



POLITECNICO
MILANO 1863

Corsi di Formazione ATE-mCD – La durabilità del calcestruzzo - 12 giugno 2025
Prelievo di campioni. Analisi in-situ e in laboratorio
Prof.ssa Maddalena Carsana



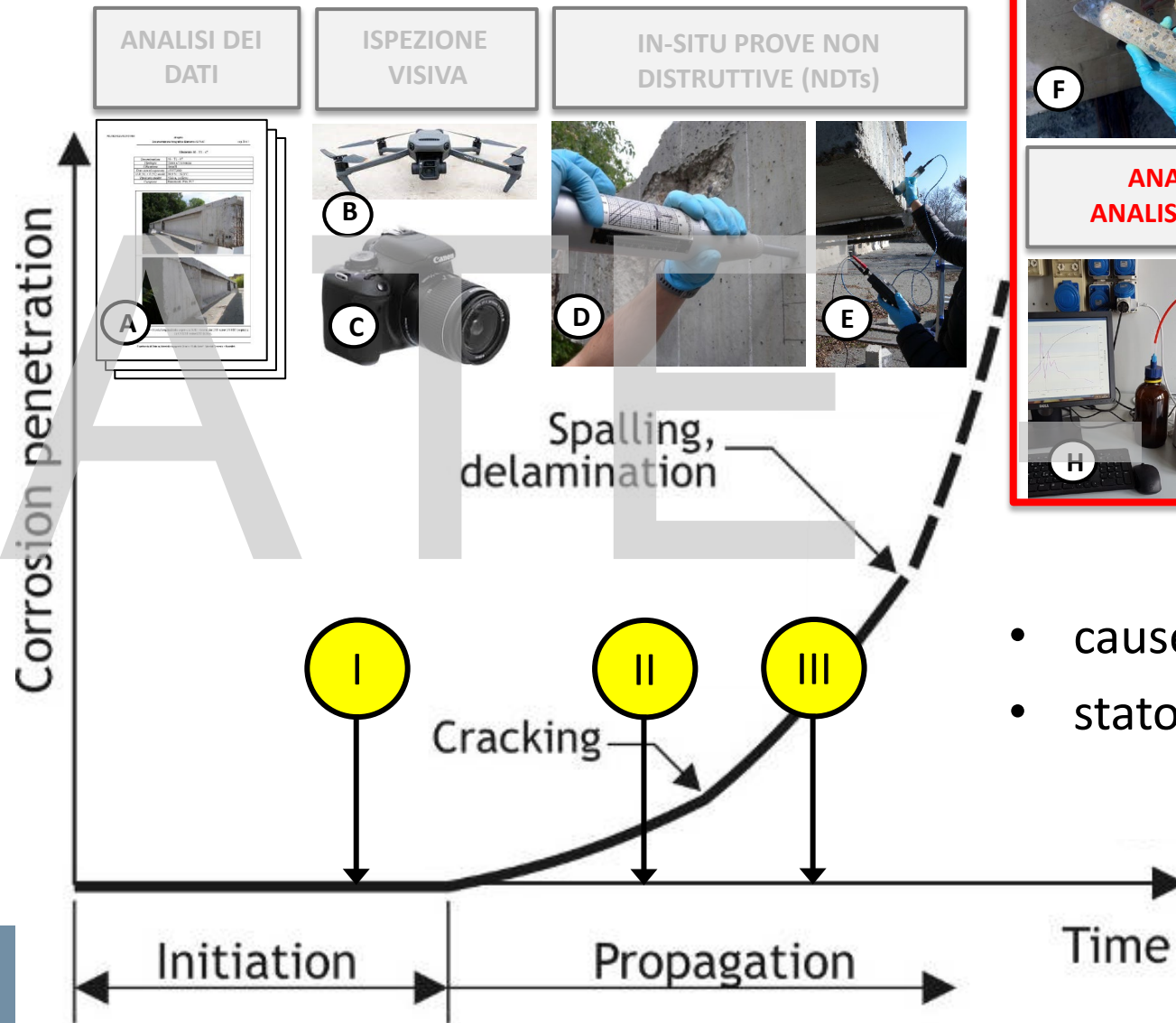
CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI



ASSOCIAZIONE
TECNOLOGI
PER L'EDILIZIA



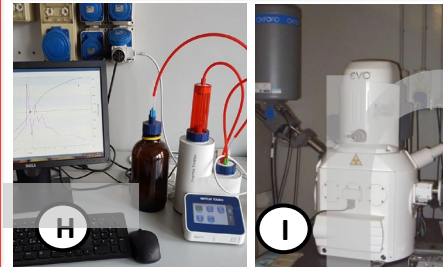
Prelievo di campioni e analisi



CAMPIONAMENTO



ANALISI IN-SITU, ANALISI LABORATORIO



- ottimizzare numerosità campioni/analisi
- scelta zone/elementi strutturali in base all'osservazione e misure non distruttive

- cause di degrado
- stato di conservazione struttura

Classificazione in funzione:

- proprietà studiate (meccaniche, fisiche, chimiche..)
- principio su cui si basano (interazione chimico-fisica, con radiazione elettromagnetiche etc....)

Per la caratterizzazione dei materiali (**in-situ, in laboratorio**):

- **prove meccaniche;**
- **prove chimiche e/o chimico-fisiche;**
- **prove fisiche;**
- **prove microstrutturali.**

CALCESTRUZZO e ACCIAIO

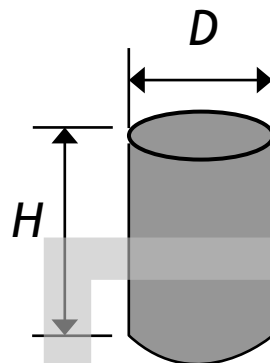
Tipologia di campioni

- condizioni ambientali (U.R; T ...)
- agenti aggressivi (CO_2 , Cl^- , SO_4^{--} ...)
- proprietà del calcestruzzo (a/c; stagionatura, compattazione,...)
- proprietà dell'acciaio (microstruttura, composizione, ...)





calcestruzzo



- H/D rapporto
- $R_{\text{cubo}} \approx 1.25 R_{\text{cilindro}}$

- diametro carota:

$D > 100 \text{ mm}$ ("ideale")

$D > 3D_{\text{max,aggregato}}$

$$\begin{cases} R_{\text{carota}} = F_{\text{max}} / A \\ R_{\text{cubo}} = \frac{2.5}{1.5 + 1/\lambda} \cdot R_{\text{carota}} \quad (\lambda = H/D) \end{cases}$$

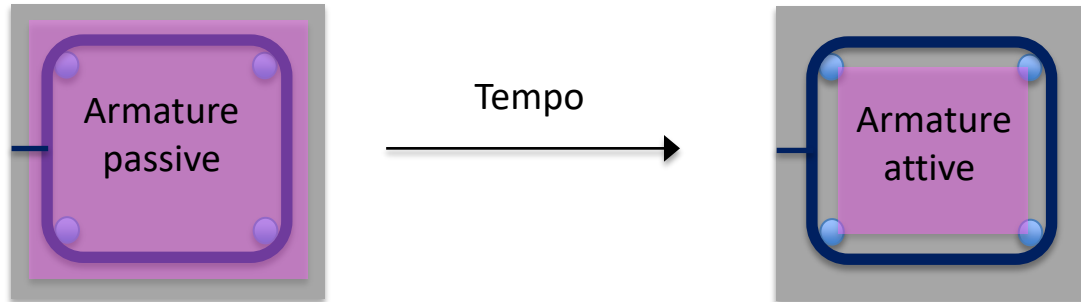
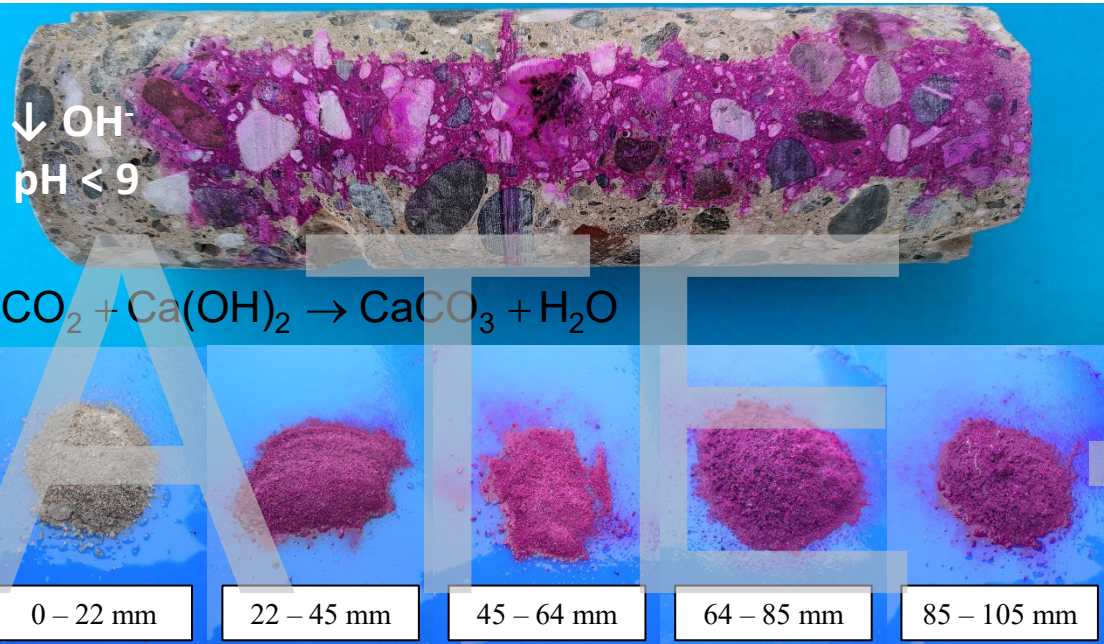
- danneggiamento della carota
- spianatura delle superfici
- umidità del calcestruzzo ($R_{\text{umido}} < R_{\text{asciutto}}$)
- presenza di armature (?)
- variabilità intrinseca del materiale



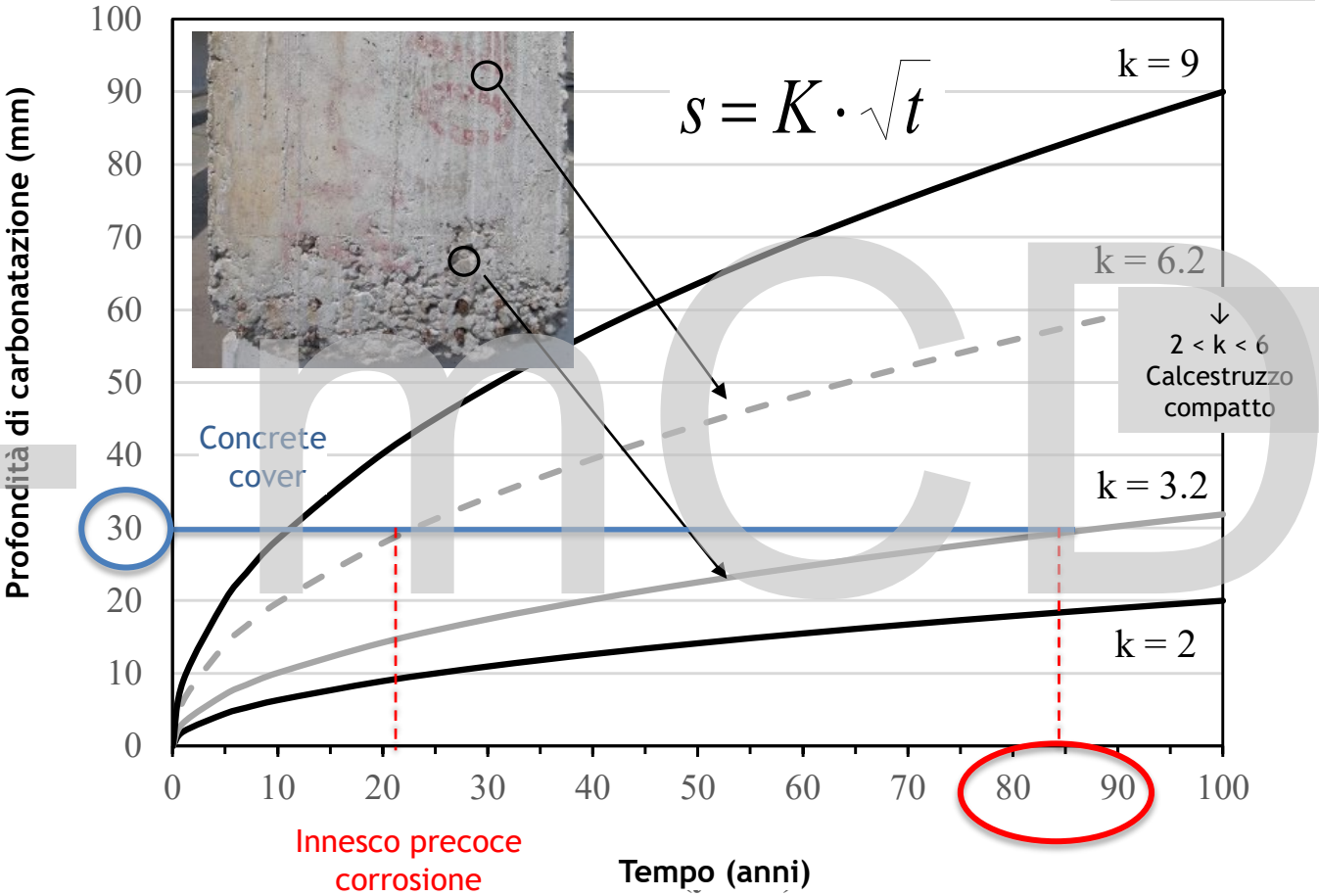
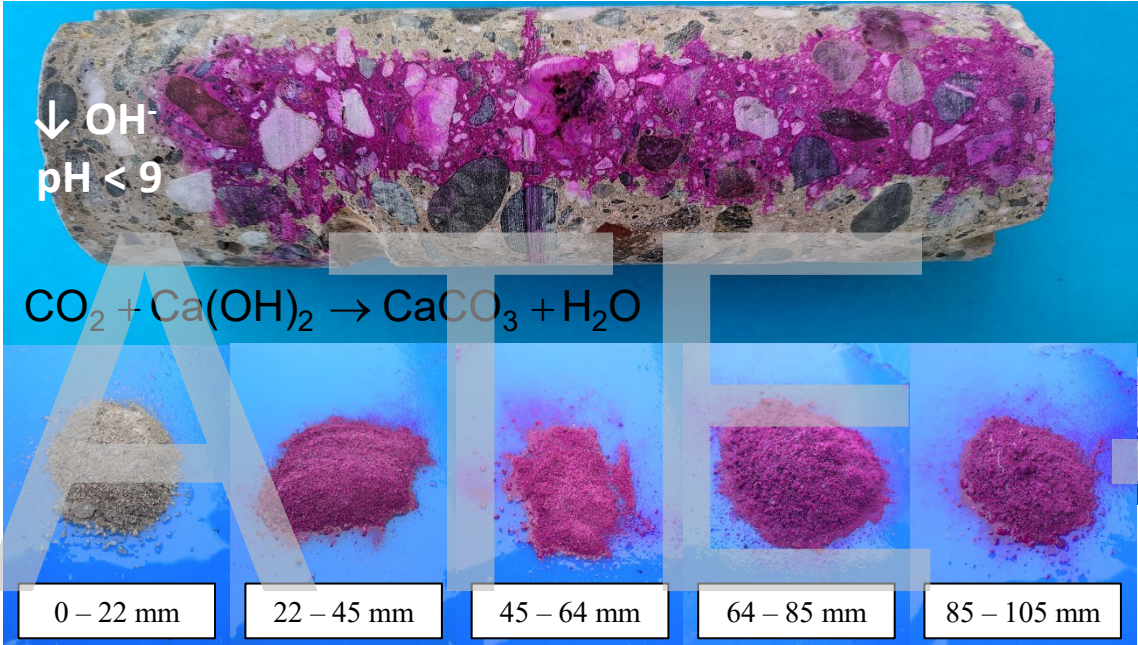
acciaio

Analisi sul calcestruzzo - Profondità di carbonatazione

IN-SITU



$k > 9$
Calcestruzzo
poroso
↑



Analisi sul calcestruzzo - Contenuto di cloruri

Analisi chimica tradizionale (via umida)



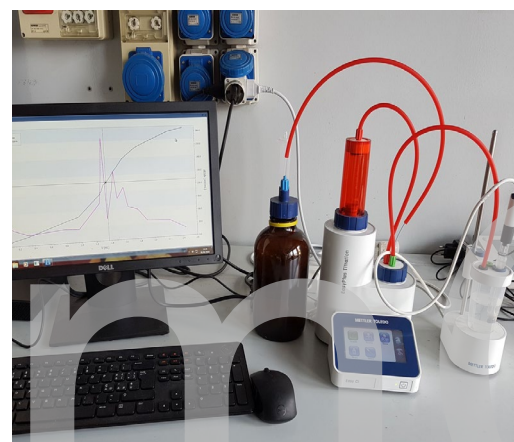
frammento calcestruzzo



macinazione



soluzione



titolazione

LABORATORIO

IN-SITU



Corrosione
da
cloruri

Acqua di mare



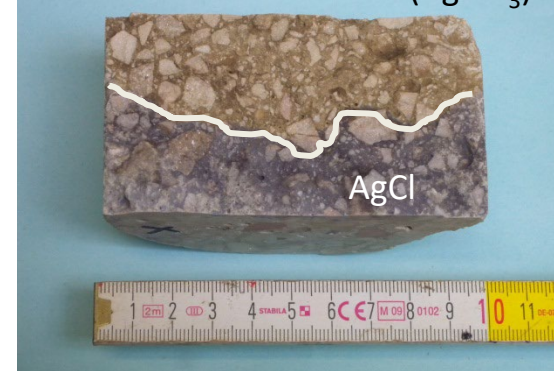
Sali
antigelo

H_2O

Cl^-



Indicatore colorimetrico ($AgNO_3$)

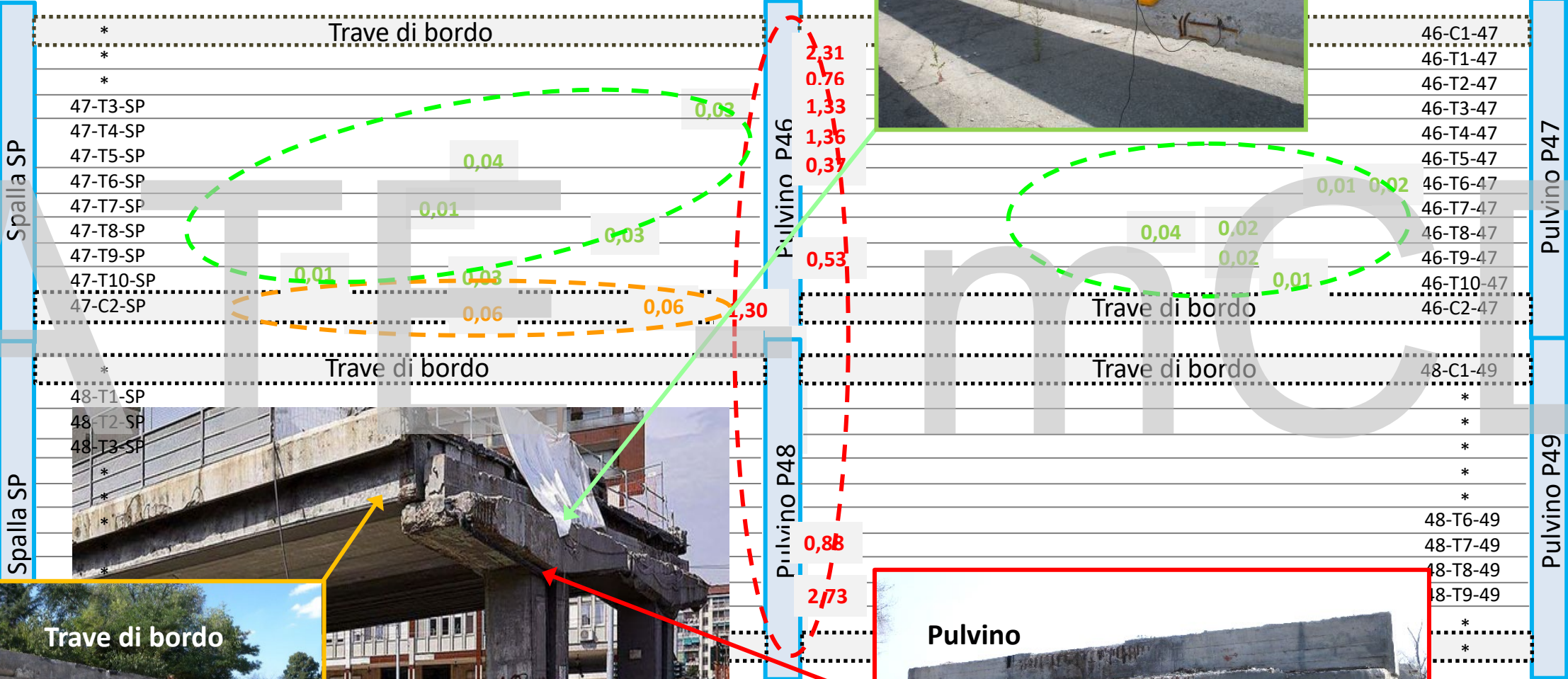


$AgCl$

POLITECNICO MILANO 1863

Analisi sul calcestruzzo - Contenuto di cloruri

LABORATORIO

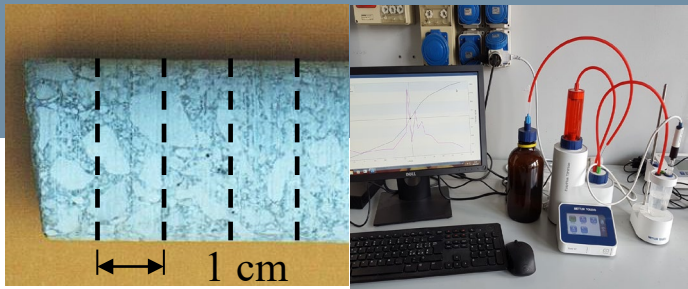


Carsana, M., Biondini, F., Redaelli, 2025. S&IE Diagnostic procedure for corrosion assessment of existing concrete bridges: Experimental case study.

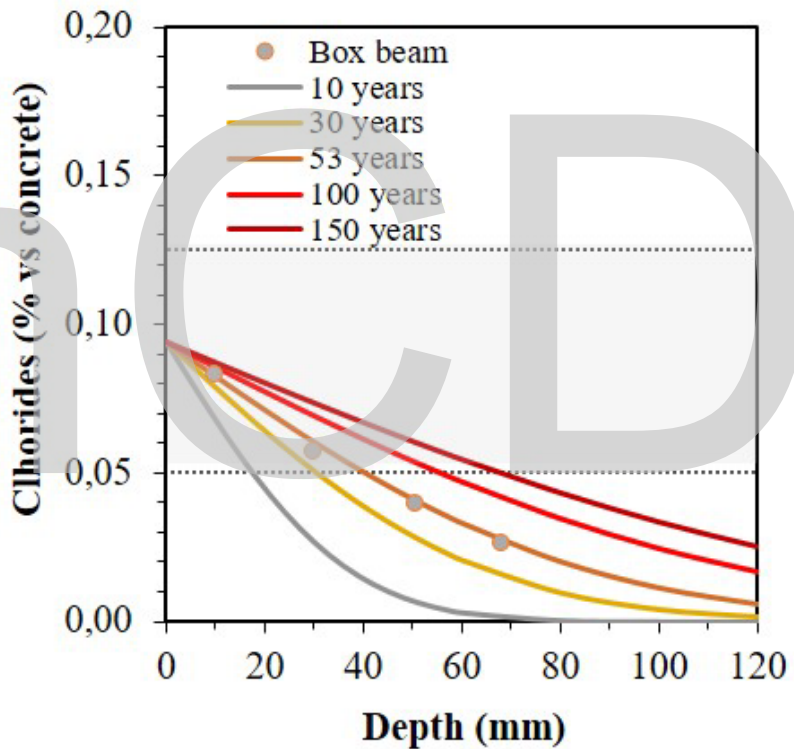
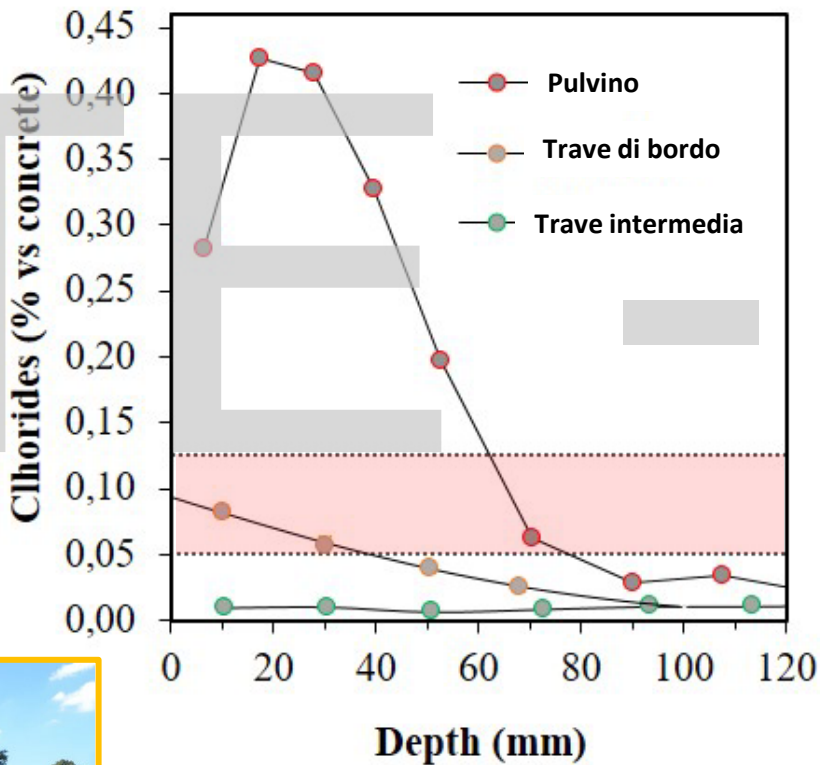
MILANO 1863

Analisi sul calcestruzzo - Profili dei cloruri

LABORATORIO



0.4-1% acciaio al carbonio
1-1.5% acciaio zincato
5-8% acciaio inossidabile
Contenuto critico di cloruri
(% in massa di cemento)



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

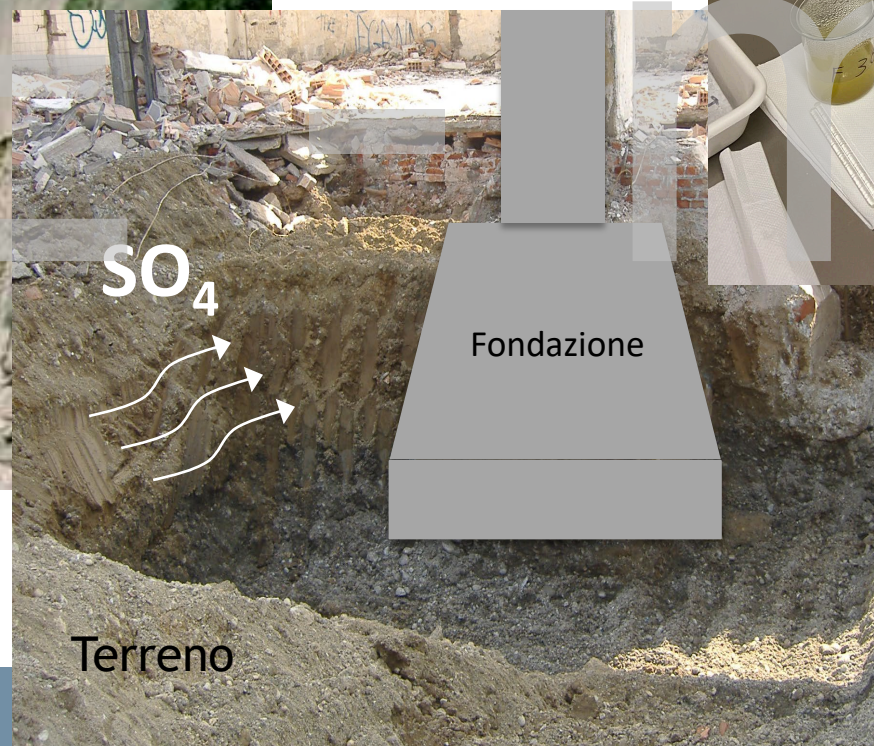
MILANO 1863

Analisi chimiche tradizionali (solfati, cloruri, etc.)



M. Collepari, R. Troli. S. Collepari, 2022.
Il Nuovo Calcestruzzo. Enco

ATTACCO SOLFATICO



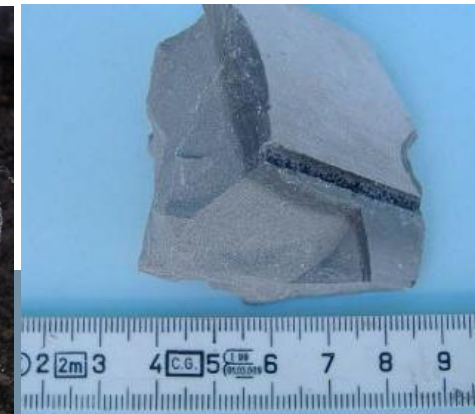
- macinazione calcestruzzo
- soluzione con acido HCl
- filtrazione
- aggiunta cloruro di bario
- filtrazione
- calcinazione



SEGREGAZIONE BOIACCA e CORROSIONE Cavi precompressi (post-tesi)



Carsana, M., Bertolini, L., 2016.
Characterization of segregated
grout promoting corrosion of post-
tensioning tendons. ASCE.

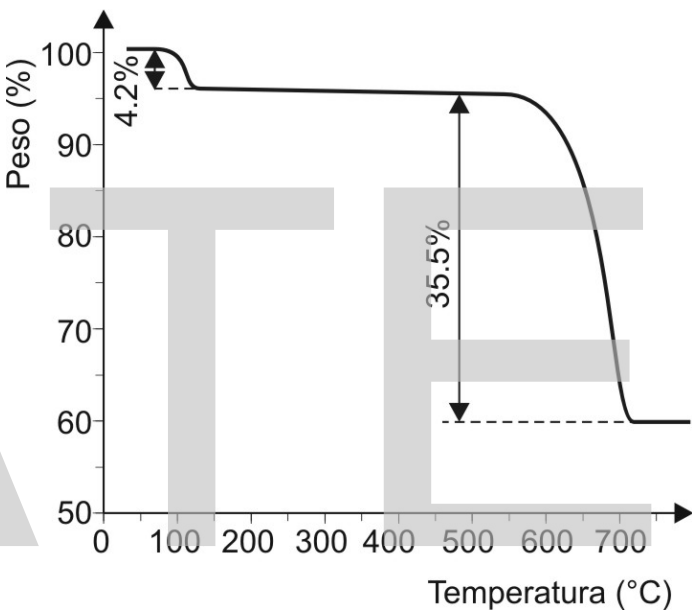


Boiacca	Non segregata (NS)	Segregata (S)
Al_2O_3	1.61 - 2.47	1.18 - 2.02
CaO	39.6 - 47.2	32.4 - 47.0
K_2O	0.29 - 0.99	0.66 - 4.00
Na_2O	0.27 - 0.63	0.47 - 2.40
MgO	1.28 - 1.95	0.88 - 1.48
Fe_2O_3	1.13 - 2.27	1.02 - 1.93
SO_3	1.75 - 4.15	3.58 - 7.88
Residue	42.5 - 50.3	46.2 - 51.2

Analisi chimica strumentale Spettrometria di emissione al plasma (ICP-OES)

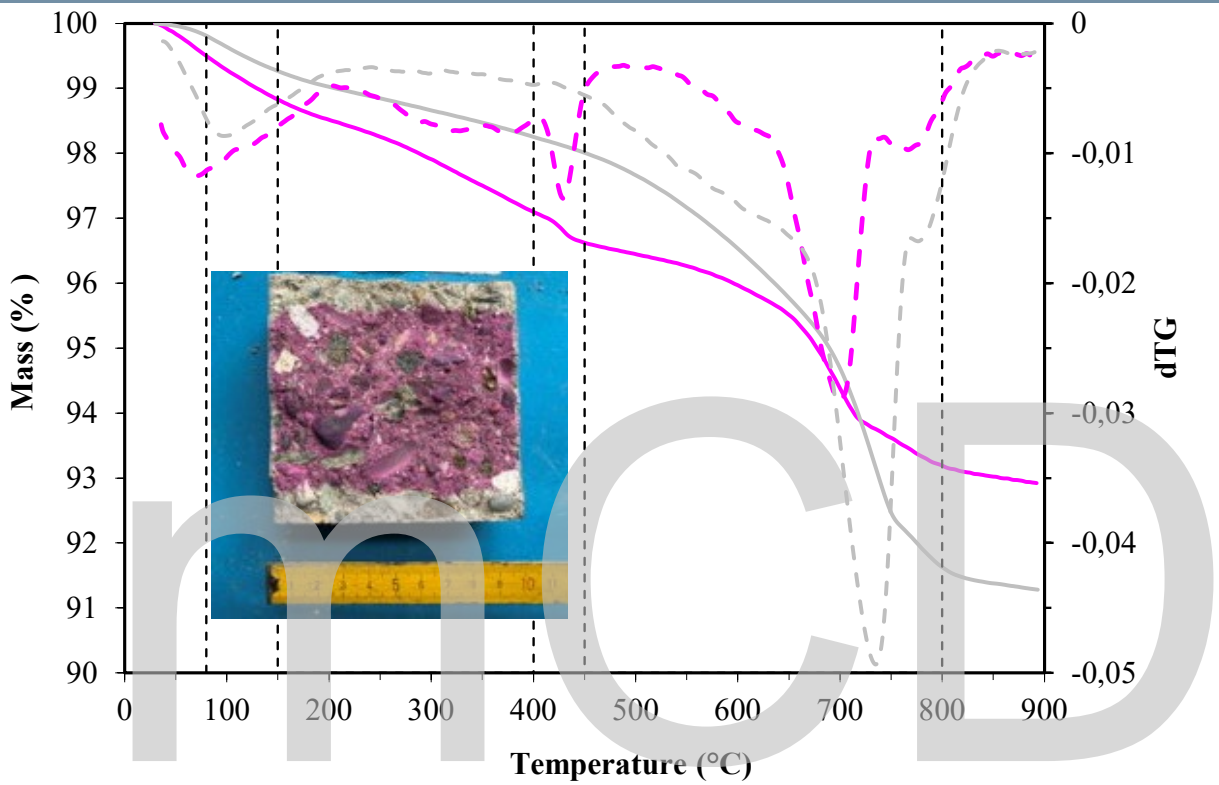
- Trasferimento energia al campione
- Eccitazione elettroni degli atomi
- Emissione di energia
(sottoforma di radiazioni elettromagnetiche)

Analisi termiche (TGA-dTG)

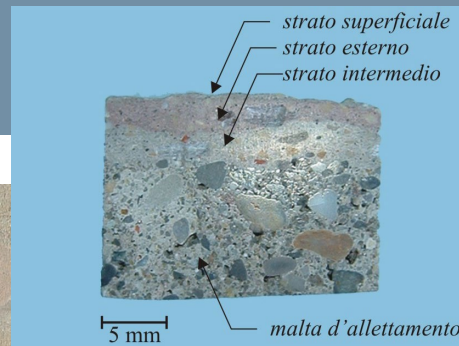


Analisi termogravimetrica su una miscela con 20% di gesso e 80% di carbonato di calcio

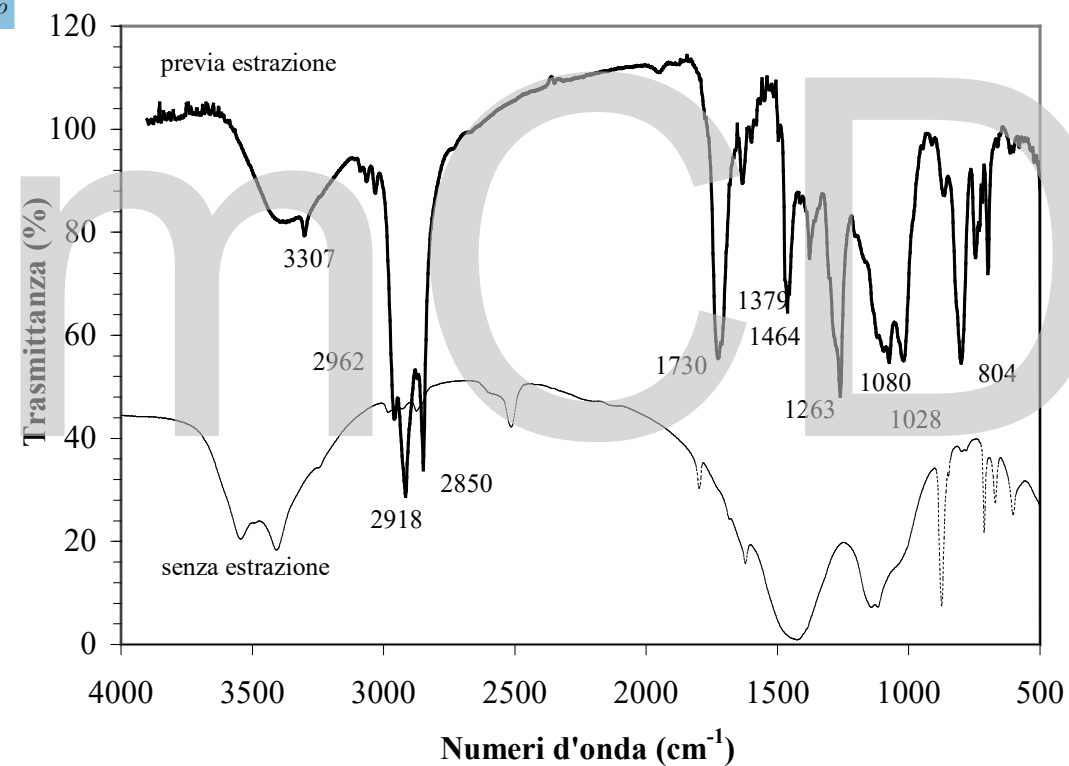
Composti	Intervallo di temperatura (°C)	Trasformazione TGA	Picco DTA
Gesso	75-150	perdita acqua	Endotermico
Carbonato di calcio	550-750	perdita CO ₂	Endotermico
Carbonato di magnesio	400-600	perdita CO ₂	Endotermico
Idrossido di calcio	450-520	perdita acqua	Endotermico
Idrossido di magnesio	400-420	perdita acqua	Endotermico
Ossalato di calcio	180-900	varie	Eso-Endotermici
Sostanze organiche	300-500	evaporazione/combustione	Endo-Esotermico
Acqua libera	60-120	evaporazione	Endotermico
Acqua legata ai silicati	150-500	perdita acqua	Endotermico
Quarzo	530-570	-	Endotermico



- Ciclo termico controllato
- Variazioni di peso in funzione della T
- Emissione di energia (sottoforma di radiazioni elettromagnetiche)

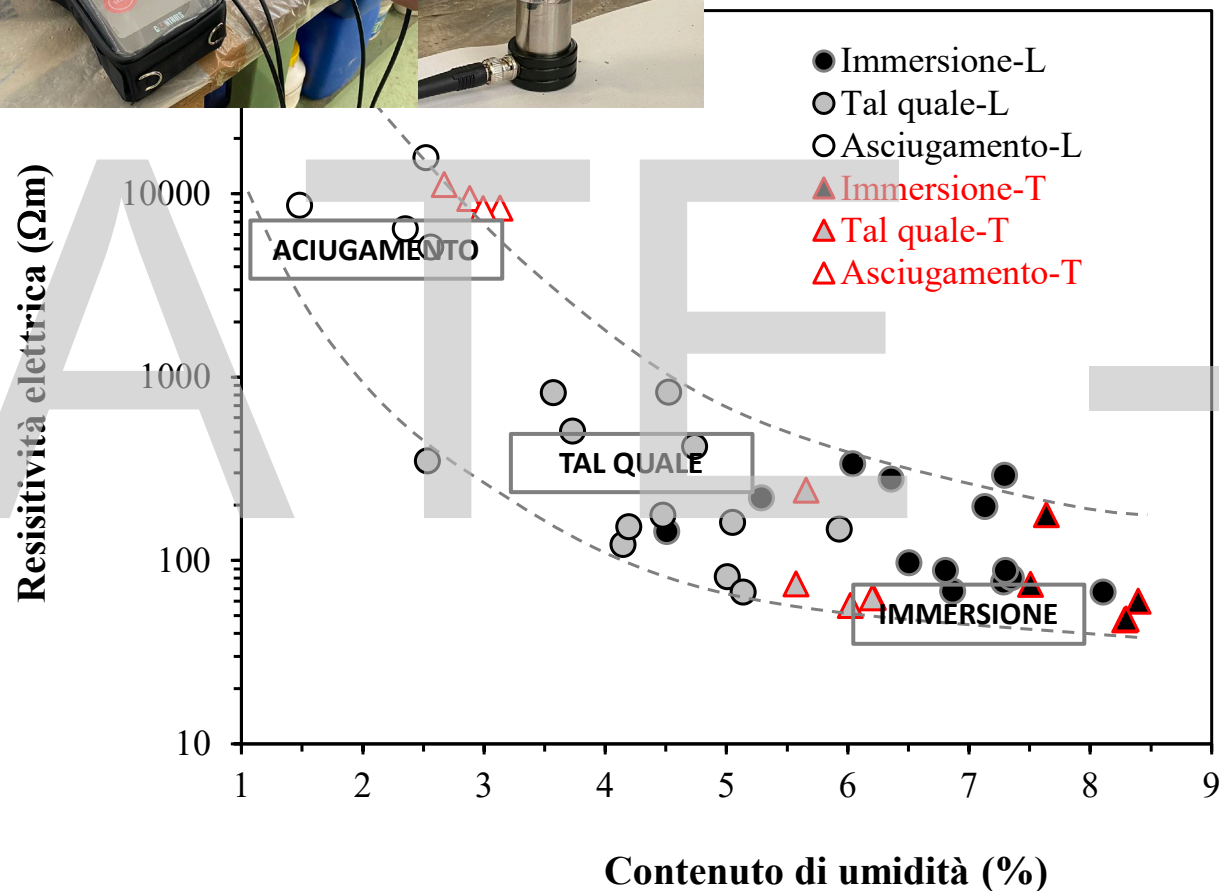


Analisi infrarossi (IR)



M. Carsana, F. Lollini., L. Bertolini, A study on the cement-based decorative materials in the San Fedele Church in Milan. Case Studies in Construction Materials, 2017

Analisi sul calcestruzzo – Proprietà fisiche



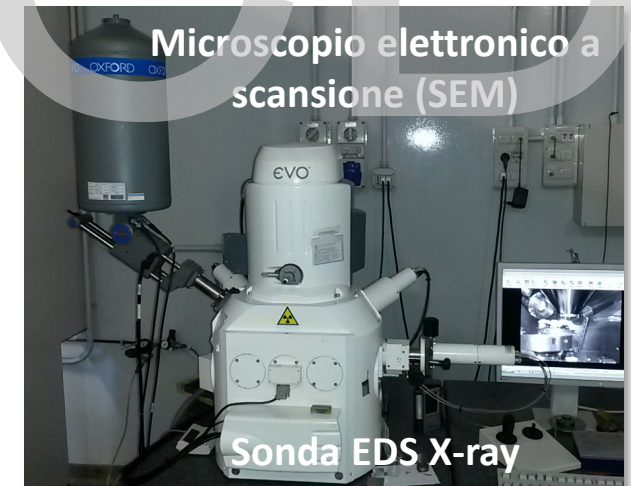
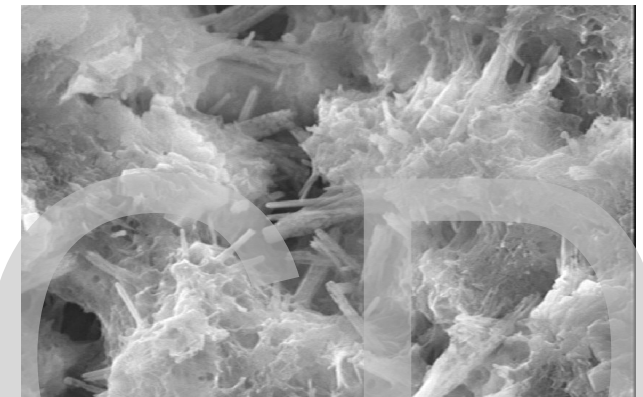
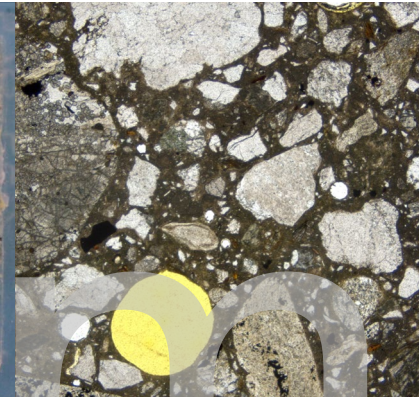
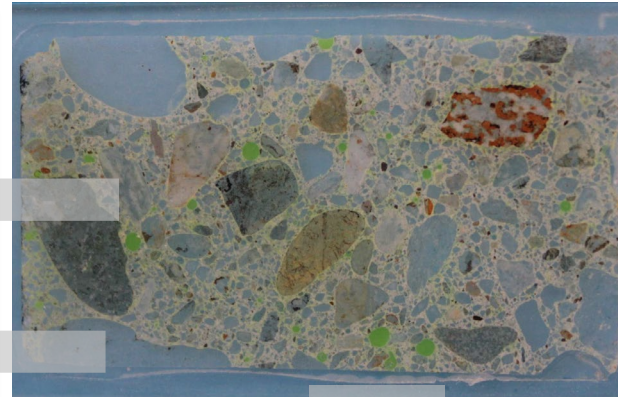
Provini (carote):

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

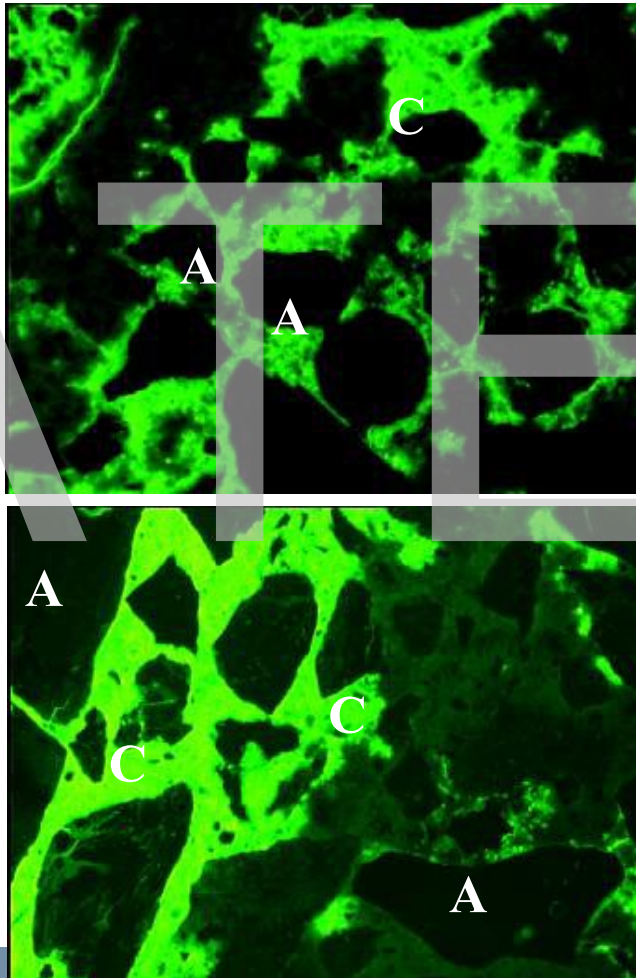


MACRO

MICRO

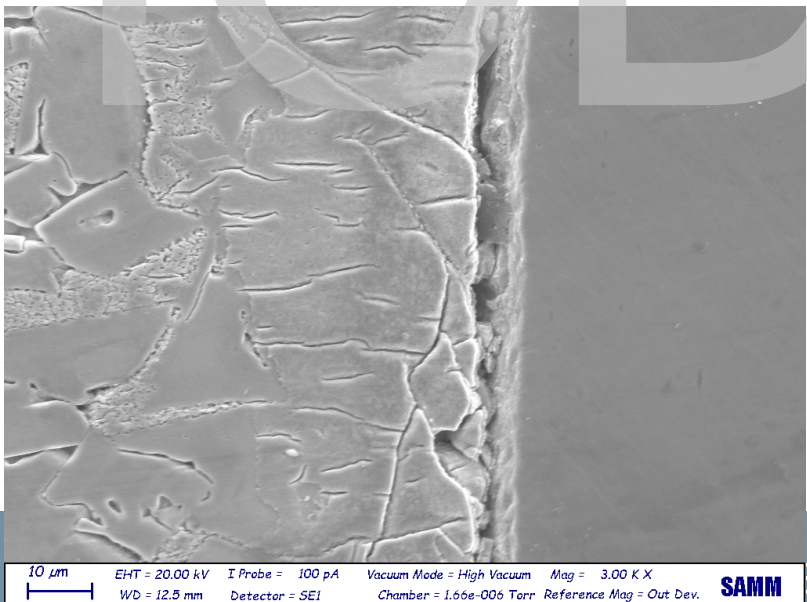
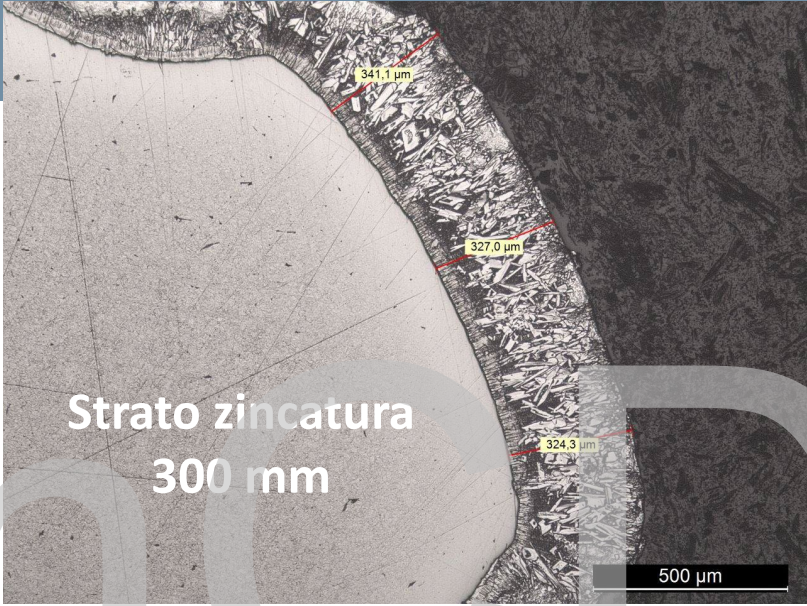
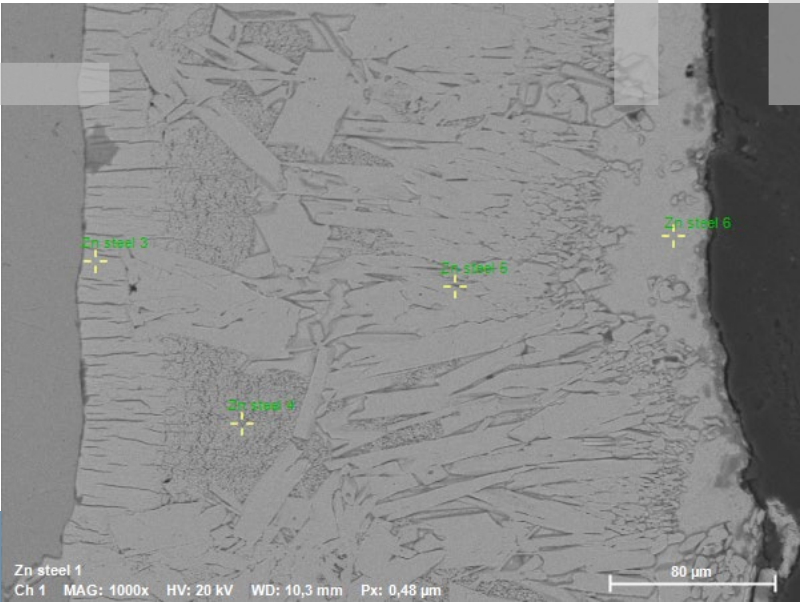
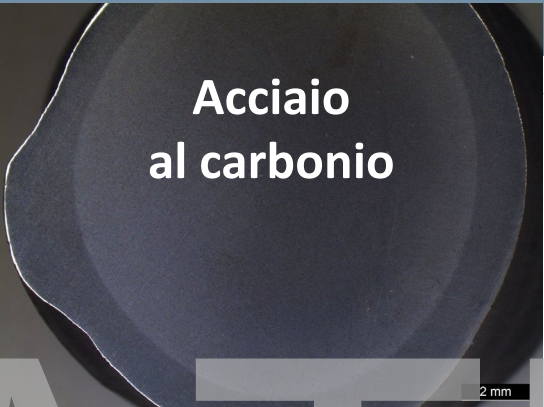


Pasta cementizia - Porosità capillare

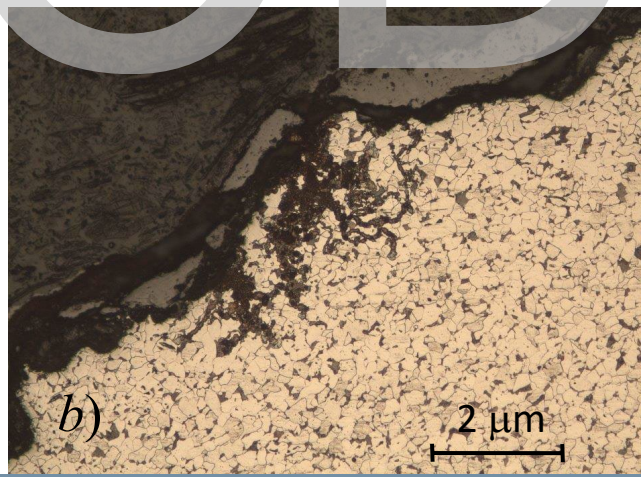
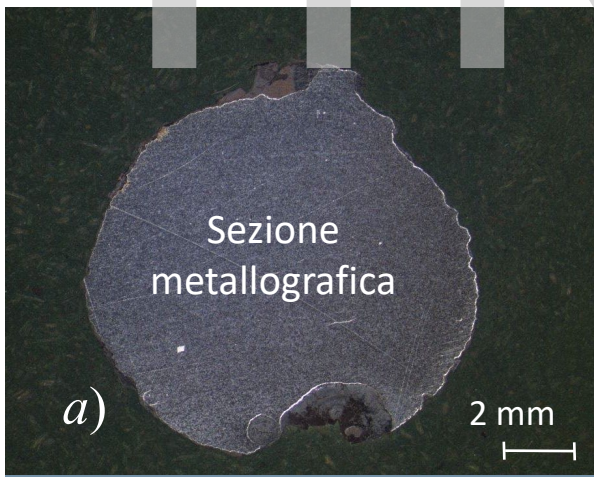
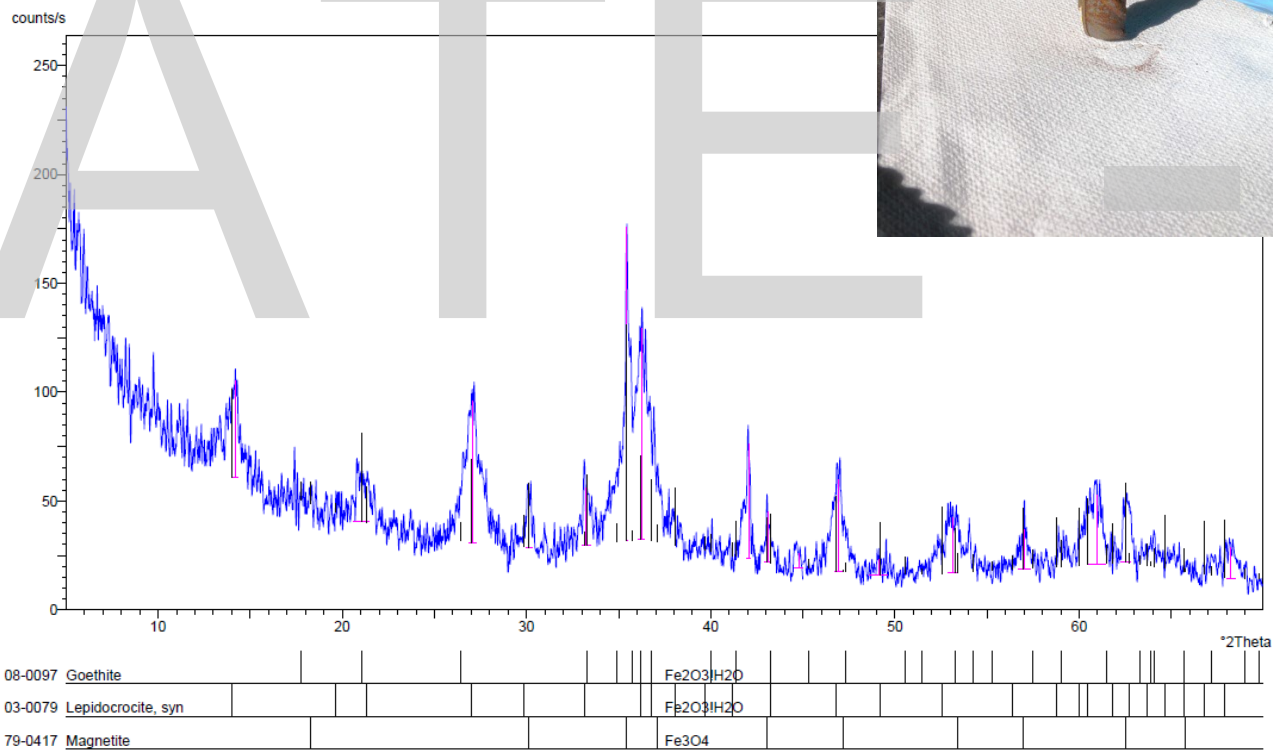


Reazione alcali - aggregato





Analisi di diffrazione di raggi X (XRD)



Grazie dell'attenzione



CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI INGEGNERI



ASSOCIAZIONE
TECNOLOGI
PER L'EDILIZIA

