

# Diagnostica sulle Infrastrutture Civili: potenzialità e limiti

**Roberto Felicetti**

DICA - Politecnico di Milano  
roberto.felicetti@polimi.it

## Sicurezza al fuoco di materiali e strutture

- caratterizzazione termica e meccanica dei materiali strutturali
- spacco esplosivo (spalling) dei calcestruzzi ad alte prestazioni
- modellazione degli scenari di incendio
- analisi numerica di sistemi strutturali in condizioni di incendio
- valutazione del danno strutturale da incendio



## Metodi sperimentali per la caratterizzazione di materiali e strutture

- caratterizzazione meccanica / frattura
- comportamento al fuoco
- sviluppo di strumentazioni e macchine di prova
- prove di carico su strutture



## Diagnostica strutturale e valutazione del danno

- prove non distruttive su calcestruzzo, metallo, materiali dei beni culturali
- diagnostica su strutture danneggiate / deteriorate
- caratterizzazione di elementi in ferro battuto





un'iniziativa nel campo della diagnostica strutturale

## Laboratorio Interdipartimentale per la Diagnostica e il Monitoraggio Strutturale

**finalità:** ricerca nell'ambito dei **metodi innovativi** per la diagnostica e il monitoraggio della stabilità, funzionalità e durabilità nelle strutture e nei componenti dell'ingegneria civile e meccanica

Dipartimenti coinvolti

**Chimica, Materiali e Ingegneria Chimica** - durabilità

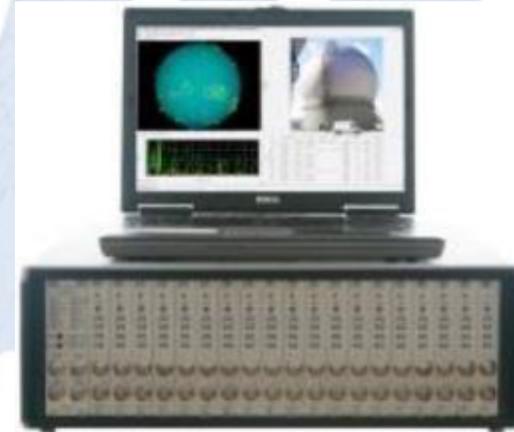
**Elettronica, Informazione e Bioingegneria** - sensori e monitoraggio

**Ingegneria Civile e Ambientale** - strutture civili

**Meccanica** - strutture meccaniche e impianti



tomografo A1040 MIRA



sistema AE Vallen (8ch)

# evento "Playground Civile" nell'ambito del 18° Congresso AIPnD (ottobre 2019)



# playground



## Evento playground

Ricerca ▾ Servizi Formazione ▾ Casi studio Strumenti **Evento playground**

Strumenti

SERVIZI

FORMAZIONE

Corsi

Casi studio

RICERCA

poliNDT

Laboratorio Interdipartimentale del Politecnico di Milano  
Tecniche diagnostiche non distruttive e innovative applicate ai settori dell'ingegneria civile e meccanica

SCOPRI DI PIÙ

SCOPRI DI PIÙ

SCOPRI DI PIÙ

# playground

Materiale informativo aggiuntivo scaricabile sulle tematiche presentate nel **PLAY GROUND CIVILE**

**A1** – diagnostica catene

**A2** – materiali accoppianti per US su beni culturali

**B1** – carbontest

**B2** – diagnostica post incendio

**C1** – radar StructureScanMiniXT + antenna 4GHz

**C2** – tomografo ad ultrasuoni MIRA

**D1** – strumento iCOR di Giatec

**D2** – monitoraggio potenziale corrosione e resistività

**E1** – diagnostica nei beni culturali

**E2** – battitura superfici

**F1** – interferometro radar di IDS

**F2** – stima stato tensionale metalli

il tema della presentazione di oggi:  
**diagnostica su infrastrutture**

**ponti e viadotti**



**gallerie**



# perché tanto interesse ?!?

(domanda retorica...)

## ponti e viadotti

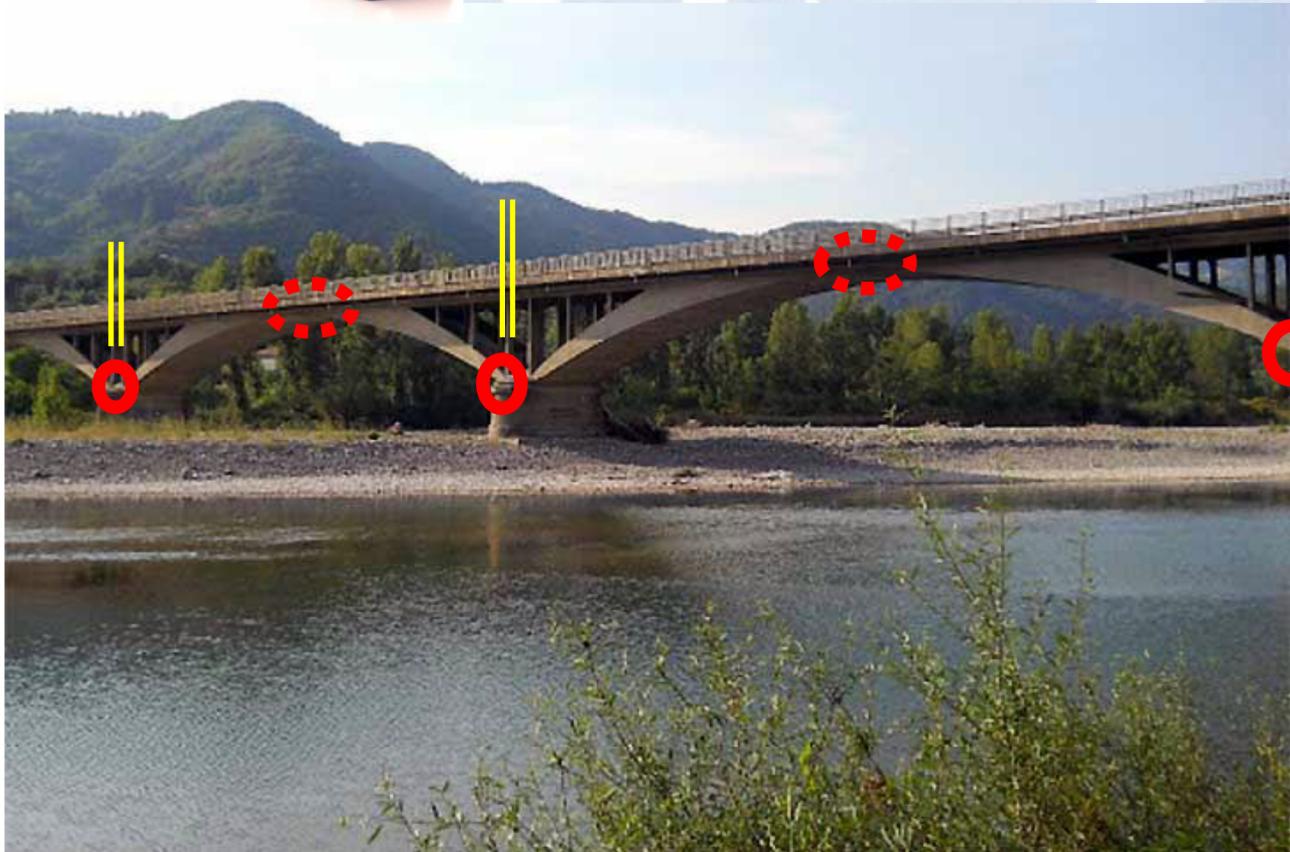


## gallerie



# What if ?

quali potrebbero essere le conseguenze di un cedimento strutturale localizzato?



# What if ?

quali potrebbero essere le conseguenze di un cedimento strutturale localizzato?

il sistema bilanciato



campata in semplice appoggio

**Rischio = probabilità di accadimento dell'evento x conseguenze dell'evento**

Conseguenze di un crollo: classe d'uso (*in termini di operatività, per i ponti classi II, III e IV*)

Robustezza: capacità di evitare danni sproporzionati rispetto all'entità di possibili cause innescanti eccezionali (quali esplosioni e urti) ma anche ordinarie (durabilità, dissesti, ecc)

# What if ?

nelle gallerie il collasso generalizzato è improbabile,  
ma le patologie sono più diffuse

**Rischio = probabilità di accadimento dell'evento x conseguenze dell'evento**



corrosione



lesione strutturale



difetto esecutivo



infiltrazioni d'acqua



lamiera raccolta acque



fissaggio impianti



segnaletica / sorveglianza

# come affrontare un problema di questa dimensione?



**Rinuncio !!**

## studio della documentazione

comprensione delle criticità della struttura  
 esito di indagini precedenti  
 modifiche e interventi manutentivi

## esame visivo (+ tattile ?)

identificazione di difetti, patologie, dissesti  
 verifica della stabilità locale  
 valutazione della sonorità (martello)

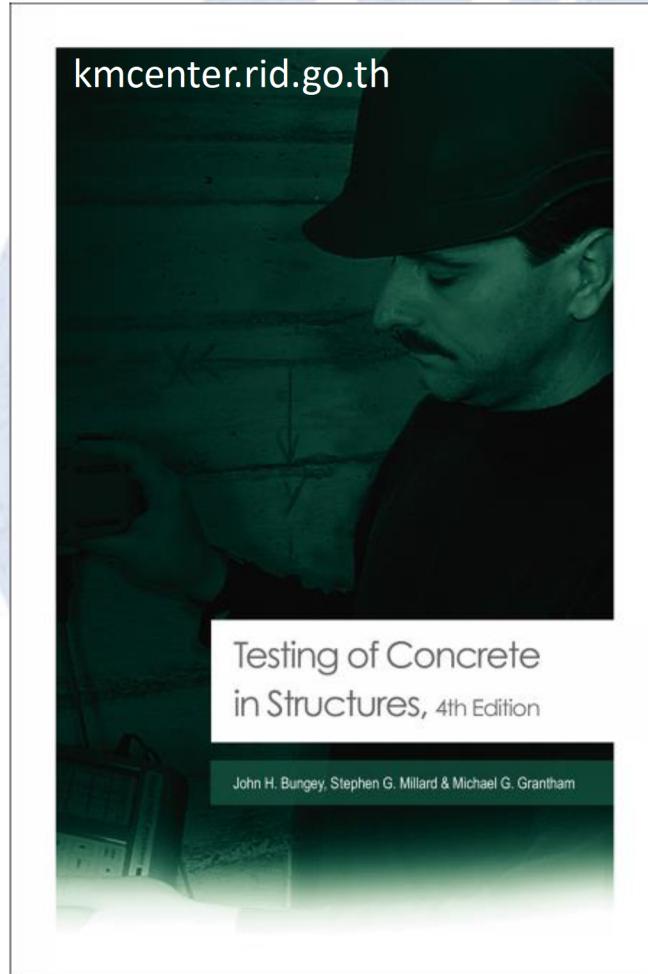
## indagini strumentali

traduzione dell'esame visivo/tattile in termini quantitativi  
 estensione ad indicazioni non visibili dall'esterno

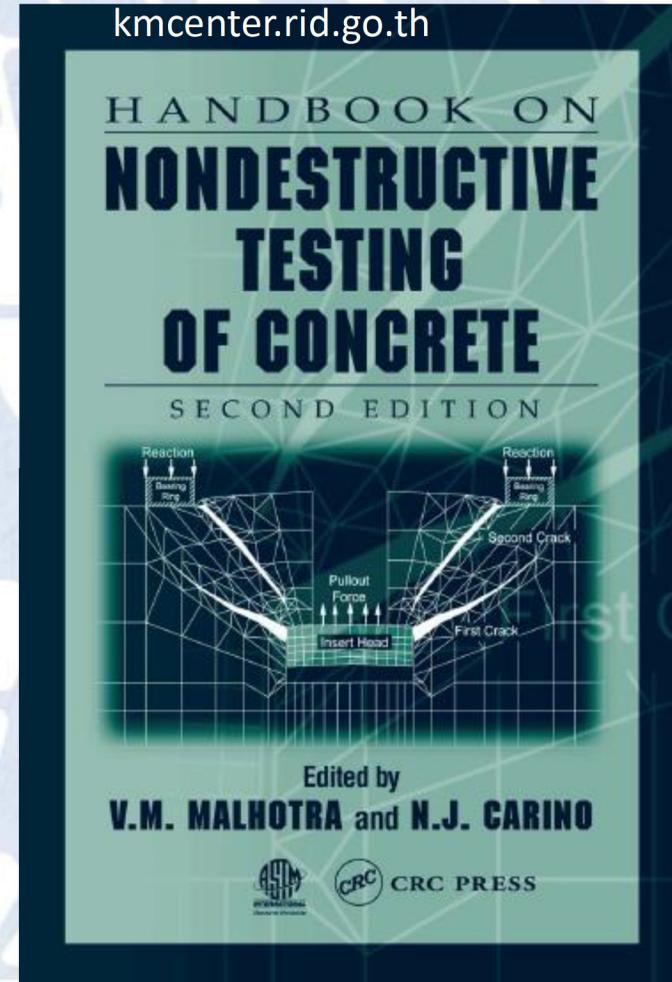
## monitoraggio

ripetizione periodica di ispezioni e rilievi strumentali  
 rilievo automatizzato di parametri strutturali significativi  
 controllo continuativo di criticità evidenziate

# Riferimenti 1 - basi generali sui Controlli Non-Distruttivi nel Calcestruzzo

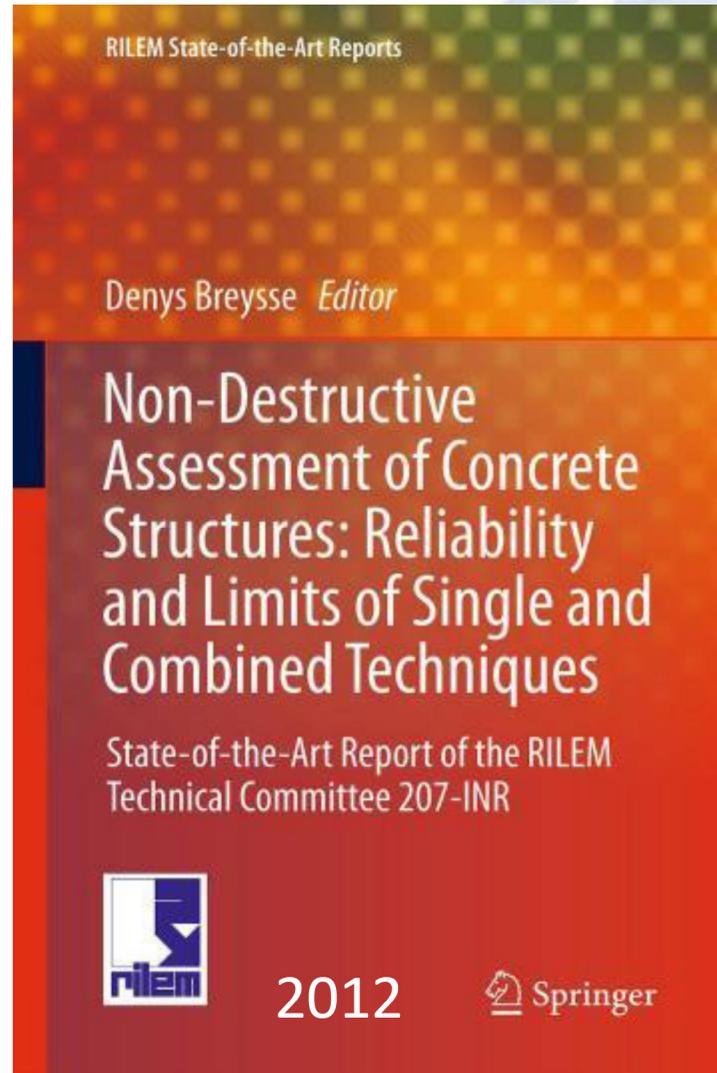


utilizzo delle tecniche ND



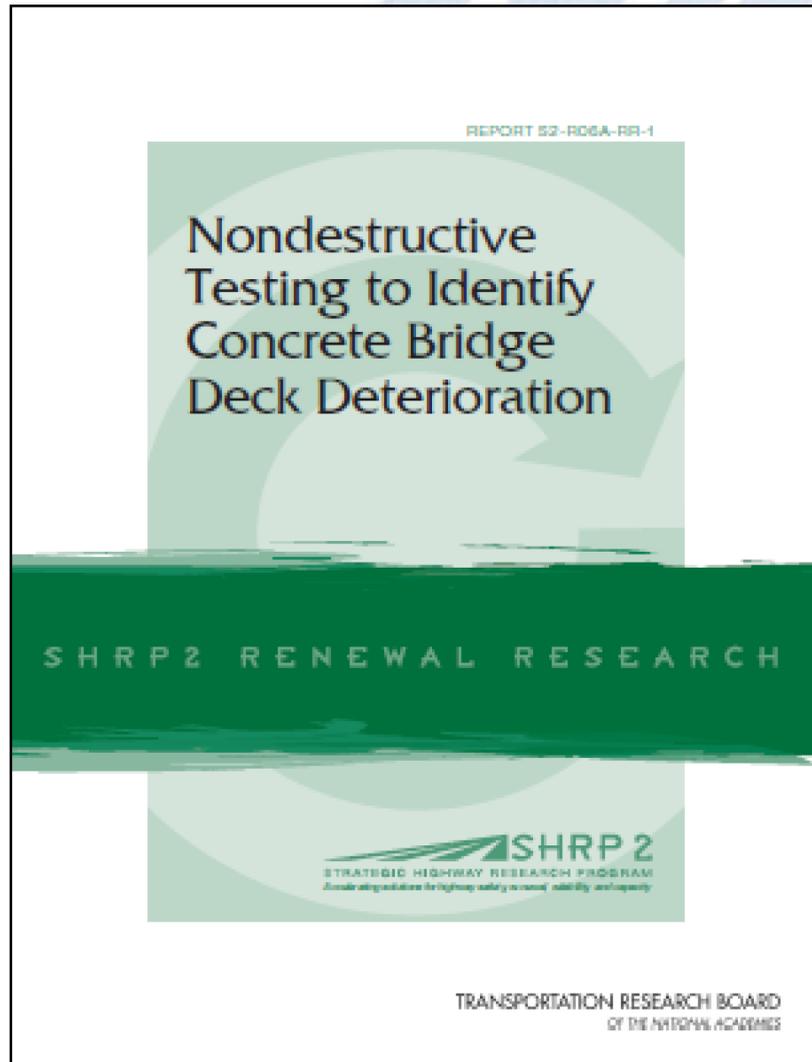
principi alla base dei metodi

## Riferimenti 2 - indagini su problematiche tipiche delle strutture in C.A.



1. Non destructive assessment of concrete structures: usual combinations of techniques
2. Presentation of common non destructive techniques
3. Estimation of on-site compressive strength of concrete
4. Control of thickness/dimensions of pavements, foundations, elements and piles
5. Assessment of bonding, delamination and interfaces
6. Localization of grouting faults in post tensioned concrete structures
7. Ruptures of prestressing cables
8. Non destructive assessment of concrete structures: combination of different techniques for addressing new challenges

## Riferimenti 3 - stato dell'arte sui metodi diagnostici per l'analisi del deterioramento degli impalcati da ponte



2<sup>nd</sup> Strategic Highway Research Program  
 Transportation Research Board  
 Washington DC, 2013

### CHAPTER 3 Candidate Methods for Deterioration in Concrete Bridge Decks

- Impact Echo
- Ultrasonic Pulse Echo
- Ultrasonic Surface Waves
- Impulse Response
- Ground-Penetrating Radar
- Half-Cell Potential
- Galvanostatic Pulse Measurement
- Electrical Resistivity
- Infrared Thermography
- Chain Dragging and Hammer Sounding

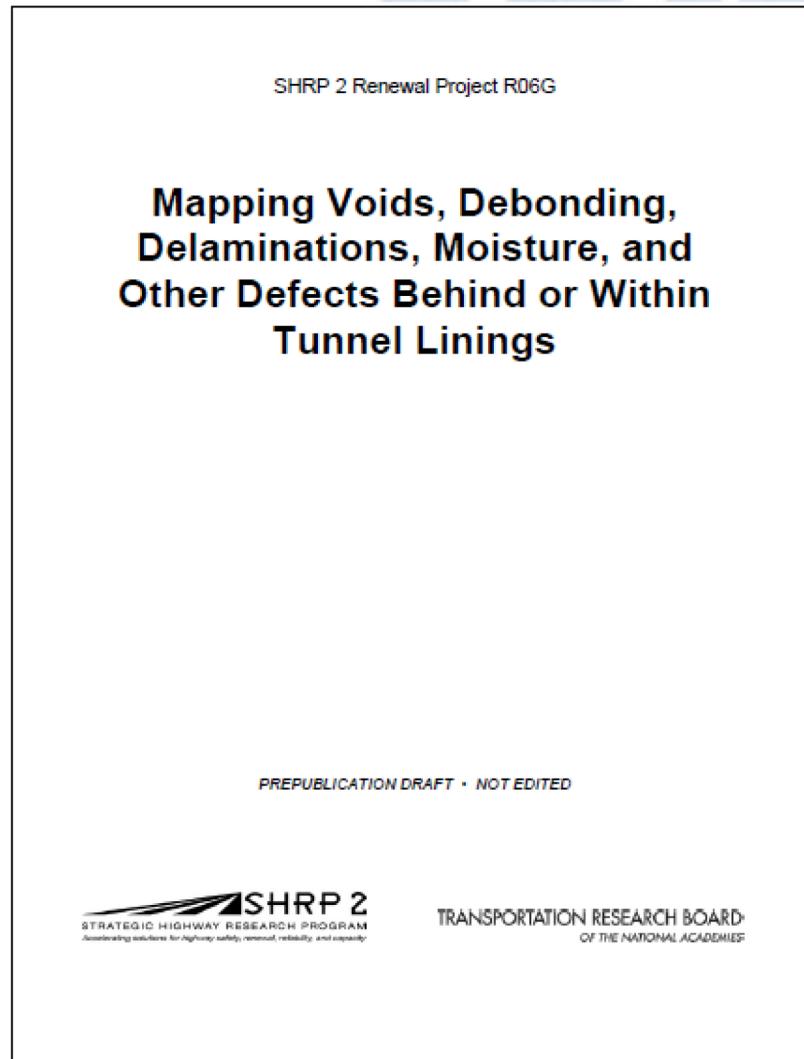
### CHAPTER 4 Criteria and Methodology for Evaluating NDT Methods for Assessment of Bridge Decks

### CHAPTER 5 Approach to Validation Testing

### CHAPTER 6 Results and Discussion

### CHAPTER 7 Evaluation and Ranking of NDT for Condition Assessment of Bridge Decks

## Riferimenti 4 - stato dell'arte sui metodi diagnostici per le indagini sul rivestimento delle gallerie



SHRP 2 Renewal Project R06G  
Transportation Research Board  
College Station, Texas, 2012

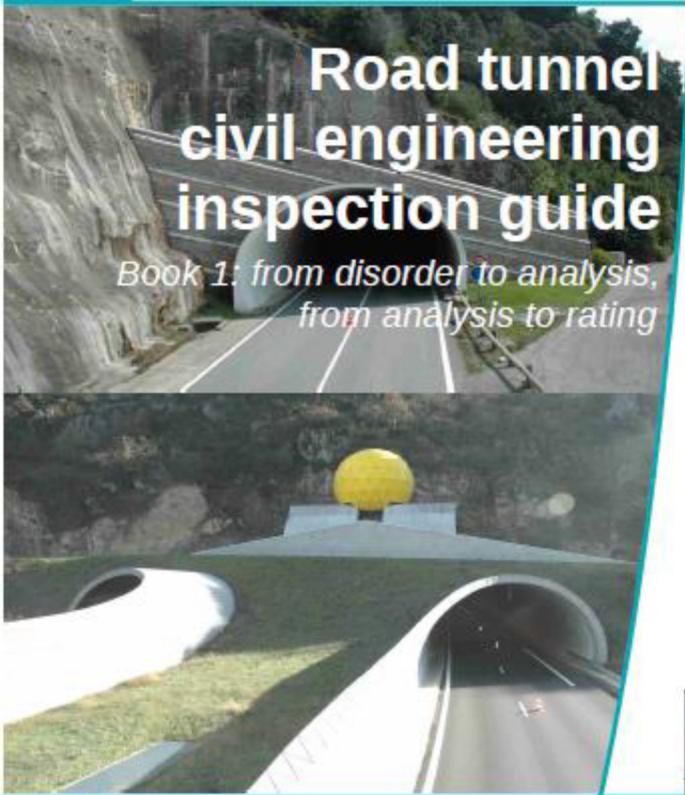
- 1. Background**
- 2. Research Approach**
- 3. Findings and Applications**
- 4. Conclusions and Recommended Research**

air coupled GPR  
ground coupled GPR  
handheld thermal camera  
ultrasonic tomography  
ultrasonic echo  
Portable Seismic Property Analyzer  
acoustic sounding  
vehicle mounted thermal camera  
spacetec  
roadscanners

# Riferimenti 5 - le guide del Centre d'Etudes des Tunnels (CETU)

 Guides

[http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide\\_inspection-book1\\_hv.pdf](http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/guide_inspection-book1_hv.pdf)



**Road tunnel civil engineering inspection guide**  
*Book 1: from disorder to analysis, from analysis to rating*

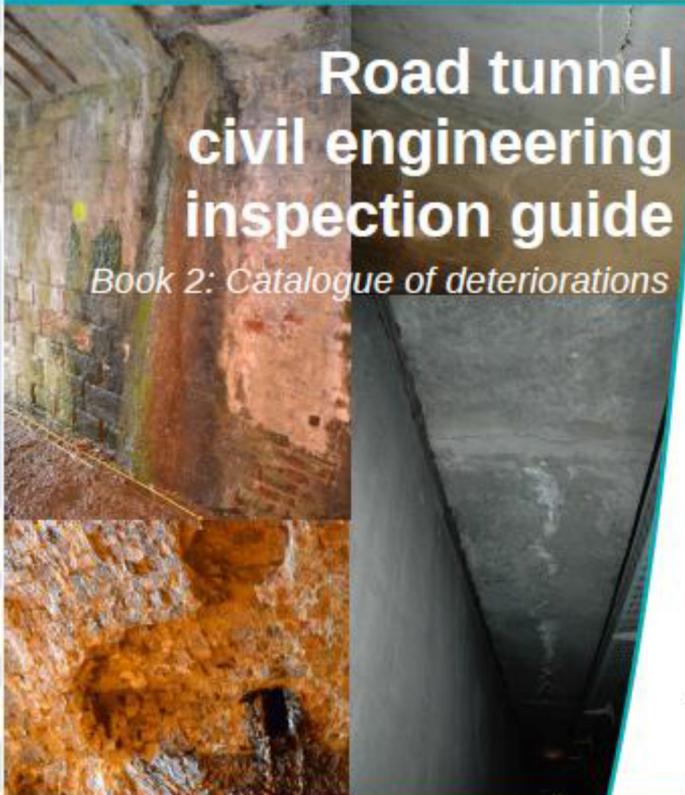
January 2015

Centre d'Études des Tunnels  
[www.cetu.developpement-durable.gouv.fr](http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr)



 Guides

[http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/road\\_tunnel\\_inspection\\_guide\\_book2\\_hv.pdf](http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/road_tunnel_inspection_guide_book2_hv.pdf)



**Road tunnel civil engineering inspection guide**  
*Book 2: Catalogue of deteriorations*

January 2015

Centre d'Études des Tunnels  
[www.cetu.developpement-durable.gouv.fr](http://www.cetu.developpement-durable.gouv.fr)



## esame visivo: patologie tipiche degli impalcati da ponte in C.A.

### delaminazione per corrosione dell'armatura ordinaria



### corrosione dei trefoli di precompressione (aderenti o entro guaine)



## esame visivo: patologie tipiche degli impalcati da ponte in C.A.

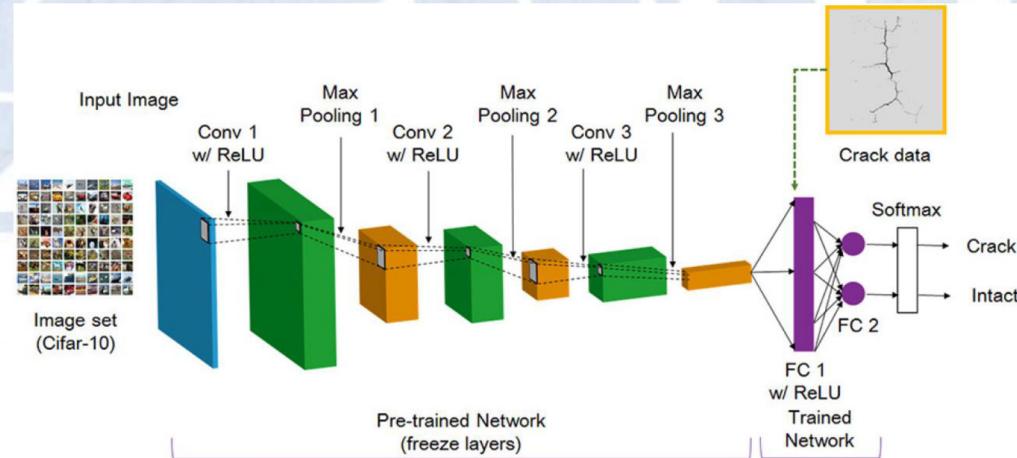
effetto della rottura dei pluviali (zona di montagna = cloruri)



# esame visivo: utilizzo di droni per l'identificazione di fessure

identificazione e riconoscimento di fessure mediante reti neurali e algoritmi deep learning

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6022134/>



Crack Thickness (mm)

C-1	1.92
C-2	1.10
C-3	1.10
C-4	1.37
C-5	1.37
C-6	1.92
C-7	2.47
C-8	1.59
C-9	1.10
C-10	0.53
C-11	0.55
C-12	0.55



Marker 1

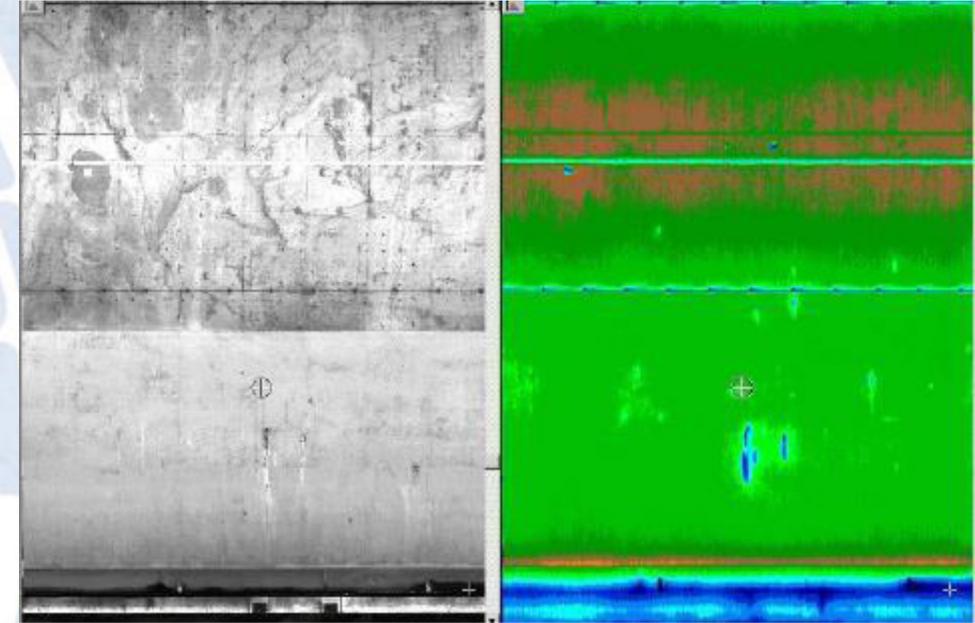


Marker 2



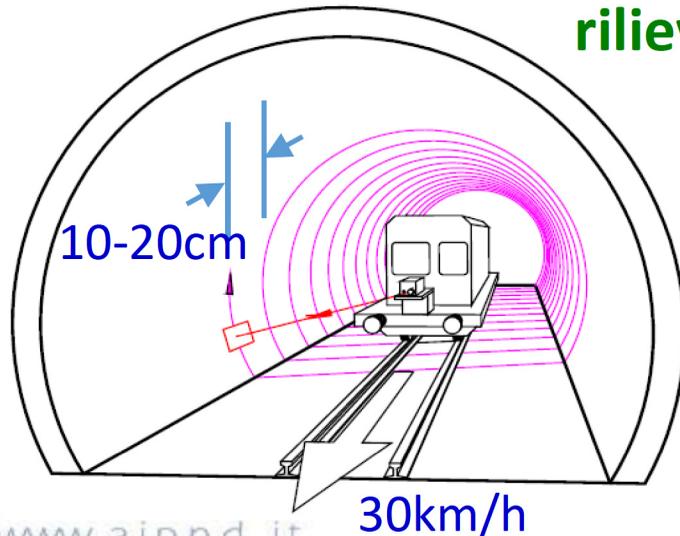
## Mobile Mapping Systems

- monitoraggio deformazioni
- identificazione infiltrazioni
- identificazione difetti



## rilievo di sezioni trasversali

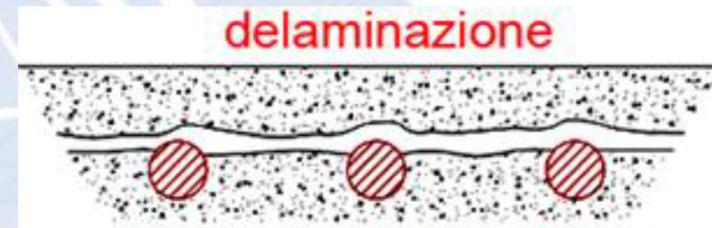
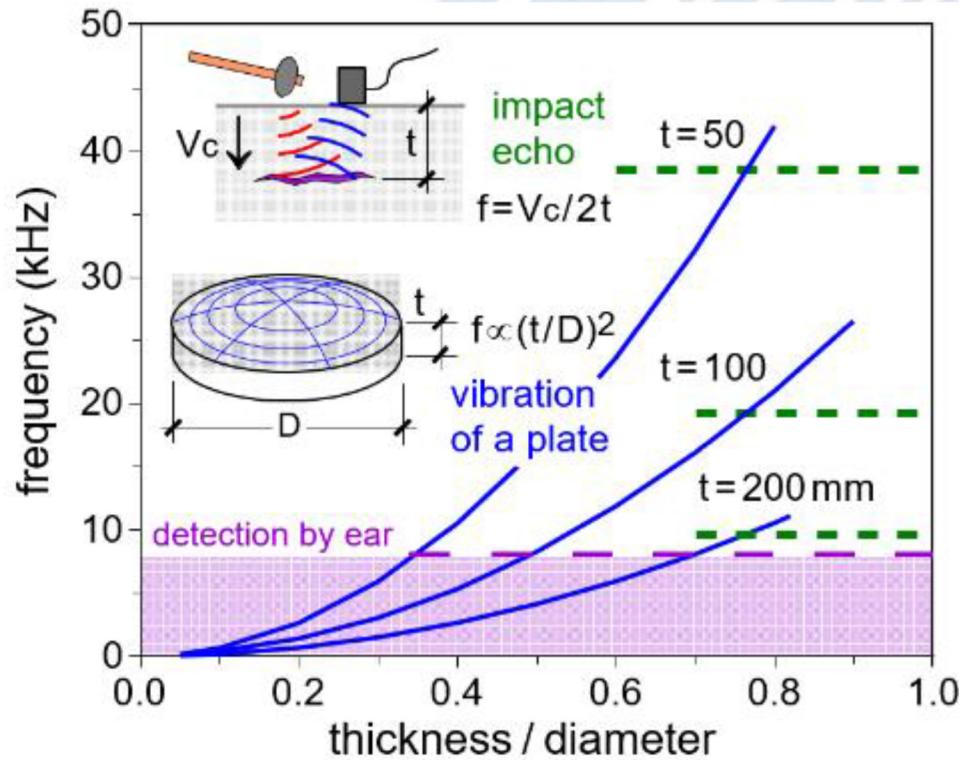
- laser scanner
- Ground Control Points
- unità inerziale



## problemi aperti

- trattamento dei dati
- patina superficiale e ostacoli
- identificazione difetti
- confronto con scansioni precedenti

## risposta del copriferro ad un impulso meccanico



nel caso di delaminazioni superficiali, al meccanismo di riflessione degli impulsi si sovrappone la vibrazione (in campo sonico) della parte distaccata

*il distacco può essere caratterizzato:*

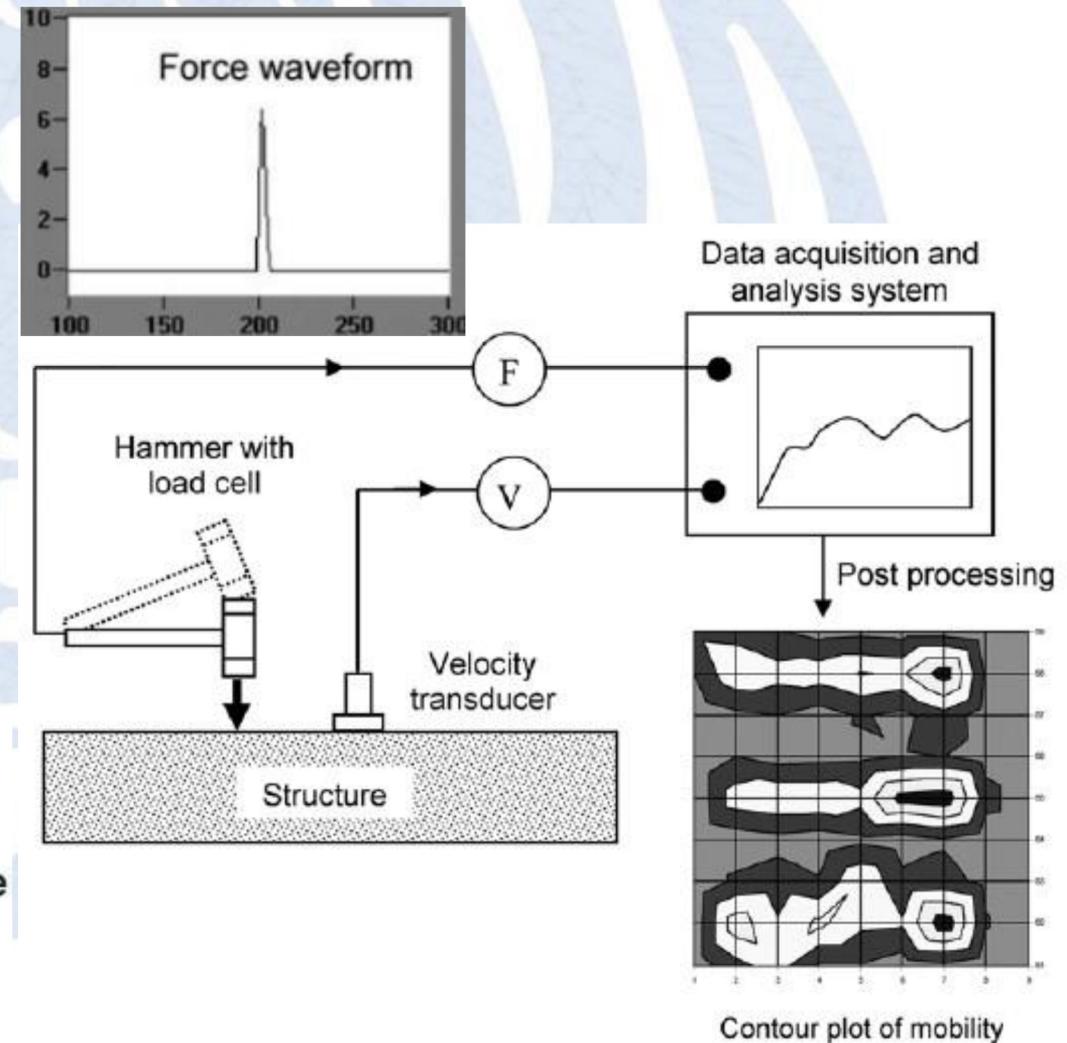
- studiando la "mobilità" del copriferro (ASTM C1740)
- verificando la risposta acustica (a orecchio o mediante strumentazione)
- rilevando l'eco del segnale riflesso (necessariamente mediante strumentazione)

risposta a impulsi di maggiore energia:  
**il metodo impulse-response**



vengono indotte vibrazioni strutturali  
 su frequenze inferiori a 1 kHz

**impattatore di massa elevata (1kg)**  
 capace di indurre vibrazioni strutturali



Designation: C1740 – 10

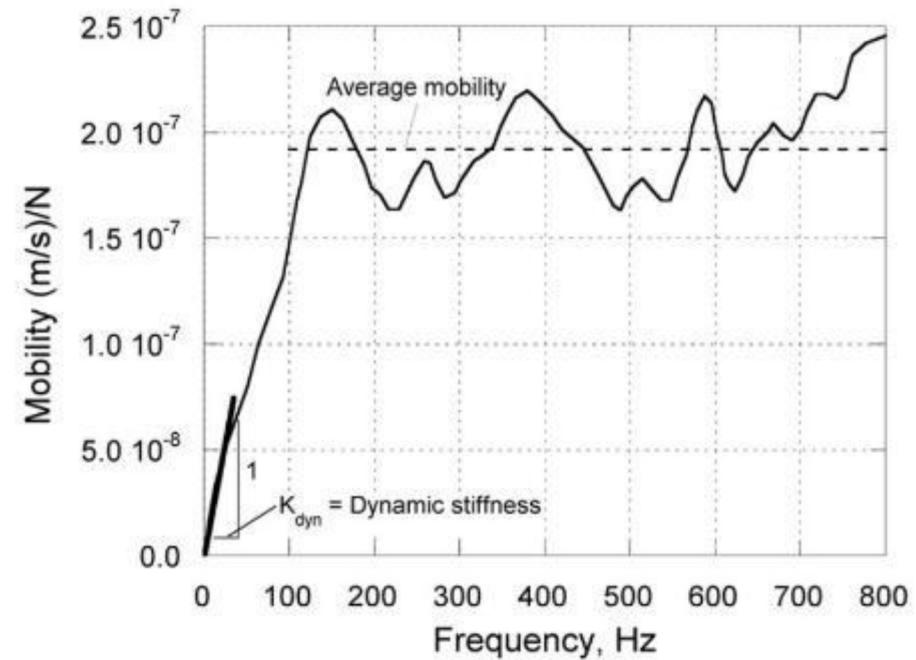
**Standard Practice for  
 Evaluating the Condition of Concrete Plates Using the  
 Impulse-Response Method<sup>1</sup>**

# implementazione sul campo e risposta



metodo tarato per piastre di spessore significativo (martello da 1kg)

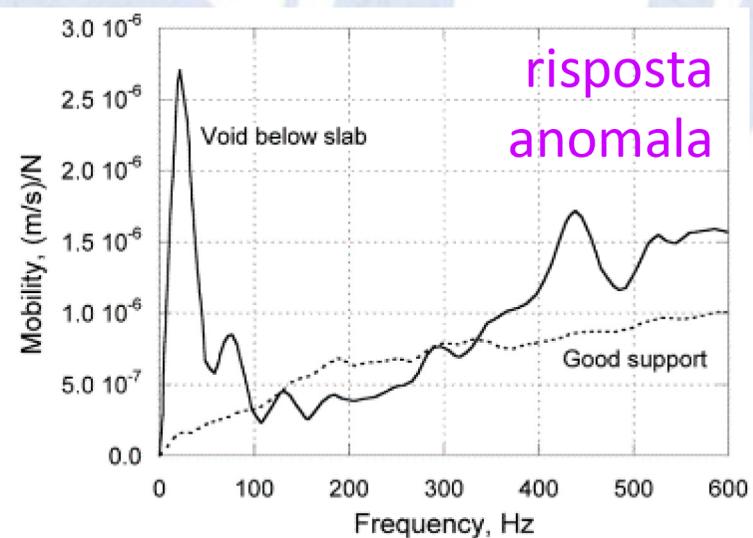
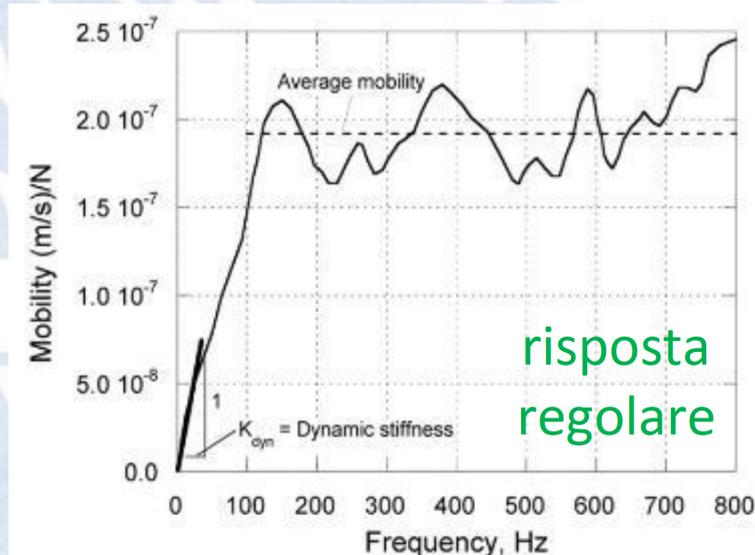
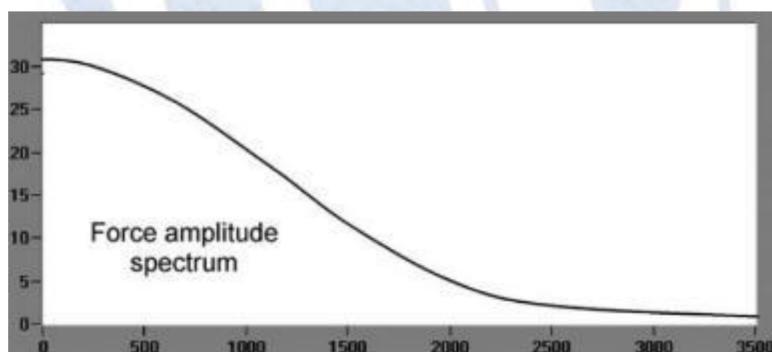
accoppiamento a contatto del sensore (geofono)



**definizione di mobilità**  
 (velocità per unità di forza)

$$M(f) = \frac{V(f) \times F^*(f)}{F(f) \times F^*(f)}$$

$M(f)$  = mobility spectrum,  
 $V(f)$  = velocity spectrum,  
 $F(f)$  = impact force spectrum  
 $F^*(f)$  = conjugate of force spectrum



**ruote dentate**

Delam Tool

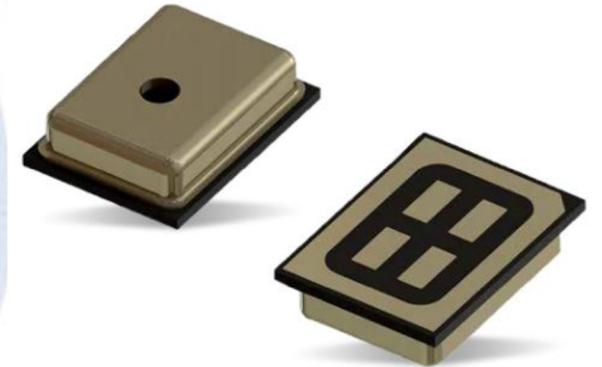
<http://soundingtech.com/>



**microfono +  
adattatore USB**



**microfono MEMS**



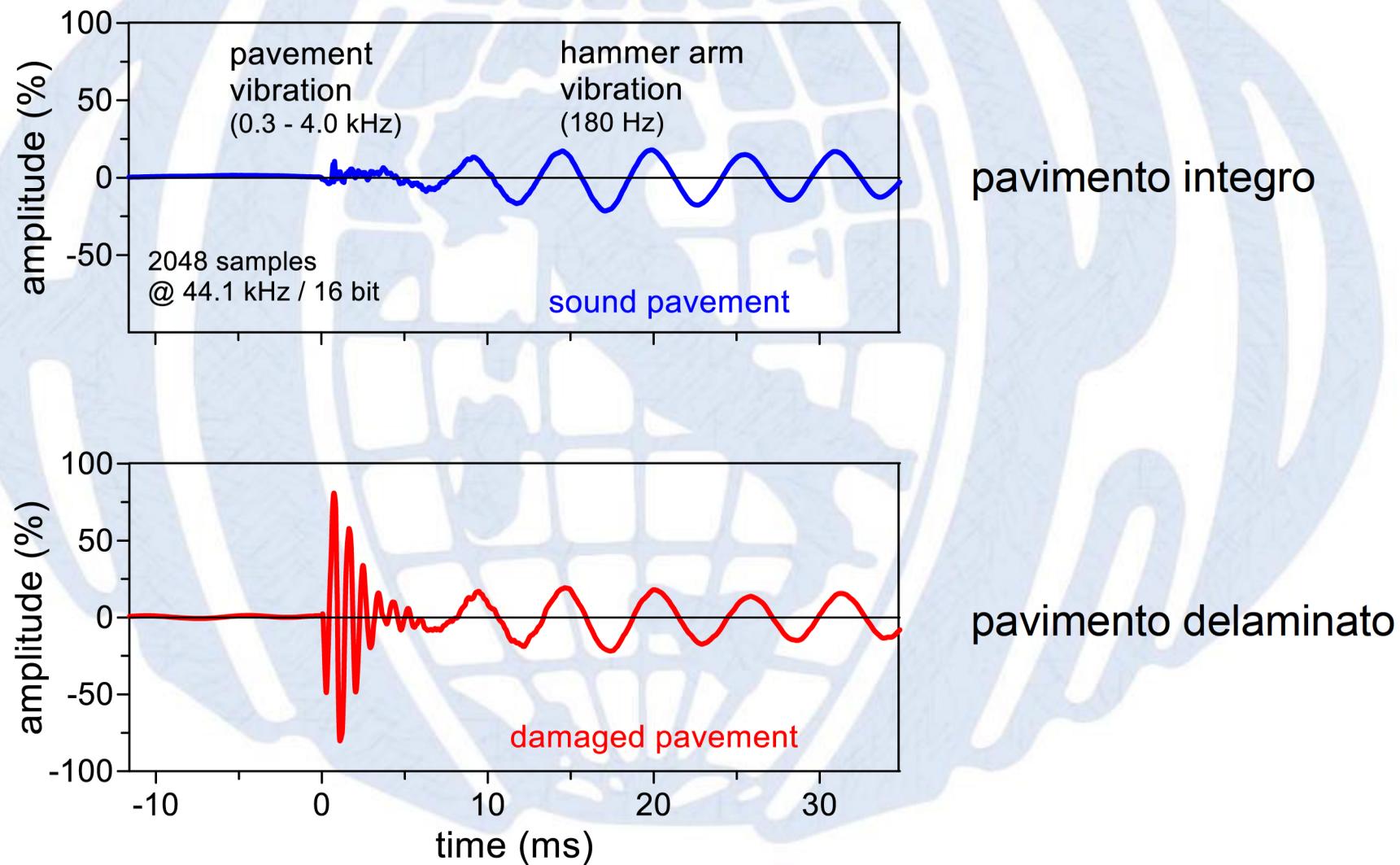
**catene**



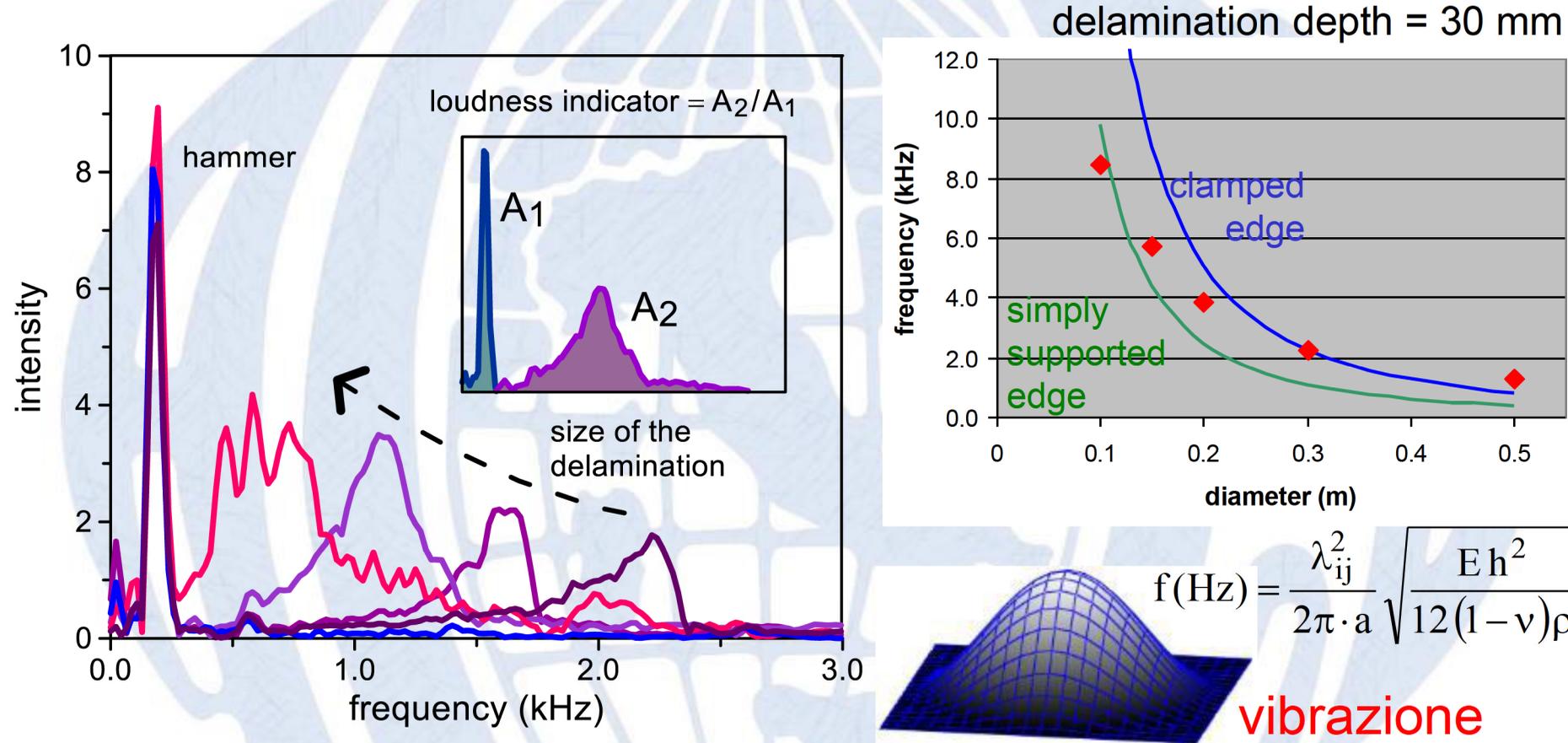
**accelerometro MEMS**



## da percezione acustica a indice di danno



# evoluzione dello spettro di frequenza al crescere della dimensione del distacco

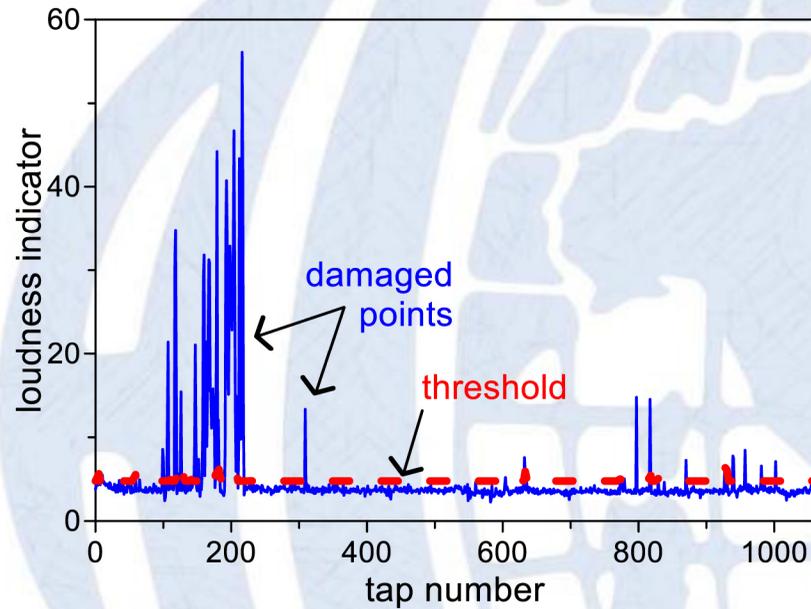


un distacco è evidenziato da

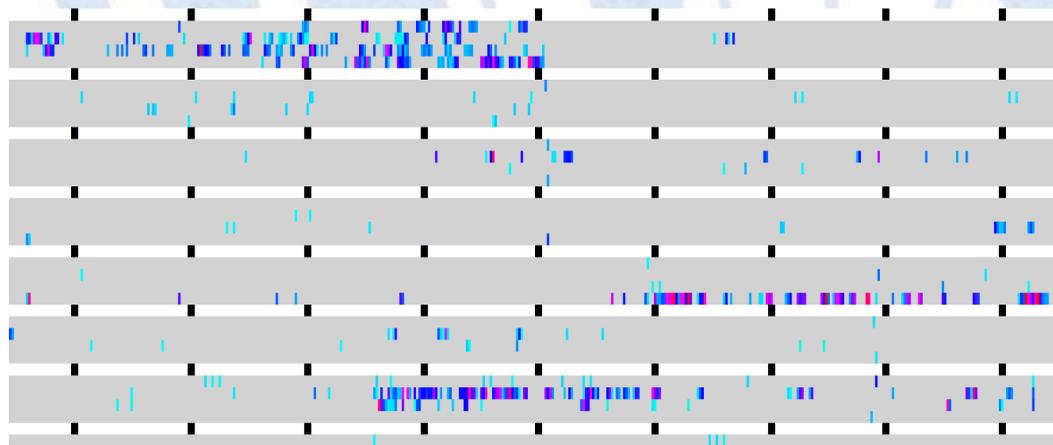
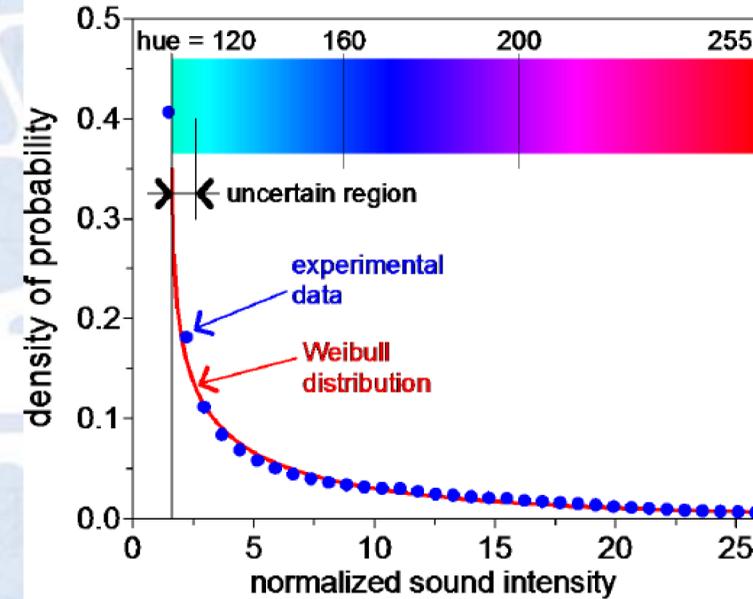
- una frequenza di picco più bassa (*che dipende dal rapporto diam / spess*)
- una maggiore sonorità (*che dipende dalla dimensione e fessurazioni*)

# creazione di una mappa dei distacchi

*indice di danno su una scansione lineare*



*traduzione mediante scala cromatica*



*mappa delle delaminazioni*

pavimentazione industriale (8000m<sup>2</sup>)

8 ore di registrazione

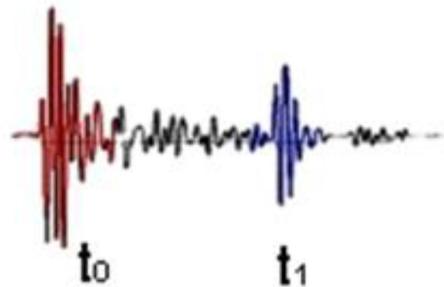
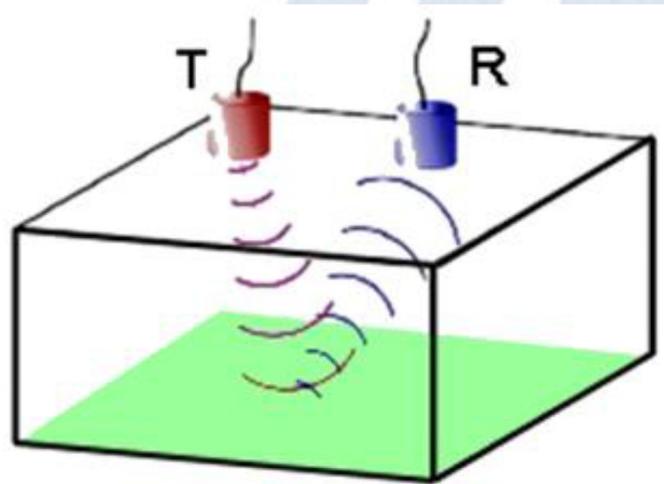
2 GBytes in files audio

85.000 battute

2400 punti danneggiati

# il metodo ultrasonic pulse-echo

**principio:** viene emesso un **breve impulso** (una-due semionde a 50kHz) e si ascoltano eventuali onde riflesse dalle discontinuità di impedenza acustica



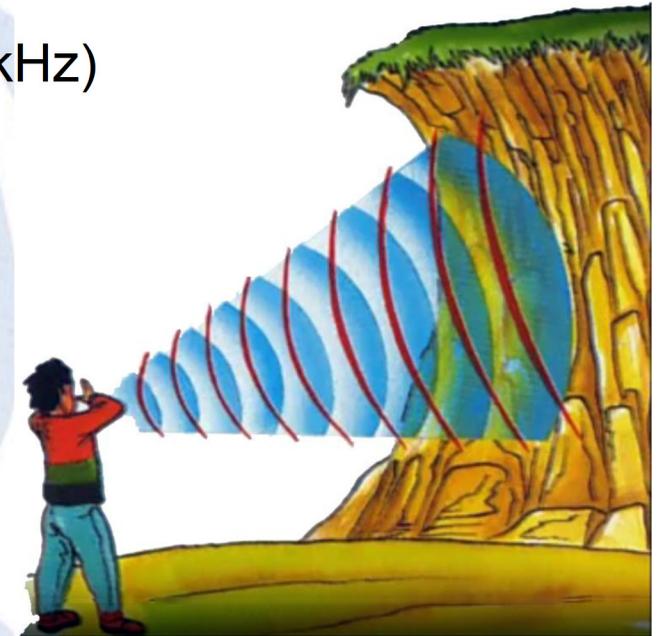
impedenza acustica  $Z' = \rho \cdot c$

fattore di trasmissione  $T = \frac{2 \cdot Z'_2}{Z'_1 + Z'_2}$

fattore di riflessione  $R = \frac{Z'_2 - Z'_1}{Z'_1 + Z'_2} = T - 1$

**calcestruzzo - aria  $R = -1$**

**calcestruzzo - acciaio  $R \approx 0.5$**



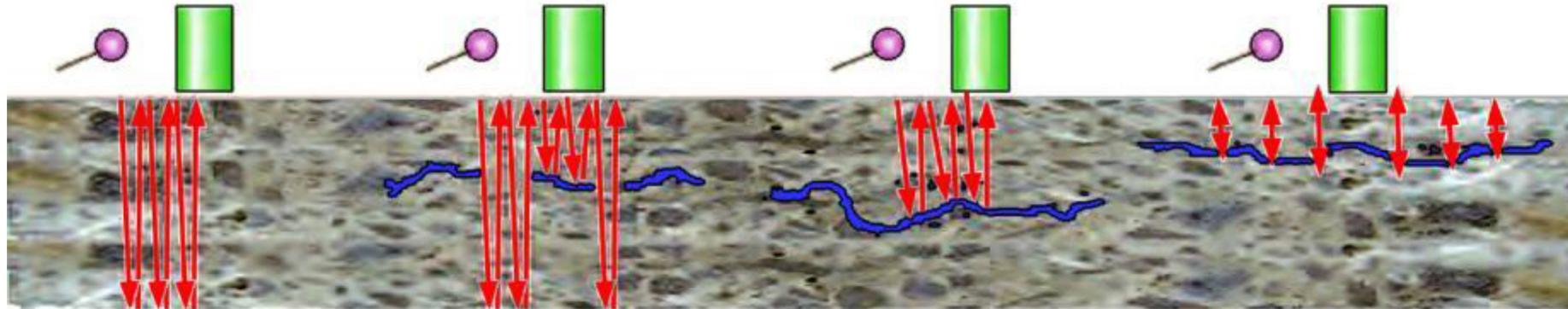
# risposta di elementi piani a brevi impulsi (20-100µs): il metodo impact-echo

**piccolo  
impattatore**  
sfera Ø 5-20mm

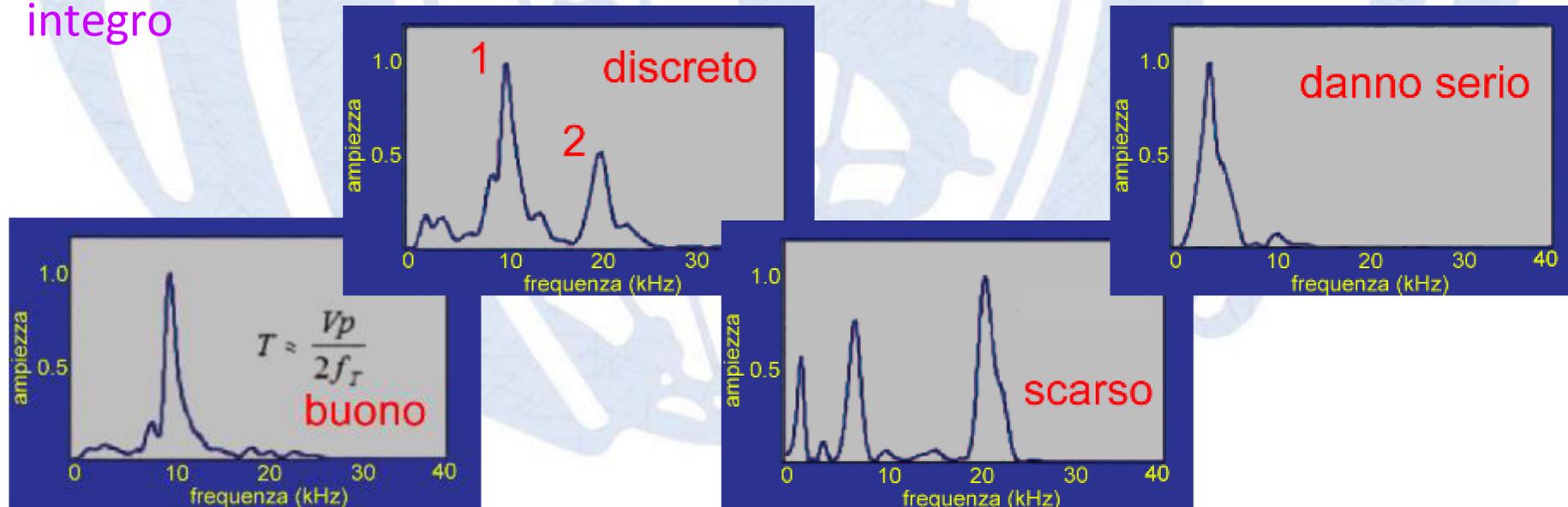
incipiente  
delaminazione

delaminato

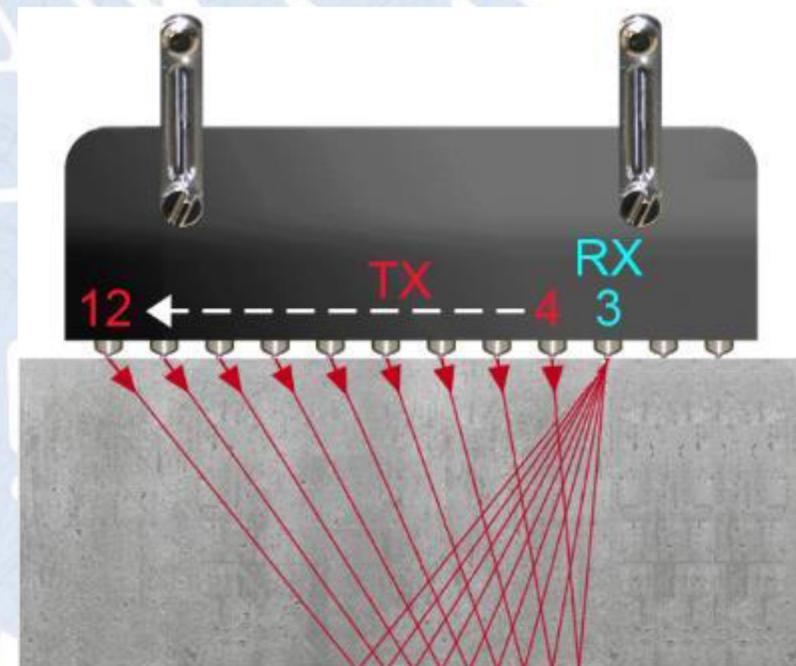
ampia  
delaminazione



integro



## il tomografo pulse-echo A1040 MIRA

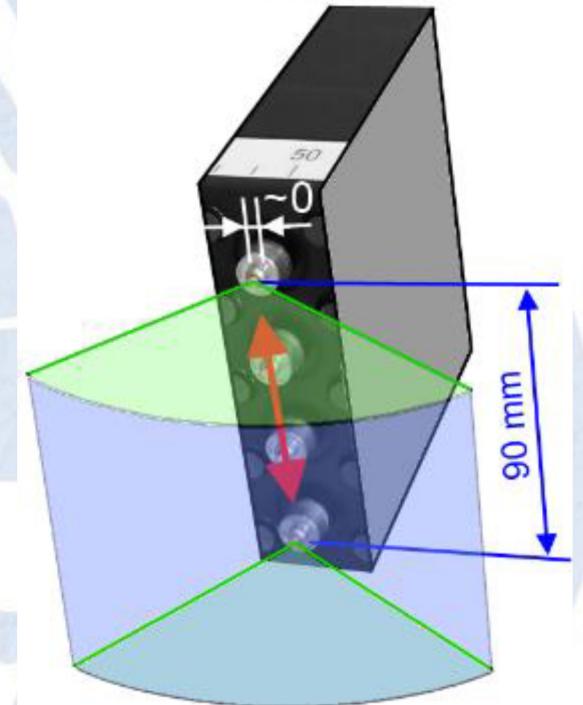


- 12 moduli equispaziati di emissione-ricezione (*4 sensori puntiformi ciascuno*)
- per ogni ricevitore emettono tutti i moduli successivi
- in una scansione vengono generate 66 forme d'onda (*in circa 2 secondi*)
- una scansione produce un'immagine B-scan di circa 350 mm



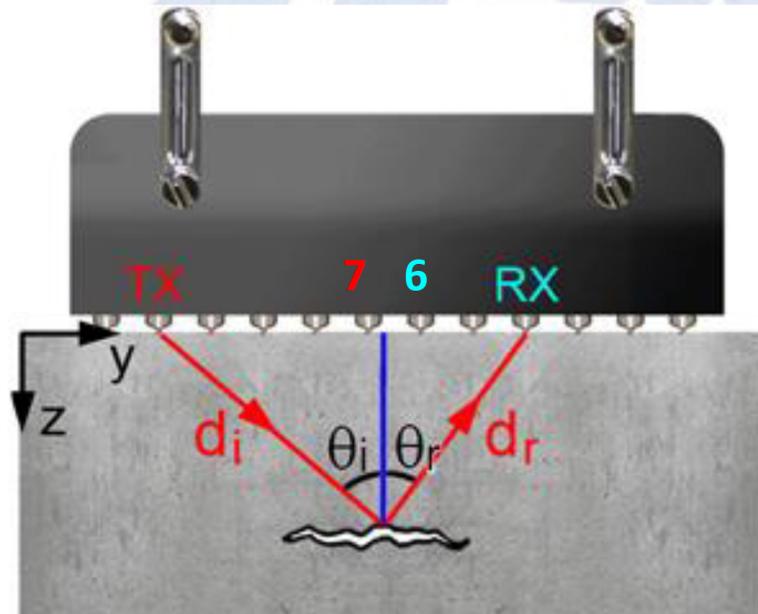
## caratteristiche tecniche del tomografo

Parameter	Value	Units
sampling rate	1	MHz
A/D conversion resolution:	14	bits
analog gain	0 to 60	dB
pulse frequency (square wave):	25-85	kHz
pause between pulses:	0 to 50	ms
pulse duration	0.5 to 5	periods
number of measuring blocks	12	
interval between blocks	30	mm

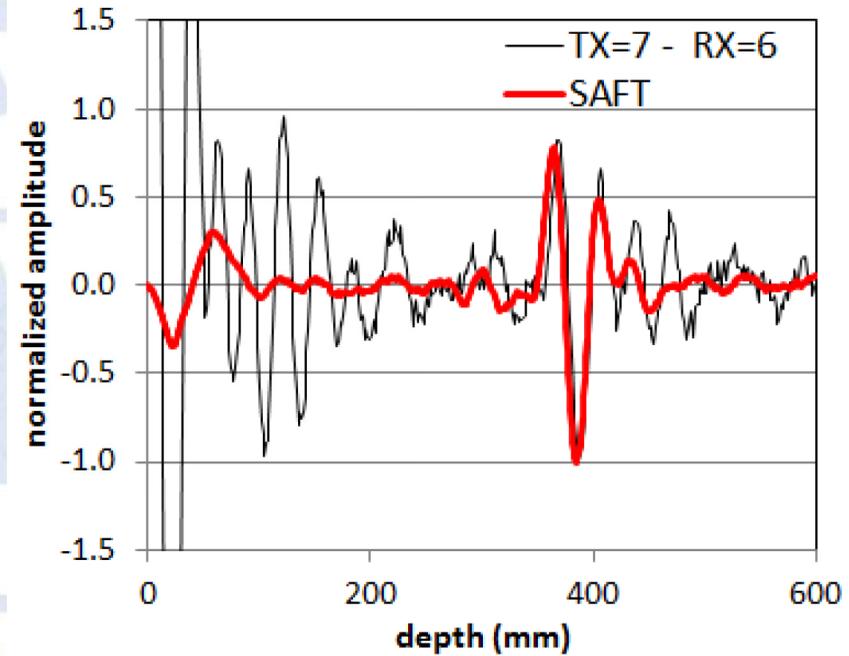


- onde di taglio (*nessuna conversione di modo*)
- ampia divergenza nel piano di scansione, limitata trasversalmente al piano
- sensori puntiformi su molle precaricate (*applicazione a secco*)
- sensori da 50 kHz smorzati (*possibilità di pilotarli in un range di frequenze*)
- pulsatore a onda quadra con lunghezza degli impulsi regolabile

## benefici della fusione di più segnali



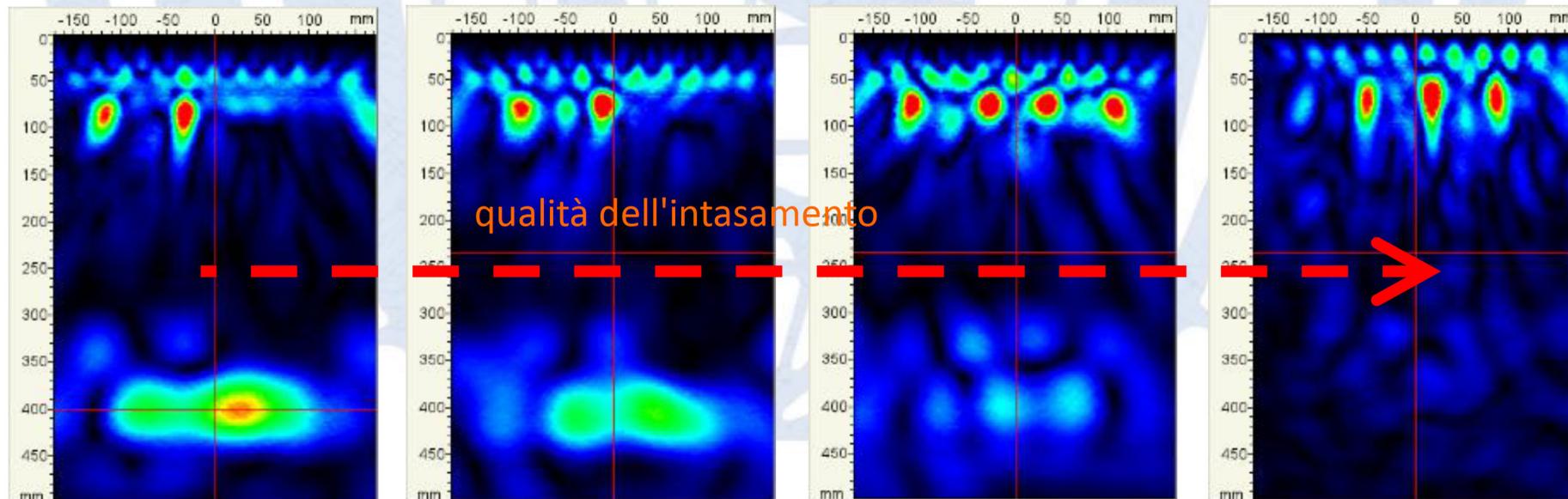
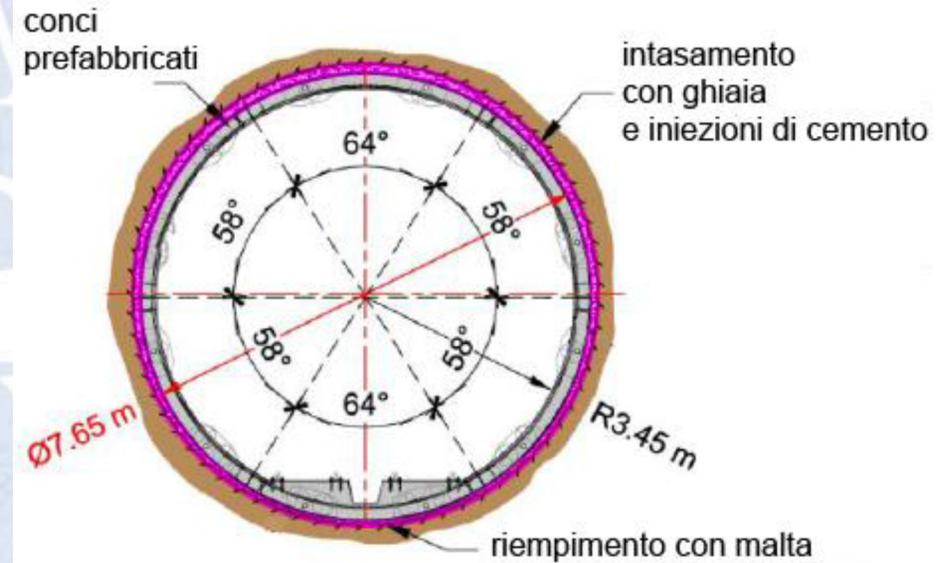
singola forma d'onda vs  
sezione dell'immagine focalizzata



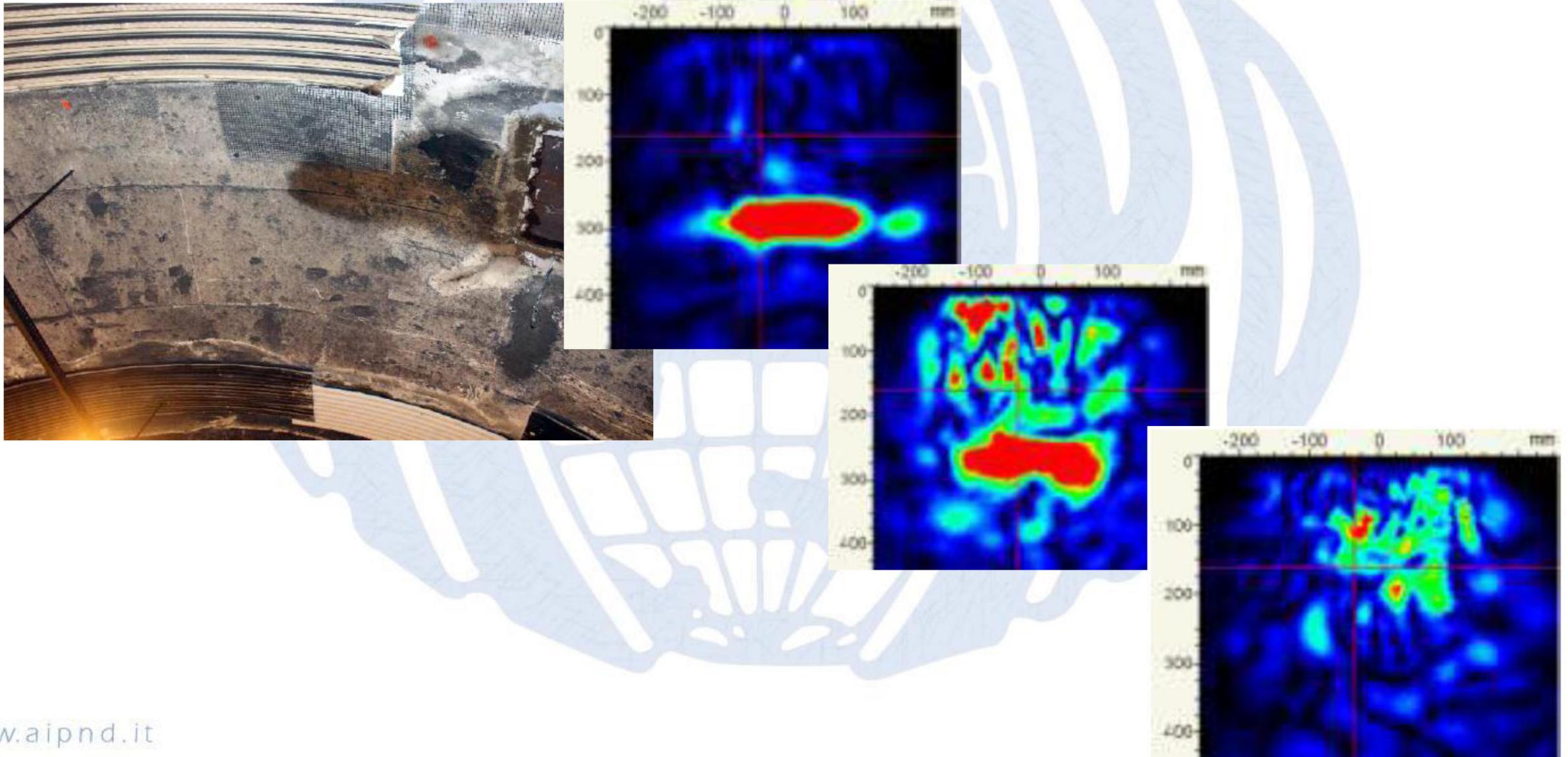
- il segnale ricevuto da un singolo emettitore è affetto da rumore strutturale (*diffrazione dovuta agli aggregati, piccole difettosità*)
- la composizione di 66 forme d'onda riduce il rumore e permette una localizzazione più precisa dei riflettori

# un'applicazione frequente: rivestimento gallerie

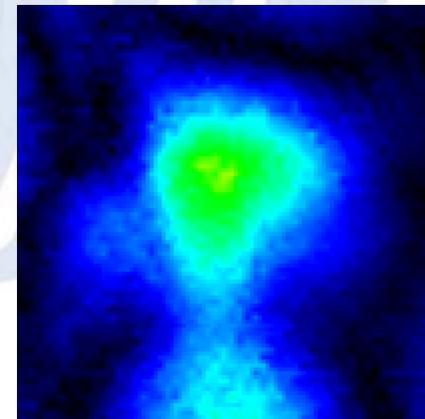
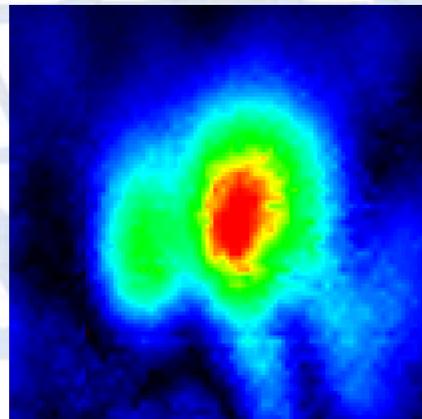
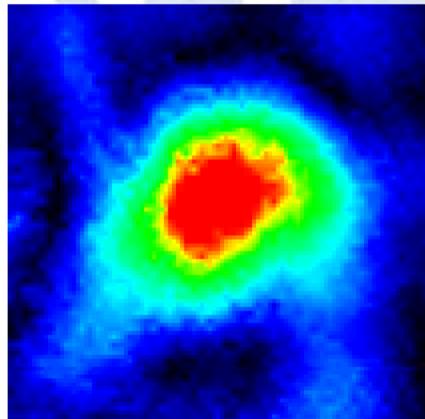
verifica dell'intasamento di gallerie in conci prefabbricati



# le condizioni operative nelle gallerie esistenti non sono ottimali

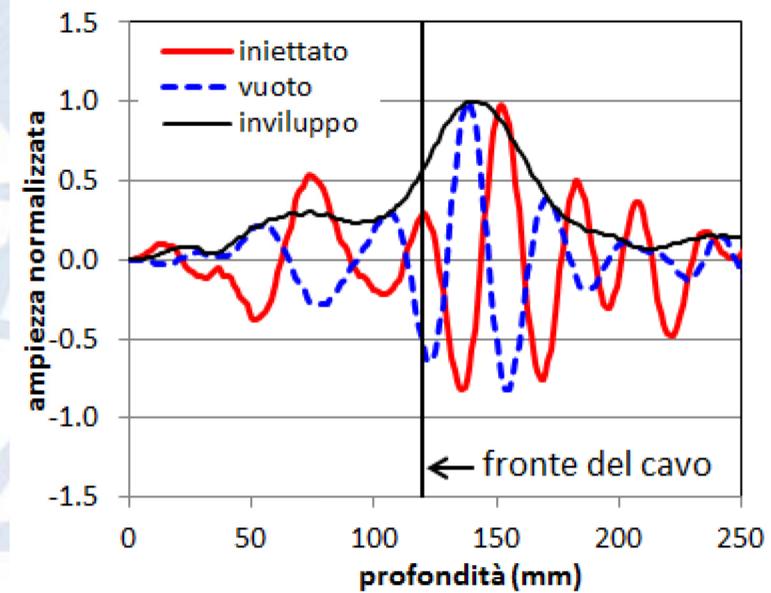
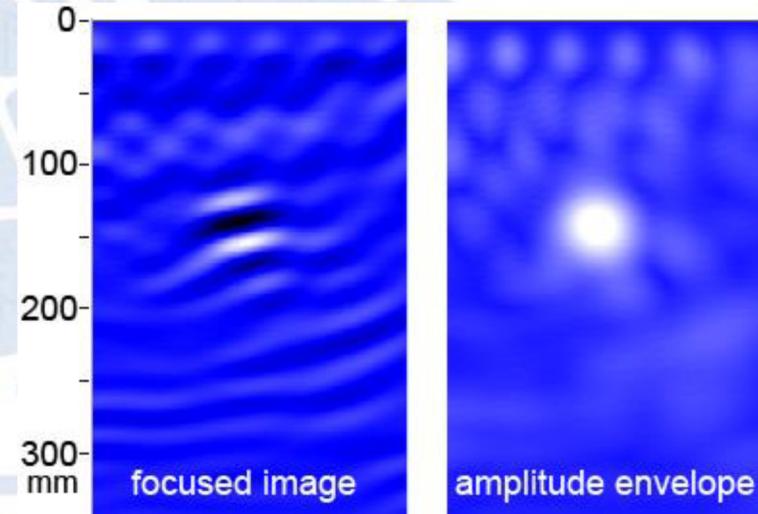
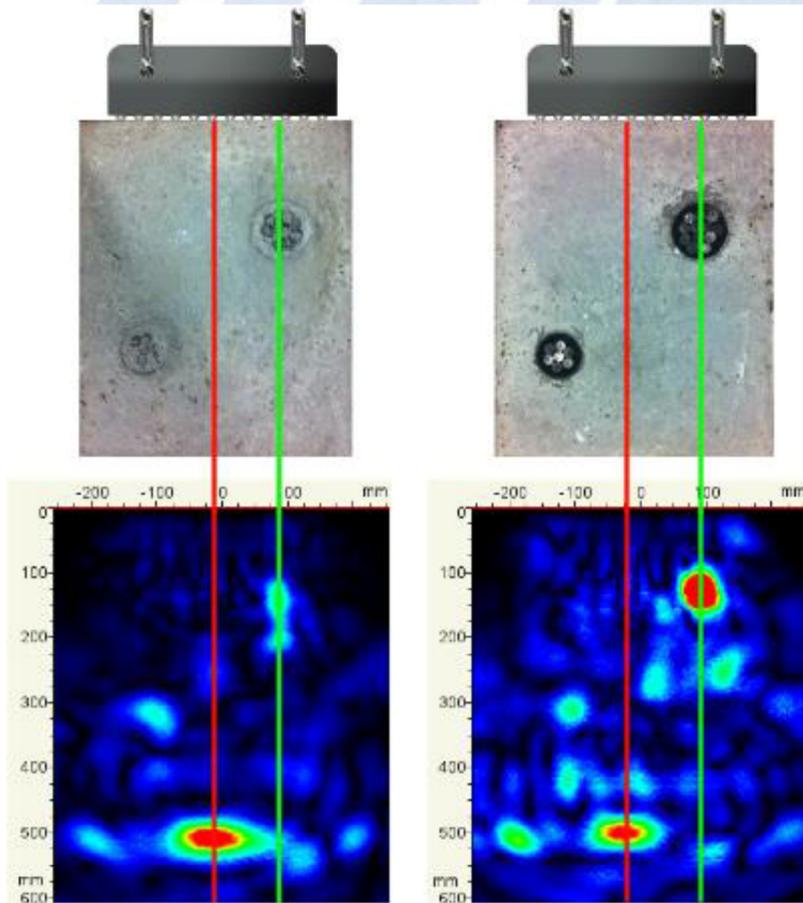


# un esempio di grande attualità: iniezioni cementizie di cavi post-tesi



## riempimento delle guaine di post-tensione

- lo strumento indica solamente l'intensità della riflessione (Hilbert envelope)
- l'immagine focalizzata preserva la fase

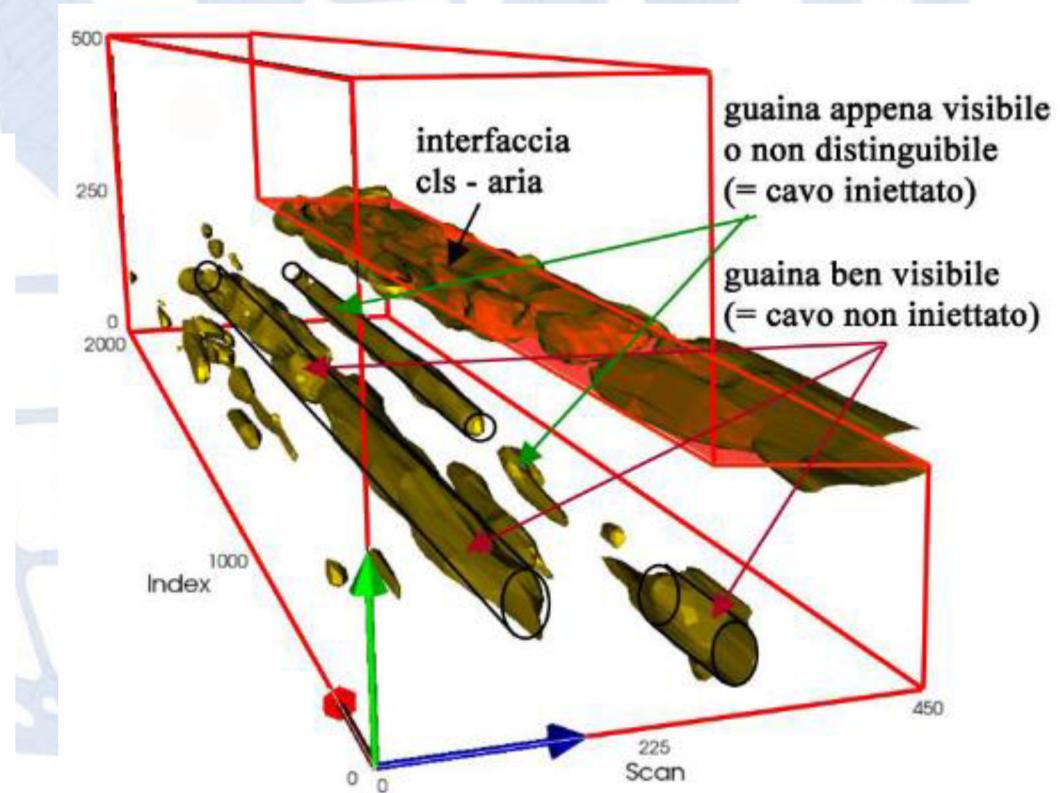
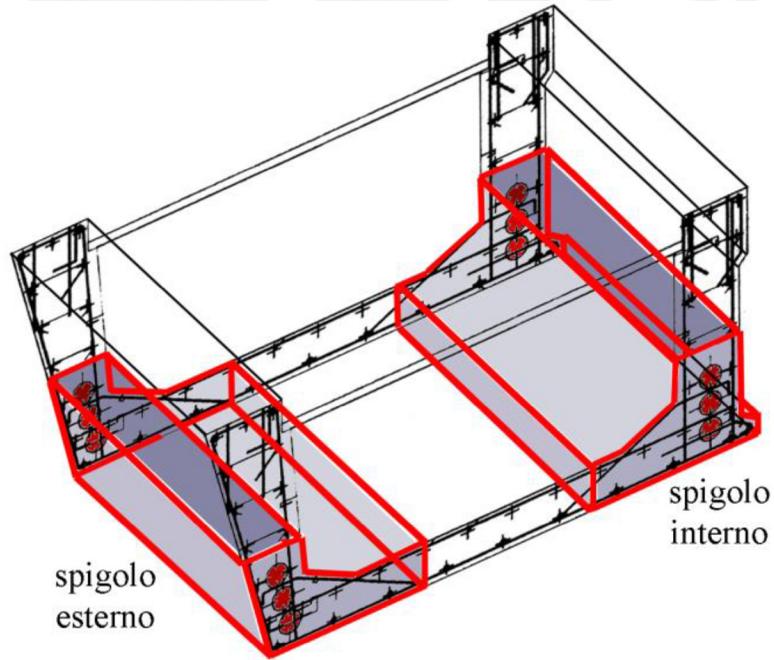


## indagini su un ponte a cassone post-teso



# indagini su un ponte a cassone post-teso

modello 3 D dei riflettori lungo gli spigoli del cassone



## indagini su un ponte a cassone post-teso



guaina indicata  
come piena

effettivo  
riempimento

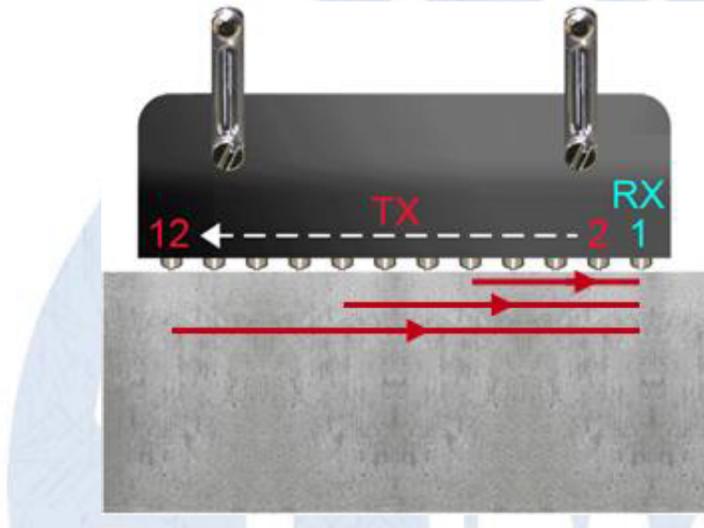


guaina indicata  
come vuota

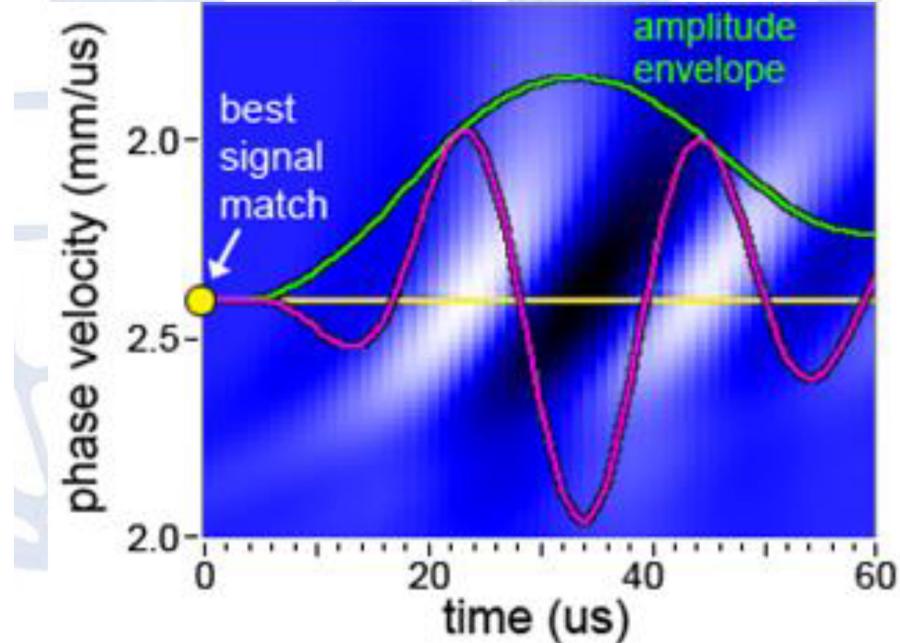
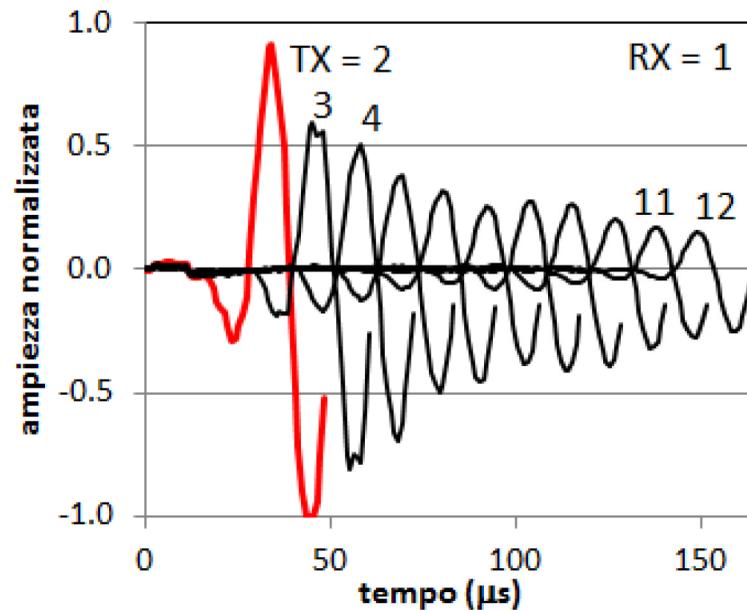
riempimento  
parziale  
(bolla d'aria  
lato ispezione)



## mappe della velocità superficiale

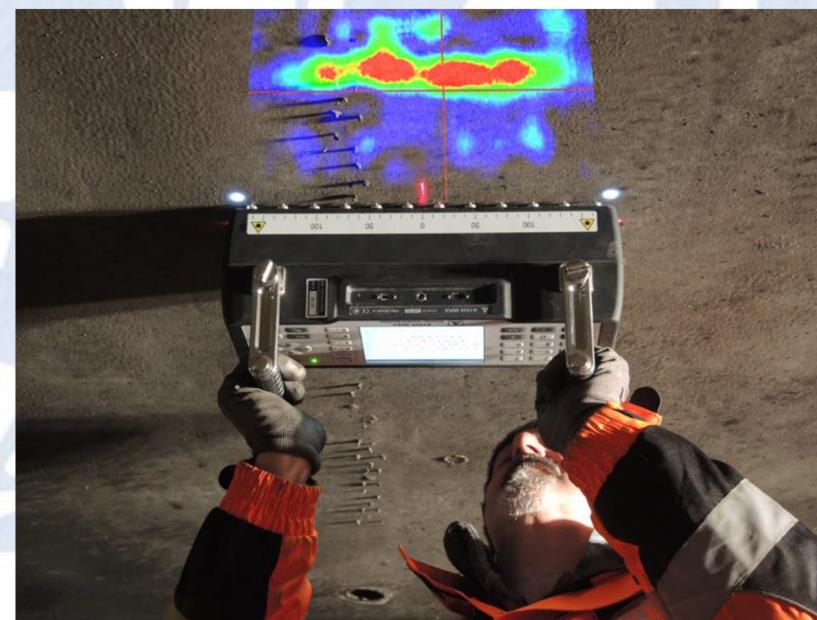


- si considera il primo impulso ricevuto attraverso la superficie del manufatto al crescere della distanza tra i sensori
- la velocità stimata è quella che permette la miglior sovrapposizione tra gli impulsi (massima ampiezza dell'involuppo)



## velocità superficiale all'intradosso di un sovrappasso incendiato

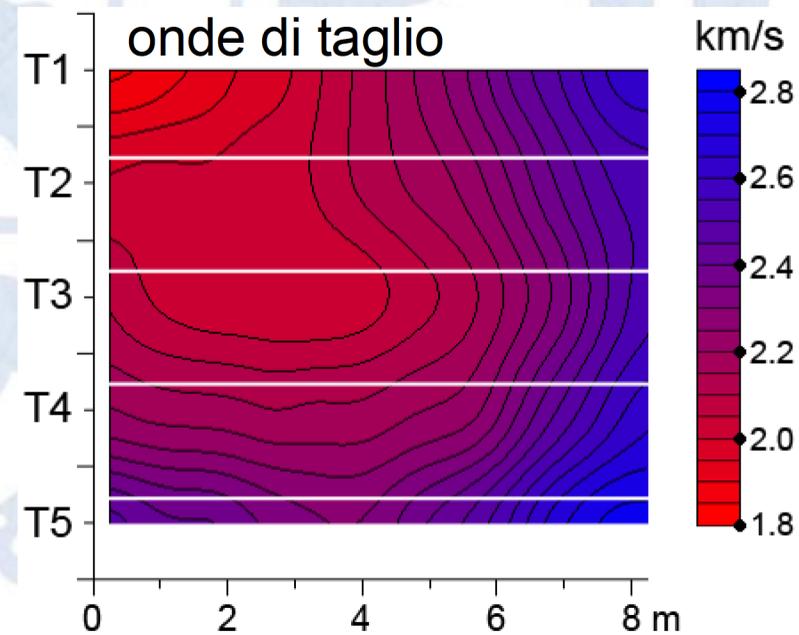
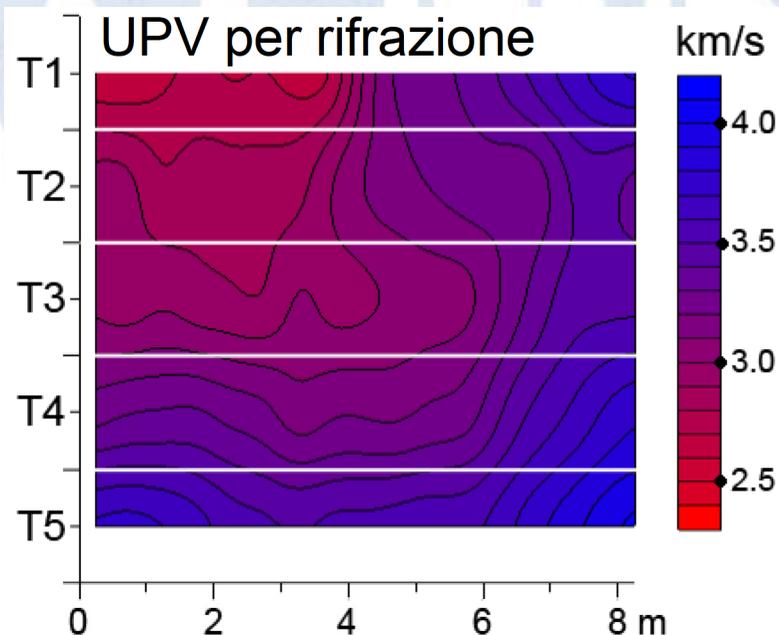
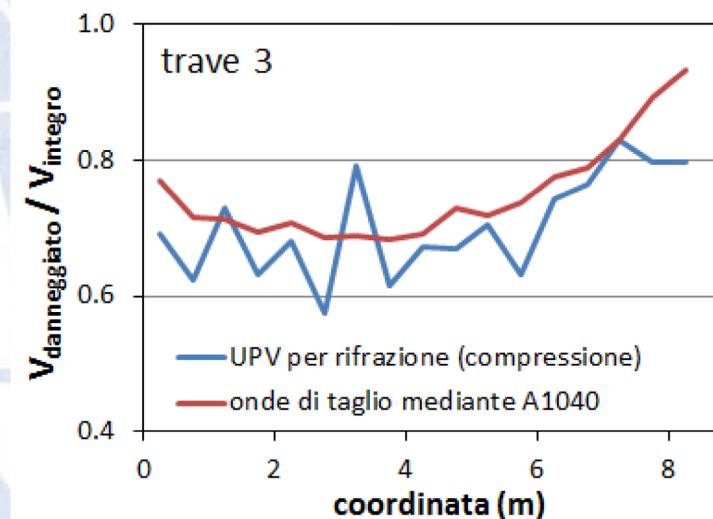
il drammatico incidente  
del 20 gennaio 2017  
sull'autostrada A4  
(uscita Verona est)



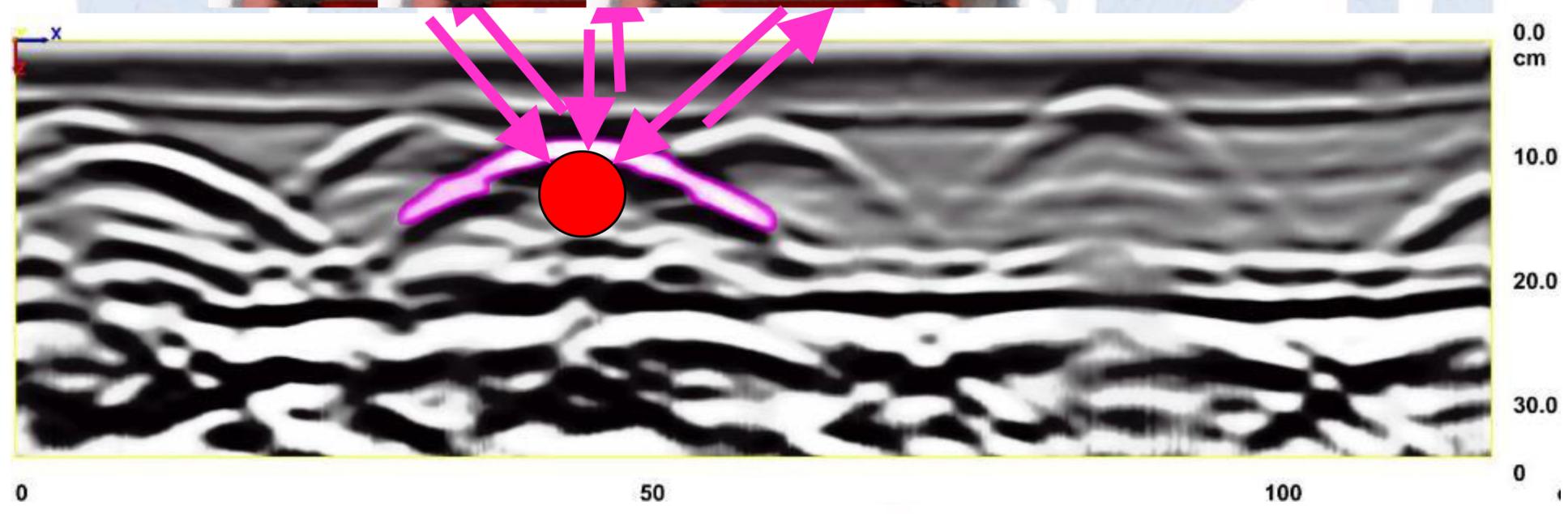
## velocità superficiale all'intradosso di un sovrappasso incendiato

il confronto tra metodo UPV indiretto con impulsi di compressione ( $d=150\text{mm}$ ) e impulsi pulse-echo con onde di taglio mostra risultati molto simili

il metodo basato sul tomografo A1040 fornisce risultati più ripetibili e risente meno delle fratture superficiali



# Geoadar: principio di funzionamento

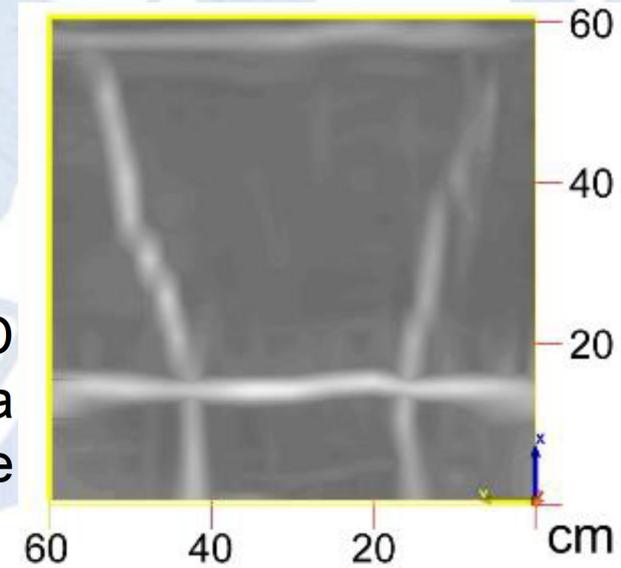


## radar ad alta frequenza per impieghi strutturali



frequenza 2.7GHz  
profondità max = 500mm

modello 3D  
dell'armatura  
di un nodo strutturale



## applicazione del radar a travi in C.A.P



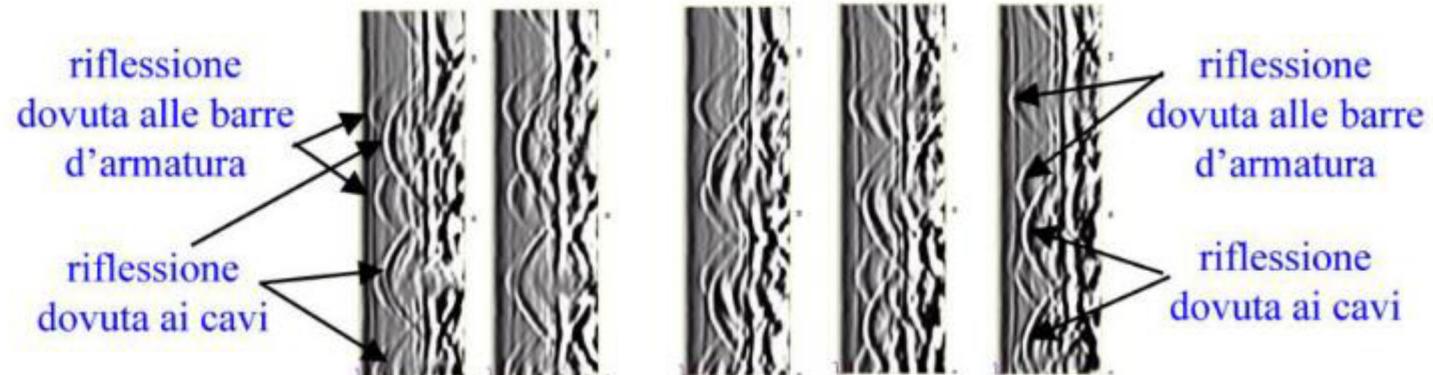
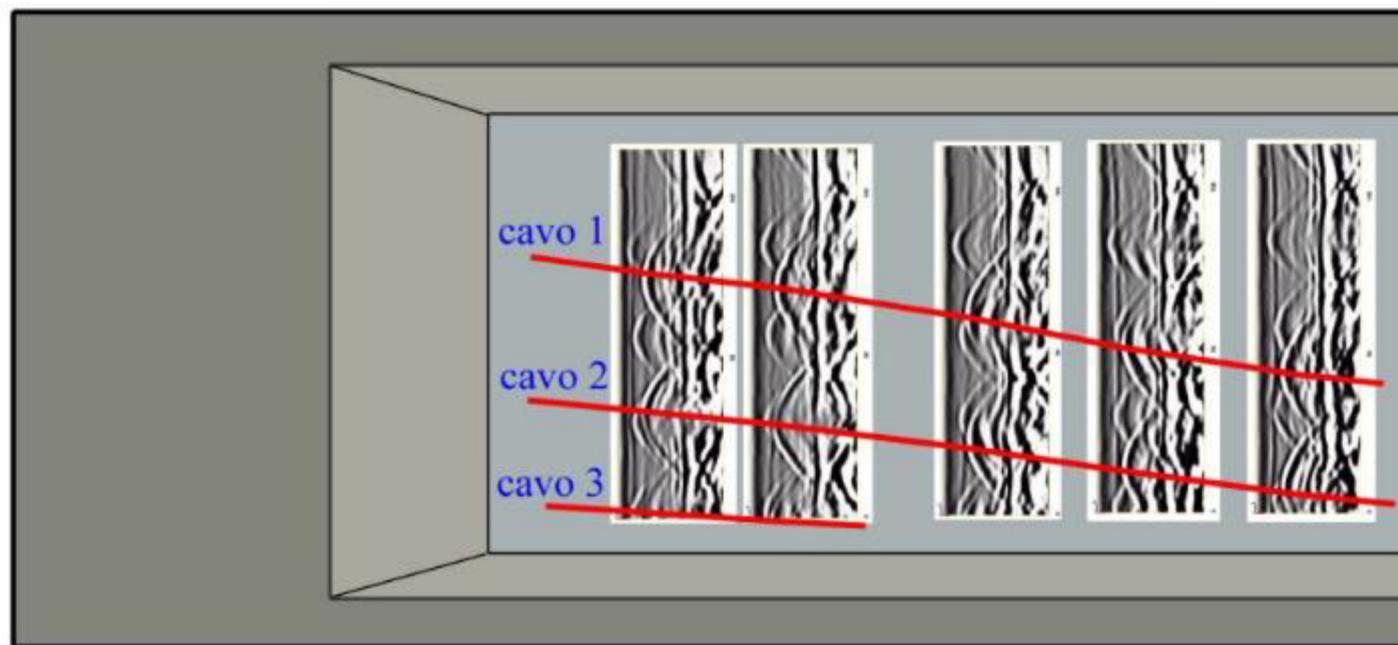
*Viadotto della SS 121 "Palermo-Agrigento" (Bolognetta)*

**Radar:** localizzazione cavi di post-tensione  
**Tomografia US:** verifica iniezione guaine

struttura già oggetto di lavori di ripristino  
 rivestimento travi con strato polimerico  
 (Mapelastic)



## applicazione del radar a travi in C.A.P



## la corrosione da carbonatazione

la "bibbia" della durabilità  
nelle strutture in C.A.



### carbonatazione

l'idrossido di calcio reagisce con l'anidride carbonica dell'atmosfera (in presenza di umidità e in ambiente basico) dando origine a carbonato di calcio e acqua



*le proprietà meccaniche migliorano, ma il pH della soluzione nei pori scende da 13-14 (molto basico) fino a meno di 9*

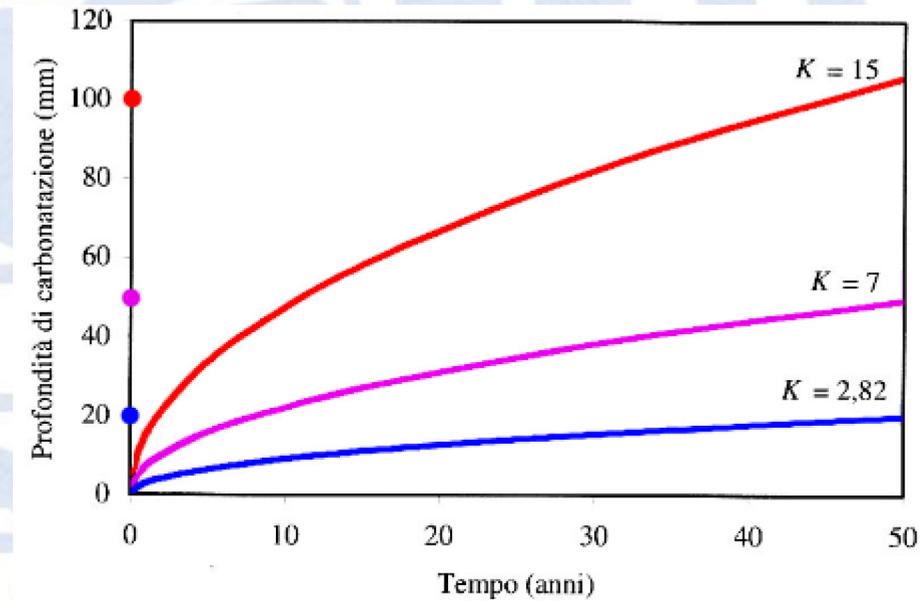
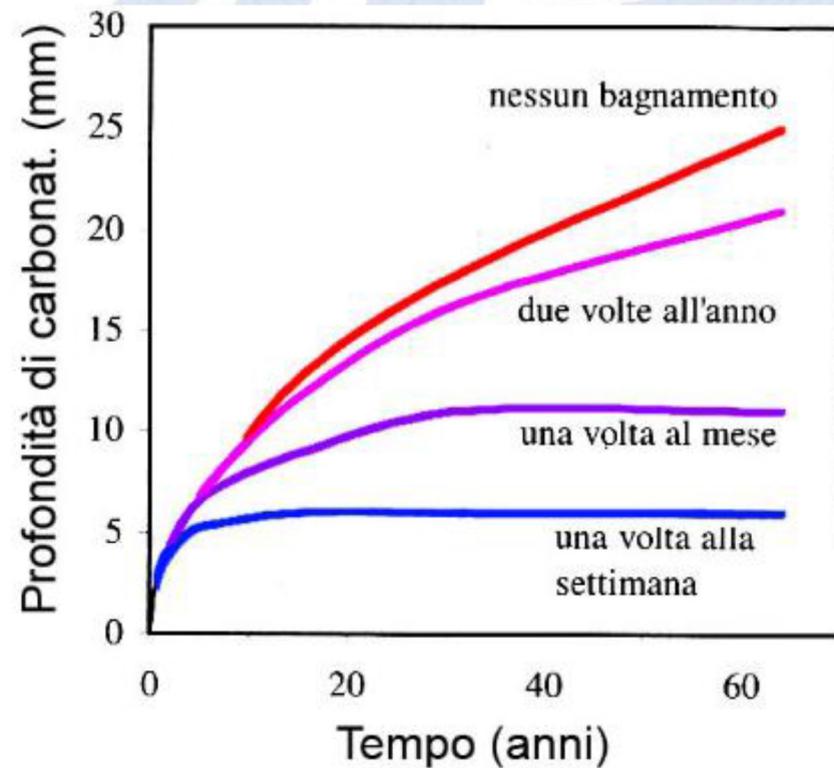
*Anche in assenza di cloruri, sotto al pH = 11.5 cessa l'effetto di protezione delle armaure dalla corrosione*

# influenza delle condizioni di esposizione e valutazione del tempo di innesco

lo spessore carbonatato cresce all'incirca con la radice quadrata del tempo

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

bagnatura del calcestruzzo



lo spessore **s** misurato in una struttura di età nota **t** permette di valutare **K**

## analisi della polvere di perforazione

in alternativa al carotaggio, per mettere a nudo il copriferro  
 si possono eseguire *scassi locali con scalpello, perforazione a tratti*  
 un metodo per estrarre con continuità un campione ordinato di polvere



# il kit per la misura della profondità di carbonatazione

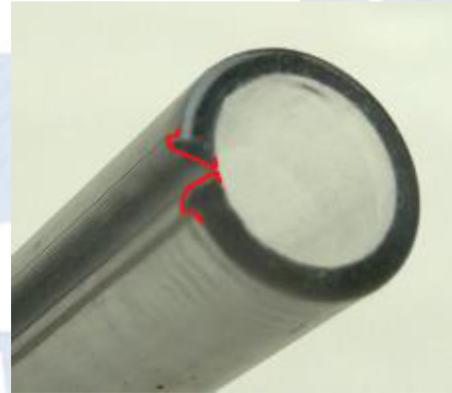
## CARBONTEST®

[www.carbontest.it](http://www.carbontest.it)

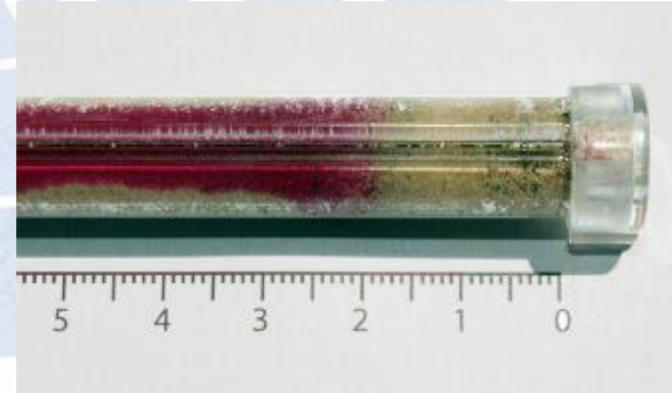
CARBONATION DIAGNOSIS



*testina di captazione*



*taglio a V  
(funge da imbuto)*



*provette ad alta trasparenza*



*set di provette*



*indicatore pH*



*contagocce*



*resina per  
ripristino*

## identificazione di processi di corrosione in atto

**Potenziale di cella** valuta la presenza di processi attivi  
necessita un contatto galvanico con l'armatura

**Risposta ad impulso galvanostatico** stima della velocità di corrosione  
non richiede collegamento galvanico con le armature

**Resistività elettrica** dipende da umidità, porosità, contenuto di ioni  
influisce sulla velocità di corrosione

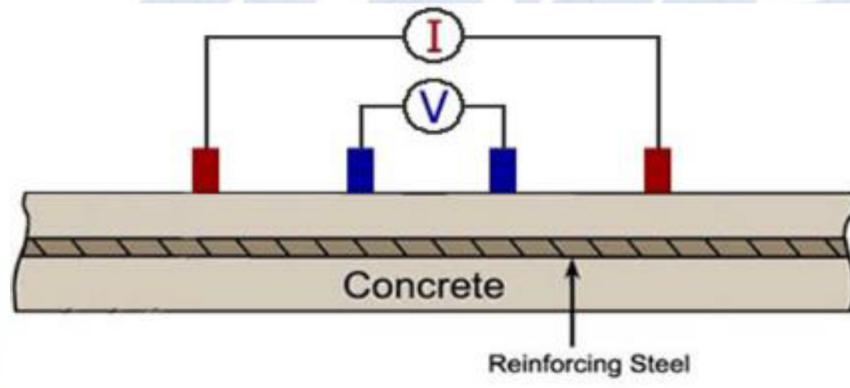


a causa dell'effetto schermo  
le guaine metalliche dei cavi  
di post-tensione vanificano  
l'impiego delle tecniche citate  
(occorre accedere ai cavi  
con una piccola demolizione)

# Connectionless Electrical Pulse Response Analysis

quadripolo di Wenner

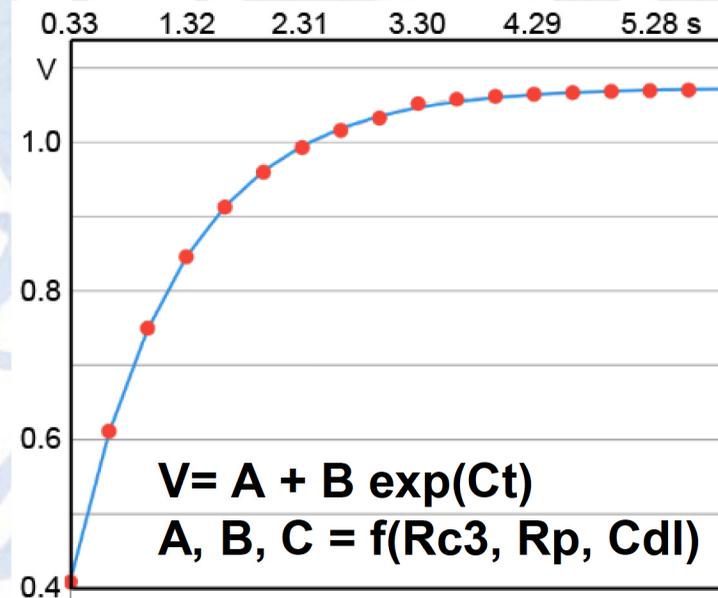
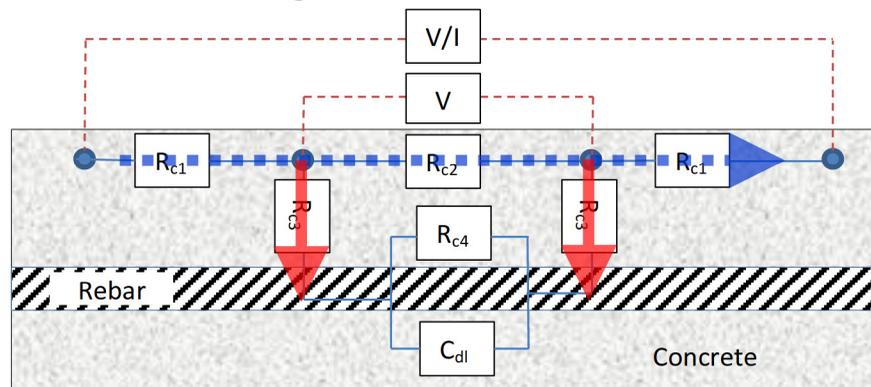
impulso di corrente (0.5-2mA / 2s) imposto tra i poli esterni



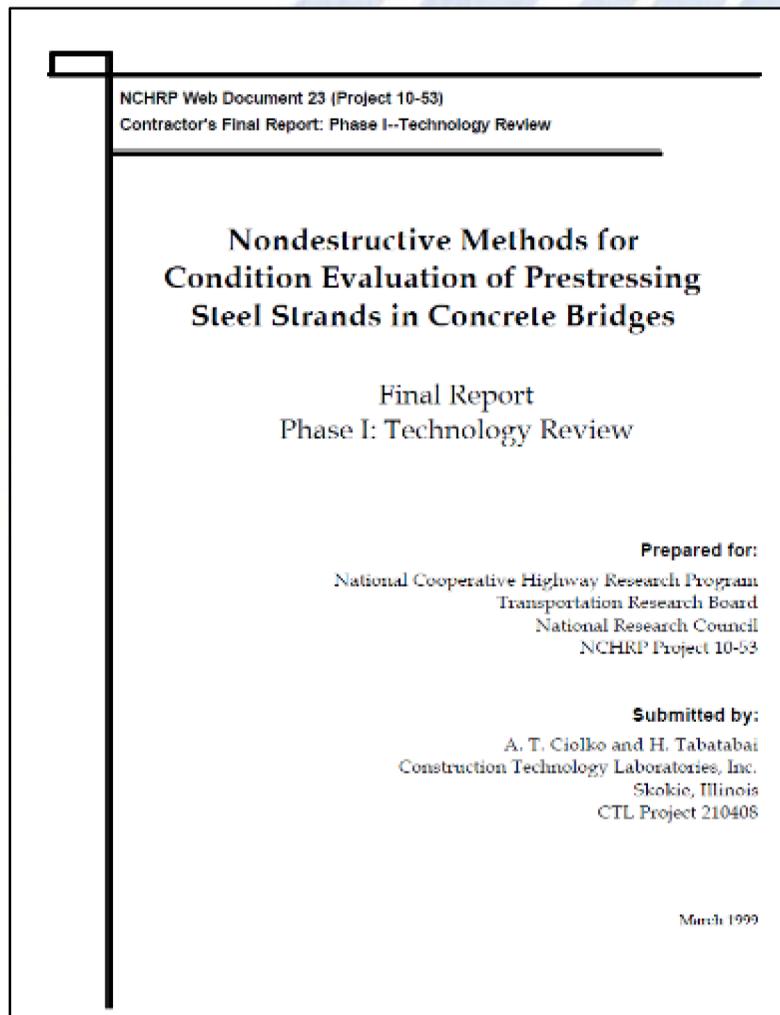
Andrew Fahim (Giatec Scientific Inc.)  
Aali R. Alizadeh (University of Ottawa)

circuito equivalente

corrente tra gli elettrodi e di polarizzazione



## indagini sulle condizioni dei cavi di precompressione



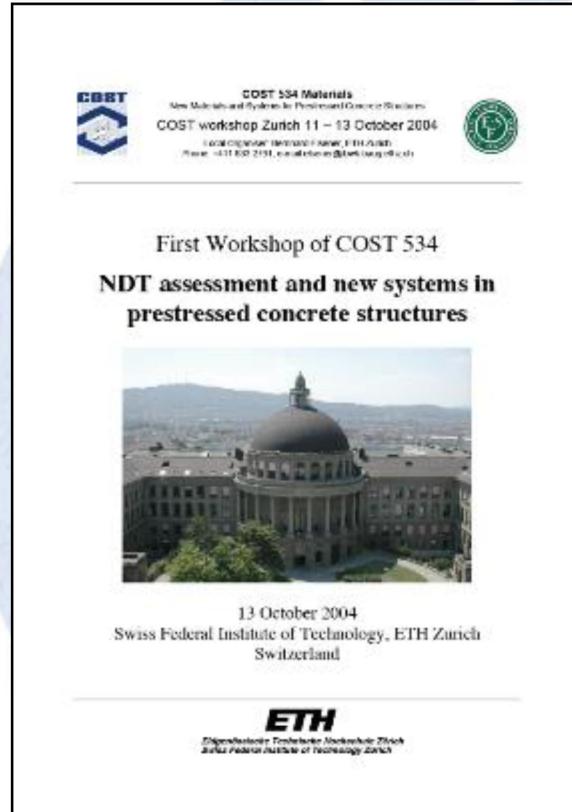
National Cooperative Highway Research Program  
NCHRP Project 10-53 - **1999**

1. Introduction
2. Condition Assessment Needs for Existing Prestressed Concrete Bridges
3. Approach to Technology Review
4. Review of Technology
5. Evaluation of NDT Technologies
6. Conclusions and Recommendations

*indagine ad ampio raggio  
sui metodi potenzialmente utili  
difficile riconoscere i metodi "maturi"  
per le applicazioni sul campo*

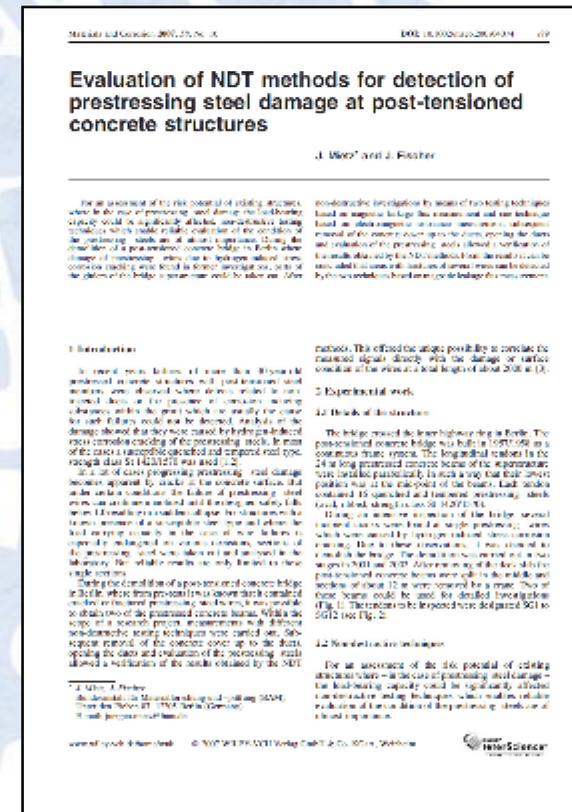
[http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_w23.pdf](http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w23.pdf)

# indagini sulle condizioni dei cavi di precompressione



- emissione acustica
- isolamento cavi

<https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/149534/eth-29093-01.pdf>



- magnetic flux leakage
- electromagnetic resonance

[https://www.researchgate.net/profile/Juergen\\_Mietz/research](https://www.researchgate.net/profile/Juergen_Mietz/research)

## indagini sulle condizioni dei cavi di precompressione

### Ricerca rotture dei fili

**ultrasuoni** identificazione vuoti e solo rotture significative (2-3 m dalla testata)

**emissione acustica** monitoraggio rottura dei trefoli

**riflettometria (ETDR)** riflessione brevi impulsi elettromagnetici ( $\approx 1\text{kV}$ , ns)

**flusso magnetico disperso (MFL e RMM)** magneti permanenti + sensori

**radiografia** 0.6m con raggi gamma, 1.2m con raggi X, sicurezza, peso sorgenti

**risonanza elettromagnetica** scansione fino a 100MHz con analizzatore di rete

### Stato tensionale dei fili

**diffrazione raggi X** misura deformazione (e quindi sollecitazione) dei trefoli

**scarico elastico dei fili** misura della presollecitazione (piccoli estensimetri)

**correnti indotte** stima dello stato tensionale dei trefoli

## considerazioni conclusive

**Le tecniche non distruttive di supporto alla diagnostica sulle infrastrutture hanno visto positivi sviluppi in tempi relativamente recenti:**

- *tomografie pulse-echo*
- *georadar ad elevata frequenza*
- *tecniche di rilievo e monitoraggio*

**Su alcuni aspetti mancano invece strumenti di facile utilizzo sul campo**

- *identificazione dei fenomeni corrosivi nelle guaine di post-tensione*
- *identificazione di rotture dei fili di acciaio armonico*

**In ambito nazionale vanno rafforzate didattica e ricerca sulle tecniche non distruttive nel settore Civile**

- *maggior attenzione a questi temi di ricerca*
- *corsi universitari e di aggiornamento professionale*
- *maggiori interazioni con industria, imprese, enti*