

Conoscere per proteggere.
Tecnologie digitali e ricerca per la resilienza del patrimonio culturale e dei territori

3 giugno 2026
Sala Magna | Rocca Malatestiana,
Via Rocca 42, Verucchio (Rimini)

Loris Vincenzi

DIEF - Università di Modena e Reggio Emilia

Organizzato da:



Con il Patrocinio di:



Comune di Verucchio



Comune di Tredozio



CONSIGLIO NAZIONALE
DEGLI ARCHITETTI
PIANIFICATORI
PAESAGGISTI
E CONSERVATORI

In collaborazione con Ordine degli
Architetti P.P.C della provincia di Rimini:



ordine degli architetti,
pianificatori, paesaggisti e conservatori
della provincia di Rimini

Partners:



Centro Interdipartimentale di Ricerca
e per i servizi nel settore delle
Costruzioni e del Territorio - CRICT



RETE ALTA TECNOLOGIA
EMILIA-ROMAGNA
HIGH TECHNOLOGY NETWORK



SERVIZIO SANITARIO REGIONALE
EMILIA-ROMAGNA
Aziende Unita Sanitarie Locali della Romagna

Media Partner:



Progetti cofinanziati da Fondo Europeo Regionale:



T.3 Tecniche di monitoraggio on-site e metodologie di analisi dati

Sperimentazione di sistemi di monitoraggio accelerometrici tradizionali (piezoelettrici) e basati su sensori MEMS, e sensori di deformazioni FBG, per confrontarne le capacità di identificazione e sviluppare specifiche tecniche di analisi dati.

Sperimentazione di sistemi di monitoraggio con tecnologie innovative – analisi di video per il monitoraggio strutturale.

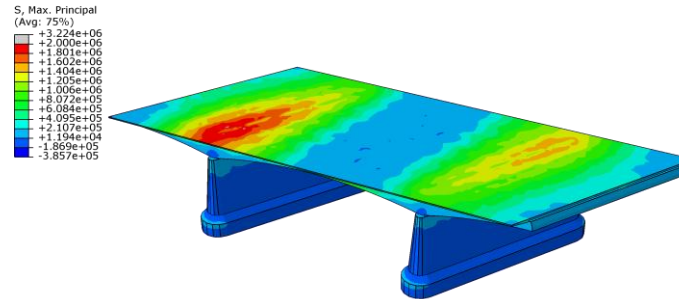
Model updating per digital twin. In sinergia con WP5 saranno implementate **metodologie di model-updating**, ovvero tecniche per aggiornare modelli digitali dei ponti in funzione delle informazioni ottenute dal monitoraggio.

Test di laboratorio e **Test in ambiente operativo**

Progettazione e installazione, su **un ponte ferroviario** e **un ponte stradale**, di sistemi di monitoraggio basati sull'impiego di MEMS. Analisi della capacità di identificare le caratteristiche dinamiche, anche in relazione alla loro stabilità nel tempo.

Motivazioni:

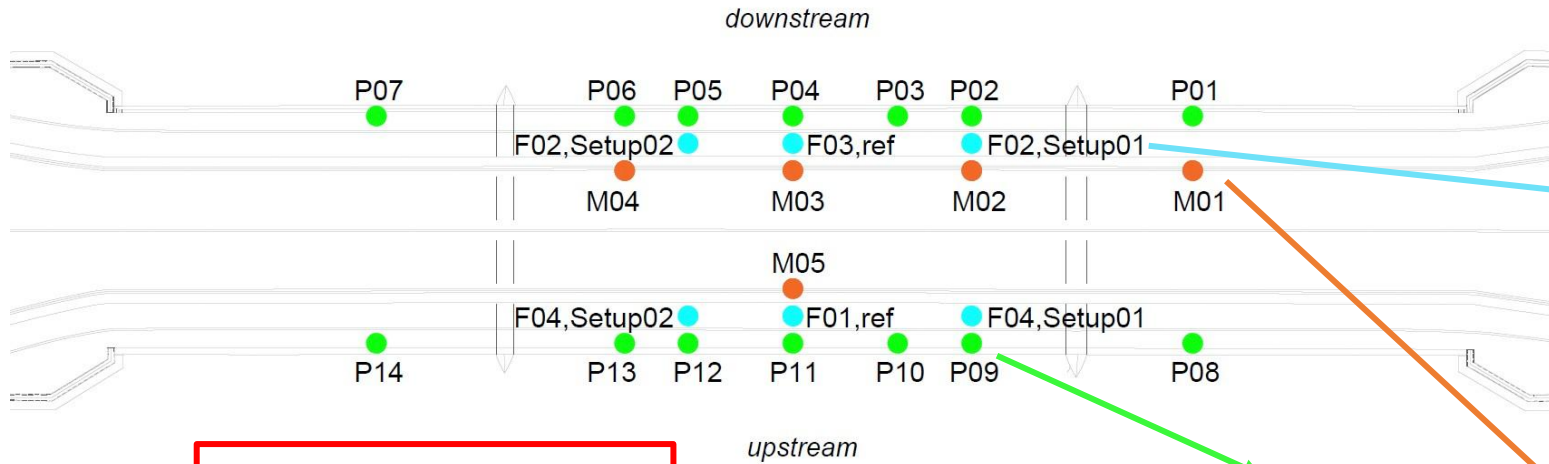
1. Misura della «**salute**» della struttura (variazione delle proprietà nel tempo)
2. Valutazione del comportamento in **condizioni ordinarie ed eccezionali**
3. **Calibrazione di modelli** per la simulazione di eventi/condizioni non riproducibili sperimentalmente



- Fornire supporto ai **processi decisionali volti a pianificare in modo ottimale gli interventi di manutenzione** (elevato rapporto costi/benefici).
- Migliorare la conoscenza della struttura** riducendo le incertezze derivanti da una quantità insufficiente di dati disponibili (capacità, domanda, fattori ambientali).



- Anno di costruzione: **1950**
- Lunghezza complessiva di **72 m (21+30+21)**
- Impalcato formato da **5 travi** di altezze variabili, **16 traversi** e una **soletta** di spessore 23 cm
- **Interventi urgenti di riparazione** nel 2017 (appoggi, selle Gerber e travi laterali)
- Ulteriori e recenti ispezioni hanno evidenziato **deterioramento delle travi centrali, delle selle e della soletta**



2 prove dinamiche:

- Luglio 2024
- Dicembre 2024

Utilizzo di differenti sistemi di monitoraggio:

- 14 sensori **Piezoelétrici**
- 5 sensori **MEMS** (Builti)
- 4 sensori a **fibra ottica** (2 setup)

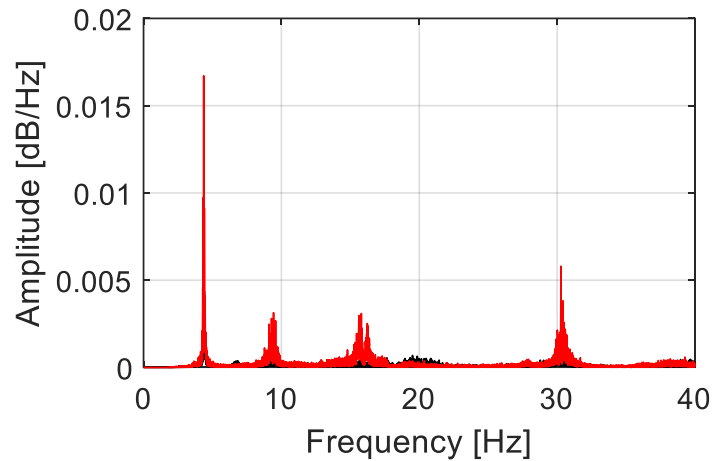
Utilizzo di differenti sistemi di monitoraggio:

- 14 sensori **Piezoelétrici**
- 5 sensori **MEMS** (Builti)
- 4 sensori a **fibra ottica** (2 setup)

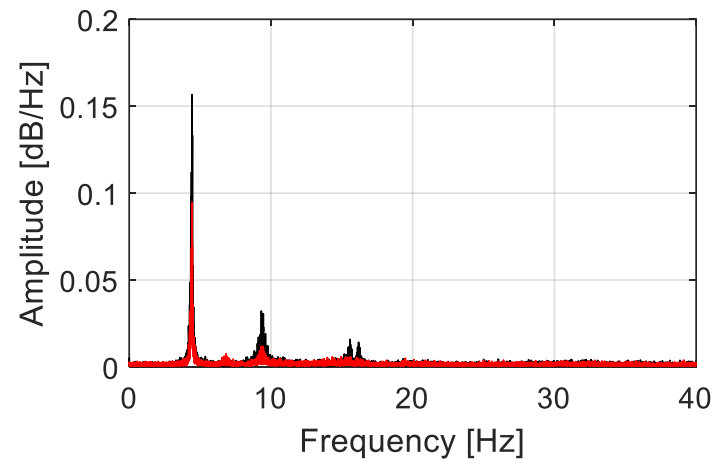
Sensore	Piezo	MEMS	FBG
RMS [mg]	0.08	0.44	0.37

- Mezzeria della campata centrale
- Un quarto della campata centrale

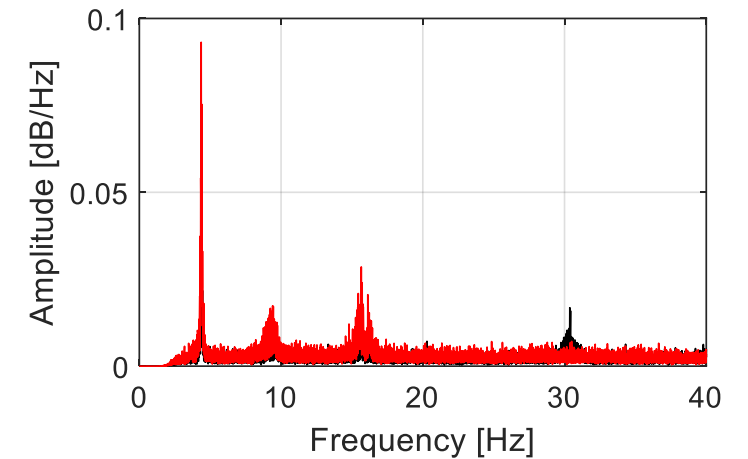
Piezoelétrici



MEMS

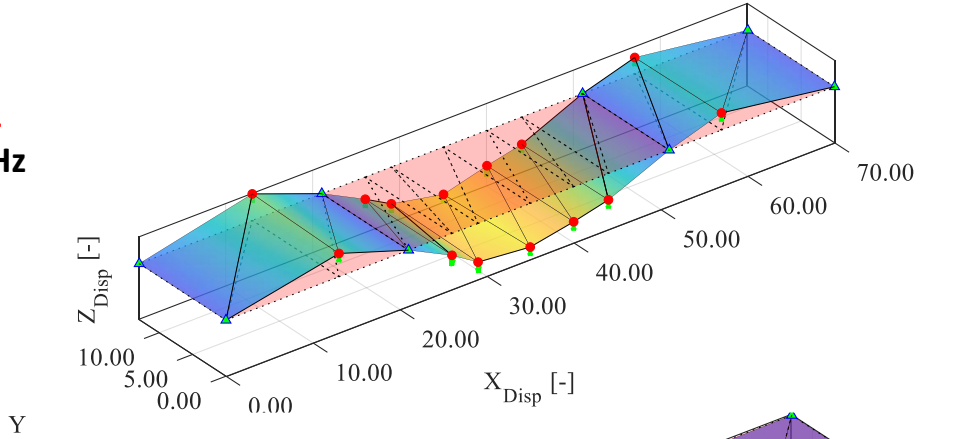


FBG

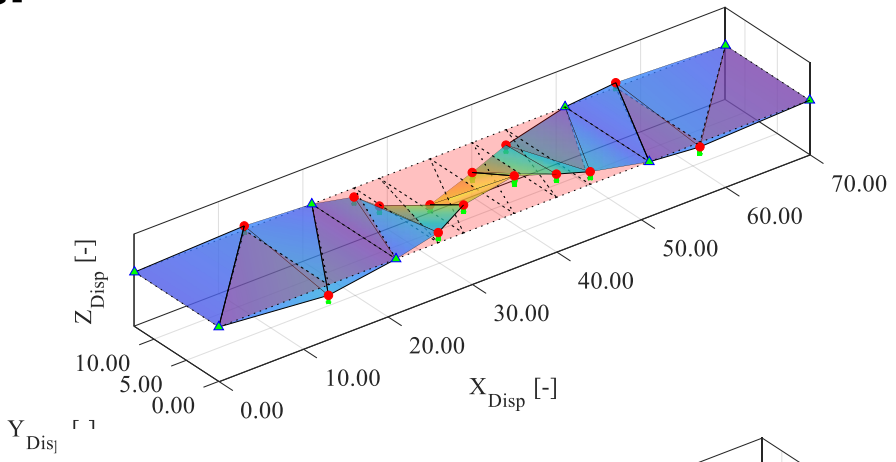


Sensori Piezoelettrici

Modo 1
f=4,19 Hz

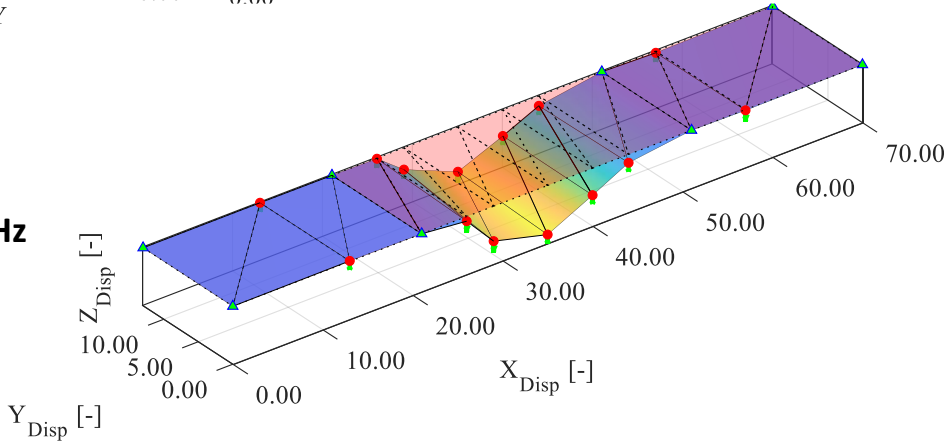


Modo 2
f=8,98 Hz

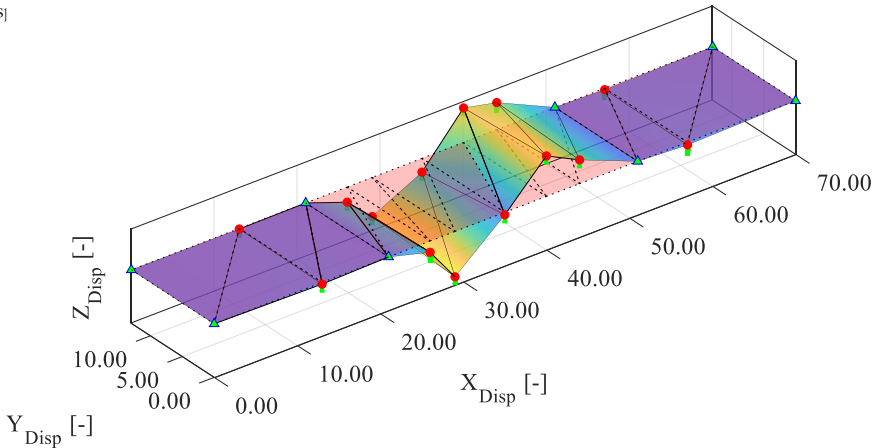


Prova
07/24

Modo 3
f=14.84 Hz



Modo 4
f=26,70 Hz



Confronto tra sensori – prova 12/24

Frequenze (Hz) dei modi identificati

Modo N.	Piezo	MEMS	FBG
1	4,37	4,37	4,38
2	9,27	9,35	9,31
3	15,70	16,15	16,06
4	30,27	-	-

Errore relativo (%) rispetto alla frequenza di riferimento (sensori piezoelettrici)

Modo N.	MEMS	FBG
1	0,00	0,23
2	0,86	0,43
3	2,87	2,29



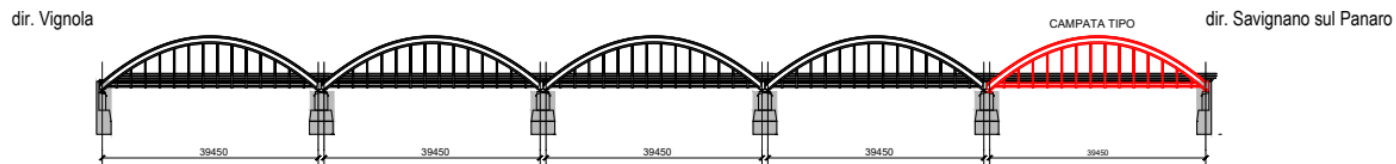
MAC (-) rispetto al modo di riferimento (sensori piezoelettrici)

Modo N.	MEMS	FBG
1	0,96	0,97
2	0,83	0,83
3	0,84	0,82



- Ponte in **calcestruzzo armato** con 5 campate da 39.45 m ognuna e caratterizzate dallo **stesso schema statico**;
- Struttura portante ad **arco superiore con pendini** e un unico impalcato;
- **2 archi** a spinta orizzontale eliminata e collegati tra loro in sommità da 8 traversi;
- **Impalcato** realizzato da **travi, traversi** e una **soletta continua**.

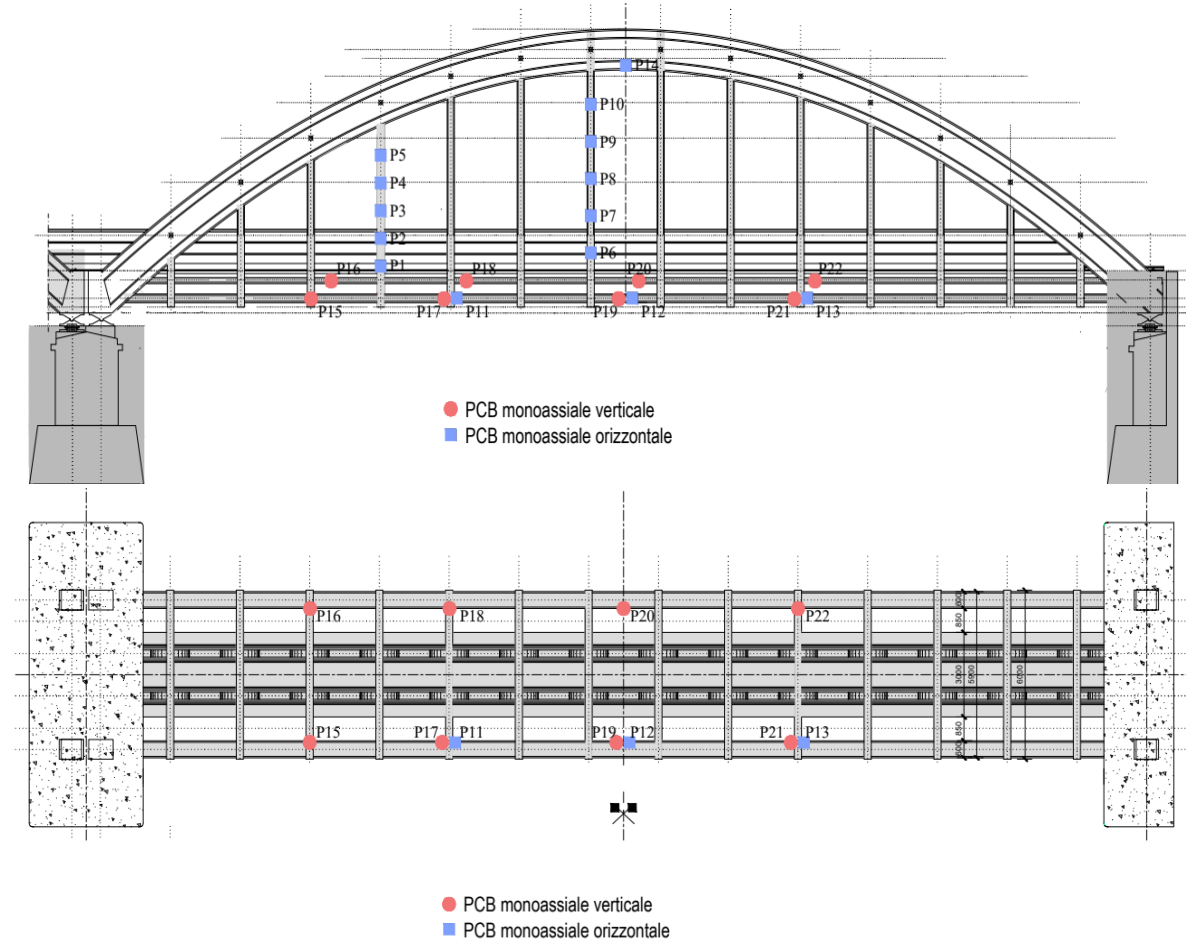
CAMPATA TIPO - PROSPETTO LONGITUDINALE

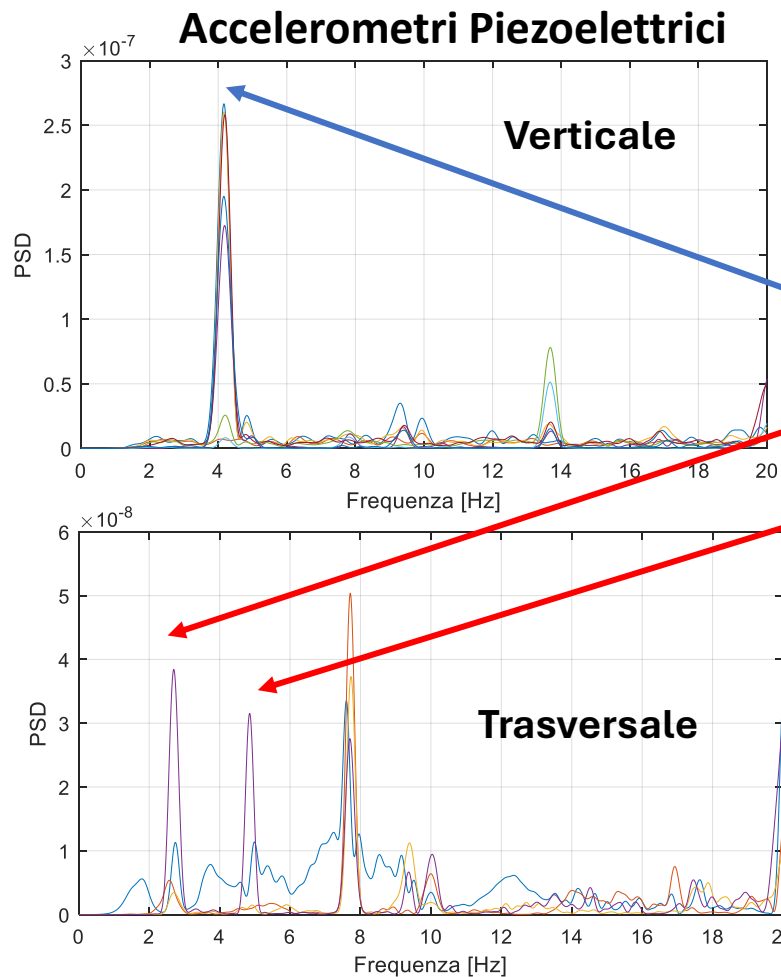




Prova dinamica e monitoraggio per 24h

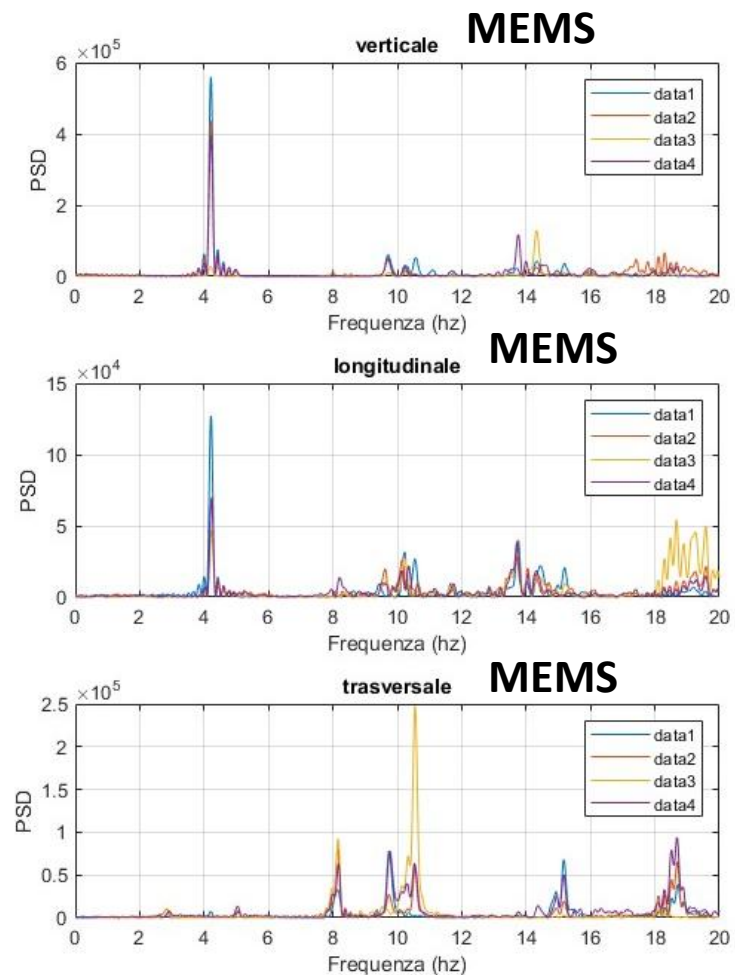
- 16 accelerometri Piezoelettrici
- 4 accelerometri MEMS (Builti)
- 4 accelerometri MEMS (MOSI)



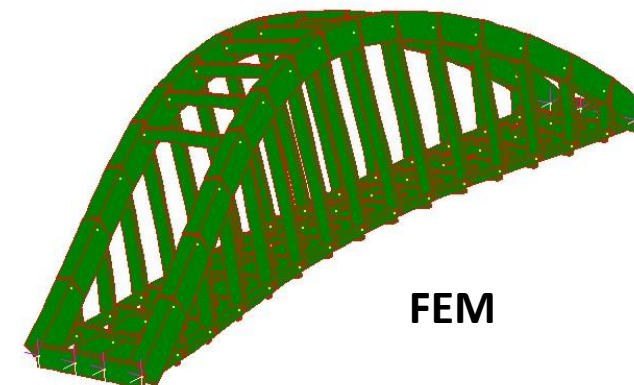
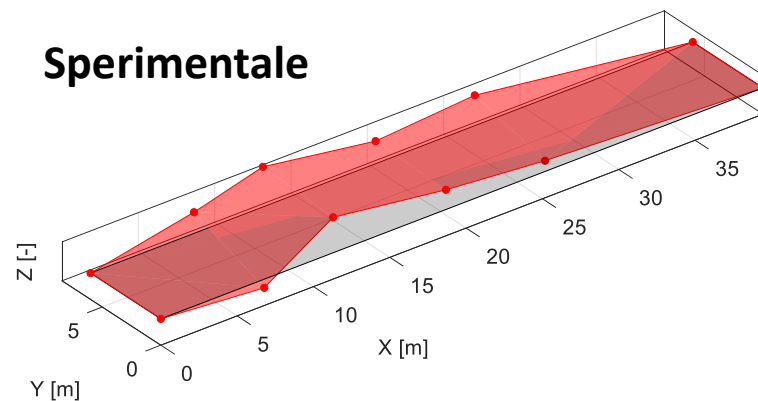


Modi sperimentali

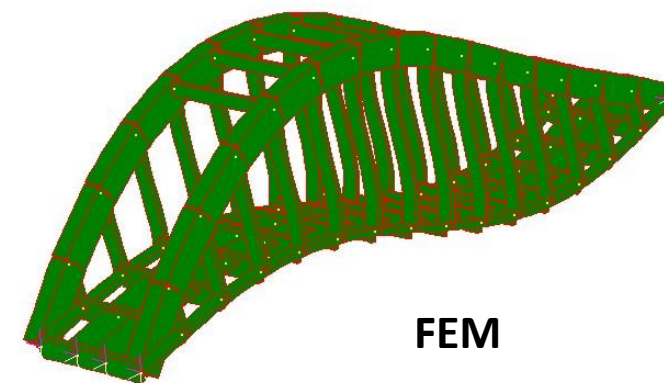
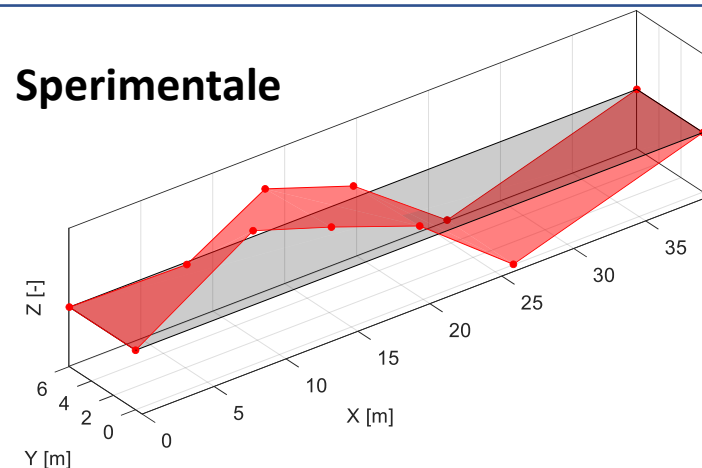
Modo N.	f (Hz)	Tipologia
1	2,70	Laterale
2	4,19	Verticale
3	4,88	Torsionale
4	7,69	Torsionale - Laterale
5	9,33	Torsionale
6	13,66	Torsionale



Modo 1:
laterale,
frequenza 2.70
Hz



Modo 2:
verticale,
frequenza 4,19 Hz



T.3 Tecniche di monitoraggio on-site e metodologie di analisi dati

Sperimentazione di sistemi di monitoraggio accelerometrici tradizionali (piezoelettrici) e basati su sensori MEMS, e sensori di deformazioni FBG, per confrontarne le capacità di identificazione e sviluppare specifiche tecniche di analisi dati.

Sperimentazione di sistemi di monitoraggio con tecnologie innovative – analisi di video per il monitoraggio strutturale.

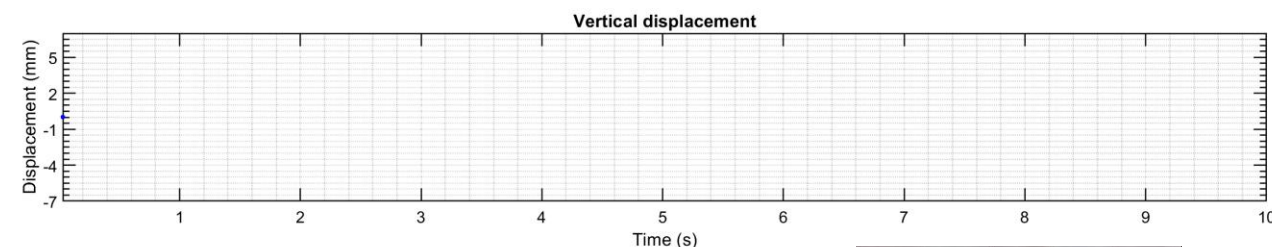
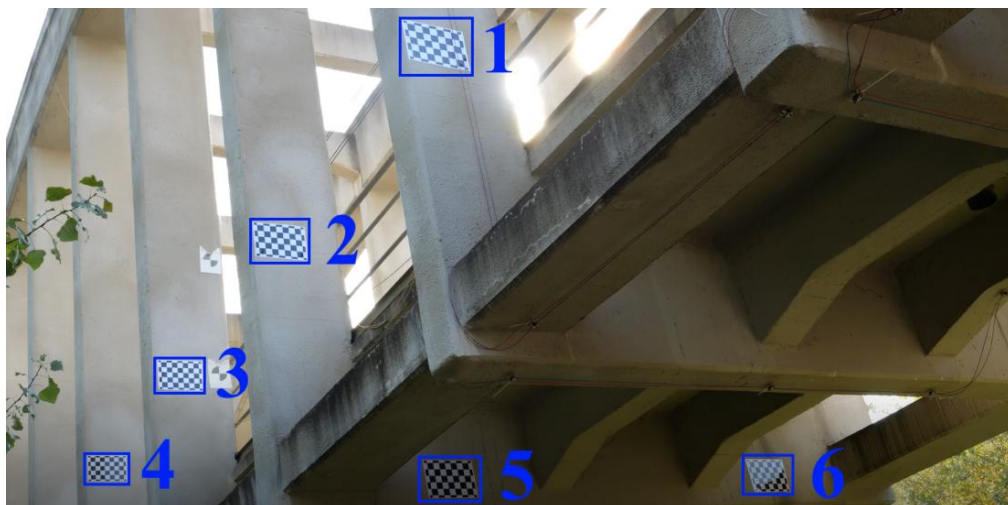
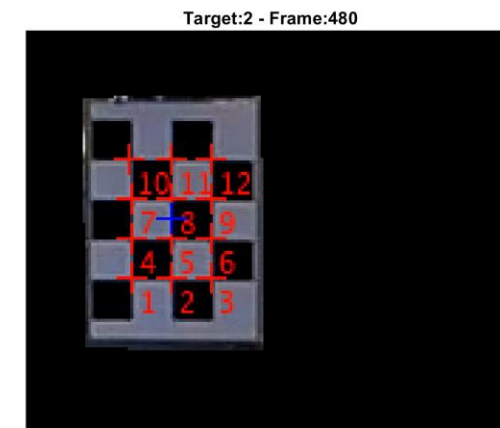
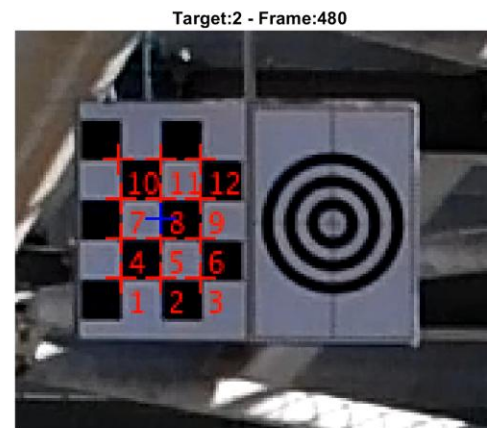
Model updating per digital twin. In sinergia con WP5 saranno implementate **metodologie di model-updating**, ovvero tecniche per aggiornare modelli digitali dei ponti in funzione delle informazioni ottenute dal monitoraggio.

Test di laboratorio e **Test in ambiente operativo**

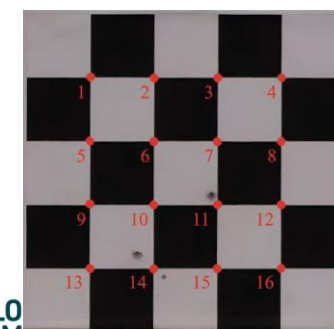
Progettazione e installazione, su **un ponte ferroviario** e **un ponte stradale**, di sistemi di monitoraggio basati sull'impiego di MEMS. Analisi della capacità di identificare le caratteristiche dinamiche, anche in relazione alla loro stabilità nel tempo.

Consiste nel seguire punti riconosciuti su un'immagine per valutare lo spostamento della struttura – variazione di posizione dello stesso target in immagini successive

Test sul ponte a Vignola-Savignano con uso di mire a scacchiera per migliorare la precisione



Precisione inferiore al pixel (circa 0,1-0,2 pixel)
 Accuratezza nello spostamento in funzione della dimensione della mira rispetto alla risoluzione della fotocamera

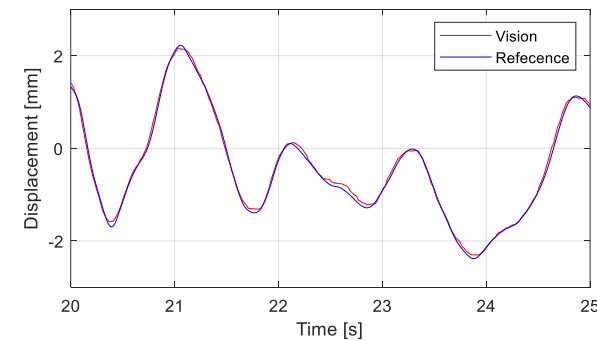
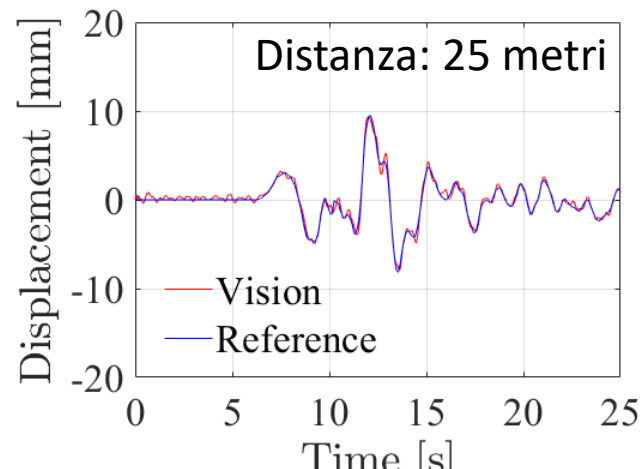
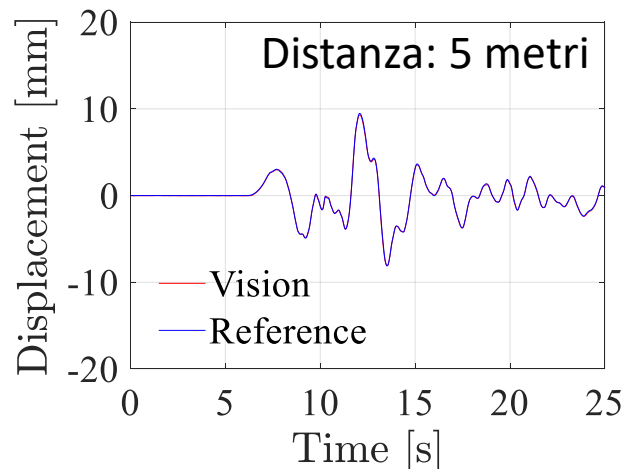


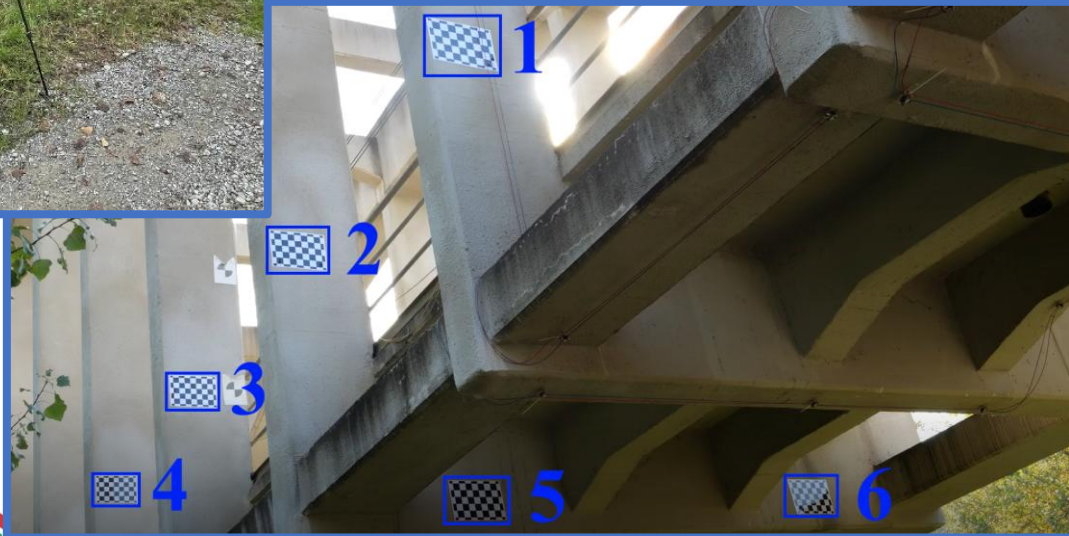
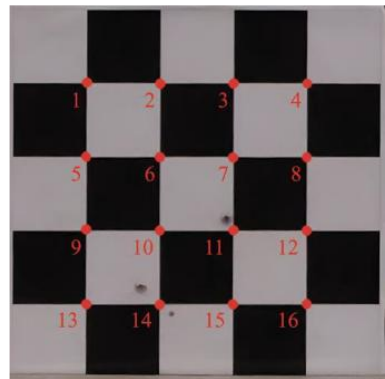
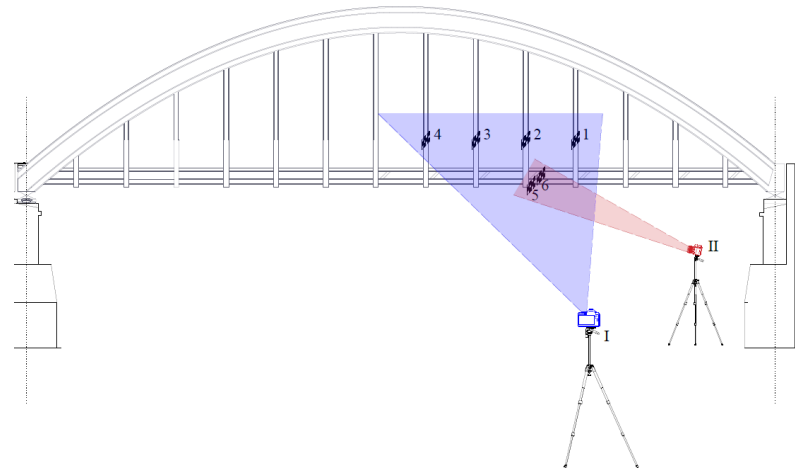
VANTAGGI:

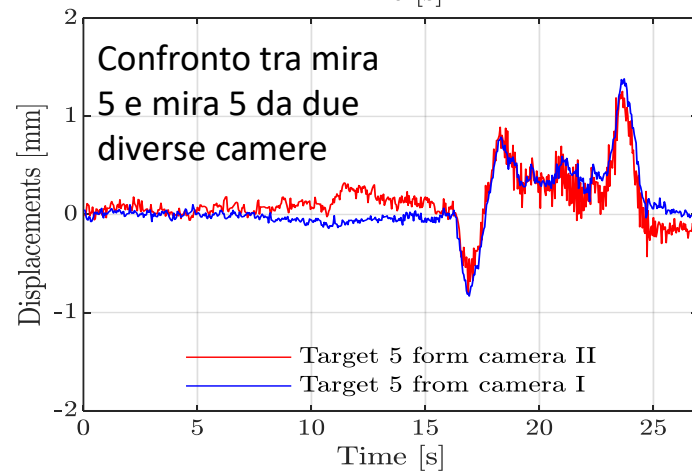
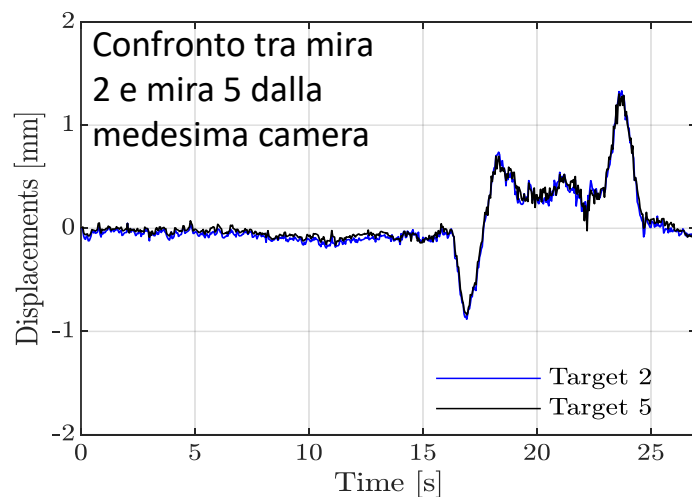
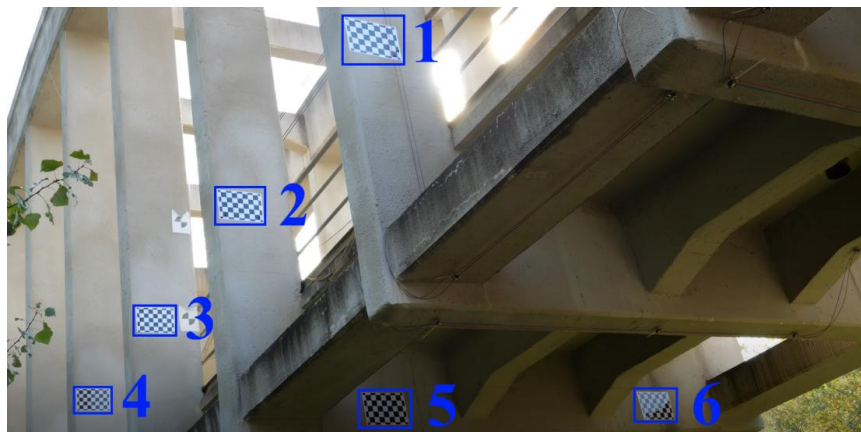
- Utilizzo di **videocamere commerciali** o industriali
- Economicità della strumentazione
- **Possibile monitorare più punti della struttura con 1 sola camera**
- Valutazione degli spostamenti (identificazione del danno)

SFIDE

- **Accuratezza** (dipende da come si elaborano le immagini)
- **Movimento della camera da controllare**







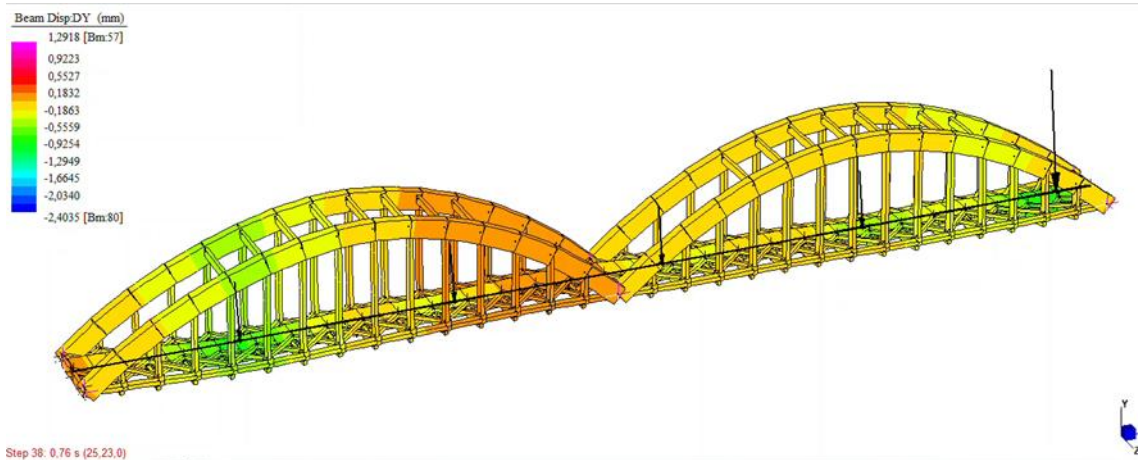
ETR 350



Spostamenti al passaggio di un treno

Motivazioni:

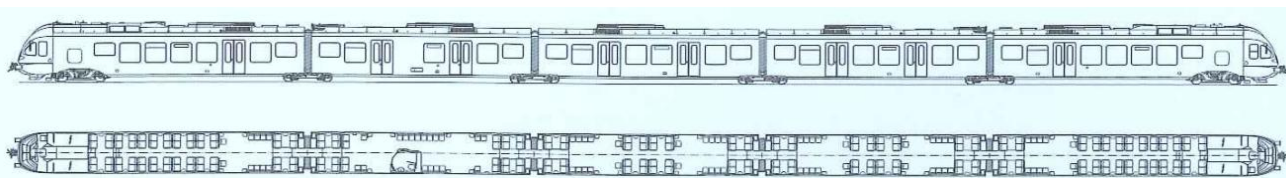
1. Misura della «salute» della struttura (variazione delle proprietà nel tempo)
2. Valutazione del comportamento in condizioni ordinarie ed eccezionali
3. **Calibrazione di modelli** per la simulazione di eventi/condizioni non riproducibili sperimentalmente



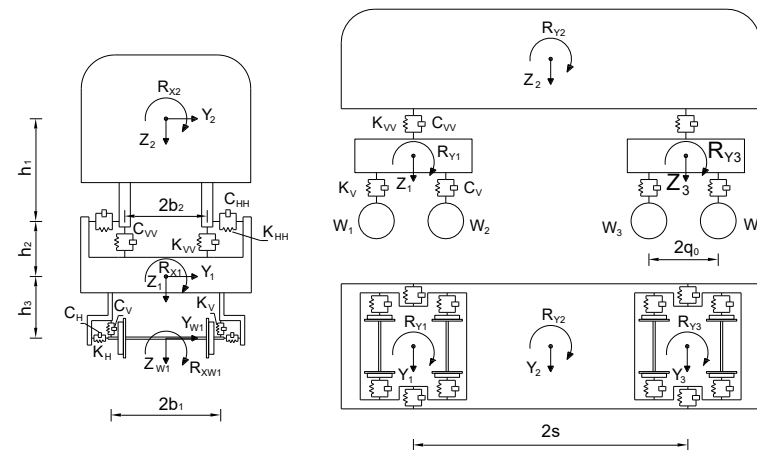
Step 38: 0.76 s (25.23.0)

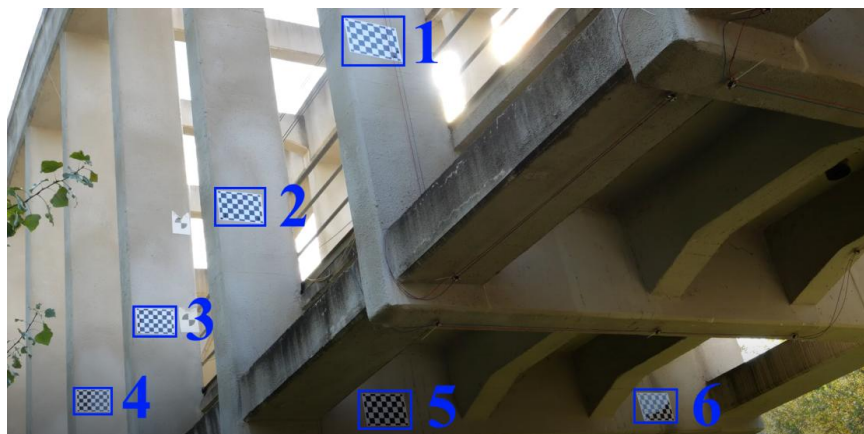
ETR 350

Massa 143 t, lunghezza 75 m

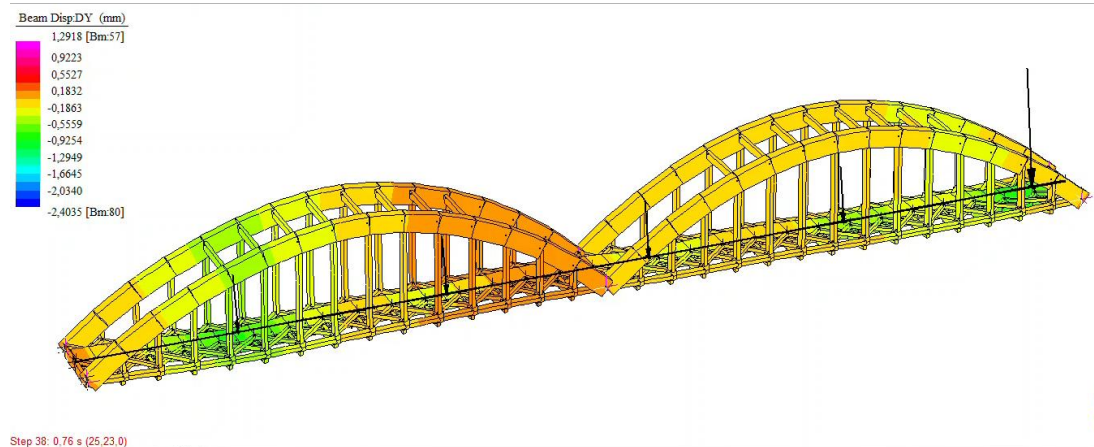
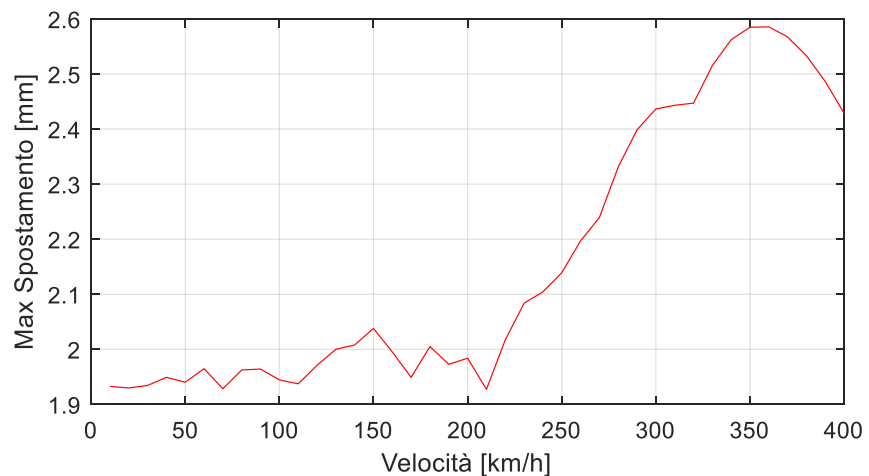
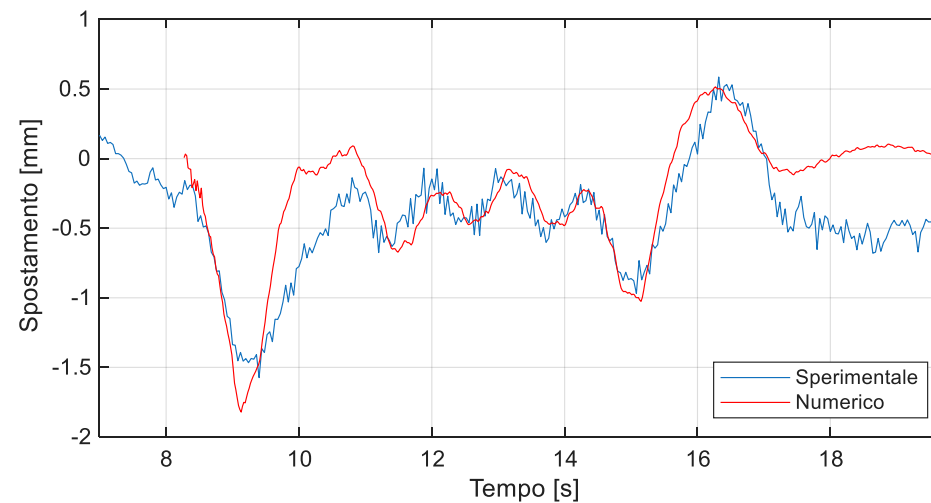


$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{q}}_b + \mathbf{C}_b^* \dot{\mathbf{q}}_b + \mathbf{K}_b^* \mathbf{q}_b = \mathbf{P}_b^* \\ \mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{v}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{v}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{v}_v = \mathbf{P}_v \end{cases}$$





Confronto tra spostamenti processati dalle immagini e simulazione FEM



Step 38: 0.76 s (26,23.0)

L'obiettivo principale del progetto **DIGI-BRIDGE** è sviluppare strumenti digitali integrati per il monitoraggio, la diagnostica e la manutenzione predittiva di ponti e viadotti.

Individuazione e validazione di tecniche di monitoraggio avanzate e innovative:

☐ **Monitoraggio con accelerometri innovativi:**

- Progettazione e installazione di sistemi di monitoraggio dinamico su **un ponte stradale e uno ferroviario** per la caratterizzazione del comportamento dinamico
- Sperimentazione di sistemi di monitoraggio **accelerometrici basati su sensori MEMS e su sensori di deformazioni FBG** con validazione - confronto con sensori tradizionali
- Base sperimentale per **la calibrazione di modelli numerici accurati (digital twin) per la previsione della vita residua**

☐ **Monitoraggio da immagini** – monitoraggio statico o dinamico:

- L'utilizzo di **videocamere commerciali** offre una soluzione **economica** con la possibilità di **monitorare più punti della struttura con 1 sola camera**;
- la valutazione degli spostamenti è spesso preziosa sin ottica di degrado / valutazione del danno e calibrazione di modelli
- Buona accuratezza, soprattutto se rapportata all'estrema economicità del sistema di monitoraggio e possibilità di depurare il movimento della camera mediante target fissi

