



FEDERAZIONE ORDINI  
INGEGNERI CALABRIA



Organizzato dall'Ordine degli Ingegneri di Catanzaro.  
In collaborazione con gli Ordini degli Ingegneri di:  
Cosenza – Crotone – Reggio Calabria – Vibo Valentia

# ***Strutture in calcestruzzo armato: influenza del danno localizzato sulla vulnerabilità statica e sismica***

**PIATTAFORMA CNI - 22 Giugno, 2020 – ore 15:00**

***Degrado delle strutture in c.a. e c.a.p.  
Prima parte***

**Matteo Felitti**

**ENGINEERING & CONCRETE CONSULTING**

Università degli Studi di Napoli Federico II

Cell. 348,8525102

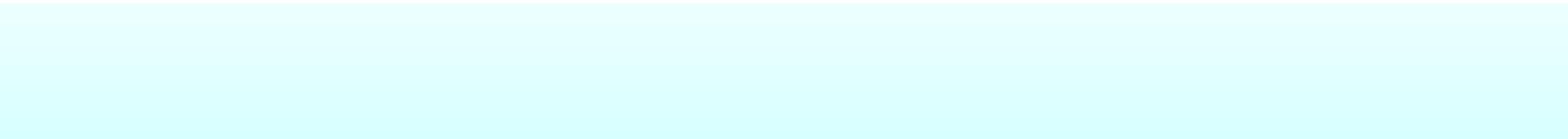
Email: [ingegneria.cls@gmail.com](mailto:ingegneria.cls@gmail.com)

## **INDICE PRIMA PARTE:**

- 0. Premessa**
- 1. Inquadramento storico (cenni)**
- 2. Il concetto di durabilità**
- 3. Introduzione al degrado**
- 4. Meccanismi di trasferimento e trasporto degli agenti aggressivi**
- 5. Aspetti elettrochimici**
- 6. Corrosione per carbonatazione**
- 7. Corrosione per azione dei cloruri**
- 8. Corrosione sotto sforzo**
- 9. Dettagli sulle velocità di corrosione e sugli aspetti meccanici**
- 10. Dal danno localizzato al collasso strutturale**
- 11. Fessurazioni di tipo tecnologico (seconda specie)
- 12. Azioni combinate (cenni)
- 13. Riferimenti bibliografici**

0

# **PREMESSA**



https://www.corriere.it/dataroom-milena-gabanelli/ponti-viadotti-pericolosi-anas-3500-ponti-fuori-controllo-763-senza-proprieta/b79e6a4c-3ac7-11ea-9d89-0cf44350b722-va.shtml?refresh\_ce-cp

EDIZIONI LOCALI ▾ CORRIERE TV ARCHIVIO TROVOCASA TROVOLAVORO SERVIZI ▾ CERCA 🔎 LOGIN ABBOGATO

 **CORRIERE DELLA SERA**  
**DATAROOM**  
di Milena Gabanelli

# Ponti a rischio: ancora 3.500 quelli senza controlli e manutenzione in Italia

di Milena Gabanelli e Andrea Pasqualetto

27 mag 2020

5

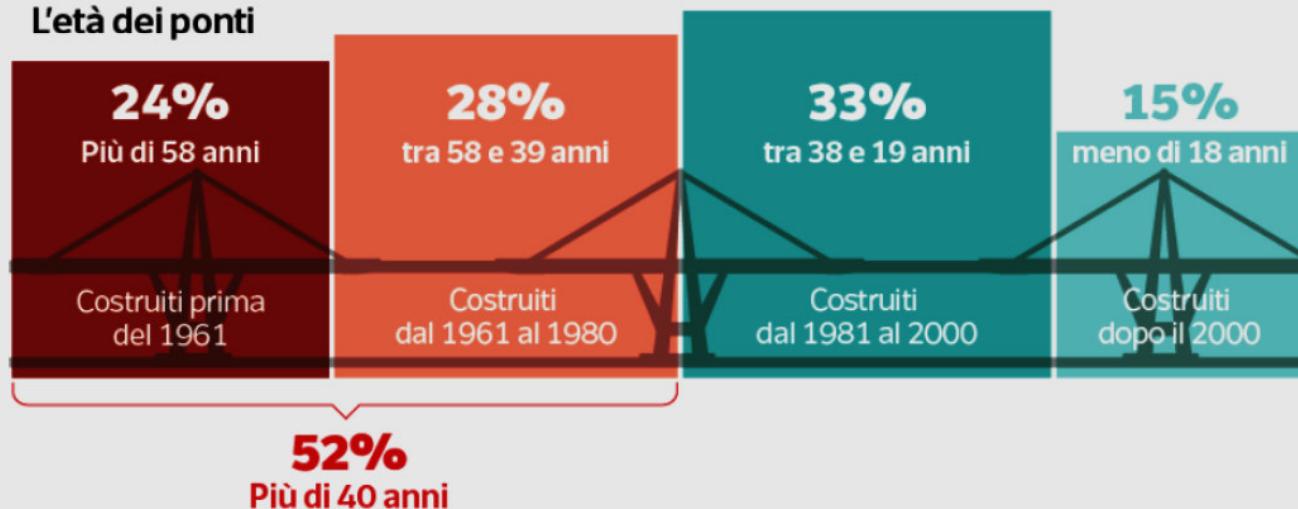


[https://www.corriere.it/dataroom-milena-gabanelli/viadotti-1425-sono-senza-proprietario-nessuno-fa-la-manutenzione-ponti-crolli-ecco-mappa/ae3102d2-263f-11e9-9b5e-1a58eb1d569a-va.shtml?refresh\\_ce-cp](https://www.corriere.it/dataroom-milena-gabanelli/viadotti-1425-sono-senza-proprietario-nessuno-fa-la-manutenzione-ponti-crolli-ecco-mappa/ae3102d2-263f-11e9-9b5e-1a58eb1d569a-va.shtml?refresh_ce-cp)

## Un ponte su quattro ha più di mezzo secolo

Secondo Anas, oltre il 50% delle strutture ha compiuto i 40 anni di età e quasi una su quattro ha superato i 50. Non è possibile risalire con certezza al gestore di un ponte perché nella maggior parte dei casi ha registrato passaggi di proprietà o di gestione. Se i titolari sono privati, come nel caso di Consorzi o singole società, possono subentrare contenziosi, fallimenti, decessi. Cambiano gli uomini, i riferimenti, e tutto si confonde. Nel caso di enti pubblici, le responsabilità si rimpallano davanti al Tar, e in assenza di interventi tutti confidano nella buona sorte.

L'età dei ponti



27 mag 2020

17

**PONTE DI SANTO STEFANO NEI PRESSI DI TAORMINA**  
**- 1954 -**



**45 anni**

**COLLASSO 23 MAGGIO 1999 !!!!**

**PONTE SUL FIUME MAGRA – LOCALITA' ALBIANO**  
**- Ricostruzione 1949 -**



**71 anni**

**COLLASSO 08 APRILE 2020!!!!**



**CAROTA ESTRATTA DA  
UNA «NUOVA»  
STRUTTURA**  
Basso rapp. a/c;  
Ottima lavorabilità;  
Riduttori di acqua:  
Poliacrilati.

**CAROTA ESTRATTA DA  
UNA «VECCHIA»  
STRUTTURA (Mecca)**  
Alto rapp. a/c;  
Cattiva reologia;  
Probabile assenza di  
riduttori di acqua  
(Ligninsolfonati - 1970).



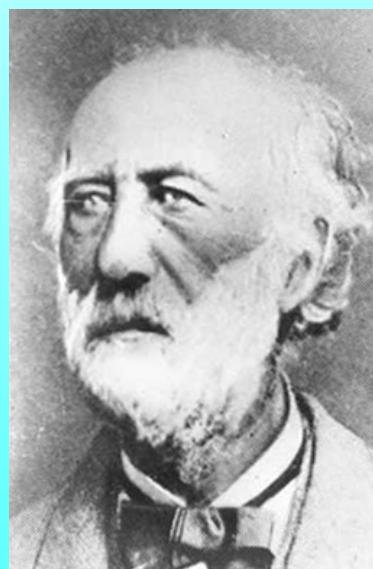
**1**

# **INQUADRAMENTO STORICO**

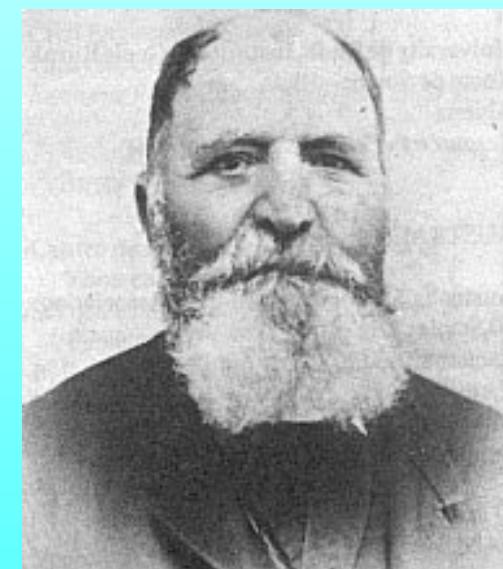
# ALCUNE TAPPE FONDAMENTALI SULLA STORIA DEL CALCESTRUZZO ARMATO



F. Coignet  
1814-1888

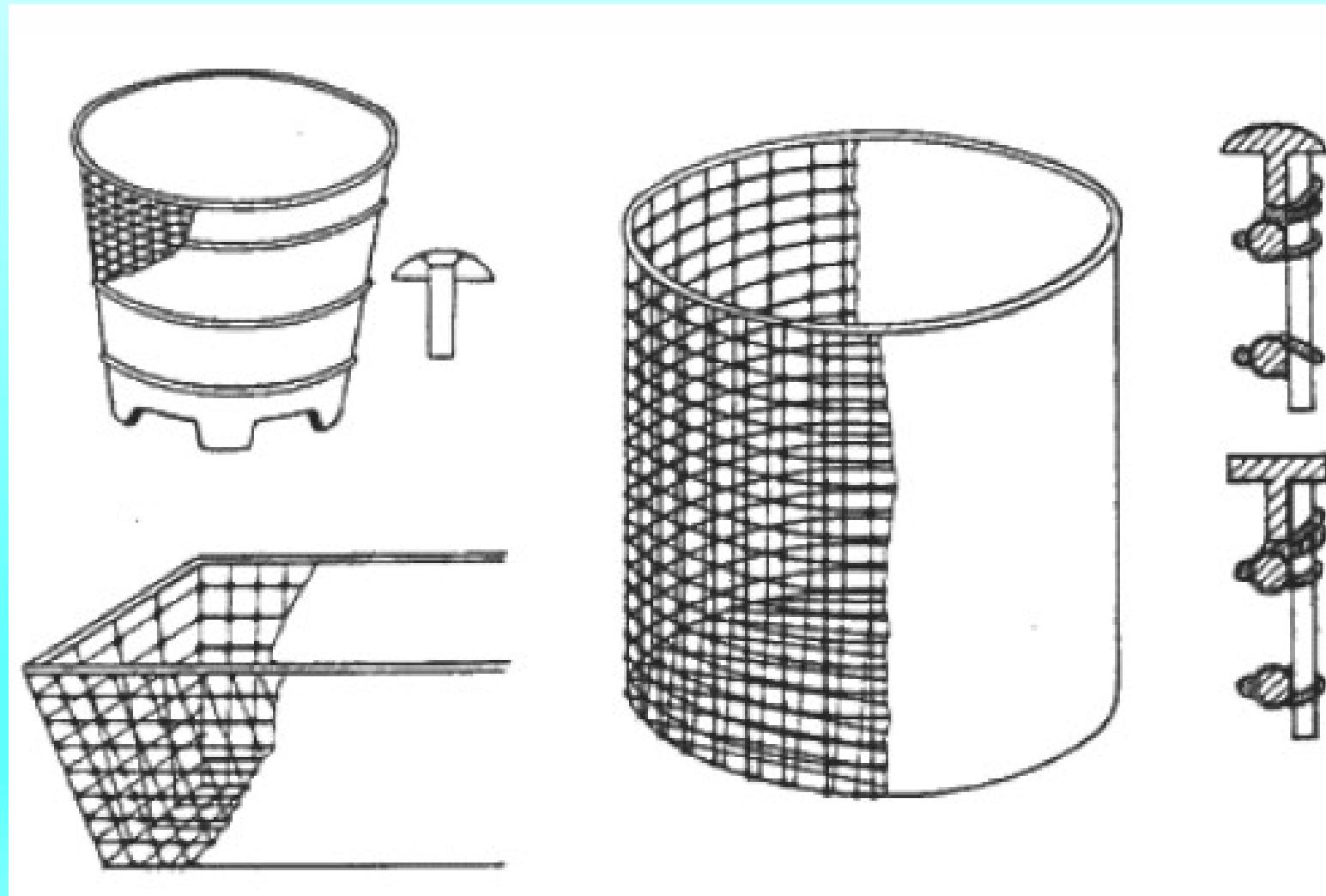


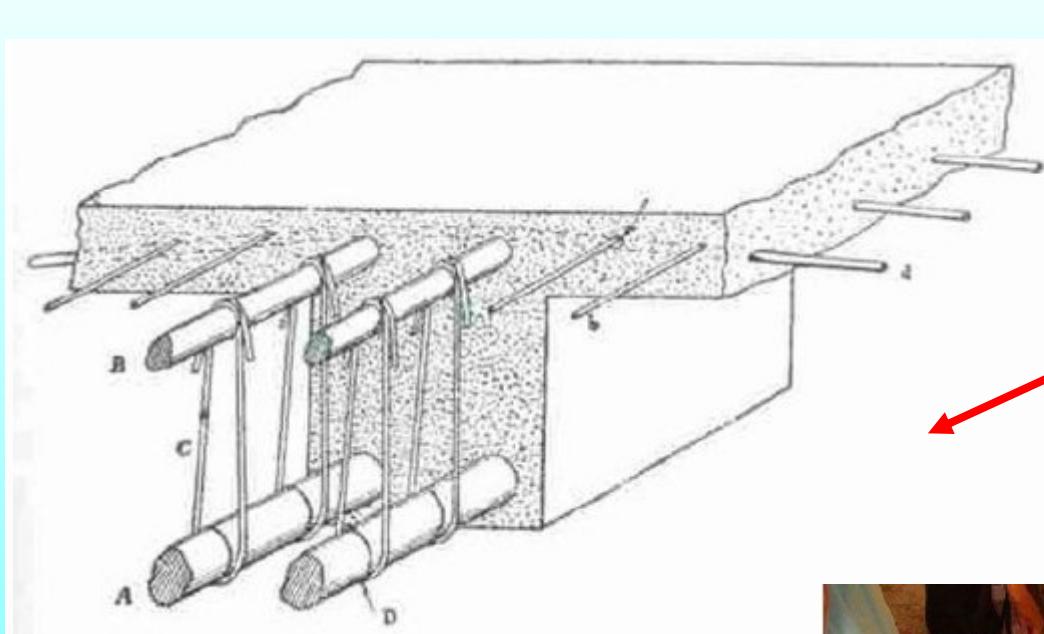
J.L. Lambot  
1814-1887



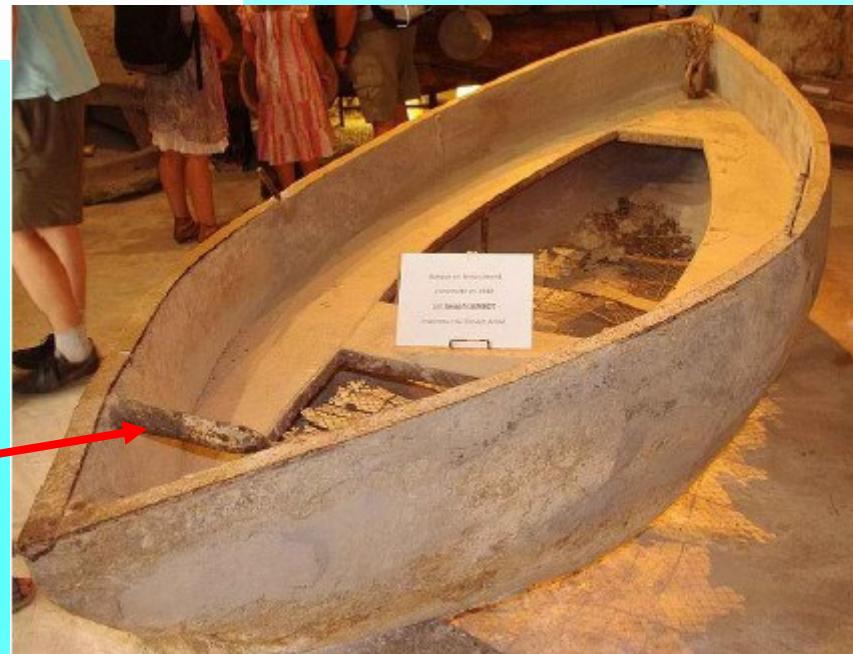
J. Monier  
1823-1906

# **Elementi in «calcestruzzo armato» di MONIER 1867 !**





## **Il sistema in c.a. di Coignet**



## **La barca in c.a. di Lambot**



**F. Hennebique 1842-1921**



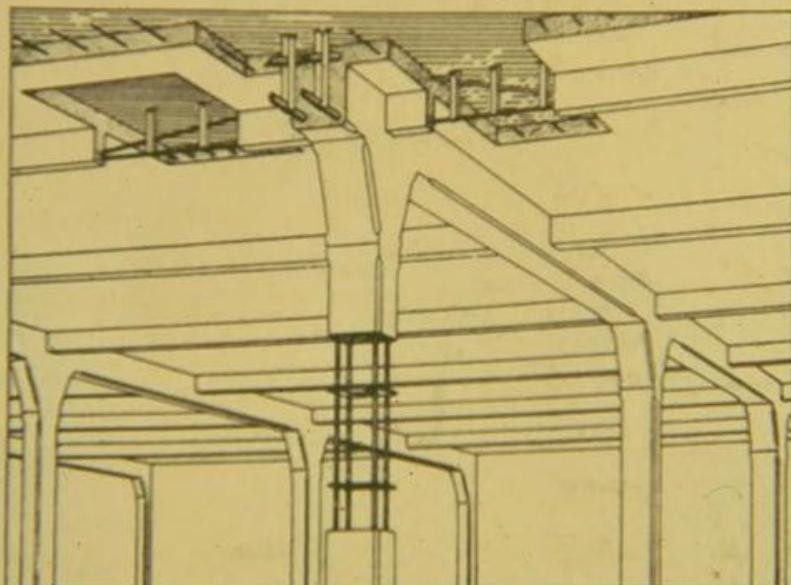
**G. Antonio Porcheddu 1860-1937**

INDESTRUCTIBLE AND FIRE-PROOF

# The Hennebique Armored Concrete System

PATENTED OCT. 4, 1898

Grand Prize, Paris Exposition, 1900



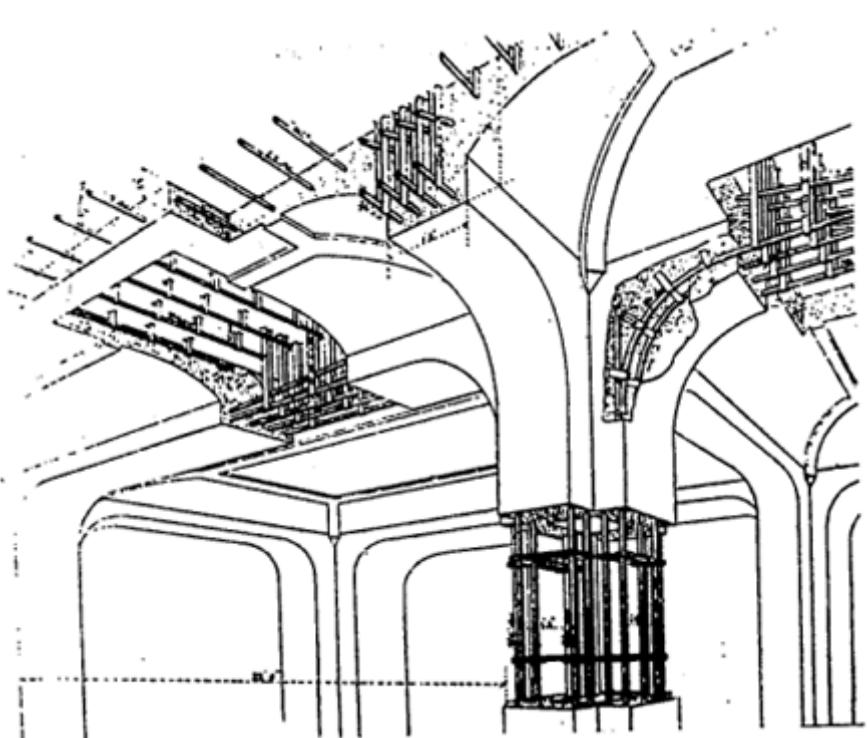
Hennebique Construction Company

U. S. Main Office, 1170 Broadway, New York

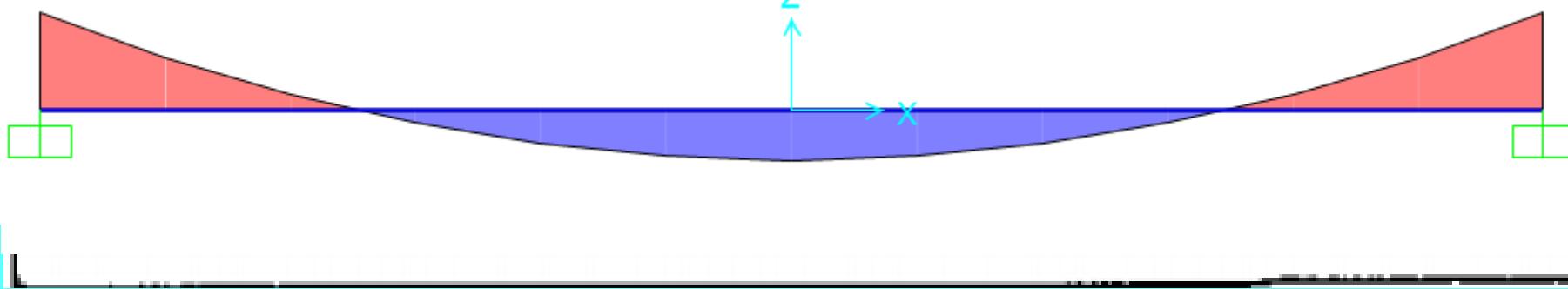
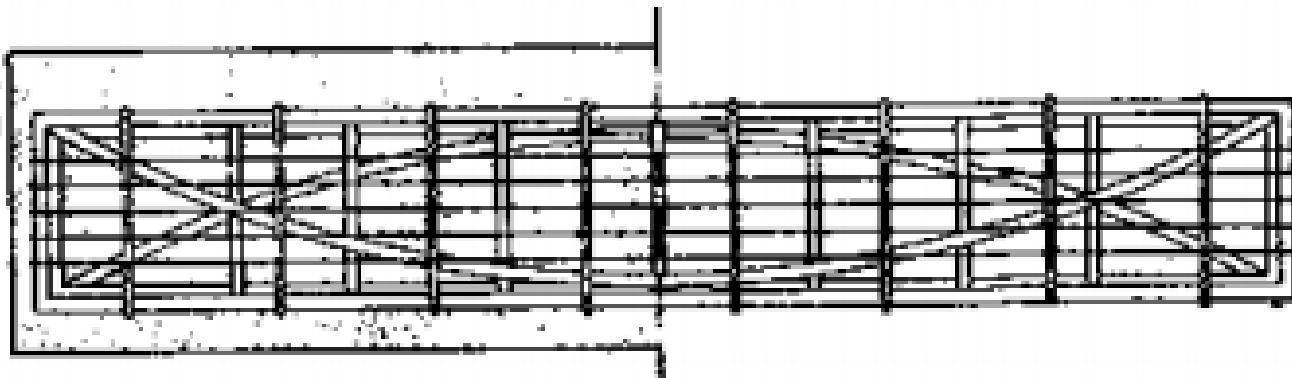
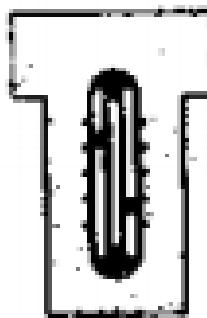
R. BAFFREY, General Manager

TELEPHONE 5774 MADISON SQUARE

1900!

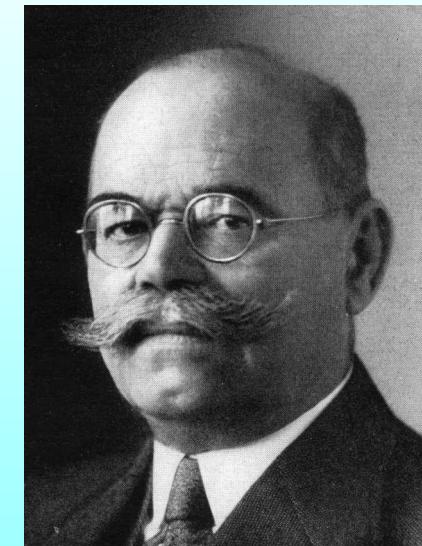
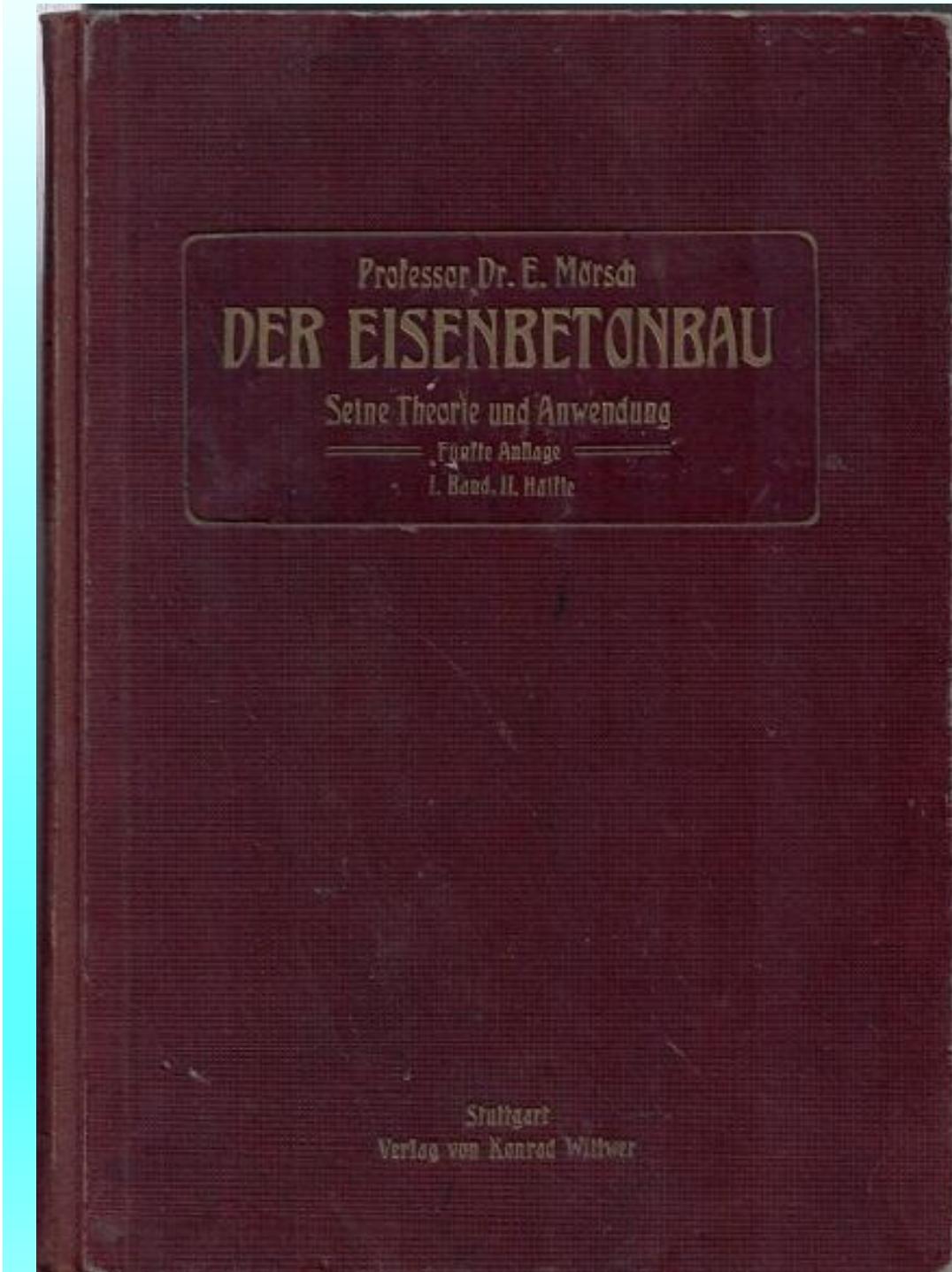


MONIER  
1878



**Ponte RISORGIMENTO a Roma, inaugurato nel 1911**  
**Struttura ad arco con luce di circa 100 m e freccia di 10 m.**





E. Morsch  
1872-1950

1902!

MÖRSCH-VISCARDINI

TEORIA E PRATICA  
DEL  
CEMENTO ARMATO



1910!

MILANO - ULRICO HOEPLI - EDITORE

TEORIA E PRATICA

DEL

CEMENTO ARMATO

DEL  
DOTT. ING. E. MÖRSCH

PROFESSORE AL POLITECNICO DI STUTTGART

SECONDA EDIZIONE ITALIANA

(SULLA 5<sup>a</sup> ORIGINALE COMPLETAMENTE RINNOVATA ED AMPLIATA)

A CURA DELL'  
ING. LUIGI SANTARELLA  
ASSISTENTE AL POLITECNICO DI MILANO

TEORIA ED ESPERIENZE

con 688 figure e con le Norme Ufficiali Tedesche ed Italiane



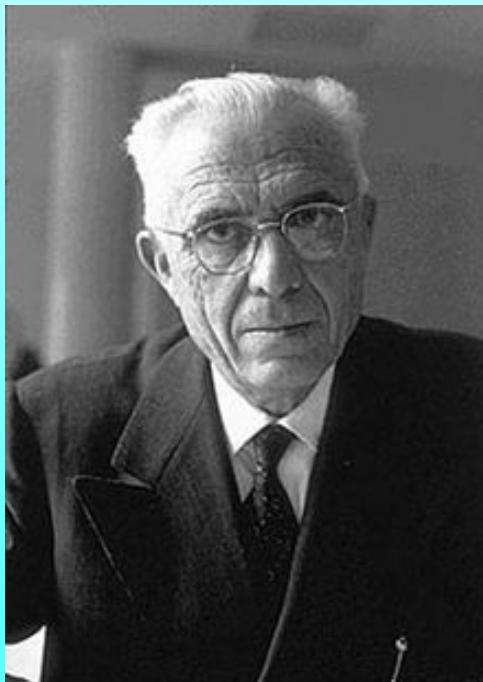
ULRICO HOEPLI

EDITORE LIBRAIO DELLA REAL CASA  
MILANO

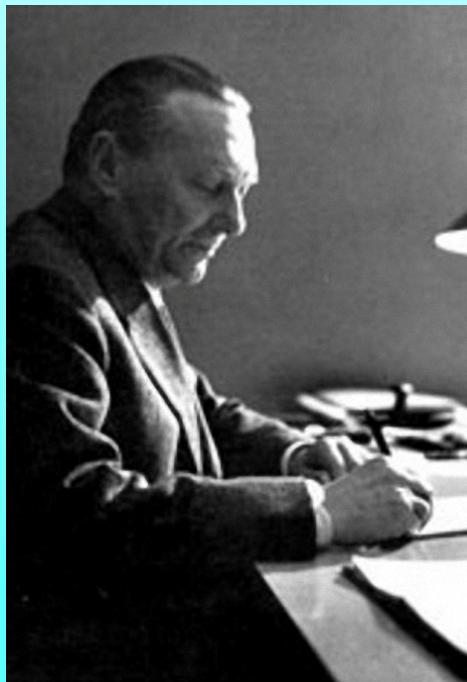
1923

1923!

# **GLI SVILUPPI.....**



**P.L. Nervi  
1891-1979**



**R. Morandi  
1902-1989**



**S. Musmeci  
1926-1981**

# **Sergio Musmeci:**

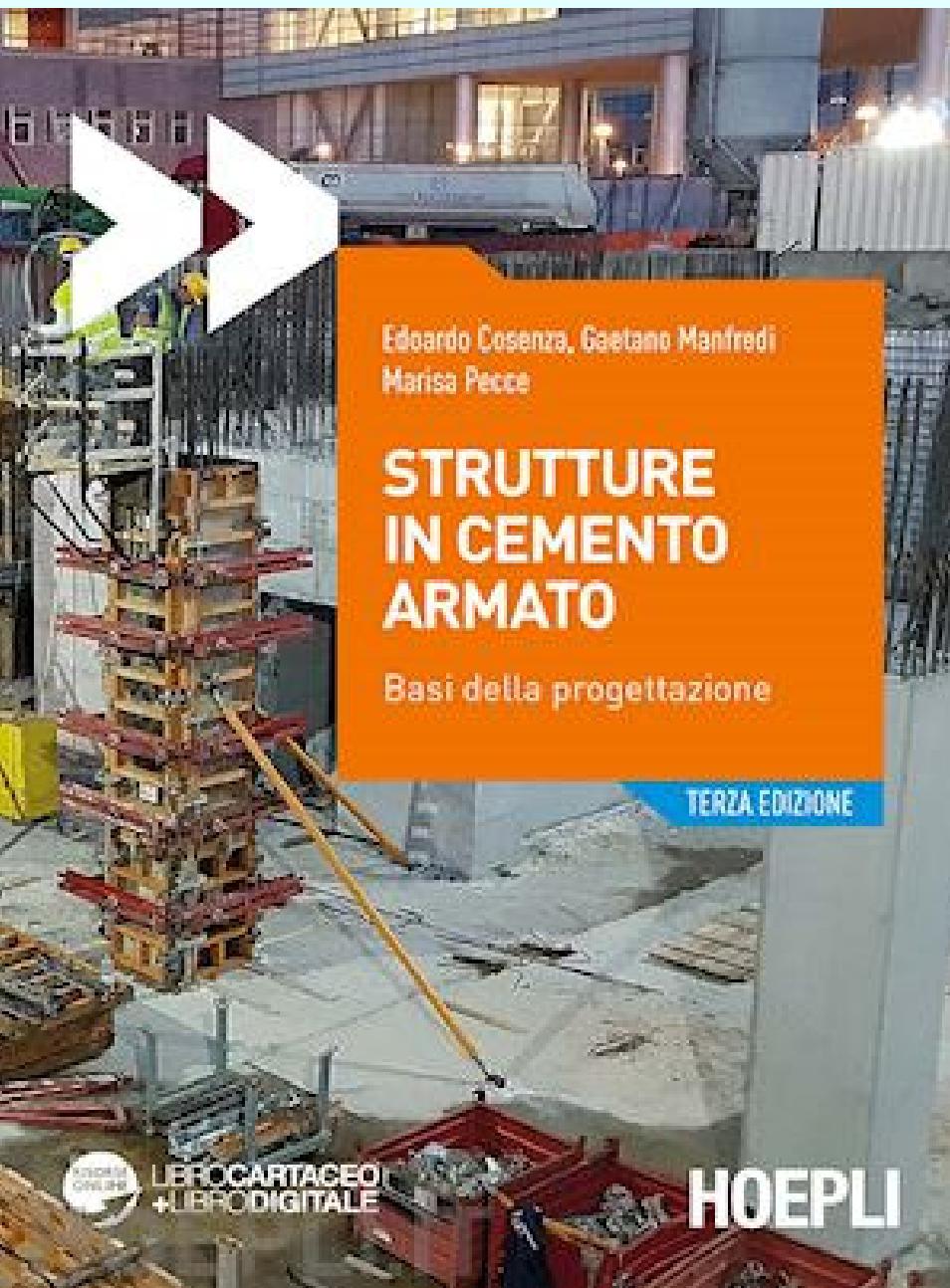
Il ponte sul Basento a Potenza – 1971 (Rete internet)



AURELIO GHERSI • PIETRO LENZA

# EDIFICI ANTISISMICI IN CEMENTO ARMATO

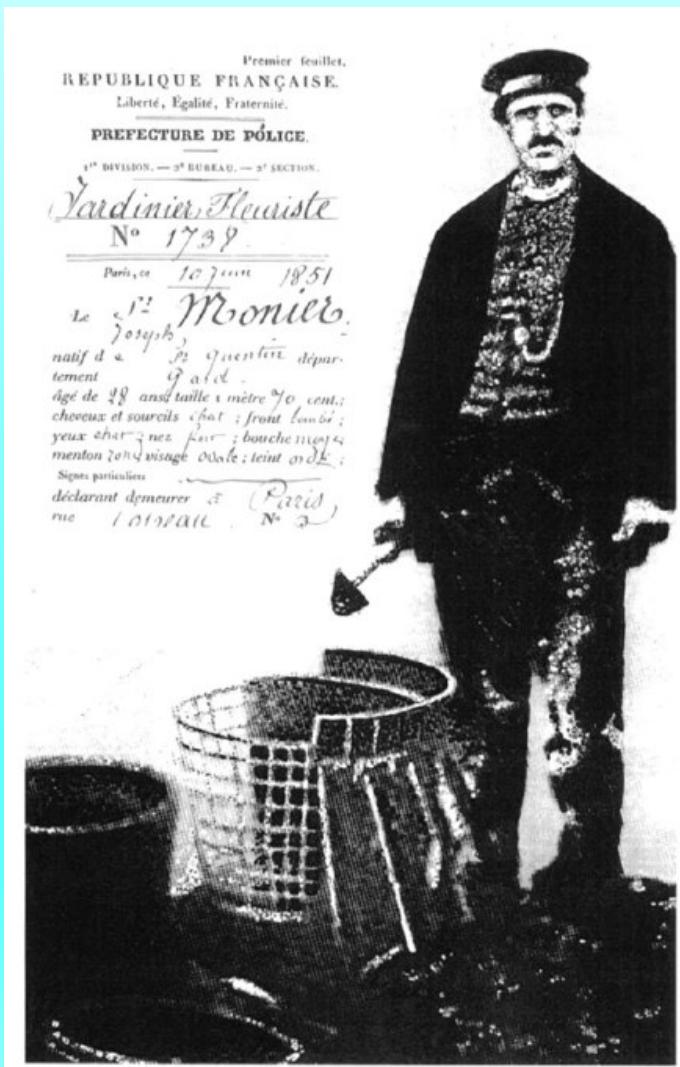
Nuove normative tecniche  
Eurocodici e classi di rischio sismico



Oltre 150 anni di Storia !

MONIER

CALATRAVA



**DOMANDA:**  
**Dal giardiniere MONIER a**  
**CALATRAVA abbiamo fatto**  
**«passi da gigante» in**  
**materia di calcestruzzo**  
**armato !!!**  
**Ma siamo davvero così**  
**bravi ???**



Demolizione delle pile 10 e 11 del Ponte sul Polcevera di Riccardo Morandi avvenuta alle ore 9:37 del 28/06/2019 – Rif. <https://www.fanpage.it/>

2

# **IL CONCETTO DI DURABILITA'**

## **PARAGRAFO 2.1 DEL D.M. 17.01.2018:**

**«durabilità: capacità della costruzione di mantenere, nell'arco della vita nominale di progetto, i livelli prestazionali per i quali è stata progettata, tenuto conto delle caratteristiche ambientali in cui si trova e del livello previsto di manutenzione».**

**LE CLASSI DI ESPOSIZIONE:**

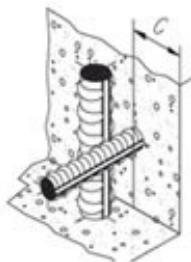
**UNI 11104:2016**

# **UNI 11104:2016**



CLASSE DI ESPOSIZIONE SECONDO LA NUOVA UNI 11104-2016																		
NESSUN rischio di corrosione dell'armatura	Corrosione delle armature indotta dalla CARBONATAZIONE					Corrosione delle armature indotta dai CLORURI						Attaggi da cicli di GELO/DISGELO				Ambiente aggressivo per ATTACCO CHIMICO		
						Acqua di mare			Cloruri provenienti da altre fonti									
X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	
Massimo rapporto a/c	-	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45			
Minima classe di resistenza	C12/15	C25/30	C30/37	C32/40	C32/40	C35/45	C30/37	C32/40	C35/45	C32/40	C25/30	C30/37	C30/37	C32/40	C35/45			
Minimo contenuto in cemento (kg/m <sup>3</sup> ) <sup>d)</sup>	-	300	320	340	340	360	320	340	360	320	340	360	320	340	360			
Contenuto minimo in aria (%)											b) 4,0 <sup>a)</sup>							
Altri requisiti					È richiesto l'utilizzo di cementi resistenti all'acqua di mare secondo UNI 9156						È richiesto l'utilizzo di aggregati conformi alla UNI EN 12620 di adeguata resistenza al gelo/disgelo				In caso di esposizione a terreno o acqua del terreno contenente solfati nei limiti del prospetto 2 della UNI EN 206:2014, è richiesto l'impiego di cementi resistenti ai solfati <sup>c)</sup>			

**Valori copriferro**  
UNI EN 1992-1-1



Classe di esposizione	Spessore copriferro mm (C)	Classe di esposizione	Spessore copriferro mm (C)	Classe di esposizione	Spessore copriferro mm (C)
-----------------------	----------------------------	-----------------------	----------------------------	-----------------------	----------------------------

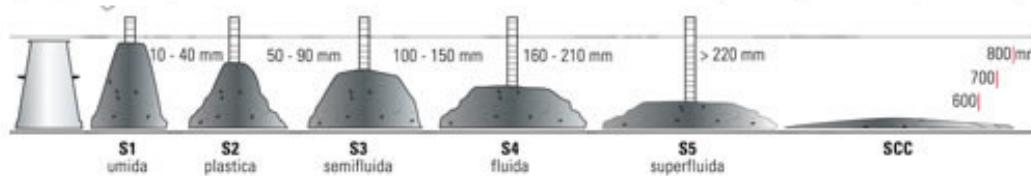
<b>XC1</b>	15	<b>XD1</b>	35	<b>XS1</b>	35
<b>XC2</b>	25	<b>XD2</b>	40	<b>XS2</b>	40
<b>XC3</b>	25	<b>XD3</b>	45	<b>XS3</b>	45
<b>XC4</b>	30				

Classe di esposizione	Spessore copriferro mm (C)	Classe di esposizione	Spessore copriferro mm (C)	Classe di esposizione	Spessore copriferro mm (C)
-----------------------	----------------------------	-----------------------	----------------------------	-----------------------	----------------------------

<b>XF1</b>	30	<b>XA1</b>	25	<b>XO</b>	10
<b>XF2</b>	45	<b>XA2</b>	25		
<b>XF3</b>	30	<b>XA3</b>	25		
<b>XF4</b>	45				

I valori del copriferro (C) riportati  
si riferiscono alla classe strutturale S4

**SLUMP TEST UNI EN 206-1**



**SPANDIMENTO UNI 11041**

**3**

# **INTRODUZIONE AL DEGRADO**

# degrado

---

Sinonimi e Contrari

---

Crea un ebook con questa voce | Scaricalo ora (0)

Condividi  

degrado s. m. [der. di *degradare*]. - [graduale passaggio da una condizione migliore a una peggiore: *d. ambientale*] ≈ decadenza, decadimento, degradazione, deterioramento, scadimento. ↑ distruzione. ↔ recupero, rinascita, ripresa.

# NTC 2018

## 8.2. CRITERI GENERALI

Le disposizioni di carattere generale contenute negli altri capitoli della presente norma costituiscono, ove applicabili, riferimento anche per le costruzioni esistenti, ad esclusione di quanto indicato nella presente norma in merito a limitazioni di altezza, regole generali, prescrizioni sulla geometria e sui particolari costruttivi e fatto salvo quanto specificato nel seguito.

Nel caso di interventi che non prevedano modifiche strutturali (impiantistici, di distribuzione degli spazi, etc.) il progettista deve valutare la loro possibile interazione con gli SLU ed SLE della struttura o di parte di essa.

La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi devono tenere conto dei seguenti aspetti della costruzione:

- essa riflette lo stato delle conoscenze al tempo della sua realizzazione;
- in essa possono essere insiti, ma non palesi, difetti di impostazione e di realizzazione;
- essa può essere stata soggetta ad azioni, anche eccezionali, i cui effetti non siano completamente manifesti;
- le sue strutture possono presentare degrado e/o modifiche significative, rispetto alla situazione originaria.

### C8.5.1 ANALISI STORICO-CRITICA

La conoscenza della storia di un fabbricato è elemento indispensabile, sia per la valutazione della sicurezza attuale, sia per la definizione degli interventi e la previsione della loro efficacia.

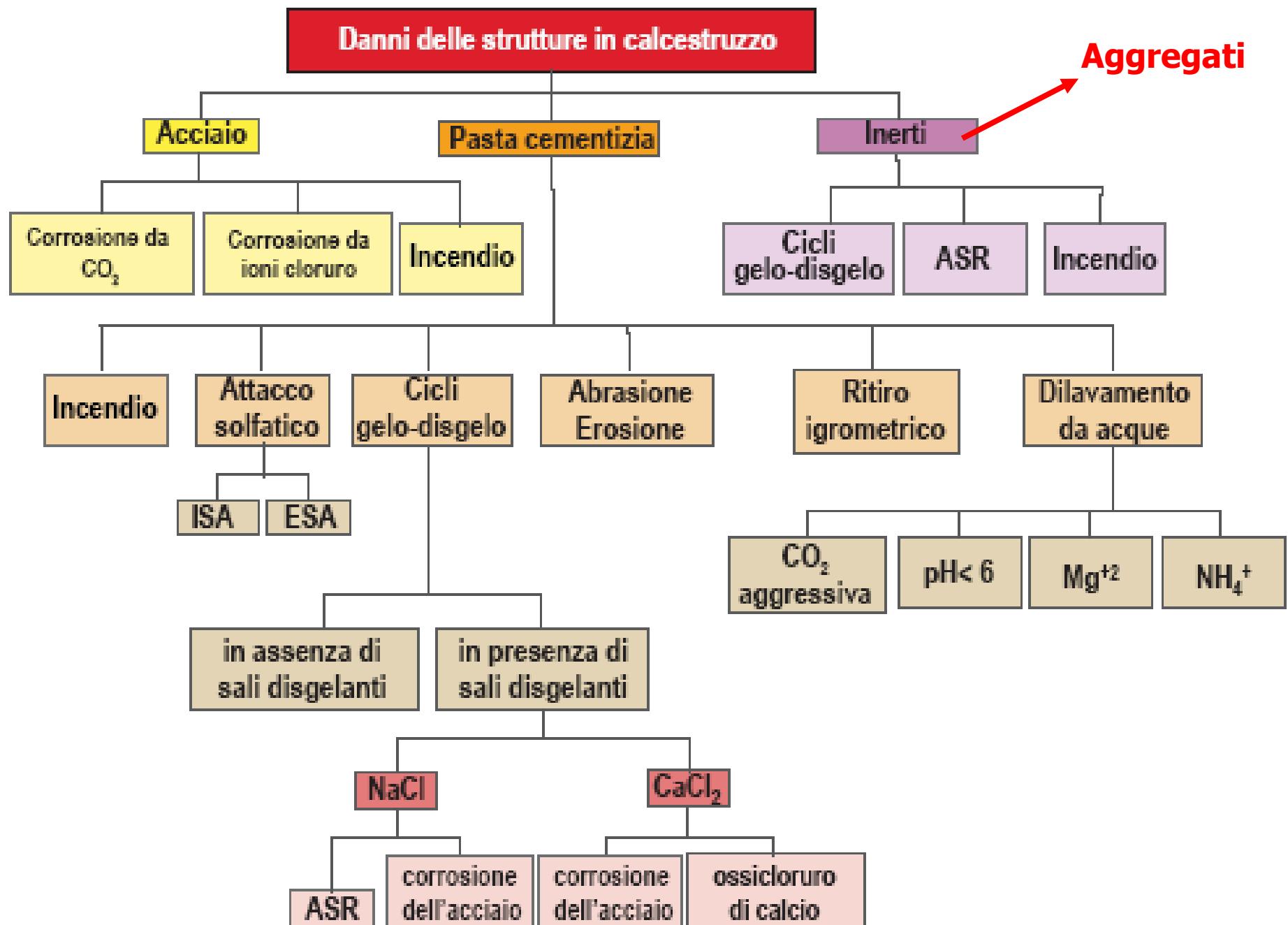
L'analisi storica deve essere finalizzata a comprendere le vicende costruttive, i dissesti, i fenomeni di degrado, i cimenti subiti dall'edificio e, particolarmente frequenti nelle costruzioni in muratura, le trasformazioni operate dall'uomo che possono aver prodotto cambiamenti nell'assetto statico originario. In tal senso l'indagine storica diventa indagine critica e fonte, per eccellenza, di documentazione e conoscenza finalizzate all'interpretazione del comportamento strutturale.

## COSTRUZIONI ESISTENTI

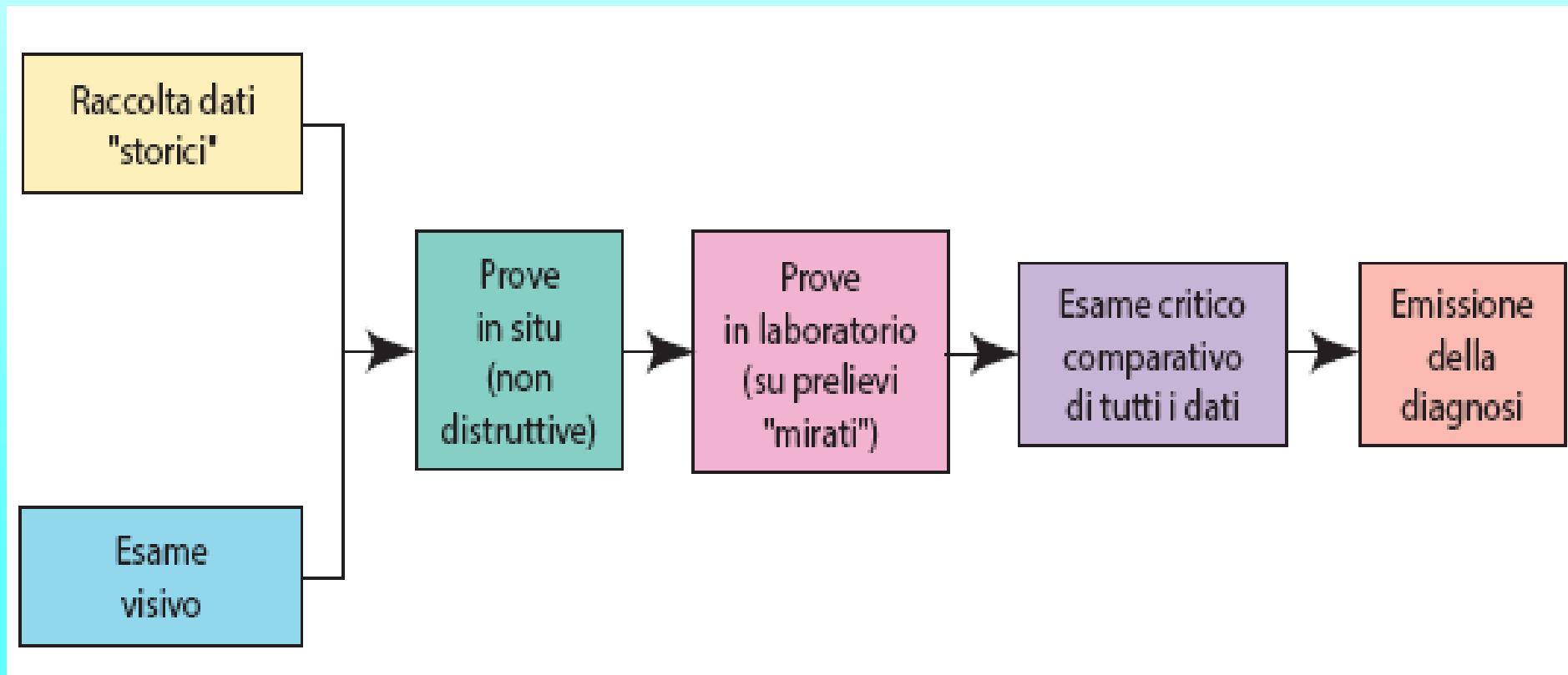
# **LINEE GUIDA PER LA CLASSIFICAZIONE E GESTIONE DEL RISCHIO, LA VALUTAZIONE DELLA SICUREZZA ED IL MONITORAGGIO DEI PONTI ESISTENTI**

Nelle verifiche occorre considerare le eventuali carenze dovute a problemi di durabilità, in particolare, l'eventuale riduzione della sezione dovuta a degrado o dilavamento del calcestruzzo superficiale che può comportare la riduzione della sezione utile, l'eventuale diminuzione di area di acciaio dovuta alla corrosione, l'eventuale assenza o carenza di staffe causate dalla corrosione delle stesse che in genere hanno copriferro ridotto o l'eventuale inefficacia delle staffe dovute alla corrosione degli spigoli d'armatura. Occorre porre attenzione agli sbalzi laterali dei ponti, particolarmente esposti agli effetti del degrado; è bene che essi siano verificati per gli effetti di urto, svio e azione delle barriere di sicurezza nelle condizioni più sfavorevoli di carichi previsti dalla verifica di sicurezza prescelta.

**2020**



# Percorso diagnostico



Mario Collepardi

# **Corrosione da cloruri provenienti da sali disgelanti e da carbonatazione**



Felitti-Mecca



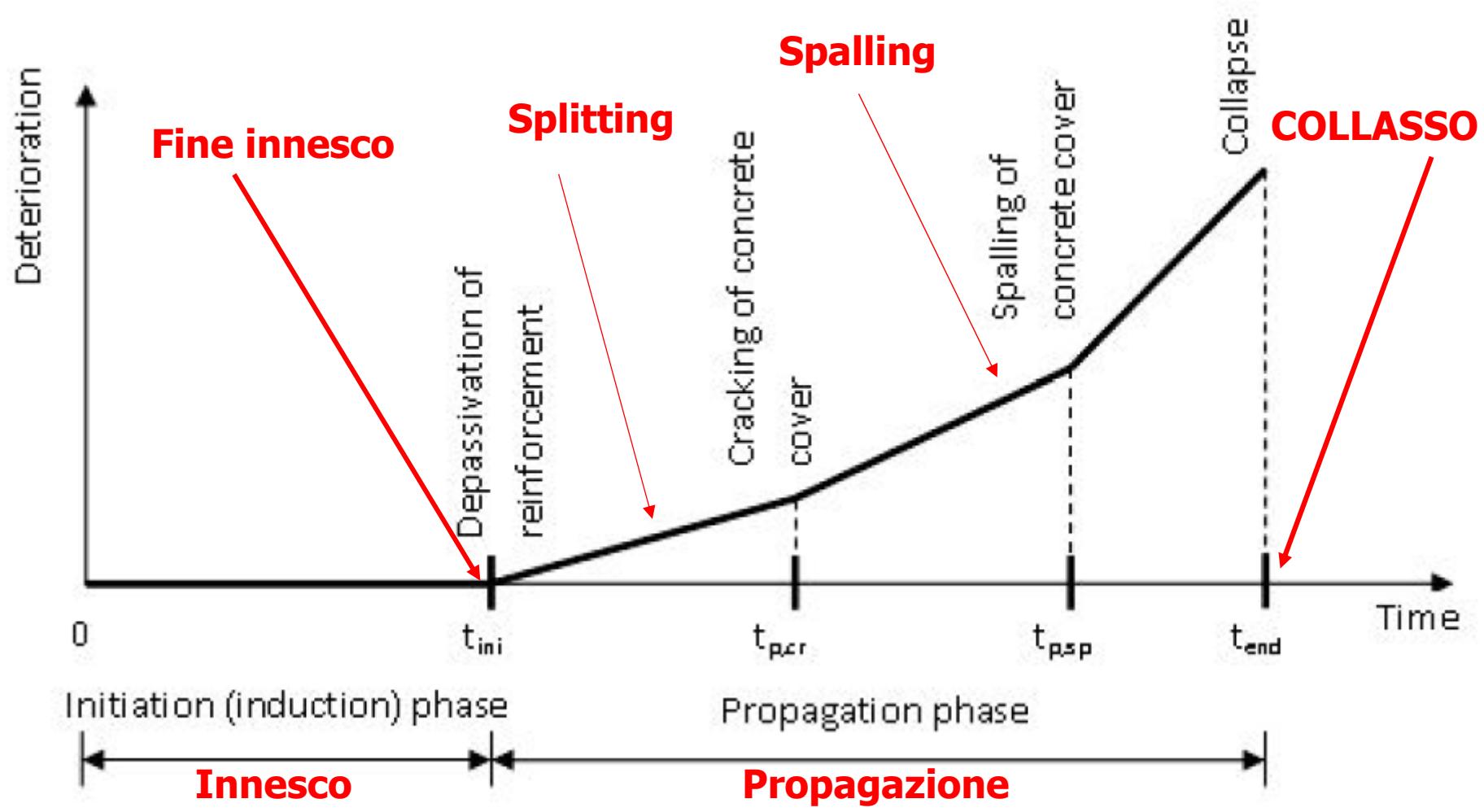
**PONTE DI SERGIO  
MUSMECI  
POTENZA**

**PONTE DI SERGIO MUSMECI**  
**- POTENZA -**



**Degrado al  
«piede» della  
membrana  
equicompressa  
in c.a.  
(2018)**

Felitti-Mecca



**DOMANDA:**

**Vi fidereste nell' eseguire  
una vulnerabilità sismica su  
una struttura «integra»,  
cioè senza introdurre lo  
stato di danno localizzato  
nel codice di calcolo???**

**4**

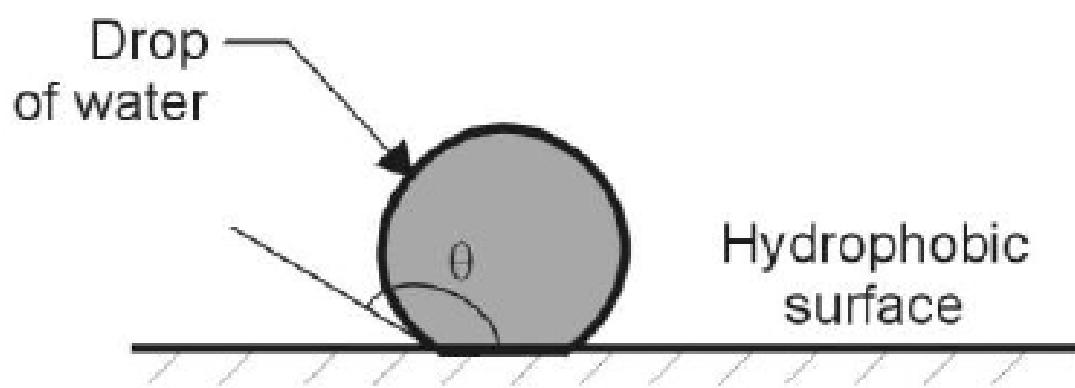
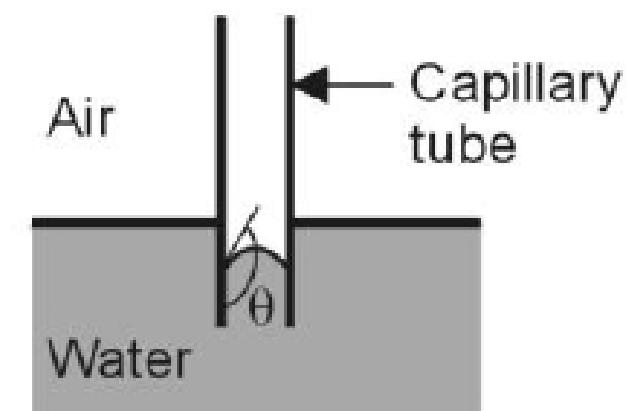
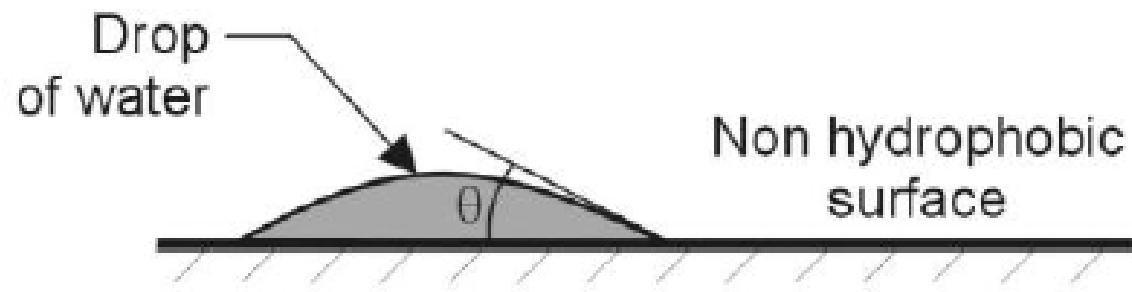
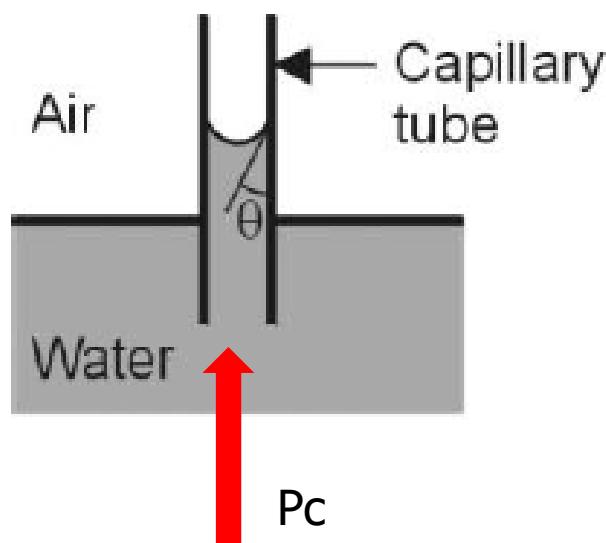
**MECCANISMI DI  
TRASFERIMENTO E  
TRASPORTO DEGLI  
AGENTI  
AGGRESSIVI**

# MECCANISMI DI TRASFERIMENTO

**1. ASSORBIMENTO PER SUZIONE CAPILLARE**  
DELL'ACQUA CHE FUNGE DA VEICOLO PER I SALI IN  
ESSA EVENTUALMENTE DISCIOGLTI; L'ASSORBIMENTO  
AVVIENE PER CONTATTO DELL'ACQUA CON IL  
CALCESTRUZZO ASCIUTTO, O COMUNQUE INSATURO  
DI UMIDITA'. LA FORZA MOTRICE CHE SPINGE  
L'ACQUA NEI PORI CAPILLARI VUOTI E' LA PRESSIONE  
CAPILLARE:

$$P_c = (2\gamma/r) \cdot \cos\theta$$

**$\gamma$  = tensione superficiale acqua**  
 **$r$  = raggio del poro**  
 **$\theta$  = angolo di bagnatura**



**2. DIFFUSIONE DEL CLORURO ATTRAVERSO IL CALCESTRUZZO NEI PORI CAPILLARI SATURI DI ACQUA: IN QUESTO CASO L'ACQUA RISTAGNA NEI PORI E IL CLORURO SI MUOVE LUNGO UNA DIREZIONE PERPENDICOLARE ALLA SUPERFICIE DI CONTATTO DEL CALCESTRUZZO SOTTO LA SPINTA DI UN GRADIENTE DI CONCENTRAZIONE REGOLATO DALLA SECONDA LEGGE DI FICK:**

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

**Equazione differenziale alle derivate parziali di tipo parabolico.  
Diffusione NON STAZIONARIA secondo una unica direzione.**

$\partial C / \partial t$  = gradiente di concentrazione dei cloruri

D = coefficiente di diffusione (vedi tabella di Colleopardi)

t = tempo di diffusione dei cloruri



**Adolf Eugen FICK (1829-1901)**

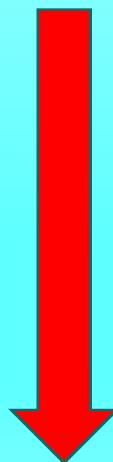
**5**

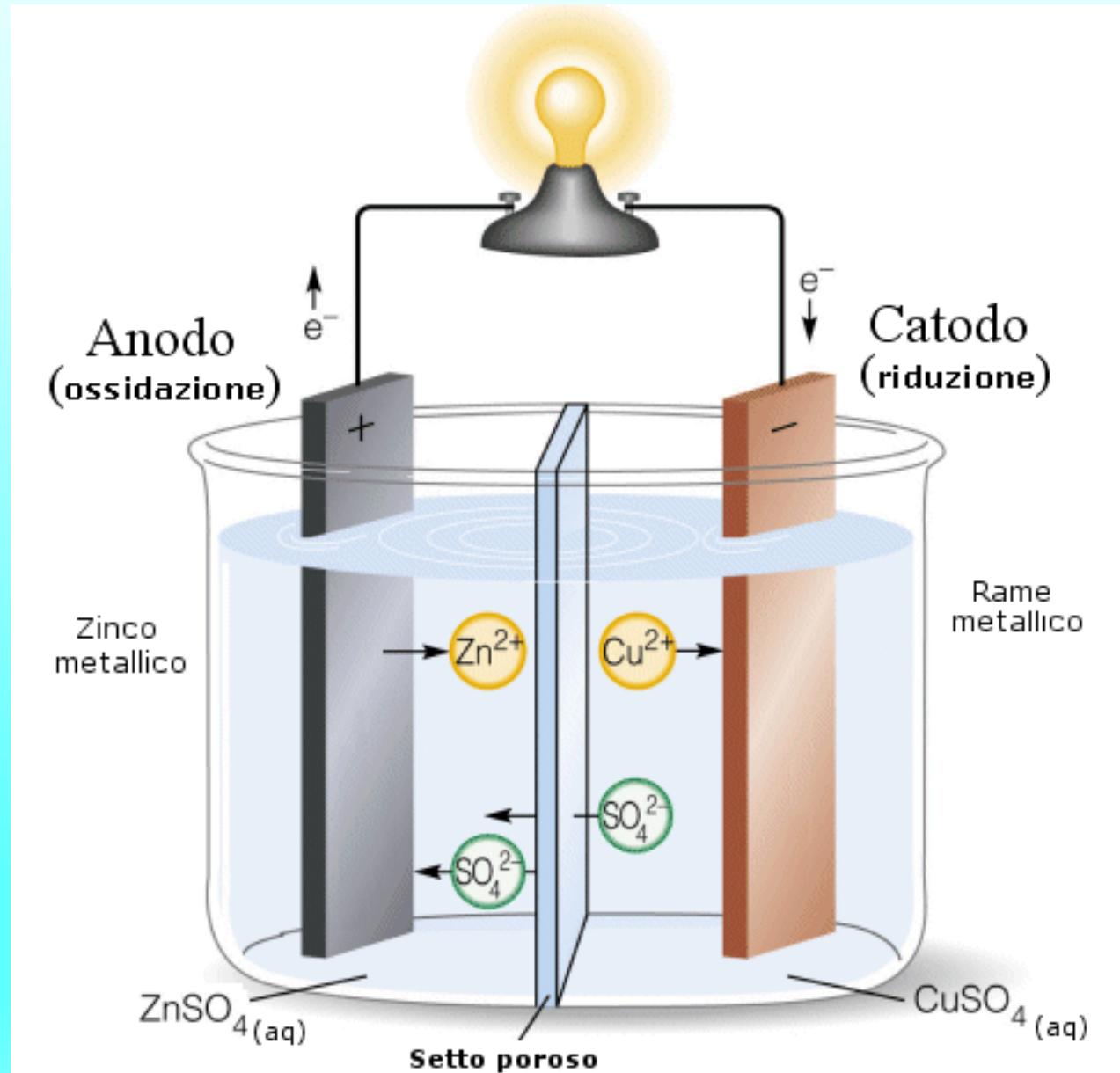
# **ASPETTI ELETTROCHEMICI**

## INTRODUZIONE

LA PRIMA PILA FU INVENTATA DAL CHIMICO COMASCO ALESSANDRO VOLTA NEL 1799. UN VERSIONE "SEMPLIFICATA" E' LA PILA DI DANIELL. ANCHE QUEST'ULTIMA E' BASATA SU DUE METALLI: ZINCO E RAME. QUESTE DUE SBARRE (ELETTRODI) SONO IMMERSE IN DUE SOLUZIONI (solfato di zinco e solfato di rame) SEPARATE DA UNA MEMBRANA POROSA CHE PERMETTE IL PASSAGGIO DEI SOLI IONI. SE COLLEGHIAMO LE DUE SBARRE CON UN CIRCUITO ELETTRICO – PER ACCENDERE UNA LAMPADINA – INIZIA A CIRCOLARE CORRENTE. NEL TEMPO NOTIAMO CHE L'ELETTRODO DI ZINCO DIVENTA SEMPRE PIU' SOTTILE (lo zinco metallico si trasforma in ione zinco cedendo due elettroni) MENTRE.....

.....QUELLO DI RAME DIVENTA SEMPRE PIU' SPESSO (lo ione rame accetta i due elettroni e diventa rame metallico). TRA I DUE ELETTRODI ESISTE, QUINDI, UNA DIFFERENZA DI POTENZIALE ELETTRICO. IL FLUSSO DI ELETTRONI VA DALL'ELETTRODO DI ZINCO (ANODO: reazione di ossidazione) ALL'ELETTRODO DI RAME (CATODO: reazione di riduzione).

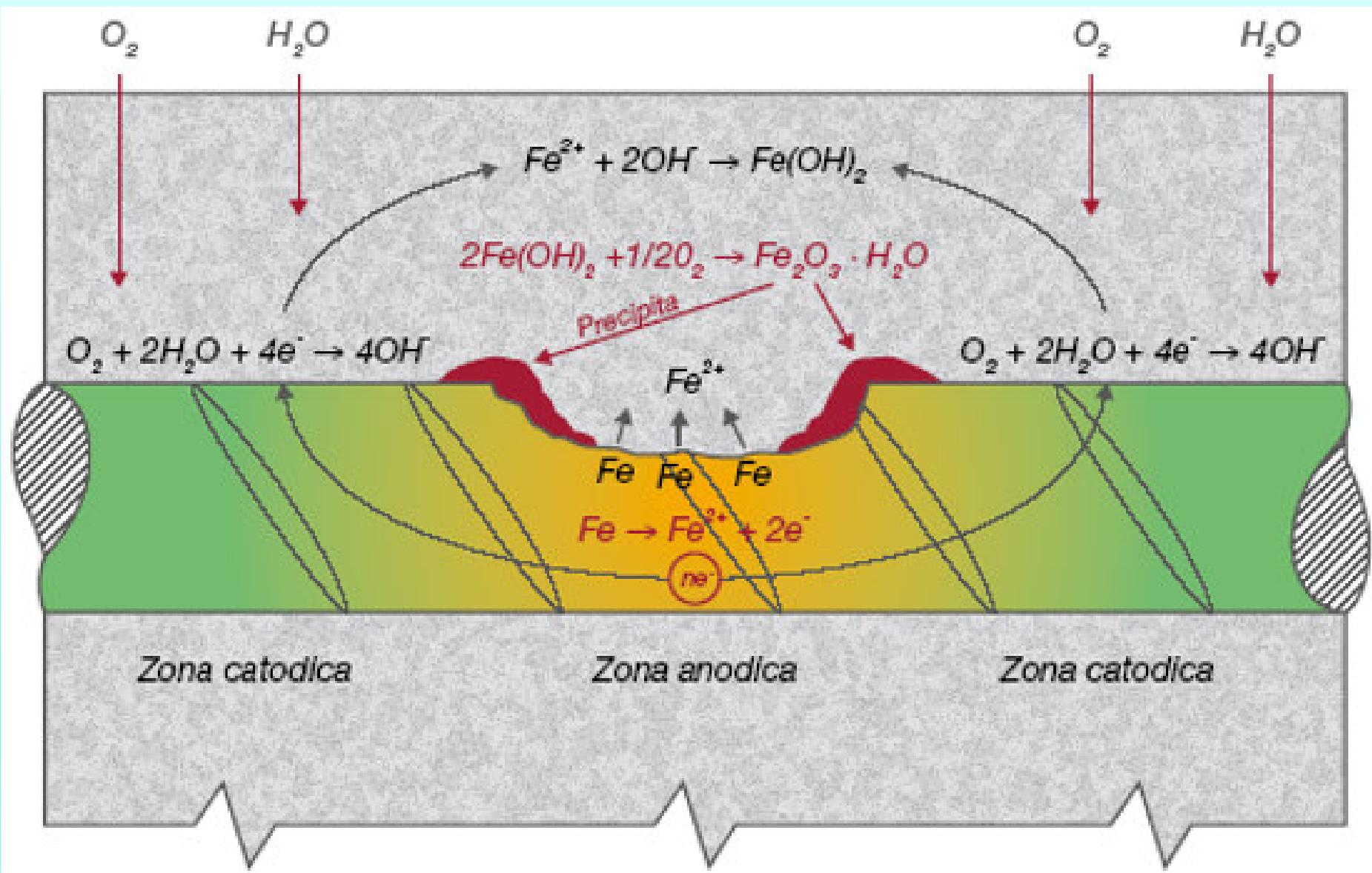




Pila di Daniell: rete internet

**LA CORROSIONE, QUINDI, E' UN PROCESSO ELETTROCHIMICO:**  
**QUANDO UN CONDUTTORE METALLICO – BARRA DI ARMATURA – E' IMMERSO IN UN MEZZO POROSO – CALCESTRUZZO – SI POSSONO GENERARE – IN CERTE CONDIZIONI – DIFFERENZE DI POTENZIALE TRA LE PARTI DEL SISTEMA. SI FORMANO, INFATTI, ZONE CATODICHE E ZONE ANODICHE, IN CORRISPONDENZA DELLE quali, SI GENERA CORROSIONE.**

## SCHEMA PROCESSO DI CORROSIONE DI UNA BARRA DI ARMATURA



**6**

# **CARROSIONE PER CARBONATAZIONE**

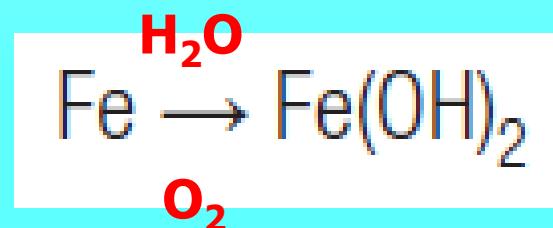
**Classe di  
esposizione XC**

**QUANDO L 'ANIDRIDE CARBONICA (complice) VIENE A CONTATTO CON IL CALCESTRUZZO, NEUTRALIZZA I COMPONENTI ALCALINI E IL PH PASSA DA VALORI > 13 A VALORI < 11. IN TALI CONDIZIONI – PENETRATO TUTTO IL COPRIFERRO – IL FILM PROTETTIVO DIVENTA POROSO E INCOERENTE, PERDENDO, LA CAPACITA' DI PROTEGGERE IL SUBSTRATO METALLICO. ATTRAVERSO LE FESSURE PRESENTI SUL CALCESTRUZZO, PENETRANO OSSIGENO E ACQUA (killer) ALIMENTANDO LA CORROSIONE DELLE BARRE DI ARMATURA CON CONSEGUENTE ESPULSIONE DEI COPRIFERRI.**

## REAZIONE DI CARBONATAZIONE



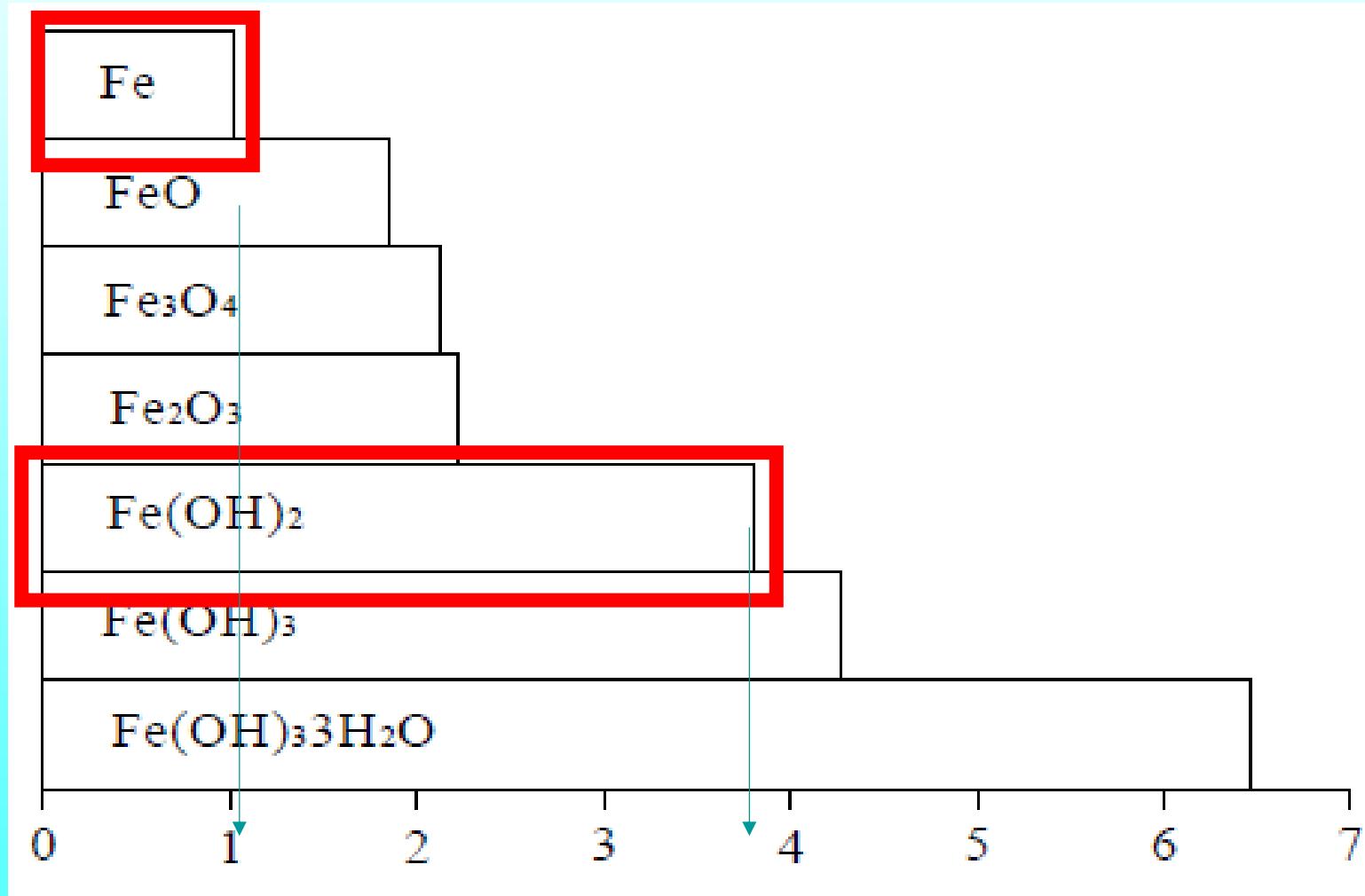
## PROCESSO DI CORROSIONE



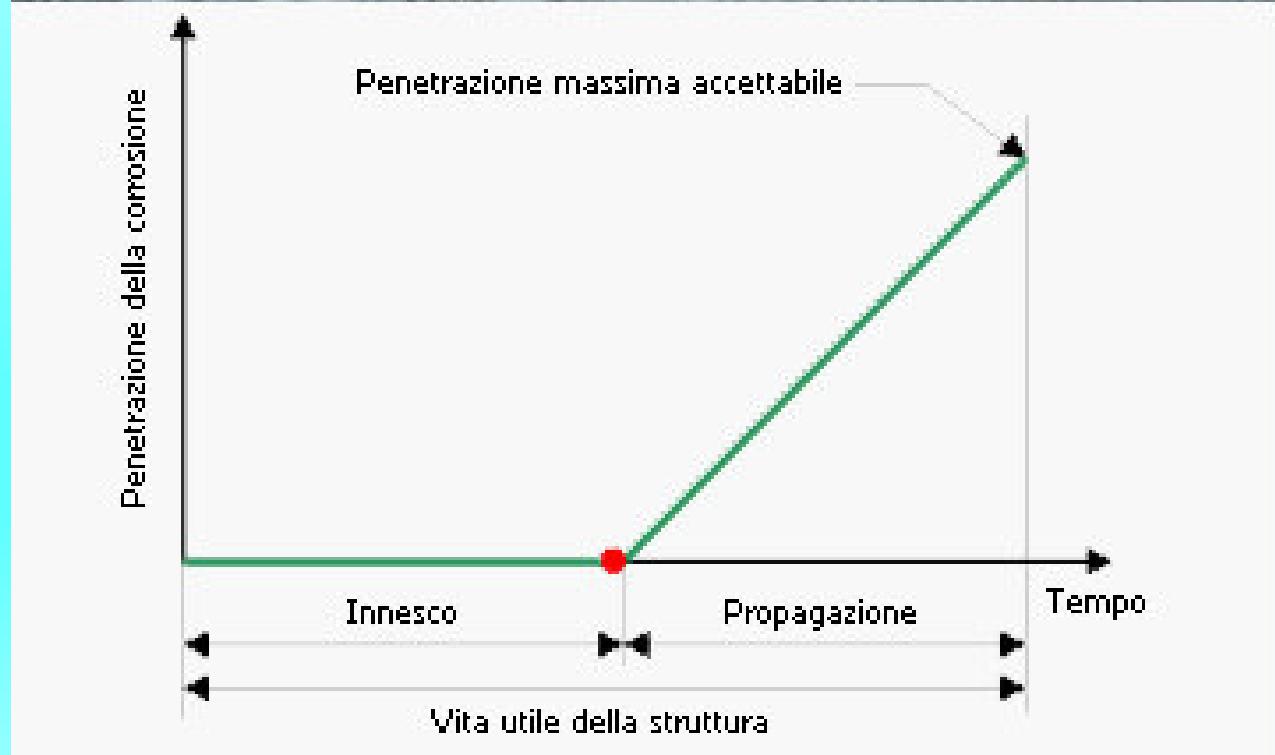
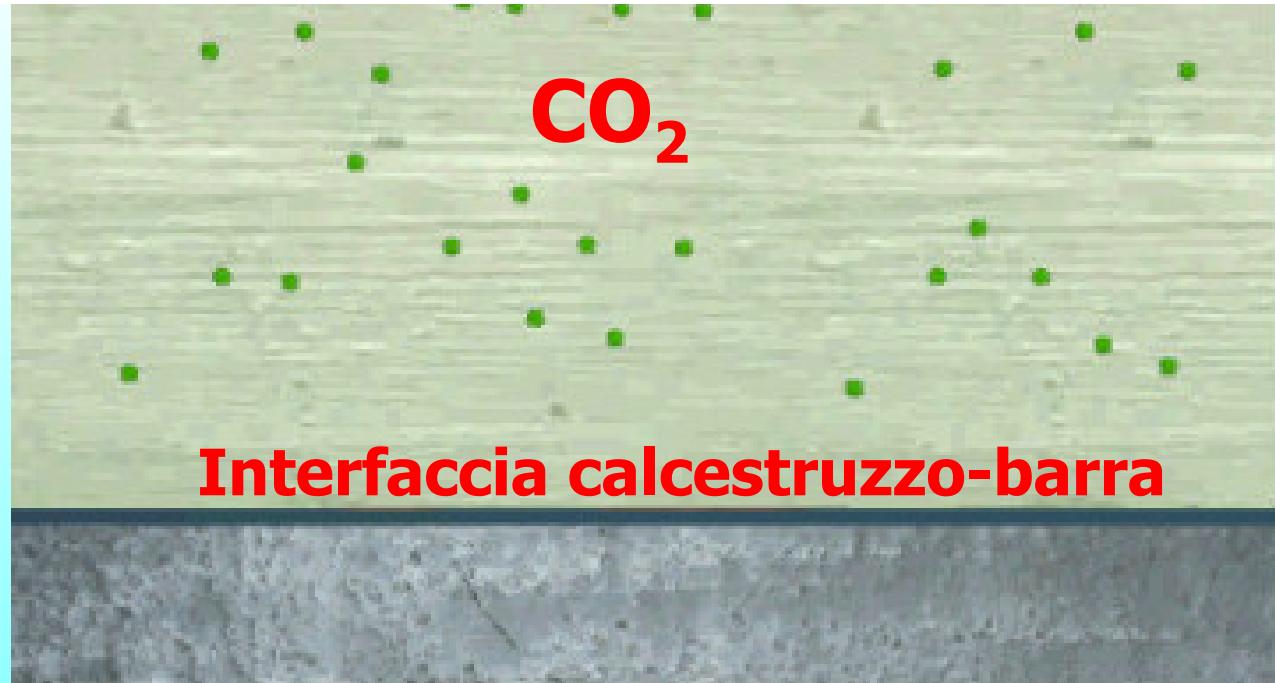
P. Pedeferri

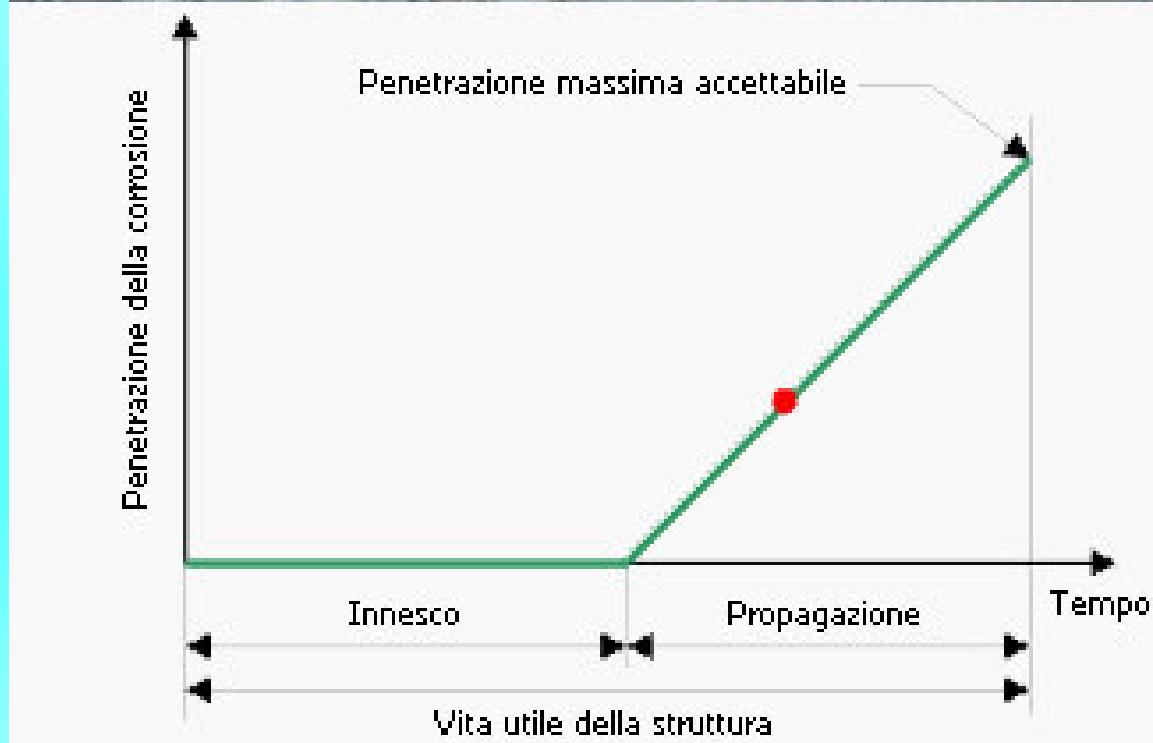
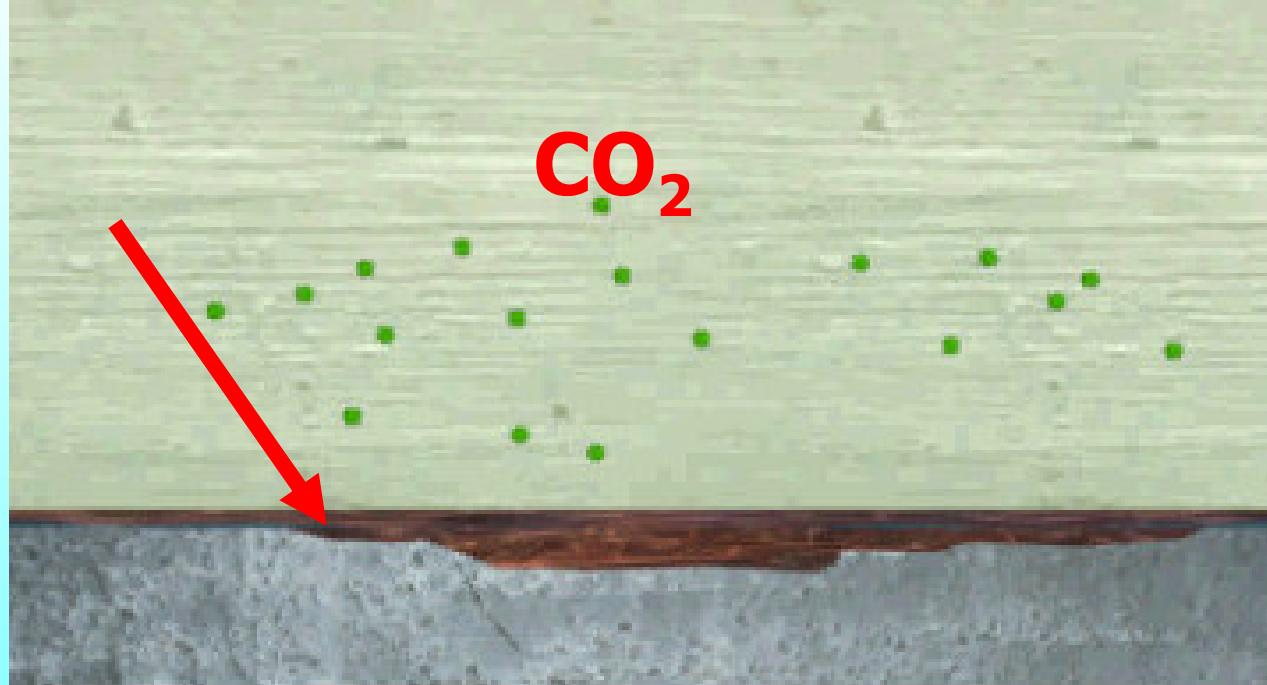


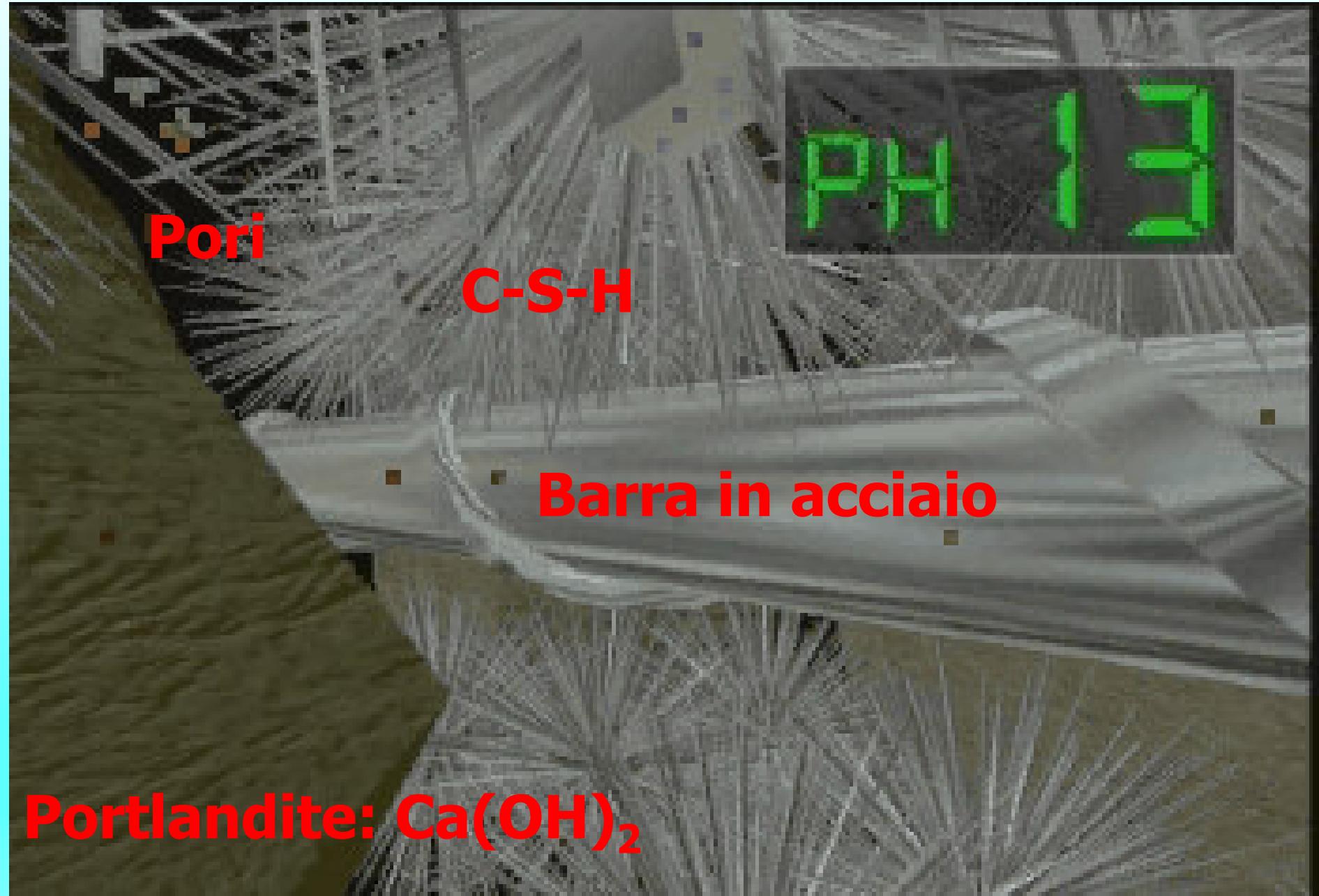
**PER LA FORMAZIONE DI RUGGINE E' FONDAMENTALE LA PRESENZA  
SIMULTANEA DI ACQUA E OSSIGENO !  
A sinistra chiodi in acqua deareata, a destra in acqua areata.**



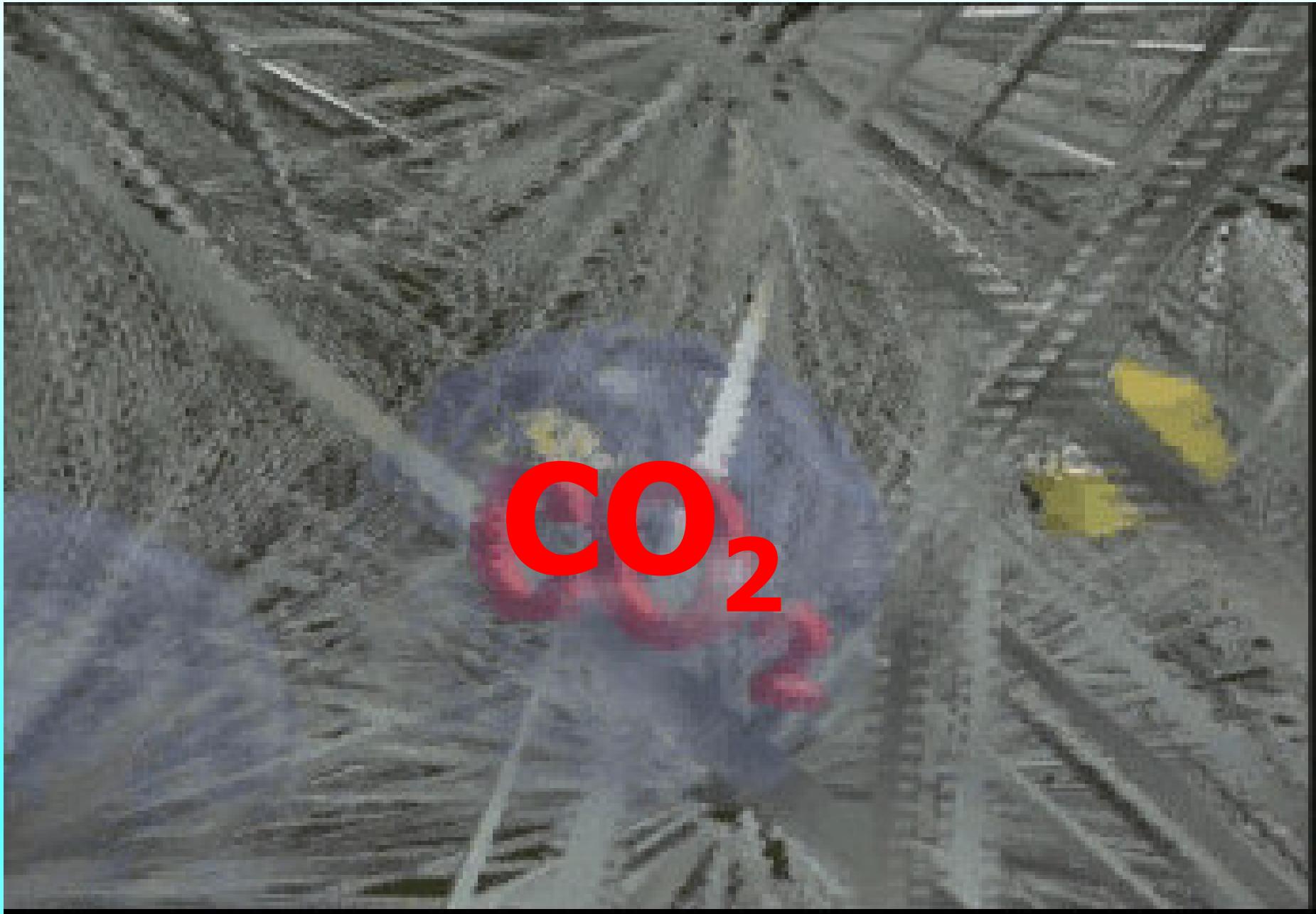
Volumi relativi del ferro metallico e dei suoi prodotti di corrosione,  
Vergani, 2010







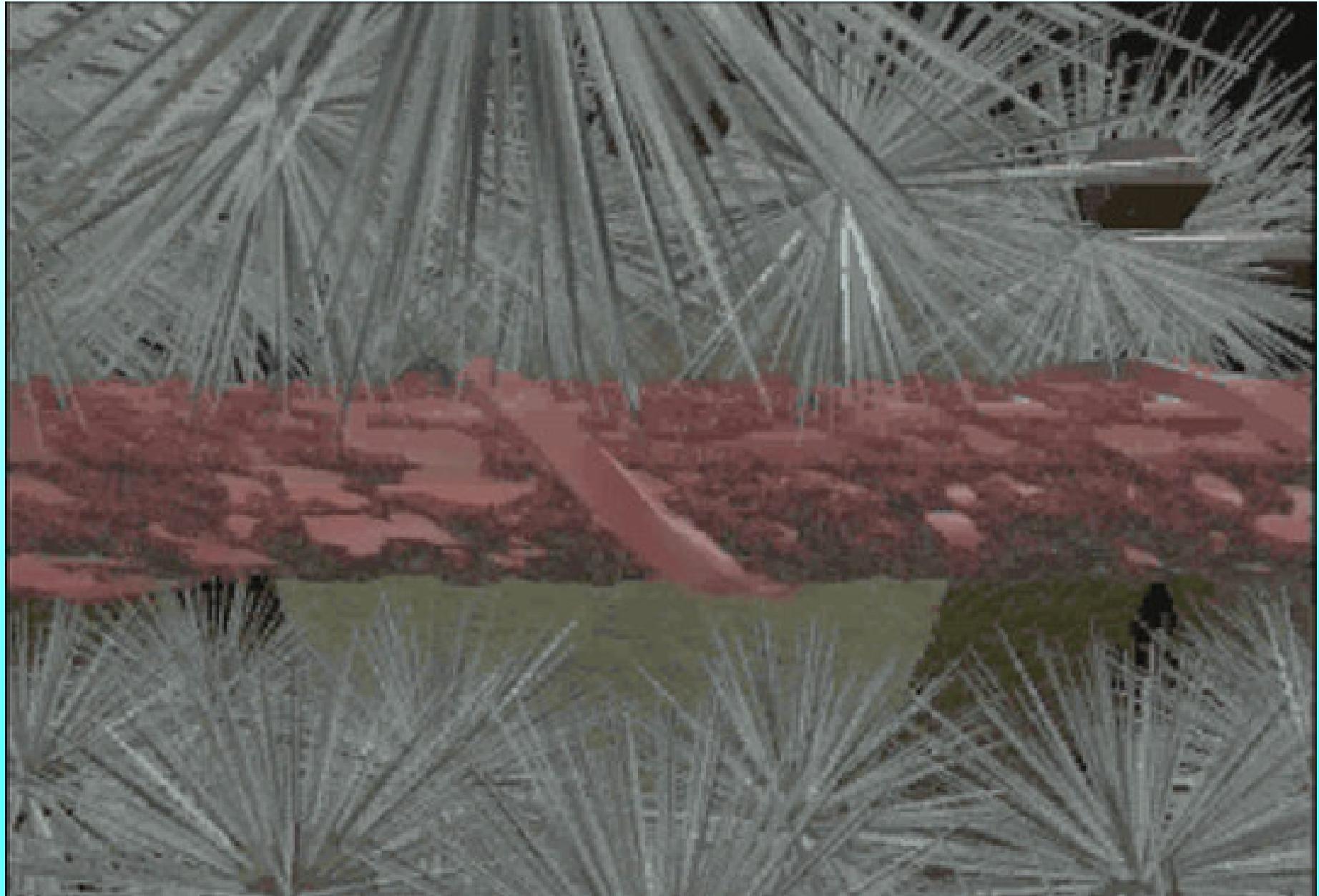
M. Collepardi



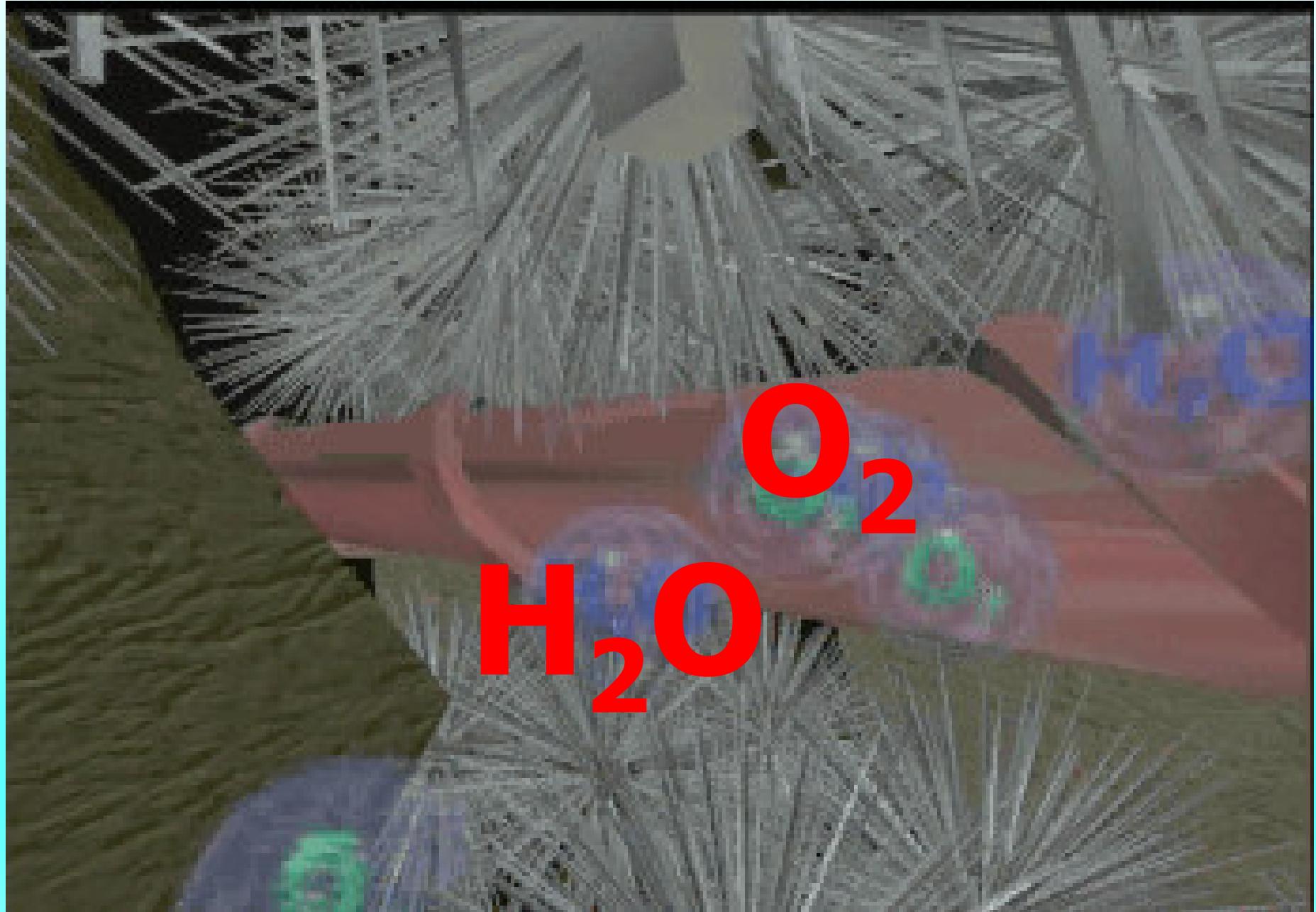
M. Collepardi



M. Collepardi



M. Collepardi



M. Collepardi

# Corrosione da carbonatazione «diffusa»





$$P_{\sigma} = \pi^2 \frac{EI}{l_0^2}$$

**DOMANDA:**

**Si tratta di eseguire una «semplice» riparazione, oppure bisognerebbe indagare su tutti i pilastri per mettere in conto la potenziale instabilità delle barre longitudinali e la riduzione dell'effetto confinamento delle staffe ???**

(oltre ad implementare il «danno» nel codice di calcolo – punto di domanda precedente)

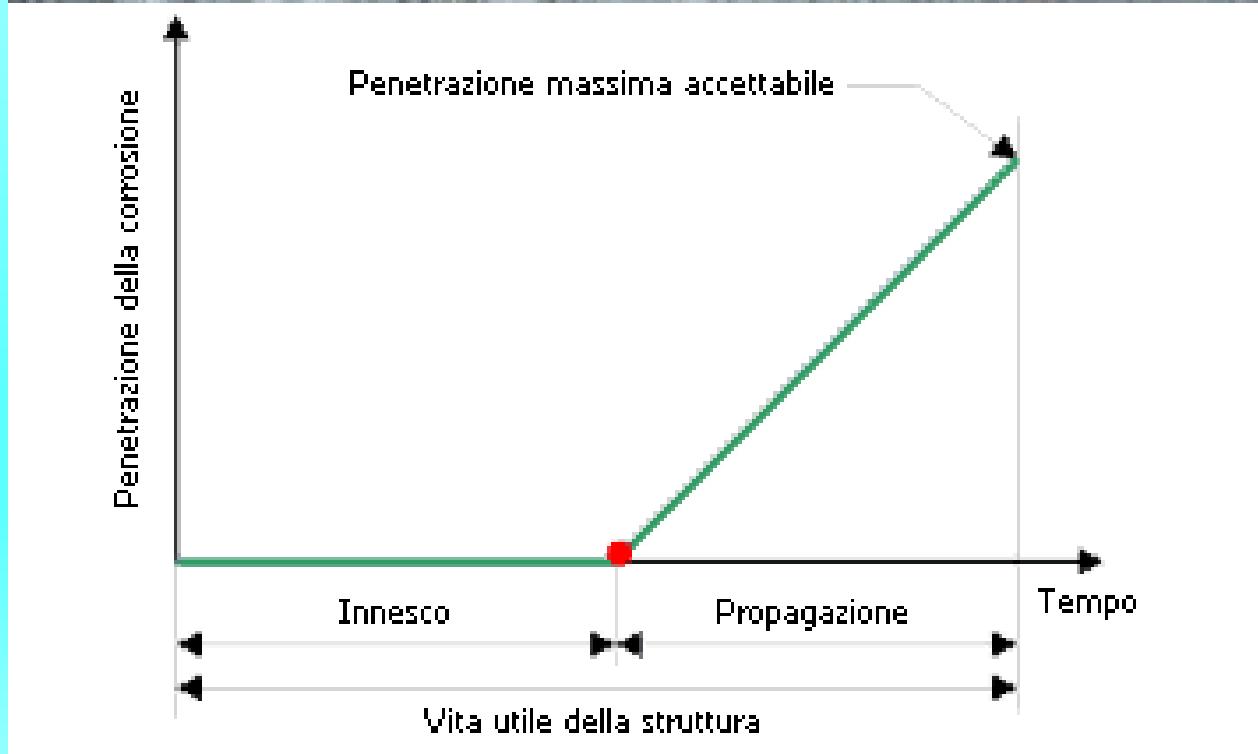
7

**CORROSIONE  
PER AZIONE DEI  
CLORURI**

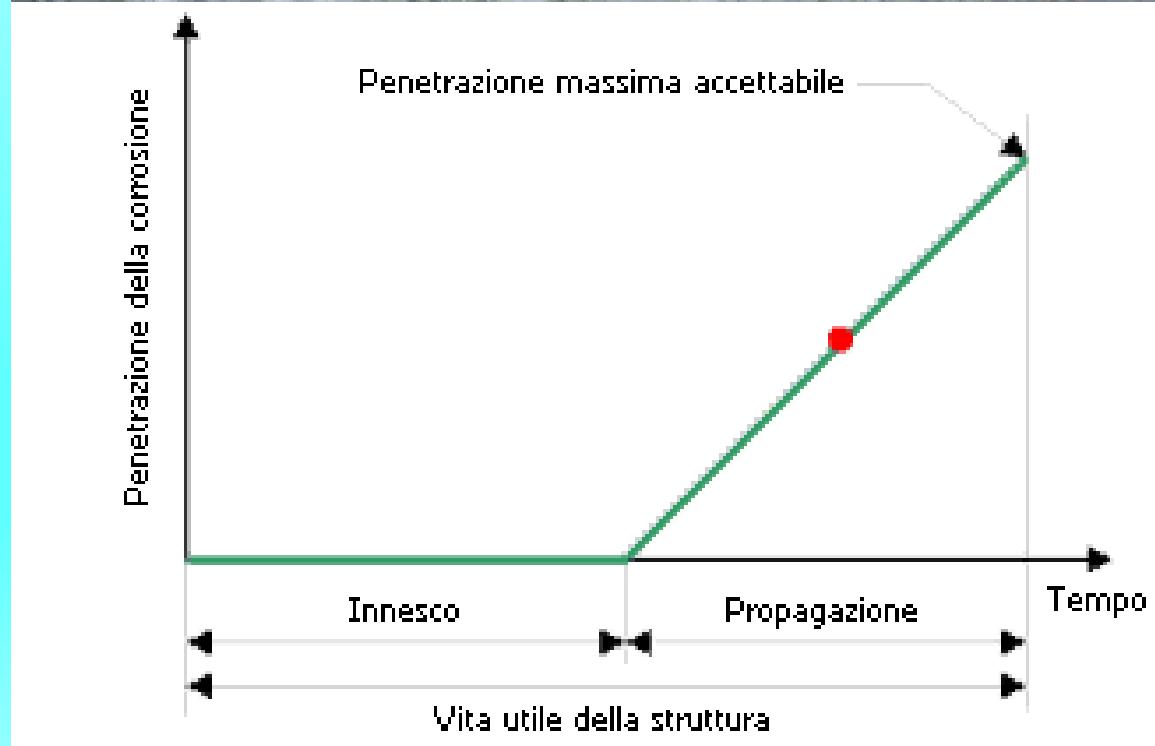
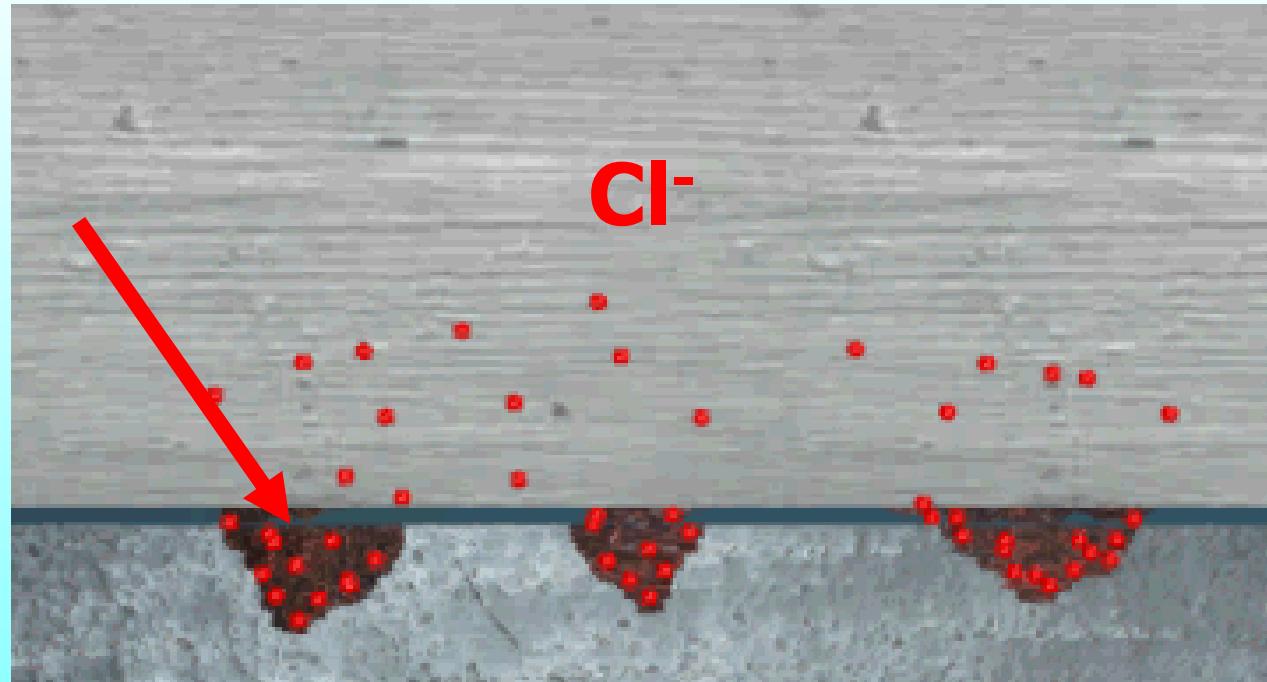
**Classe di  
esposizione XD-XS**

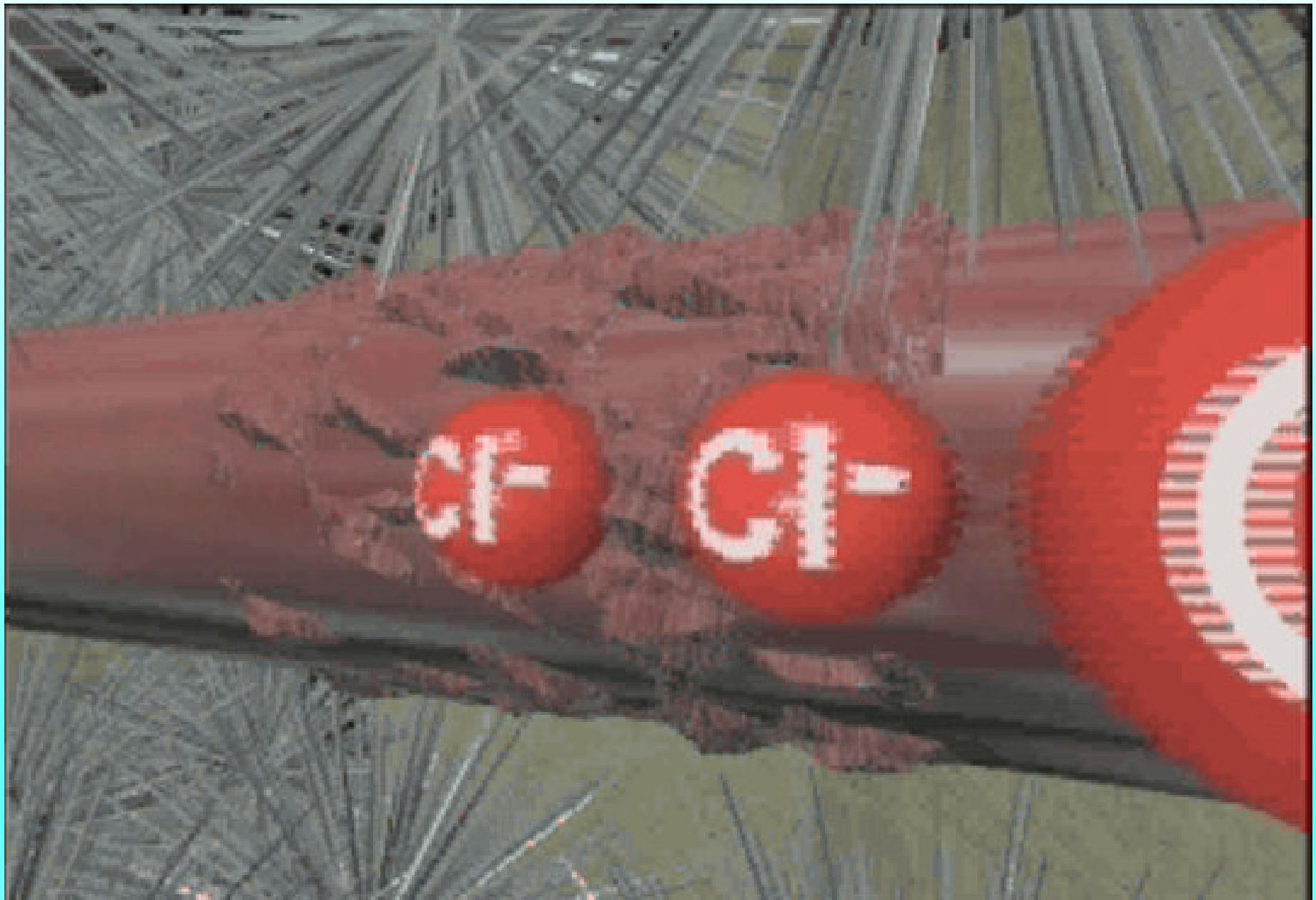
**I CLORURI SONO GENERALMENTE PRESENTI NELL'ACQUA DI MARE E, ARTIFICIALMENTE, NEI SALI DISGELANTI!**

**LO IONE CLORURO (complice), AL PARI DELL'ANIDRIDE CARBONICA, PENETRANDO IL COPRIFERRO, DANNEGGIA LOCALMENTE IL FILM DI OSSIDO PROTETTIVO. CON L'INGRESSO DI OSSIGENO E ACQUA (killer), POI, SI GENERA CORROSIONE ED ESPULSIONE DEL COPRIFERRO (la «ruggine» ha un volume di circa 5 volte superiore a quello del metallo che l'ha generata).**

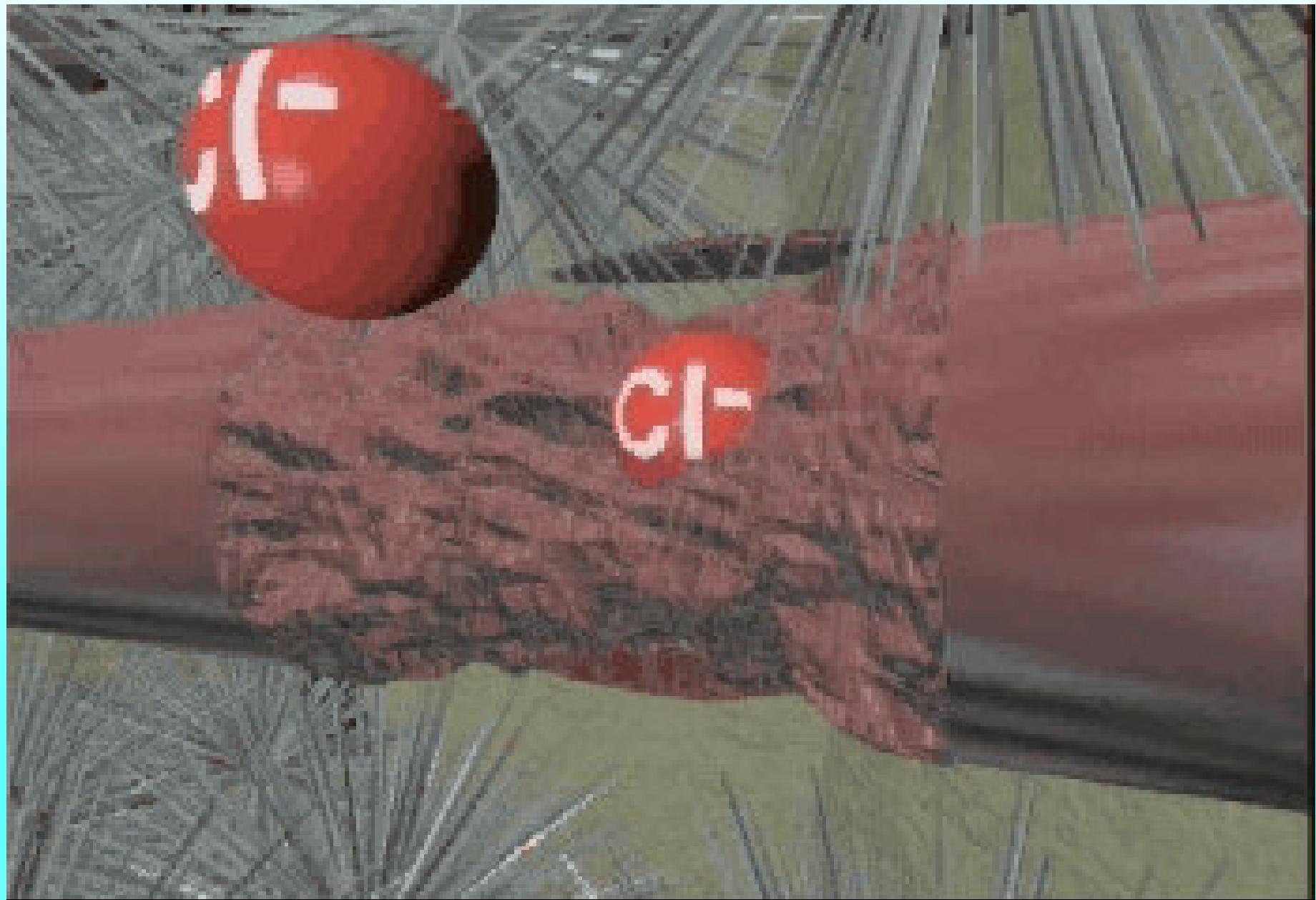


Pietro  
Pedefterri





M. Collepardi



M. Collepardi

# **Corrosione da cloruri «localizzata»**



Pietro Pedefterri

**Cratere corrosivo (PIT)**



Luigi Coppola

## VARIE FORME DI PIT



# **INFILTRAZIONE ACQUA (PONTI)**

## **Geomonitor Srl**



09.11.2014 11:01



# **CORROSIONE ARMATURA LENTA (PONTI)**

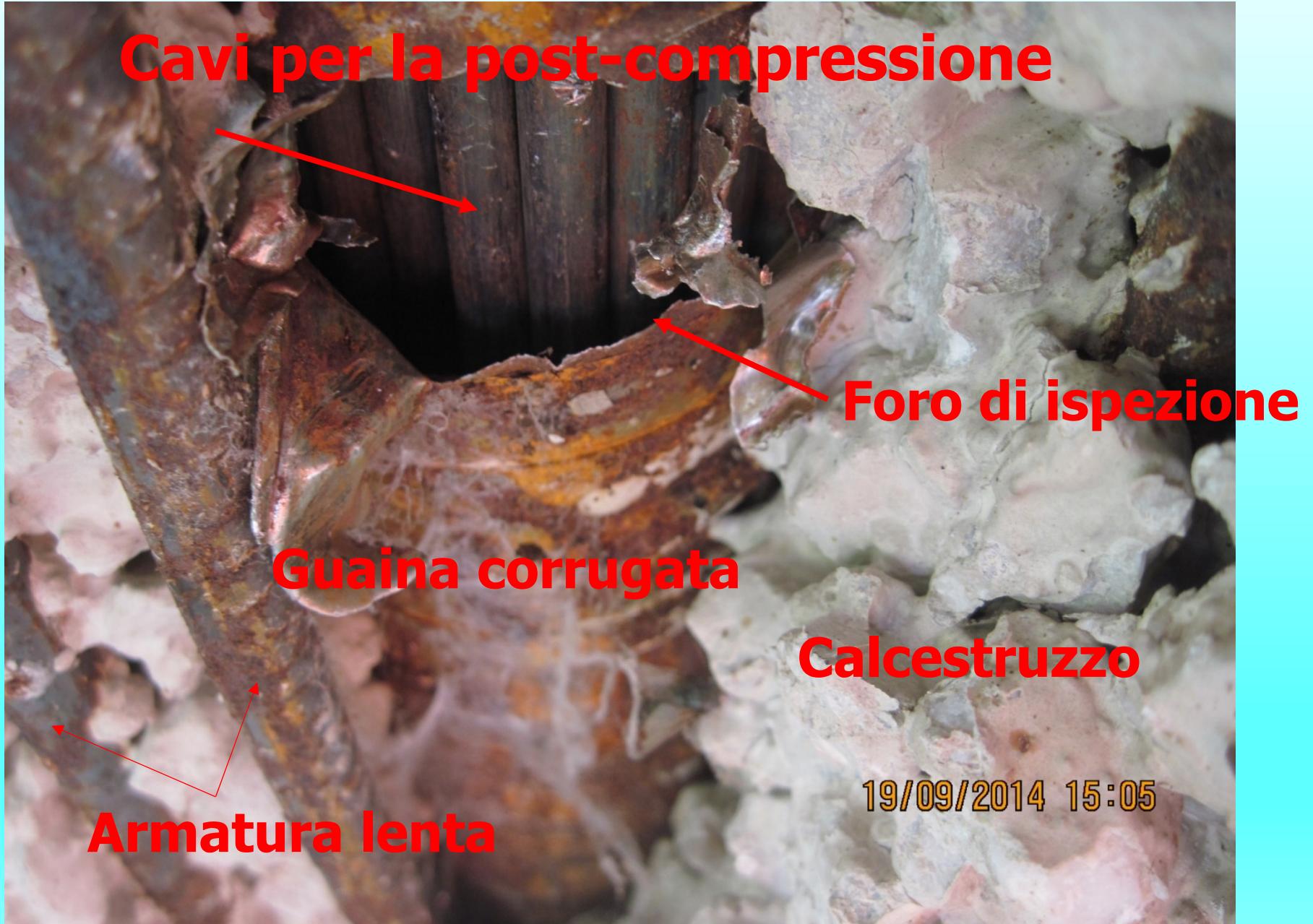
**Geomonitor Srl**



19/09/2014 13:20

# **CORROSIONE CAVI POST-TENSIONE (PONTI)**

**Geomonitor Srl**



Lucia Rosaria Mecca

8

# CORROSIONE SOTTO SFORZO

I METALLI SOTTO SPECIFICHE CONDIZIONI METTALLURGICHE, AMBIENTALI E DI CARICO POSSONO ESSERE SOGGETTI A FENOMENI CORROSIVI, NOTI CON IL NOME DI ***CORROSIONE SOTTO SFORZO O TENSOCORROSIONE***, CHE PROVOCANO CRICCHE NEL MATERIALE. IN ALCUNI CASI LE CRICCHE AVANZANO PERCHE' LA LORO PUNTA SI CORRODE A CAUSA DELLA REAZIONE ANODICA DEL PROCESSO DI CORROSIONE; IN ALTRI PERCHE' L'IDROGENO ATOMICO PRODOTTO DALLA REAZIONE CATODICA LA INFRAGLISCE (da qui il nome di *infragilimento da idrogeno*) E NE PROVOCA LA ROTTURA. QUESTA SECONDA VARIANTE E' QUELLA CHE PUO' PORTARE AL COSIDDETTO CEDIMENTO DA IDROGENO DEGLI ACCIAI AD ALTA RESISTENZA.



**Trefolo da 6/10"**  
**Tensione = 13.500**  
**kg/cmq**  
**Carico = 18.765 kg !!!!!**





Fig. 1.19 Crollo della Congress Hall di Berlino per cedimento da corrosione sotto sforzo di armature precomprese (1981)



Fig. 1.20 Cedimento da corrosione sotto sforzo (meccanismo idrogeno) di una trave di un ponte in Germania. (1996) c

Pietro Pedefterri

**Nelle strutture soggette alla penetrazione dei cloruri con conseguente corrosione da pitting, si creano le condizioni per lo sviluppo di idrogeno: pH = 2,5 e potenziale = -600 mV**

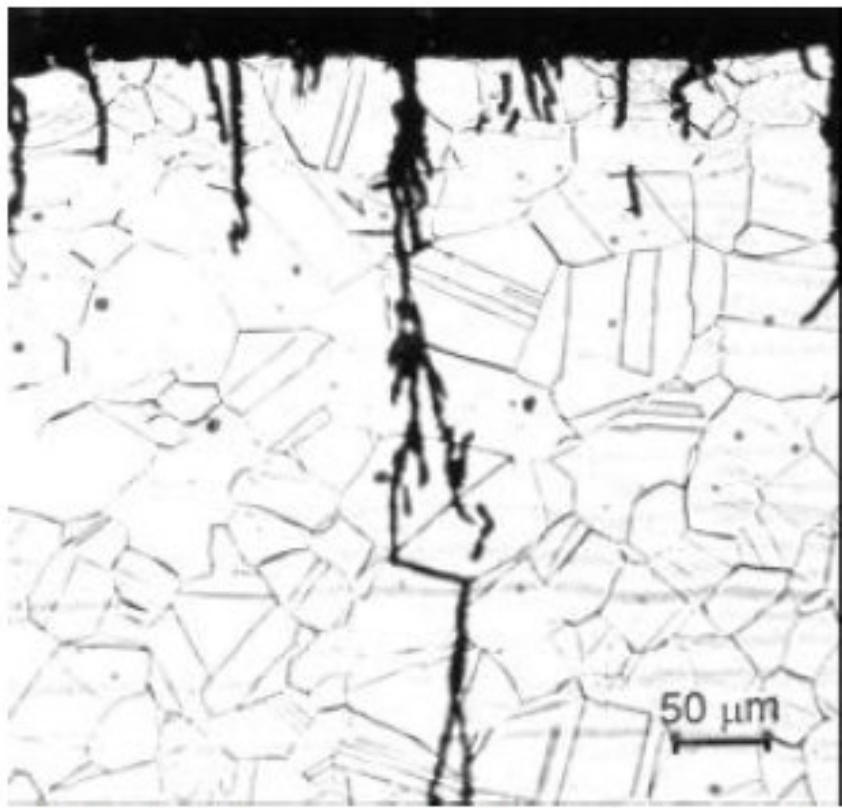


Fig. 1.13 Cricche transgranulari corrosione sotto sforzo in acciaio inossidabile AISI 316 in acqua di mare 70°C.

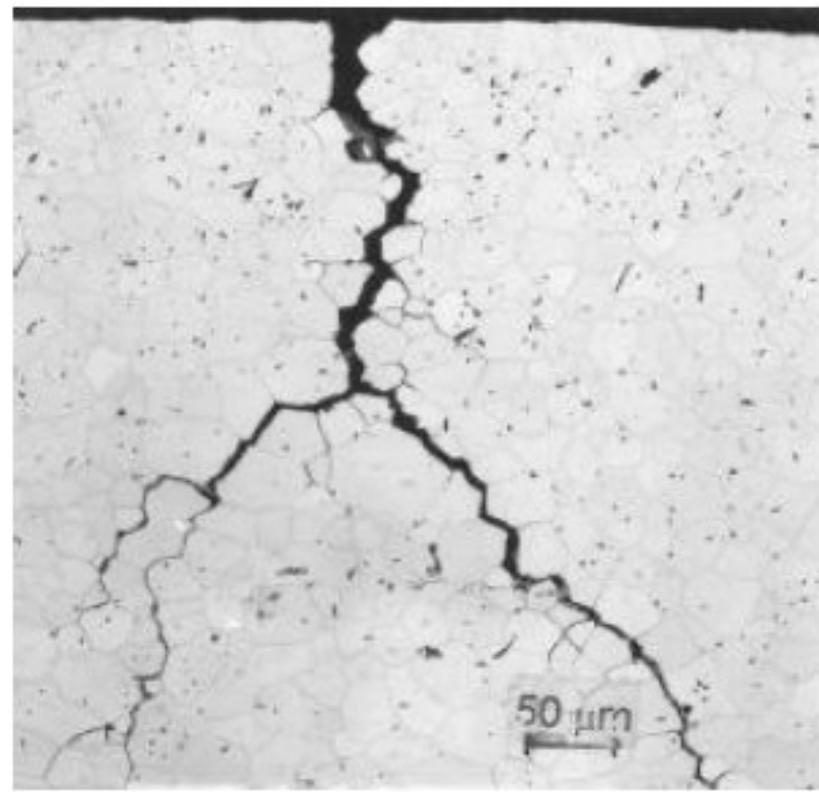


Fig. 1.14 Cricche transgranulari da corrosione sotto sforzo in AISI 304 in soda caustica a 200 °C.

Pietro Pedefterri

9

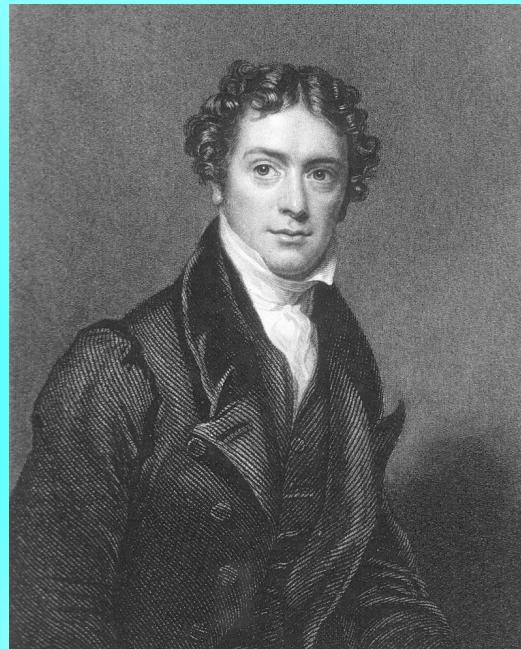
**DETTAGLI SULLE  
VELOCITA' DI  
CORROSIONE E  
SUGLI ASPETTI  
MECCANICI**

**PER STRUTTURE ESISTENTI LA VELOCITA' DI ASSOTTIGLIAMENTO  $V_{corr}$  ( $\mu\text{m}/\text{anno}$ ) VIENE STIMATA CON LA LEGGE DI FARADAY A PARTIRE DA MISURE DI INTENSITA' DI CORRENTE  $I_{corr}$  ( $\text{mA}/\text{m}^2$ ):**

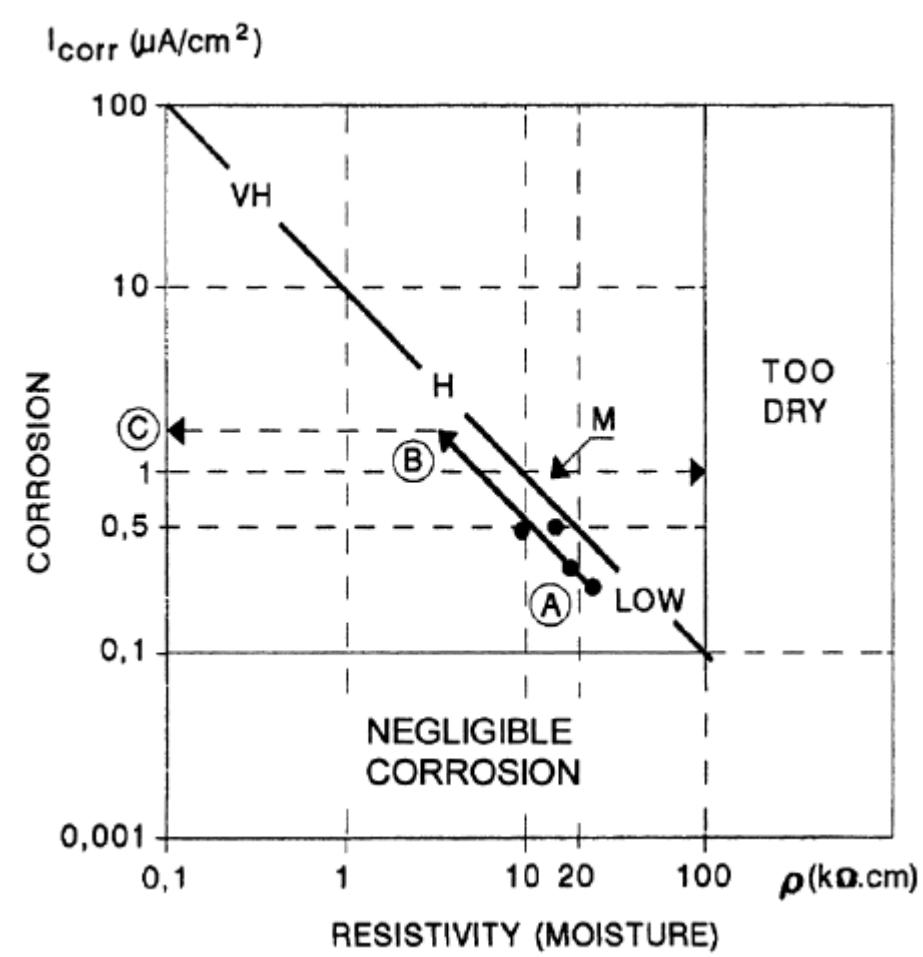
$$V_{corr} = 1.16 \cdot i_{corr}$$

**N.B.:**

**Si è visto sperimentalmente (Andrade) che la velocità di corrosione è maggiore nelle ore più calde e dopo un evento di pioggia .**



Faraday (1791-1867)



**La velocità di corrosione aumenta al diminuire della resistività elettrica.**

**$R = \rho \cdot (L/A)$  resistenza elettrica ( $\Omega$ )**

**$\rho = 1/\sigma$  resistività elettrica ( $\Omega \cdot \text{m}$ )**

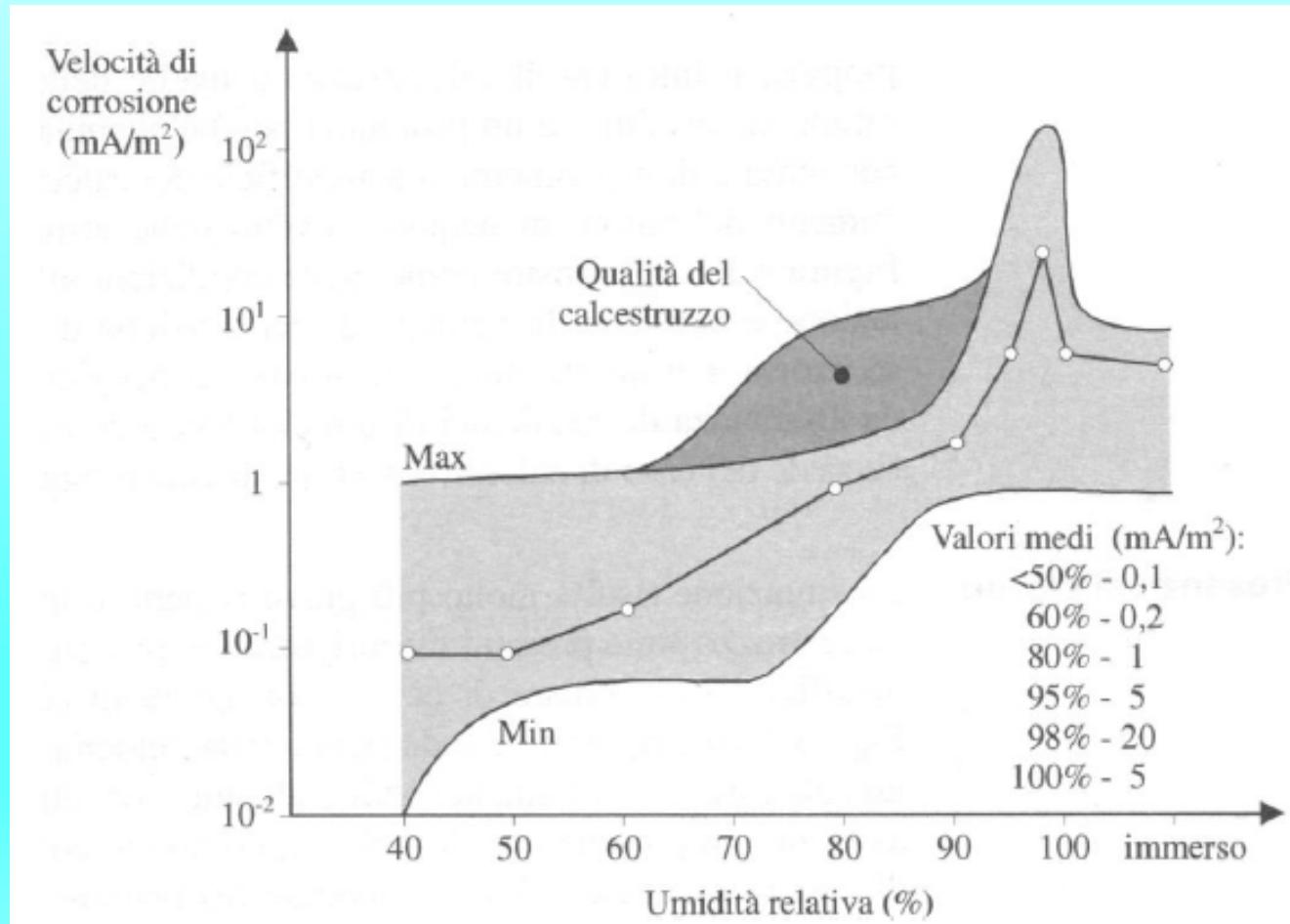
**$\sigma =$  conducibilità elettrica ( $\text{S}/\text{m}$ )**

**$L =$  lunghezza conduttore ( $\text{m}$ )**

**$A =$  area sezione conduttore ( $\text{m}^2$ )**

Dipendenza della velocità di corrosione dalla resistività del calcestruzzo, Andrade

**LA CINETICA CORROSIVA E' IN PARTE DOMINATA DALLA RESISTIVITA' DEL CALCESTRUZZO, QUINDI DAL SUO CONTENUTO IN ACQUA. INFATTI ALL'AUMENTARE DELL'UMIDITA', DIMINUISCE LA RESISTIVITA' E AUMENTA LA VELOCITA' DI CORROSIONE !**

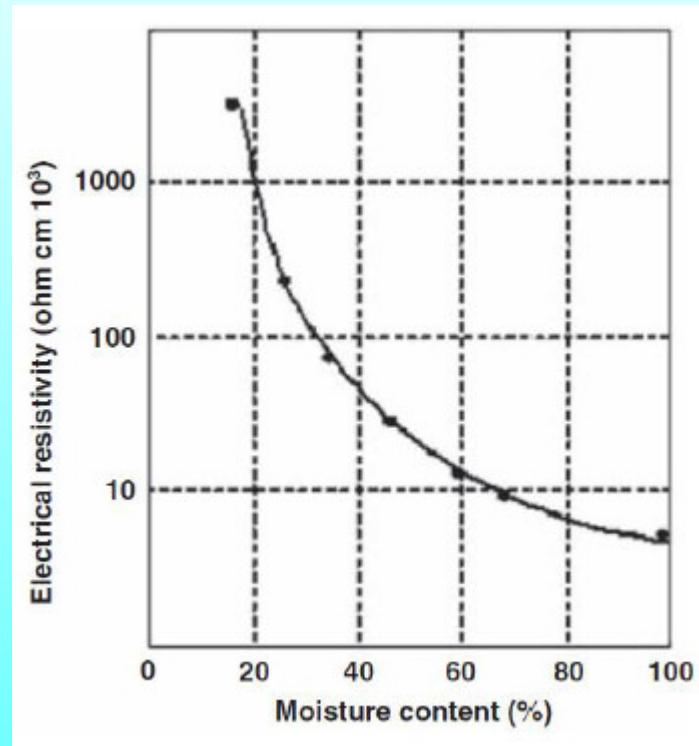


**100 – 200  
micron/anno  
con umidità  
vicina al  
100%**

Velocità di corrosione in funzione dell'umidità relativa, Pietro Pedefterri

# IN SINTESI :

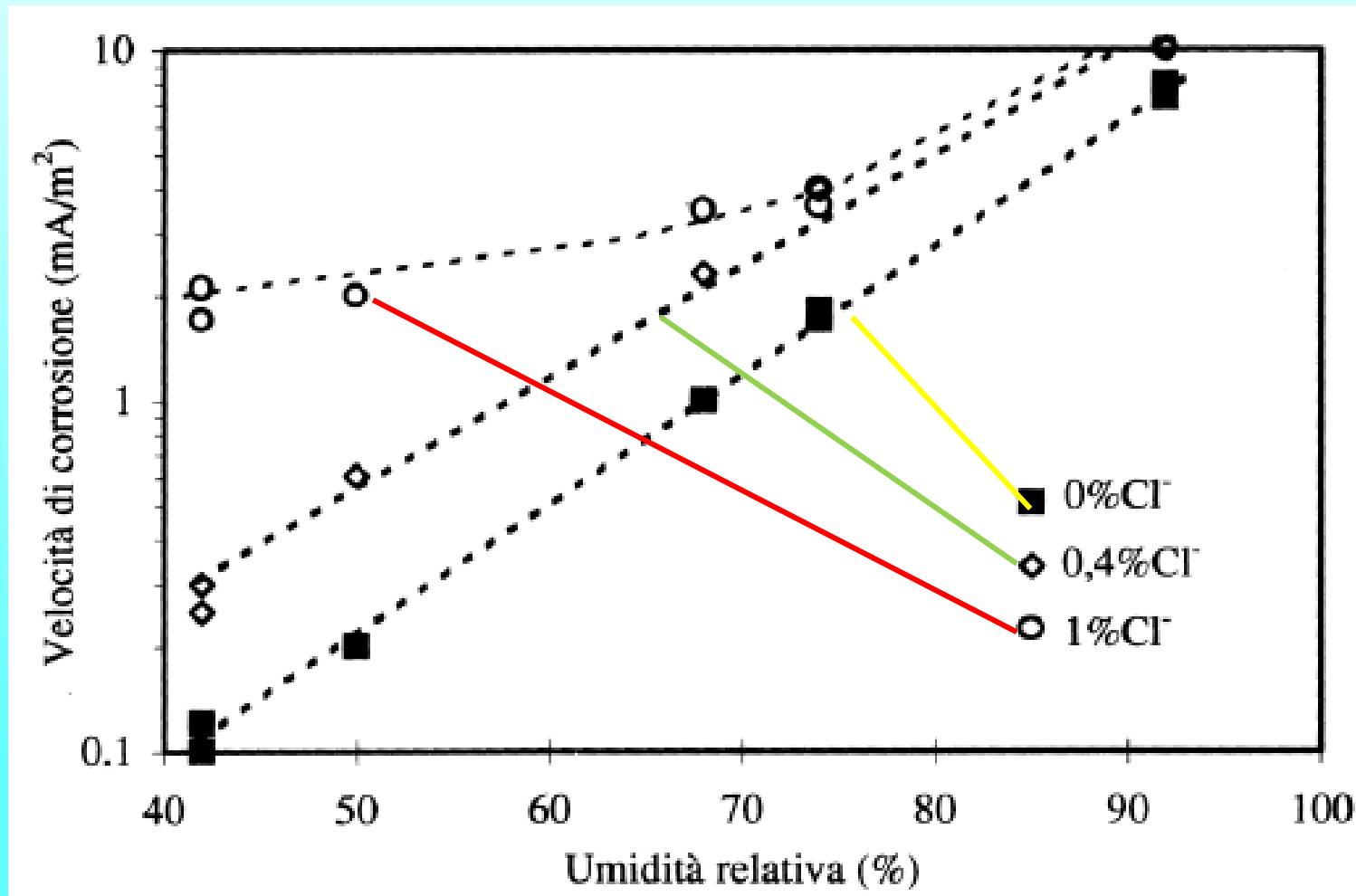
**U** ↑      **R** ↓



Gjorv

**Icorr** ↑      → **Vcorr** ↑

**La velocità di corrosione aumenta se, nel calcestruzzo carbonatato, si presentano i cloruri.**



Relazione tra umidità relativa e velocità di corrosione in presenza o in assenza di piccoli tenori di cloruri, Pedferri e Bertolini

0% Cl <sup>-</sup>	$I_{CORR} = 0,003 \cdot e^{0,0853(U.R.)}$	$\forall$ U.R.
0,4% Cl <sup>-</sup>	$I_{CORR} = 0,0132 \cdot e^{0,0745(U.R.)}$	$\forall$ U.R.
1% Cl <sup>-</sup>	$I_{CORR} = 1,0588 \cdot e^{0,0159(U.R.)}$	$40\% \leq \text{U.R.} \leq 65,5\%$
1% Cl <sup>-</sup>	$I_{CORR} = 0,3269 \cdot e^{0,0338(U.R.)}$	$65,5\% \leq \text{U.R.} \leq 74\%$
1% Cl <sup>-</sup>	$I_{CORR} = 0,0132 \cdot e^{0,0654(U.R.)}$	$74\% \leq \text{U.R.} \leq 100\%$

Velocità di corrosione in funzione del contenuto di cloruri e dell'umidità relativa,  
Assinnata

Cl <sup>-</sup> ≤ 0,4%	$I_{CORR} = 0$
Cl <sup>-</sup> ≥ 0,4%	$I_{CORR} = 0,1376 \cdot (Cl\%)^{2,8614}$

Velocità di corrosione in funzione del contenuto di cloruri, Assinnata

Umidità relativa (%)	Velocità di corroione nel calcestruzzo carbonatato (µm/anno)	Velocità di corrosione nel calcestruzzo contaminato da cloruri (µm/anno)
99	2	34
95	50	122
90	12	98
85	3	78
80	1	61
75	0.1	47
70	0	36
65	0	27
60	0	19
55	0	14
50	0	9

Velocità di corrosione in calcestruzzo carbonatato ed esposto a cloruri, RILEM, 1996

**UNA FORMULAZIONE CHE TIENE CONTO DI DIVERSI FATTORI E' QUELLA PROPOSTA DA LIU E WEYERS (da Chen et al., 2008), IN CUI LA VELOCITA' DI CORROSIONE ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) IN CALCESTRUZZO CONTAMINATO DA CLORURI E' ESPRESSA COME:**

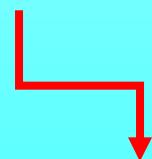
$$i_{corr} = 0.926 \exp \left[ 7.98 + 0.7771 \ln(1.69C_t) - \frac{3006}{T} - 0.000116R_c + 2.24t^{-0.215} \right]$$

**C<sub>t</sub> = contenuto di cloruri ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )**

**T = temperatura ( $^{\circ}\text{K}$ )**

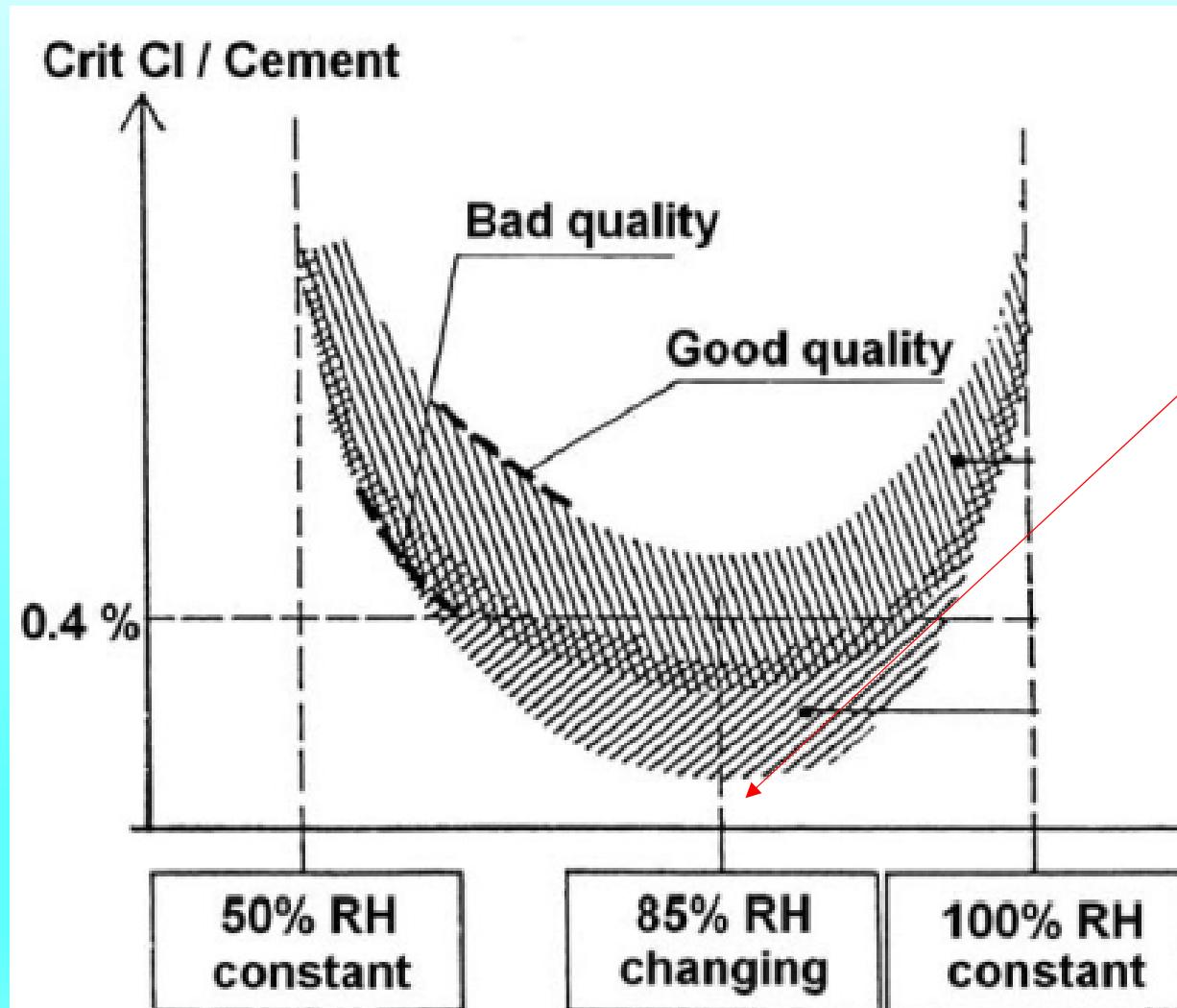
**R<sub>c</sub> = resistenza ( $\Omega$ )**

**T = tempo (anni)**



$$R_c = \exp[8.03 - 0.549 \ln (1 + 1.69C_t)]$$

## IL CONTENUTO CRITICO DEI CLORURI E' DEFINITO COME QUELLO NECESSARIO PER LA DEPASSIVAZIONE DELL'ACCIAIO.



**ATTENZIONE:**  
Si abbassa il  
contenuto critico  
all'aumentare  
dell'umidità relativa  
(fino a circa 85%) e  
per calcestruzzi  
scadenti.

Relazione qualitativa tra contenuto critico di cloruri (Ccr), condizioni ambientali e qualità del calcestruzzo, Gjorv

**10**

**DAL DANNO  
LOCALIZZATO AL  
COLLASSO  
STRUTTURALE**



cafecivil



..... è un po' come andare a picconare  
al piede di un pilastro !



**DOMANDA:**  
**Esiste la possibilità di  
modellare il danno  
localizzato ????**



**EDIFICIO – ANNI  
SETTANTA - IN  
C.A. SOGGETTO A  
FENOMENI DI  
DEGRADO**

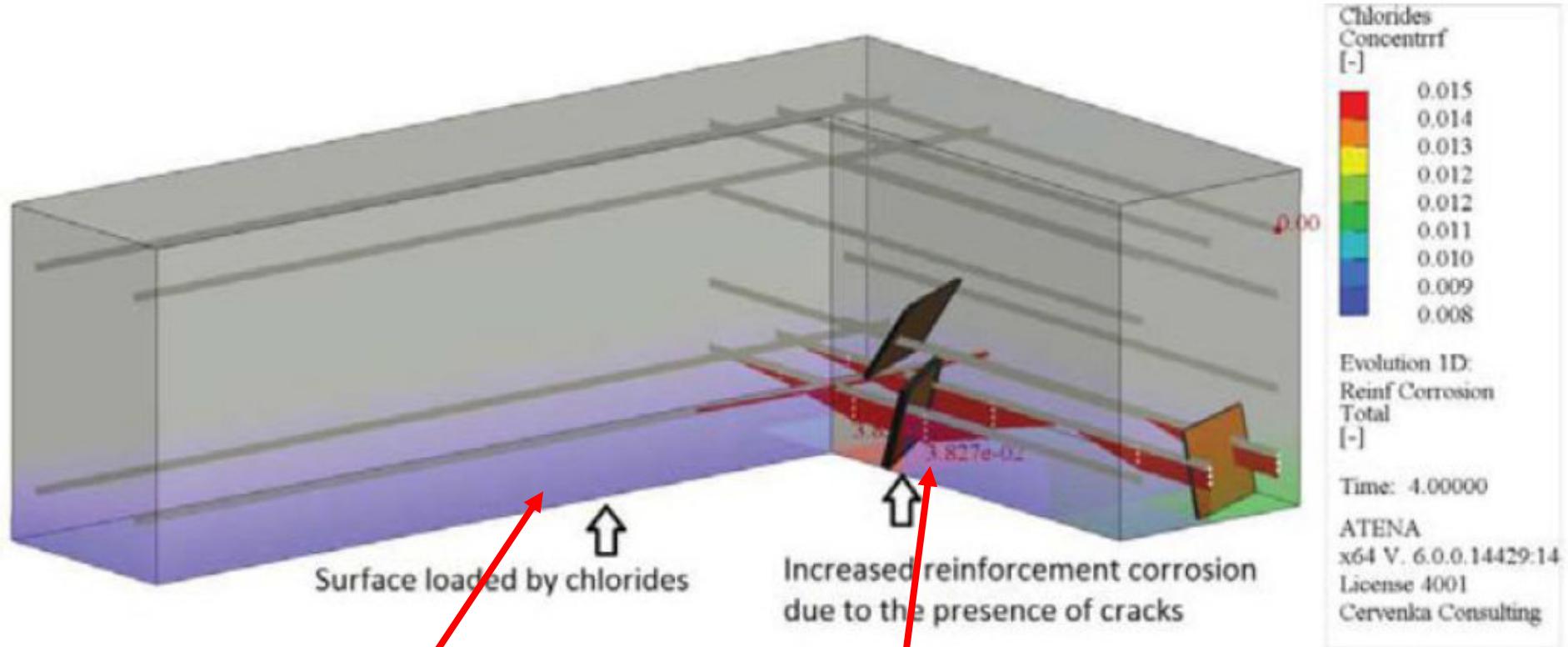
Felitti-Mecca

1



Felitti-Mecca

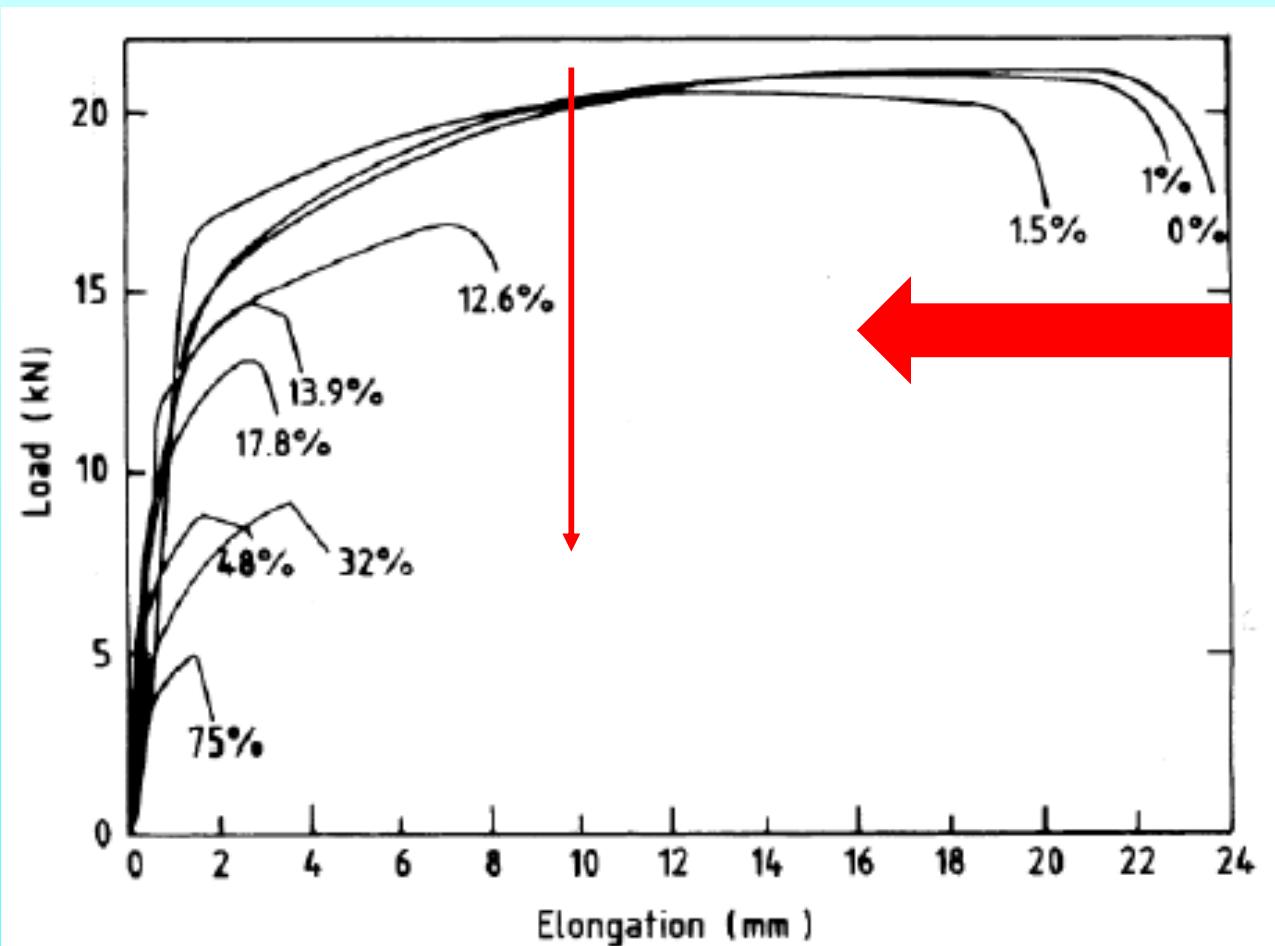
## EVOLUZIONE TEMPORALE DELLO STATO DI DANNO IN UN ELEMENTO TRAVE SOGGETTO AD ATTACCO DEI CLORURI



Superficie di attacco cloridrico

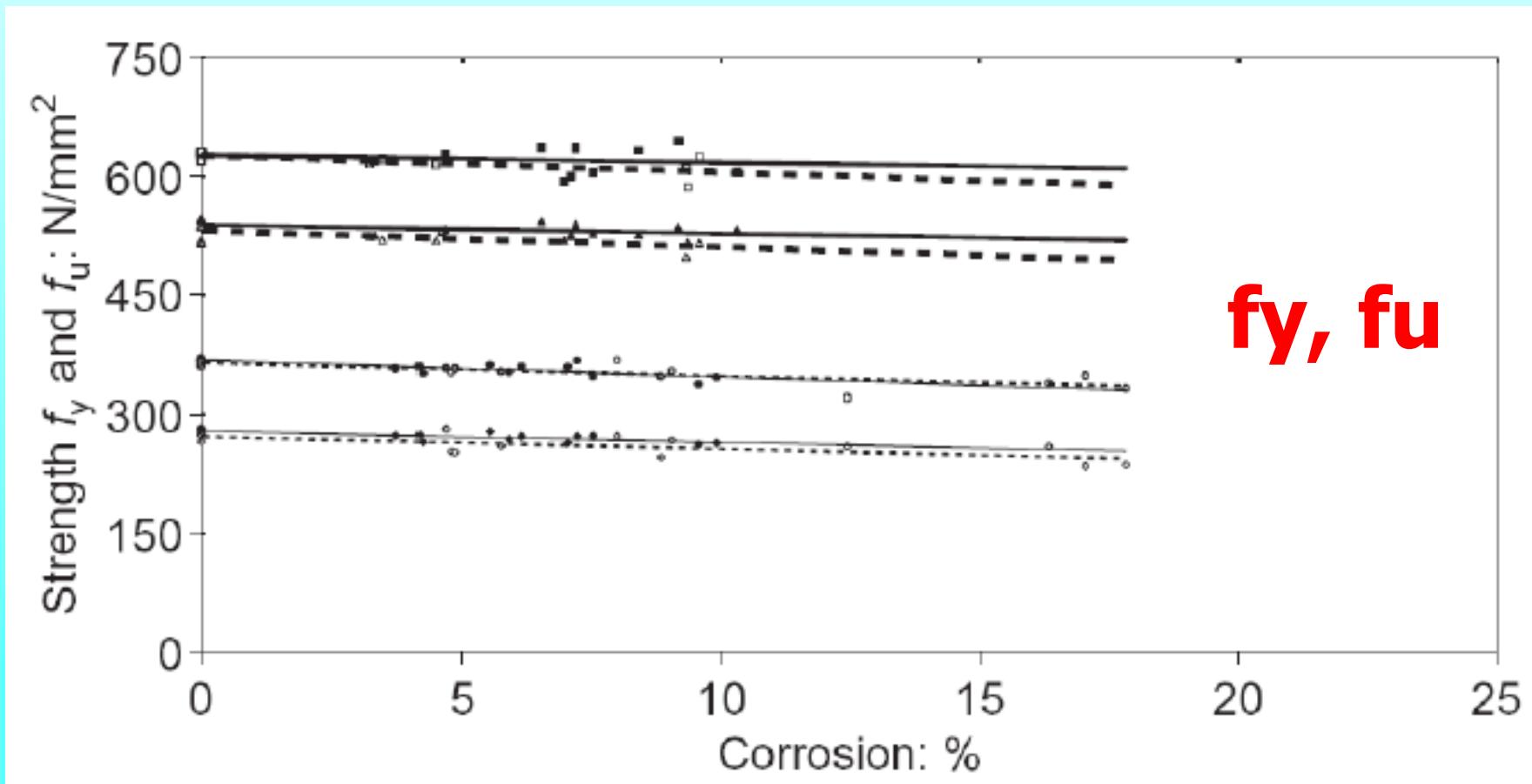
Avanzamento corrosione barre di armatura  
in corrispondenza del calcestruzzo fessurato

# PERDITA DI DUTTILITA' DELL'ACCIAIO



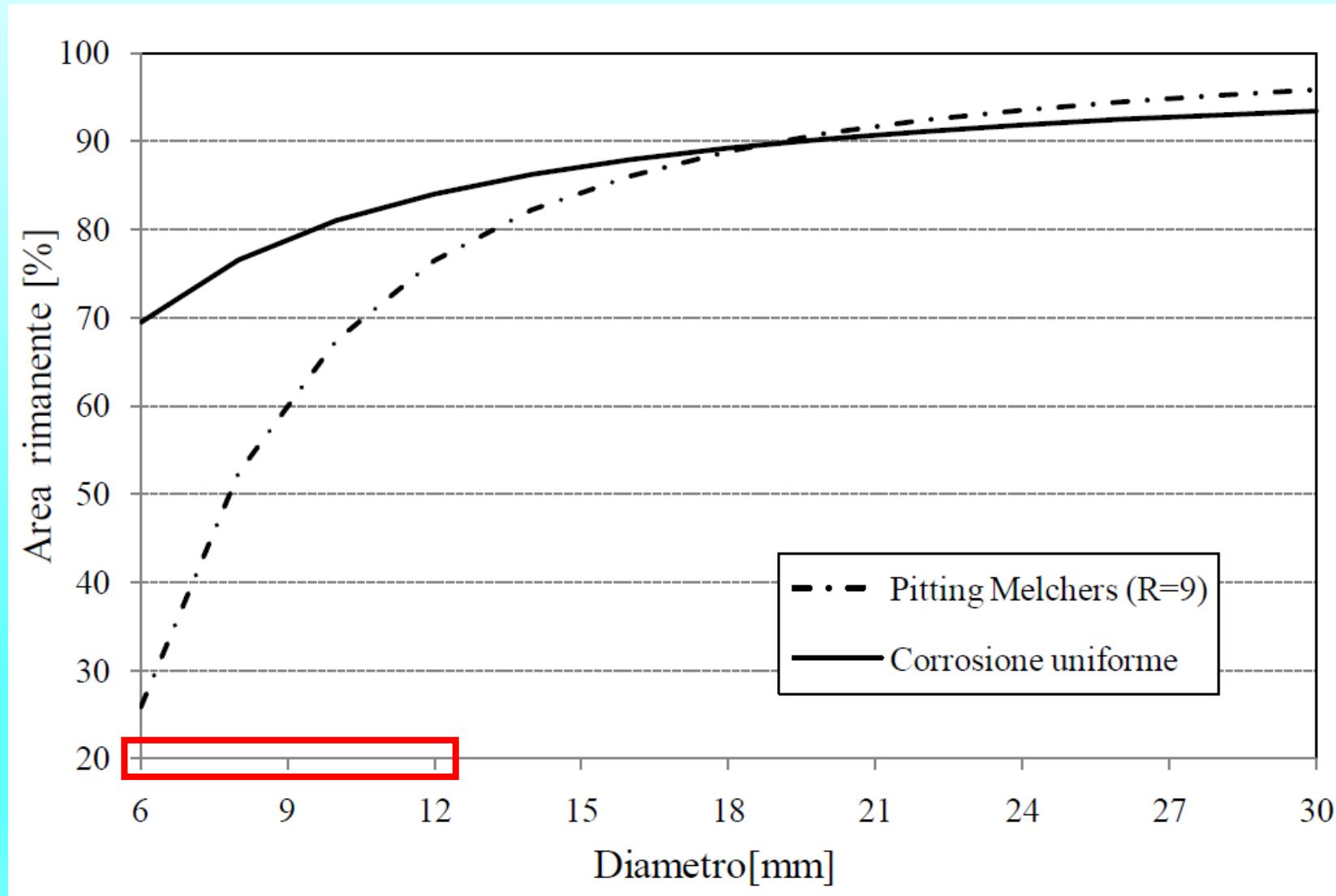
Curve carico-allungamento per barre con diverso livello di corrosione (espresso come perdita in massa in %, Almusallam, 2001)

# VARIAZIONE PROPRIETA' MECCANICHE DELL'ACCIAIO



Resistenza residua di barre di armatura corrosa, Du, 2005

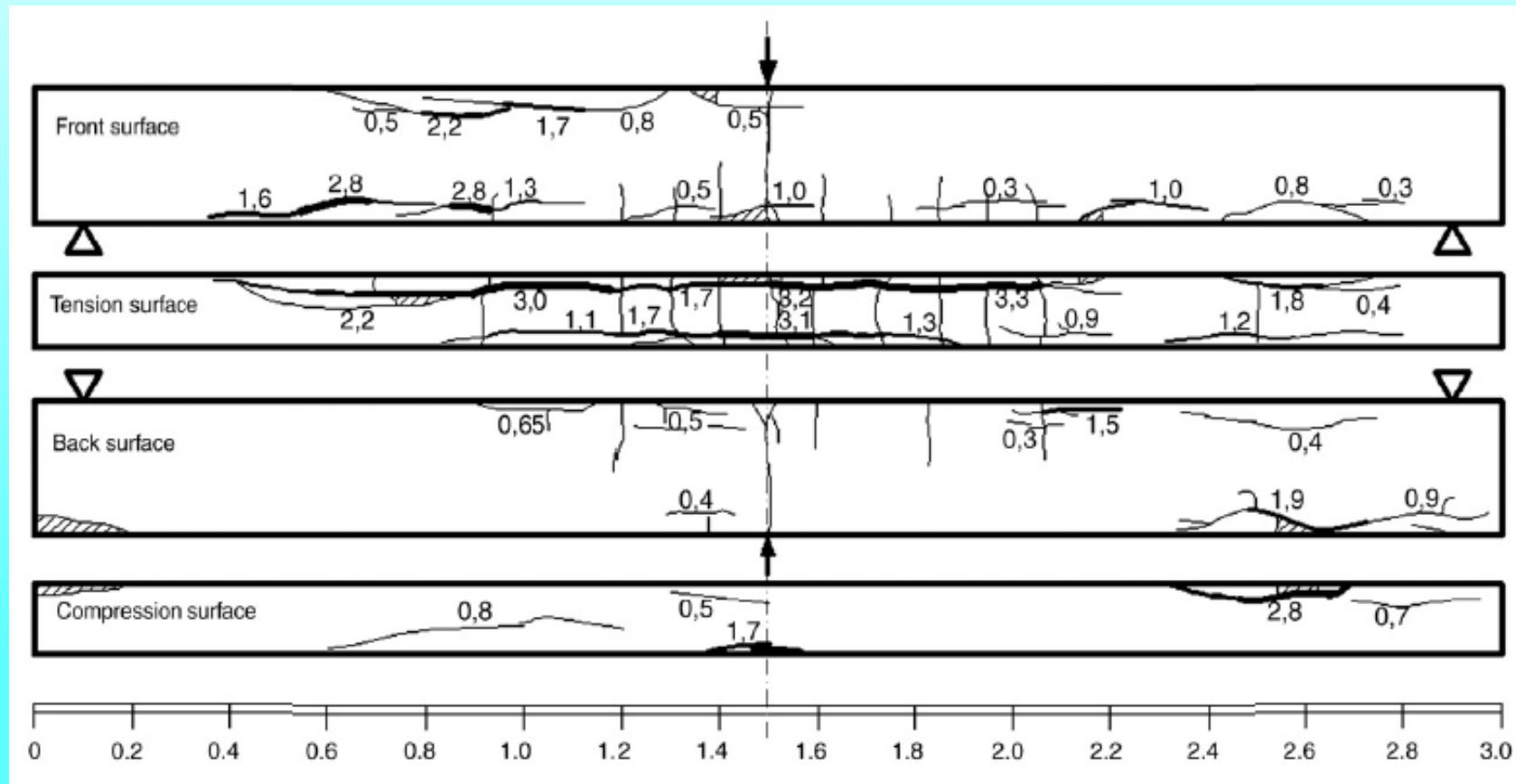
**In alcuni modelli si registra un maggior danneggiamento da pitting nelle barre di piccolo diametro (staffe)**



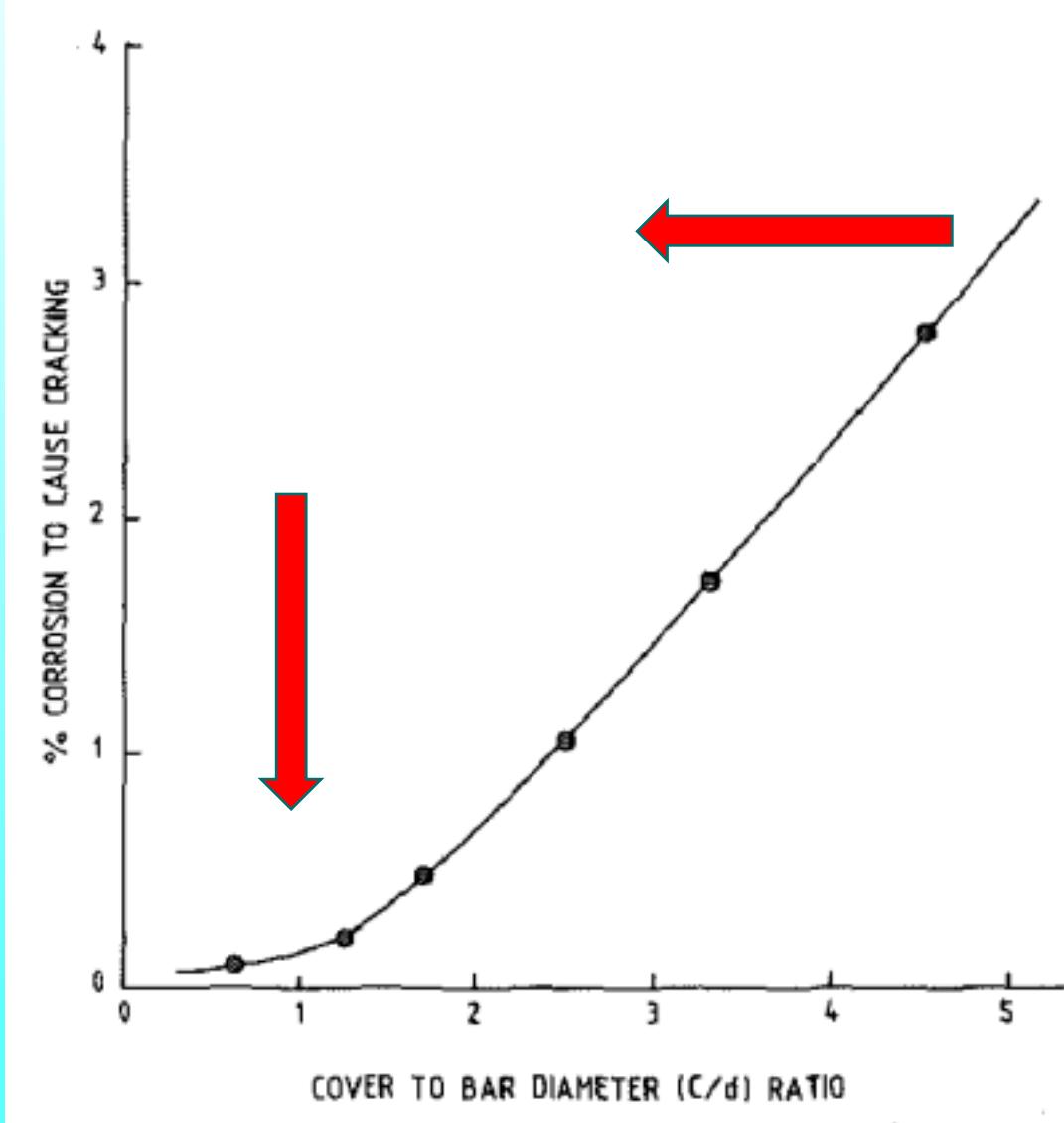
Vergani, 2010

# EFFETTI DELLA CORROSIONE SUL CALCESTRUZZO

**La conseguenza della fessurazione del copriferro è una riduzione  
della resistenza a compressione del calcestruzzo oltre alla  
perdita di aderenza**

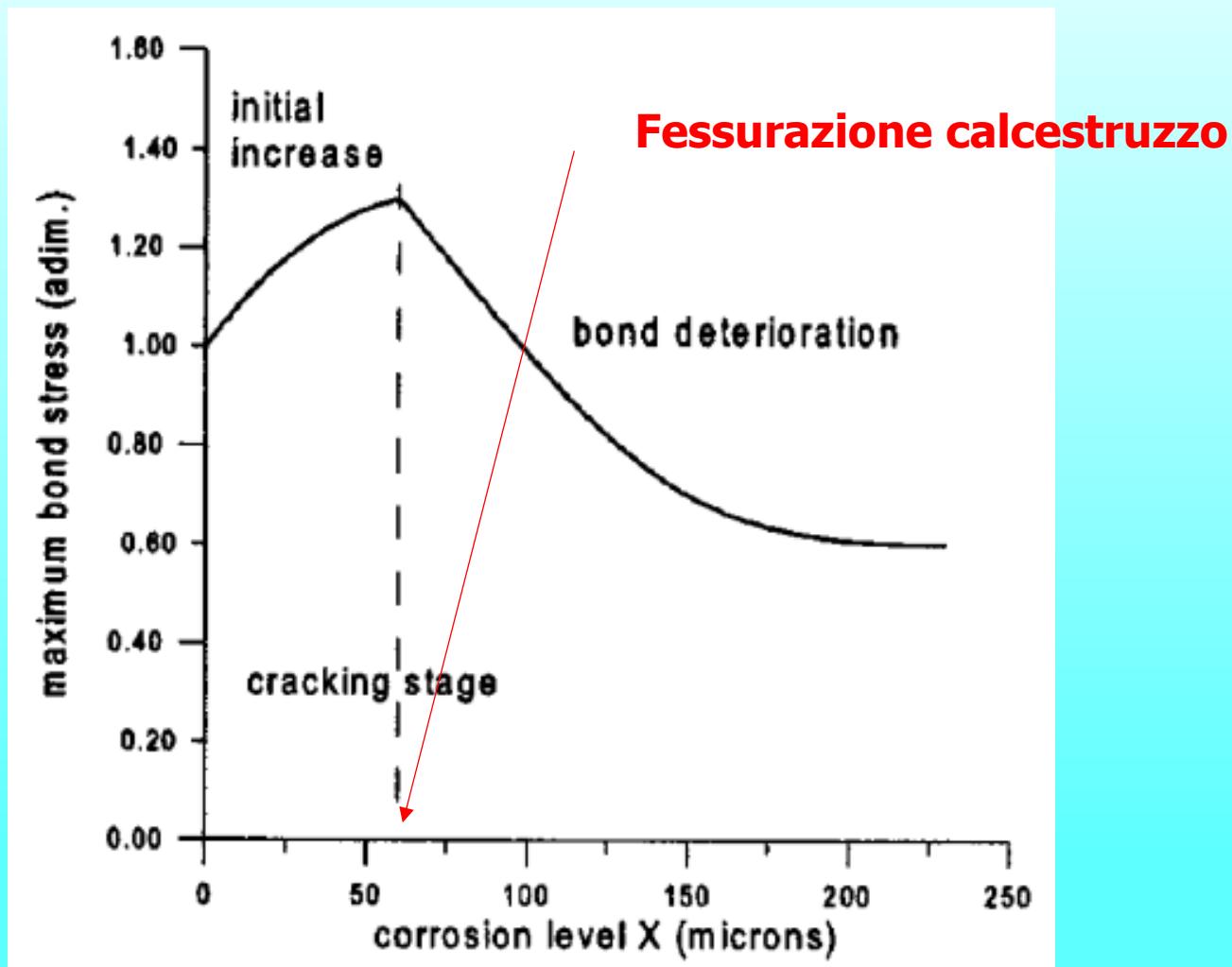


Andamento delle fessure in una trave di sezione 150x280 mm, armata con due Fi 6 superiori e due Fi 12 inferiori, soggetta a corrosione naturale, dopo 23 anni (le parti rettinate rappresentano il calcestruzzo distaccato), Zhang, 2009



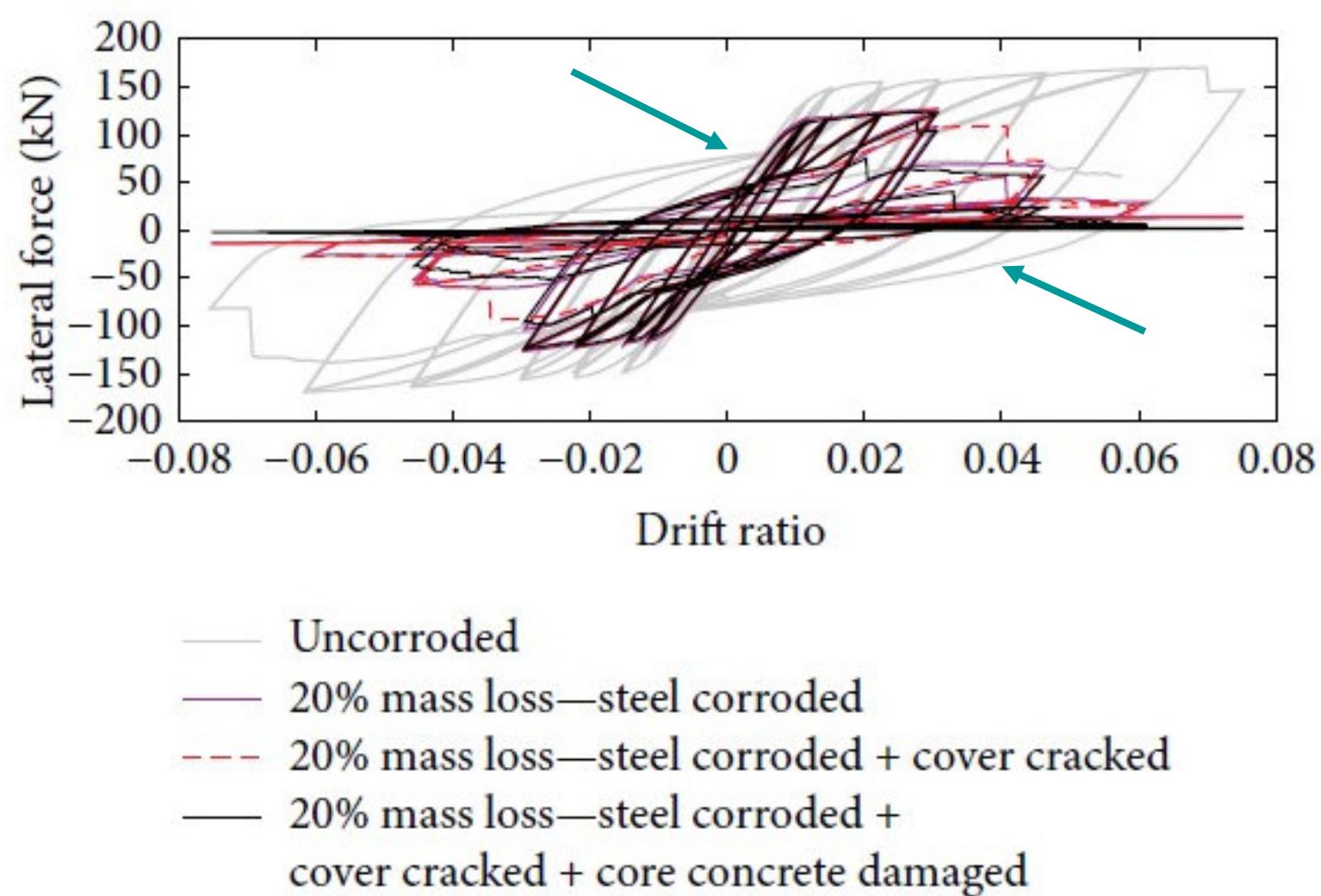
Relazione tra il rapporto tra il copriferro e il diametro della barra (c/d) ed il livello di corrosione necessario per avere l'inizio della fessurazione, Rasheeduzzafar, 1990

# PERDITA DI ADERENZA



Variazione della tensione di aderenza massima con il livello di corrosione

## VARIAZIONE CICLI ISTERETICI



**DOMANDA:**  
**Esiste la possibilità di**  
**modellare il danno**  
**localizzato su un**  
**MODELLO GLOBALE ???**

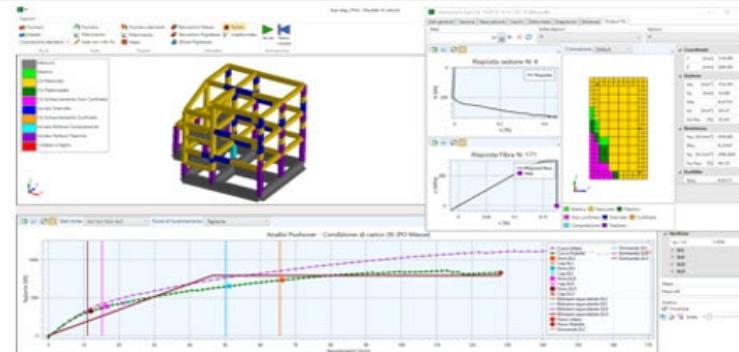


## SCOPRILo CON I NOSTRI WEBINAR GRATUITI

LEZIONE N. 8 - **VENERDÌ 29 maggio 2020** - ore 15:30

### MODELLI DI DEGRADO

Prof. Matteo Felitti - Ing. Francesco Oliveto - Ing. Biagio Pisano - durata 180'



#### PROGRAMMA

Ore 15,30 - 16,10

IL DEGRADO DELLE STRUTTURE IN C.A. E C.A.P.

**Prof. Matteo Felitti** - Università di Napoli

Ore 16,10 - 17,30

MODELLI DI DANNO PER LE STRUTTURE IN C.A.

**Ing. Francesco Oliveto** - Esperto in analisi numeriche avanzate

Ore 17,30 - 18,30

IMPLEMENTAZIONE DEI MODELLI IN FaTA Next

**Ing. Biagio Pisano** - Analista STACEC



richiesti  
**Crediti formativi CNI**

iscrivi

partecipa

#### TUTTE LE LEZIONI:

11.03.2020 ♦ Lezione 1. La modellazione delle strutture [guarda](#)

20.03.2020 ♦ Lezione 2. Gestione approfondita delle armature [guarda](#)

27.03.2020 ♦ Lezione 3. Le strutture esistenti. [guarda](#)

09.04.2020 ♦ Lezione 4. Modellazione e consolidamento degli elementi di fondazione [guarda](#)

24.04.2020 ♦ Lezione 5. Progettazione di strutture in acciaio [guarda](#)

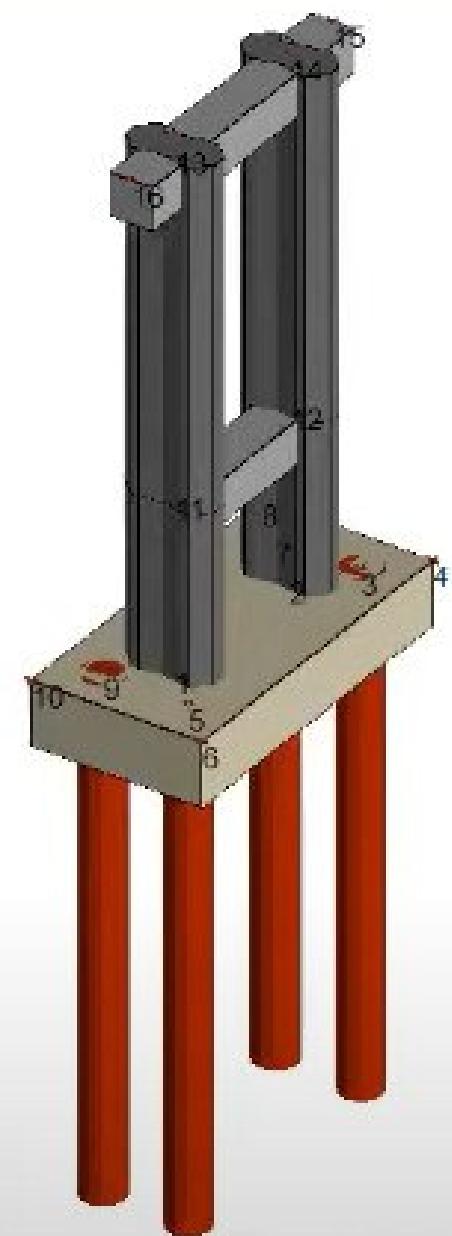
08.05.2020 ♦ Lezione 6. Analisi non lineari. Parte I. Applicazione dei modelli e teorie utilizzate [guarda](#)

22.05.2020 ♦ Lezione 7. Analisi non lineari. Parte II. Analisi dinamica non lineare e dispositivi antisismici [guarda](#)

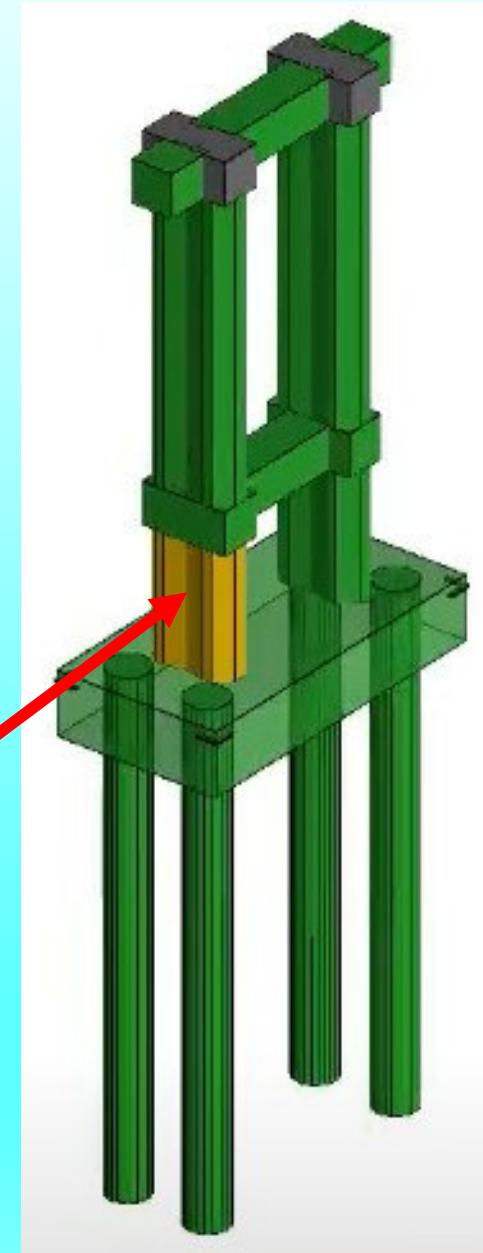
29.05.2020 ♦ Lezione 8. Modelli di degrado integrati in FaTA Next [guarda](#)

# PRESENTAZIONE DEL 29/05/2020

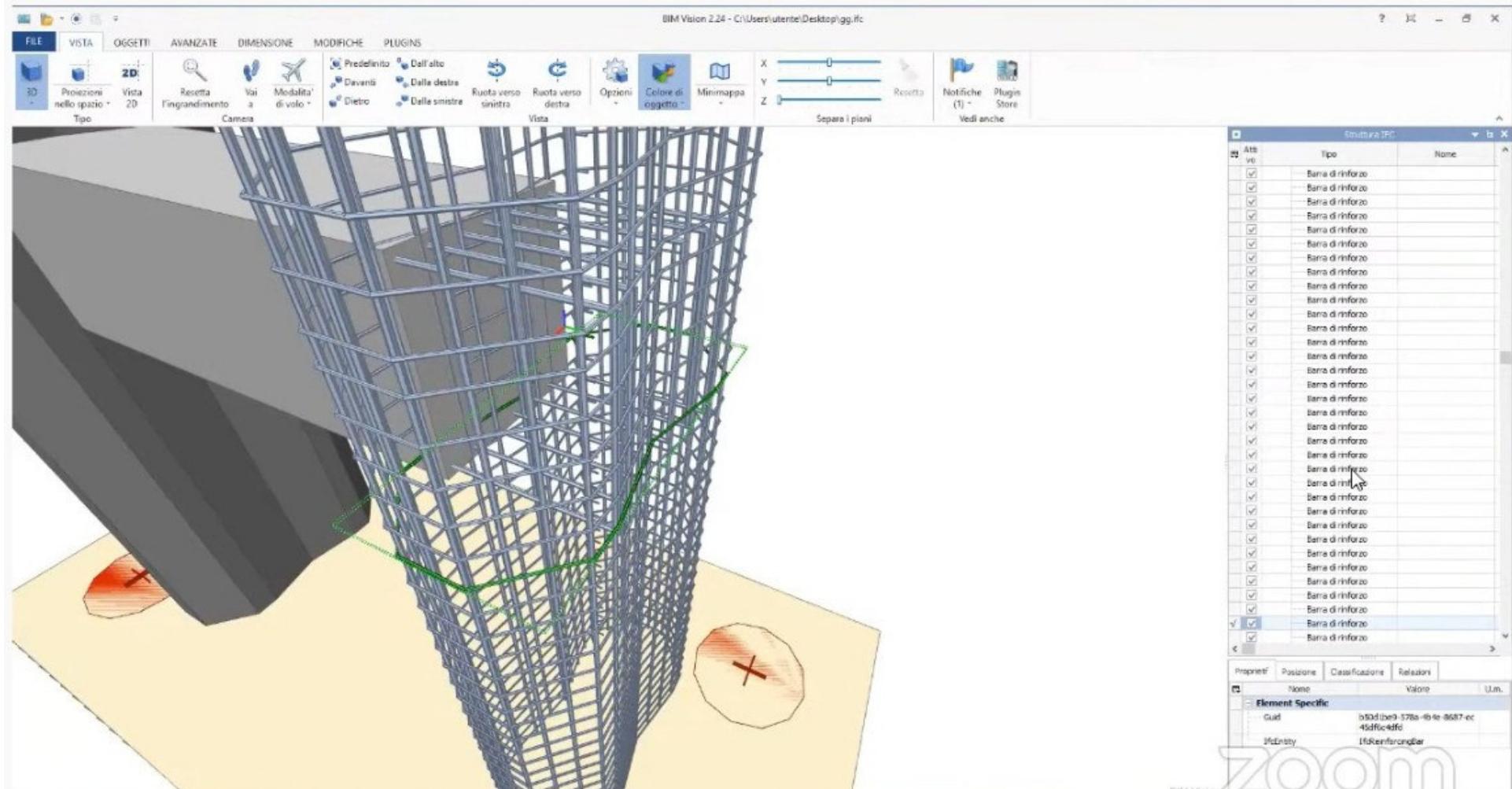
<https://www.youtube.com/watch?v=YVVKAu4Rjs8>



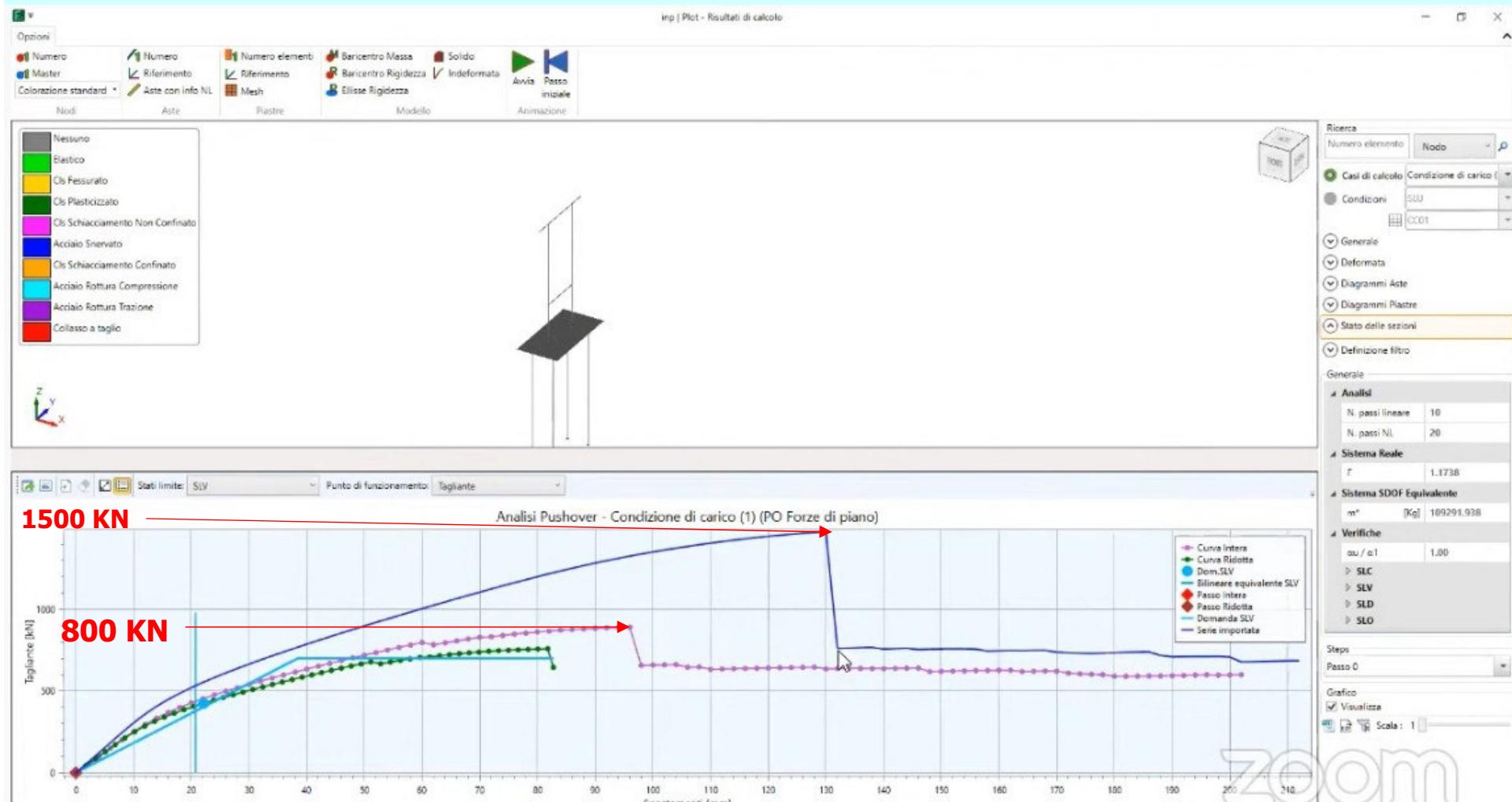
Esempio pila  
da ponte  
**INTEGRA** e  
con  
**DEGRADO**  
localizzato  
alla base



# Armatura in BIM



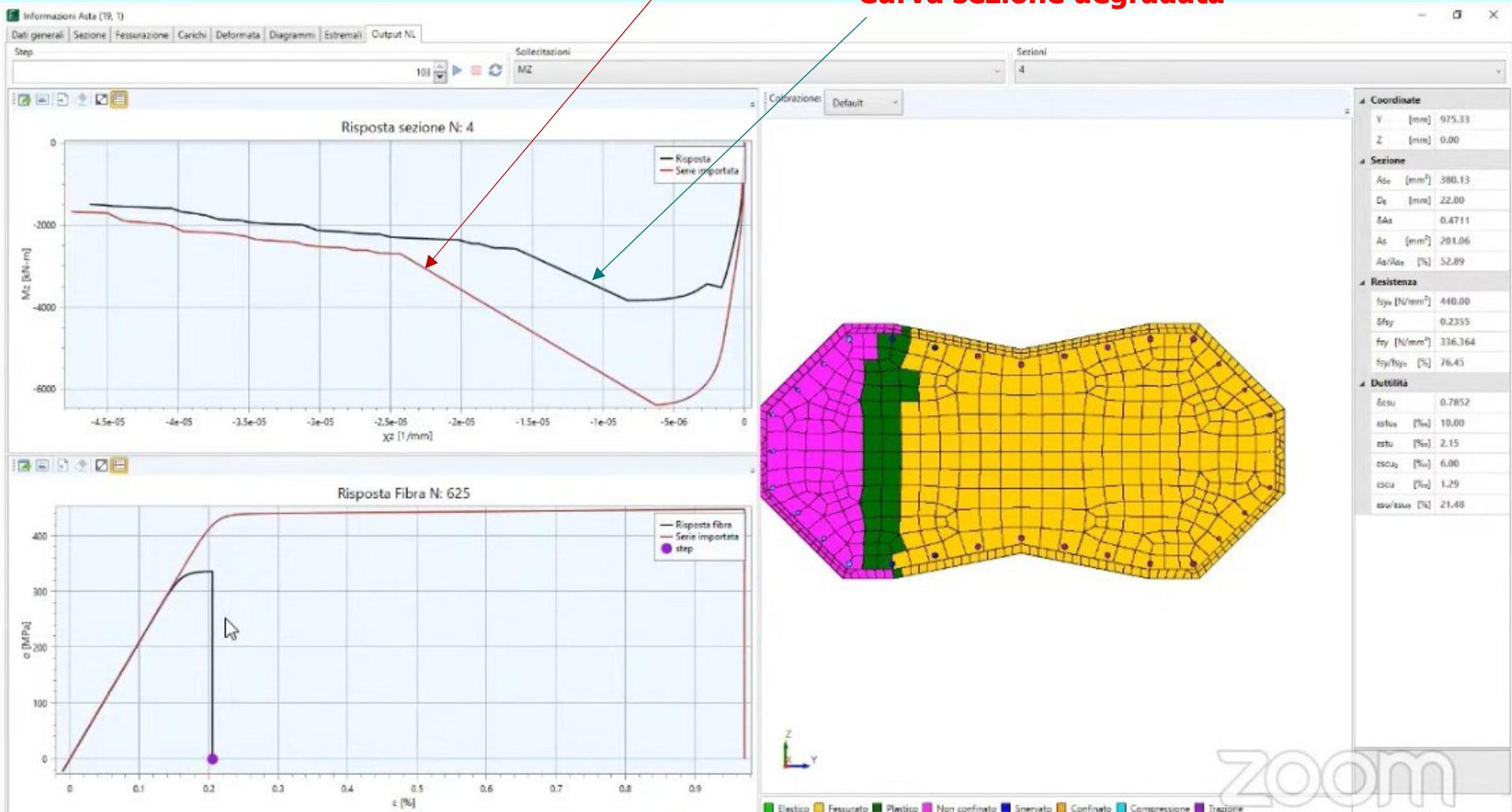
# Confronto curve di capacità : riduzione tagliante e riduzione capacità di spostamento !



## Momento – curvatura (sezione): riduzione capacità dissipativa

Curva sezione integra

Curva sezione degradata

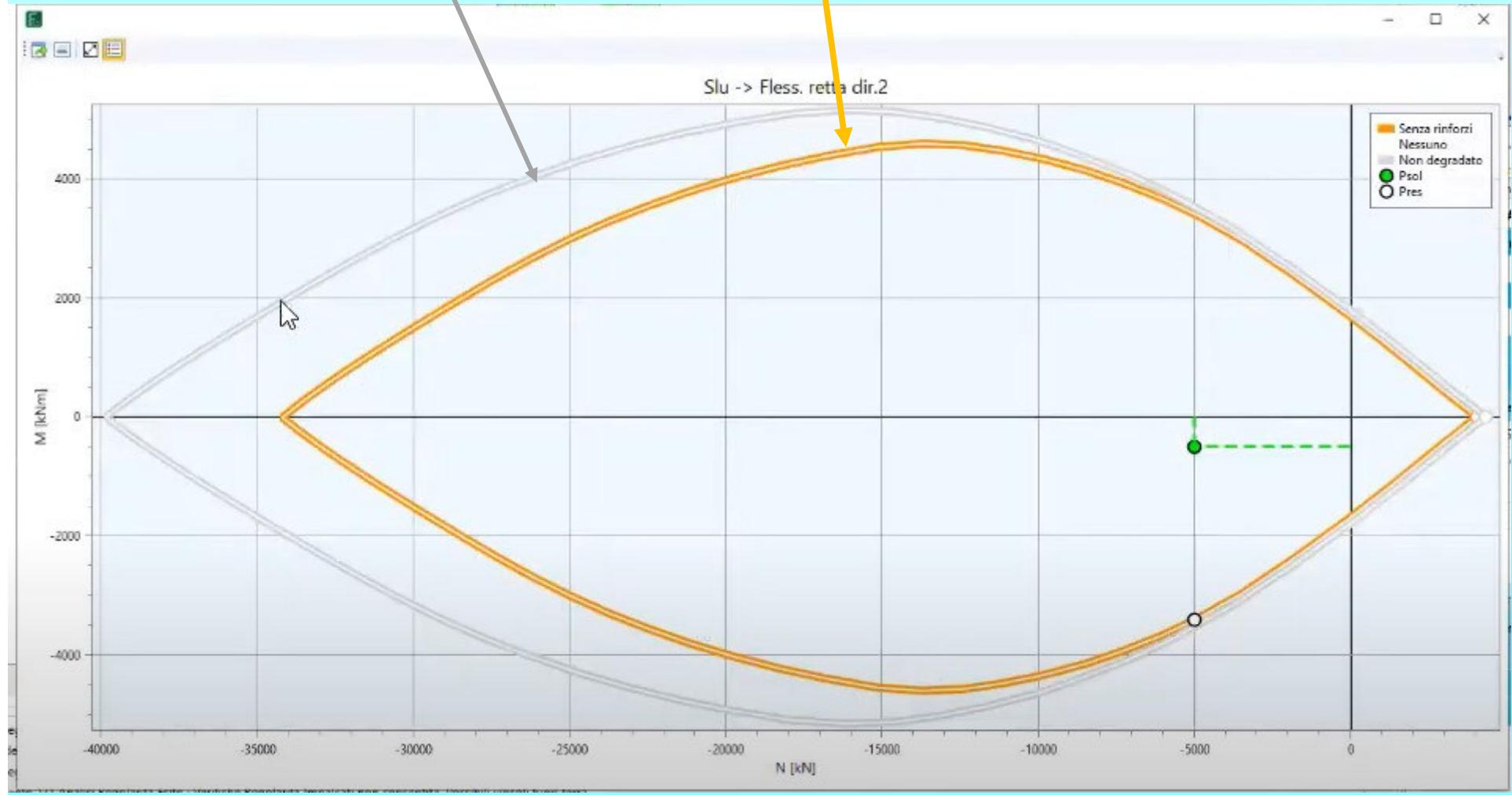


Curva tensione – deformazione (fibra acciaio): riduzione resistenza e soprattutto riduzione duttilità !

# Variazione domini di resistenza

Dominio sezione degradata

Dominio sezione integra



**IN SINTESI:**



Pietro Pedefterri

**Fig. 1.6 Corrosione delle armature di un pilastro di un edificio di 7 piani crollato a Palermo nel 1999**

- 1. Corrosione staffe**
- 2. Corrosione barre long.**
- 3. Splitting**
- 4. Spalling**
- 5. Riduzione aderenza all'interfaccia**

**Pertanto: riduzione delle prestazioni meccaniche della sezione per variazione dei domini di resistenza!**

**RICORDIAMOCI CHE INSISTE UN CARICO!!!**

- 1. Possibile rottura delle staffe**
- 2. Possibile instabilità delle barre long.**
- 3. Crisi locale del calcestruzzo a compressione**

**VARIAZIONE DEGLI INDICATORI GLOBALI DI RISCHIO!!!!**

## **DOMANDA:**

**Ritenete – quindi - che  
sia corretto eseguire le  
verifiche di sicurezza  
NON mettendo in conto  
possibili scenari di  
danno ???**

**11**

# **FESSURE DI TIPO TECNOLOGICO**

**- FESSURE DI TIPO «SECONDARIO» -**

# **PREMESSE**

## **Viscosità e Ritiro**

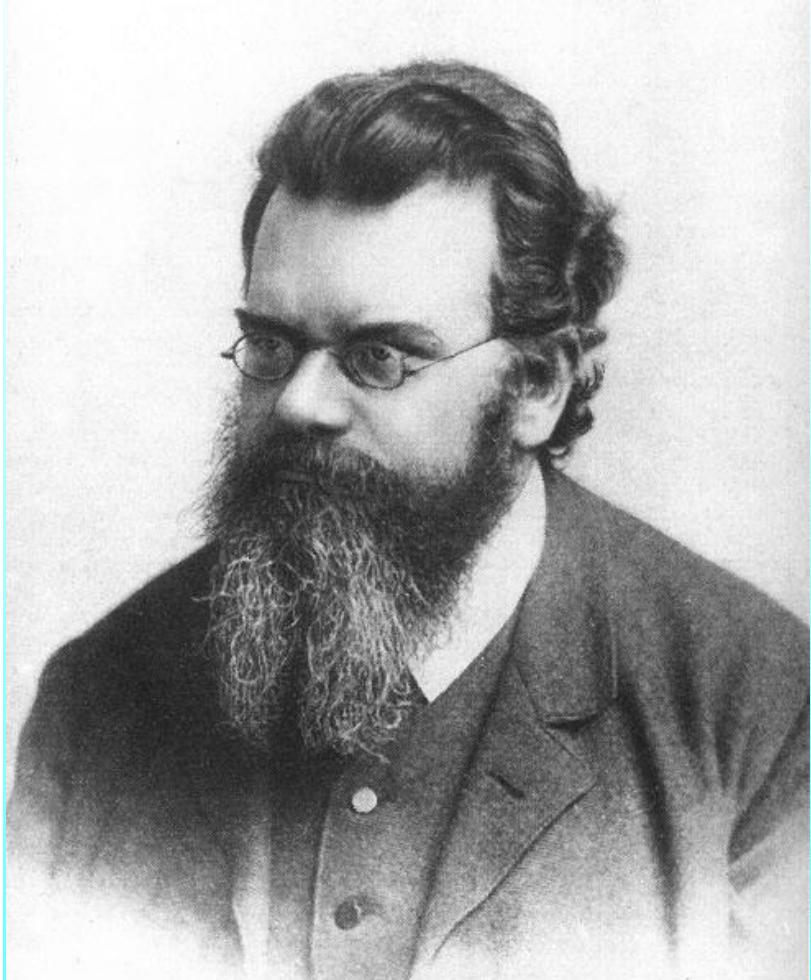
**Quando un elemento di forma prismatica in calcestruzzo è soggetto ad uno stato di tensione normale costante :**

$$\sigma = \text{costante}$$

**la sua risposta è sia immediata che dipendente dal tempo. Sotto carico costante, la deformazione dell'elemento aumenta gradualmente con il tempo e a lungo termine può essere di gran lunga superiore al suo valore iniziale (deformazioni viscose).**

**Se la temperatura è costante e lo stato tensionale nullo, lo sviluppo delle deformazioni nel tempo, è causato dalla variazione volumetrica del calcestruzzo (ritiro).**

**PERTANTO, LA DEFORMAZIONE VIScosa E' PRODOTTA DA STATI TENSIONALI, MENTRE LE DEFORMAZIONI DA RITIRO SONO INdIPENDENTI DALLO STATO TENSIONALE.**

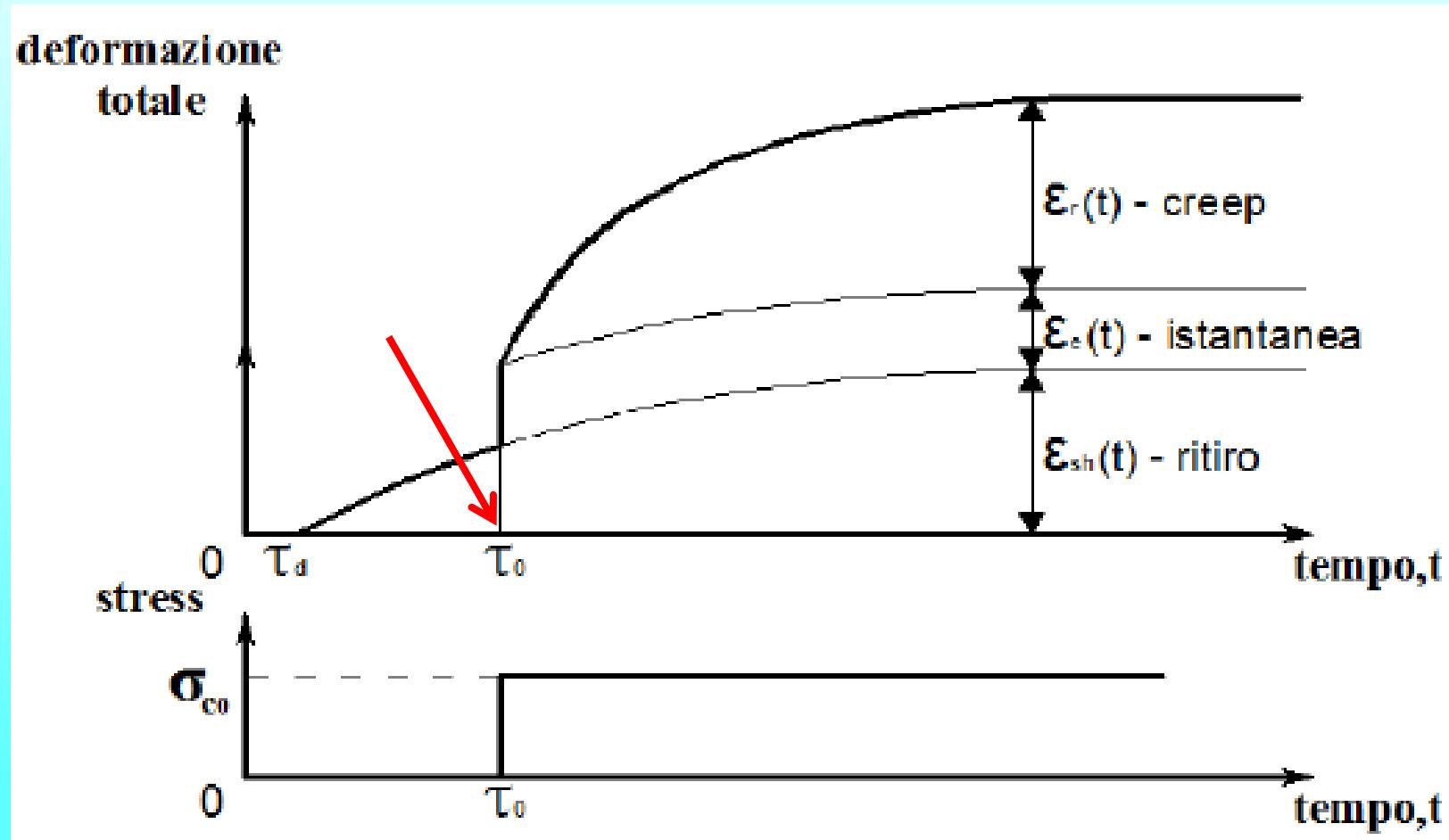


**L. E. Boltzmann – 1844; 1874**

**Vito Volterra – 1860; 1940**



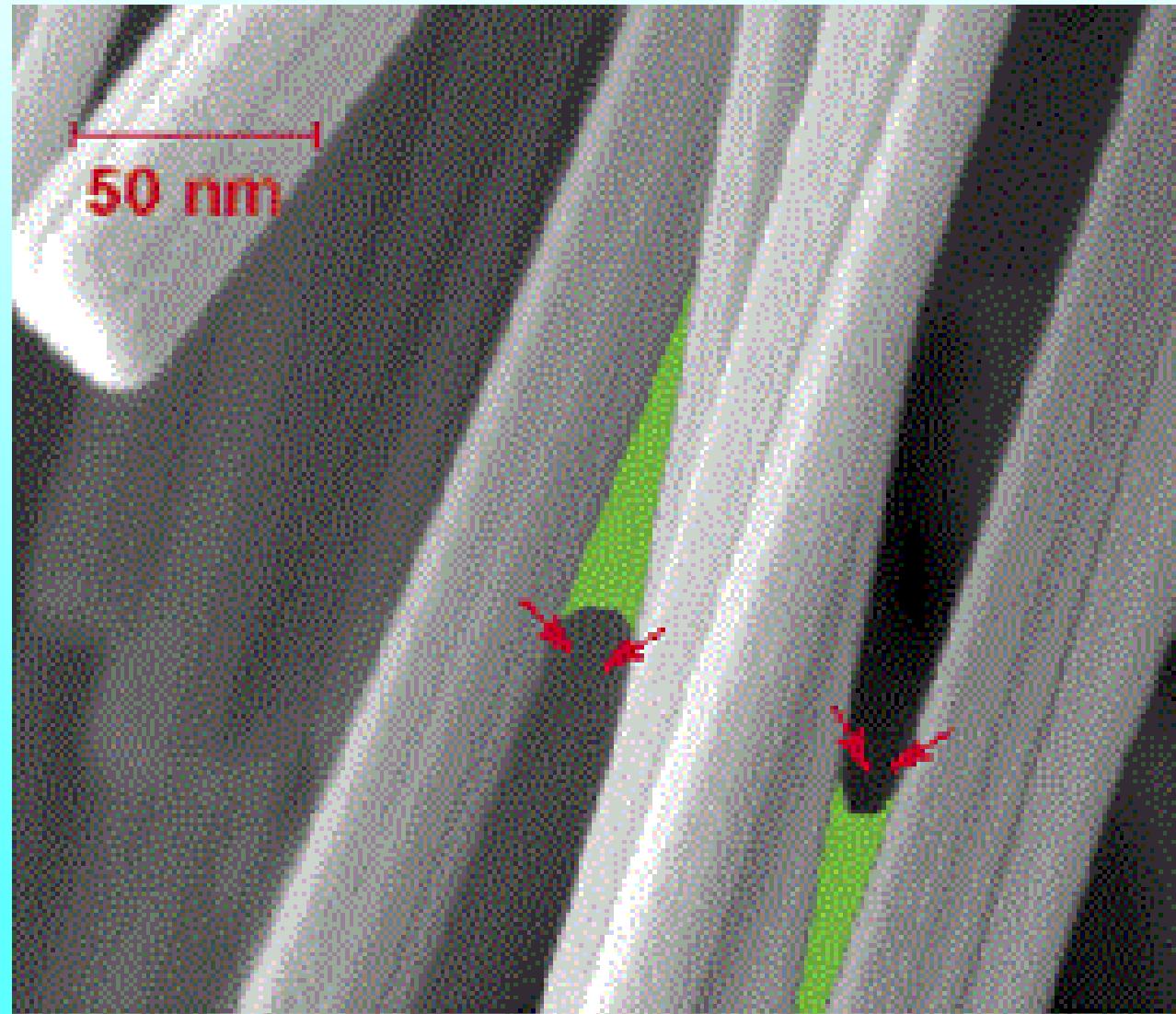
Nella figura sottostante l'evoluzione delle deformazioni (P. Monaco) :



Per soddisfare gli stati limite di esercizio nelle strutture in c.a. risulta necessario quindi eseguire accurate previsioni, non solo sulle deformazioni istantanee, ma anche sulle deformazioni differite.

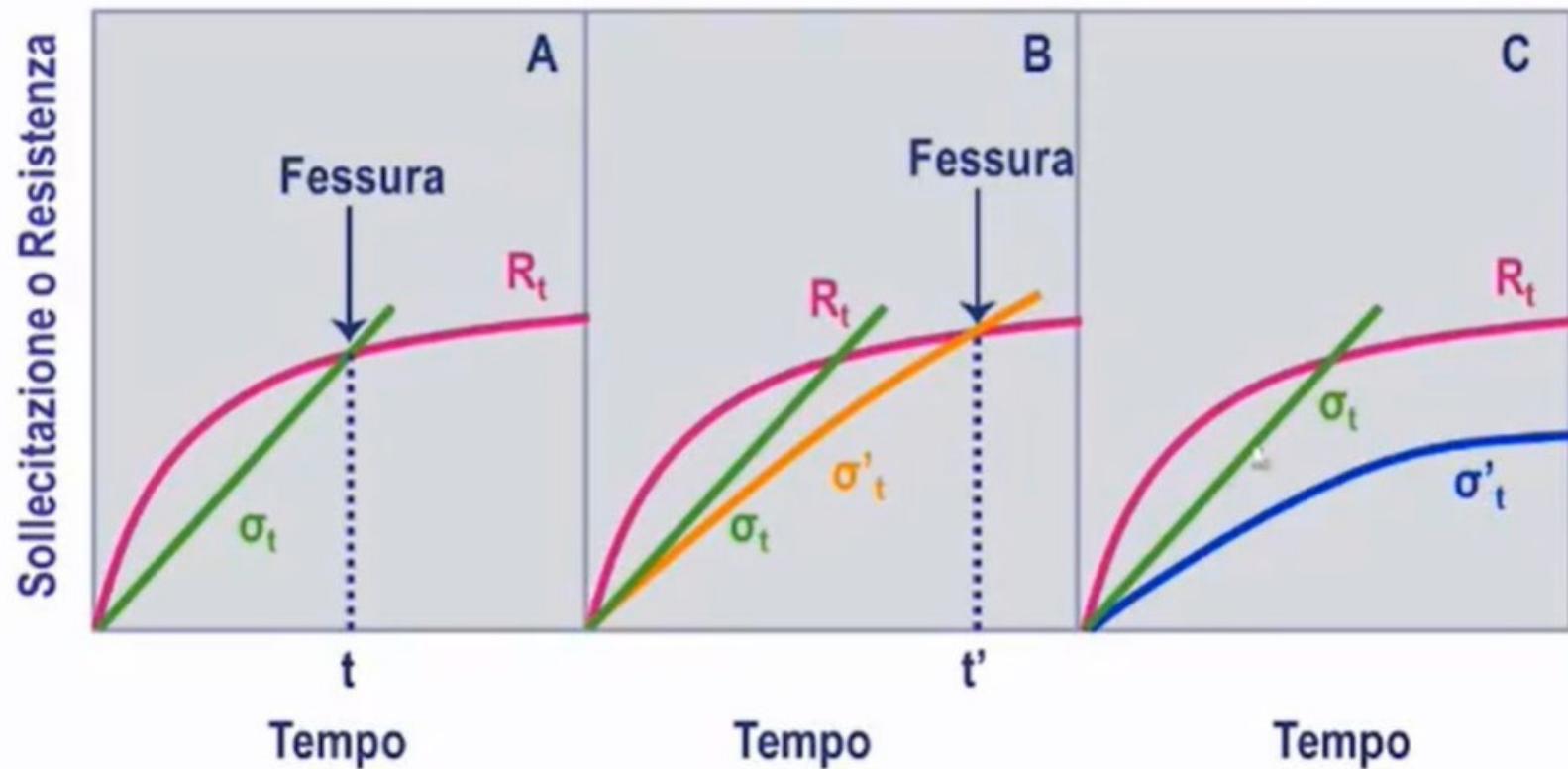
# **EFFETTI DEL RITIRO :**





M. Collepardi: Schematizzazione di menischi di acqua (conca superficiale - in verde) che provocano l'avvicinamento delle fibre C-S-H (vedi frecce rosse) e conseguente contrazione da ritiro

## Sollecitazione e fessura



**Ritiro plastico**

21/01/20

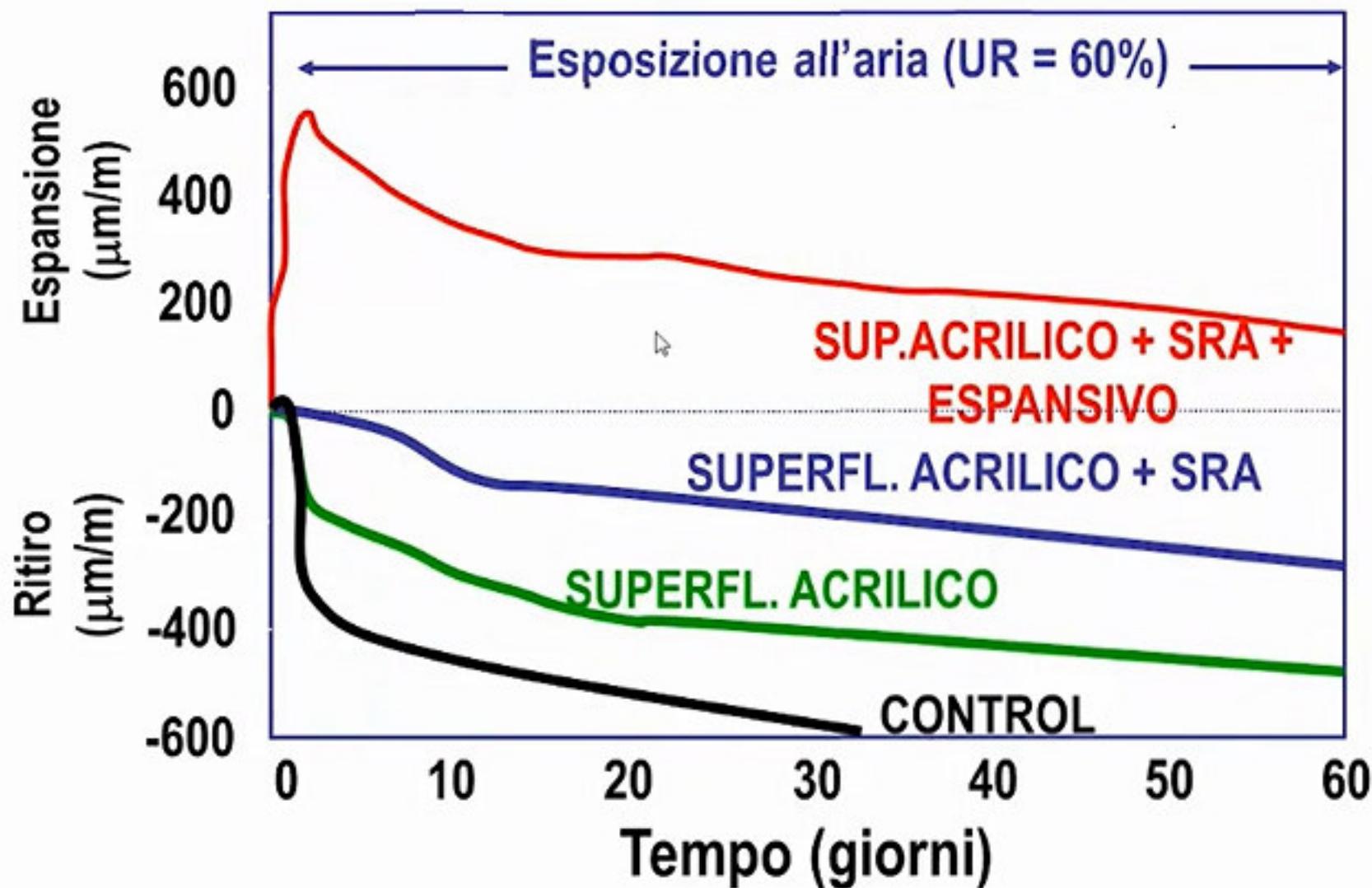


**Ritiro igrometrico**



**DISSESTO DOVUTO ALLA MANCANZA  
DI GIUNTO DI ISOLAMENTO TRA  
PILASTRO E PAVIMENTO: IL  
PILASTRO HA CREATO UN  
OSTACOLO ALLA LIBERA  
CONTRAZIONE DA RITIRO DEL  
CALCESTRUZZO DETERMINANDO LA  
FORMAZIONE DI FESSURE A CIRCA  
45 gradi A PARTIRE DAGLI SPIGOLI  
(Sergio Tattoni).**

## CIs scasserati a 2 giorni e quindi esposti all'aria



# **EFFETTI DELLA VISCOSITA' :**



# **PROBLEMI LEGATI ALLA VISCOSITÀ' NEL CALCESTRUZZO : Il caso del PONTE sul RIO SINIGO (Provincia di Bolzano)**



**POSSIAMO, QUINDI, DEFINIRE IL CREEP COME L'AUMENTO DI DEFORMAZIONE CHE SI VERIFICA SOTTO UN CARICO PROLUNGATO NEL TEMPO E, POICHE' ESSO PUO' SUPERARE DI SVARIATE VOLTE LE DEFORMAZIONI ELASTICHE, HA UN RUOLO IMPORTANTE NELLA MECCANICA DELLE STRUTTURE (Adam M. Neville).**

**DOMANDA:**

**Ritenete che tali quadri fessurativi siano trascurabili ai fini delle conseguenze strutturali? e ai fini della durabilità ???**

**12**

# **AZIONI COMBINATE**

**- Meccaniche e tecnologiche -**

**Classe di esposizione XC/XD/XA**

## **Corrosione per azione combinata:**

- **Assenza di copriferro**
- **Cattivo riempimento guaine**
- **Carbonatazione**
- **Cloruri provenienti dai sali disgelanti**
- **Elevato stato tensionale sui cavi**



2009/09/23 15:36



**Guaine «vuote»**

**"UN ESPERTO E'  
UNO CHE  
CONOSCE ALCUNI  
DEI PEGGIORI  
ERRORI CHE PUO'  
COMPIERE NEL  
SUO CAMPO E SA  
COME EVITARLI."**

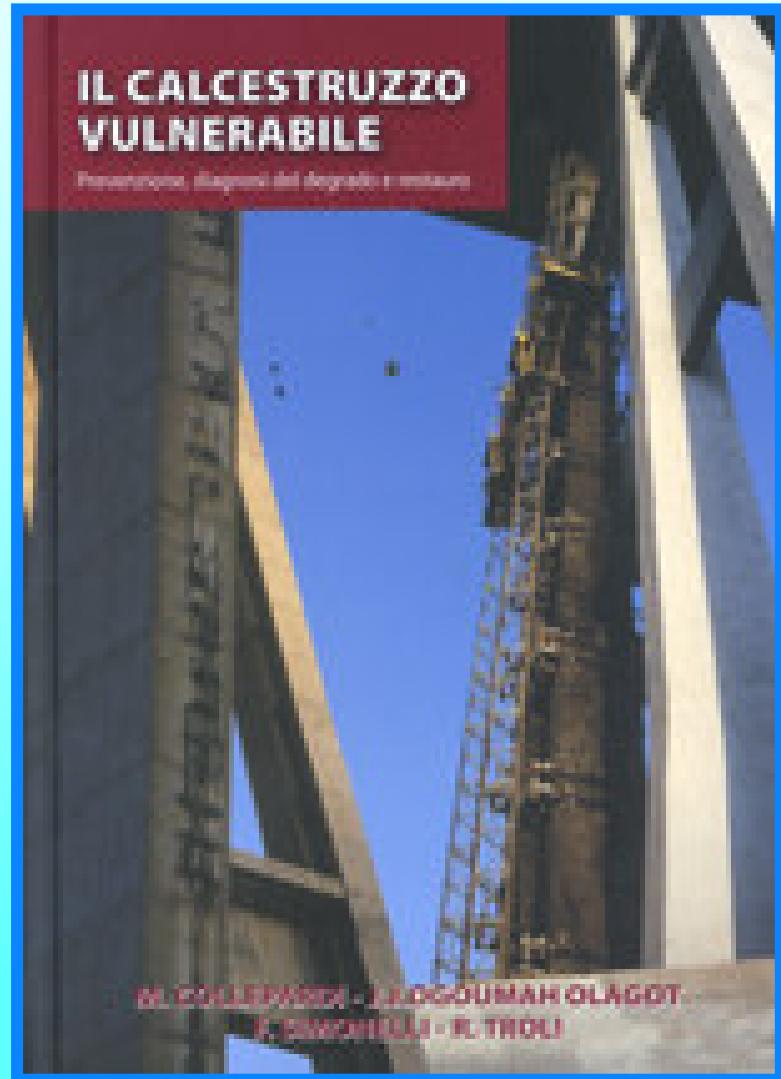
**WERNER HEISENBERG**

STORIE SCIENTIFICHE



**13**

**RIFERIMENTI  
BIBLIOGRAFICI**



**MARIO COLLEPARDI**

**PIETRO PEDEFERRI**



MATTEO FELITTI  
LUCIA ROSARIA MECCA  
FRANCESCO OLIVETO  
NICOLA SANTORO

## MODELLI DI DEGRADO NELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO

Influenza del Danno Localizzato sulla Vulnerabilità Statica e Sismica



Con esempi svolti, commentati e riproducibili tramite il software FaTA Next – in versione Full per un periodo di 30 gg - messo a disposizione dalla STACEC Srl



Bozza

# NOVITA'



# **GRAZIE !**

**Matteo Felitti**

**Strutturista ed Esperto in Degrado del  
Calcestruzzo Armato**

**Università degli Studi di Napoli Federico II**

**Email: [ingegneria.cls@gmail.com](mailto:ingegneria.cls@gmail.com)**

**Email: [matteo.felitti@unina.it](mailto:matteo.felitti@unina.it)**

**Cell. 348.8525102**