

# Smart Infrastructures Academy

Napoli, 15 aprile 2023



## La valutazione del rischio di corrosione nelle strutture in c.a.p. a cavi post-tesi: criticità e considerazioni operative



Edoardo Proverbio  
*Università di Messina*

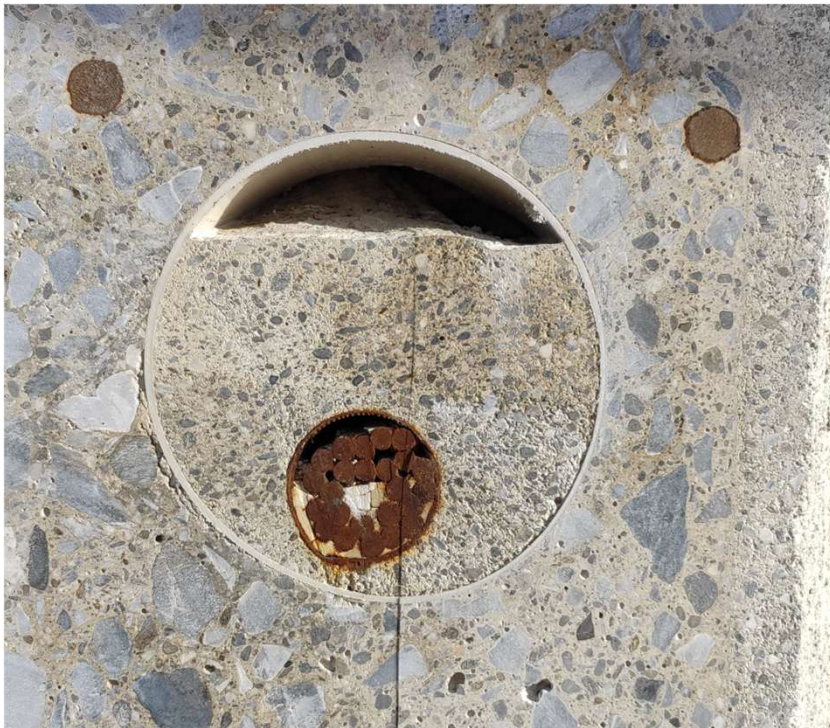
La valutazione del **rischio di corrosione** negli elementi post-tensi pone delle **problematiche peculiari** che devono essere considerate con attenzione per arrivare ad ottenere una **stima affidabile**





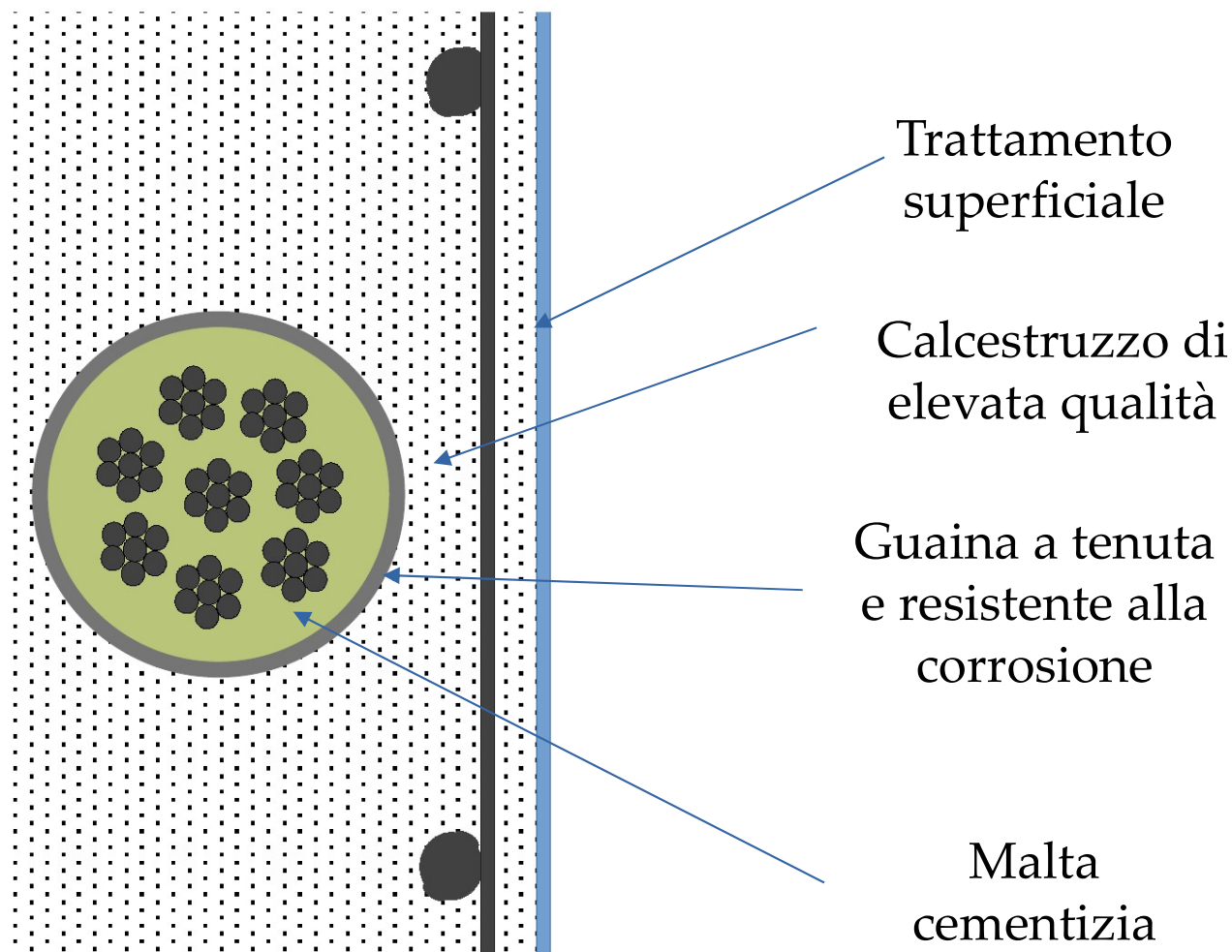


- La **malta di intasamento** è fondamentale per garantire l'ambiente alcalino necessario per la passivazione dei fili e dei trefoli in acciaio dei cavi post-tensi.



- Le prescrizioni per la composizione della malta (UNI EN 447:2007) indicano primariamente l'uso di un **cemento portland (CEM I)**
- La **passivazione** è una condizione necessaria, ma a volte, non sufficiente per garantire la durabilità della struttura

# Sistema di protezione a strati multipli





## Il collasso del sistema di protezione a strati multipli



## Identificazione dei punti deboli del sistema di protezione: gli scenari di rischio

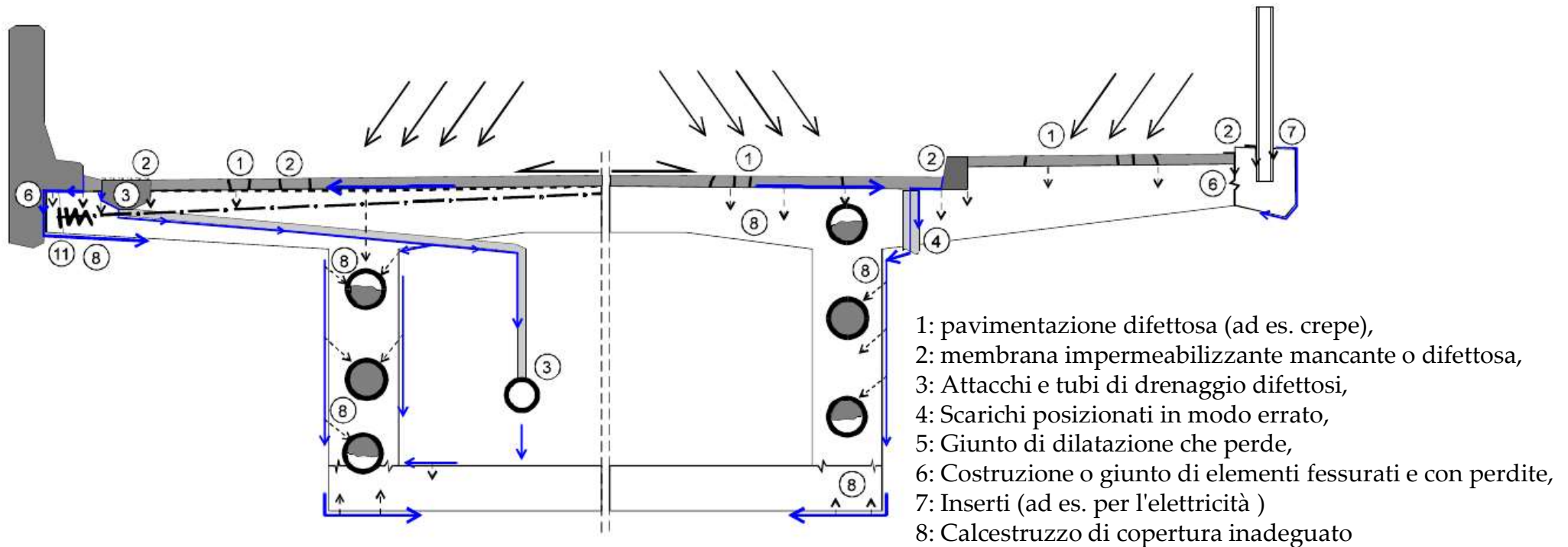
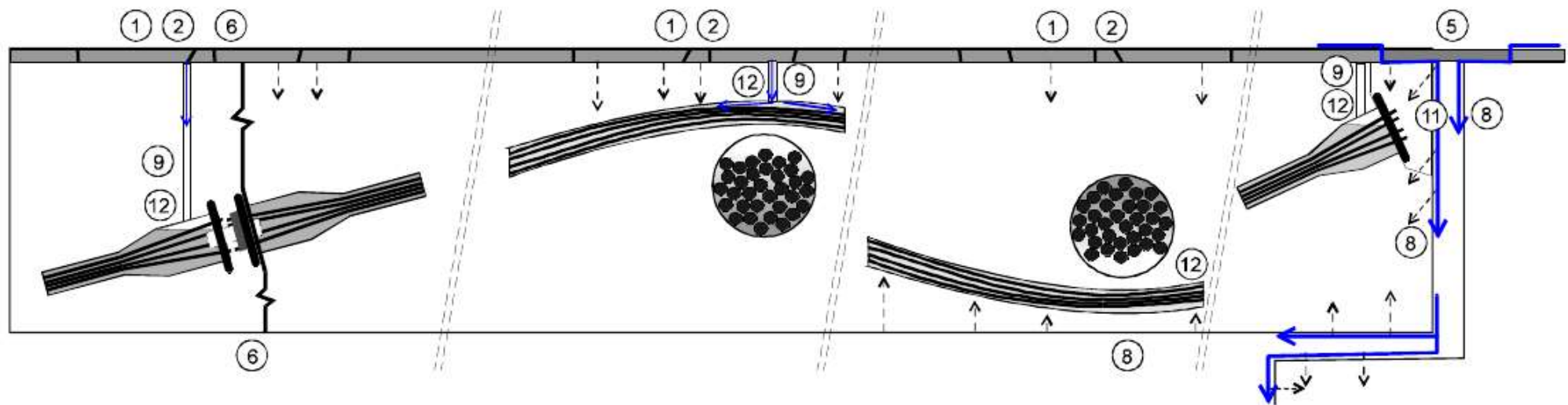


Immagine tratta da: Hunkeler F., Matt P., Von Matt U., R. Werner, Prestressing tendons, stay cables and ground anchors - Description of the systems and lessons learnt from corrosion damages, Research report Nr. 588, Vereinigung Schweiz. Strassenfachleute (VSS), Zürich 2005 (in German)

## Identificazione dei punti deboli del sistema di protezione: gli scenari di rischio



- 9: Tubi di iniezione e ventilazione inadeguati o non sigillati
- 10: Tubi di rivestimento che perdono, danneggiati, corrosi
- 11: Calcestruzzo di copertura degli ancoraggi che perde
- 12: Iniezione scadente nella zona di ancoraggio, nei punti alti e bassi (cavità)

Immagine tratta da: Hunkeler F., Matt P., Von Matt U., R. Werner, Prestressing tendons, stay cables and ground anchors - Description of the systems and lessons learnt from corrosion damages, Research report Nr. 588, Vereinigung Schweiz. Strassenfachleute (VSS), Zürich 2005 (in German)



## La criticità locali: ancoraggi e giunti

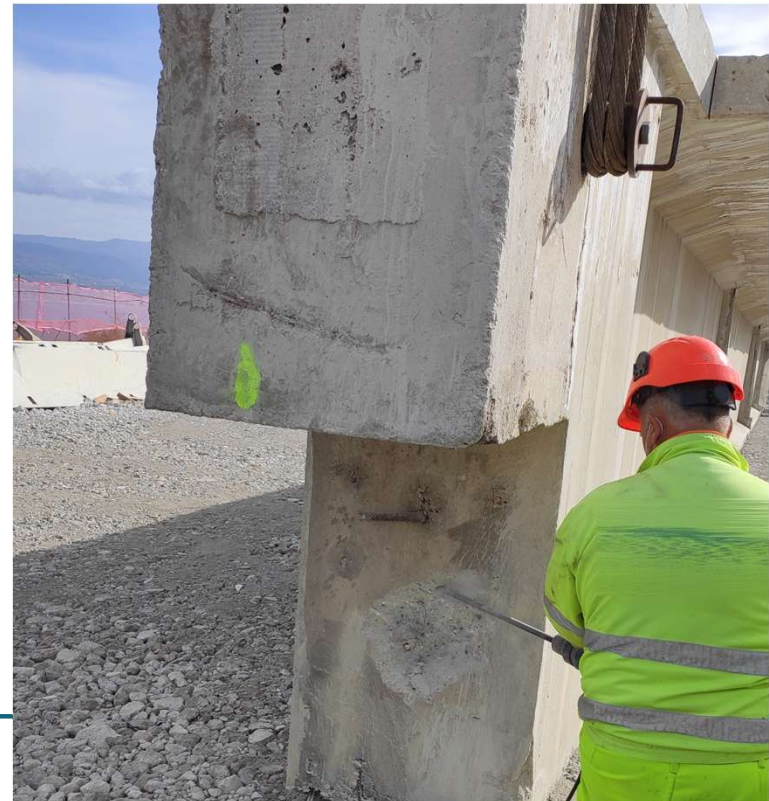


# Ispezione delle testate e dei giunti

- Ancoraggi ispezionabili



- Ancoraggi non ispezionabili



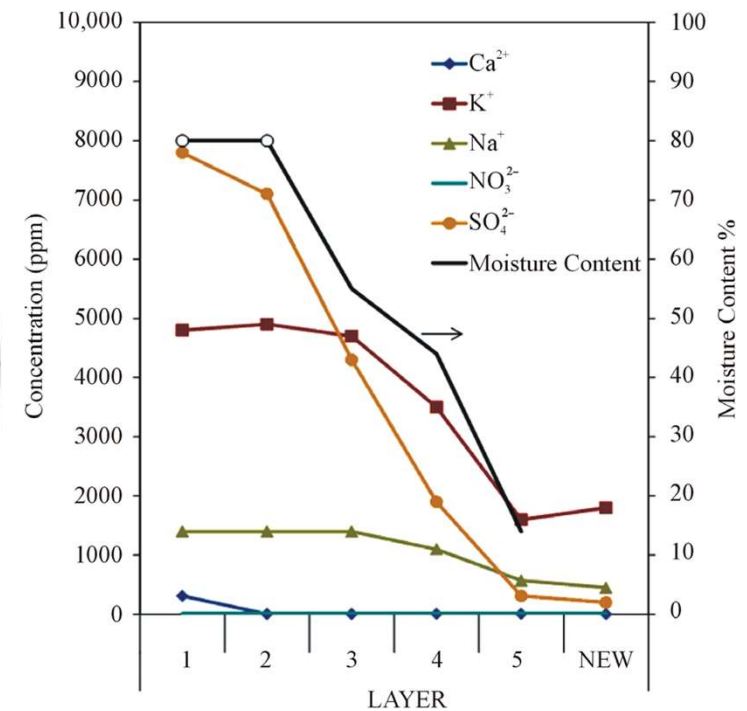
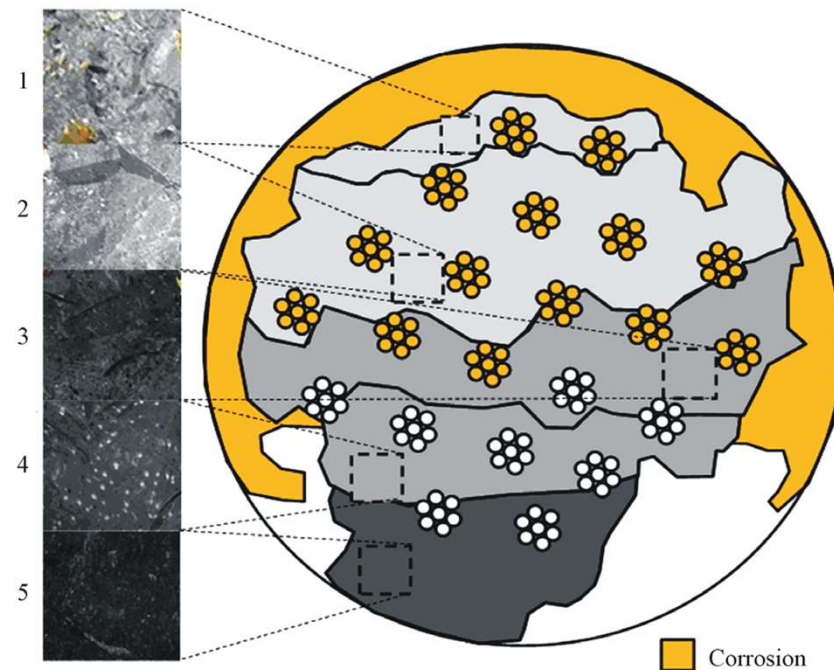


# Il quadro fessurativo e le lesioni superficiali





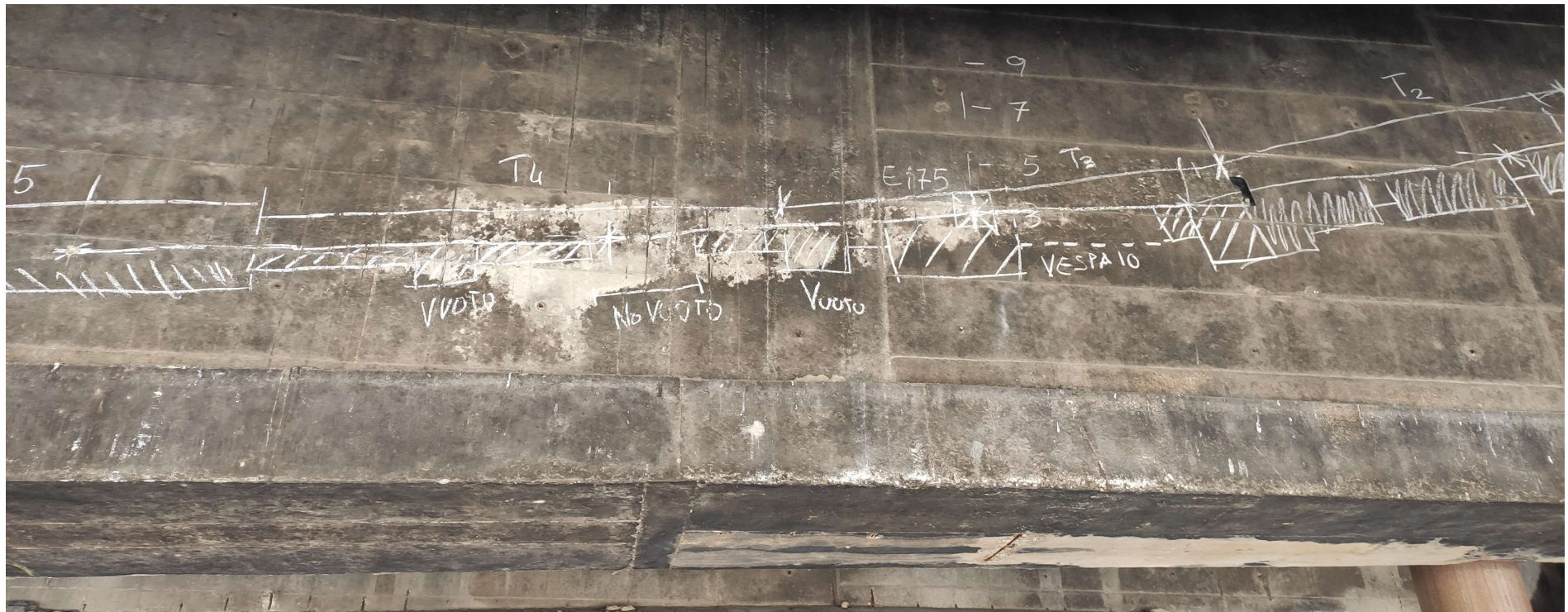
# La criticità principale: difetti di riempimento e segregazione della malta



Open Journal of Civil Engineering, 2013, 3, 182-187, <http://dx.doi.org/10.4236/ojce.2013.33022>

# Individuare le discontinuità di intasamento

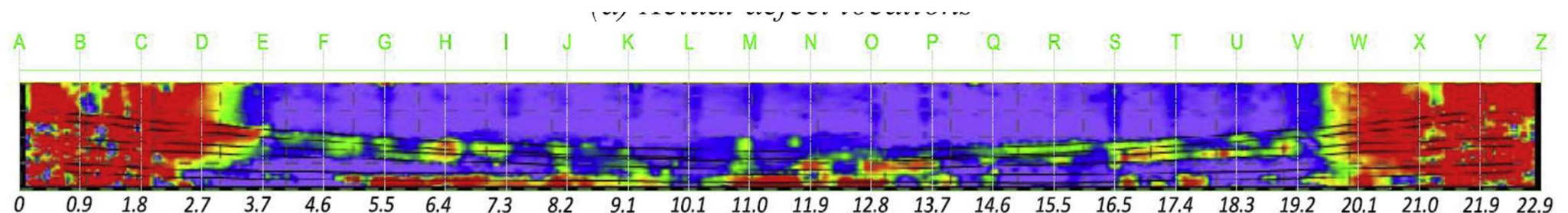
- La ricerca di tali difettosità è di primaria importanza.





# Individuare le discontinuità di intasamento

- Il ruolo delle tecniche di indagine non distruttive (GeoRadar, IE, tomografia acustica, etc..)



Note: Purple = Normal web thickness (tendon is not detected), Blue-Green = Intact (completely filled with grout), Yellow-Orange = Partial void (partially filled with grout), Red = Full void (poorest grout condition)

Nondestructive evaluation of grout defects in internal tendons of post-tensioned girders, NDT & E International, 99, 2018, 23-35, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.05.013>.



# Individuare le discontinuità di intasamento

- La difficoltà ad individuare i difetti in condotti molto “affollati”

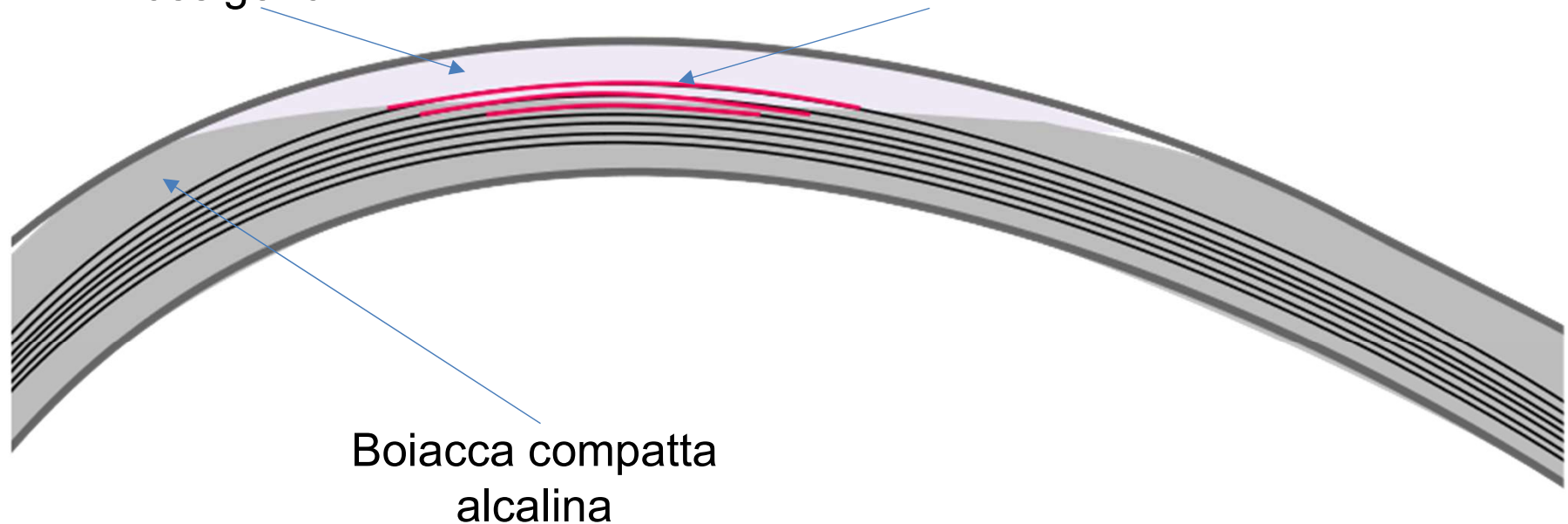




# La corrosione nei difetti di intasamento

Vuoto. Ambiente saturo a  
basso contenuto di  
ossigeno

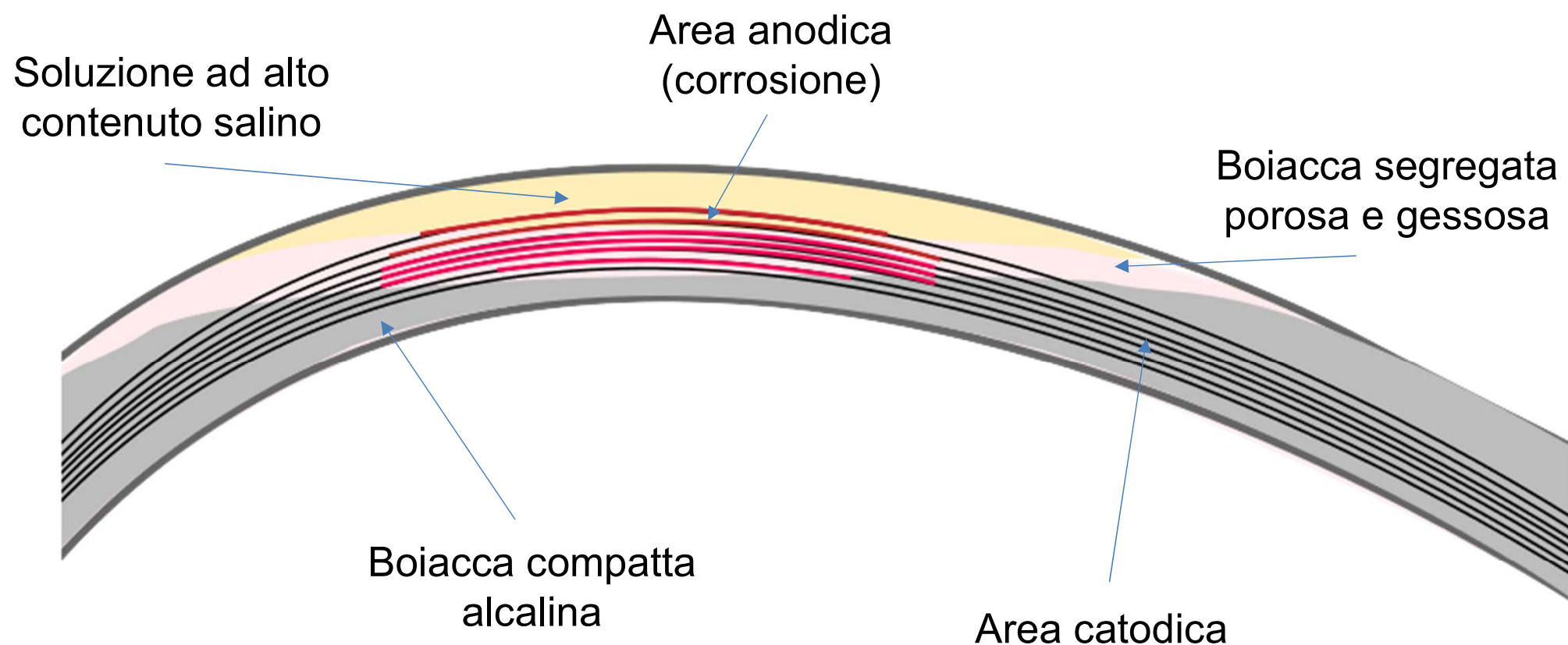
Corrosione "atmosferica"







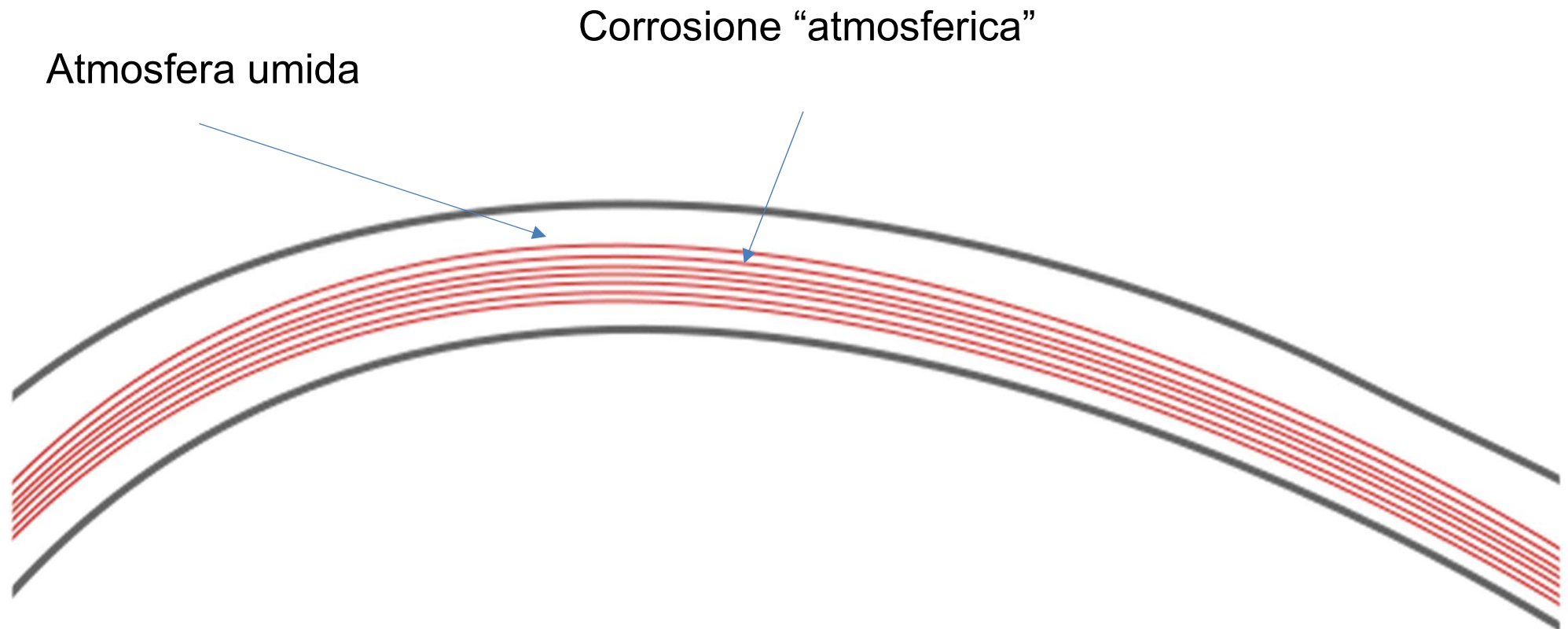
# La corrosione nei difetti di intasamento







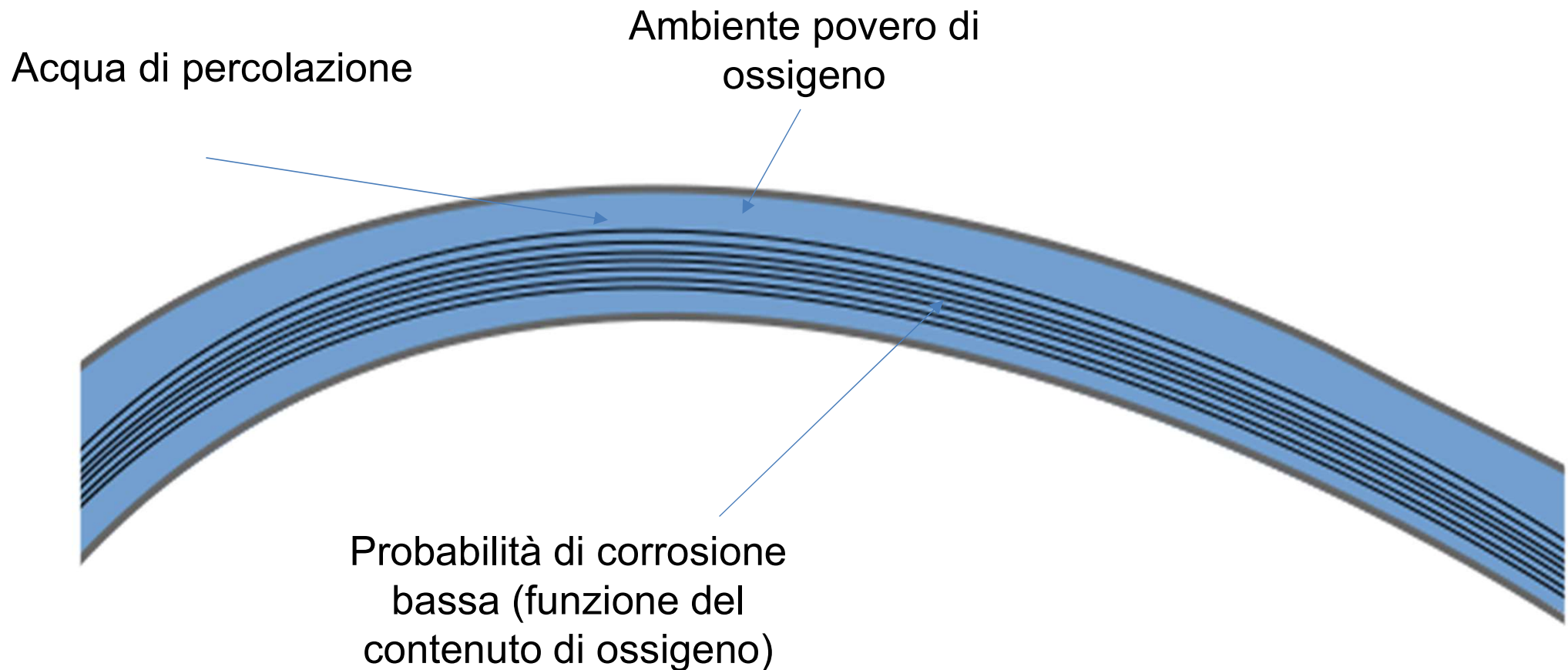
# La corrosione nei difetti di intasamento







# La corrosione nei difetti di intasamento







# Principali forme di corrosione

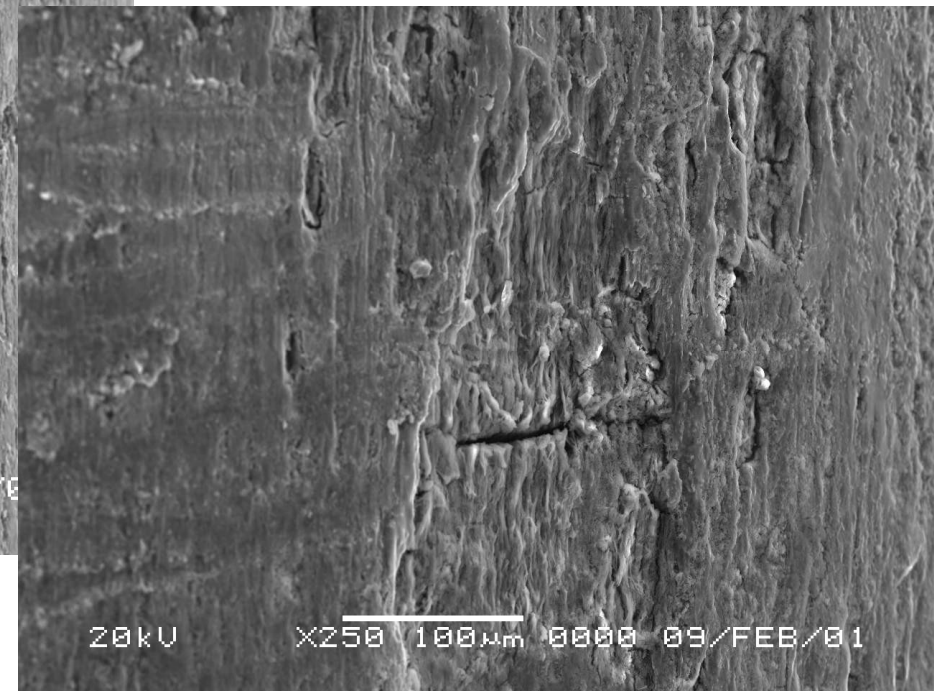


Corrosione generalizzata



# Principali forme di corrosione

## Pitting da cloruri e cracking





# Principali forme di corrosione

Tensocorrosione, cracking assistito da idrogeno  
e infragilimento da idrogeno





# Tensocorrosione acciaio al carbonio

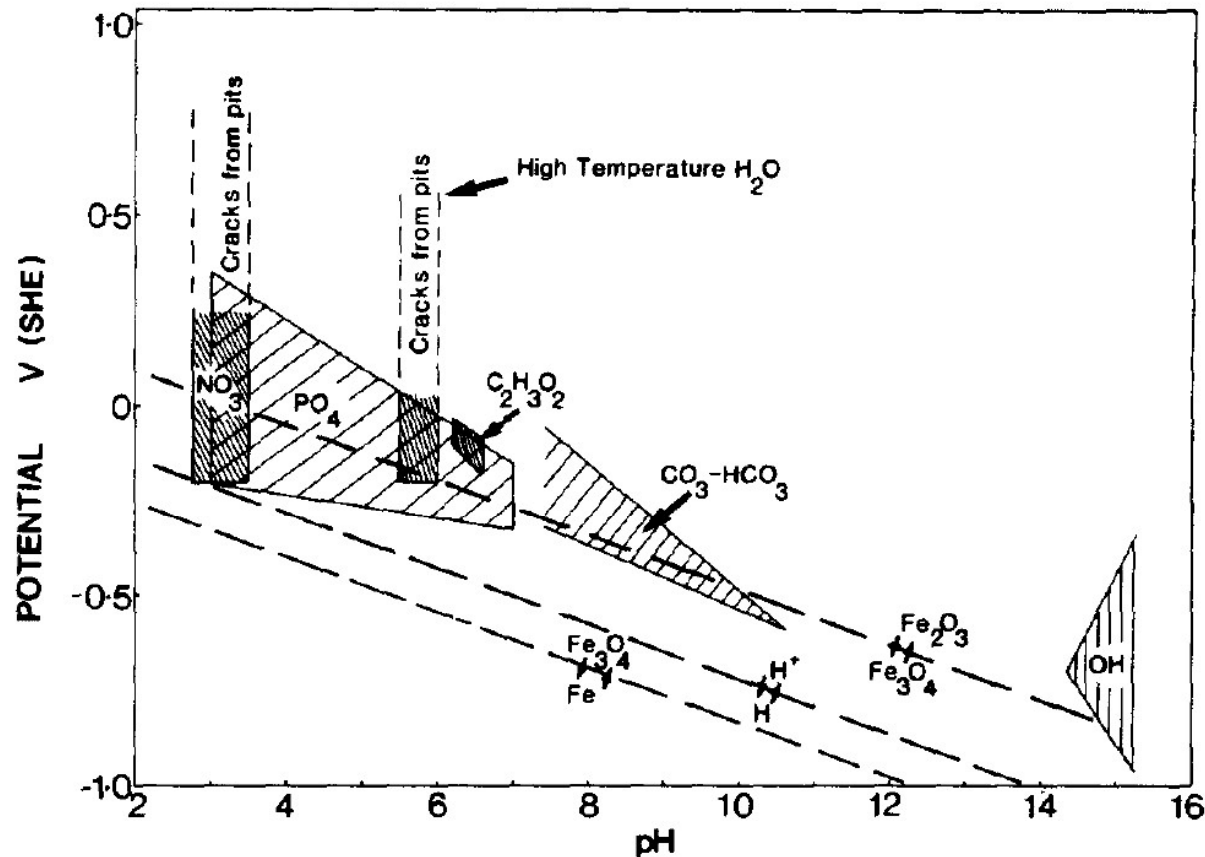


FIG. 11. Potential and pH ranges for the stress corrosion cracking of ferritic steels in various environments, together with the pH-dependent equilibrium potentials for reactions involving  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{H} \rightarrow \text{H}^+$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

J Congleton; T Shoji; R.N Parkins (1985). The stress corrosion cracking of reactor pressure vessel steel in high temperature water. , 25(8-9), 0–650.

## Meccanismi di frattura fragile dell'acciaio da precompressione

A seconda della situazione di corrosione prevalente e delle condizioni di carico, nonché delle proprietà dell'acciaio da precompressione, si possono distinguere le seguenti possibilità di frattura:

- Frattura fragile dovuta al superamento della capacità di carico residua. La frattura fragile è favorita in particolare da:
  - **attacco locale** di corrosione (vaiolatura e corrosione per vaiolatura),
  - **infragilimento** da idrogeno.
- Frattura come risultato di **tensocorrosione**, dove distinguiamo tra
  - tensocorrosione anodica
  - tensocorrosione indotta da idrogeno.
- Rottura come risultato di influenze di fatica e corrosione, distinguendo tra
  - **corrosione fatica**
  - corrosione da sfregamento/fatica da sfregamento (**fretting**).



# Tipologie di acciaio

Laminato a caldo,  
deformato e rinvenuto

*Table 6.1* Prestressing steels and their mechanical properties

| Product          |                               |                        | Steel grade             |                                   | Nominal values for the mechanical properties       |                                               |                                          |                                                  |
|------------------|-------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Type             | Surface                       | Dia. (mm)              | Short name <sup>a</sup> | Condition of treatment            | Elastic limit <sup>b</sup><br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 0.2%,<br>proof stress<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Tensile strength<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | Elongation after fracture<br>A <sub>10</sub> (%) |
| Bar steel, round | Smooth or ribbed <sup>c</sup> | 26–36                  | St 835/1031             | Hot-rolled, strained and tempered | 735                                                | 835                                           | 1030                                     | 7                                                |
|                  |                               | 15                     | St 885/1080             |                                   | 735                                                | 885                                           | 1080                                     | 7                                                |
|                  |                               | 26–36                  | St 1080/1230            |                                   | 950                                                | 1080                                          | 1230                                     | 6                                                |
| Wire, round      | Ribbed                        | 16                     | St 1325/1470            | Quenched and tempered             | 1175                                               | 1325                                          | 1470                                     | 6                                                |
|                  | Smooth or ribbed              | 6–14                   | St 1420/1570            |                                   | 1220                                               | 1421                                          | 1570                                     | 6                                                |
|                  | Smooth                        | 8–12.2                 | St 1375/1570            |                                   | 1130                                               | 1375                                          | 1570                                     | 6                                                |
|                  | Smooth or shaped              | 5.5–7.5                | St 1470/1670            | Cold-drawn                        | 1225                                               | 1471                                          | 1670                                     | 6                                                |
|                  | Smooth or shaped              | 5.0–5.5                | St 1570/1770            |                                   | 1325                                               | 1570                                          | 1770                                     | 6                                                |
| Wire, flat       | Shaped                        | 4.5 × 10 to 7.9 × 15.5 | St 1420/1570            | Quenched and tempered             | 1220                                               | 1420                                          | 1570                                     | 6                                                |
| Strand           | 7-wires                       | 9.3–18.3               | St 1570/1770            | Cold-drawn                        | 1150                                               | 1570                                          | 1770                                     | 6                                                |

<sup>a</sup> the two numbers represent the nominal values for 0.2% proof stress and tensile strength in N/mm<sup>2</sup>

<sup>b</sup> 0.01% limit of elongation

<sup>c</sup> thread ribs

Laminato a caldo,  
temprato e rinvenuto

Trafilato a  
freddo, disteso

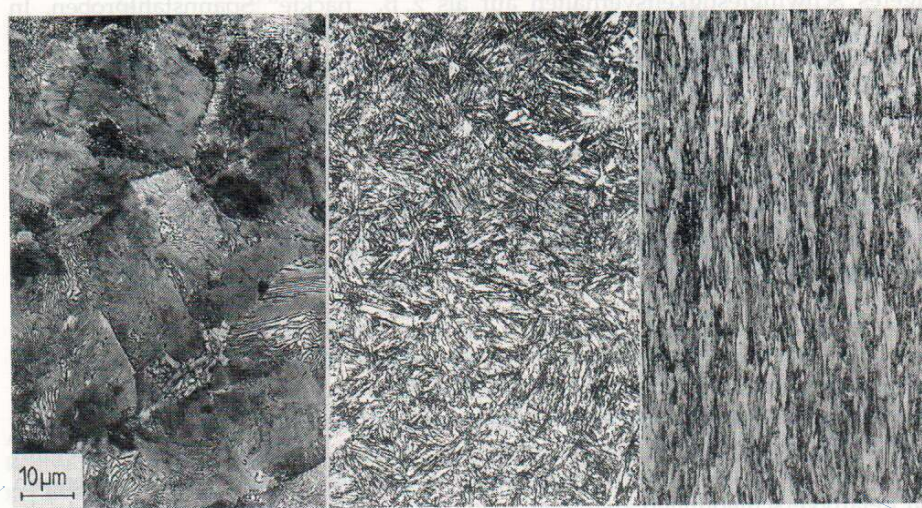
*Table 6.2* Chemical composition of the prestressing steels in use

| Type of prestressing steel         | Reference data for the chemical composition <sup>a</sup> |      |      |      |                  |
|------------------------------------|----------------------------------------------------------|------|------|------|------------------|
|                                    | % C                                                      | % Si | % Mn | % Cr | % V              |
| Wire, quenched and tempered        | 0.5                                                      | 1.6  | 0.6  | 0.4  | –                |
| Wire and stranded wire, cold-drawn | 0.8                                                      | 0.2  | 0.7  | –    | –                |
| Bar steel                          | 0.7                                                      | 0.7  | 1.5  | –    | 0.3 <sup>b</sup> |

<sup>a</sup> according to ladle analysis

<sup>b</sup> only for St 1080/1230

U. Nürnberger, G. Sawade, B. Isecke, Degradation of prestressed concrete, in *Durability of concrete and cement composites*, Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2007, Pages 187-246

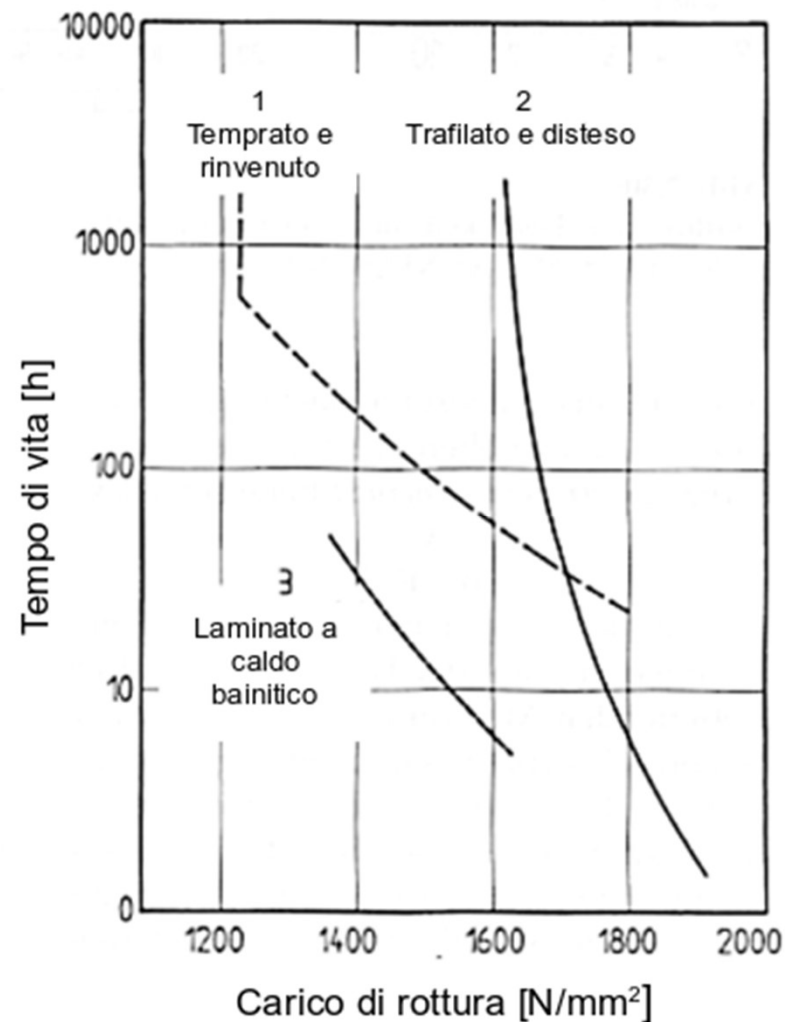


Laminato a caldo, deformato e rinvenuto.  
Struttura perlitica

Laminato a caldo, temprato e rinvenuto.  
Martensite rinvenuta

Trafilato a freddo, disteso.  
Struttura perlitica deformata





Influenza della resistenza dell'acciaio sulla durata nel test di tensocorrosione ( $\sigma 0.8 R_m$ ).  
1) Soluzione satura  $H_2S$ ; 2), 3) soluzione 20%  $NH_4SCN$  (FIP-test).

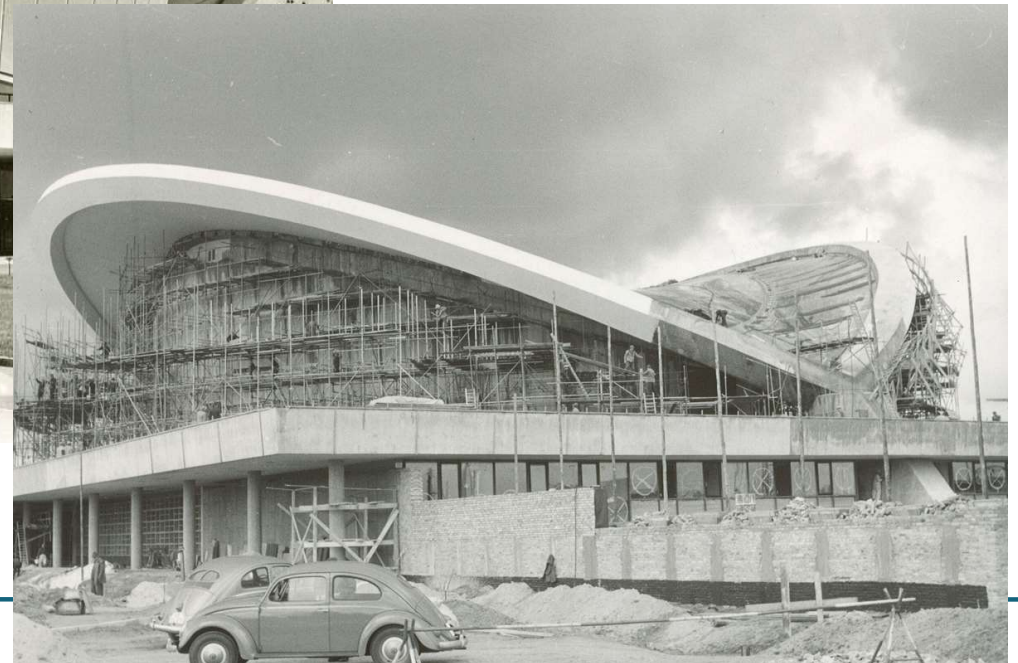
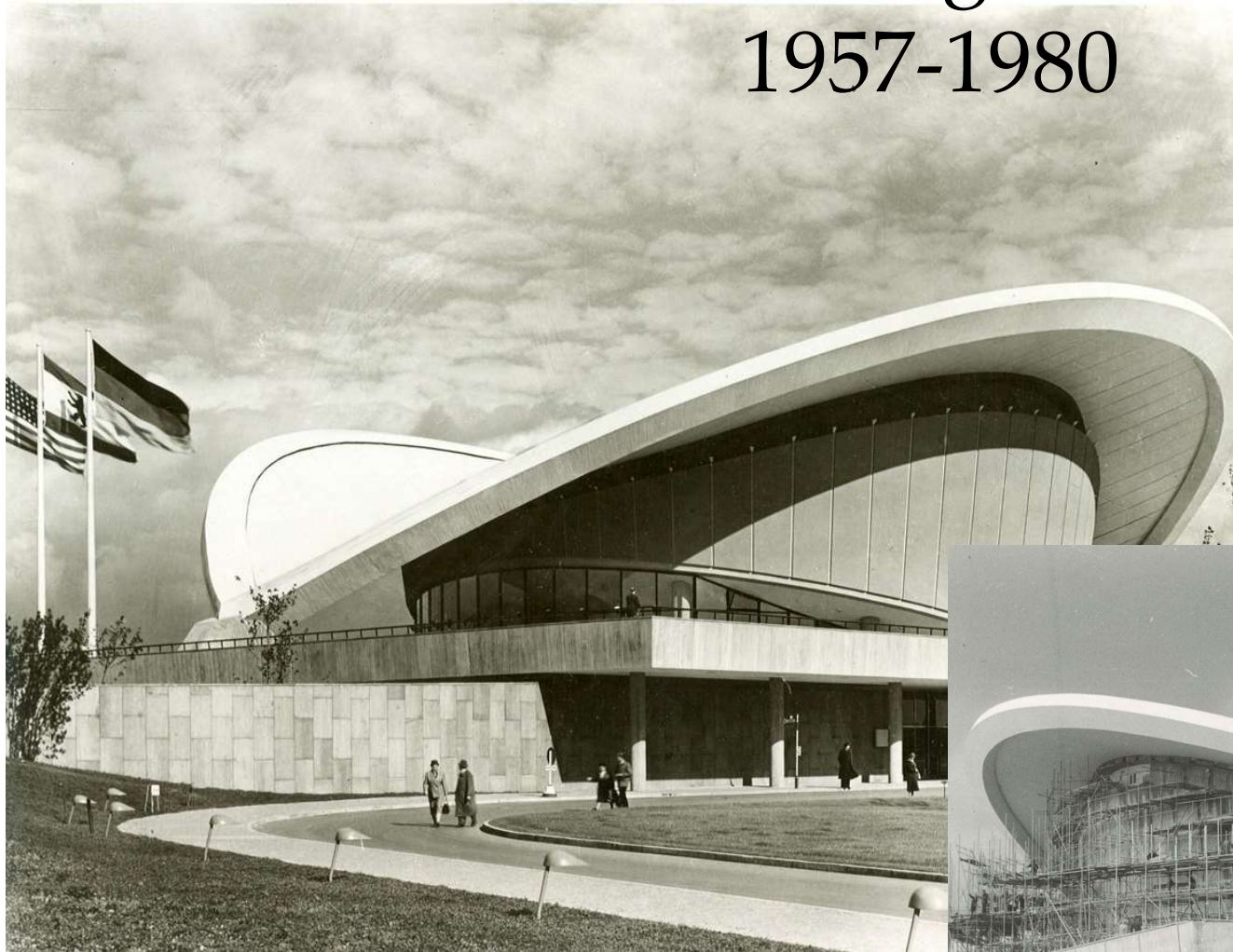
# Alcuni esempi



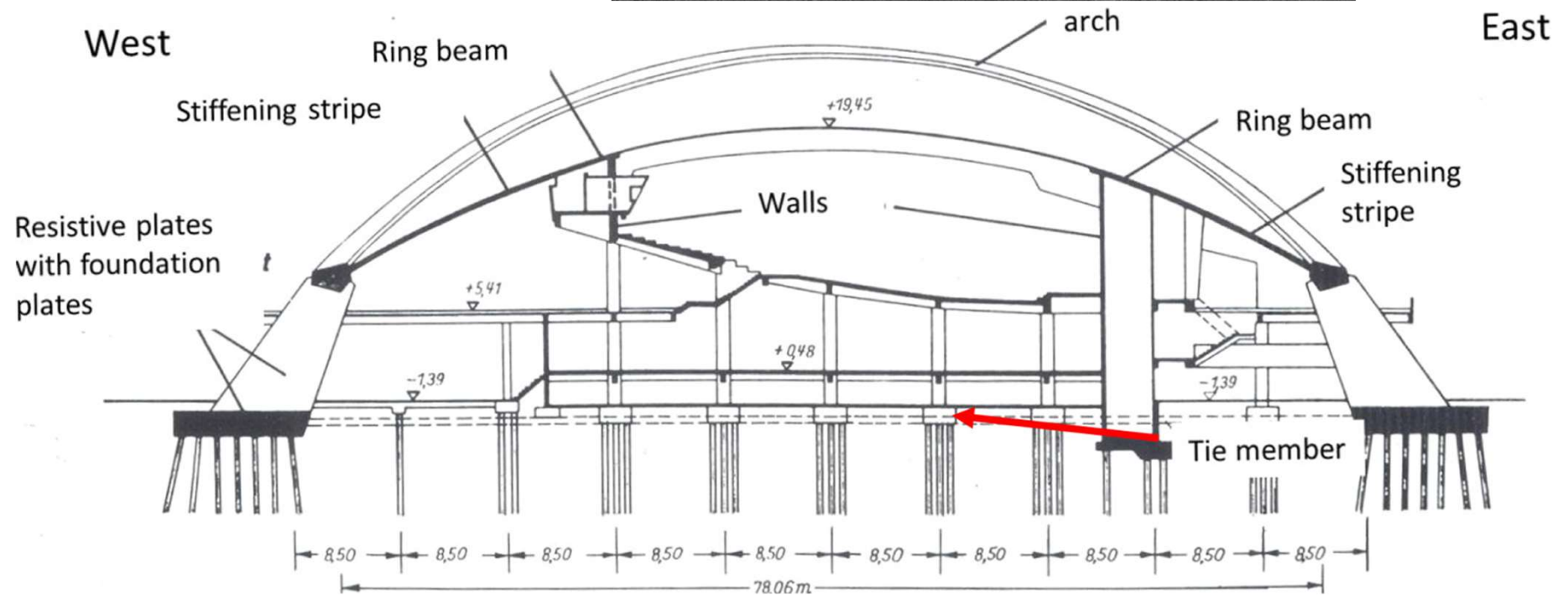
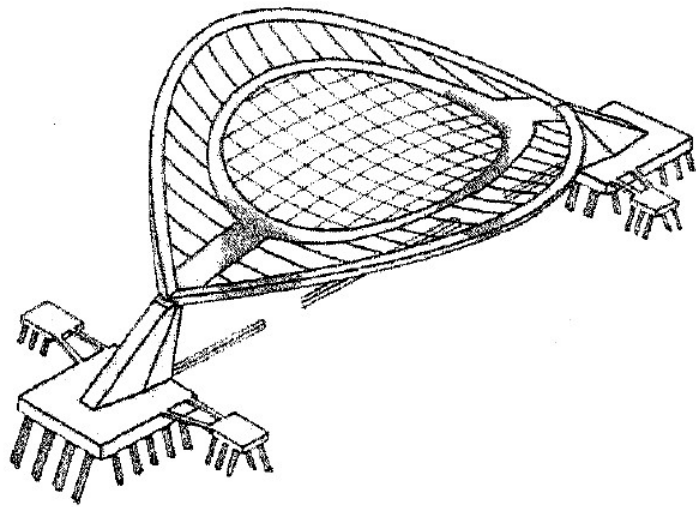
# Berlin Congress Hall 1957-1980



# Berlin Congress Hall 1957-1980

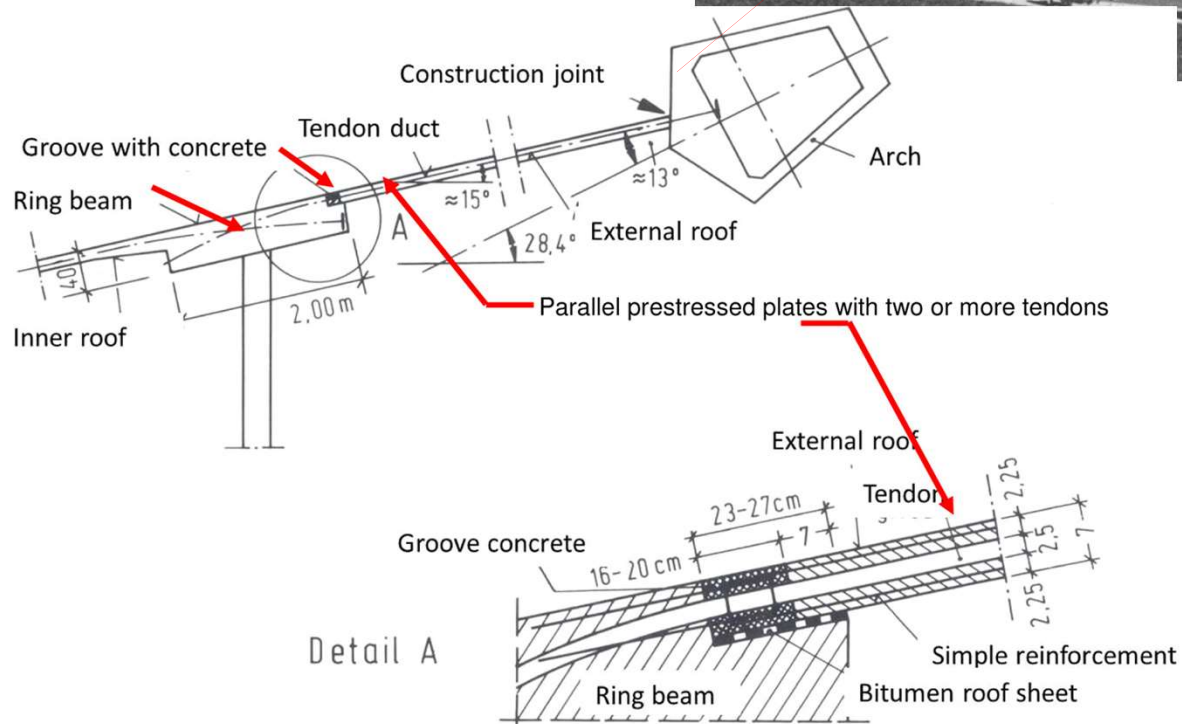
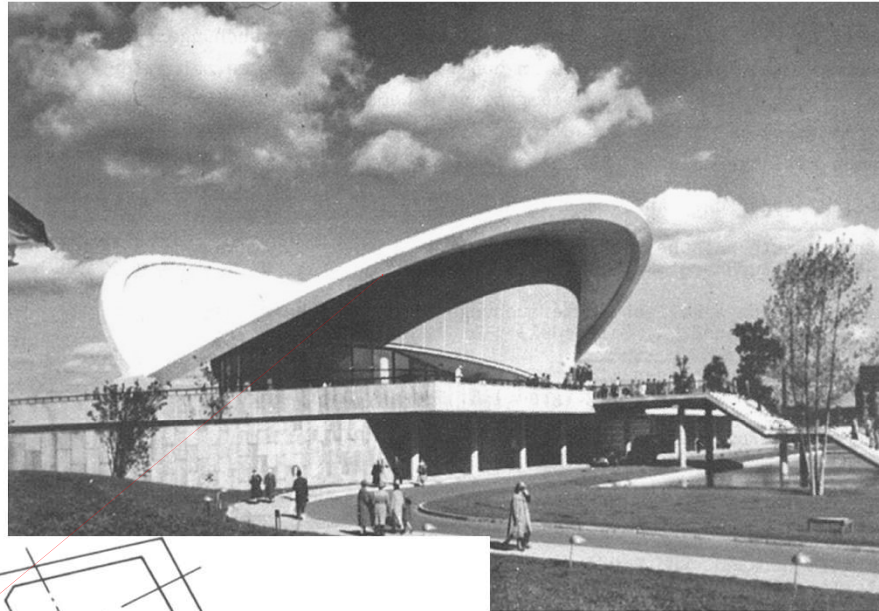


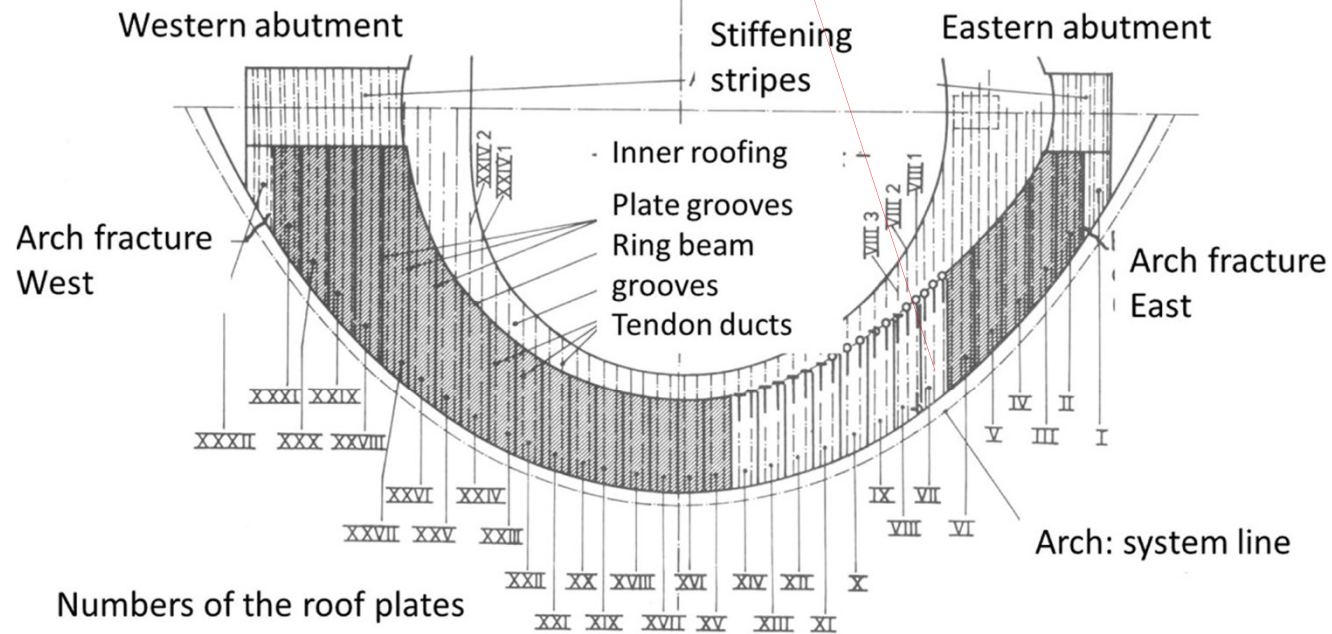




Partial collapse of the Berlin Congress Hall on May 21st, 1980, R. Helmerich, A. Zunkel, Engineering Failure Analysis 43 (2014) 107–119







Plates II-VI and XV-XXXI were hangig at the ring beam or stiffening stripe

Plates VII-XIV were hangig at the edging arch

Broken tendons in the ring beam groove:

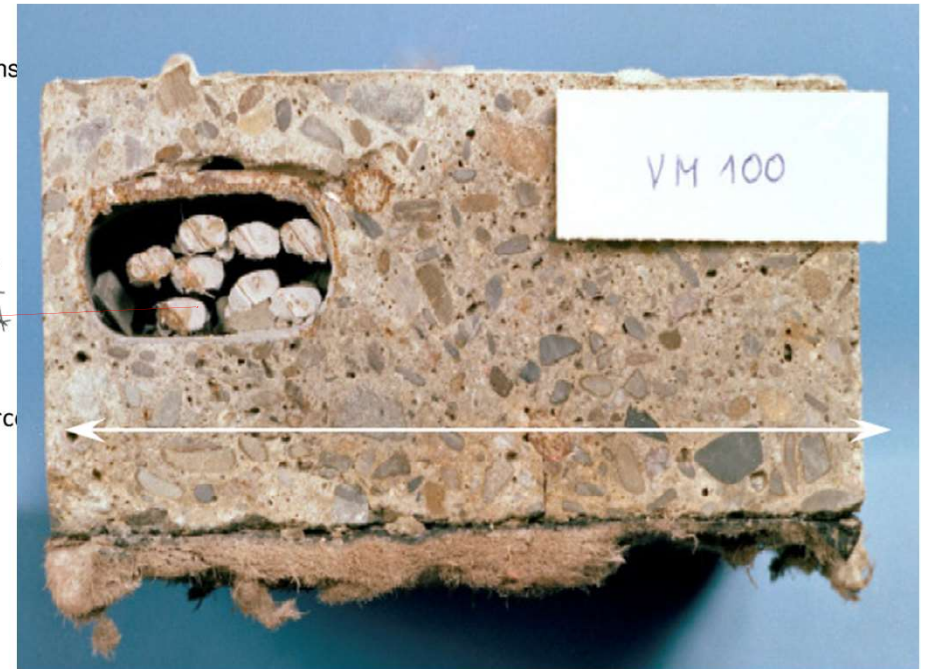
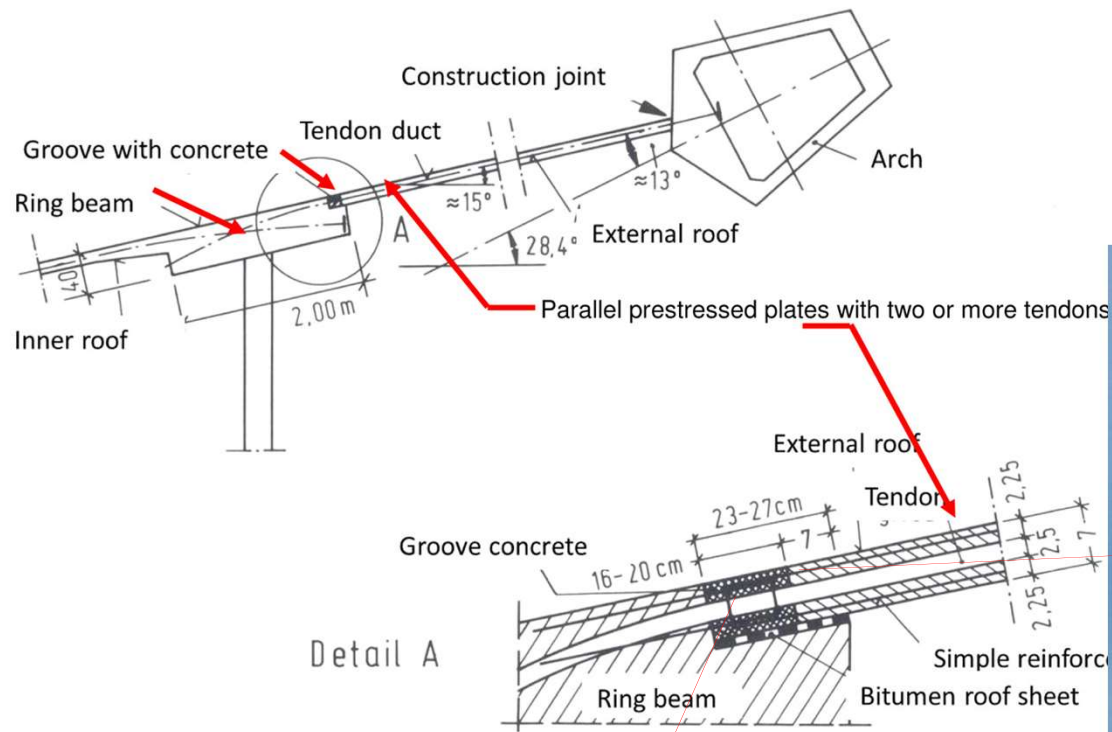
- Ductile fracture
- ⊥ Corroded fracture surface
- ⊥ Partly corroded surface



## Berlin Congress Hall 1957-1980



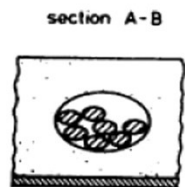
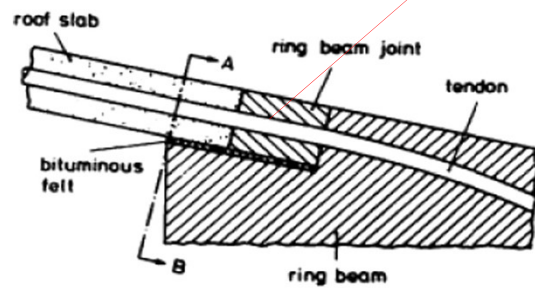
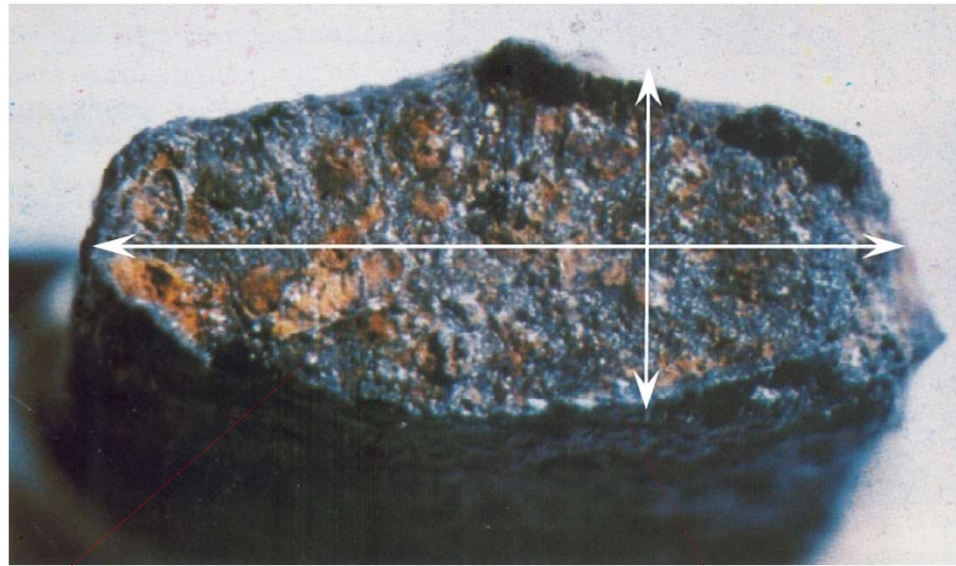




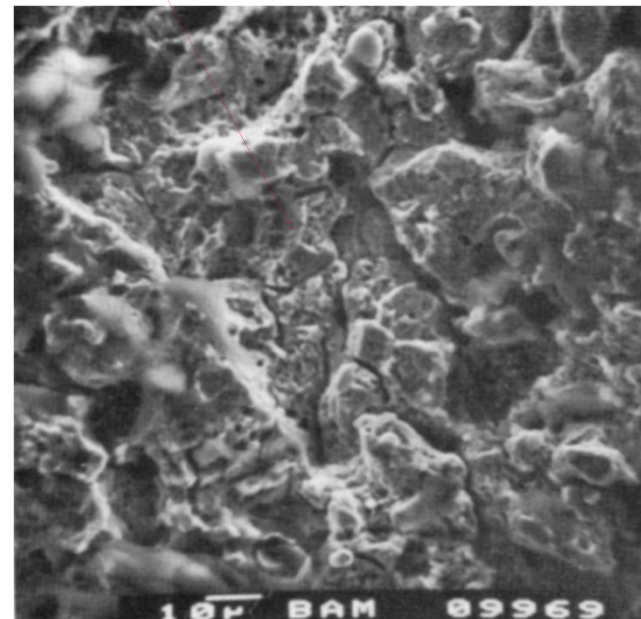
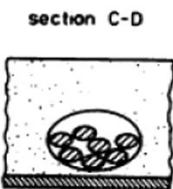
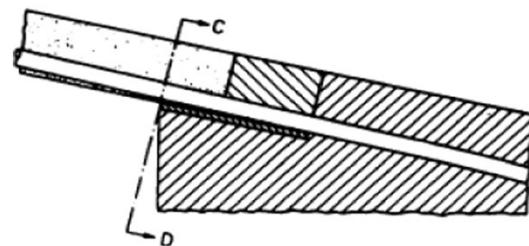
Assenza di  
intasamento

Partial collapse of the Berlin Congress Hall on May 21st, 1980, R. Helmerich, A. Zunkel, Engineering Failure Analysis 43 (2014) 107–119

## Superficie di frattura pre-esistente



enlarged view



Frattura intergranulare





Ricostruita tra il  
1984 e il 1987





# Ancoraggi

## Paratia di contenimento A12 -Flamatt, CH

Autoroute du Canton de  
Fribourg

Anno di costruzione:1970/1971



Prestressing tendons, stay cables and ground anchors – Description of the systems and lessons learnt from corrosion damages.  
F.Hunkeler, P.Matt, U. von Matt, R. Wermer, prog. AGB2000/470, Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti e dell'energia,  
Zurigo, 2005

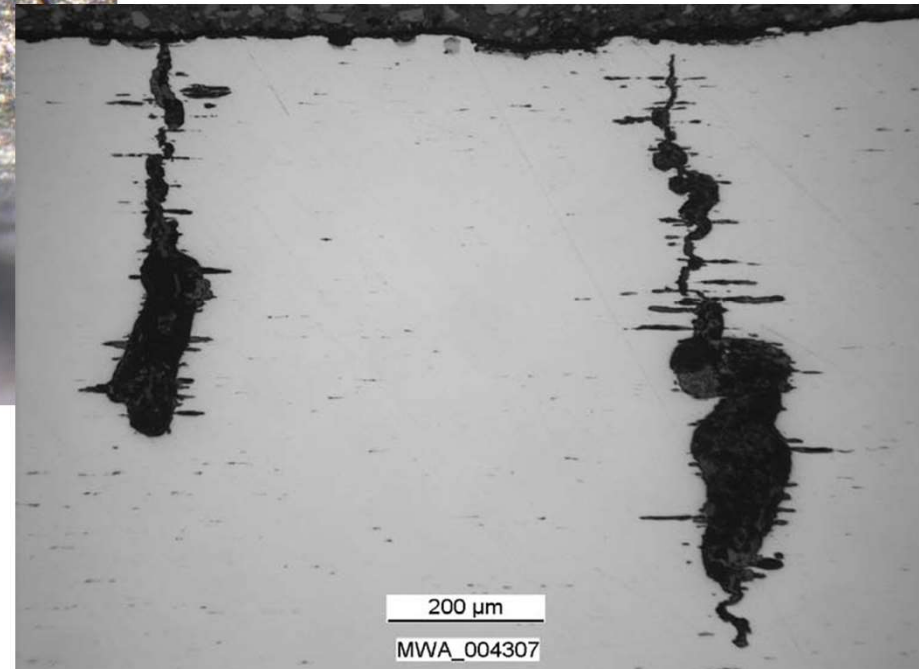
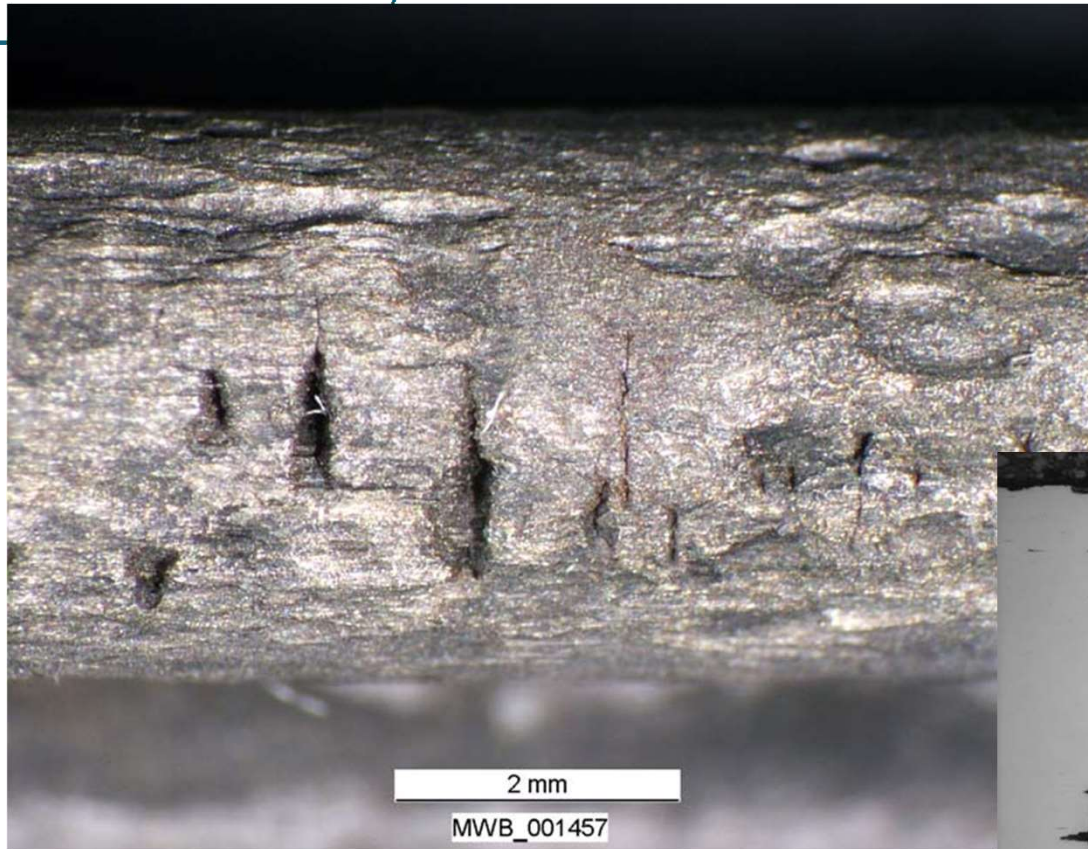


Prestressing tendons, stay cables and ground anchors – Description of the systems and lessons learnt from corrosion damages. F.Hunkeler, P.Matt, U. von Matt, R. Wermer, prog. AGB2000/470, Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti e dell'energia, Zurigo, 2005



*E. Proverbio - La valutazione del rischio di corrosione nelle strutture in c.a.p. a cavi post-tesi: criticità e considerazioni operative*

---



Prestressing tendons, stay cables and ground anchors – Description of the systems and lessons learnt from corrosion damages.  
F.Hunkeler, P.Matt, U. von Matt, R. Wermer, prog. AGB2000/470, Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti e dell'energia, Zurigo, 2005

# Valutare il rischio di corrosione

- Guaine in lamierino metallico
- Guaine in polimero (PE o PP)





## Guaine in lamierino metallico

- La perdita delle capacità protettive della matrice di calcestruzzo (a seguito di carbonatazione, diffusione di cloruri, etc.), può portare alla perforazione della stessa e favorire la contaminazione della malta di iniezione o l'ingresso di acqua e inquinanti all'interno del condotto.



## Guaine in lamierino metallico

- La corrosione dei cavi può avvenire **all'interno** del condotto a seguito di **ingresso di acqua** o contaminazioni preesistenti della boiacca di intasamento o scarse capacità protettive di quest'ultima, anche in **assenza** di problematiche di carbonatazione o inquinamento da cloruri a carico della matrice di calcestruzzo.
- In letteratura sono riportati casi di frattura in ambiente alcalino in presenza di quantitativi anomali di **ioni solfato**



## Guaine in lamierino metallico



Corrosione  
limitata o  
assente

Corrosione  
all'interno della  
guaina e sui fili



## Valutare il rischio di corrosione

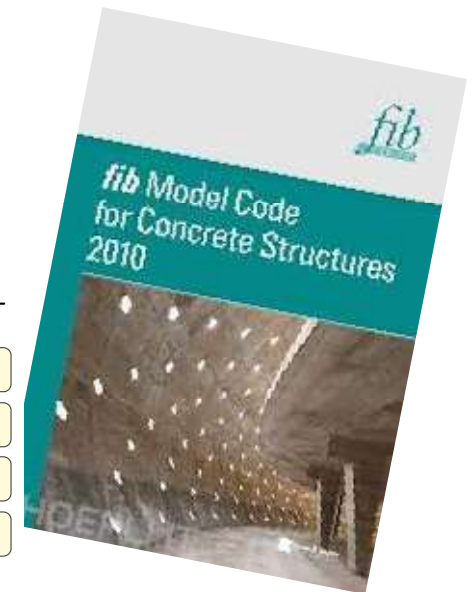
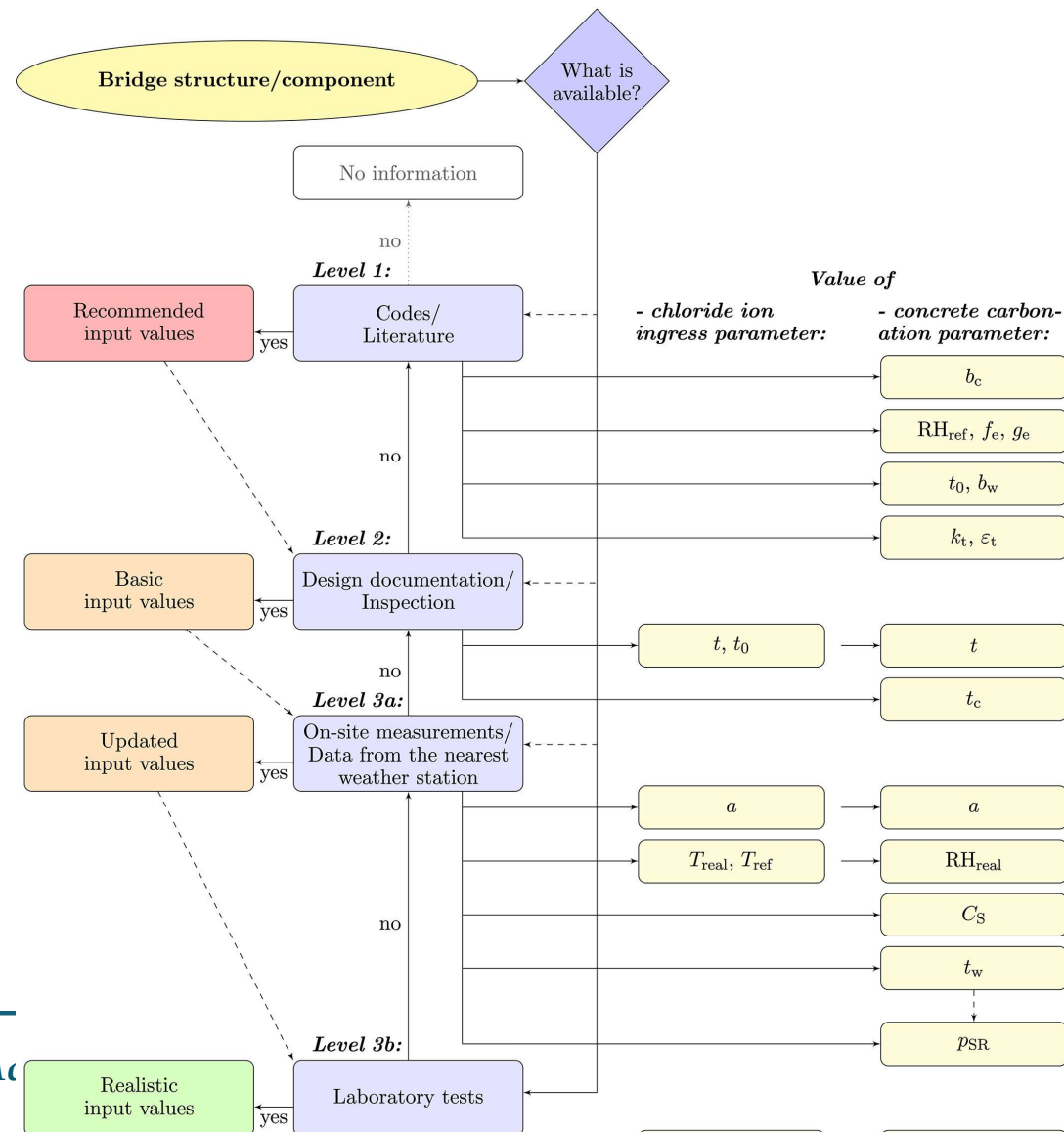
- Indagini sul calcestruzzo
  - (stima della probabilità di corrosione a carico della guaina metallica)
    - Spessore dello strato di calcestruzzo ricoprente la guaina
    - Potenziale elettrochimico delle armature e misura della velocità di corrosione
    - Resistività del calcestruzzo
    - Profondità di carbonatazione
    - Concentrazione di ioni cloruro (profilo di penetrazione)
    - Concentrazione di ioni solfato (in funzione dell'eventuale contatto dell'elemento precompresso con terreni o acque di falda)

Tali valutazioni **NON** sono indicative sugli eventuali fenomeni corrosivi che coinvolgono i cavi



# Valutare il rischio di corrosione

- Modelli previsionali probabilistici



## Valutare il rischio di corrosione

- Indagini sul calcestruzzo
  - (stima della probabilità di corrosione a carico della guaina metallica)

ATTENZIONE, le misure elettrochimiche, (potenziale, velocità di corrosione) sono fortemente influenzate dalla presenza di eventuali barre di armatura lenta superiori (ad un livello più superficiale dei condotti), specie se queste sono interessate da attacchi corrosivi

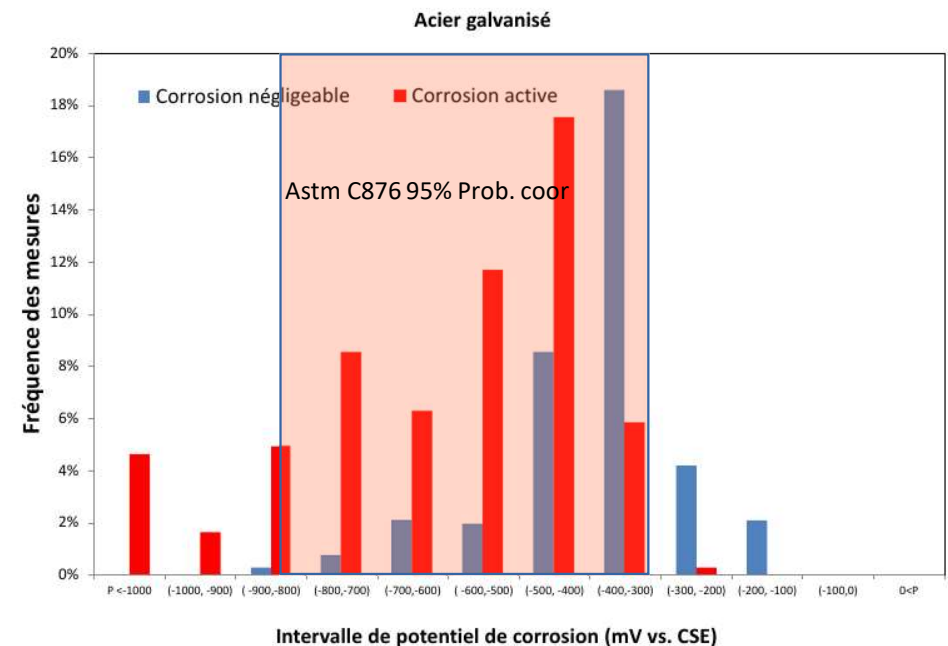
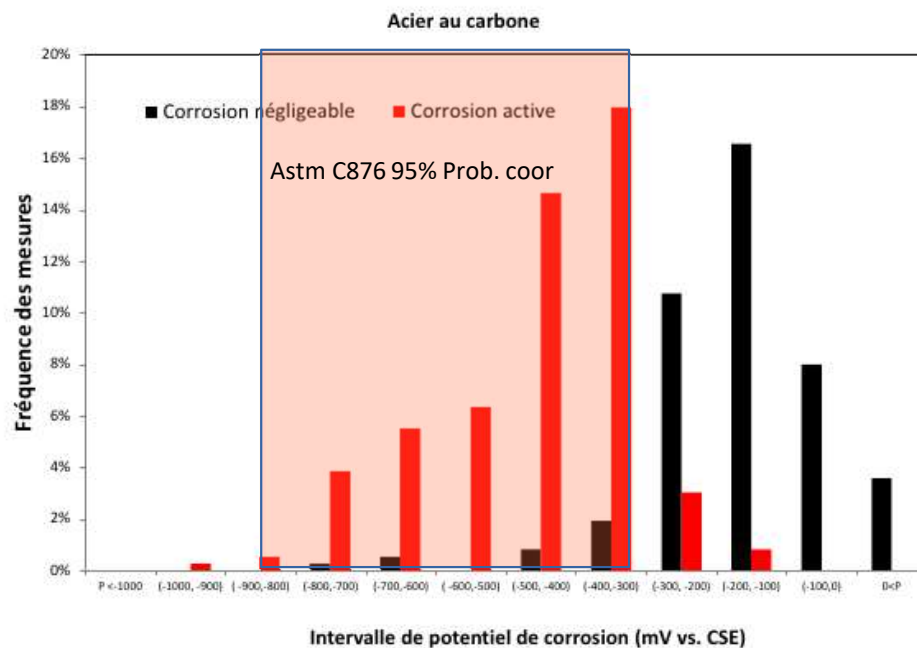




# Valutare il rischio di corrosione

- Indagini sul calcestruzzo
  - Potenziale di corrosione o di macrocella

ATTENZIONE LE GUAINE SONO IN ACCIAIO ZINCATO  
IL POTENZIALE DI PASSIVITÀ È INFERIORE A QUELLO DELL'ACCIAIO NERO

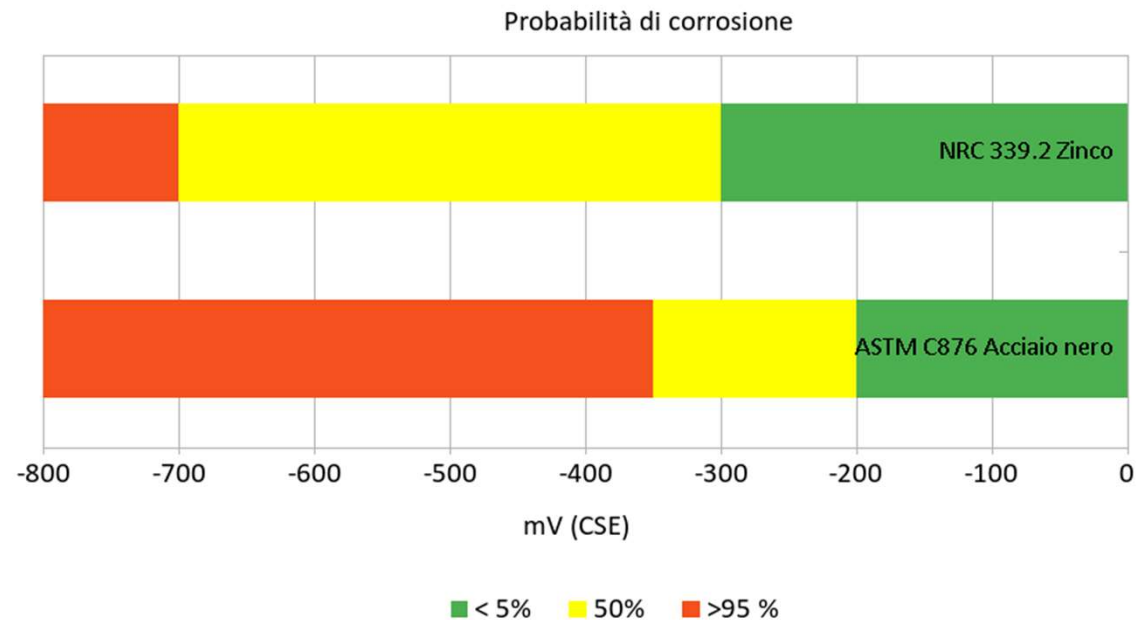


Évaluation de l'état et atténuation de la corrosion de l'armature d'acier galvanisé dans les ouvrages en béton. 2012. National Research Council Canada. NRC Report A1-000339.2

# Valutare il rischio di corrosione

- Indagini sul calcestruzzo
  - Potenziale di corrosione o di macrocella

ATTENZIONE LE GUAINE SONO IN ACCIAIO ZINCATO  
IL POTENZIALE DI PASSIVITÀ È INFERIORE A QUELLO DELL'ACCIAIO NERO





# Valutare il rischio di corrosione

- Indagini sul calcestruzzo
  - Velocità di corrosione istantanea

La misura della velocità di corrosione che si basa sulla tecnica della resistenza di polarizzazione (diretta o indiretta) è una misura istantanea dell'attività elettrochimica all'interfaccia acciaio (zinc) calcestruzzo

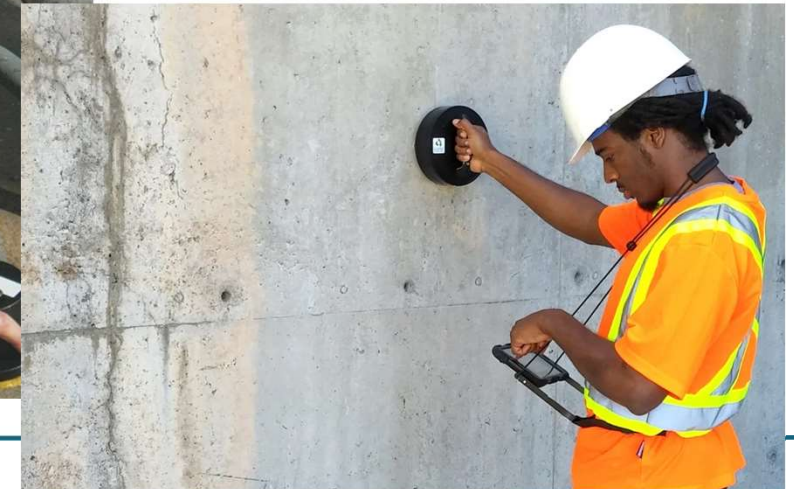
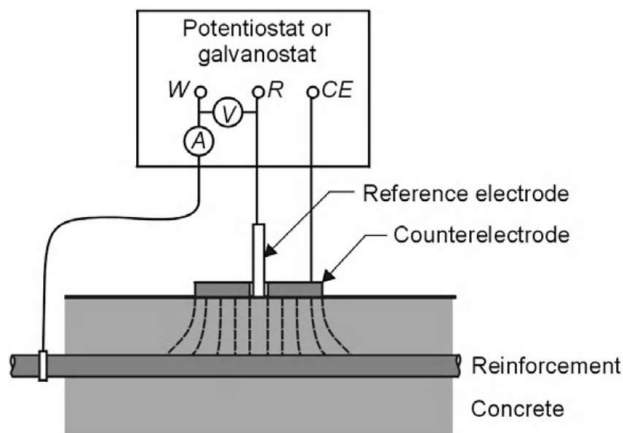


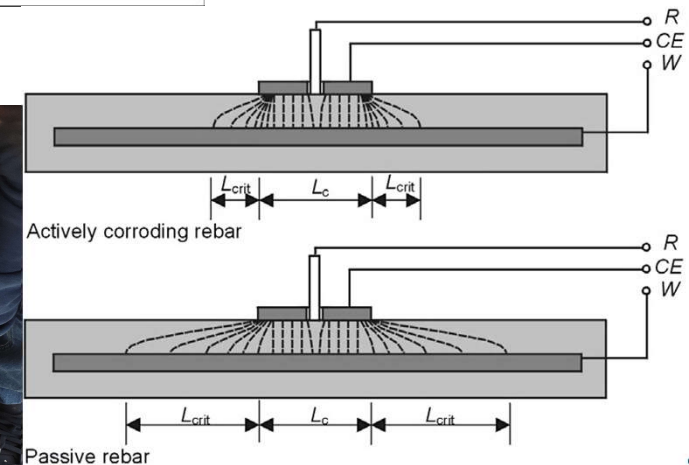
Figure 16.17 Schematic setup for linear polarization measurements.

# Valutare il rischio di corrosione

- Indagini sul calcestruzzo
  - Velocità di corrosione istantanea

E' fondamentale la conoscenza dell'estensione della superficie metallica interessata dal flusso di corrente

| $I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ ) | $I_{corr}$ ( $\mu A/in^2$ ) | Severity of Damage                           |
|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|
| < 0.2                       | < 0.031                     | No corrosion damage expected                 |
| 0.2 – 1.0                   | 0.031 to 0.155              | Corrosion damage possible in 10 to 15 years  |
| 1.0 – 10                    | 0.155 to 1.55               | Corrosion damage expected in 2 to 10 years   |
| > 10                        | > 1.55                      | Corrosion damage expected in 2 years or less |

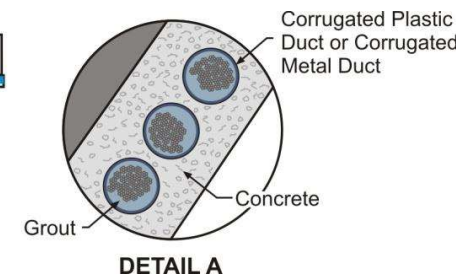
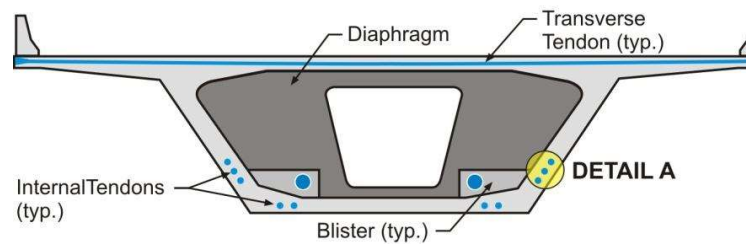
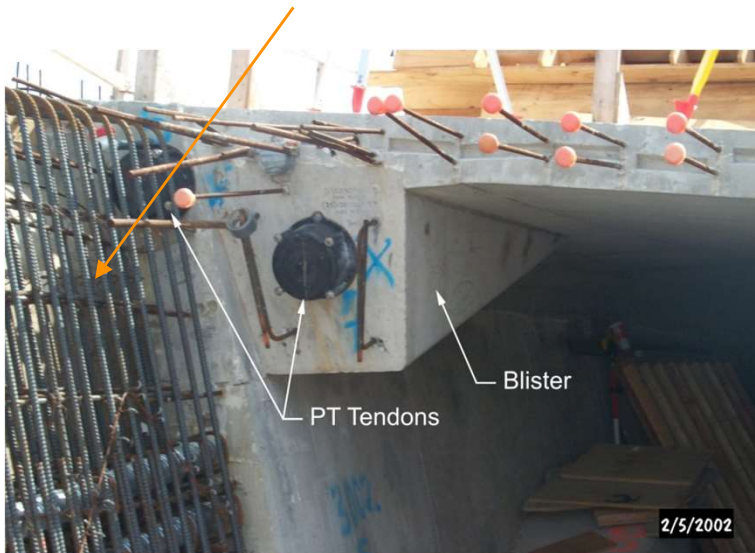


# Valutare il rischio di corrosione

- Indagini sul calcestruzzo
  - Velocità di corrosione istantanea

**NON** è possibile misurare la velocità di corrosione dei fili all'interno della guaina

Le armature superficiali possono influenzare significativamente le misure intenzionalmente rivolte alle guaine metalliche



Immagini tratte da FHWA-HRT-13-028 Guidelines for Sampling, Assessing, and Restoring Defective Grout in Prestressed Concrete Bridge Post-Tensioning Ducts

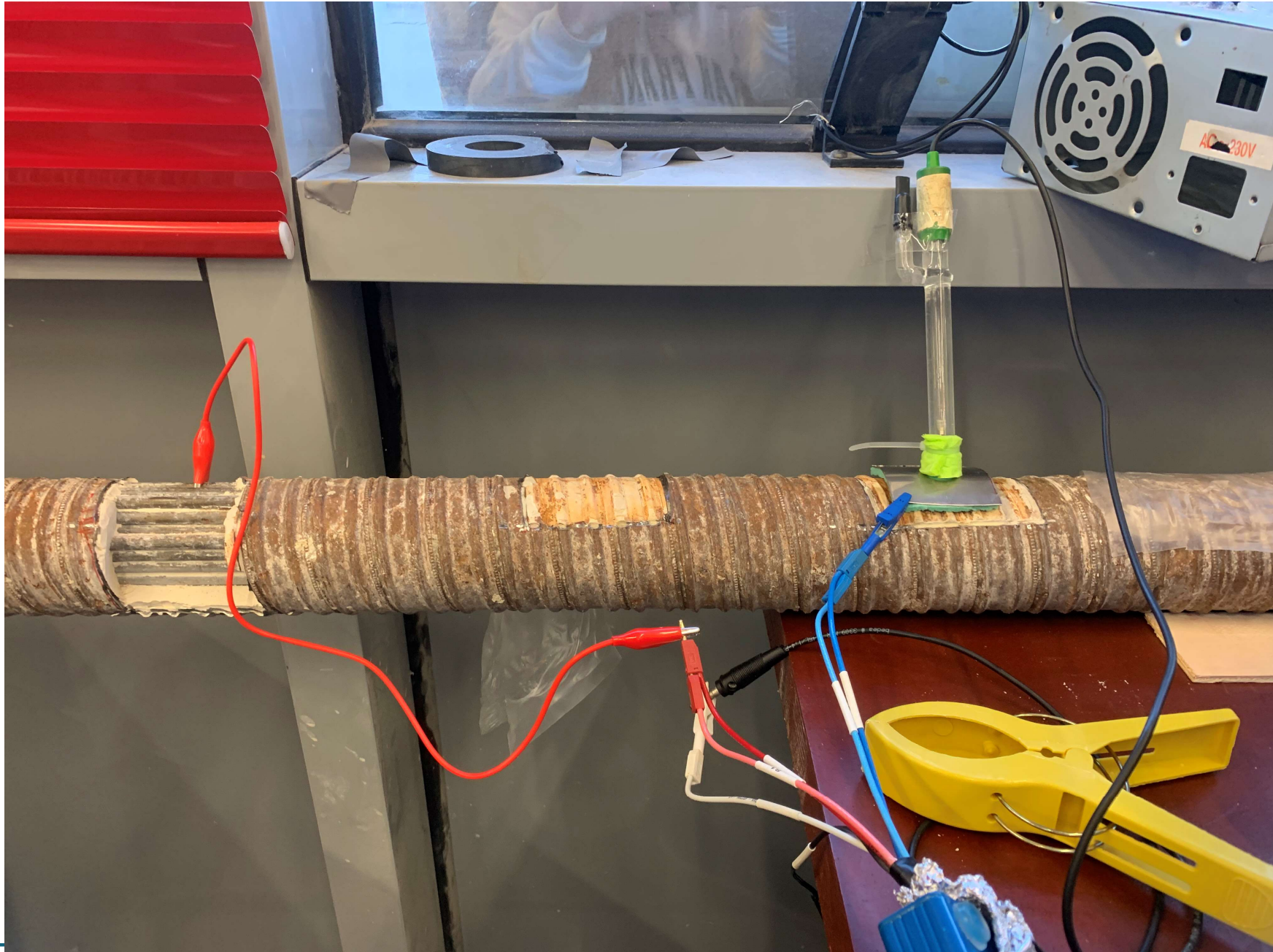


# Valutare il rischio di corrosione

- Indagini sul calcestruzzo
  - Velocità di corrosione istantanea

La misura di velocità di corrosione misurata direttamente all'interno della guaina è molto delicata e da effettuare con estrema attenzione e spesso non è possibile effettuarla

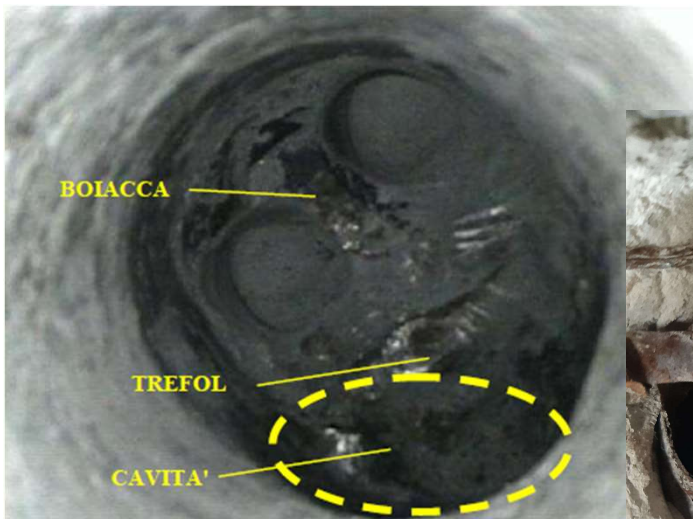






# Valutare il rischio di corrosione

- L'**accesso diretto** al condotto tramite l'apertura di finestre, fori con carotaggi o per ispezioni endoscopiche è l'unica tecnica dirimente in caso di forti perplessità.
- La tecnica oltre che essere invasiva è ovviamente **locale**





# Valutare il rischio di corrosione

Il prelievo e l'analisi della boiaccia di iniezione può fornire importanti informazioni sul rischio di corrosione



## Guidelines for Sampling, Assessing, and Restoring Defective Grout in Prestressed Concrete Bridge Post-Tensioning Ducts

PUBLICATION NO. FHWA-HRT-13-028

OCTOBER 2013



U.S. Department of Transportation  
Federal Highway Administration

Research, Development, and Technology  
Turner-Fairbank Highway Research Center  
6300 Georgetown Pike  
McLean, VA 22101-2296

Il prelievo e l'analisi della boiaccia di iniezione può fornire importanti informazioni sul rischio di corrosione

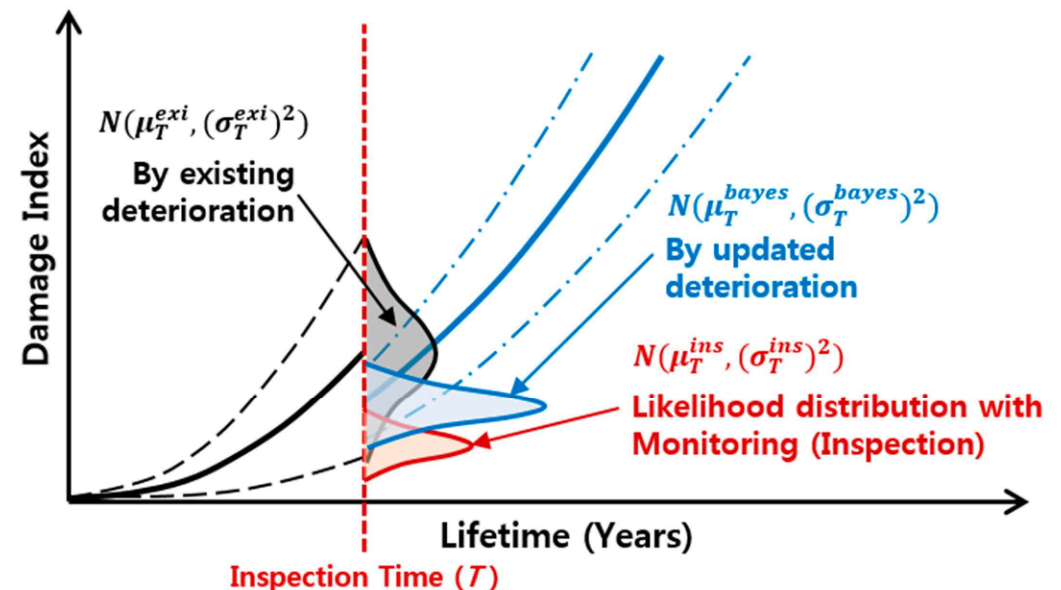
1. contenuto di cemento,
2. concentrazione di ioni cloruro,
3. concentrazione di ioni solfato,
4. alcalinità,
5. contenuto di umidità.



Immagini tratte da Maddalena Carsana & Luca Bertolini (2015) Corrosion failure of post-tensioning tendons in alkaline and chloride-free segregated grout: a case study, Structure and Infrastructure Engineering, 11:3, 402-411, DOI: [10.1080/15732479.2014.887736](https://doi.org/10.1080/15732479.2014.887736)

## Valutare il rischio di corrosione

- Le indagini spesso hanno una rilevanza solo locale
- La necessità di un approccio probabilistica alla valutazione del rischio da corrosione
- La transizione da una visione deterministica ad una valutazione probabilistica
- L'approccio del *fib* Model Code for Service Life design e oltre
- Inferenza Bayesiana e EVS



Sustainability 2019, 11(23), 6593; <https://doi.org/10.3390/su11236593>



# La necessità di tecniche di indagine (e monitoraggio) globali

# Tecniche di indagine (e monitoraggio) globali

- E' importante individuare una tecnica che sia in grado di dare una valutazione complessiva e “diretta” dello stato di corrosione dei cavi all'interno del condotto. Tra le altre sono da evidenziare:
  - **Emissione acustica** (tecnica da anni consolidata in campo industriale per il controllo dei strutture metalliche e ora in fase di applicazione anche nel campo dell'Ingegneria Civile)
  - **Riflettometria elettrica** nel dominio del tempo e nel dominio delle frequenze (tecnica sviluppata nel settore delle telecomunicazioni e linee di trasmissione elettrica, applicata in campo geotecnico)

## Tecniche di indagine: emissione acustica

L'utilizzo di tale tecnica è versatile e può avere diverse finalità. Una delle principali potenzialità della tecnica EA è quella di consentire sia la **localizzazione della sorgente** emissiva che di **determinarne la natura**. È difatti plausibile ritenere che ogni segnale emesso possa essere rappresentato da caratteristiche che individuano univocamente la sorgente acustica.

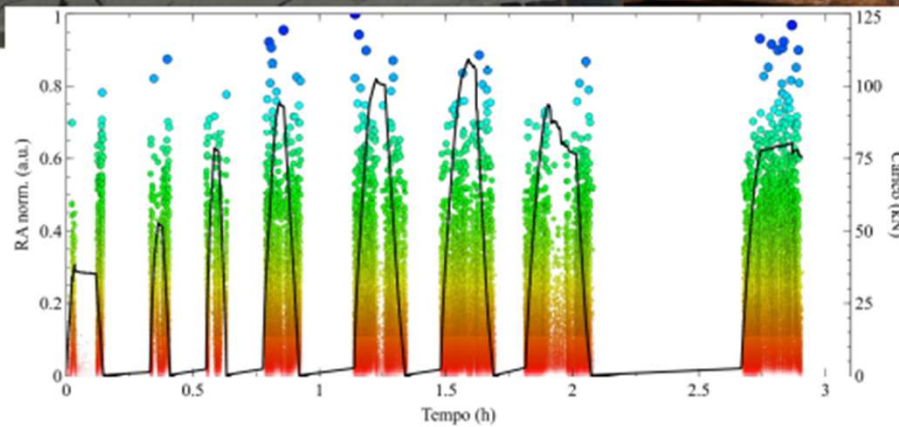
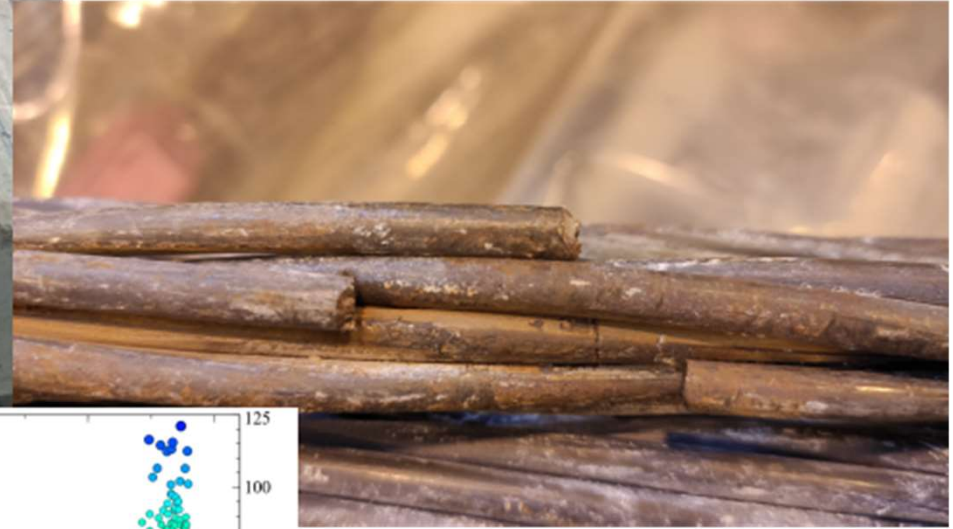
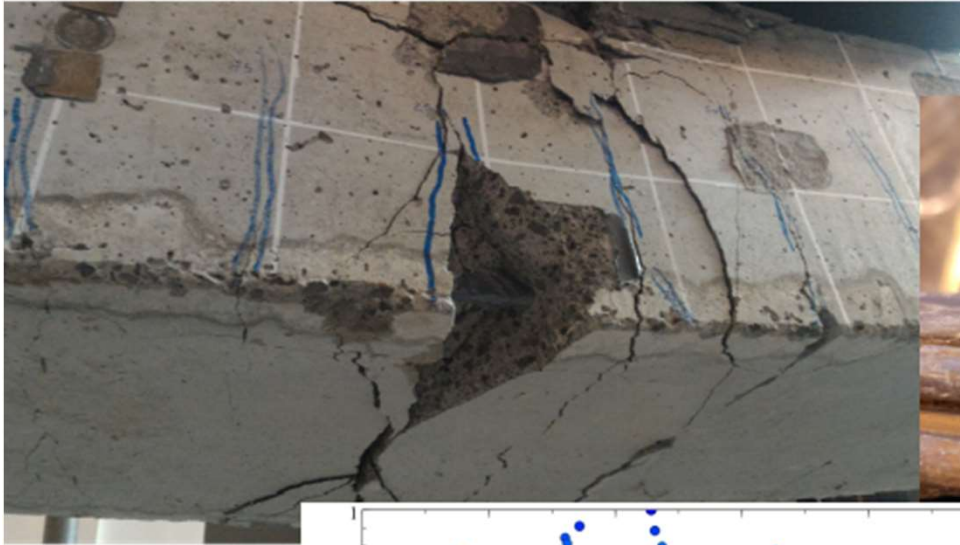
L'Emissione acustica è una **tecnica passiva**, registra ciò solo gli eventi microsimici generati dalla struttura e richiede pertanto l'applicazione in un contesto di **monitoraggio**

Un difetto per essere emissivo deve essere un **difetto attivo** (avanzamento di una cricca nel calcestruzzo, frattura di un filo o di un cavo).

Tale attività può essere conseguente all'evoluzione di un processo di degrado o favorita dall'applicazione di una **sollecitazione esterna**, ad esempio per carichi indotti da traffico veicolare o durante le prove di carico



### Lesioni nel calcestruzzo



### Fratture nell'acciaio

# EA: standard e normativa italiana

Norme UNI

Controllo e verifica delle apparecchiature in pressione

[UNI EN ISO 18081:2016](#)

Prove non distruttive - Prova di emissione acustica (AT) - Rilevazione delle perdite mediante emissione acustica

[UNI EN 13554:2011](#)

Prove non distruttive - Prova di emissione acustica - Principi generali

[UNI EN 1330-9:2017](#)

Prove non distruttive - Terminologia - Parte 9: Termini utilizzati nel controllo con emissione acustica

[UNI CEN/TS 13445-501:2019](#)

Recipienti a pressione non esposti a fiamma - Parte 501: Emissione acustica per recipienti a pressione

[UNI EN 14584:2013](#)

Prove non distruttive - Prova di emissione acustica - Ispezione di attrezzature a pressione metalliche durante la prova di accettazione - Localizzazione planare delle sorgenti di EA

[UNI EN ISO 16148:2020](#)

Bombole per gas - Bombole per gas ricaricabili di acciaio senza saldatura e tubi - Prova di emissione acustica (AT) e successivo controllo ultrasonico (UT) per ispezioni e prove periodiche

# EA: standard e normativa italiana

## [UNI EN 13477-1:2003](#)

Prove non distruttive - Emissione acustica - Caratterizzazione dell'apparecchiatura - Descrizione dell'apparecchiatura

## [UNI EN 15495:2008](#)

Prove non distruttive - Emissione acustica - Ispezione di attrezzature a pressione metalliche durante la prova di accettazione - Localizzazione a zona delle sorgenti di EA

## [UNI EN 15856:2010](#)

Prove non distruttive - Emissione acustica - Principi generali di prova con EA per la rivelazione di corrosione all'interno di strutture metalliche riempite di liquido

## [UNI EN 15857:2010](#)

Prove non distruttive - Emissione acustica - Prova di polimeri rinforzati con fibre - Metodologia specifica e criteri di valutazione generali

## [UNI EN 13477-2:2010](#)

Prove non distruttive - Emissione acustica - Caratterizzazione dell'apparecchiatura - Parte 2: Verifica delle caratteristiche funzionali

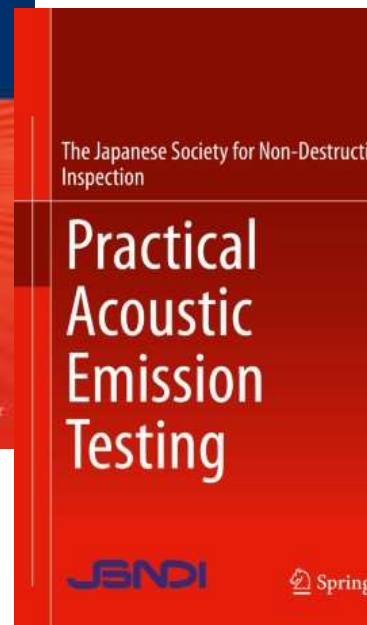
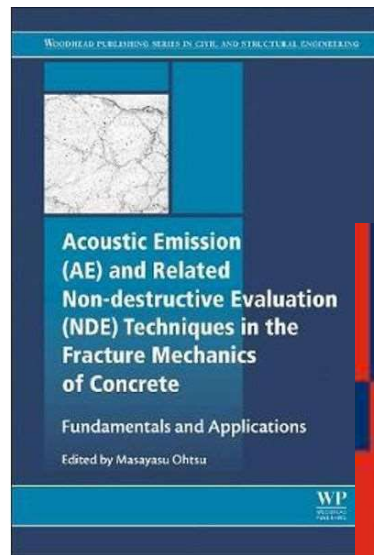


*E. Proverbio - La valutazione del rischio di corrosione nelle strutture in c.a.p. a cavi post-tesi: criticità e considerazioni operative*

---



# EA applicata alle strutture in c.a.: standard e normativa internazionale



Materials and Structures (2010) 43:1183–1186  
DOI 10.1617/s11527-010-9639-z

RILEM TECHNICAL COMMITTEE

## Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete\*

### Test method for damage qualification of reinforced concrete beams by acoustic emission

RILEM Technical Committee (Masayasu Ohtsu)\*\*

Published online: 29 July 2010  
© RILEM 2010

#### 1 Scope

Acoustic Emission (AE) techniques have been investigated in concrete engineering for more than a half century [1]. Nowadays, results of AE research are going to be applied to practical use, not only in

concrete structures, but also in masonry structures [2, 3]. This is because the increase of aging structures and disastrous damages due to recent earthquakes urgently demands for maintenance and retrofit of reinforced concrete structures in service.

Reinforced concrete structures in service could deteriorate due to heavy traffic loads and fatigue. In order to assess the damage levels of the structures by AE, one criterion based on the Kaiser effect is proposed. The damages of such reinforced concrete beams in service as bridges, docks and buildings are qualified, by simply applying cyclic loading and monitoring AE activity. This recommendation is referred to the existing standards and codes [4–14], of which the newest versions shall be cited.

#### 2 Definition of technical terms

In addition to terms defined in *RILEM recommendation*, “measurement method for acoustic emission signals in concrete”, the following terms are defined.

- (a) *AE count and hit*: One AE transient signal detected by AE sensors and processed by a given AE channel. Normally, AE counts imply the number of times when the signal amplitude exceeds the threshold. They also are rigorously named ring-down counts, or simply referred to as counts. The number of hits is obtained by event-counting and corresponds to that of AE waves detected at one channel

\*The text presented hereafter is a draft for general consideration.

Comments should be sent within 6 months of publication to the TC chairman, Prof. Masayasu Ohtsu, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, Japan. Phone: +81-96-342-3542, Fax: +81-96-3423507, E-mail: Ohtsu@gpo.kumamoto-u.ac.jp.

\*\*This recommendation was developed by a work group within RILEM TC212-ACD under the leadership of Mr. Masayasu Ohtsu, Japan.

TC-Membership:

Chairman: Masayasu Ohtsu, Japan.

Secretary: Tomoki Shiotani, Japan.

Members: M. Shigeishi, T. Kamada, S. Yuyama, T. Watanabe, T. Suzuki, Japan; J. G. M. van Mier, T. Vogel, Switzerland; C. Grosse, R. Helmerich, Germany; M. C. Forde, U.K.; A. Moczko, Poland; D. Breyse, France; S. A. Ivanovich, Russia; A. Sajna, Slovenia; D. Aggelis, Greece; G. Lacidogna, Italy.

RILEM Technical Committee 212-ACD  
(Masayasu Ohtsu) (✉)

Graduate School of Science and Technology, Kumamoto University, 2-39-1 Kurokami, Kumamoto 860-8555, Japan  
e-mail: Ohtsu@gpo.kumamoto-u.ac.jp.



## Tecniche di indagine: emissione acustica

Design Manual for Roads and Bridges



Highway Structures & Bridges  
Inspection & Assessment

**CS 465**

### Management of post-tensioned concrete bridges

(formerly BD 54/15)

Revision 0

#### Summary

This document provides a process of risk review, risk assessment and risk management for post-tensioned concrete bridges to provide assurance on the safety of the stock of those bridges.

#### Application by Overseeing Organisations

Any specific requirements for Overseeing Organisations alternative or supplementary to those given in this document are given in National Application Annexes to this document.

#### Feedback and Enquiries

Users of this document are encouraged to raise any enquiries and/or provide feedback on the content and usage of this document to the dedicated Highways England team. The email address for all enquiries and feedback is: [Standards\\_Enquiries@highwaysengland.co.uk](mailto:Standards_Enquiries@highwaysengland.co.uk)

This is a controlled document.

INTERNATIONAL  
STANDARD

ISO  
16837

First edition  
2019-01

**Non-destructive testing — Acoustic  
emission testing — Test method for  
damage qualification of reinforced  
concrete beams**

*Essais non destructifs — Contrôle par émission acoustique —  
Méthode d'essai pour la qualification des dommages des faisceaux de  
béton armé*



# EA applicata alle strutture in c.a.: standard e normativa internazionale

## ISO 16836:2019(en)

Non-destructive testing — Acoustic emission testing — Measurement **method** for acoustic emission signals in concrete

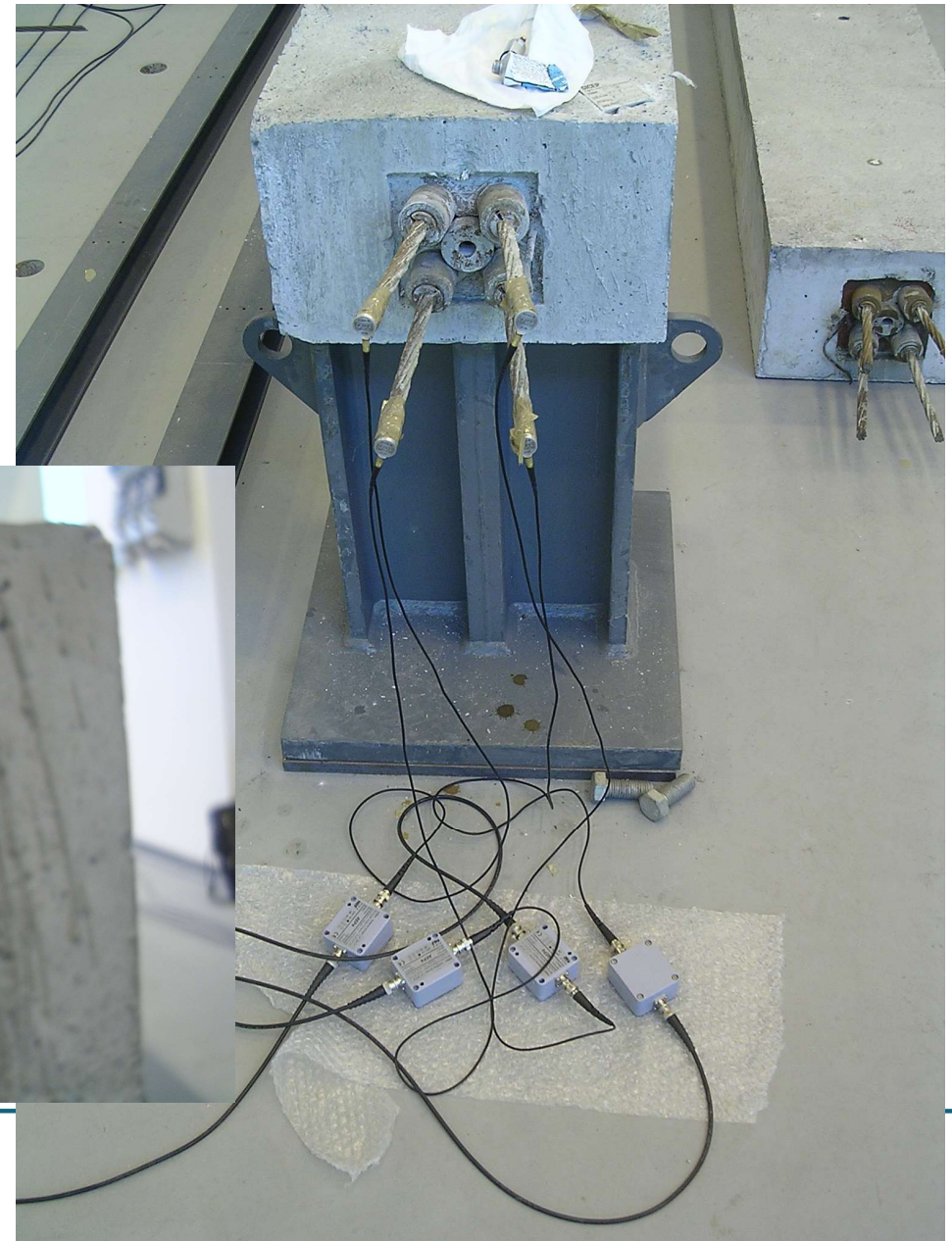
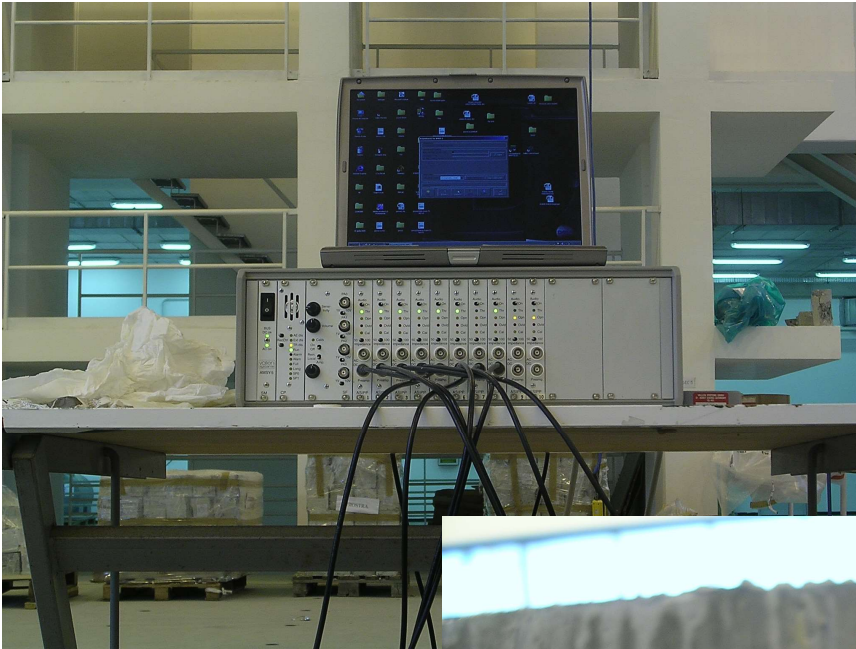
## ISO 16837:2019(en)

Non-destructive testing — Acoustic emission testing — Test method for damage **qualification** of reinforced concrete beams

## ISO 16838:2019(en)

Non-destructive testing — Acoustic emission testing — Test method for **classification** of active cracks in concrete structures

## Tecniche di indagine: emissione acustica



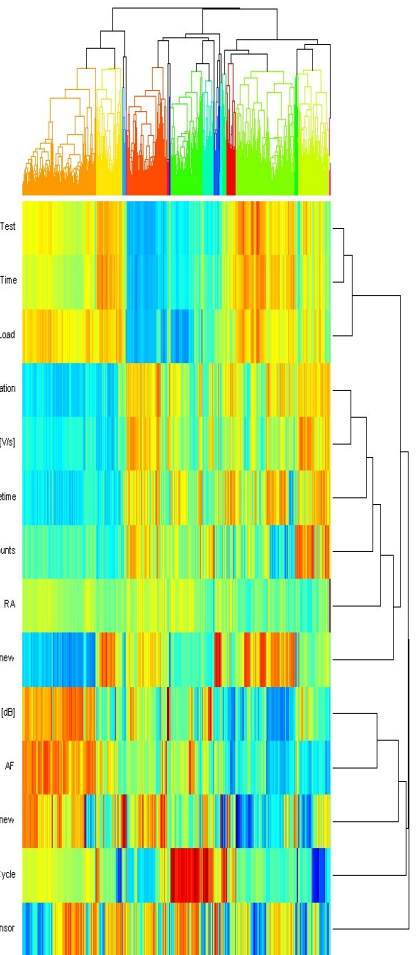


## Tecniche di indagine: emissione acustica



Sorgenti EA

Acquisizione e  
unità di  
elaborazione



Post processing



## Tecniche di indagine: emissione acustica: Il monitoraggio

Particolare attenzione va posta nella valutazione dell'**attenuazione** del segnale acustico lungo il percorso di propagazione. Tale attenuazione è determinante nella definizione del **numero di sensori** da installare e nella precisione dell'elaborazione dell'algoritmo di localizzazione.



Products & Systems  
Division



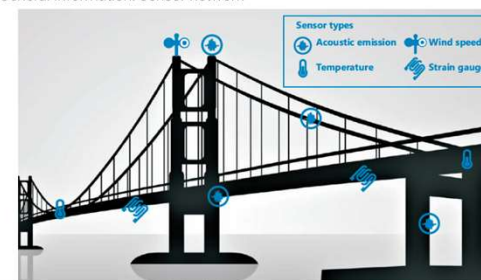
### PRODUCT BULLETIN

vallen systeme

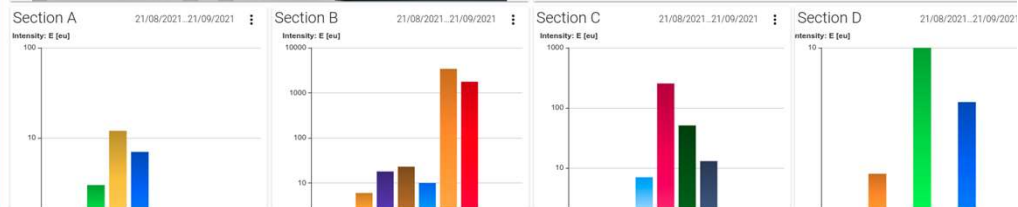
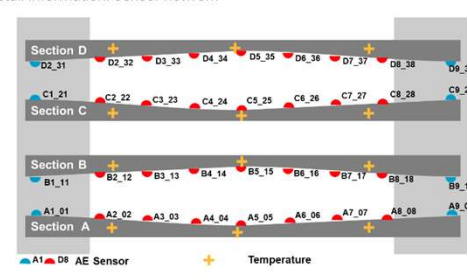
- Dashboard overview
- Dashboard title plural
- Acoustic Emission & Temperature
- AE: Section A, B, C, D
- AE: Section B (details)
- Temperature
- Terms imprint
- Terms privacy
- Terms about

### Acoustic Emission & Temperature: Top View

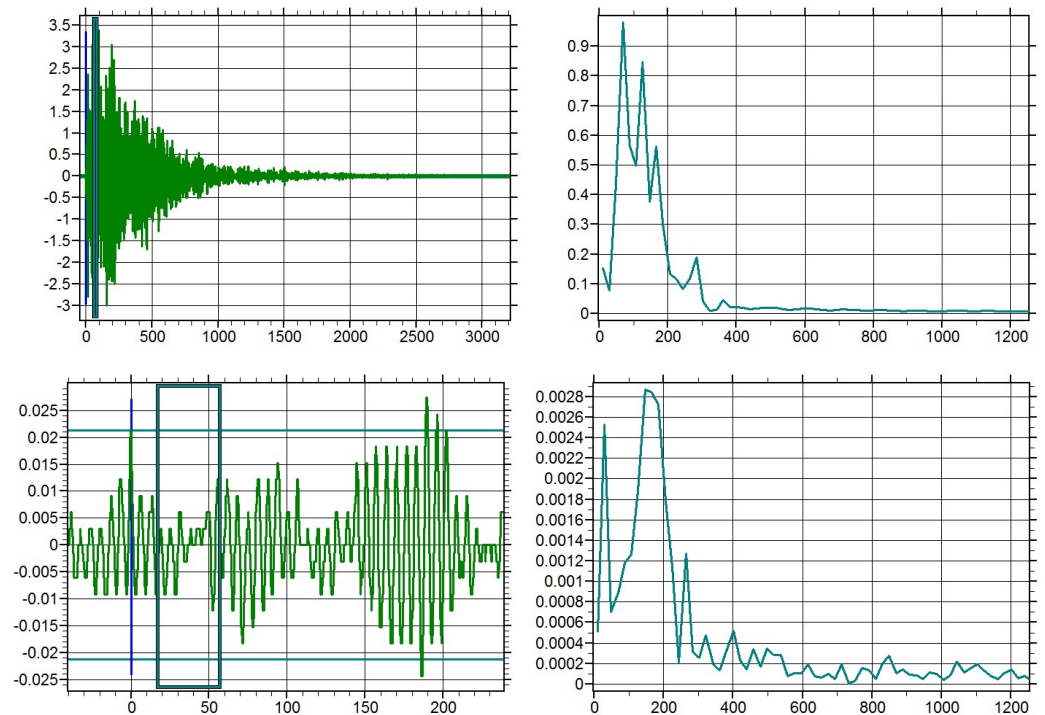
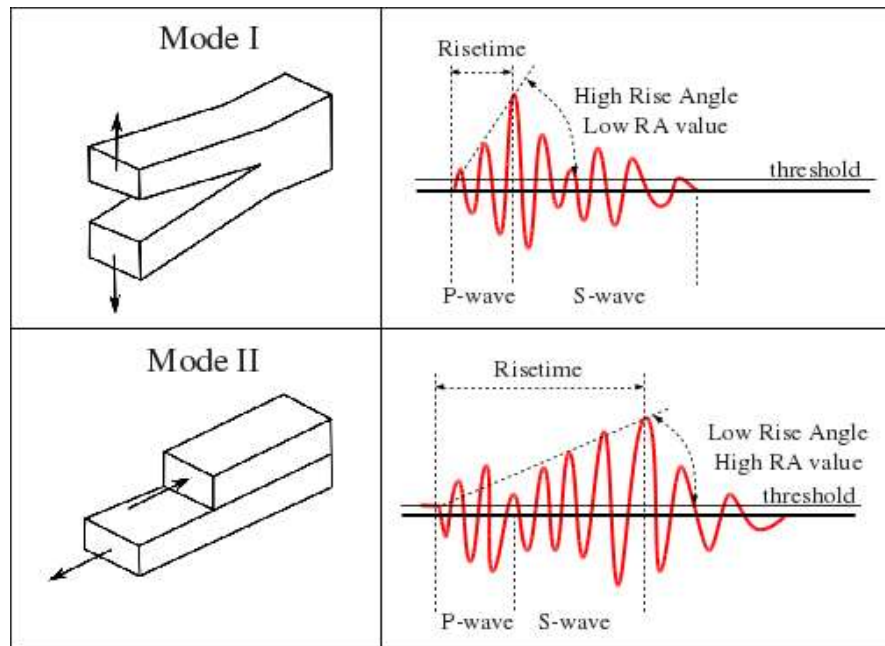
#### General information: Sensor network



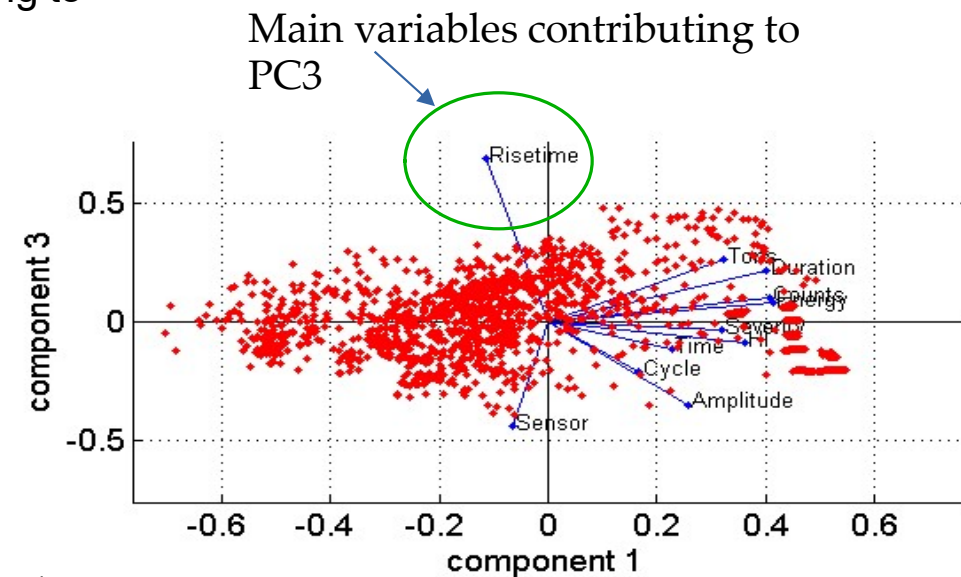
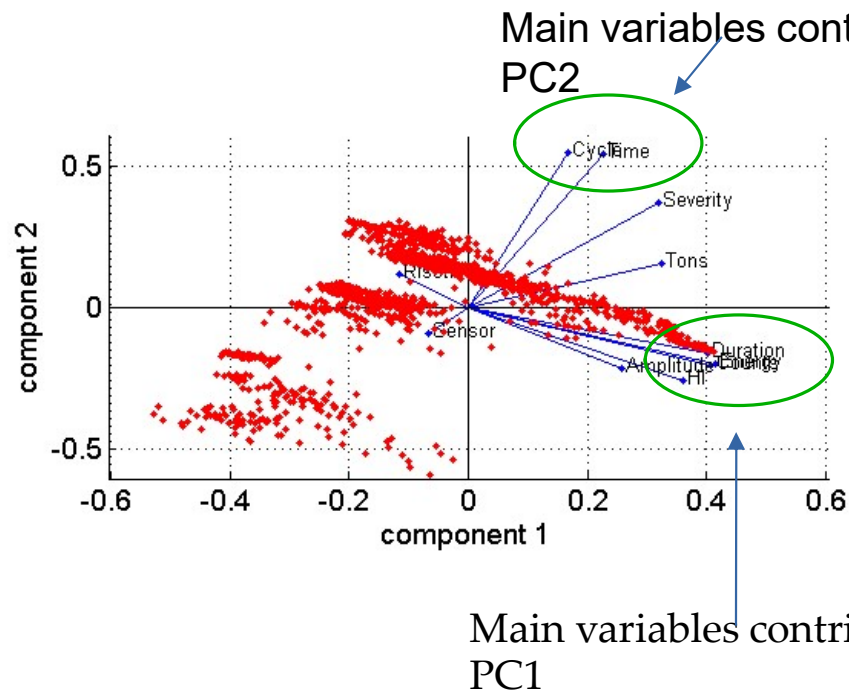
#### Detail information: Sensor network



## EA: analisi della forma d'onda

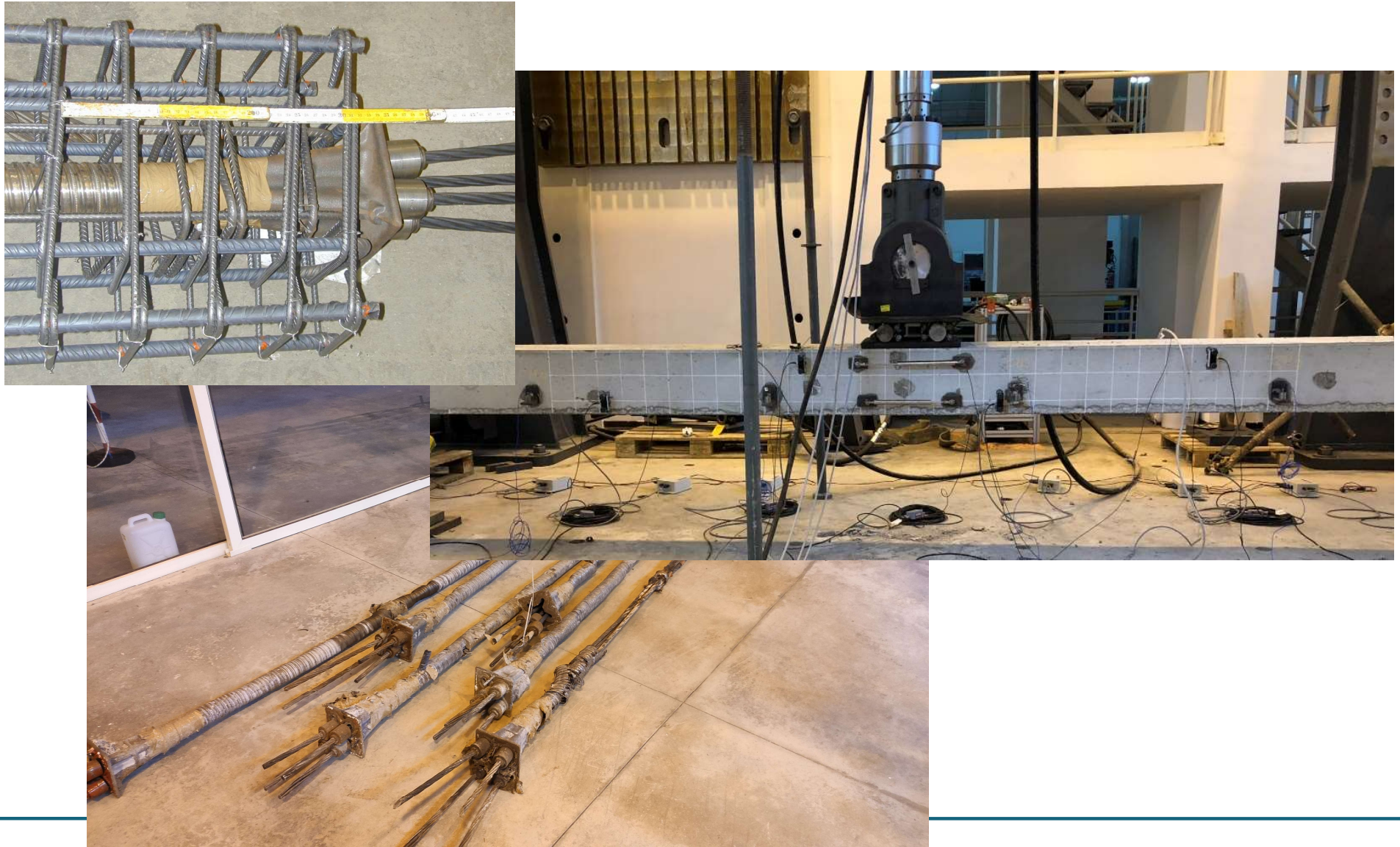


## EA: analisi multivariabile e clusterizzazione dei dati





## EA- valutazione del danno - Test in laboratorio



## EA- valutazione del danno - frattura fragile / frattura duttile



Frattura fragile - trave T5a

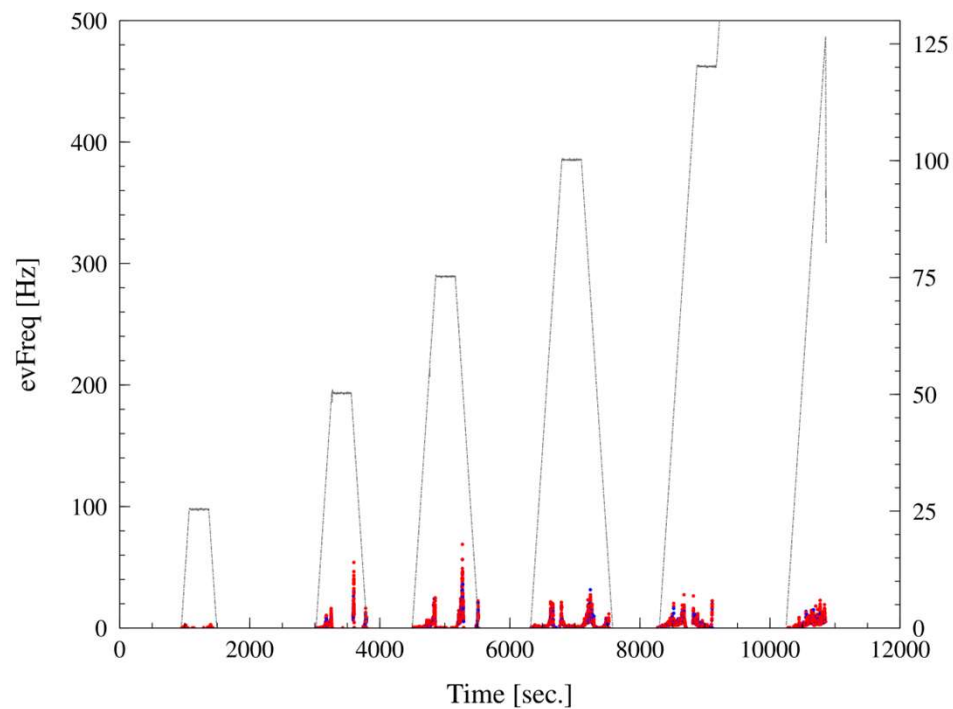


Frattura duttile – trave T5a

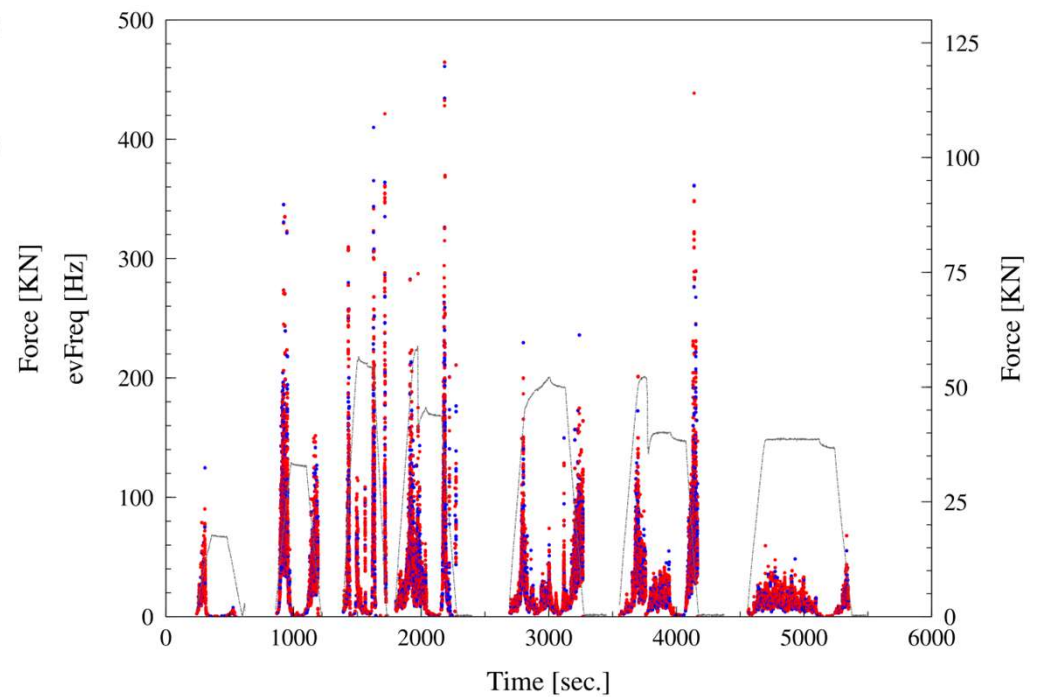


## AE data analysis: activity during loading cycle

Trave integra: T1

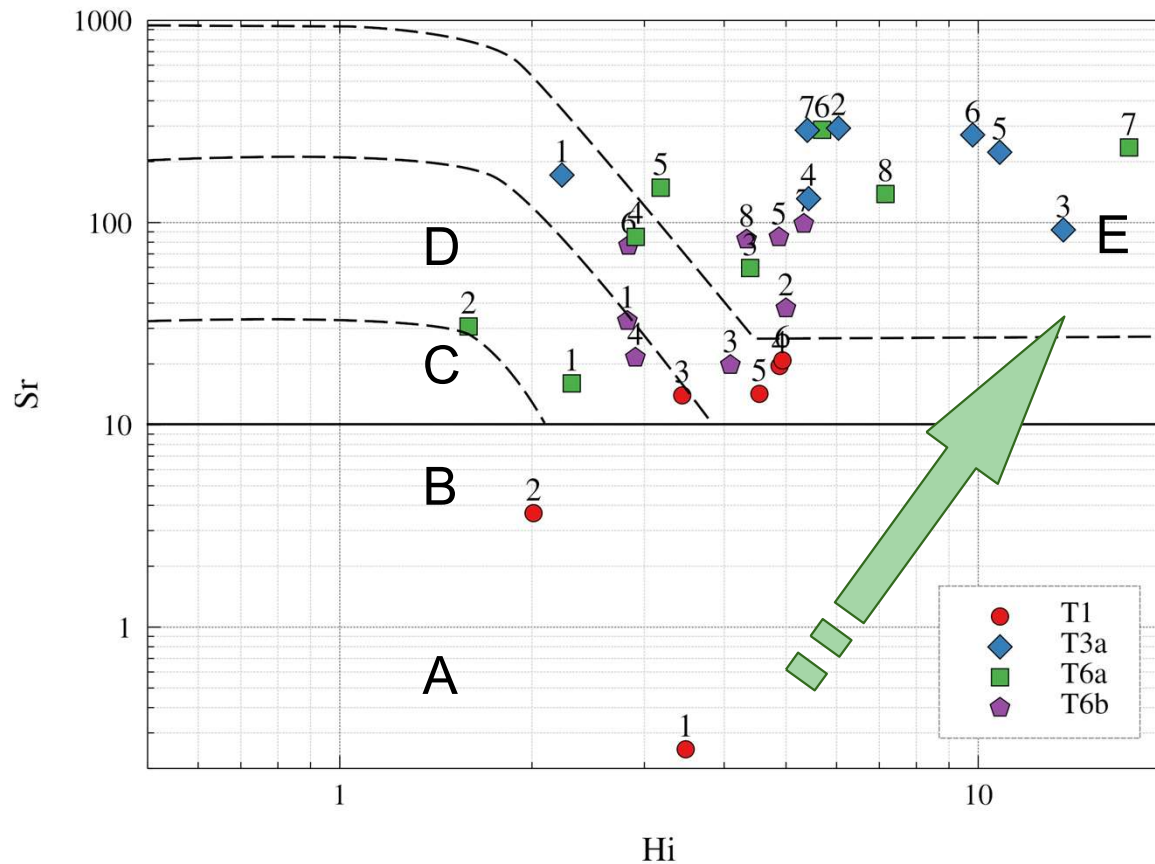


Trave pre-danneggiata (corrosione cavo): T3a





## EA- valutazione del danno -Indici di danno (cicli di carico crescente) Test in laboratorio



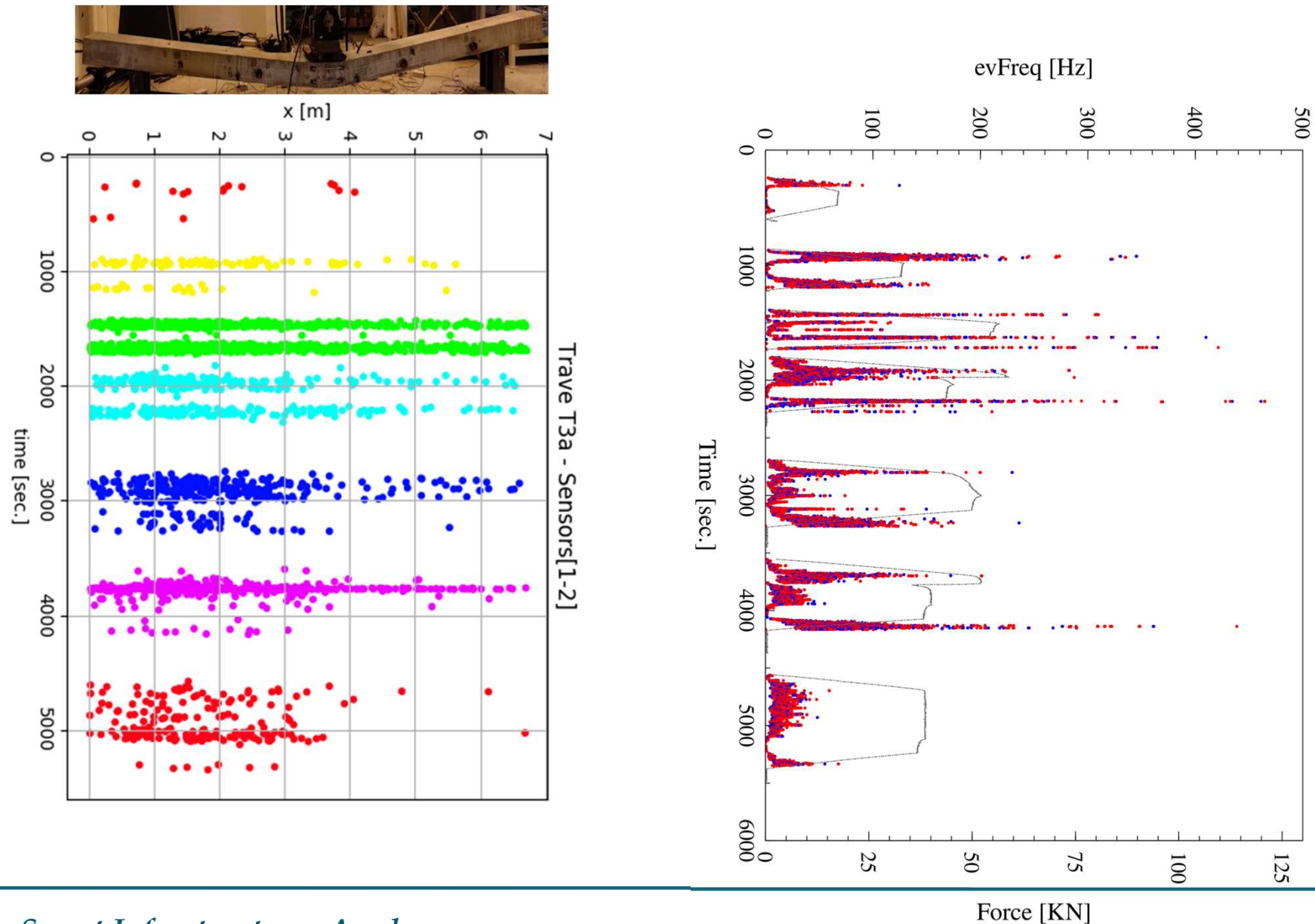
Attività EA crescente  
Danno crescente

I numeri si riferiscono alla  
sequenza dei cicli di carico

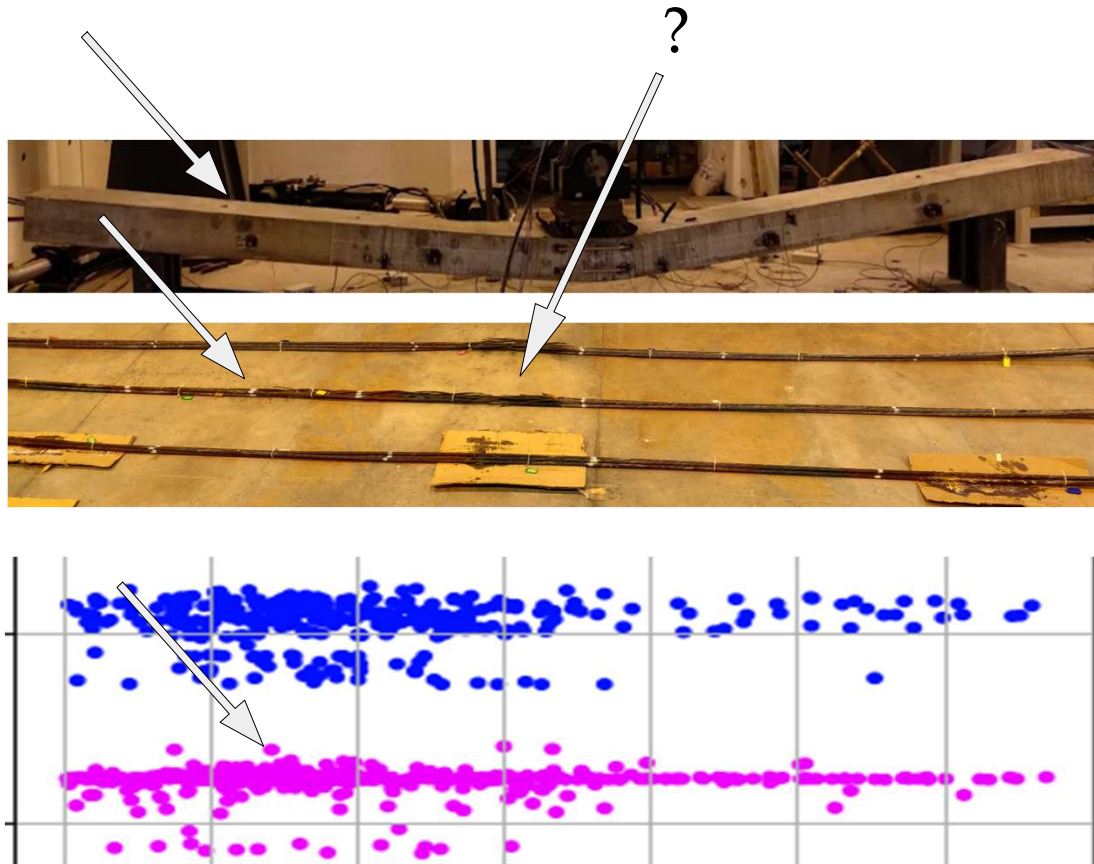
Indice di Severità (**Sr**): misura  
relativa dell'intensità dell'EA

Indice storico (**Hi**) quantifica la  
velocità di variazione dell'intensità  
di EA

## EA localizzazione del danno



## EA: errori di localizzazione

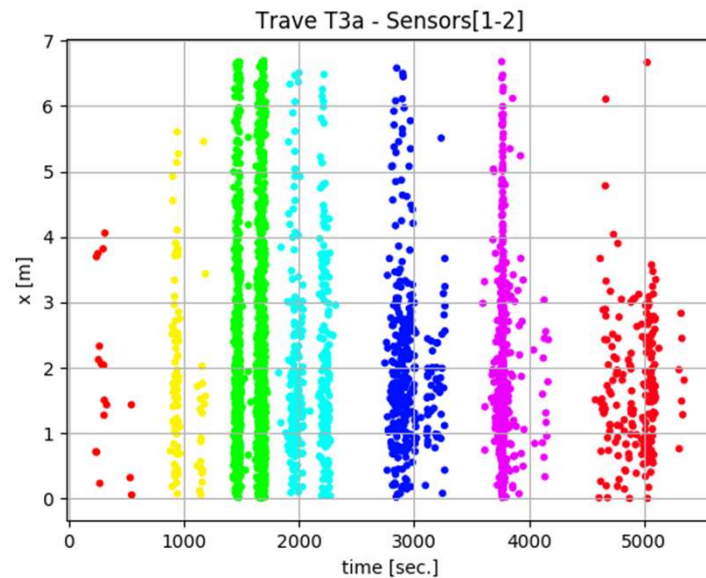


Errata localizzazione dovuta  
all'interruzione del cavo

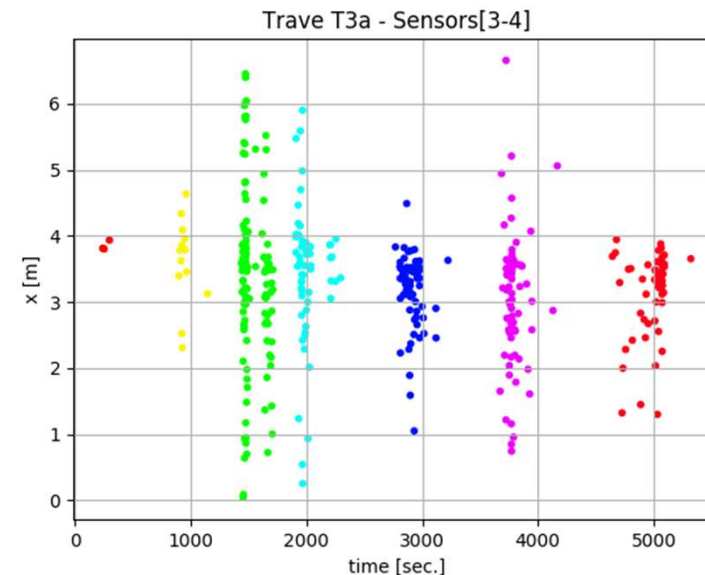


## EA localizzazione del danno

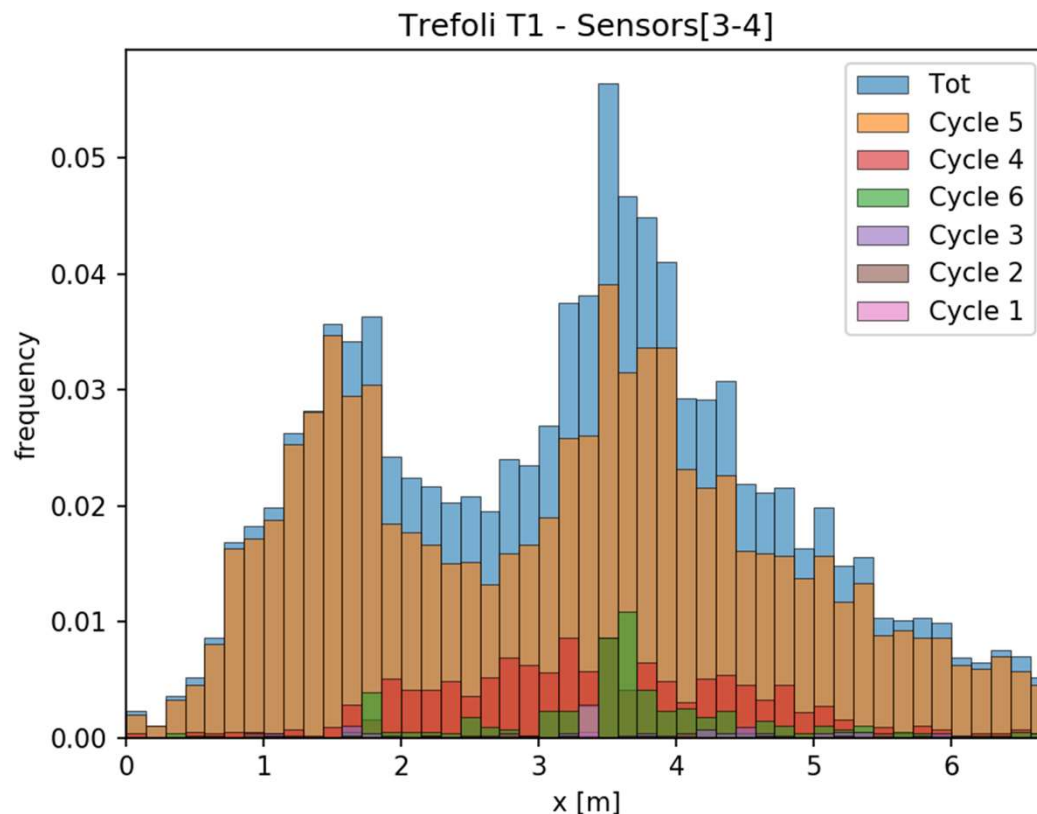
Localizzazione errata



Localizzazione corretta



## EA: localizzazione del danno: trave non danneggiata



- Nessuna rottura dei cavi
- Fessurazione del calcestruzzo: sorgente primaria di EA
- Influenza delle fessure sulla propagazione delle onde di EA
- Errori di localizzazione per fenomeni di riflessione

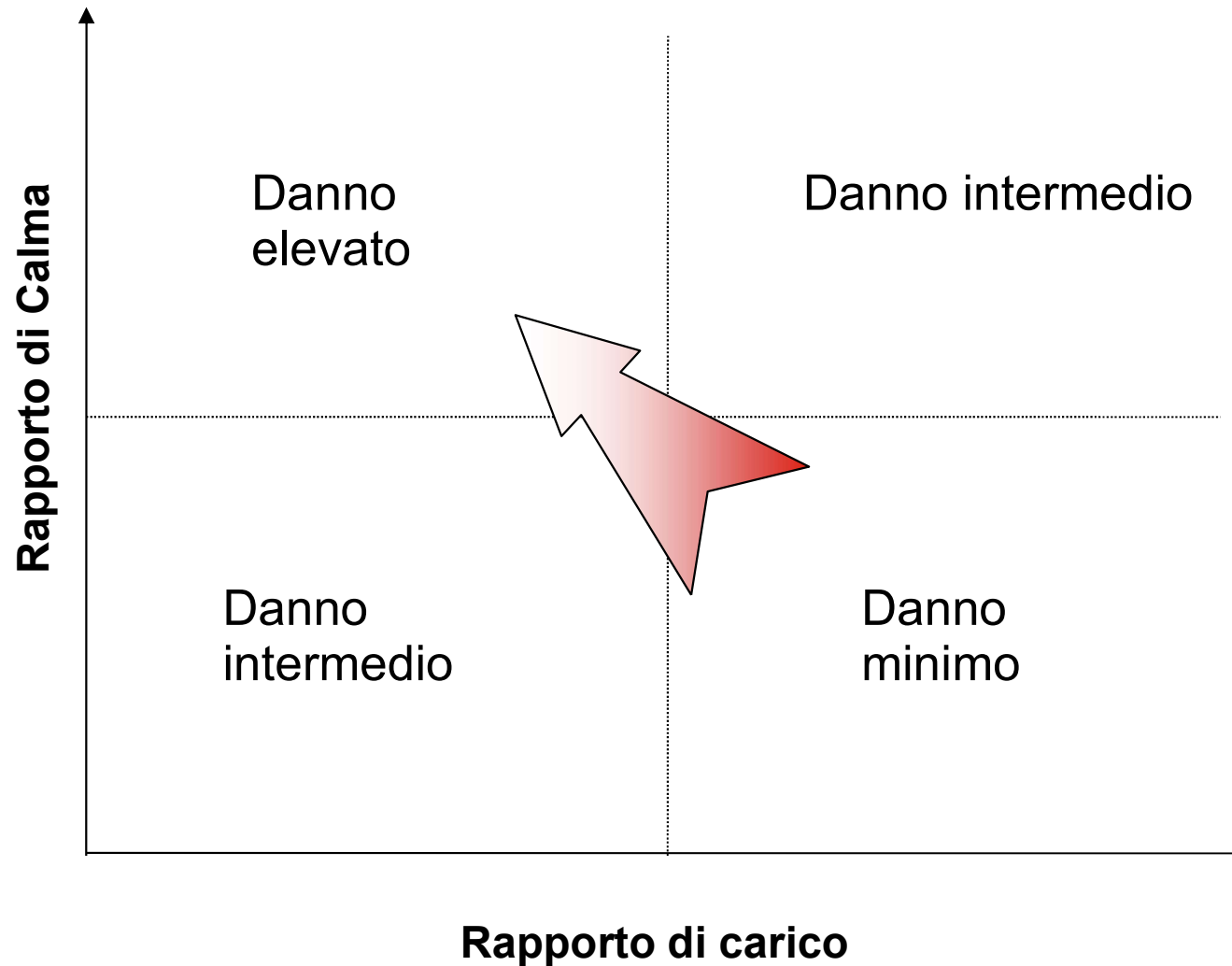
## Tecniche di indagine: emissione acustica: Analisi del danno ISO-16837

Il metodo prevede il calcolo di due indici: **Rapporto di Calma (CR)** e **Rapporto di Carico (LR)**. Il primo indice (CR) è calcolato come il rapporto tra il numero cumulativo degli eventi di EA durante la condizione di scarico della struttura e il numero cumulativo degli eventi di EA durante l'intero ciclo di carico; il secondo indice (LR) come il rapporto tra il carico che provoca l'emissione dei primi eventi acustici in una condizione di carico successiva e il massimo carico nell'ultimo ciclo di sollecitazione.

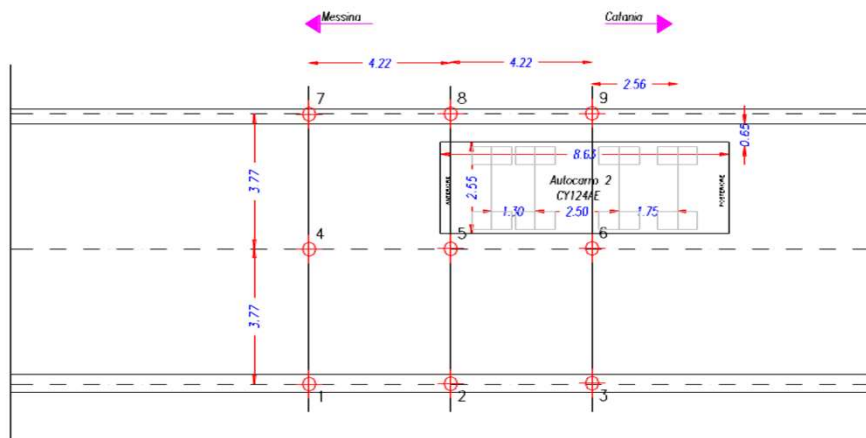




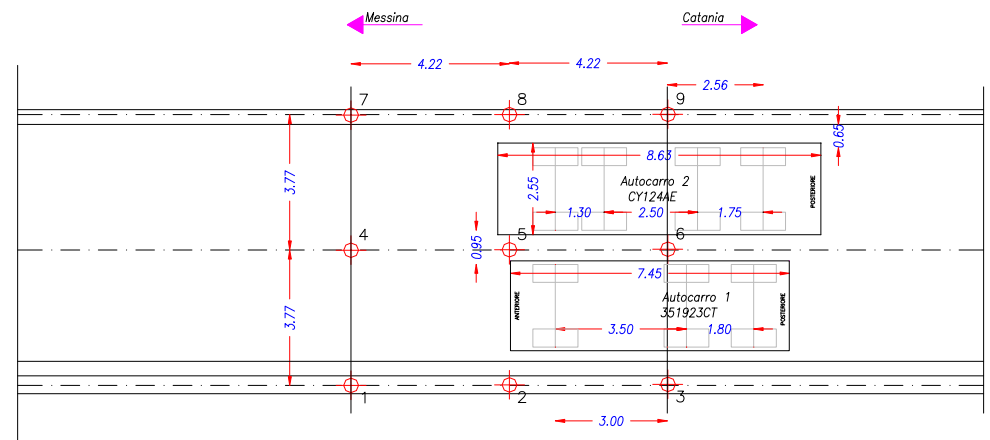
## Tecniche di indagine: emissione acustica: Analisi del danno ISO-16837



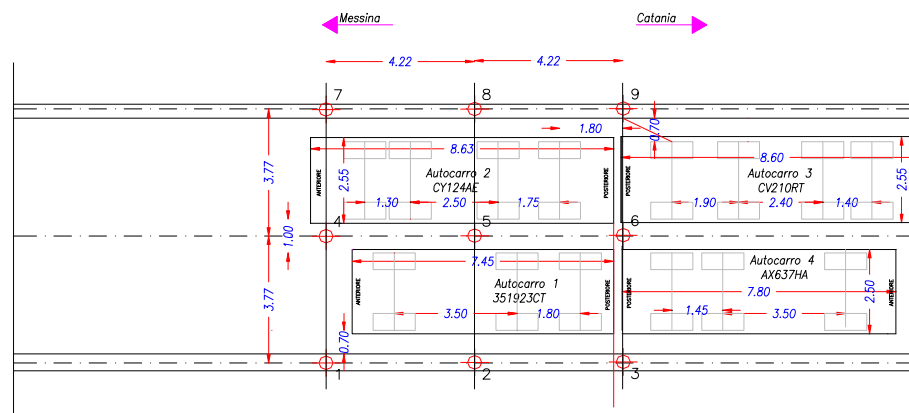
## E. Proverbio - La valutazione del rischio di corrosione nelle strutture in c.a.p. a cavi post-tesi: criticità e considerazioni operative



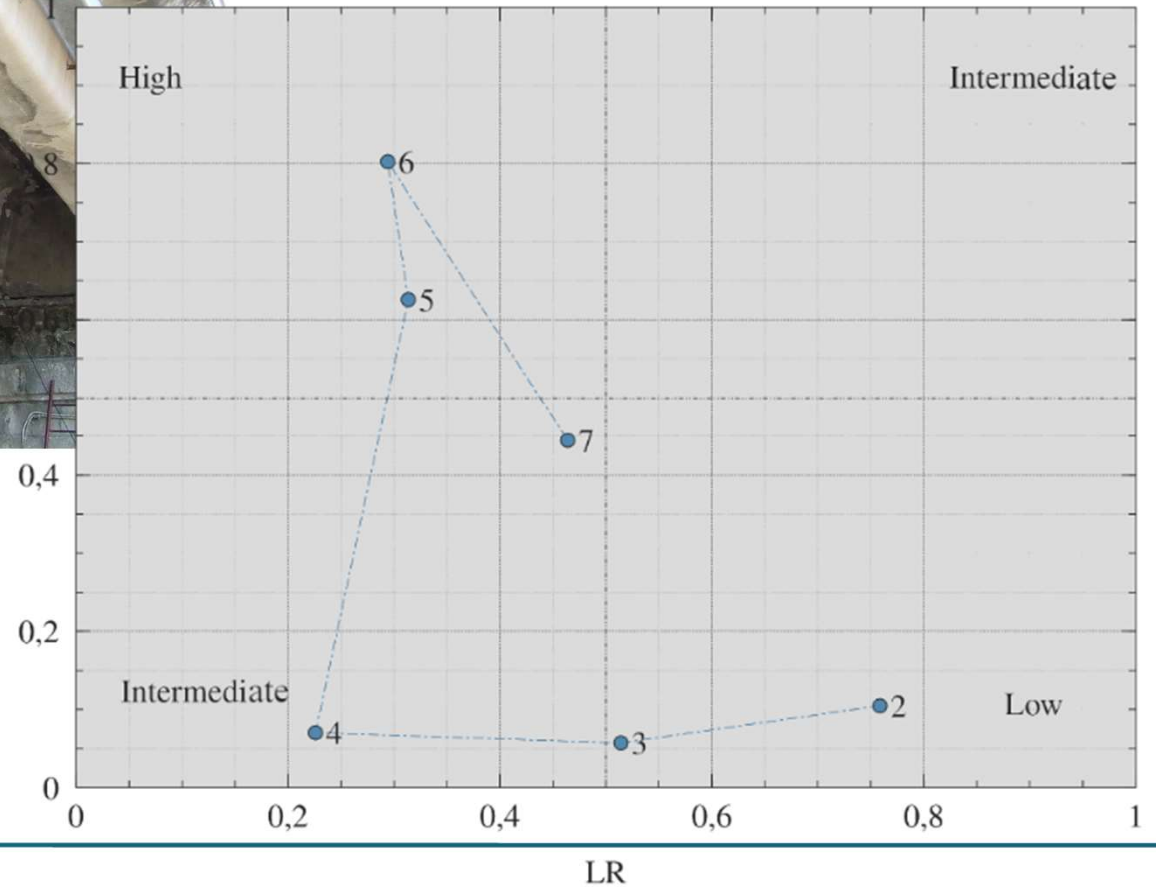
I<sup>o</sup> ciclo 30 ton



II<sup>o</sup> ciclo 50 ton



V<sup>o</sup> ciclo 110 ton





# Tecniche di indagine riflettometriche

Riflettometria nel dominio del Tempo TDR  
Riflettometria nel dominio delle frequenze FDR

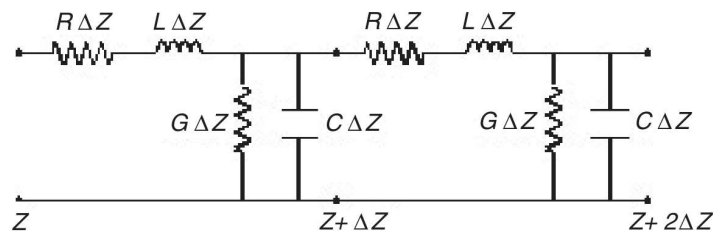
Ampiamente impiegate per il controllo delle linee elettriche e ottiche a partire dagli anni '80

Impiegate anche in geotecnica (controllo della stabilità dei pendii)

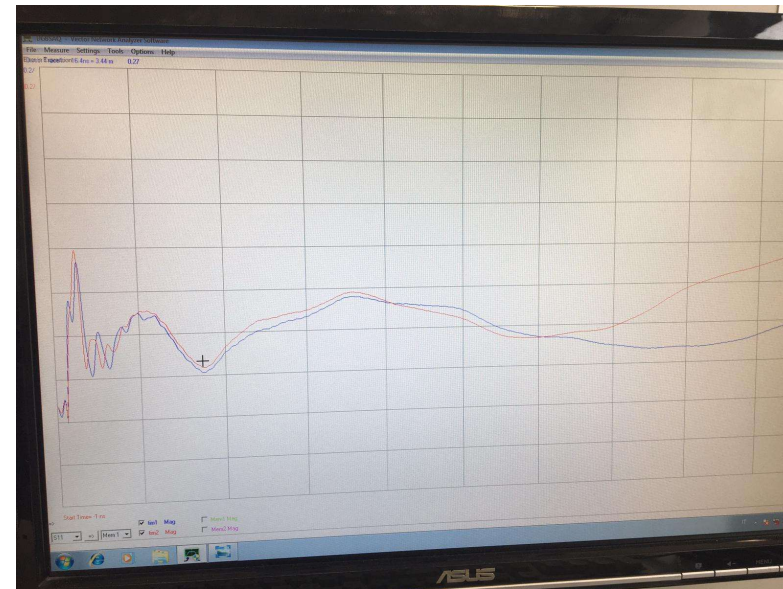
# Tecniche di indagine riflettometriche

L'insieme dei trefoli della boiacca di intasamento e del calcestruzzo circostante sono assimilabili (idealmente) ad un **conduttore in un mezzo dielettrico**

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}}$$



Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, CD 11-S, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2005, pp. 243–252.



## Tecniche di indagine riflettometriche

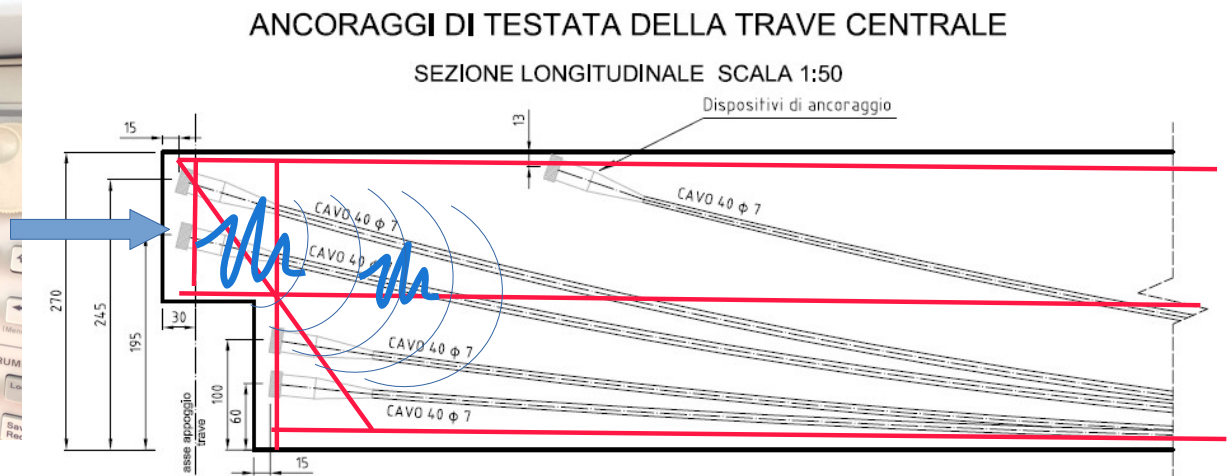
Il metodo riflettometrico (TDR) si basa su misure di riflessione nel dominio del tempo (o anche con analisi nel dominio delle frequenze - FDR) di impulsi elettrici di brevissima durata.

Il metodo consiste essenzialmente in misure di **variazione di impedenza** effettuate emettendo impulsi di tensione ad una estremità del cavo e rilevando, nello stesso punto, i segnali elettrici riflessi dall'altra estremità o da eventuali difetti presenti lungo il cavo.

Mentre la **resistenza ohmica** e la **reattanza induttiva** sono legate principalmente alle caratteristiche elettriche del cavo (conducibilità, dimensioni geometriche, ecc.), la **reattanza capacitiva** dipende essenzialmente dal mezzo fisico isolante (iniezione di malta tra cavo e guaina).

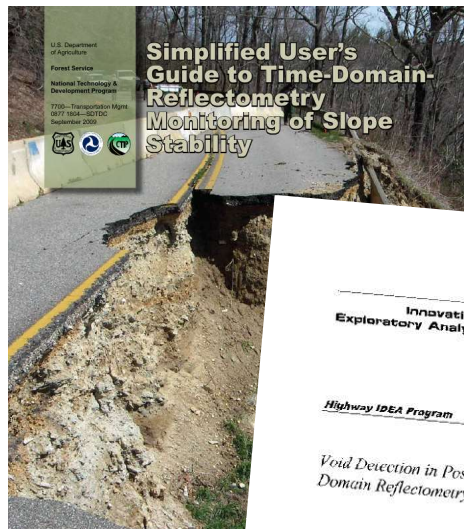


# Tecniche di indagine riflettometriche



Ogni discontinuità, come variazione di sezione dei componenti metallici come difetti di intasamento costituiscono delle variazioni di **impedenza induttiva** (le prime) e di **impedenza capacitiva** (boiacca di intasamento)

# Tecniche di indagine riflettometriche



Innovations Deserving  
Exploratory Analysis Programs



Highway IDEA Program

Void Detection in Post-Tensioning Ducts Using Time-  
Domain Reflectometry

Final Report for Highway IDEA Project 98

Prepared by:  
Robert G. Humpaligon and Michael J. Chajes, University of Delaware, Newark, DE

October 2006

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD  
OF THE NATIONAL ACADEMIES

Zerstörungsfreie Spannkabel-  
prüfung mit reflektometrischer  
Impulsmessung

Contrôle non-destructif des câbles de précontrainte par mesure  
réflectométrique d'impulsions

Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich  
Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion  
Dr. B. Elsener  
Prof. Dr. H. Böhni  
Fachkommission Hochspannungsfragen, FK1, Zürich  
Dr. R. Bräntlich  
Grundbauverbund AG, St. Gallen  
Dr. A. Markees

Forschungsauftrag 81/93 auf Antrag  
der Arbeitsgruppe Brückentrostung

Mai 1997



## RIMT-SYSTEM

Project ID: BRST960243

Finanziato nell'ambito di: FP4-BRITE/EURAM 3

New electrotechnical measurement equipment for the application of reflectometric  
impulse measurement technique

Dal 1996-11-26 al 1997-05-31

## Dettagli del progetto

### Costo totale:

Non disponibile

### Contributo UE:

Non disponibile

### Coordinato in:

Netherlands

### Argomento (I):

0203 - Reliability and quality of materials and products

### Meccanismo di finanziamento:

EAW - Exploratory awards

## Obiettivo

The European construction industry is confronted with a major problem concerning the safety of large and massive concrete structures: the unexpected deterioration, due to corrosion, of the steel stressing-tendons used in concrete structures (pre-stressed concrete structures), causing these structures to break or reducing their load carrying capacity. Present non-destructive analysis methods (NDA-methods) to measure defects, damage and degradation (anomaly) of pre-stressed concrete structures due to corrosion have been researched without much success. However with knowledge gained in a successful feasibility project executed by NEBEST B.V. in the Netherlands, a new NDA method to locate and measure corrosion of pre-stressed concrete structures has been tested: Reflectometric Impulse Measurement Technique (RIMT). The principle of RIMT is as follows. Series of high frequency-low voltage electrical pulses are sent through a steel-stressing tendon in pre-stressed concrete structures at one end of the tendon (anchor). The reflection signals are stored and analysed in a recently developed, complex mathematical model. The impedance variations of the standard characteristics are used to calculate the location of the anomaly. Physical and di-electrical anomalies cause different types of impedance variations, which can be recognised in the reflection signals. Therefore it is also possible to reveal the type of anomaly. The objective of this research project is to execute RTD into new electrotechnical measurement equipment (RIMT-System) for the application of the RIMT technology as a NDA-method to locate and measure corrosion of pre-stressed concrete structures. The new RIMT-System will consist of sensors, hardware and software. With the RIMT-System it will be possible to determine defects, damage and degradation of existing pre-stressed concrete structures in a non-destructive way.

# Tecniche di indagine riflettometriche

Eigenständiges Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement  
Bundesamt für Strassenbau

Département fédéral des transports, des communications  
Office fédéral des routes

Departamento Federal del Transport, delle comunicazioni e  
Infrastruttura delle strade

## Local Corrosion Monitoring of Prestressed Concrete Strand via Time-Frequency Domain Reflectometry

by M. Ding, Jiong (Hua) Tian, Xiang (Hua) Li, Yan (Hua) Liu, and Tong (Hua) Wu\*

\*School of Electrical and Electronic Engineering  
Department of Civil and Environmental Engineering  
Tsinghua University  
Beijing 100084, P.R. China

### Integritäts- und Korrosionsprüfung Vorspannkabeln in Brückenbauwerken

#### Die reflektometrische Impulsmessung

Analyse d'intégrité et de corrosion des câbles de précontrainte

#### La méthode RIMT

Grundbesitzers AG, St. Gallen  
Dr. H. Kapp, G. Nuss, Dr. M. Saffert

Forschungsprojekte 93/98 und 91/98 auf Auftrag  
der Arbeitsgruppe Brückenbauwerksforschung

Januar 1992

## WHAT IS R.I.M.T.®

Before R.I.M.T.®, the only way to evaluate bonded and unbonded prestressed tendons was to select tendons at random and remove them from the concrete structure for visual inspection. This method is both incomplete — only a few tendons are actually examined — and expensive, as it requires the destruction and restoration of part of the structure.

## R.I.M.T.®

R.I.M.T.® employs Time Domain Reflectometry to locate anomalies such as corrosion, breakage of wires or whole tendons. The R.I.M.T.® process, which involves the sending of a high-frequency impulse along a tendon or anchor, allows in-situ measurement of the integrity of prestressed tendons and rock/soil anchors. To perform R.I.M.T.® measurements, only the tendon ends or anchors need be exposed. Where this is not possible, an electrical connection can be made to the tendon nearest the end in question.

The gathering of the data by the R.I.M.T.® equipment takes only a few minutes. The processing of the data by computer can be completed within a few days.

## MULTIPURPOSE

R.I.M.T.® can be used to examine both new structures and to document the condition of existing structures. R.I.M.T.® is the only investigatory method available which allows for repeated measurement of tendons and rock/soil anchors. A "finger print" of a tendon or rock anchor's present or initial condition can be compared against later measurements to determine if and where deterioration has occurred. The installation of permanent lead wires of the anchorage will allow for low cost future measurements.

## FEATURES

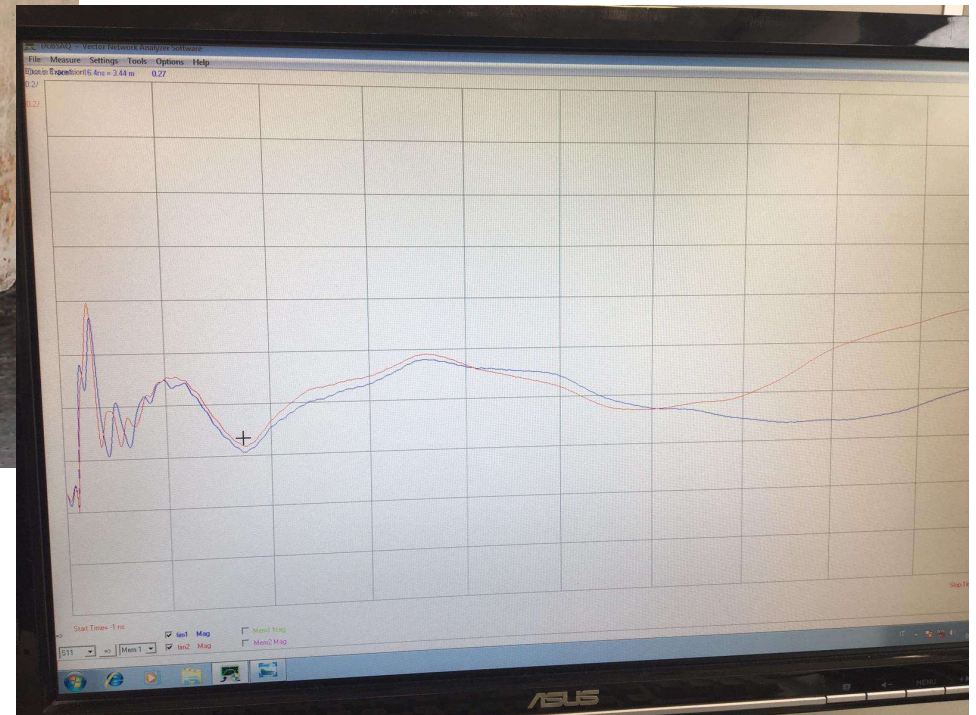
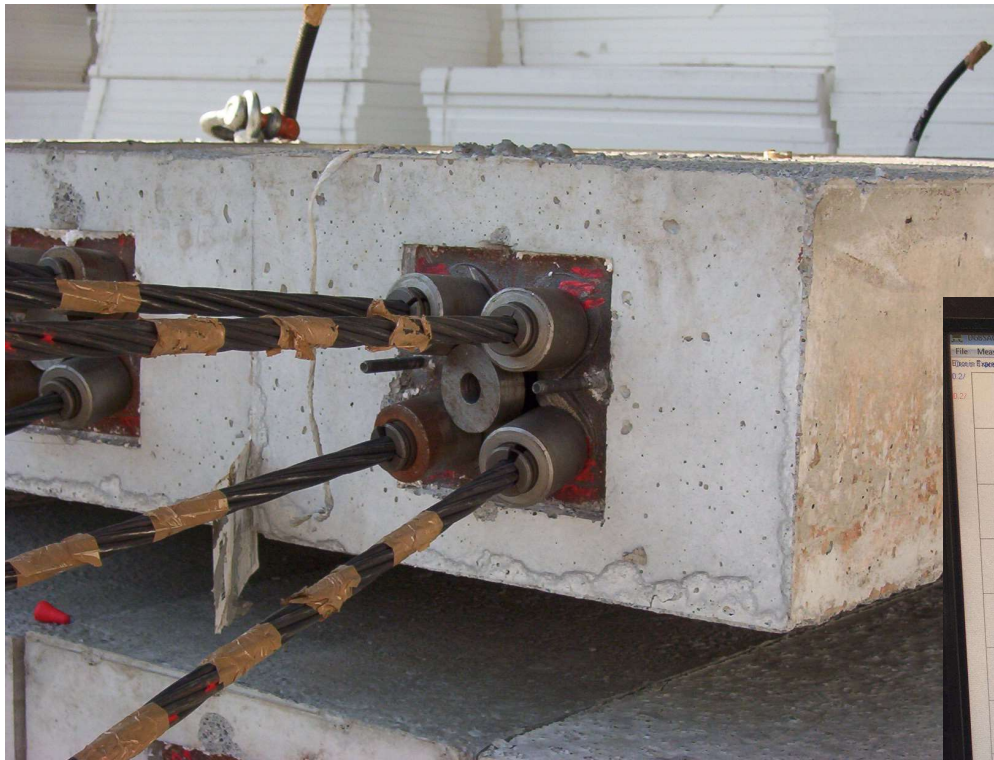
- Measures Bonded and Unbonded Tendons
- Efficient, Economical, Fast
- Non-Destructive
- Instant Condition Evaluation
- Long Term Condition Monitoring

## LIMITATIONS

- Large numbers of reinforcing bars which run parallel to the tendon and which are in R.I.M.T.® measurements
- R.I.M.T.® does not differentiate between a tendon and its metal tubing
- R.I.M.T.® measurements on tendons longer than 50m are not practical at this time



## Test su travi in laboratorio





## Test su travi in scala reale







## Test su travi in scala reale

### Problematiche:

- Accesso limitato agli ancoraggi: cavi cortocircuitati
- Guaine in lamierino metallico cortocircuitate
- Cavi cortocircuitati con l'intera armatura lenta



## Tecniche di indagine riflettometriche

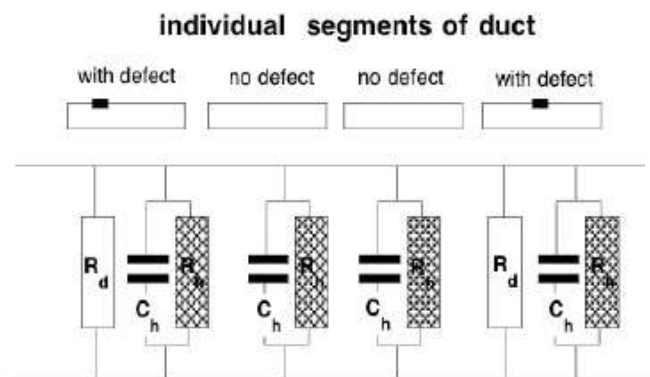
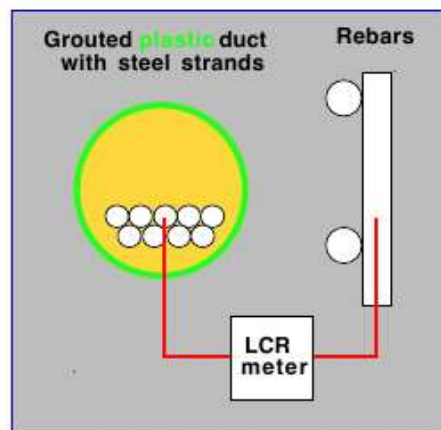
### Guaine metalliche: problematiche

- Isolamento elettrico del sistema cavi-condotto impossibile
- Difficoltà a delimitare esattamente l'oggetto dell'indagine
- Influenza delle armature lente (in strutture fortemente armate)
- Difficoltà ad identificare difetti in assenza di un riferimento iniziale (condizione zero)
- Modelli analitici (per la valutazione delle anomalie di segnale) complessi
- Applicabile con successo solo su elementi semplici con cavi paralleli

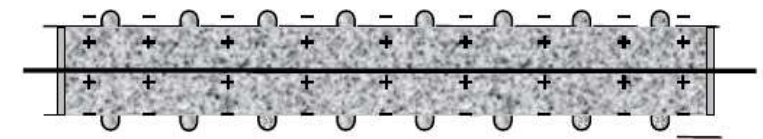
## Condotti in materiale polimerico (PE/PP) e isolati elettricamente

L'utilizzo di condotti in materiale polimerico o meglio ancora di sistemi isolati elettricamente (EIT) elimina quasi totalmente tutte le problematiche precedentemente evidenziate.

In questo modo il mio sistema (cavo/boiacca/guaina) costituisce un elemento capacitivo ideale

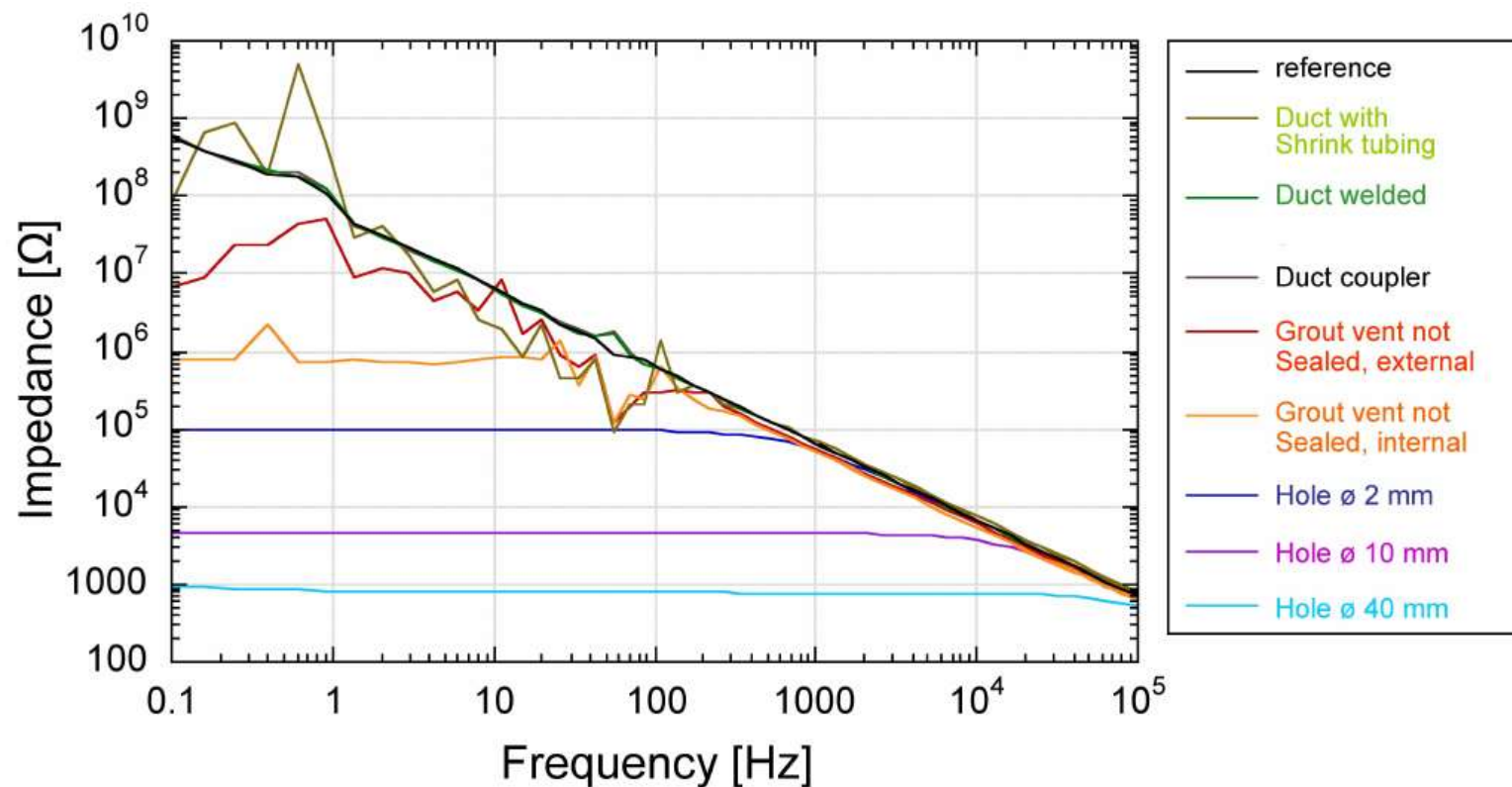


Fully grouted duct



## Condotti in materiale polimerico (PE/PP) e isolati elettricamente

- La variazione di impedenza resistiva e di impedenza capacitiva identificano la perdita di isolamento e la presenza di difetti



Elsener, B. and Biichler, M. (2011) Quality Control and Monitoring of Electrically Isolated Post-Tensioning Tendons in Bridges, VSS Report 647





## Polymer-duct systems for internal bonded post-tensioning

Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen  
Office fédéral des routes  
Ufficio federale delle Strade

## Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges

Qualitätsprüfung und Ueberwachung elektrisch isolierter Spannglieder in Brücken

Contrôle de la qualité et surveillance des câbles de précontrainte isolés électriquement dans les ponts

ETH Zurich, Institute of Building Materials, Zurich  
Prof. Dr. Bernhard Elsener

Swiss Society for Corrosion Protection, Zurich  
Dr. Markus Büchler



## Durability of post-tensioning tendons

Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen  
Office fédéral des routes  
Ufficio federale delle Strade

## **Quality Control and Monitoring of electrically isolated post- tensioning tendons in bridges**

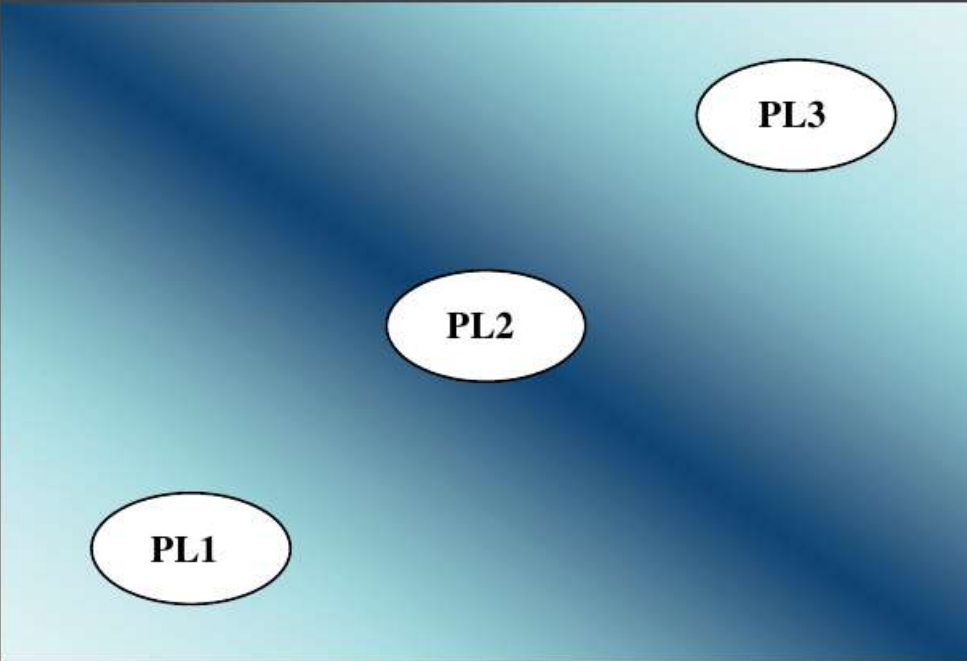
**Qualitätsprüfung und Ueberwachung elektrisch isolierter  
Spannglieder in Brücken**

**Contrôle de la qualité e surveillance des câbles de  
précontrainte isolés électriquement dans les ponts**

ETH Zurich, Institute of Building Materials, Zurich  
Prof. Dr. Bernhard Elsener

Swiss Society for Corrosion Protection, Zurich  
Dr. Markus Büchler

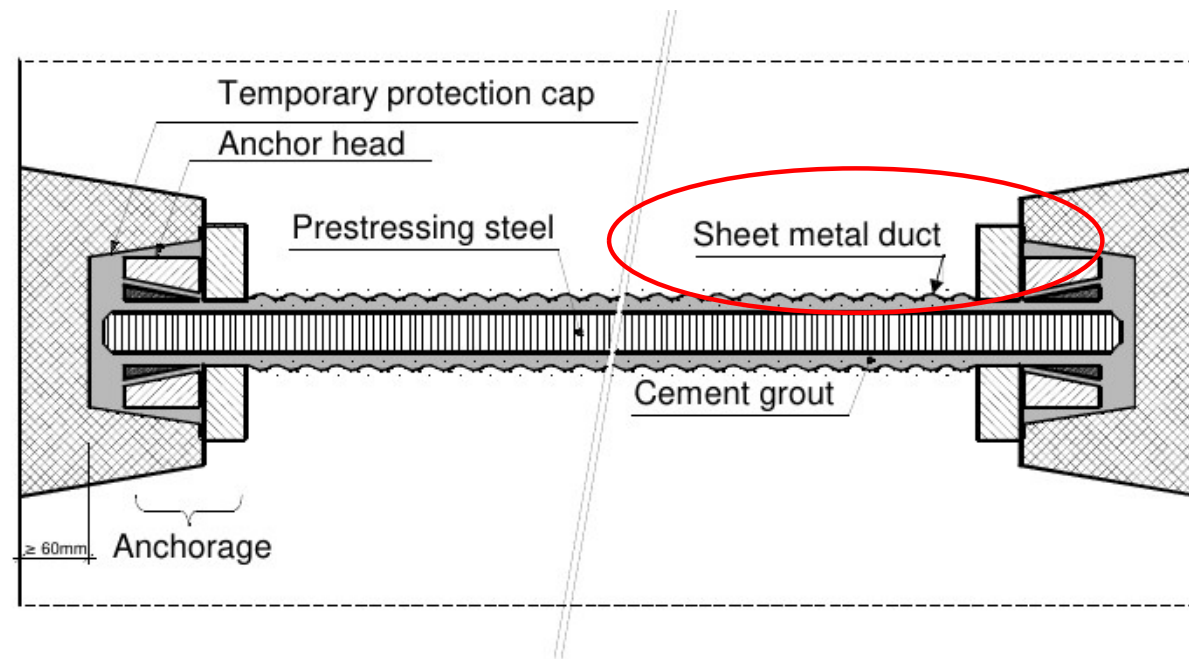
## Livelli di protezione per sistemi PT

|                         |        | Structural protection layers                                                        |        |     |
|-------------------------|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|-----|
|                         |        | High                                                                                | Medium | Low |
| Aggressivity / Exposure | High   |  |        |     |
|                         | Medium |                                                                                     |        |     |
|                         | Low    |                                                                                     |        |     |

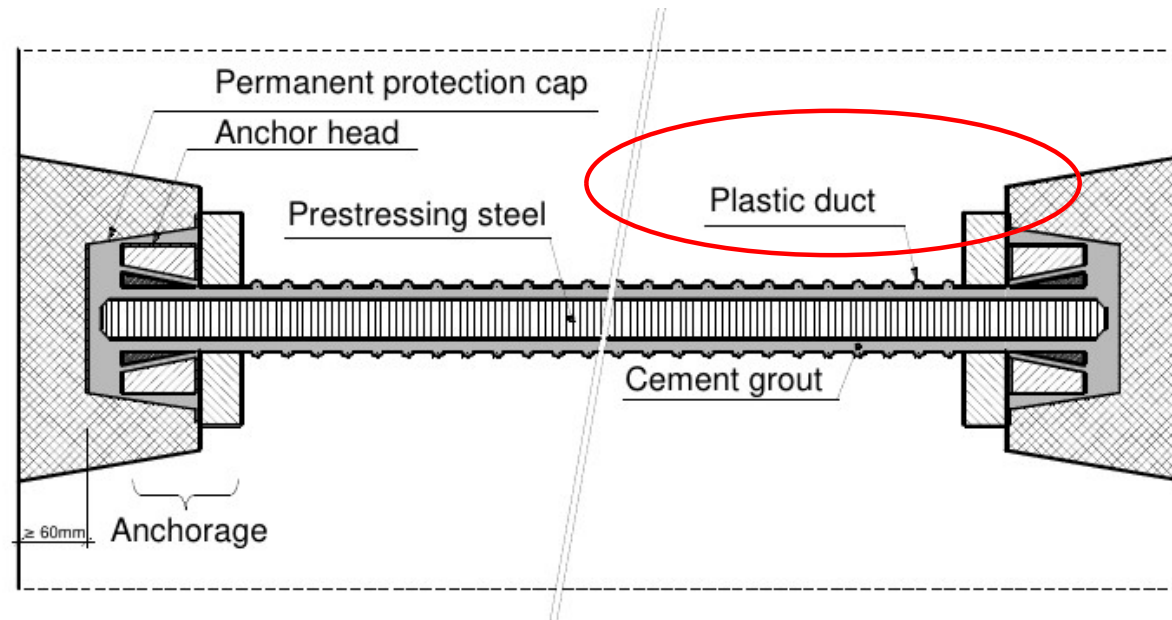
*Table 1.2: Protection Levels for post-tensioning tendons based on aggressivity/exposure versus structural protection layers*



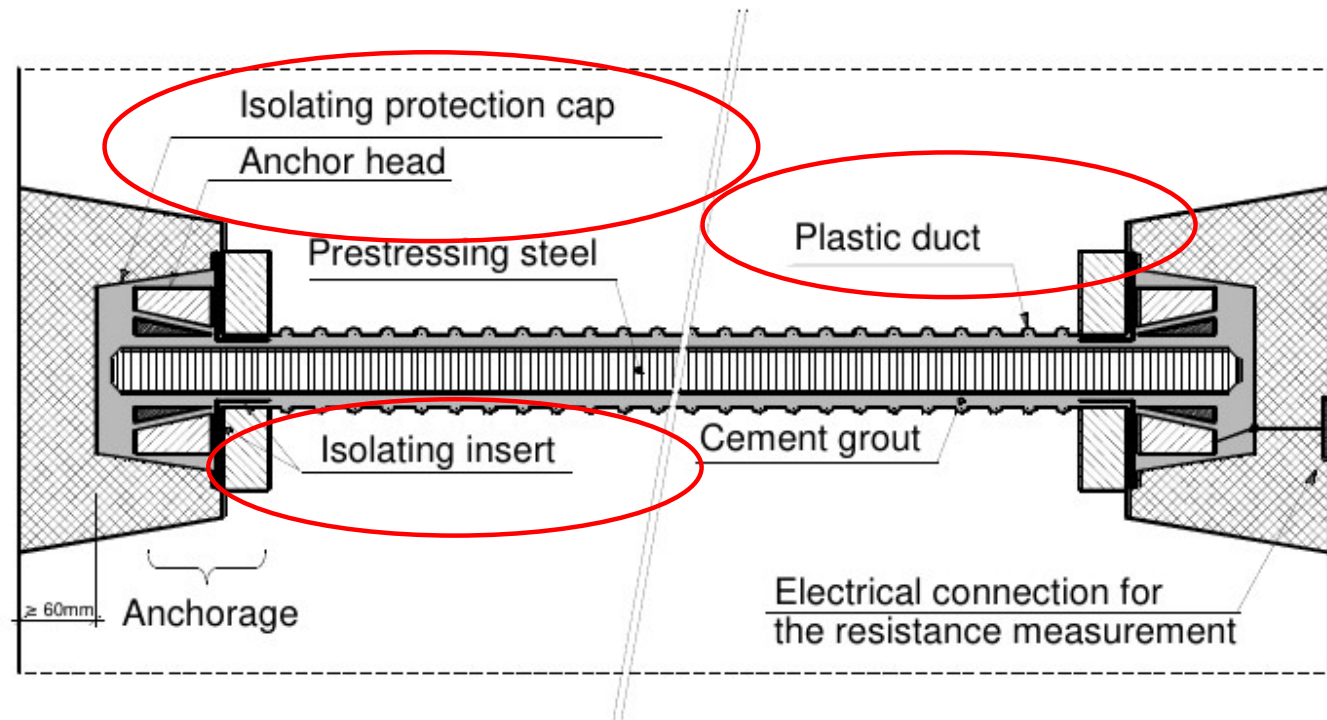
Tendon system for  
PL 1



Fully encapsulated  
tendon system for  
PL 2



Electrically isolated  
tendon system for  
PL 3







Testa di ancoraggio di cavi elettricamente isolati, notare il disco isolante tra la piastra di appoggio e l'ancoraggio. Piacenza Viaduct, Foto V. Nicollier (2005). da Elsener B. *Post-Tensioned Tendons: Problems, inspection, solutions*. Structural 2021:1–28. doi:10.12917/STRU238.28.

## Condotti in materiale polimerico (PE/PP) e isolati elettricamente

### Misure capacitive: esempi di applicazioni



**Viadotto Marchiazza, Linea alta velocità AV Torino-Milano**

(Da Della Vedova M., Elsener B., *Enhanced Durability, Quality Control and Monitoring and of Electrically isolated Tendons*, Proc. 2 Int. fib Congress, June 5 – 8, 2006, Napoli)





**Viadotto Piacenza, Linea alta velocità AV Milano-Bologna**

(Da Della Vedova M., Elsener B., *Enhanced Durability, Quality Control and Monitoring and of Electrically isolated Tendons*, Proc. 2 Int. fib Congress, June 5 – 8, 2006, Napoli)





# Considerazioni conclusive

- ✓ La fenomenologia del **degrado degli elementi di post-tensione** nelle struttura in c.a.p. è complessa e variegata
- ✓ L'**individuazione dei difetti** e la valutazione della corrosione dei cavi di post-tensione non è sempre agevole.
- ✓ E' possibile stimare una **probabilità di corrosione** attraverso una valutazione complessiva degli scenari di rischio e di alcuni indicatori.
- ✓ L'utilizzo delle **tecniche elettrochimiche** per la stima della probabilità di corrosione va fatta con accortezza e cognizione di causa.
- ✓ La tecnica di **Emissione Acustica** permette di ottenere informazioni importanti sullo stato di degrado globale delle struttura ed utilizzata con propositi di monitoraggio permettere di individuare l'insorgenza di condizioni di allarme e segnalare eventuali di cedimenti (a carico dei cavi o della struttura in c.a.).

## Considerazioni conclusive

- ✓ Le tecniche di **riflettometria elettrica** o elettromagnetica (TDR, FDR) permettono di valutare lo stato generale di elementi anche di notevoli dimensioni e di localizzare eventuali difetti.
- ✓ Le tecniche riflettometriche mostrano alcune **criticità** se utilizzate in sistemi non **isolati elettricamente** e con guaine metalliche.
- ✓ L'utilizzo di **guaine in materiale polimerico** ed un **isolamento elettrico** del sistema di post-tensione permette, oltre a garantire una durabilità elevata del sistema, di utilizzare le tecniche di misure di impedenza o riflettometriche con maggiore efficacia ed affidabilità.

Grazie per l'attenzione