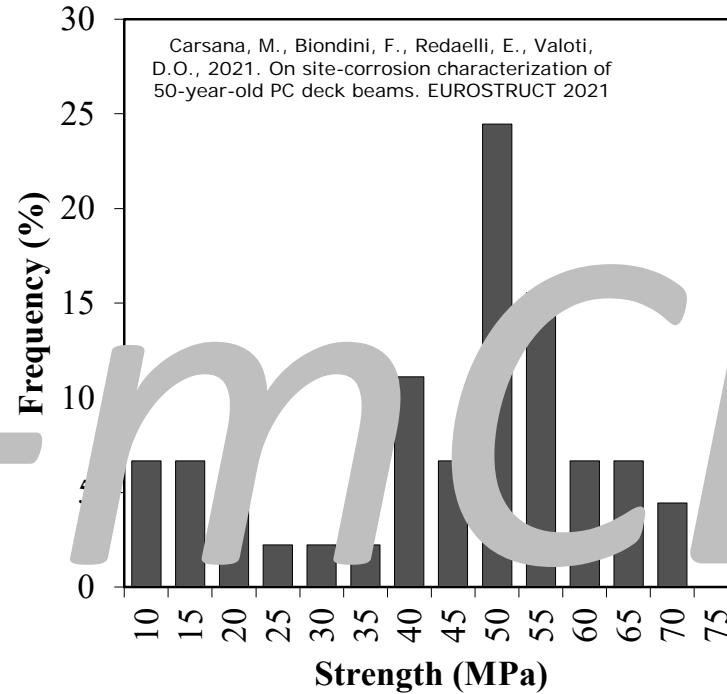


Ispezione e diagnosi Indagini sul calcestruzzo – Proprietà meccaniche

2. Analisi sclerometriche (Schmidt hammer)



Analisi statistica delle misure (almeno una decina di battute per ogni zona 30x30 cm²)



Controllo omogeneità
dal calcestruzzo



Ispezione e diagnosi Indagini sul calcestruzzo – Proprietà meccaniche

3. Velocità di transito ultrasuoni (v)

a) **proprietà meccaniche:**

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

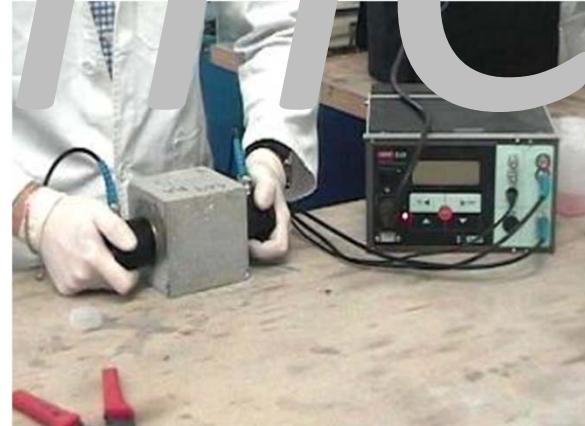
d_i = densità (kg/m³); v = velocità di transito (m/s); δ = modulo di Poisson

Misura diretta: $v = L/t$

t = tempo di transito (ms)
 L = distanza tra le sonde (m)

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

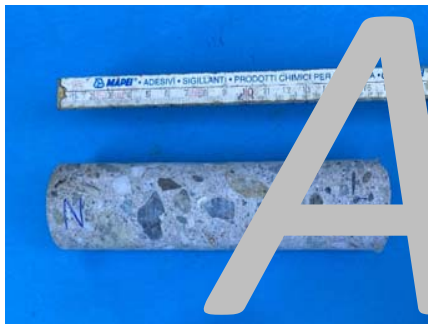
Misura
indiretta



Ispezione e diagnosi

Indagini sul calcestruzzo – Altre proprietà

Proprietà fisiche →

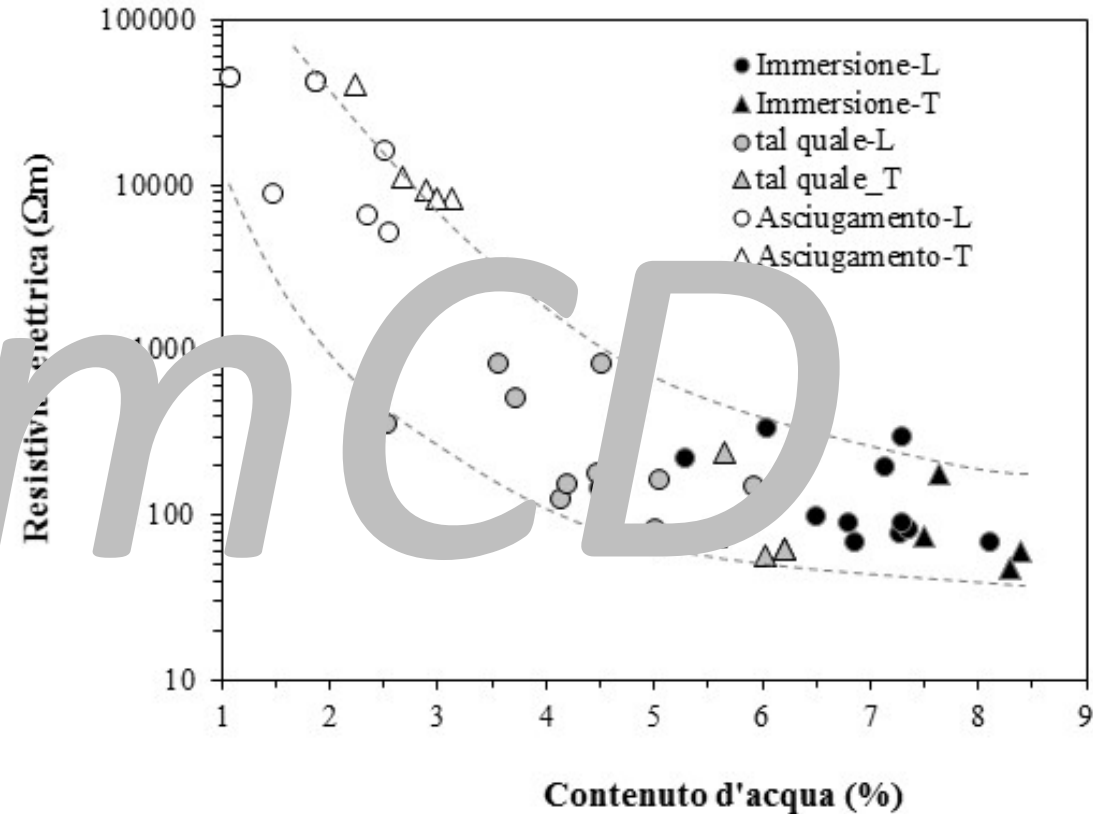


Provini (carote):

- densità (kg/m^3)
- assorbimento (A, %)
- coefficiente di assorbimento ($\text{S, g/m}^2\text{s}^{1/2}$)
- permeabilità ($K, \text{m/s}$)
- resistività elettrica ($\rho, \Omega\cdot\text{m}$)

Resistività elettrica dipende:

- grado di saturazione
- composizione soluzione dei pori
- dimensione, distribuzione, tortuosità dei pori



Ispezione e diagnosi Indagini sul calcestruzzo – Altre proprietà

Provini (carote):

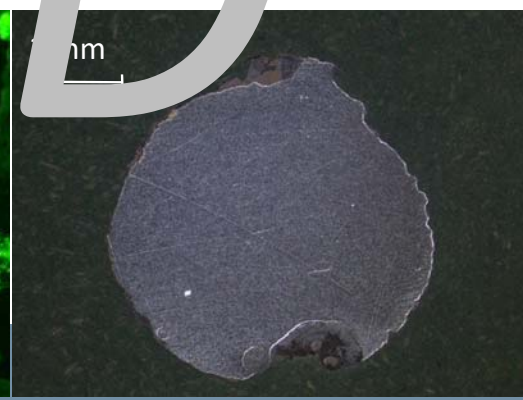
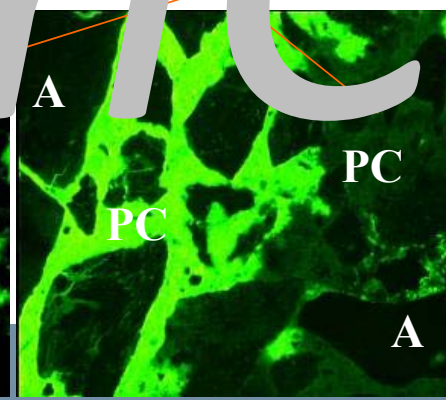
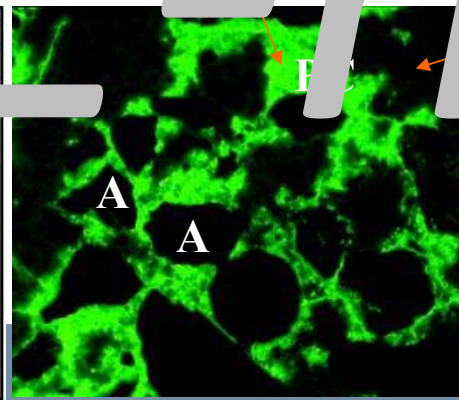
Proprietà fisiche →

- densità (kg/m^3)
- assorbimento (A , %)
- suzione capillare (S , $\text{g/m}^2\text{s}^{1/2}$)
- permeabilità (K , m/s)
- resistività elettrica (ρ , $\Omega\cdot\text{m}$)

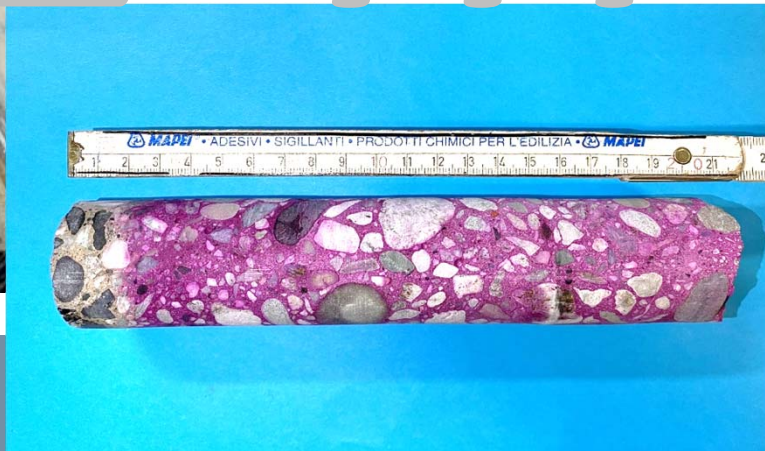
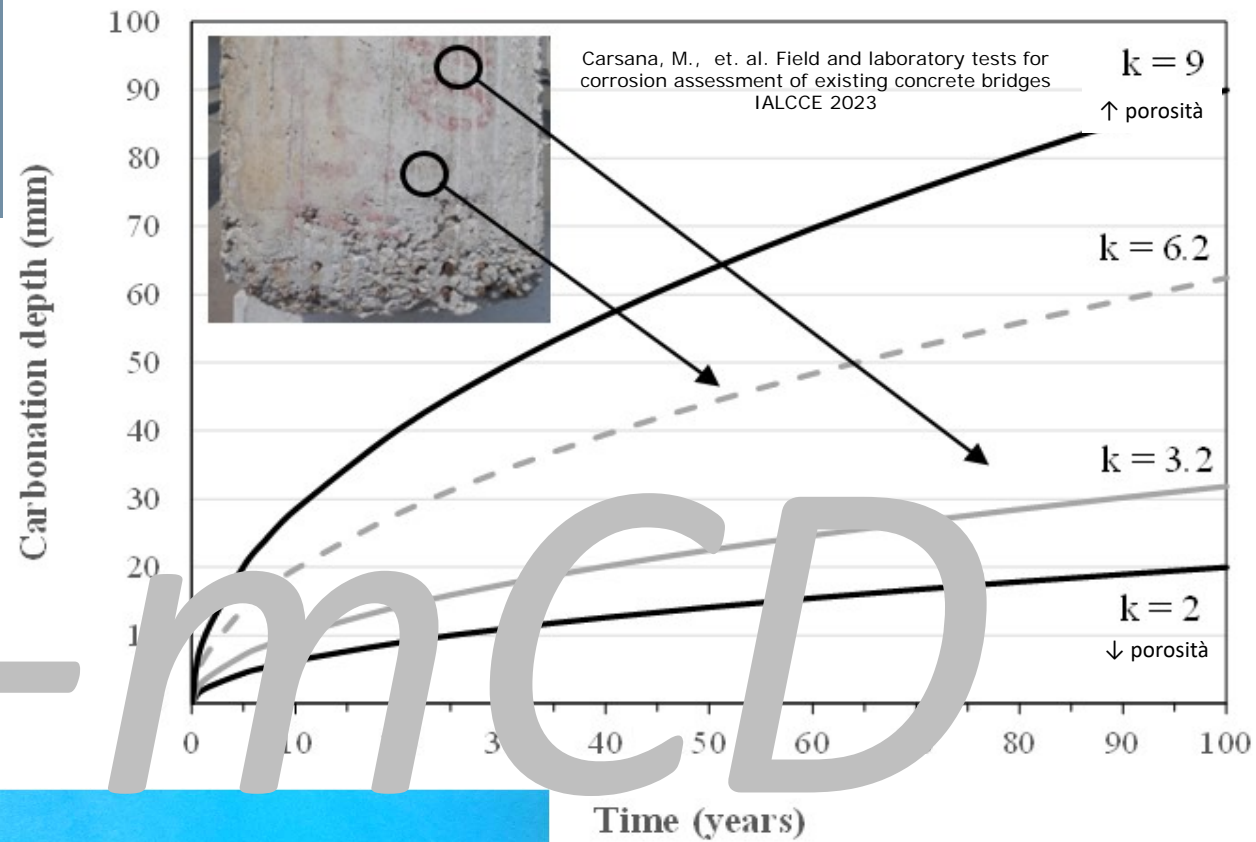
Analisi microstrutturali

Elevata porosità capillare

Bassa porosità capillare

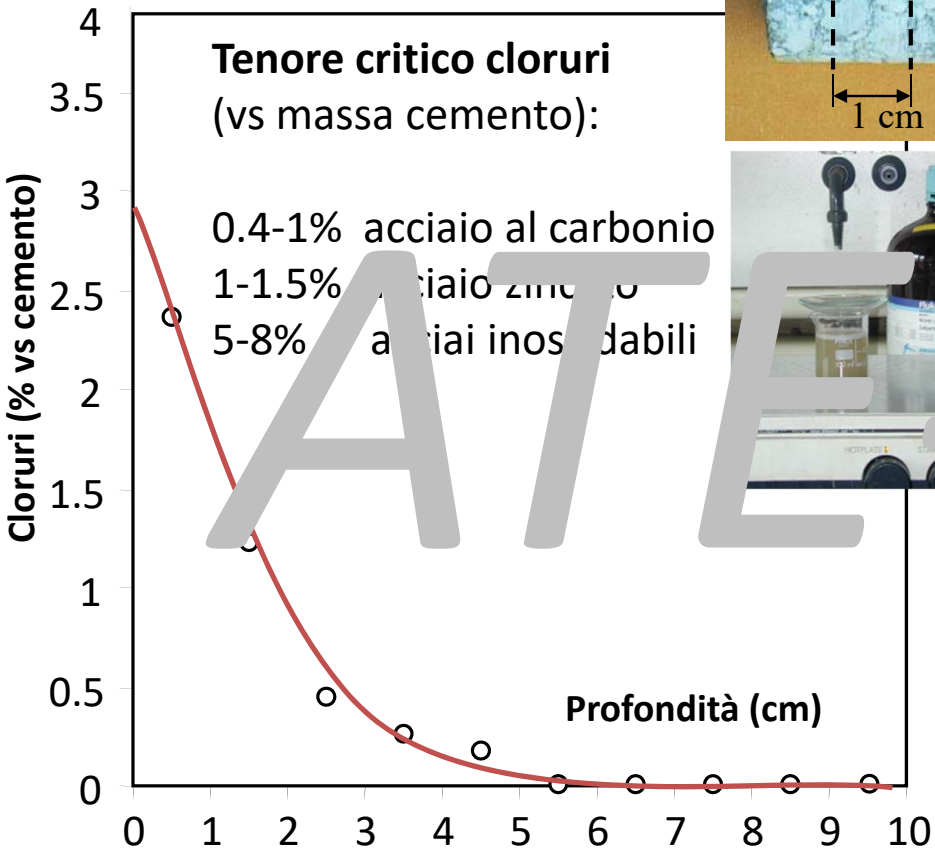
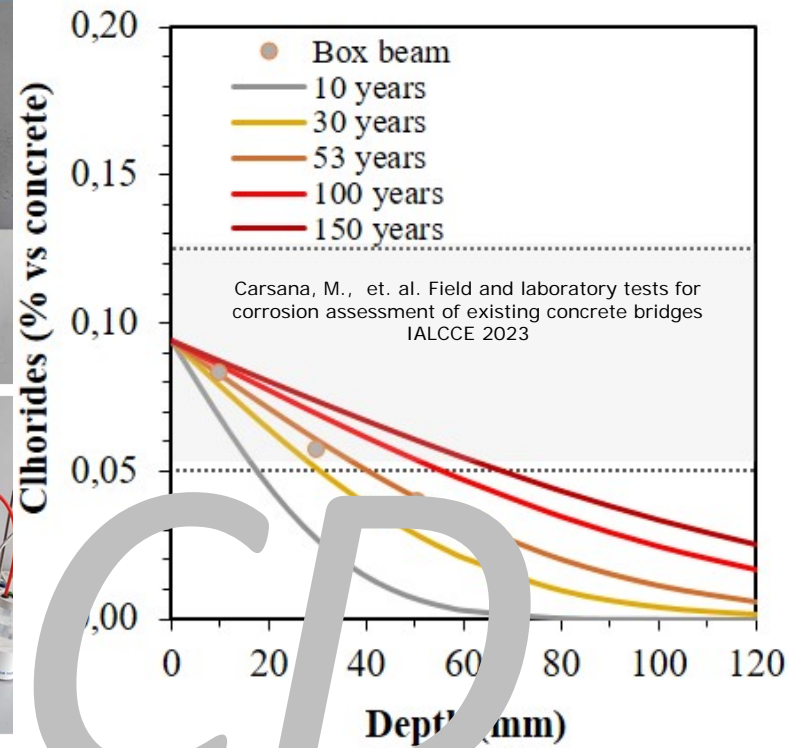
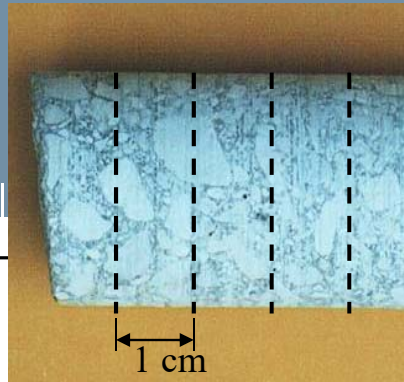


Ispezione e diagnosi Penetrazione della carbonatazione



$$s = k \cdot \sqrt{t}$$

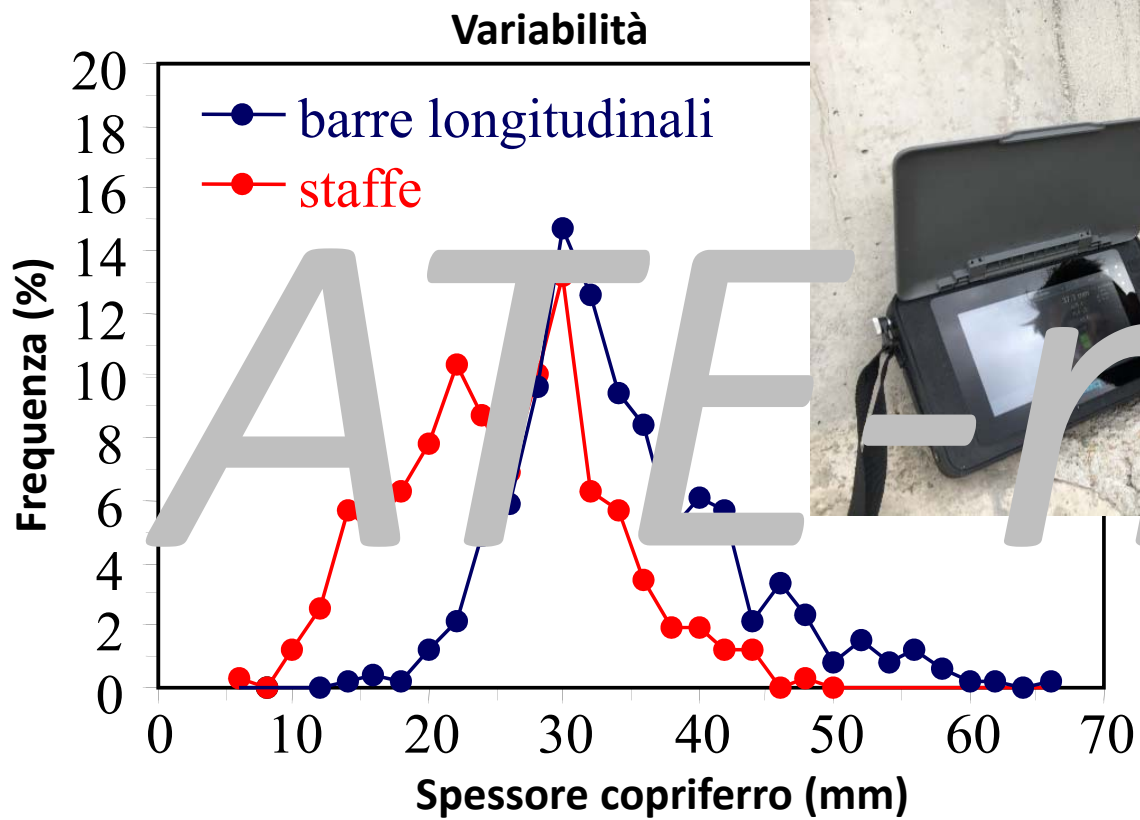
Ispezione e diagnosi Penetrazione dei cloruri



$$C_x = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \cdot \frac{x}{2\sqrt{D_{app} \cdot t}} \right)$$

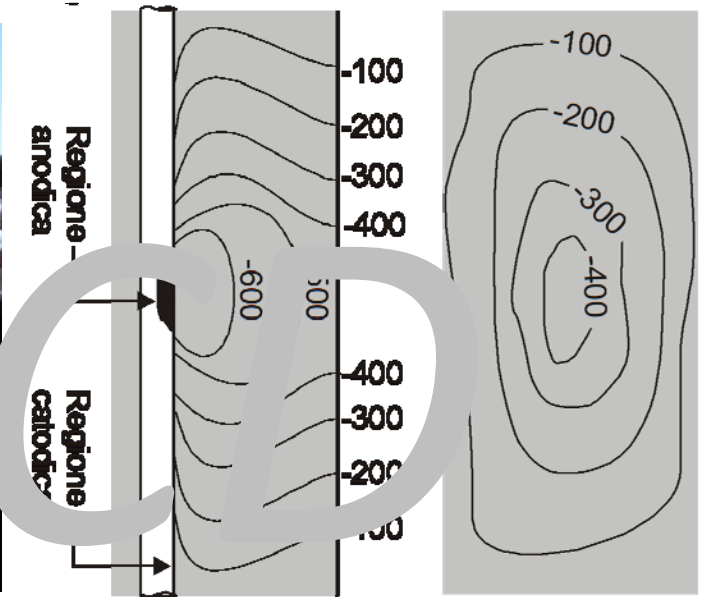
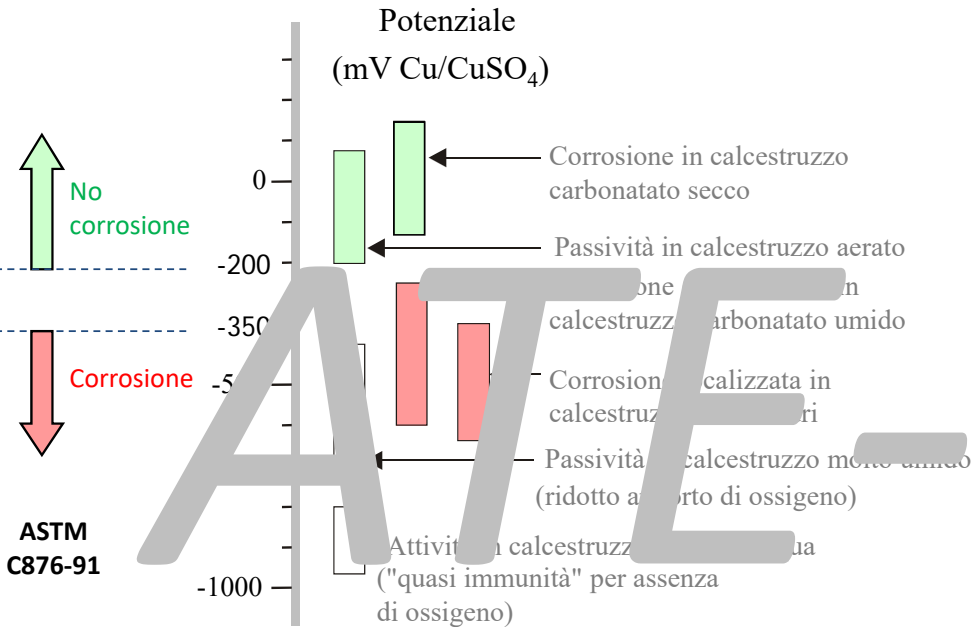
Ispezione e diagnosi

Spessore di copriferro

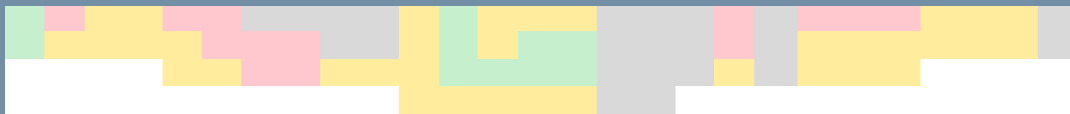


Ispezione e diagnosi

Misure elettrochimiche – Potenziale di corrosione



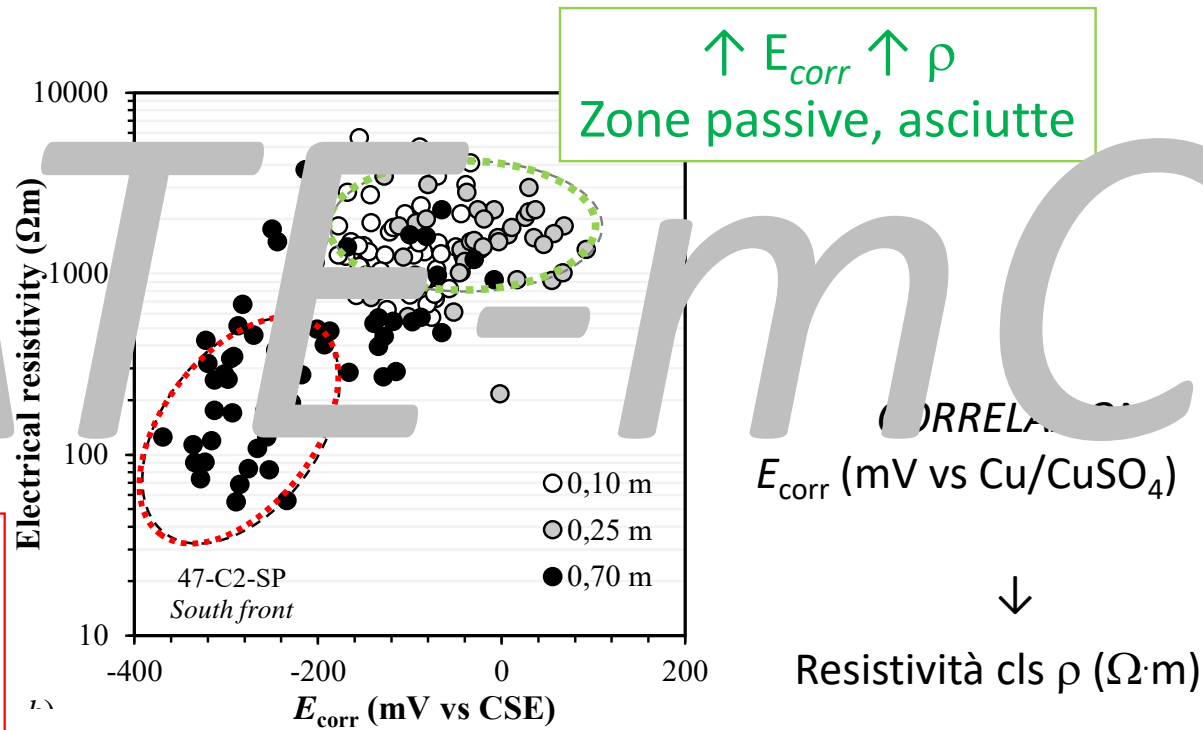
- $E_{\text{corr}} > -200 \text{ mV vs CSE}$
- $E_{\text{corr}} \geq -350 \text{ mV vs CSE}$
- $-200 \text{ mV vs CSE} \leq E_{\text{corr}} < -350 \text{ mV vs CSE}$
- Spalling zone



Ispezione e diagnosi

Misure elettrochimiche – Resistività elettrica

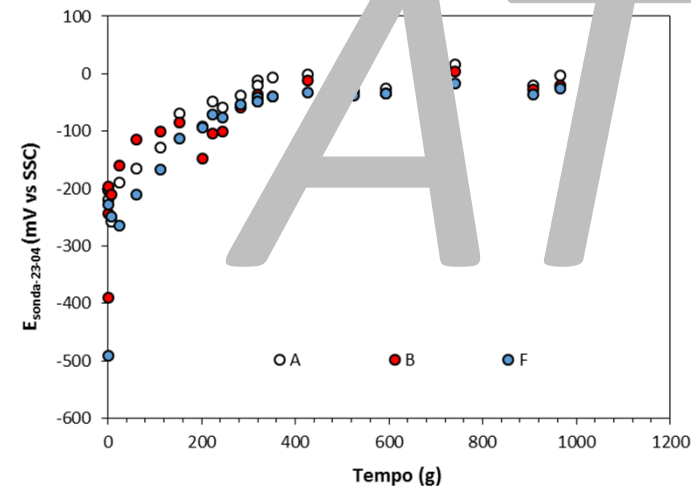
RESISTIVITA' ELETTRICA e VELOCITA' DI CORROSIONE in campo



Ispezione e diagnosi

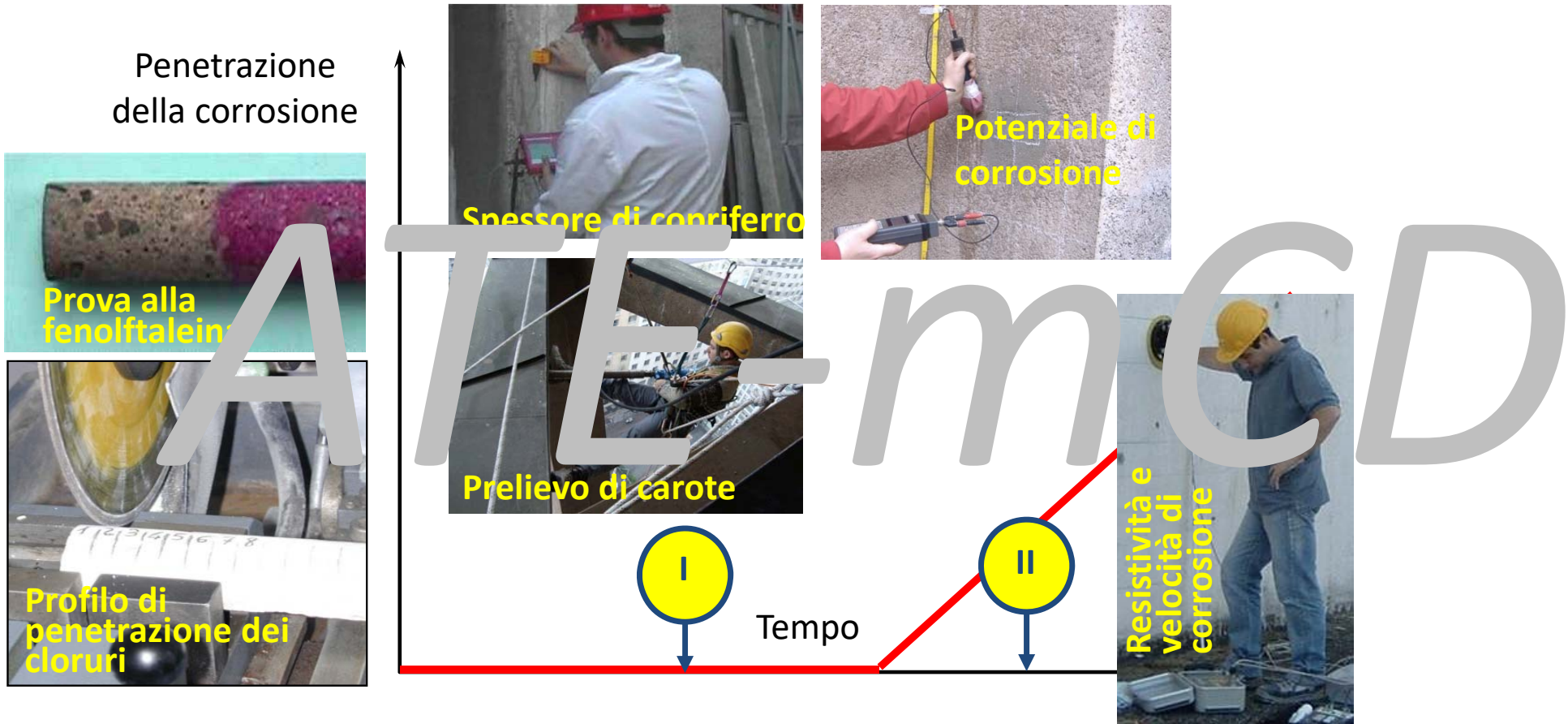
Monitoraggio

1. Sonde fisse (elettrodi di riferimento, resistività, ecc.)
2. Sistema di acquisizione dati
3. Analisi dei dati e criteri di interpretazione
4. Condizioni critiche, progetto di intervento



Redaelli, E.et. Al., Culvert prototype made with seawater concrete: Materials characterization, monitoring, and environmental impact. ADVANCES IN CIVIL ENGINEERING MATERIALS 2019

Ispezione e diagnosi



Ispezione e diagnosi Caso di studio



Viadotto Corso Grosseto - TORINO (1970)

RESIDUAL STRUCTURAL PERFORMANCE OF A 50-YEAR-OLD BRIDGE

BRIDGE | 50
Testing site



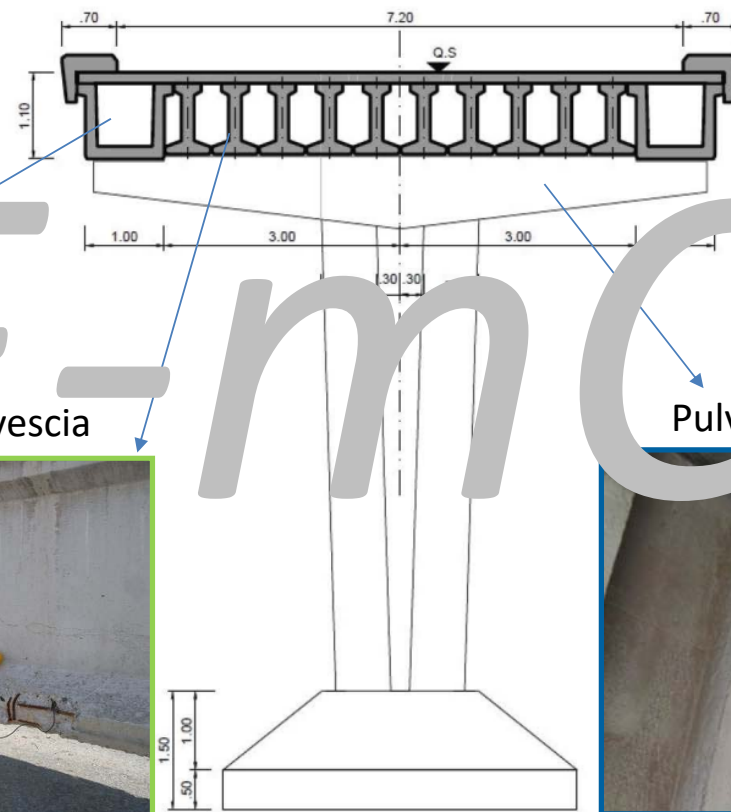
Ispezione e diagnosi

Caso di studio

Viadotto (travi, pilasti, solette) in calcestruzzo armato (c.a., c.a.p.)

Località urbana
Costruzione: 1970

Ispezione 2019 (49 anni):



Trave di bordo

Trave rovescia

Pulvino



Ispezione e diagnosi

Caso di studio

Viadotto (travi, pilasti, solette) in
calcestruzzo armato (c.a., c.a.p.)

Località urbana
Costruzione: 1970

Ispezione 2019 (49 anni):

- dati di progetto
- osservazione visiva
- analisi non distruttive (in campo)
- prelievo campioni (analisi laboratorio)

osservazione visiva



Ispezione e diagnosi

Caso di studio

Sclerometro

N° di battute (misure in MPa)										m	σ
54	44	54	45	44	49	53	48	53	42	48.6	4.7



Spessore di copriferro

Staffe (mm)	Arm. lungo (mm)
24	30



Prelievo di campioni

Profondità di carbonatazione		
(m)	min (mm)	Max (mm)
0.5	12	15



Misure elettrolitiche

E (mV vs CSE)	ρ ($\Omega \cdot m$)	V_{corr} ($\mu m/anno$)
+80	1100	0,7

DATI PROGETTO:

$$R_{ck} = 50 \text{ MPa}$$



Profondità (mm)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
Cl^- (% massa cemento)	0.41	0.28	0.15	0.072	0.025

Ispezione e diagnosi

Caso di studio

Zona	Descrizione	Punto	R_{scl} (MPa)	s (mm)	Copriferro		E_{corr} (mV vs Cu/CuSO ₄)	ρ ($\Omega \cdot m$)	v_{corr} ($\mu m/anno$)
					staffe (mm)	long. (mm)			
A	Travi rovesce dell'impalcato	A1	48,6	20	24	32	+80	1100	0,4
		A2	45	10	25	31	-100	500	0,7
B	Travi di bordo	B1	42,6	22	24	32	-450	42	9,5
		B2	48	25	31	39	-50	550	0,9
C	Pulvino	C1	44	23	25	40	-490	20	25

R_{scl} sclerometro Spessore carbonatazione Misure elettrochimiche

→ stato di conservazione degli elementi in c.a. in relazione agli effetti della corrosione sulle armature nei diversi punti delle zone di ispezione.

Ispezione e diagnosi

Caso di studio

Copriferro

Zona	Descrizione	Punto	R_{scl} (MPa)	s (mm)	staffe (mm)	long. (mm)	E_{corr} (mV vs Cu/CuSO ₄)	ρ ($\Omega \cdot m$)	v_{corr} ($\mu m/anno$)
A	Travi rovesce dell'impalcato	A1	48,6	20	24	32	+80	1100	0,4
		A2	45	10	25	31	-100	500	0,7
B	Travi di bordo	B1	42,6	31	24	32	-450	42	9,5
		B2	48	25	31	39	-50	550	0,9
C	Pulvino	C1	44	23	25	40	-490	20	25

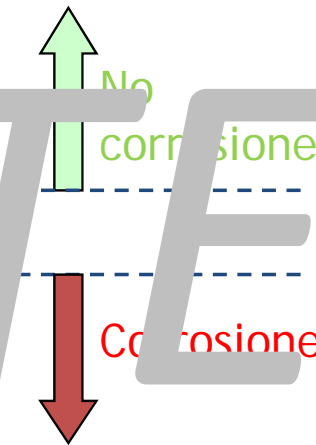
cloruri < 0,2% in massa di cemento

~~Corrosione da Cloruri~~

Ispezione e diagnosi Caso di studio

Zona	Descrizione	Punto
A	Travi rovesce dell'impalcato	A1 A2
B	Travi di bordo	B1 B2
C	Pulvisce	C1

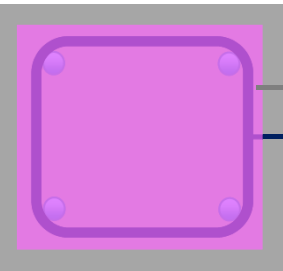
ASTM
C876-91



Potenziale
(mV Cu/CuSO₄)



E_{corr} (mV vs Cu/CuSO ₄)	ρ ($\Omega \cdot m$)	v_{corr} ($\mu m/anno$)
-100	1100	0,7
-450	500	3,9
-500	550	3,9
-490	20	25



$S_{carbonat.} < C_{staffe}$
 $S_{carbonatazione}$
 C_{staffe}

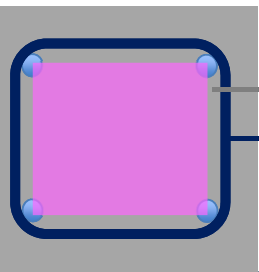
~~Corrosione da Cloruri~~ ~~Corrosione da carbonatazione~~

Ispezione e diagnosi

Caso di studio

Copriferro

Zona	Descrizione	Punto	R_{scl} (MPa)	s (mm)	staffe (mm)	long. (mm)	E_{corr} (mV vs Cu/CuSO ₄)	ρ ($\Omega \cdot m$)	v_{corr} ($\mu m/anno$)
A	Travi rovesce dell'impalcato	A1	48,6	20	24	32	+80	1100	0,4
		A2	45	10	25	31	-100	500	0,7
B	Travi di bordo	B1	42.6	31	24	32	-50	42	0,9
		B2	48	25	31	39		550	
C	Pulvino	C1	44	23	25	40	-490	20	25



$S_{carbonatazione}$

C_{staffe}

$S_{carbonatazione} > C_{staffe}$

~~Corrosione da Cloruri~~

Corrosione da carbonatazione

cloruri < 0,2% in massa di cemento

Ispezione e diagnosi

Caso di studio

Copriferro

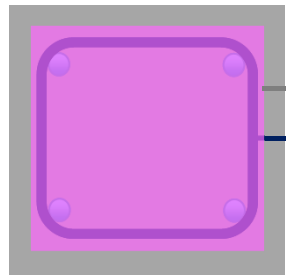
Zona	Descrizione	Punto	R_{scl} (MPa)	s (mm)	staffe (mm)	long. (mm)	E_{corr} (mV vs Cu/CuSO ₄)	ρ ($\Omega \cdot m$)	v_{corr} ($\mu m/anno$)
A	Travi rovesce dell'impalcato	A1	48,6	20	24	32	+80	1100	0,4
		A2	45	10	25	31	-100	500	0,7
B	Travi di bordo	B1	46	31	24	32	450	550	0,9
		B2	38	20	21	39	350	550	0,9
C	Pulvisce	C1	44	20	25	40	20	25	

Armatura attiva in C1

$I_{corr} = 7,1 \mu A/cm^2$
 $E_{corr} = -490 mV vs Cu/CuSO_4$
 Resistività = 520 $\Omega \cdot m$

Corrosione da Cloruri

~~Corrosione da
carbonatazione~~

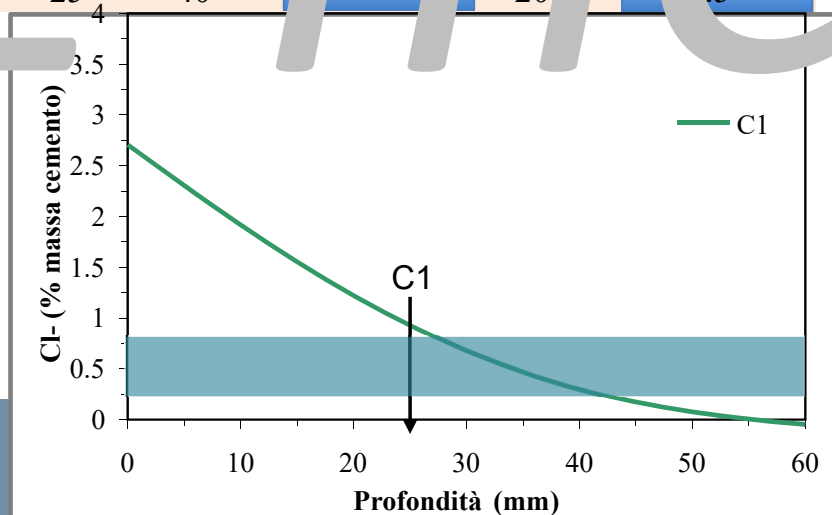


C staffe > Spes. Carb.

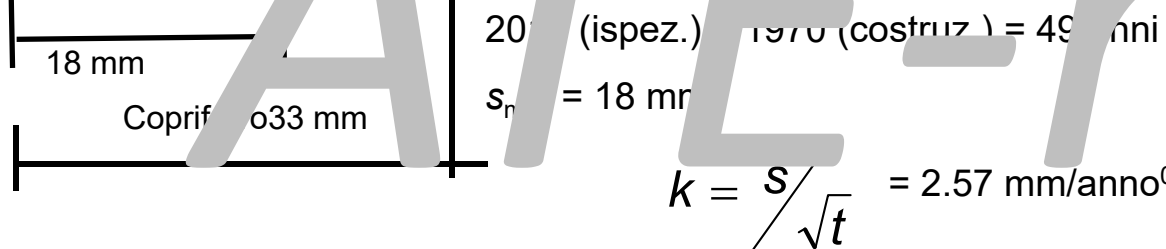
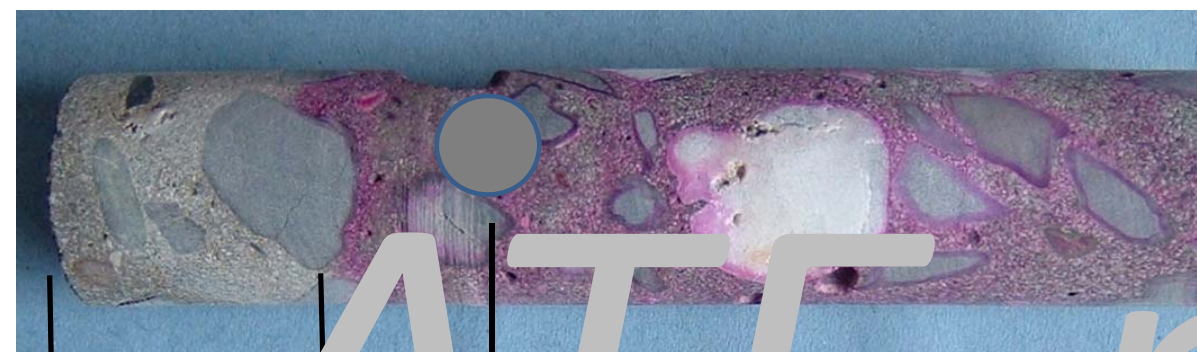
$S_{carbonatazione}$

C_{staffe}

C staffe > Spes. Carb.



Ispezione e diagnosi Caso di studio



Previsione tempo innesco:

→ $s = k \cdot \sqrt{t} = c = 33 \text{ mm}$

$t = 164 \text{ anni} \rightarrow \text{anno } 2183$

Corsi di formazione ATE-mCD:
La durabilità del calcestruzzo

Grazie dell'attenzione

I CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI



ASSOCIAZIONE
TECNOLOGI
PER L'EDILIZIA

