



FABRE – Consorzio di ricerca per la valutazione di ponti viadotti e altre strutture

*Ponti, viadotti e gallerie esistenti: ricerca, innovazione e applicazioni*

2- 4 Febbraio 2022, Lucca



# L'ispezione speciale di impalcati post-tesi mediante radiografie digitali

Fabrizio Gara<sup>1</sup>, Raoul Davide Innocenzi<sup>1</sup>, Vanni Nicoletti<sup>1</sup>, Giulia Pigliapoco<sup>2</sup>, Luigino Dezi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia*

<sup>2</sup>*Evolvea srl, Gruppo Filippetti, Ancona, Italia*

<sup>3</sup>*DSD Dezi Steel Design srl, Ancona, Italia*

**EVOLVEA**  
Your Partner in Business



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE



## Collasso di impalcati a cavi post-tesi in Italia

I cavi da precompressione nei ponti in c.a.p. rappresentano un elemento di fondamentale importanza per garantire la capacità portante dell'impalcato per carichi verticali e al contempo rappresentano la più importante vulnerabilità della struttura (soprattutto nel caso di cavi post-tesi)

Sono infatti imputabili a difetti e danni dei cavi di post-tensione alcuni dei crolli di ponti avvenuti in Italia nel recente passato

PONTE DI SANTO STEFANO (ME)



Anno di costruzione: 1956

Anno del crollo: 1999

Età: 43 anni

VIADOTTO PETRULLA (AG)



Anno di costruzione: primi '80

Anno del crollo: 2014

Età: circa 34 anni

VIADOTTO FOSSANO (CN)



Anno di costruzione: 1990

Anno del crollo: 2017

Età: 27 anni

- Tutti i crolli sono riconducibili a difetti nei cavi
- Non erano presenti segni di degrado evidenti
- Tutti i crolli sono avvenuti in assenza di traffico

## Radiografie digitali nell'ispezione dei ponti in c.a.p.

I difetti o la mancanza di iniezione, in presenza di umidità o di infiltrazioni d'acqua, possono causare l'inizio della corrosione, che è promossa nell'acciaio dei trefoli dal processo di trafilatura, che induce un elevato incrudimento del materiale, e dai livelli di tensione permanente



### Valutazione dell'efficienza residua dei cavi

- Le ispezioni visive e i test tradizionali non sono in grado di fornire una visione adeguata dello stato di salute dei cavi
- Le *Linee Guida per la valutazione della sicurezza dei ponti esistenti* prescrivono delle ispezioni speciali per i ponti in c.a.p. a cavi post-tesi a supporto del rilievo visivo di difettosità



### Radiografie digitali con raggi X

*Vantaggi*

- Immagini nitide e definite della parte interna di un elemento in cls
- Possibilità di indagare lo stato di conservazione dei cavi e delle armature lente

*Svantaggi*

- Costi elevati (strumentazione e personale addetto qualificato)
- Protocolli rigidi per garantire la sicurezza delle persone



*Trefoli corrosi del Viadotto Polcevera*



*Guaina rotta con trefoli corrosi nella piattabanda inferiore*

### Principi base sulle radiografie digitali

L'indagine radiografica è una tecnica diagnostica non distruttiva che consente di ottenere immagini bidimensionali delle porzioni delle strutture indagate.

Questa tecnica si basa sull'interazione della radiazione ionizzata con un corpo posto tra una sorgente emittente e un ricevitore, e l'elaborazione successiva dei dati attraverso un tablet con un software in grado di acquisire, elaborare e memorizzare le immagini in tempo reale

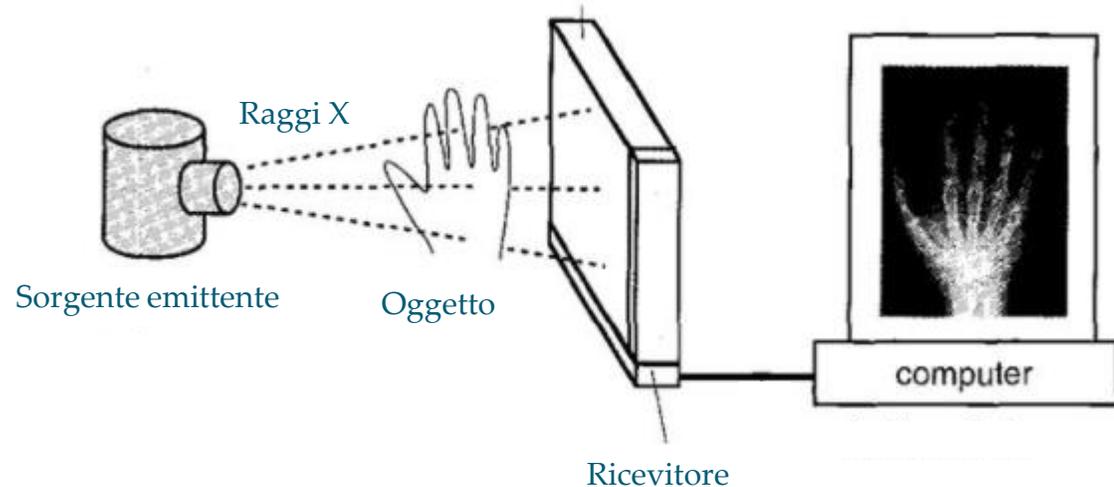


Immagine radiografica =  
immagine fedele del corpo ma "in negativo"



Macchie chiare =  
Elementi con densità alta

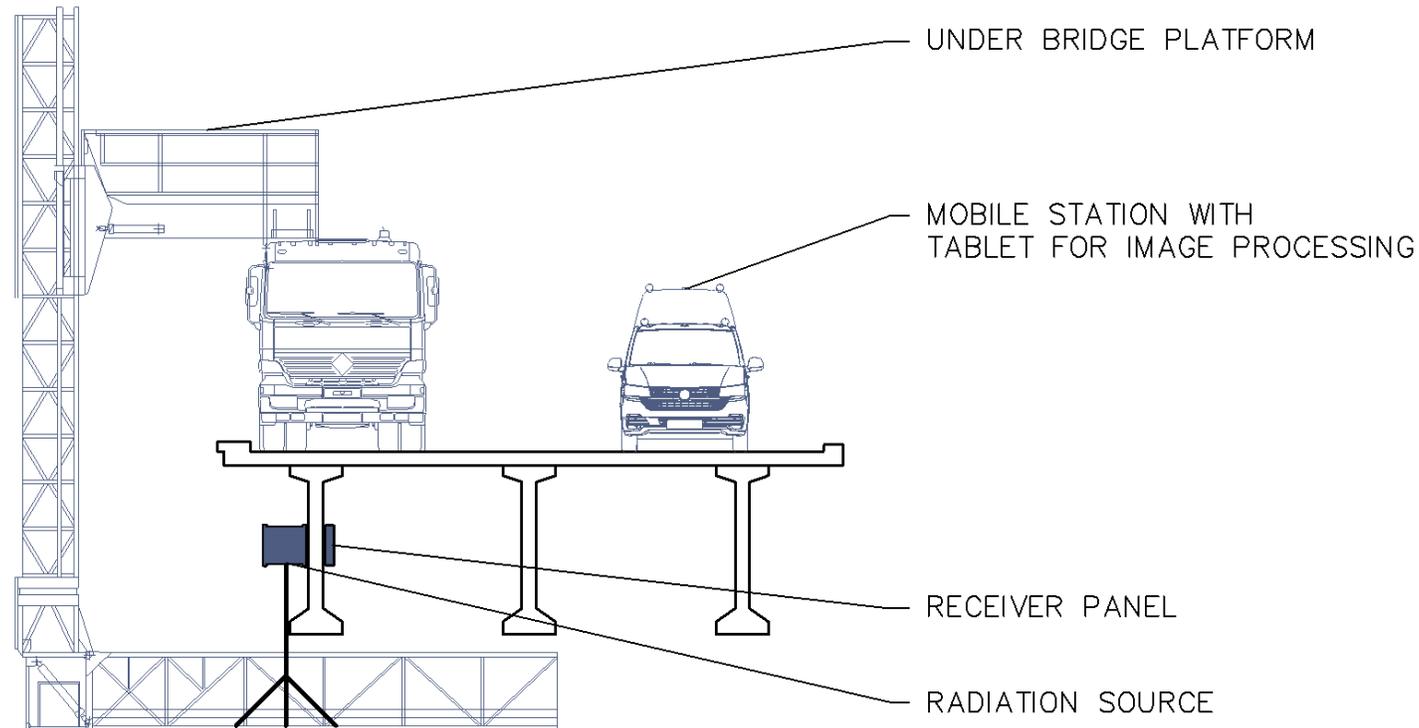
Macchie scure =  
Elementi con densità bassa (vuoti)

Parametri importanti:

- Spessore del corpo da attraversare
- Densità del materiale del corpo
- Potenza penetrante della radiazione
- Intensità spettrale dell'energia emessa

## Esecuzione

### By-bridge



L'esecuzione richiede speciali autorizzazioni per la tutela della salute delle persone e lo shot radiografico viene effettuato dopo essersi accertati che tutti gli operatori siano nella zona di sicurezza debitamente perimetrata

## Progettazione dei test radiografici

Il piano di indagine deve specificare:

- il numero di radiografie da effettuare
- la loro posizione (lungo il tracciato dei cavi)

La radiografia digitale fornisce risultati migliori nel caso di:

- **ponti a travata**

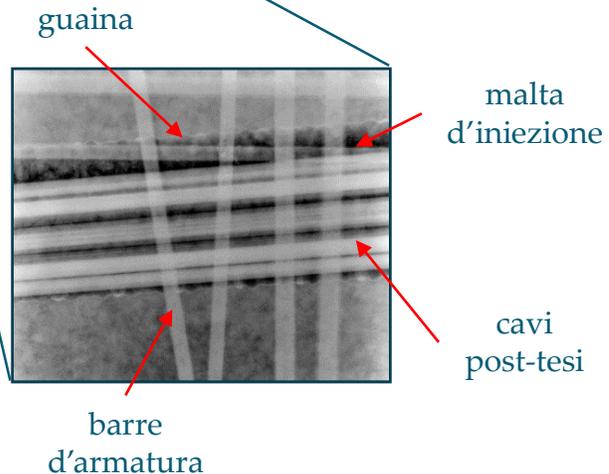
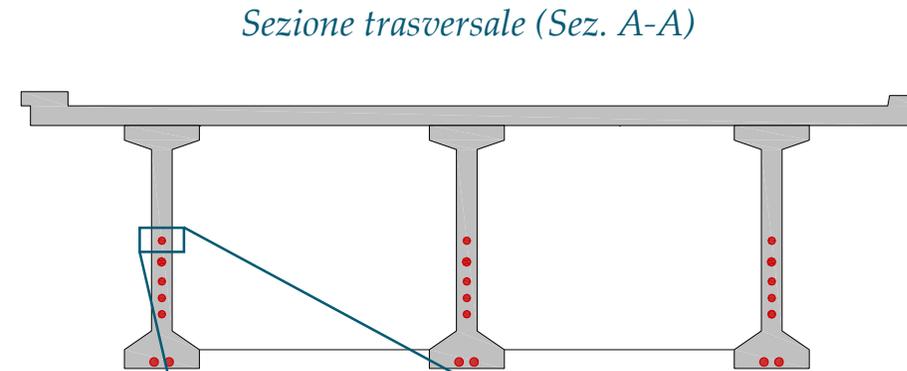
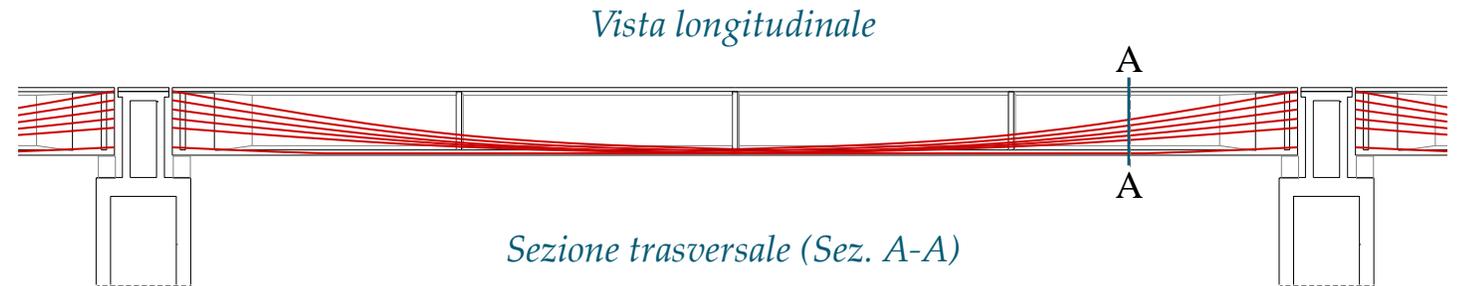


piccoli spessori delle anime contribuiscono a migliorare la qualità delle radiografie

- **cavi post-tesi**

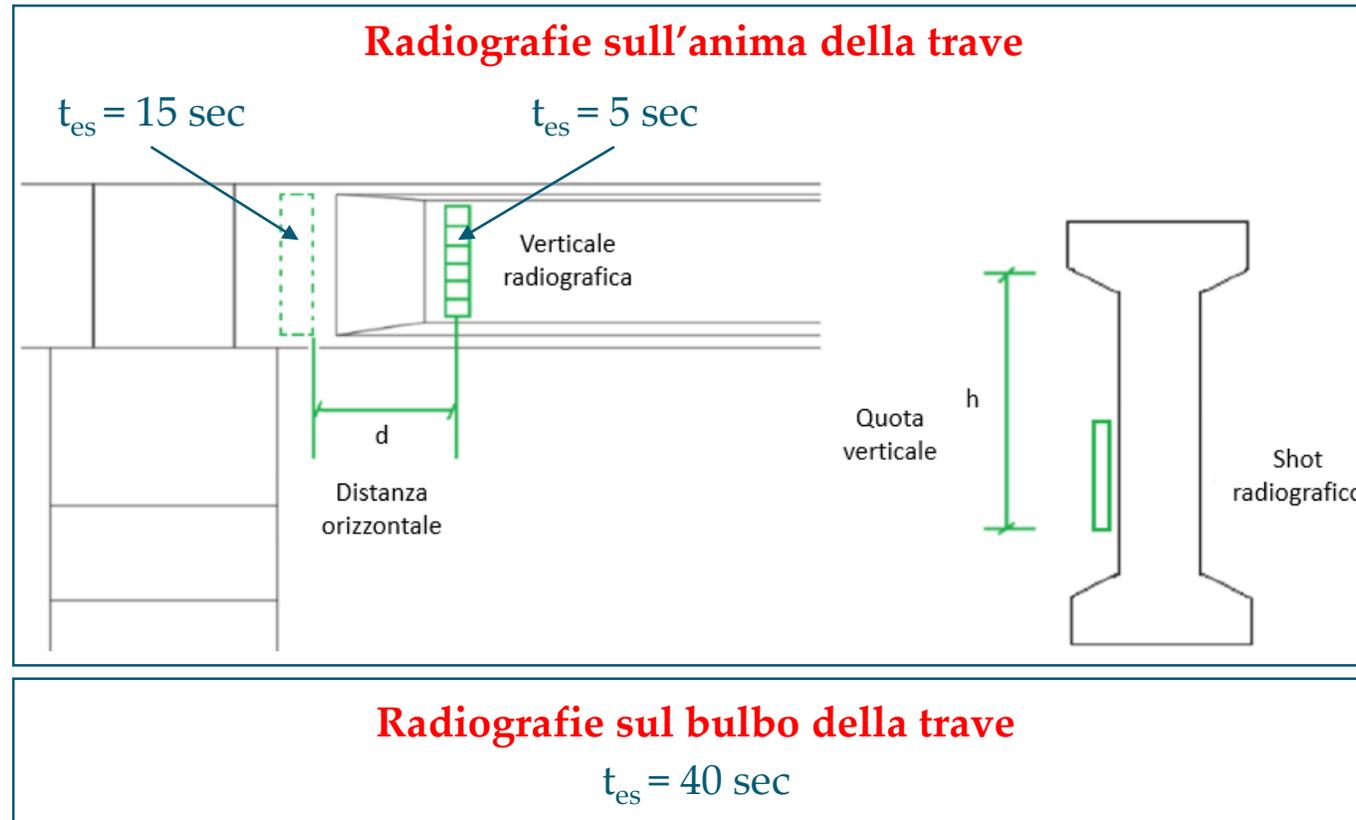


tracciati parabolici permettono di individuare e fotografare i singoli che cavi per lunga parte non si sovrappongono



## Tempo di esposizione ai raggi X

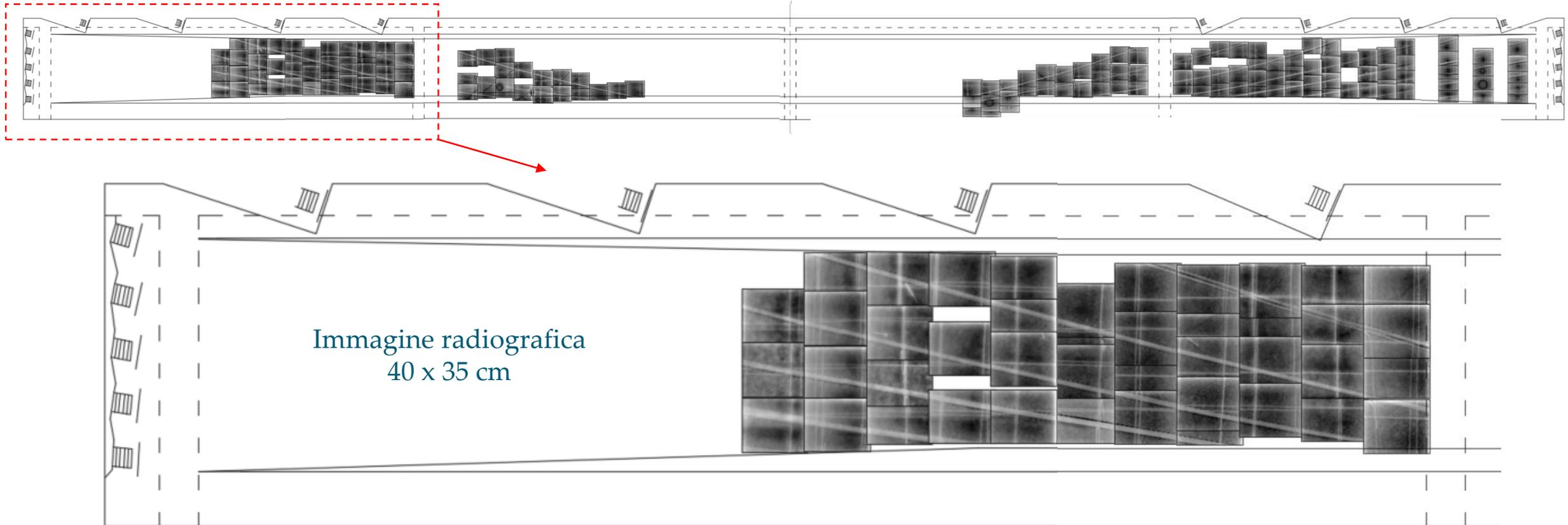
Il tempo di esposizione ( $t_{es}$ ) ai raggi X è direttamente proporzionale allo spessore attraversato



L'estensione della zona della trave fotografata è funzione delle dimensioni del pannello ricevente.

Affiancando più immagini con parziale sovrapposizione, si può ricostruire la fotografia dell'intera trave.

## Esempi di indagini radiografiche sull'anima della trave – Caso studio 1

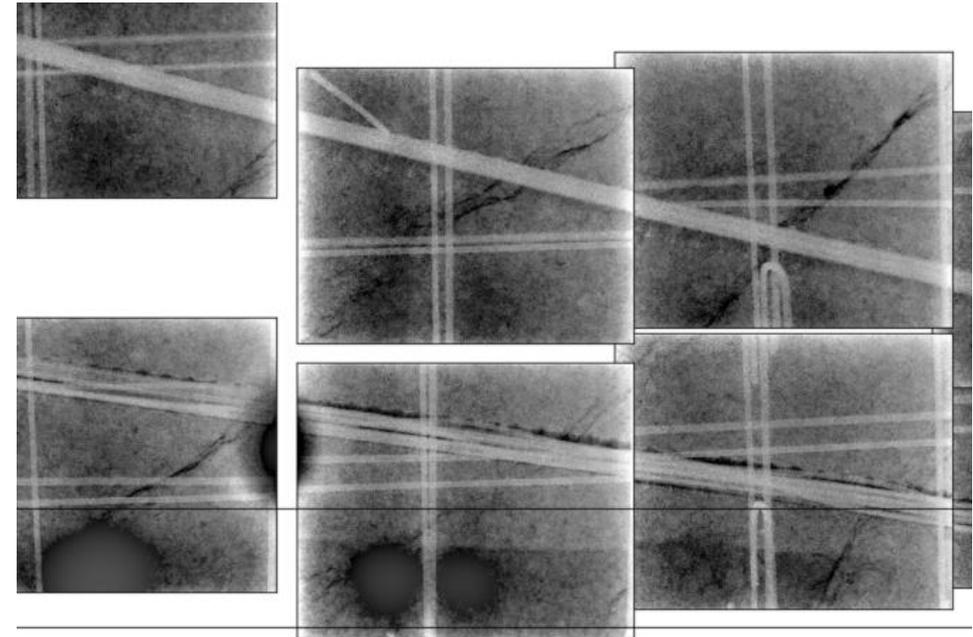
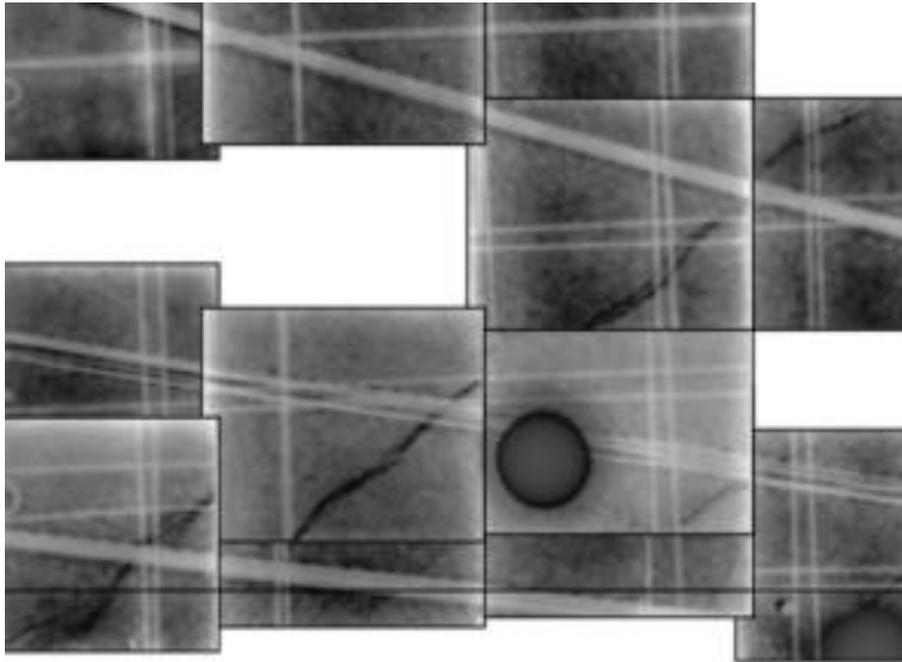


Nell'interpretazione dell'immagine ottenuta occorre tener presente che questa è il risultato della diffusione dei raggi emessi dalla sorgente verso il ricevitore, con una traiettoria all'incirca conica; ciò determina una distorsione dell'immagine e delle dimensioni degli oggetti in funzione della posizione reciproca della sorgente, dell'oggetto e del ricevitore.

## Caso studio 1 - indagini radiografiche sull'anima della trave

### Difetti del calcestruzzo

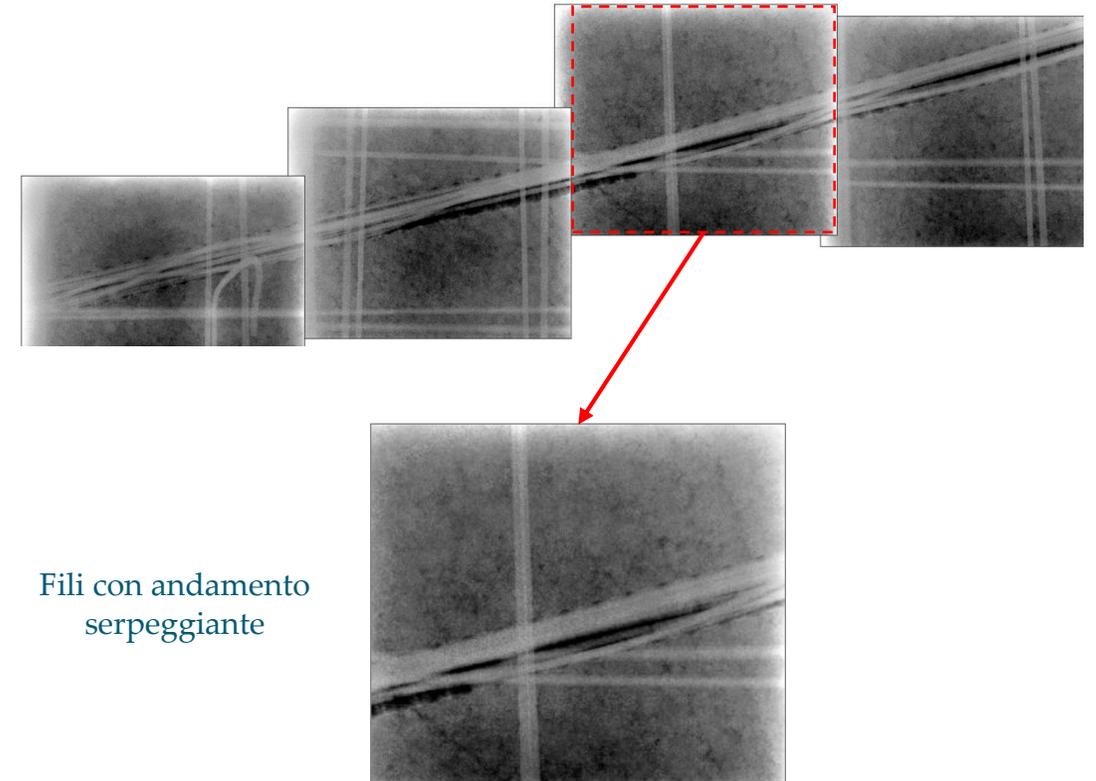
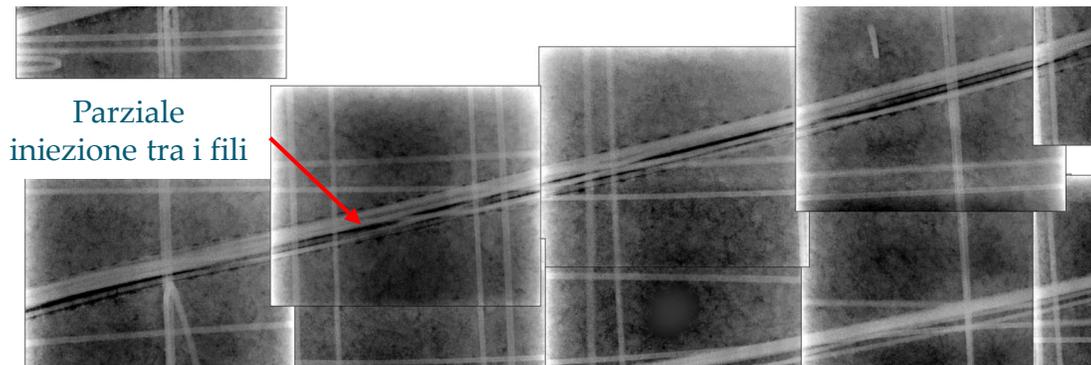
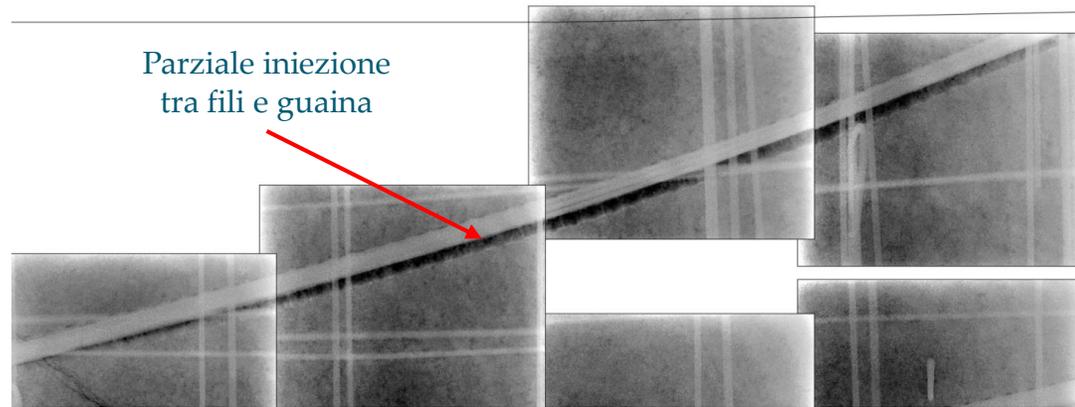
- fessure di una certa ampiezza
- nidi di ghiaia e vespai



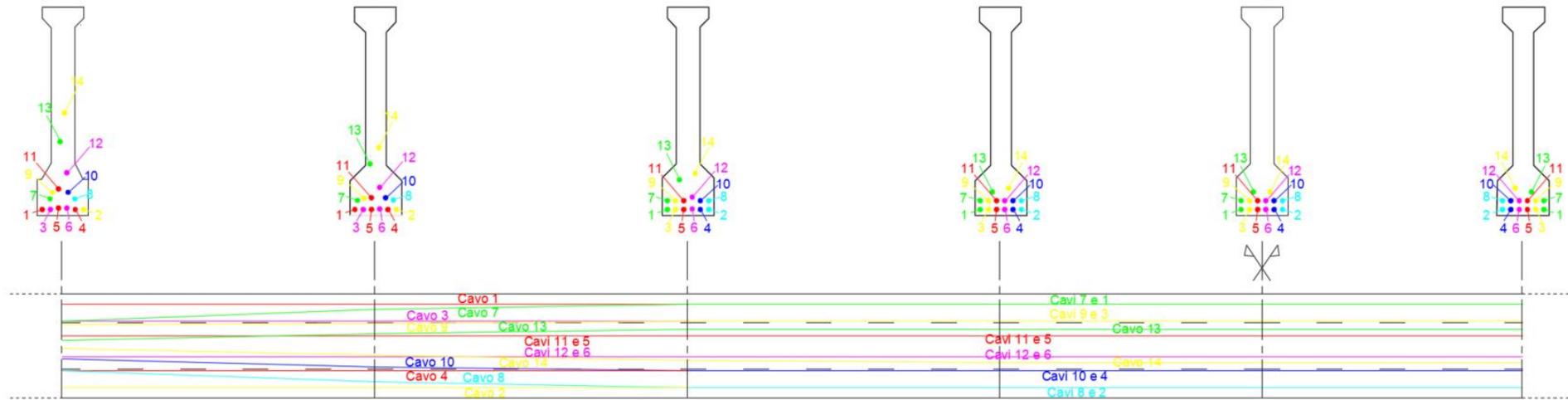
## Caso studio 1 - indagini radiografiche sull'anima della trave

### Difetti dei cavi

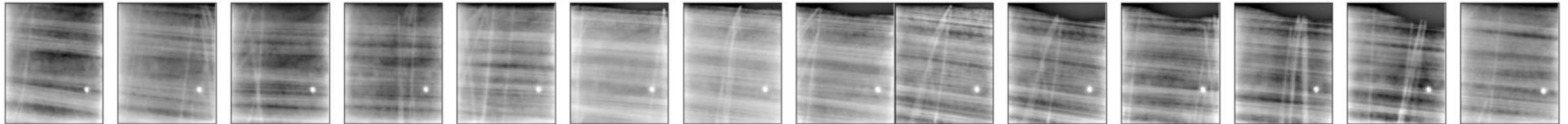
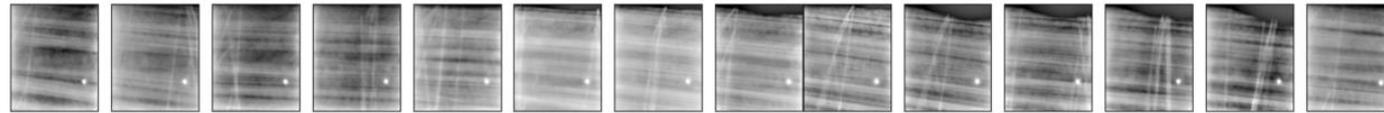
- iniezioni di malta parziali
- trefoli o fili con andamento serpeggiante (de-tensionamento)
- trefoli o fili spezzati
- corrosione dei cavi (solo se evidente diminuzione di sezione)



## Caso studio 1 - indagini radiografiche sul bulbo della trave



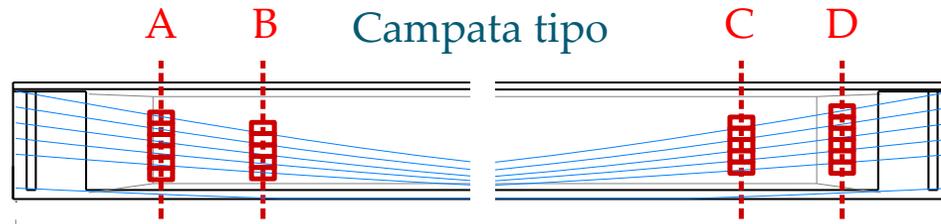
Radiografie in prossimità della mezzeria della trave



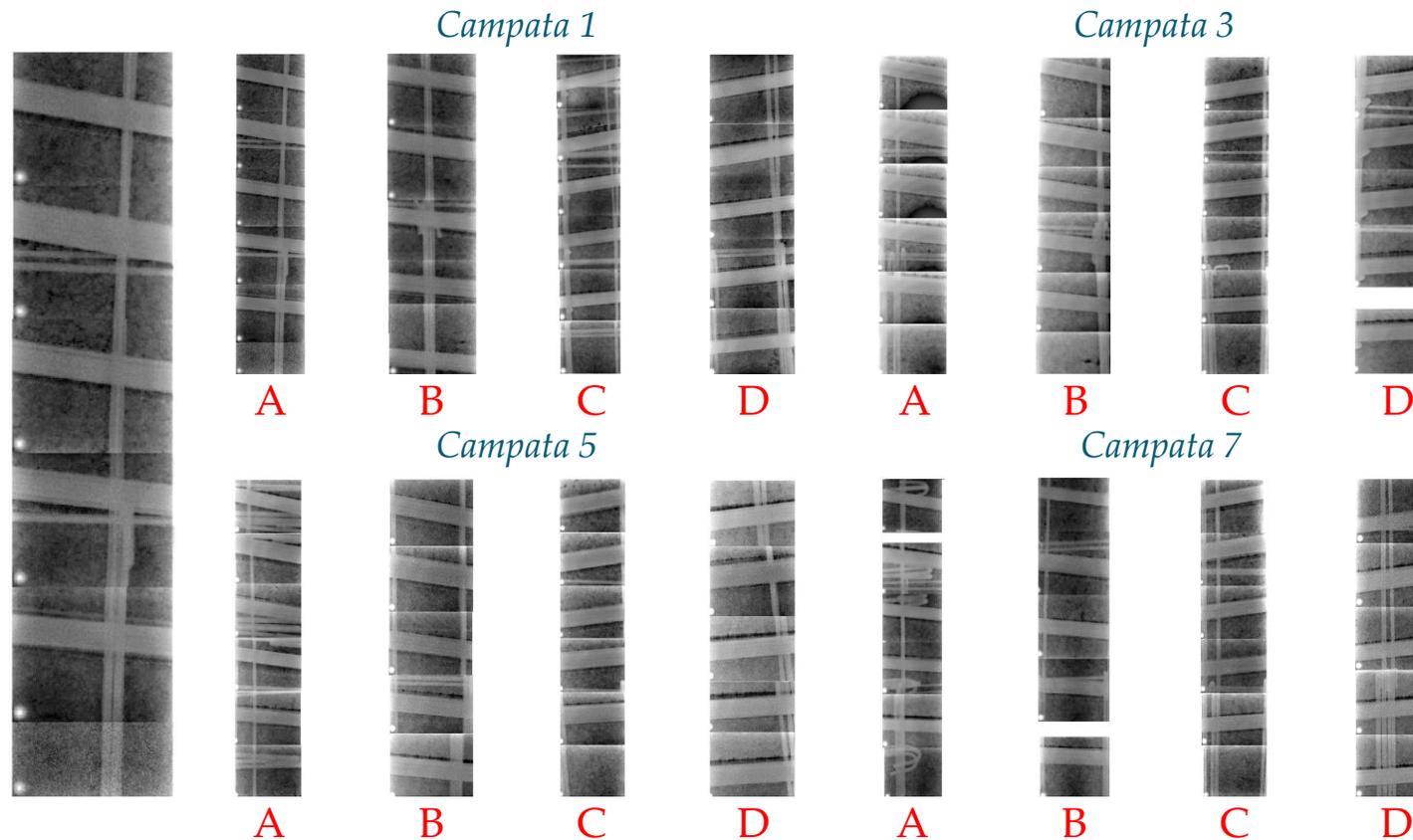
Difficoltà nel distinguere il tracciato dei vari cavi dovuta a:

- distorsione delle immagini dovuta all'esecuzione della prova
- elevati addensamento e sovrapposizione dei cavi

## Caso studio 2 - indagini radiografiche sull'anima della trave

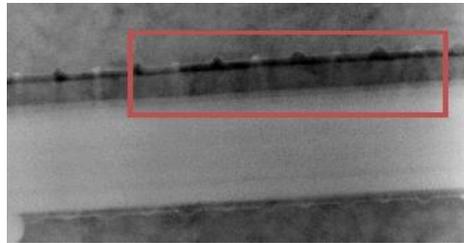
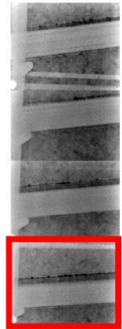


- 16 verticali in 4 posizioni
- 89 shot radiografici

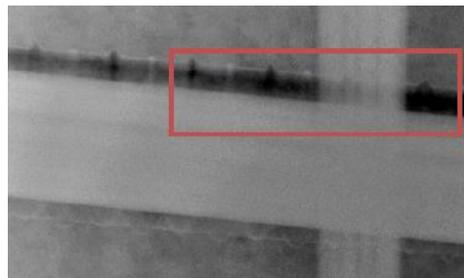
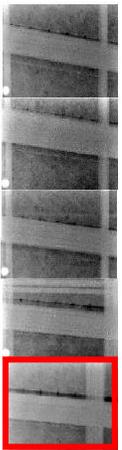
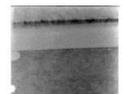


## Caso studio 2 - indagini radiografiche sull'anima della trave

### Shot radiografici



Zone di colore scuro tra la boiaccia di iniezione e la guaina protettiva dei cavi



Anomalie cromatiche tra l'interno e l'esterno delle guaine di protezione dei cavi

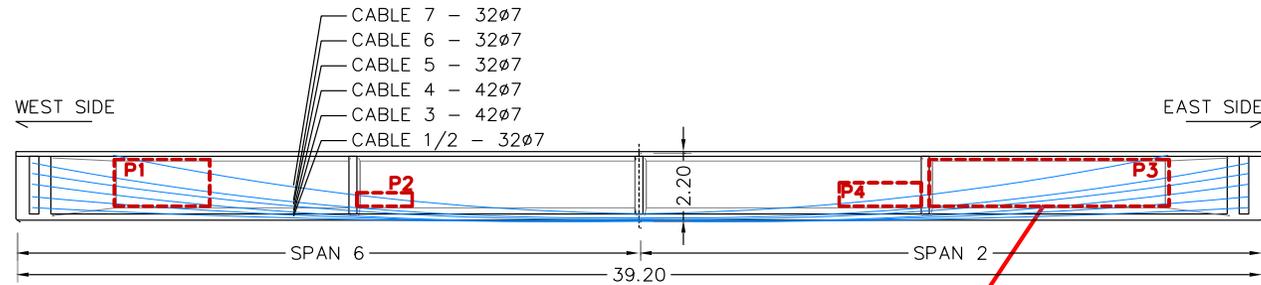
### Endoscopie



### Considerazioni

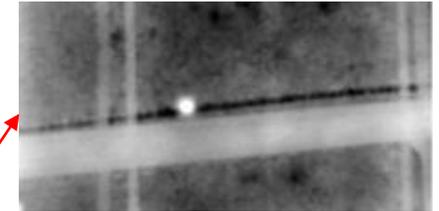
- Iniezione con malta di scarsa qualità
- Cavi in buon stato di conservazione

## Caso studio 3 - indagini radiografiche sull'anima della trave



- 4 aree della trave
- 117 shot radiografici

### Shot radiografico



### Endoscopia



Cavo non ben definito - fili separati?

Vespai nel cls?

Presenze di vuoti all'interno della guaina?

### Considerazioni

- Dalla radiografia sembrerebbero esserci dei vuoti all'interno della guaina dovuti ad una non corretta iniezione
- L'endoscopia ha confermato che la zona tra i fili e l'estremità superiore della guaina è vuota.

## Considerazioni conclusive

- ✓ La metodologia di prova basata sulle appare in grado di fornire indicazioni importanti sullo stato di salute delle travi in c.a.p. radiografie digitali, dimostrando un' **elevata affidabilità nell'identificazione dei difetti**
- ✓ L'**interpretazione** delle radiografie risulta relativamente **facile sulle anime delle travi in c.a.p.** con sezione a I (spessori contenuti e tracciati dei cavi ben distinti)
- ✓ L'interpretazione delle radiografie risulta invece **abbastanza complicata sulle testate e sul bulbo** delle travi in c.a.p. con sezione a I (spessori elevati e tracciati dei cavi che si sovrappongono)
- ✓ La Radiografia Digitale è ancora una metodologia di prova per le strutture in via di studio e di sviluppo, ma ha già suscitato **notevole interesse per le applicazioni in ponti esistenti**
- ✓ Risulta evidente la **necessità di ulteriori campagne di indagine** che portino a coprire una **più ampia casistica strutturale e di possibili danni**, al fine di valutare in modo più approfondito l'accuratezza nei risultati e definire una procedura standard di prova



FABRE – Consorzio di ricerca per la valutazione di ponti viadotti e altre strutture

*Ponti, viadotti e gallerie esistenti: ricerca, innovazione e applicazioni*

2- 4 Febbraio 2022, Lucca



## Grazie per l'attenzione

Fabrizio Gara<sup>1</sup>, Raoul Davide Innocenzi<sup>1</sup>, Vanni Nicoletti<sup>1</sup>, Giulia Pigliapoco<sup>2</sup>, Luigino Dezi<sup>3</sup>

*<sup>1</sup>Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italia*

*<sup>2</sup>Eolvea srl, Gruppo Filippetti, Ancona, Italia*

*<sup>3</sup>DSD Dezi Steel Design srl, Ancona, Italia*



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

