

DIGI BRIDGE

Strumenti Digitali Integrati
per il Monitoraggio Strutturale,
la Diagnostica e la Manutenzione Predittiva
di Ponti e Viadotti



L'impiego di dati accelerometrici nel monitoraggio di ponti e infrastrutture: casi studio del Ponte delle Grazie di Faenza e del ponte ferroviario di Savignano sul Panaro

Dott. Federico Ponsi
Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia



CENTRO INTERDIPARTIMENTALE DI RICERCA INDUSTRIALE EDILIZIA E COSTRUZIONI



Attività del progetto DIGIBRIDGE

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.

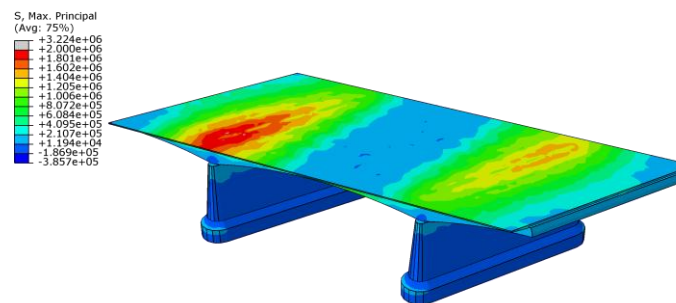
➔ Test di laboratorio e **Test in ambiente operativo**

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.

Monitoraggio dinamico

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

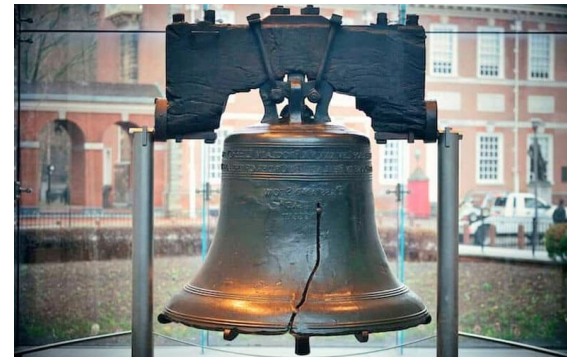


- ❑ Fornire supporto ai **processi decisionali volti a pianificare in modo ottimale gli interventi di manutenzione** (elevato rapporto costi/benefici).
- ❑ **Migliorare la conoscenza della struttura** riducendo le incertezze derivanti da una quantità insufficiente di dati disponibili (capacità, domanda,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

Monitoraggio dinamico

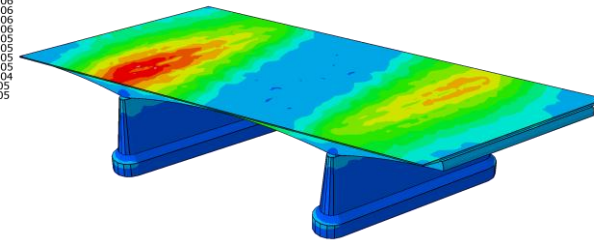
Motivazioni:

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



S, Max. Principal
(Avg: 75%)

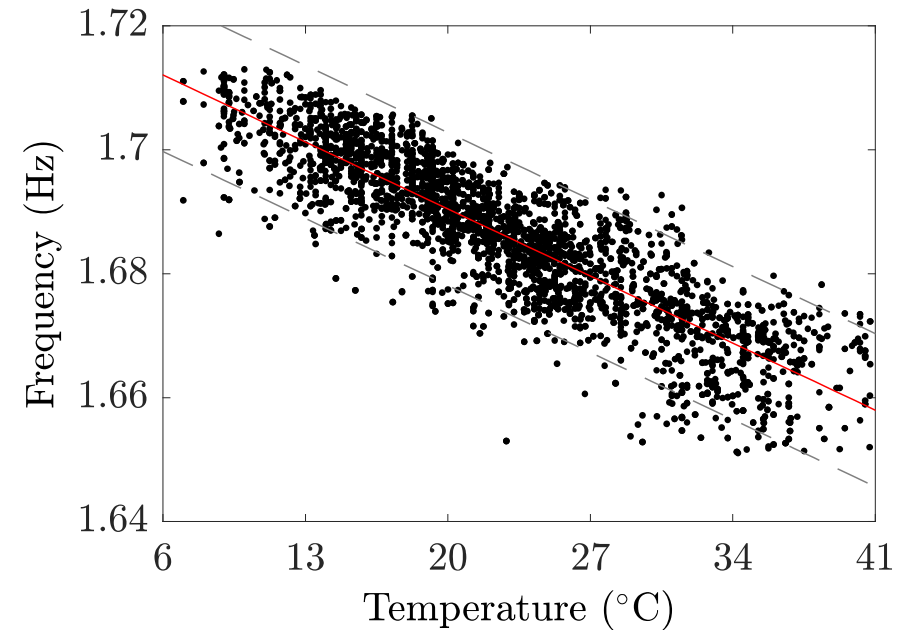
+	3.224e+06
+	2.000e+06
+	1.901e+06
+	1.602e+06
+	1.404e+06
+	1.205e+06
+	1.006e+06
+	8.072e+05
+	6.084e+05
+	4.095e+05
+	2.107e+05
+	1.194e+04
-	1.859e+05
-	3.857e+05



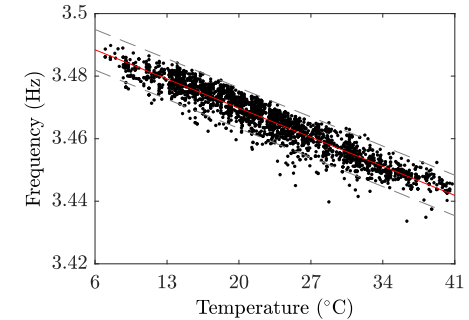
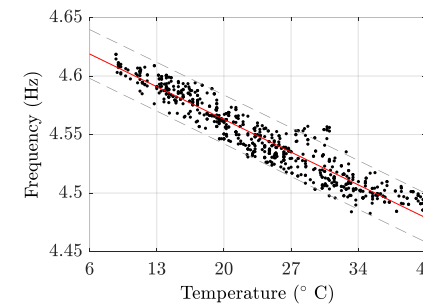
Monitoraggio dinamico

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



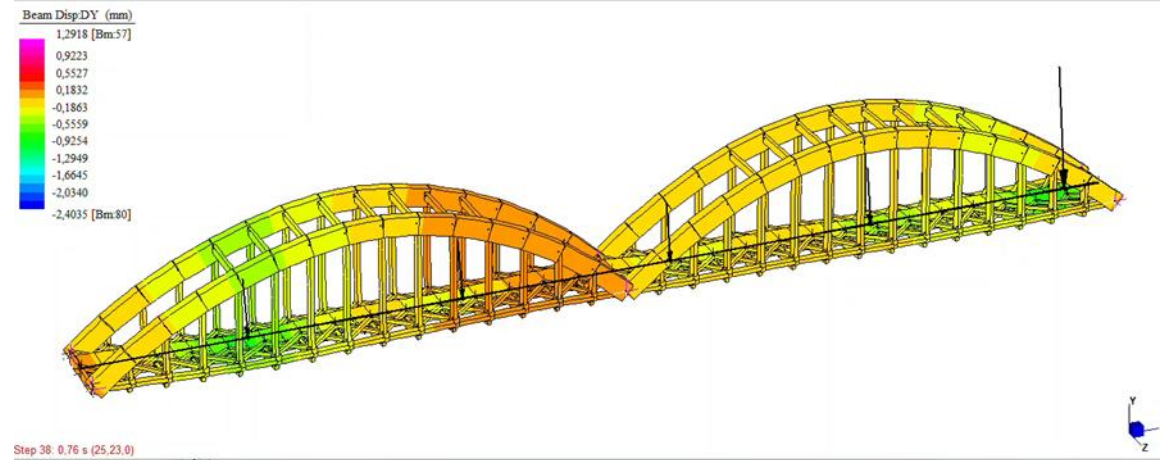
Effetto della temperatura sulle frequenze proprie:



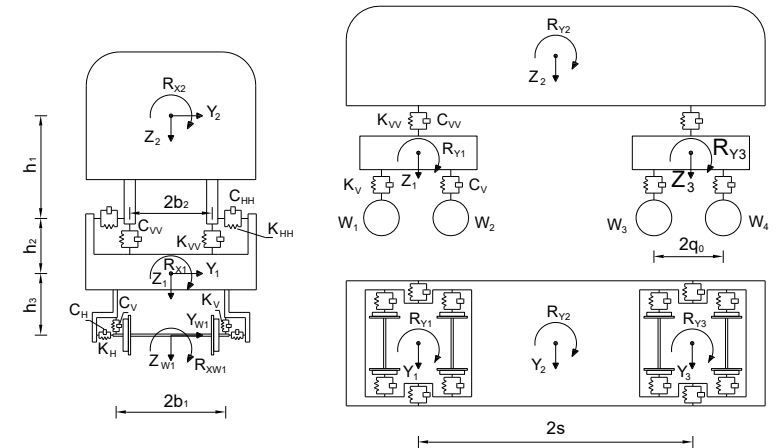
Monitoraggio dinamico

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



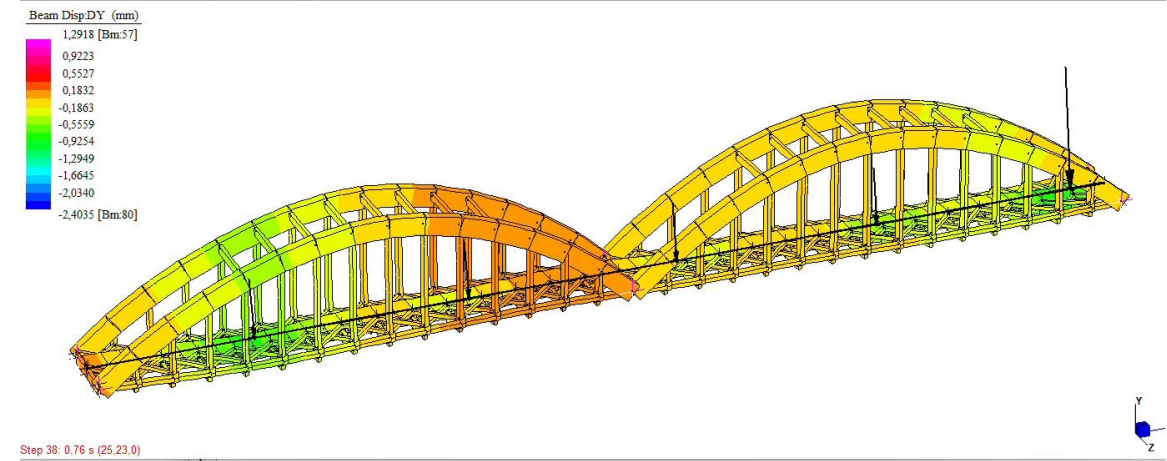
$$\begin{cases} \ddot{\mathbf{q}}_b + \mathbf{C}_b^* \dot{\mathbf{q}}_b + \mathbf{K}_b^* \mathbf{q}_b = \mathbf{P}_b^* \\ \mathbf{M}_v \ddot{\mathbf{v}}_v + \mathbf{C}_v \dot{\mathbf{v}}_v + \mathbf{K}_v \mathbf{v}_v = \mathbf{P}_v \end{cases}$$



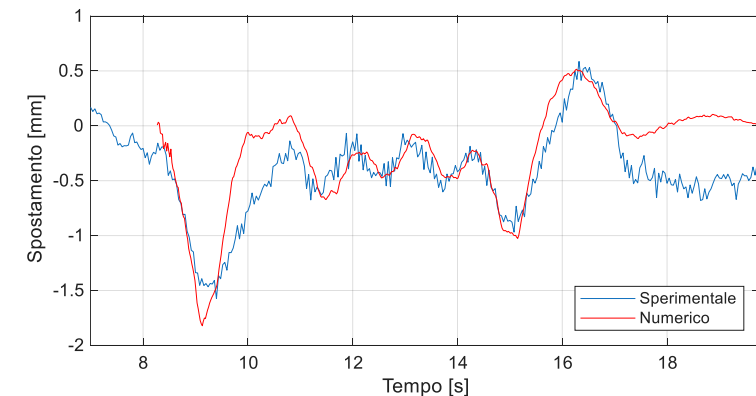
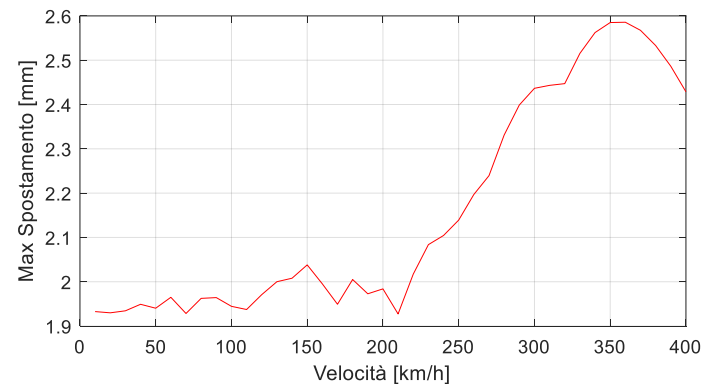
Monitoraggio dinamico

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



Risposta del ponte al variare della velocità del treno

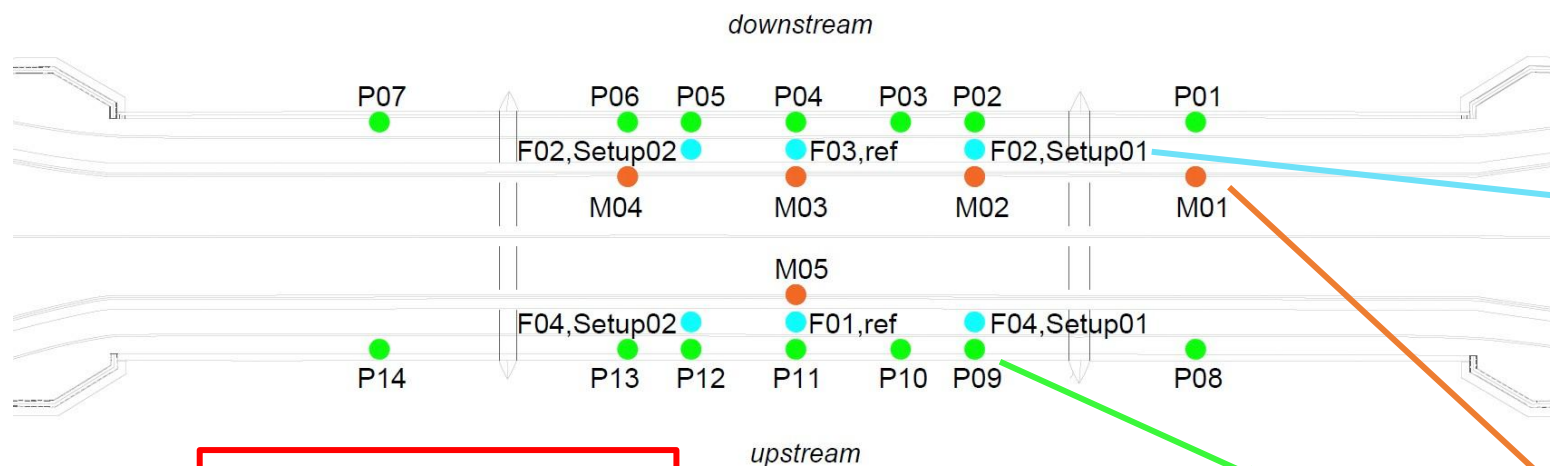


Ponte delle Grazie di Faenza



- 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**

Ponte delle Grazie di Faenza: monitoraggio



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)



Ponte delle Grazie di Faenza: dati acquisiti

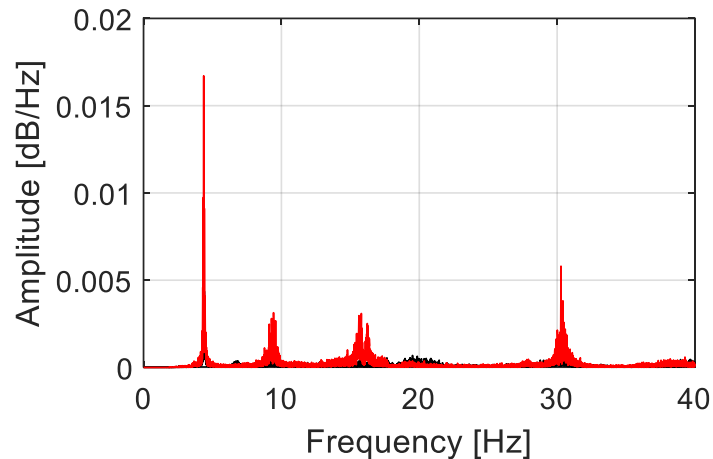
Utilizzo di differenti sistemi di monitoraggio:

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

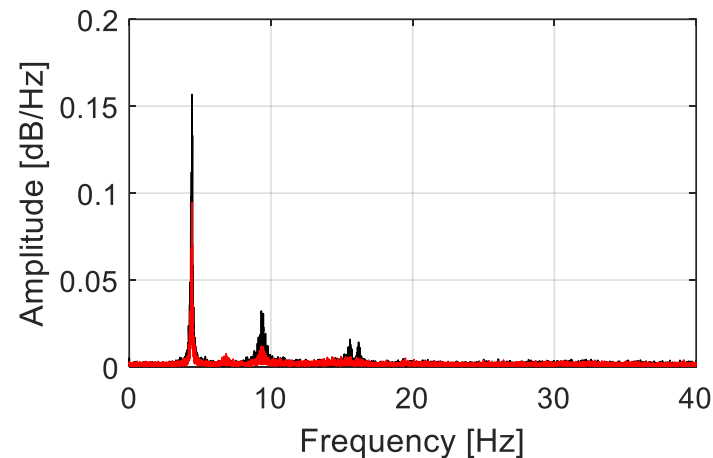
Sensore	Piezo	MEMS	FBG
RMS [mg]	0.08	0.44	0.37

- Mezzeria della campata centrale
- Un quarto della campata centrale

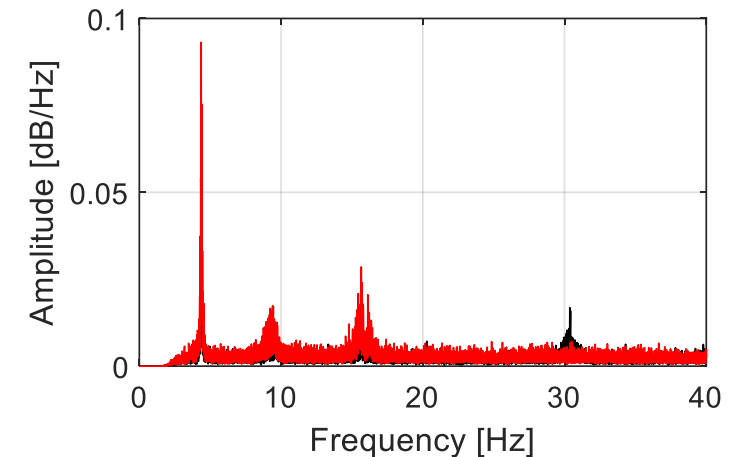
Piezoelétrici



MEMS



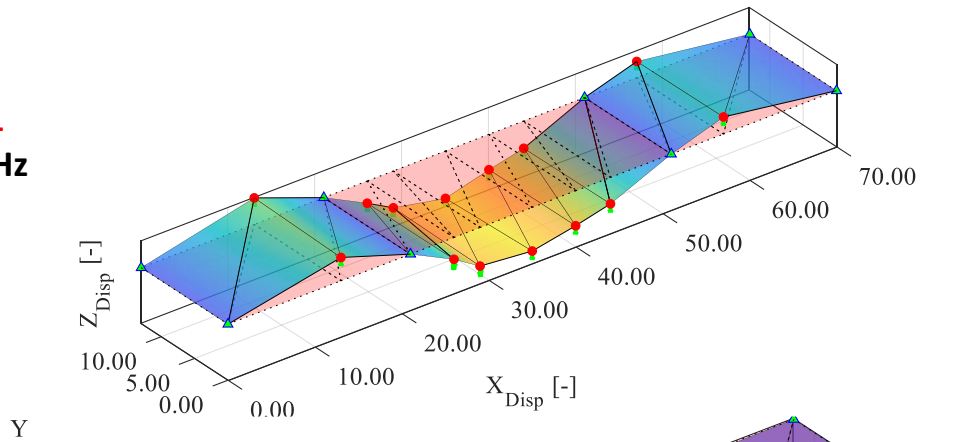
FBG



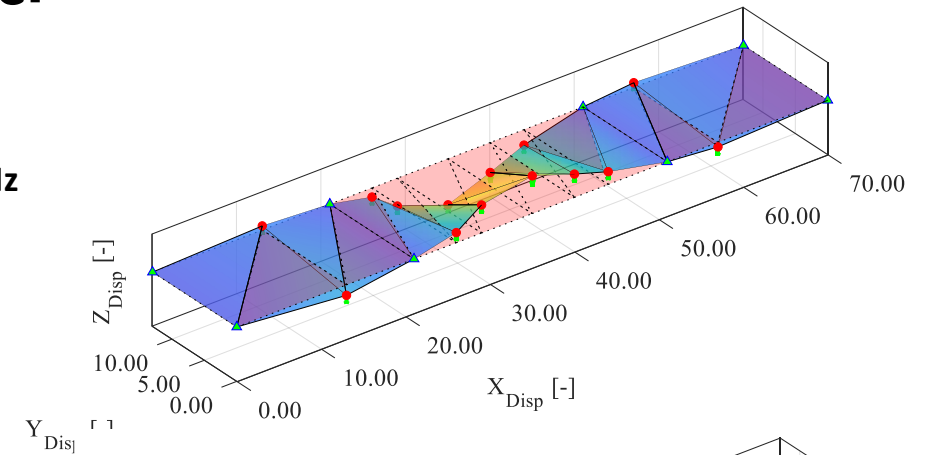
Ponte delle Grazie di Faenza: identificazione

Sensori Piezoelettrici

Modo 1
f=4,19 Hz

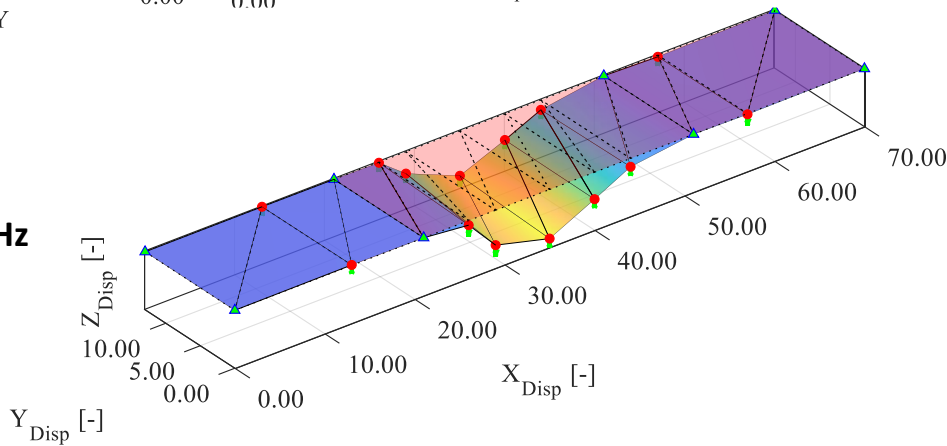


Modo 2
f=8,98 Hz

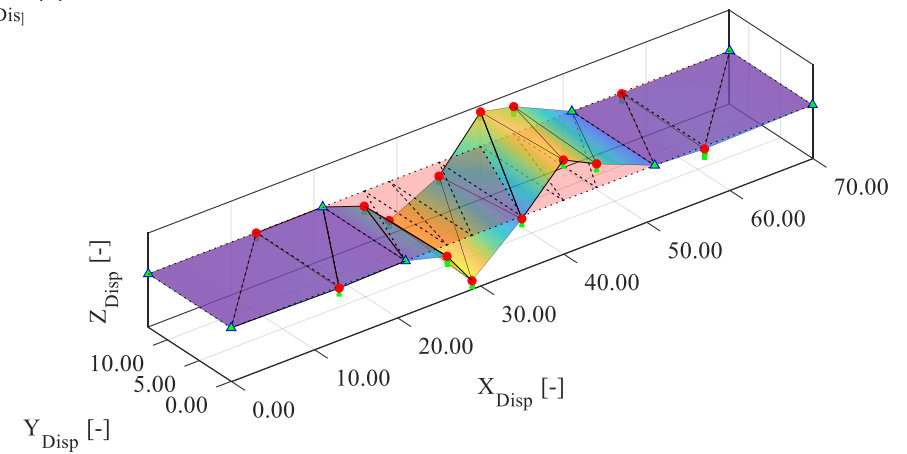


Prova
07/24

Modo 3
f=14,84 Hz



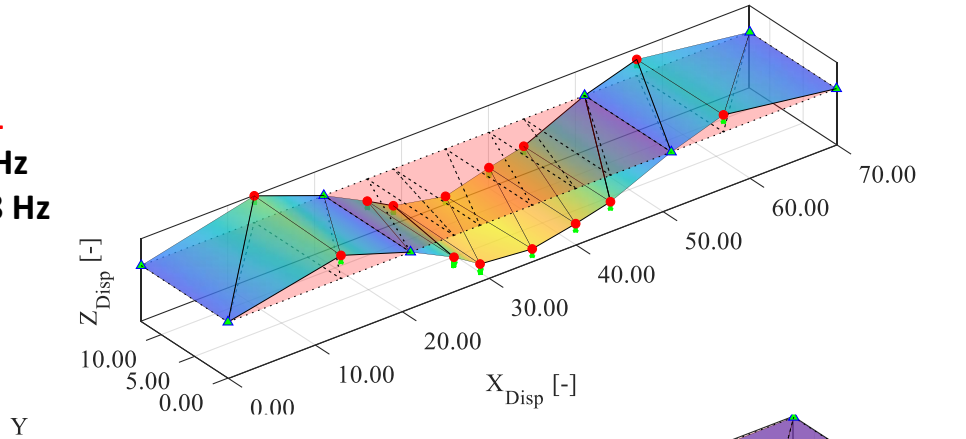
Modo 4
f=26,70 Hz



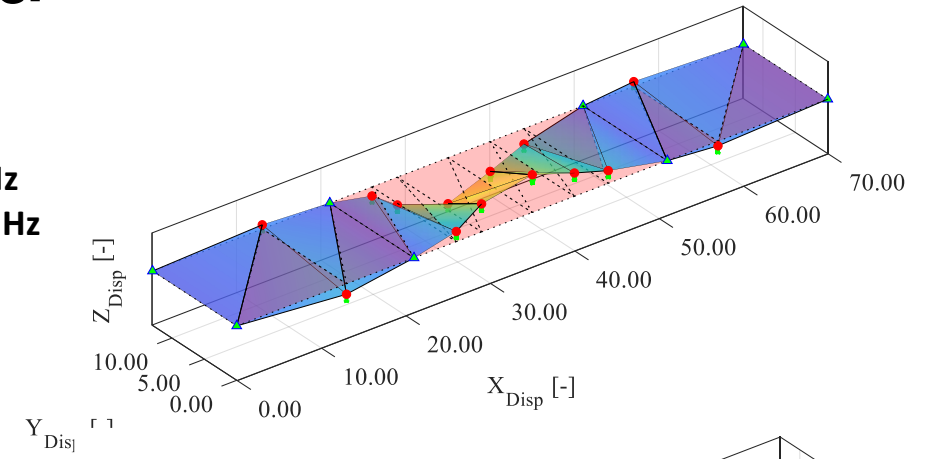
Ponte delle Grazie di Faenza: identificazione

Sensori Piezoelettrici

Modo 1
f=4,37 Hz
Δf=0.18 Hz

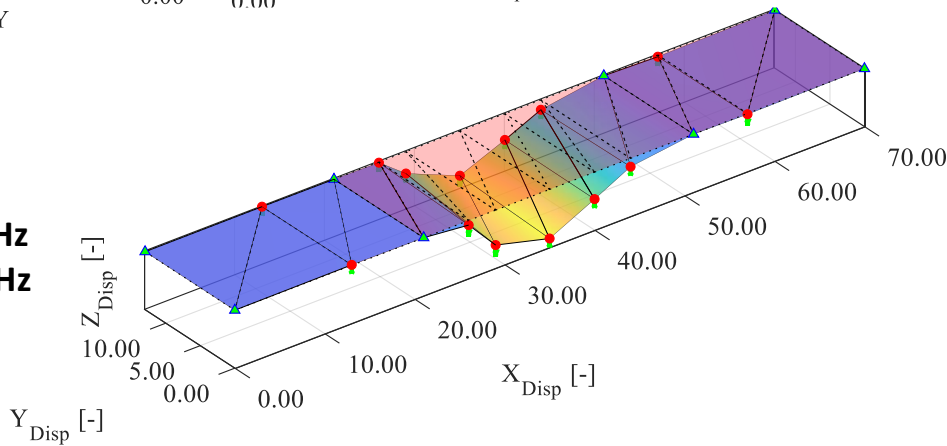


Modo 2
f=9,27 Hz
Δf=0.29 Hz

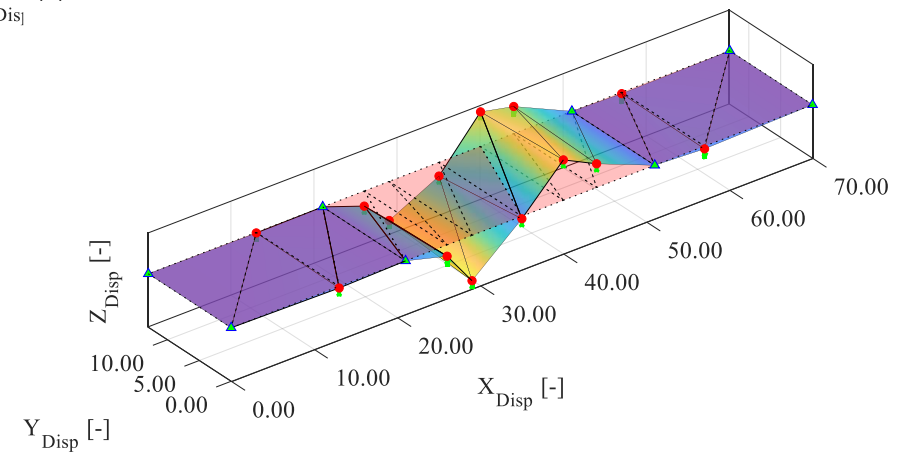


Prova
12/24

Modo 3
f=15,70 Hz
Δf=0.86 Hz



Modo 4
f=30,27 Hz
Δf=3.57 Hz



Ponte delle Grazie di Faenza: confronto

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



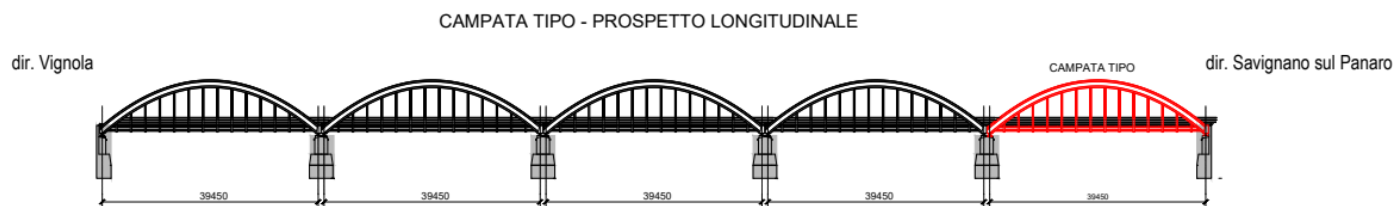
MAC (-) rispetto al modo di riferimento (sensori piezoelettrici)

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

Ponte ferroviario di Savignano sul Panaro



- 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**.

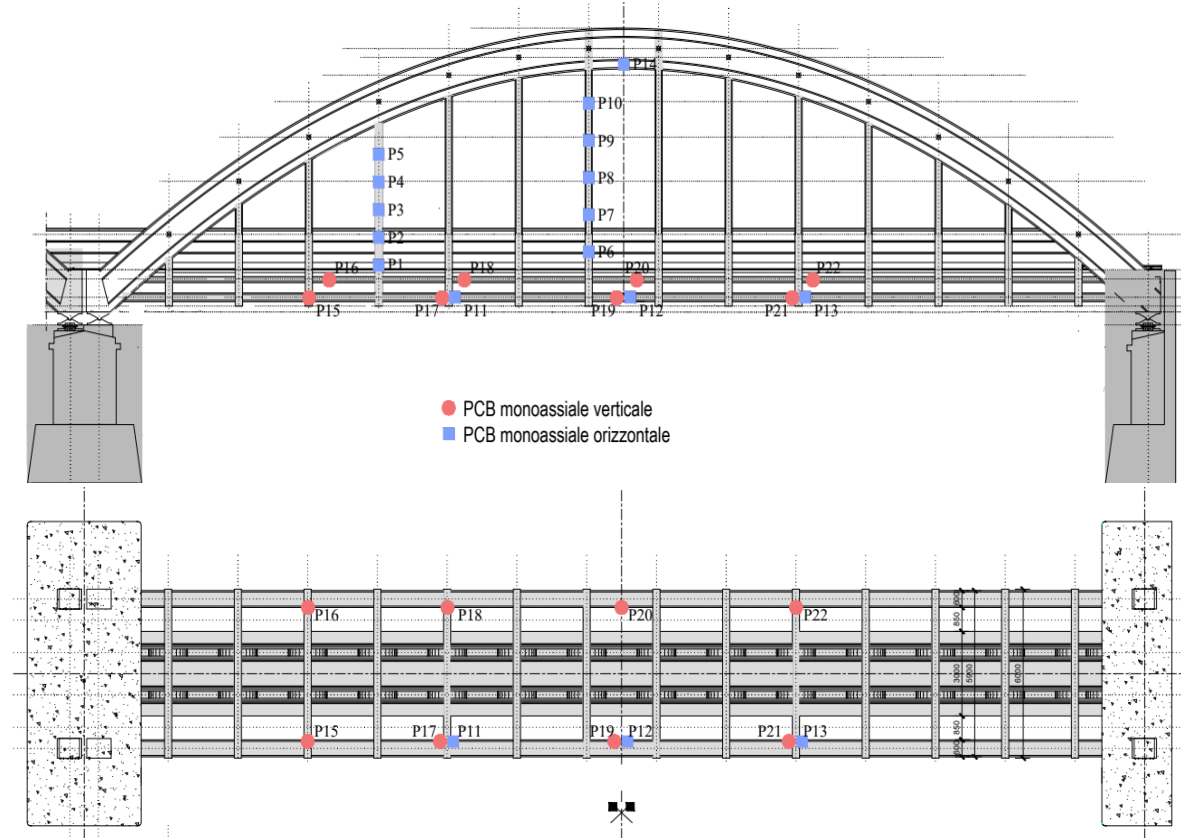


Ponte ferroviario di Savignano: monitoraggio



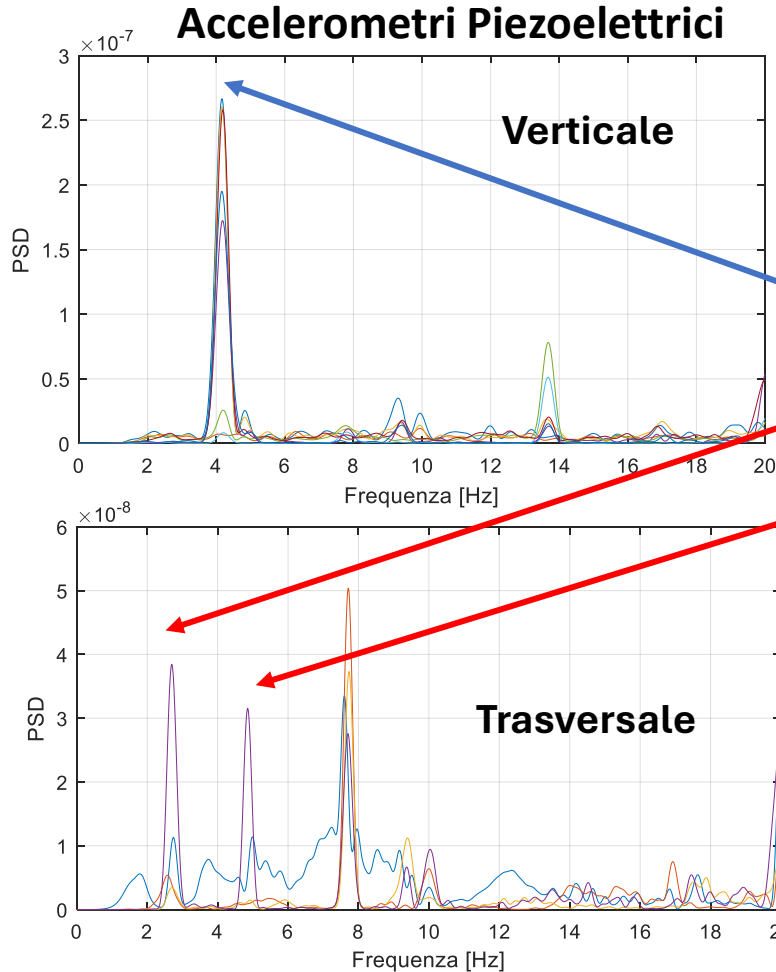
Prova dinamica e
monitoraggio per 24h

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



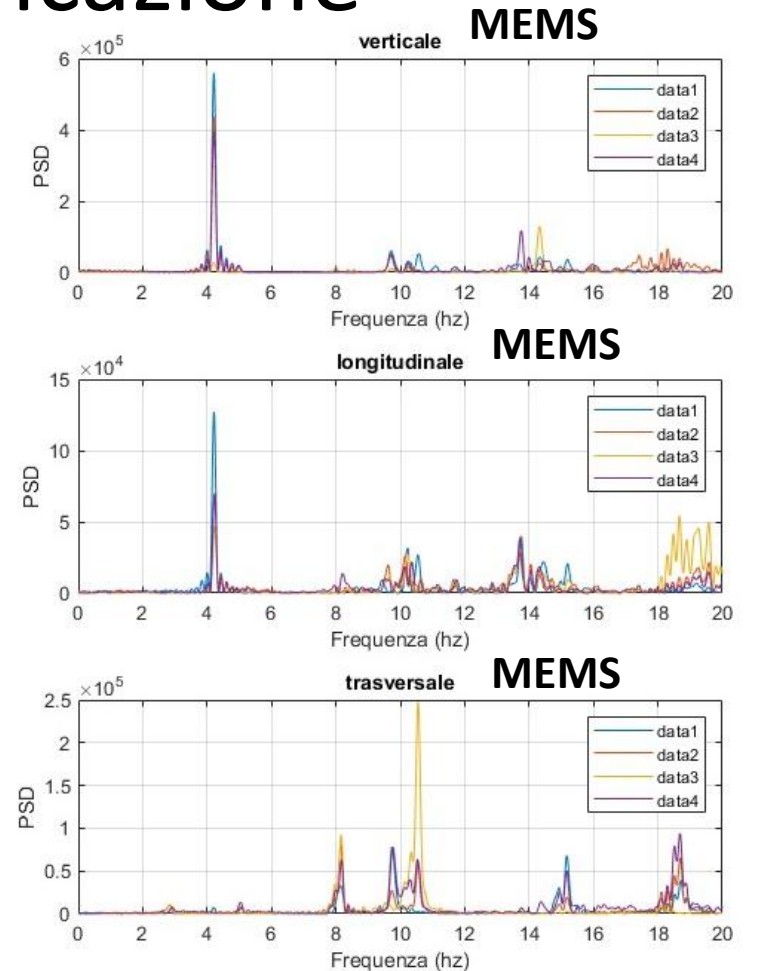
● PCB monoassiale verticale
■ PCB monoassiale orizzontale

Ponte ferroviario di Savignano: identificazione



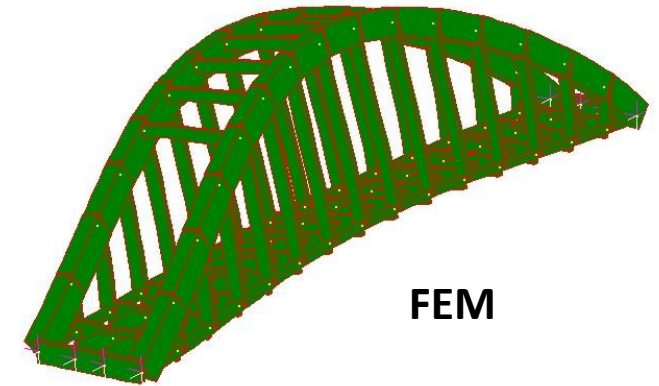
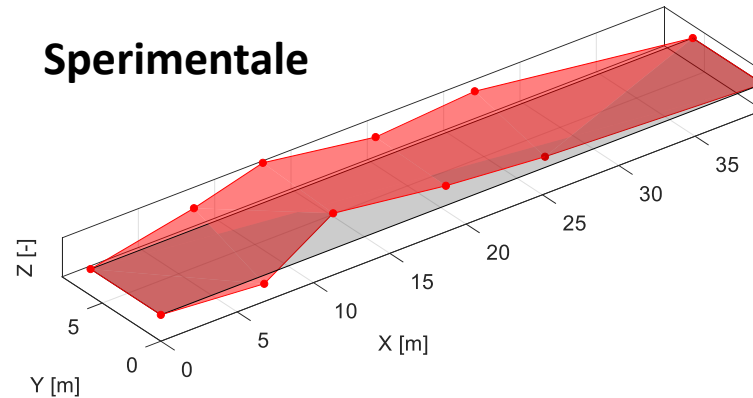
Modi sperimentali

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

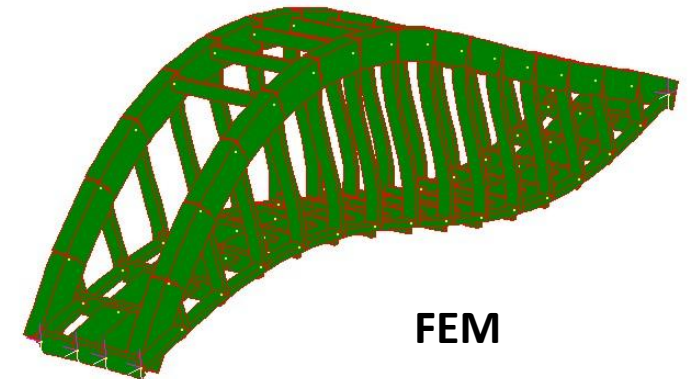
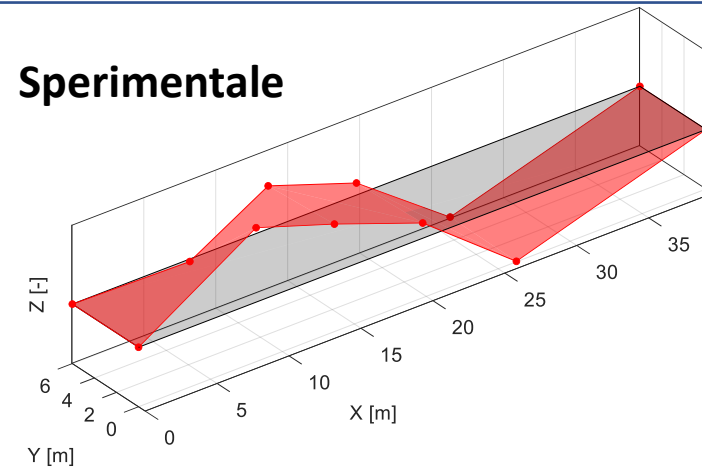


Ponte ferroviario di Savignano: identificazione

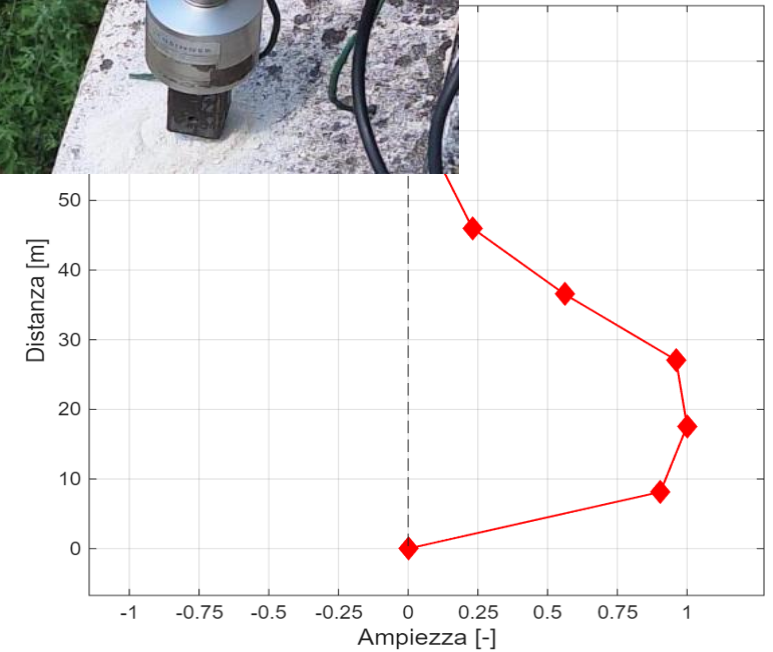
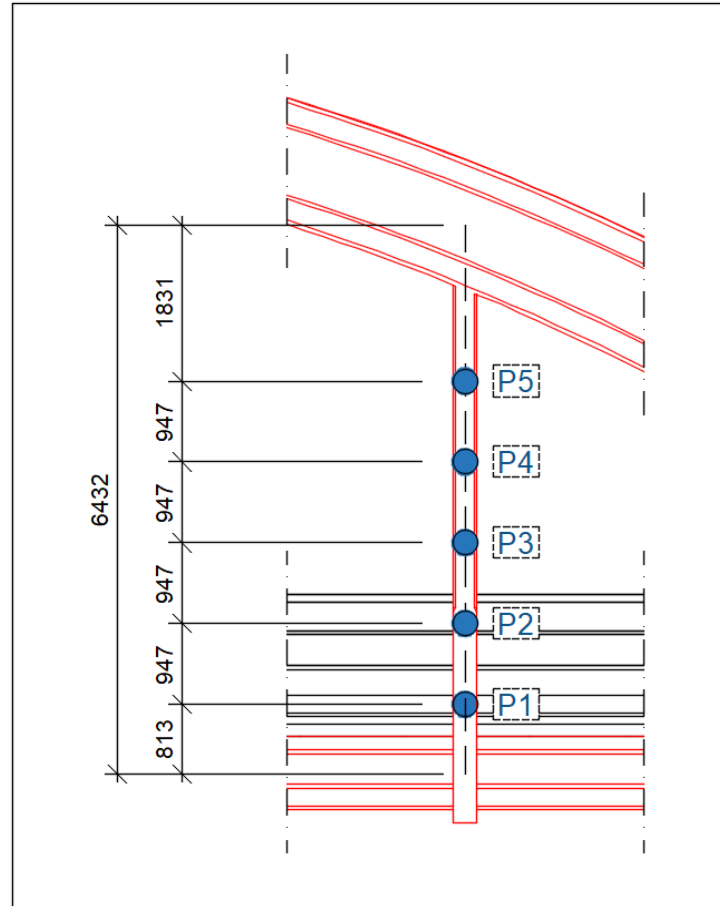
Modo 1:
laterale,
frequenza 2.70
Hz



Modo 2:
verticale,
frequenza 4,19 Hz



Ponte ferroviario di Savignano: pendini



Conclusioni

- Progettazione e installazione di **sistemi di monitoraggio dinamico** su un **ponte stradale** e uno **ferroviario**
- **Caratterizzazione del comportamento dinamico** nell'ottica di un futuro **monitoraggio permanente**
- **Sperimentazione** di sistemi di monitoraggio accelerometrici basati su **sensori MEMS** e su **sensori di deformazioni FBG**
- **Validazione** attraverso il **confronto** con sensori tradizionali (**piezoelettrici**)
- Base sperimentale per la **calibrazione** di modelli numerici accurati (**digital twin**) per la previsione della vita residua



Grazie per l'attenzione!

Dott. Federico Ponsi

Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia



Archliving s.r.l.



Ferrovie Emilia-Romagna s.r.l.



BULTI s.r.l.



STRUCTURAL ANALYTICS s.r.l.



CENTRO INTERDIPARTIMENTALE DI RICERCA INDUSTRIALE EDILIZIA E COSTRUZIONI



ENSER s.r.l.



COMACO ITALIANA s.p.a.

