



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile**

**Dipartimento di Costruzioni e Trasporti**

# **CARATTERIZZAZIONE STRUTTURALE ED IDENTIFICAZIONE DINAMICA DI DUE PONTI STRADALI**

**PONTE GRESAL A BELLUNO E PONTE NUOVO A VERONA**

**Laureando: Alberto Bisson**

**Relatore: Prof. Claudio Modena**

**Correlatore: Ing. Kleidi Islami**

# Obiettivi della tesi

## PONTE SUL TORRENTE GRESAL, Belluno

**Calibrazione modello  
FEM** tramite I.D.

Valutazione **a posteriori**  
dell'effettiva funzionalità  
degli interventi  
di adeguamento  
statico e sismico  
**tuttora in essere**

## PONTE NUOVO DEL POPOLO sul fiume Adige, Verona

**Calibrazione modello  
FEM** tramite I.D.

Valutazione di sicurezza  
statica e dinamica  
degli elementi strutturali  
più ammalorati e  
**ipotesi per un possibile  
adeguamento**

# Il processo di identificazione

## **ECCITAZIONE**

*(Deformazioni o velocità iniziali, Forzanti note, Forzanti random)*

## **STRUTTURA**

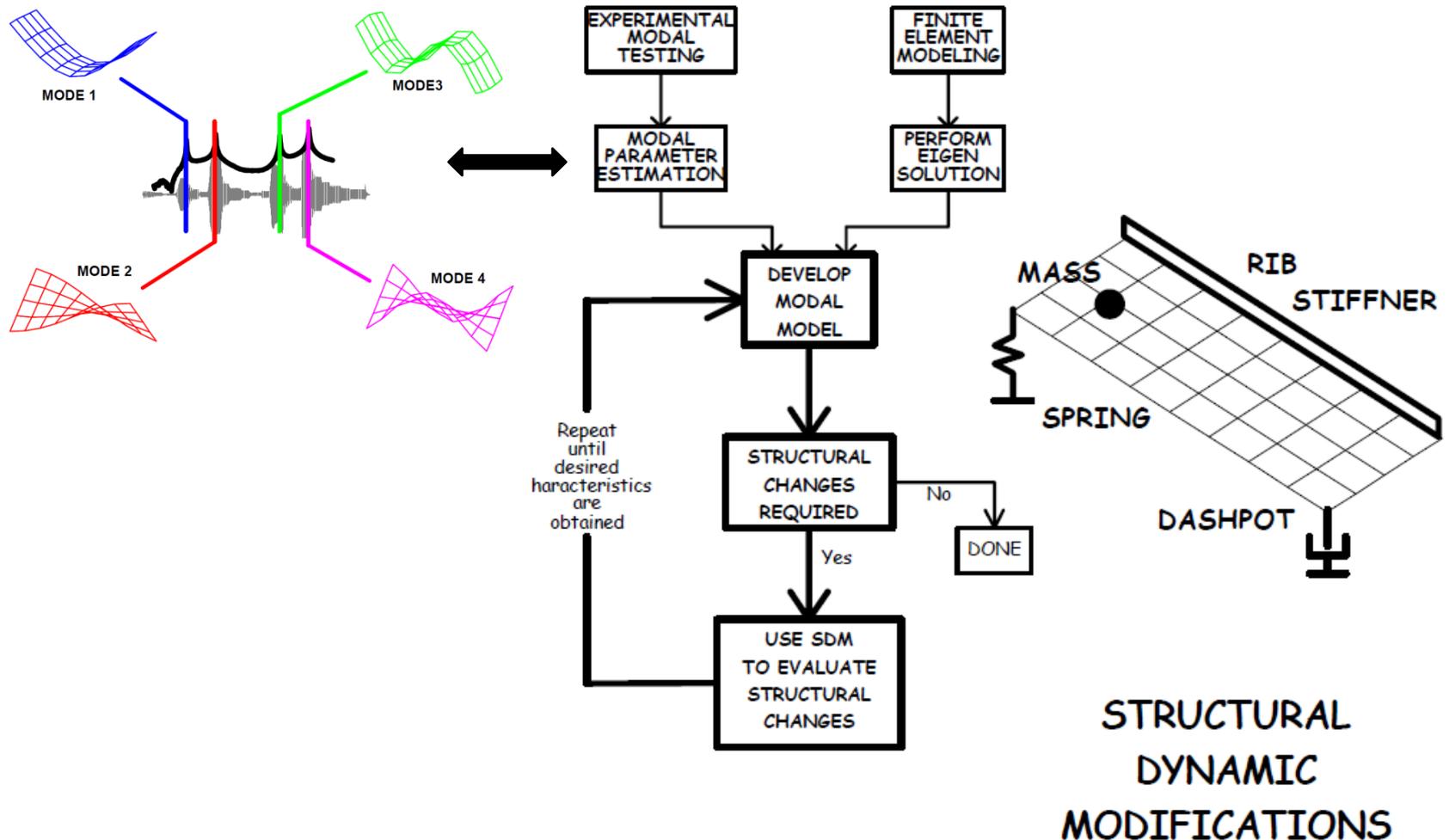
## **TRASDUTTORI DI SPOSTAMENTO, ACCELEROMETRI**

## **ANALIZZATORE**

*(Filtri, Convertitore Analogico-Digitale, Fast Fourier Transform)*

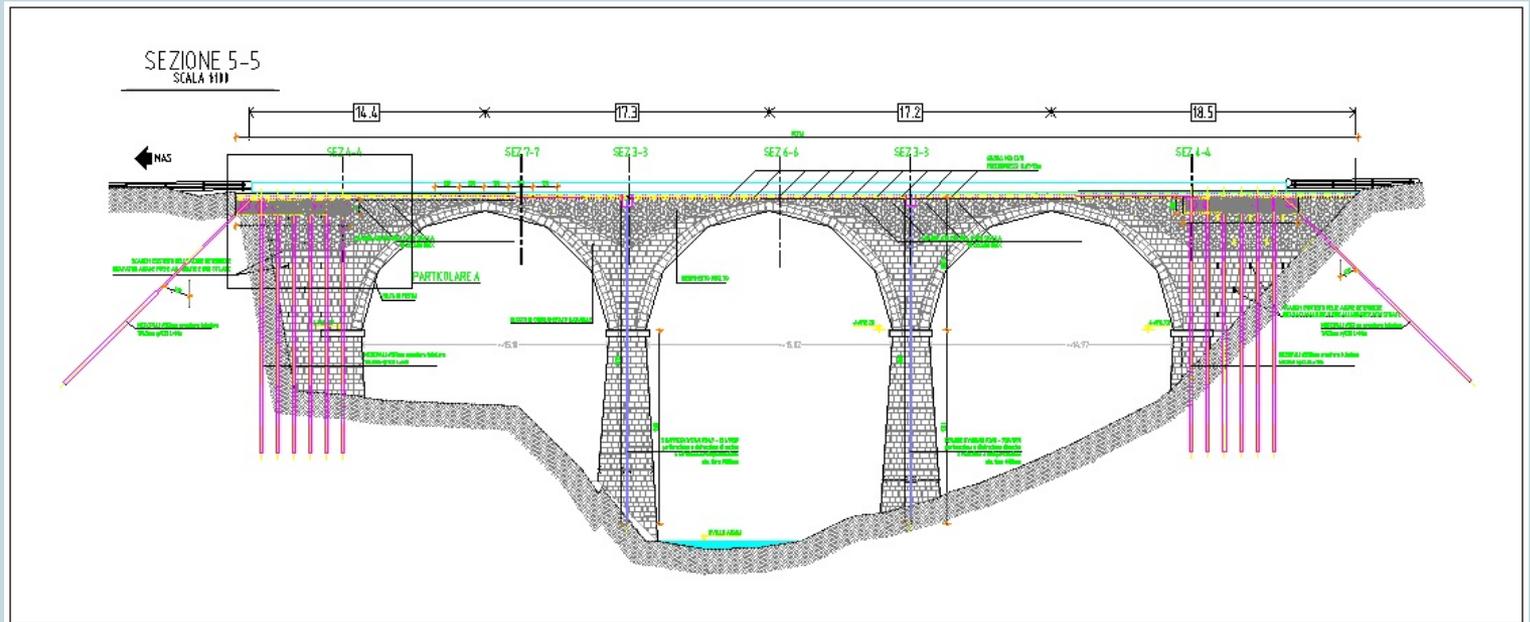
## **FREQUENZE, RAPPORTI DI SMORZAMENTO, MODI**

# II Model Updating



# Ponte sul torrente Gresal, Belluno

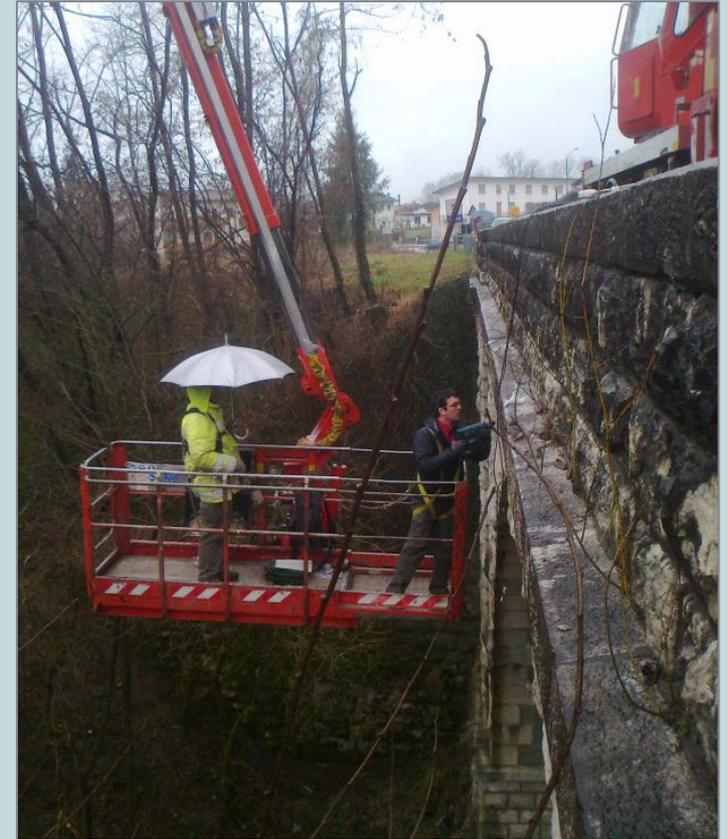




## Intervento di adeguamento sismico (NTC 2008)

Non accettabili i margini di sicurezza a collasso rispetto ad azioni sismiche di progetto, per azioni dirette sia in senso longitudinale sia trasversale.

**Intervento:** Micropali, barre *Dywidag*, soletta integrativa in cls.



## Test accelerometrici *in situ*

La campagna di acquisizione si è svolta il giorno **15 marzo 2011**, all'interno di un progetto di collaborazione con **Veneto Strade S.p.A.**

Durante le operazioni di acquisizione dei dati **non è stato interrotto il traffico** stradale, utilizzato al contrario come **naturale eccitazione della struttura**.



## Analisi di identificazione modale

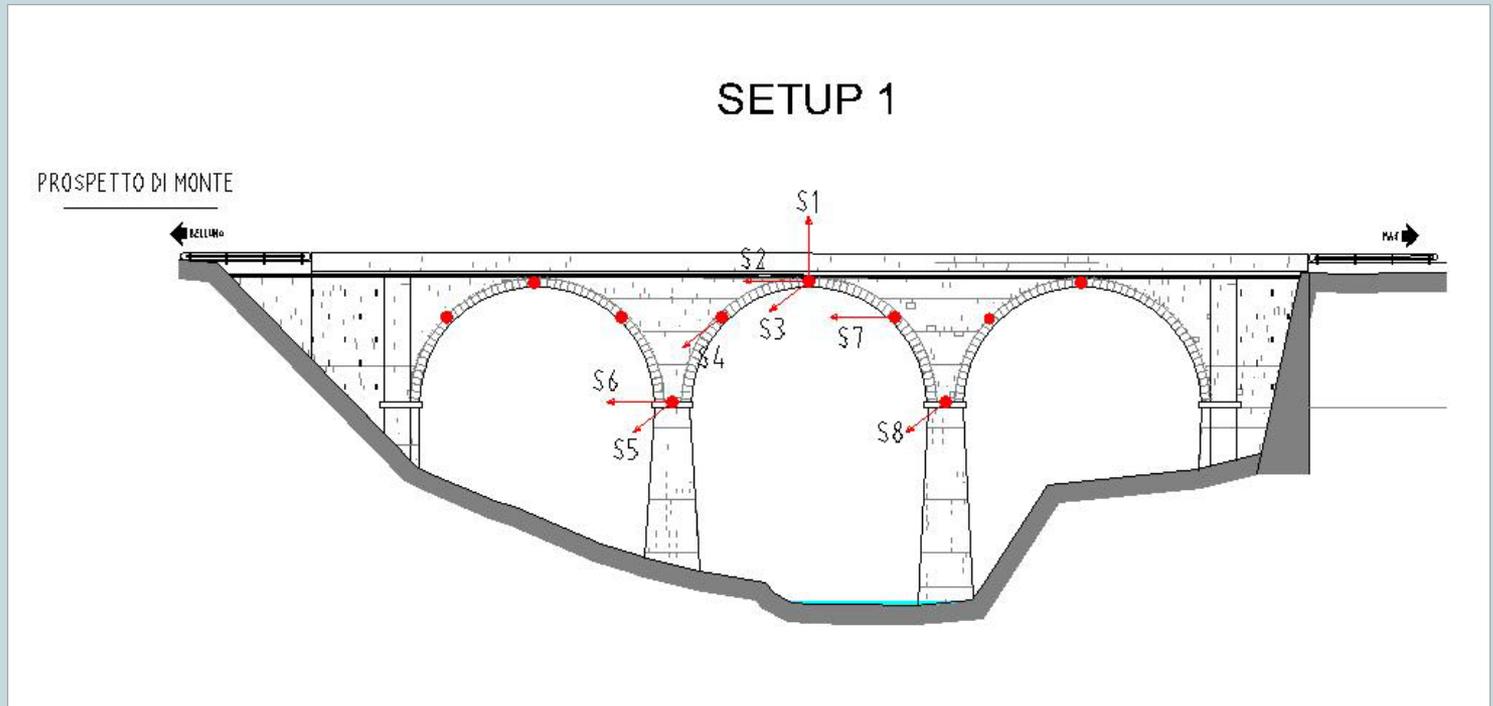
Attrezzatura: **8 accelerometri piezoelettrici** ad alta sensibilità (risoluzione di  $6 \mu\text{g}$   $\text{m/s}^2$ ), in grado di registrare le vibrazioni nell'intervallo 0-100Hz.

I sensori sono collegati con cavi coassiali ad un computer equipaggiato con il quadro di acquisizione dati ed un convertitore A-D.



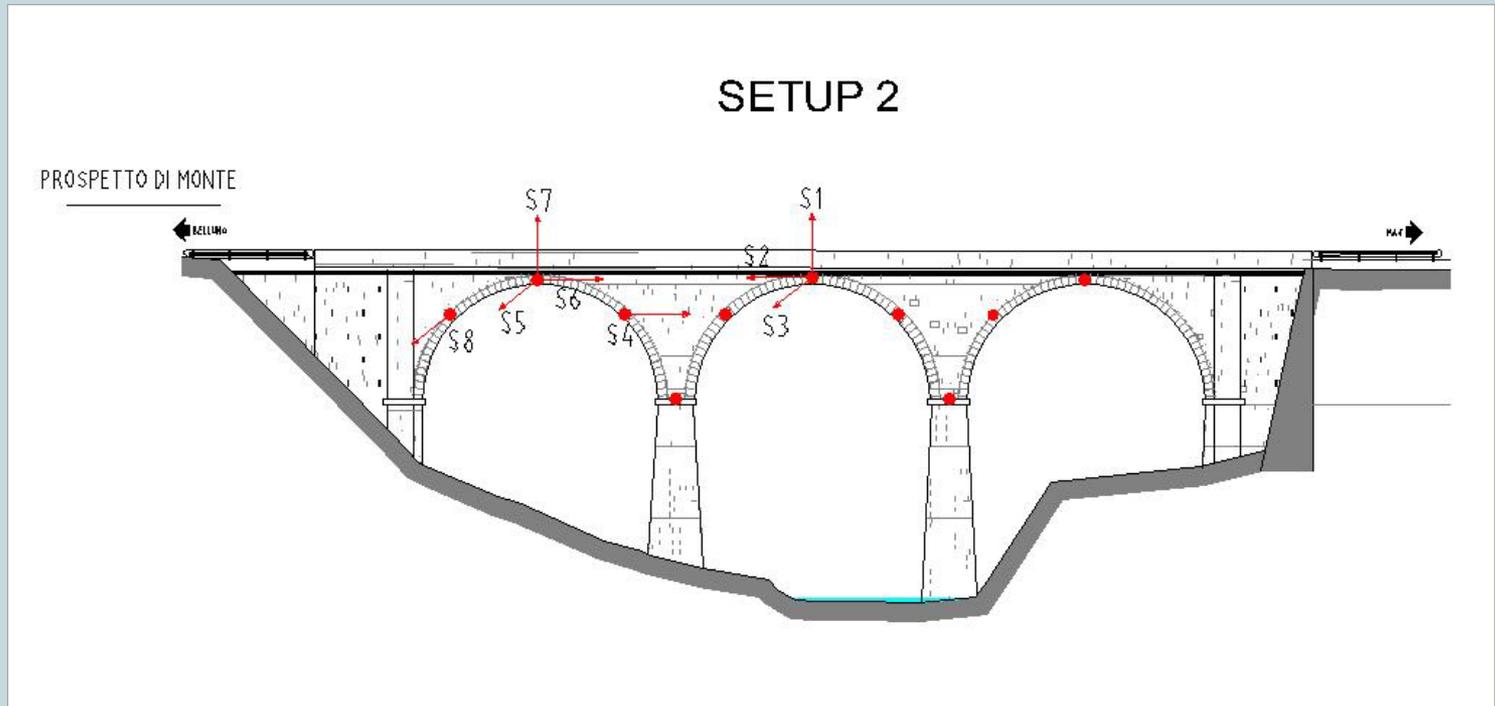
## Trasduttori accelerometrici

Le serie temporali delle accelerazioni ambientali sono state registrate per circa 11 minuti con una frequenza di campionamento di 100 Hz.



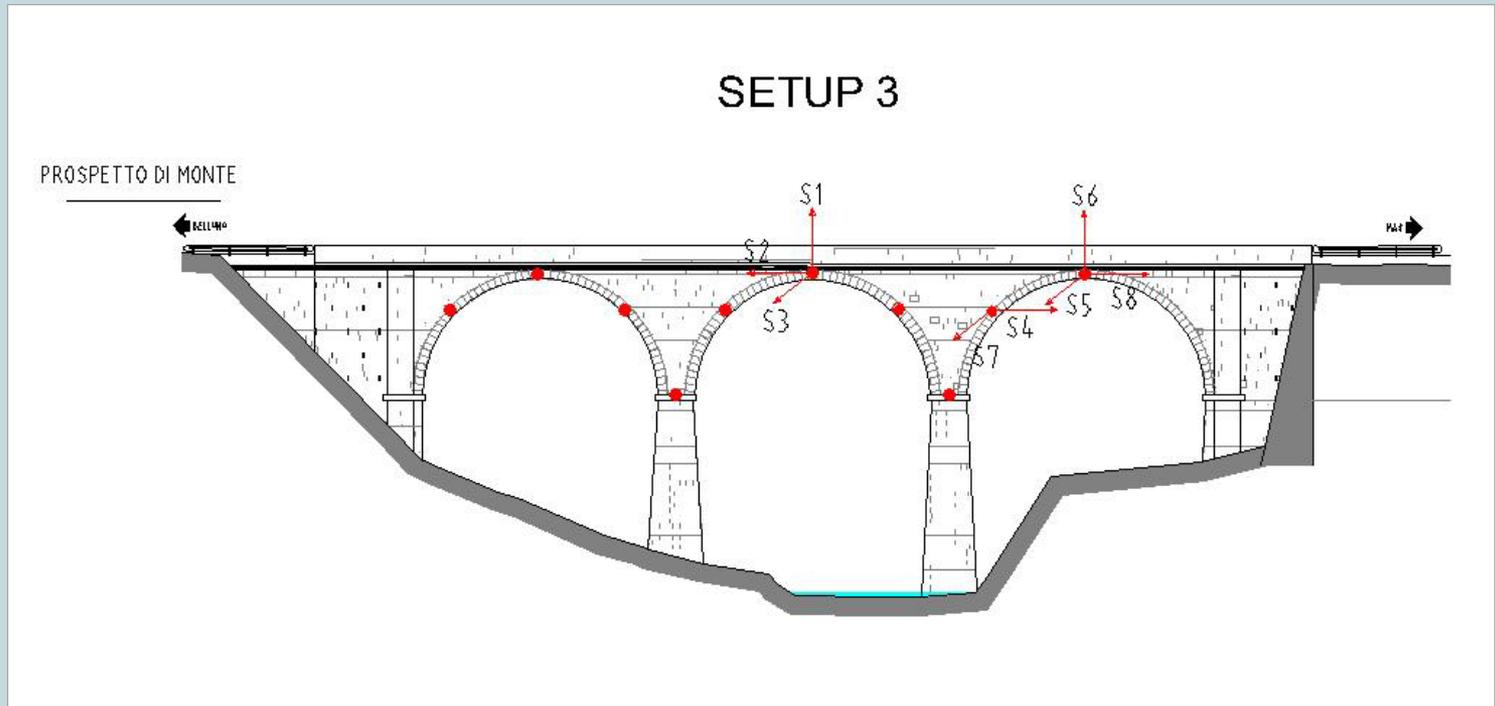
## Setup 1

**3 accelerometri** sono stati posizionati come **riferimento** in corrispondenza della mezzeria del ponte, mentre altri **5 accelerometri** sono stati **spostati** secondo 3 diversi setup per coprire l'intera area del ponte.



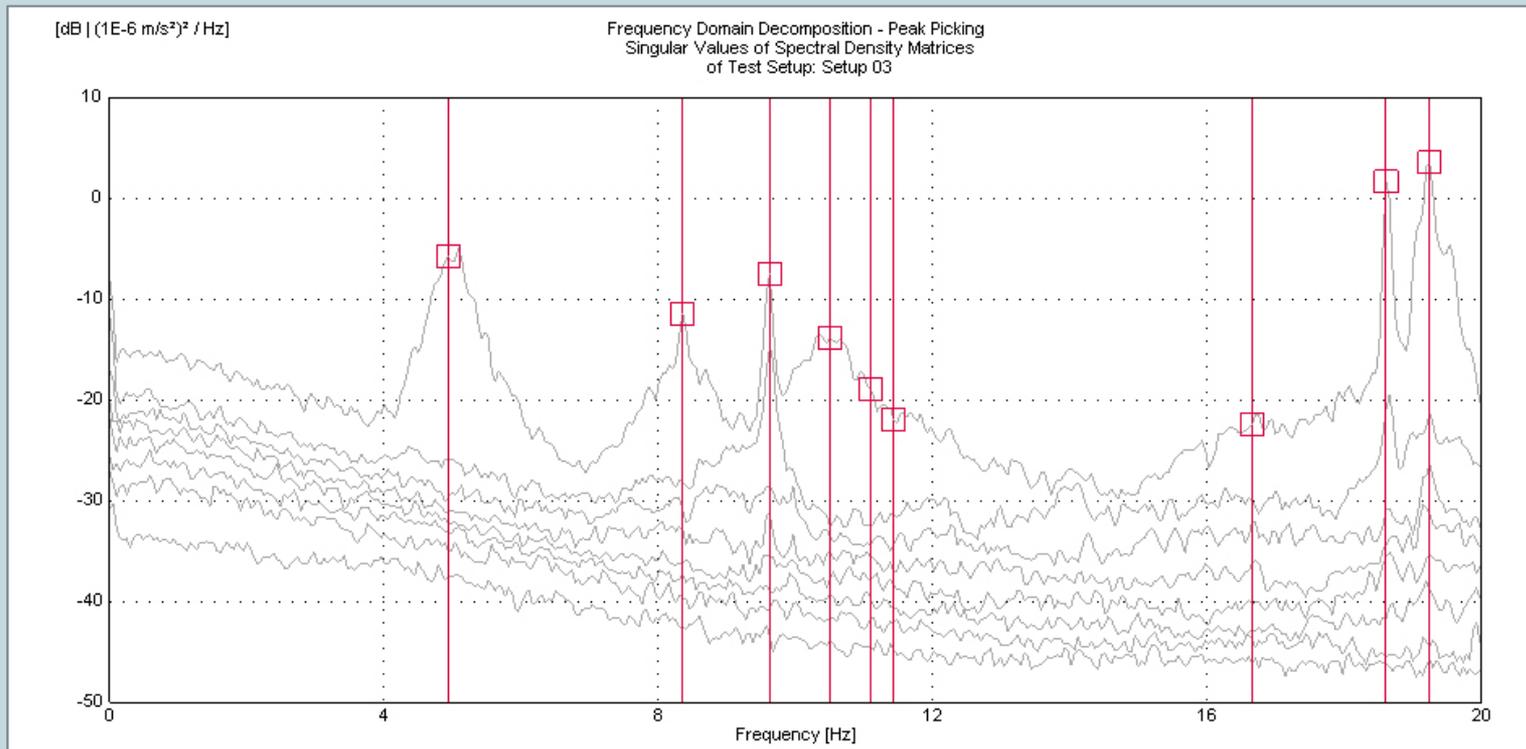
## Setup 2

**3 accelerometri** sono stati posizionati come **riferimento** in corrispondenza della mezzeria del ponte, mentre altri **5 accelerometri** sono stati **spostati** secondo 3 diversi setup per coprire l'intera area del ponte.



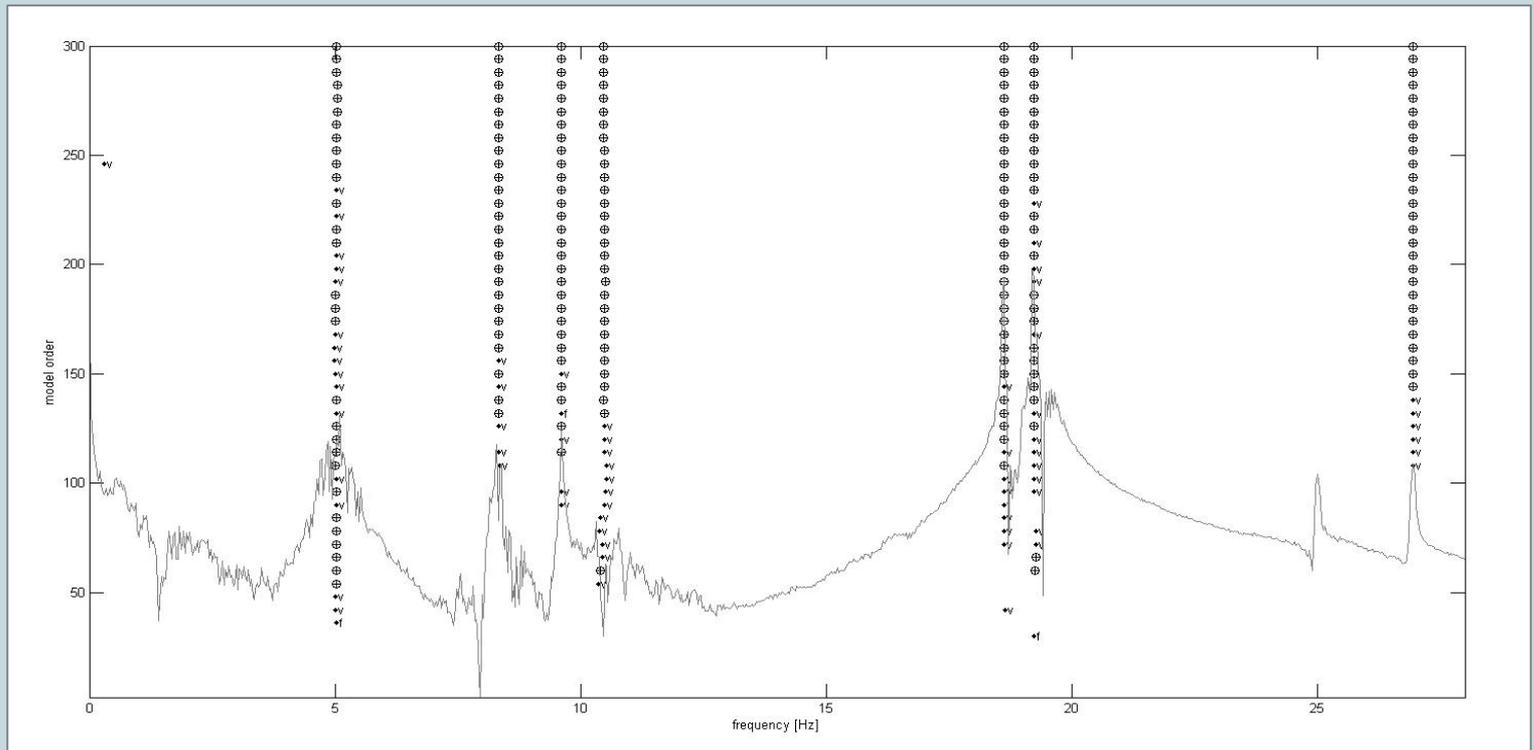
## Setup 3

**3 accelerometri** sono stati posizionati come **riferimento** in corrispondenza della mezzeria del ponte, mentre altri **5 accelerometri** sono stati **spostati** secondo 3 diversi setup per coprire l'intera area del ponte.



## Grafico delle frequenze FDD

Sono evidenziati i picchi in corrispondenza dei modi rilevati, con l'utilizzo della tecnica del *Peak-Picking (Frequency Domain)*.



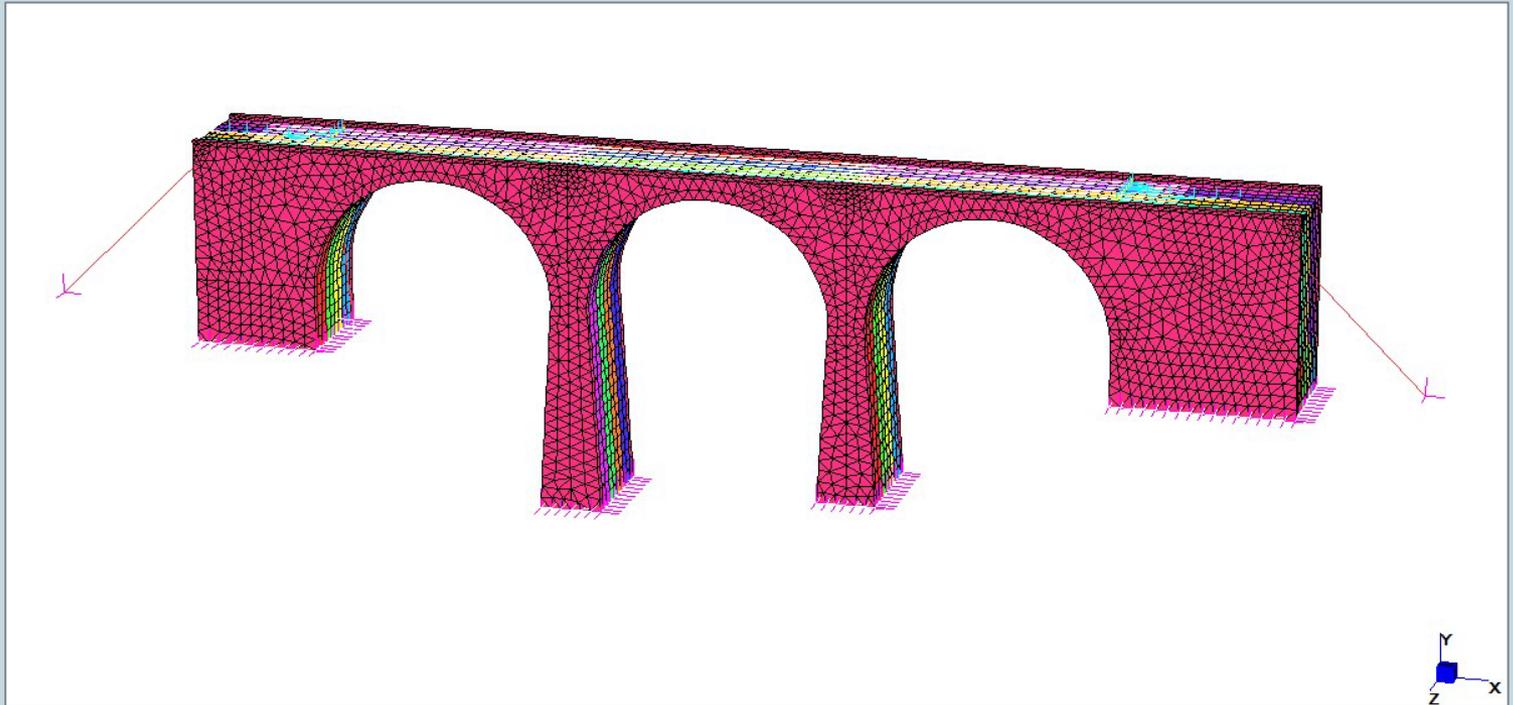
## Grafico delle frequenze SSI

Sono evidenziati i picchi in corrispondenza dei modi rilevati, con l'utilizzo della tecnica della *Stochastic Subspace Identification (Time Domain)*.

| Mode | Identification Method |        |        |        |        |        |
|------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|      | FDD                   | NP FDD | SSI    |        | pLSCF  |        |
|      | f [Hz]                | f [Hz] | f [Hz] | DR [%] | f [Hz] | DR [%] |
| 1    | 4,932                 | 5,023  | 4,962  | 3,512  | 4,991  | 1,621  |
| 2    | 8,350                 | -      | 7,762  | 9,518  | -      | -      |
| 3    | 9,619                 | 9,503  | 10,118 | 1,624  | 9,675  | 0,626  |
| 4    | 10,500                | 10,598 | -      | -      | 10,590 | 0,088  |
| 5    | 11,080                | 10,730 | 10,825 | 4,084  | -      | -      |
| 6    | 11,430                | 14,509 | 14,788 | 1,141  | 12,849 | 0,722  |
| 7    | 16,650                | 15,572 | 17,675 | 2,328  | -      | -      |
| 8    | 18,600                | 17,013 | 18,977 | 4,137  | -      | -      |
| 9    | 19,240                | 20,133 | 21,438 | 5,025  | 19,045 | 0,510  |

## Confronto tra diversi metodi di identificazione

- *Frequency Domain Decomposition (FDD);*
- *Non-Parametric FDD (NP FDD);*
- *Stochastic Subspace Identification (SSI);*
- *Poly-reference Least Squares Complex Frequency domain (pLSCF).*

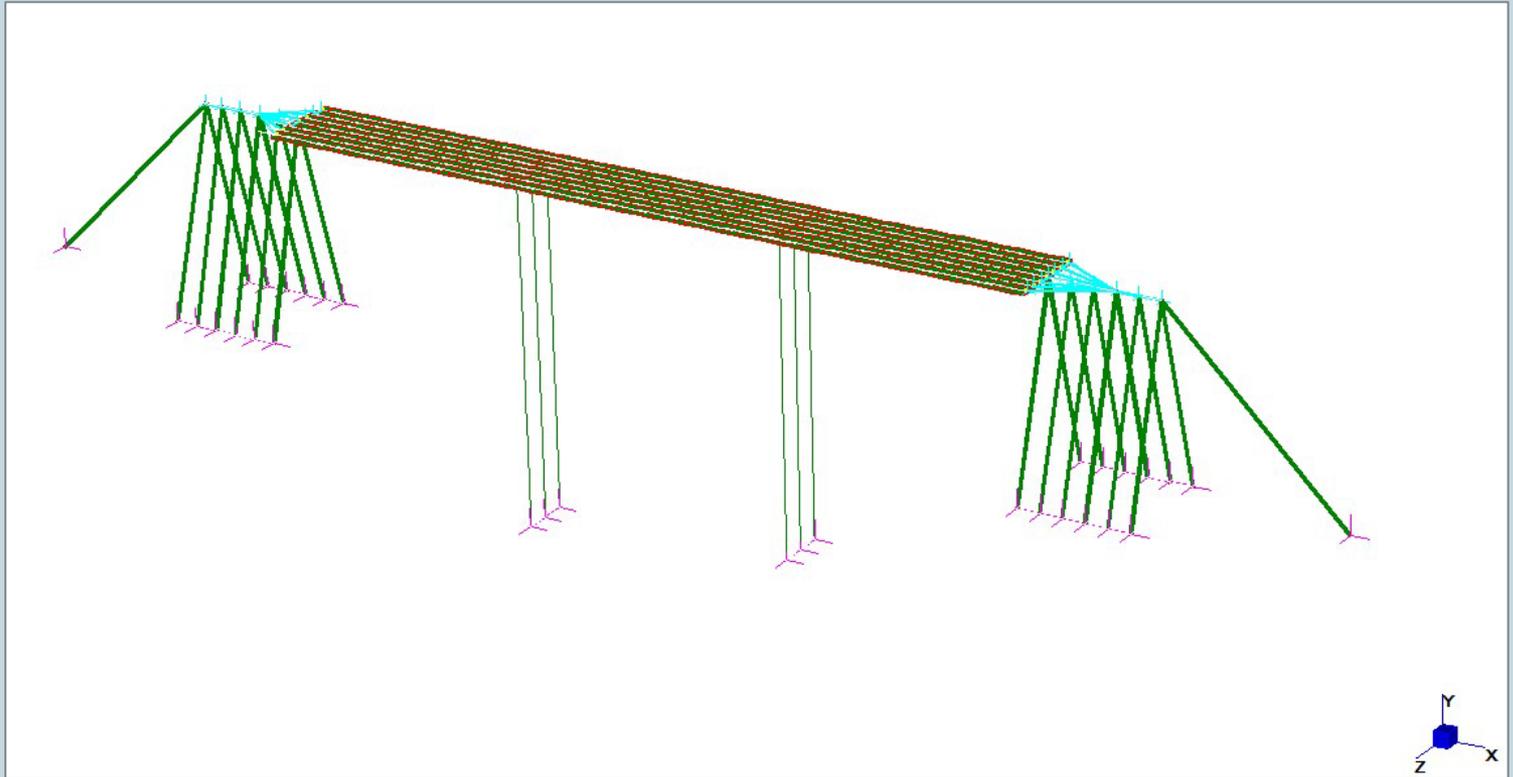


## Modello FEM

Software utilizzato: **Straus7**

Pile, spalle, timpani e riempimento in muratura: **Elementi *brick***

Micropali, barre *Dywidag*, soletta integrativa in cls: **Elementi *beam***

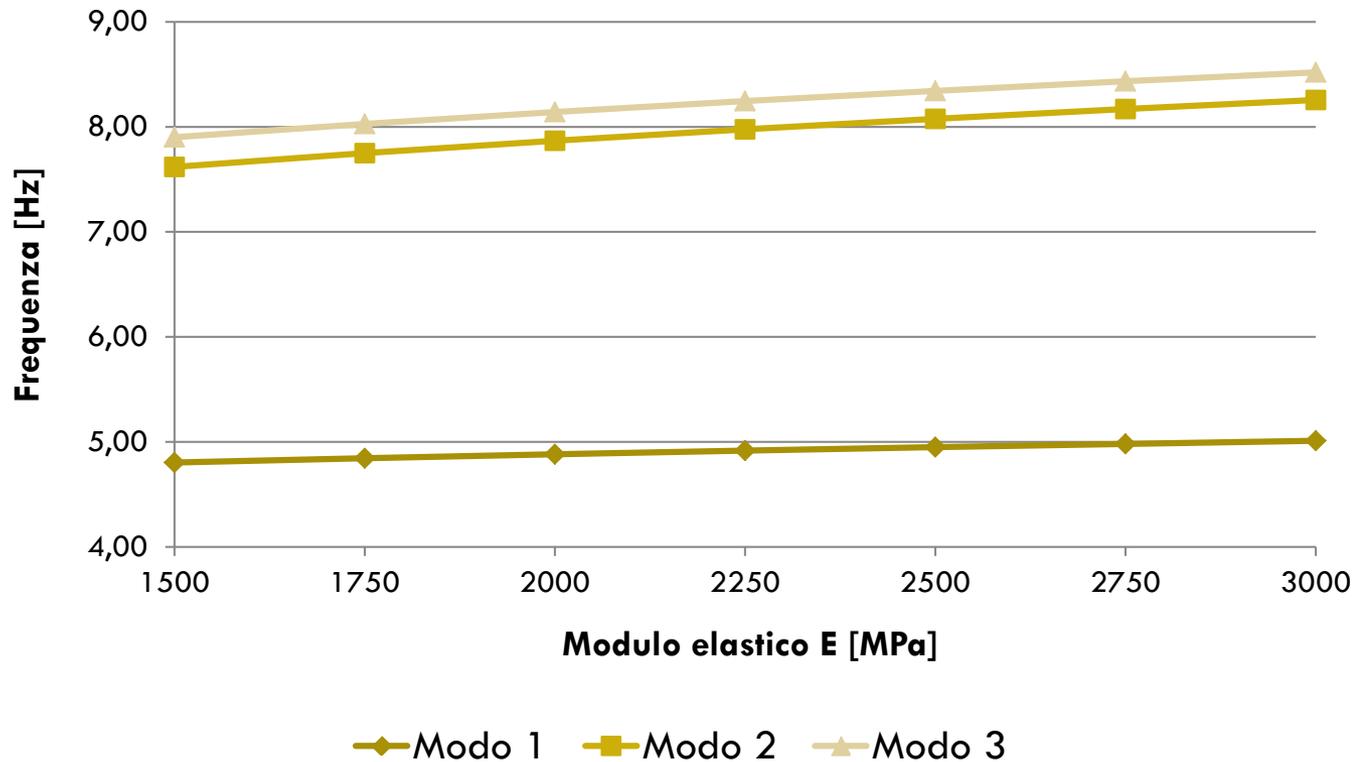


## Modello FEM: Intervento di adeguamento

Software utilizzato: **Straus7**

Pile, spalle, timpani e riempimento in muratura: **Elementi *brick***

Micropali, barre *Dywidag*, soletta integrativa in cls: **Elementi *beam***



## Studio di sensitività: Modulo elastico E

Frequenze FEM al variare del modulo elastico del riempimento, fissato il modulo elastico di spalle, pile e timpani.

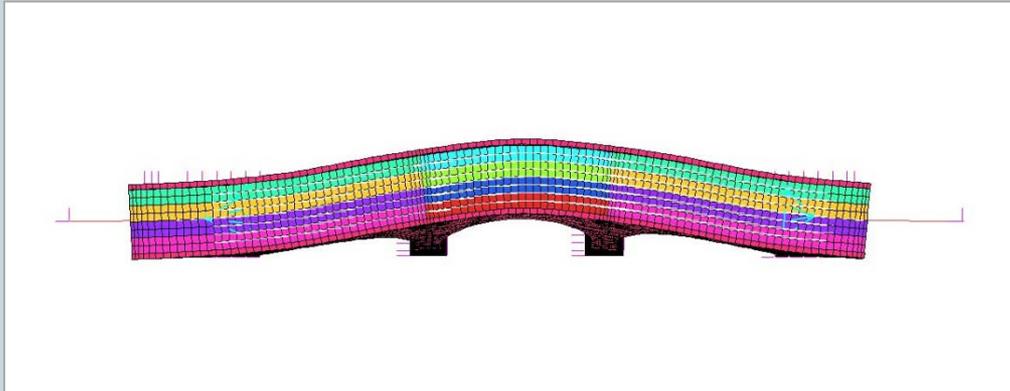
Non si sono eseguite prove sui materiali in laboratorio.

| Mode | FDD f [Hz] | Model [FEM] |              |              |
|------|------------|-------------|--------------|--------------|
|      |            | f [Hz]      | $\Delta$ [%] | MAC          |
| 1    | 4,932      | 4,924       | 0,17         | <b>0,977</b> |
| 2    | 8,350      | 7,923       | 5,39         | <b>0,620</b> |
| 3    | 9,619      | 8,202       | 17,28        | <b>0,809</b> |
| 4    | 10,500     | 10,993      | -4,48        | <b>0,825</b> |
| 5    | 11,080     | 11,193      | -1,01        | <b>0,960</b> |
| 6    | 11,430     | 12,731      | -10,22       | 0,291        |
| 7    | 16,650     | 15,992      | 4,12         | 0,906        |
| 8    | 18,600     | 16,416      | 13,31        | 0,671        |
| 9    | 19,240     | 17,174      | 12,03        | 0,466        |

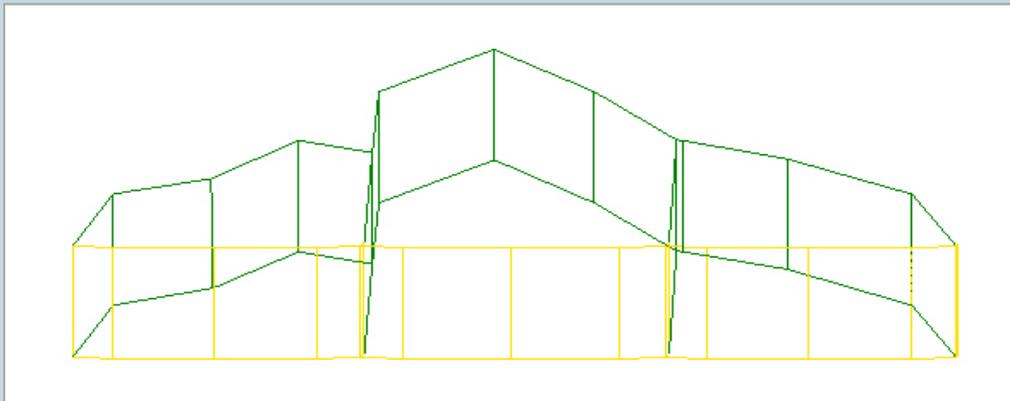
## Modal Assurance Criterion (MAC)

Il MAC fu ideato da *R.J. Allemang* e *D.L. Brown* per fornire un singolo valore numerico che desse indicazione sul **grado di correlazione tra forme modali**.

Il MAC assume **valore pari a 1** quando vi è **perfetta correlazione** modale, mentre quando le forme modali sono **totalmente scorrelate** esso assume **valore nullo**.



**MODO 1**  
**Numerico:**  
**4,92 Hz**



**MODO 1**  
**Sperimentale (FDD):**  
**4,93 Hz**

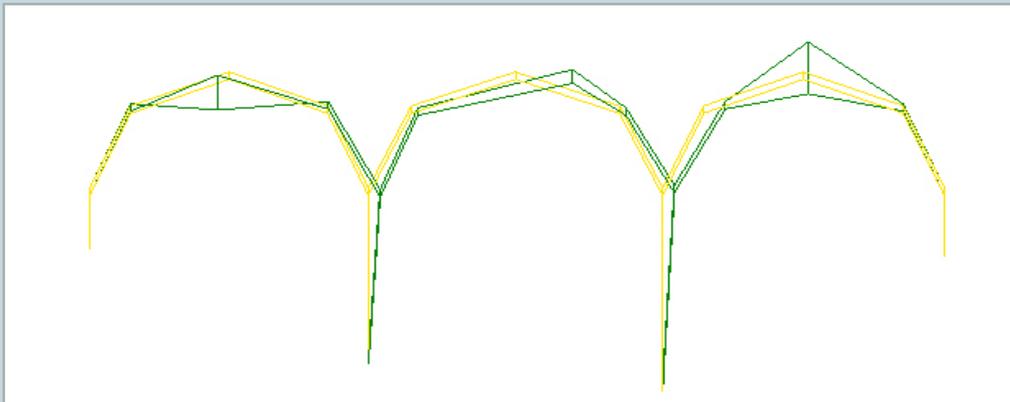
## Modi di vibrare: confronto FEM vs Exp (FDD)

Per i primi 5 modi di vibrare c'è alta correlazione tra modi sperimentali e FEM.

Il primo modo di vibrare è di tipo flessionale in direzione trasversale, il secondo è di tipo flessionale in direzione longitudinale, mentre il terzo è di tipo torsionale.



**MODO 2**  
**Numerico:**  
**7,92 Hz**

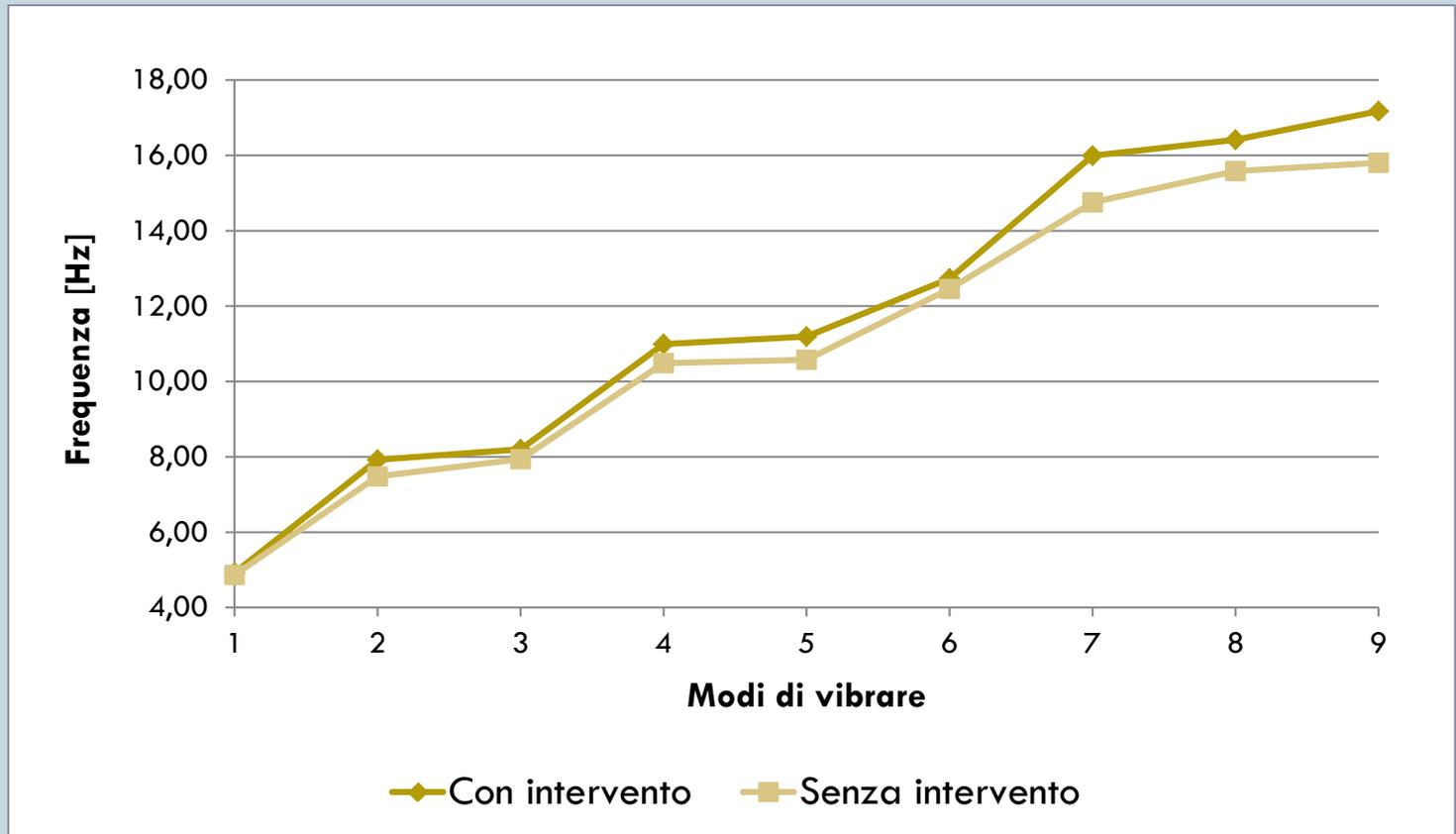


**MODO 2**  
**Sperimentale (FDD):**  
**8,35 Hz**

## Modi di vibrare: confronto FEM vs Exp (FDD)

Per i primi 5 modi di vibrare c'è alta correlazione tra modi sperimentali e FEM.

Il primo modo di vibrare è di tipo flessionale in direzione trasversale, il secondo è di tipo flessionale in direzione longitudinale, mentre il terzo è di tipo torsionale.



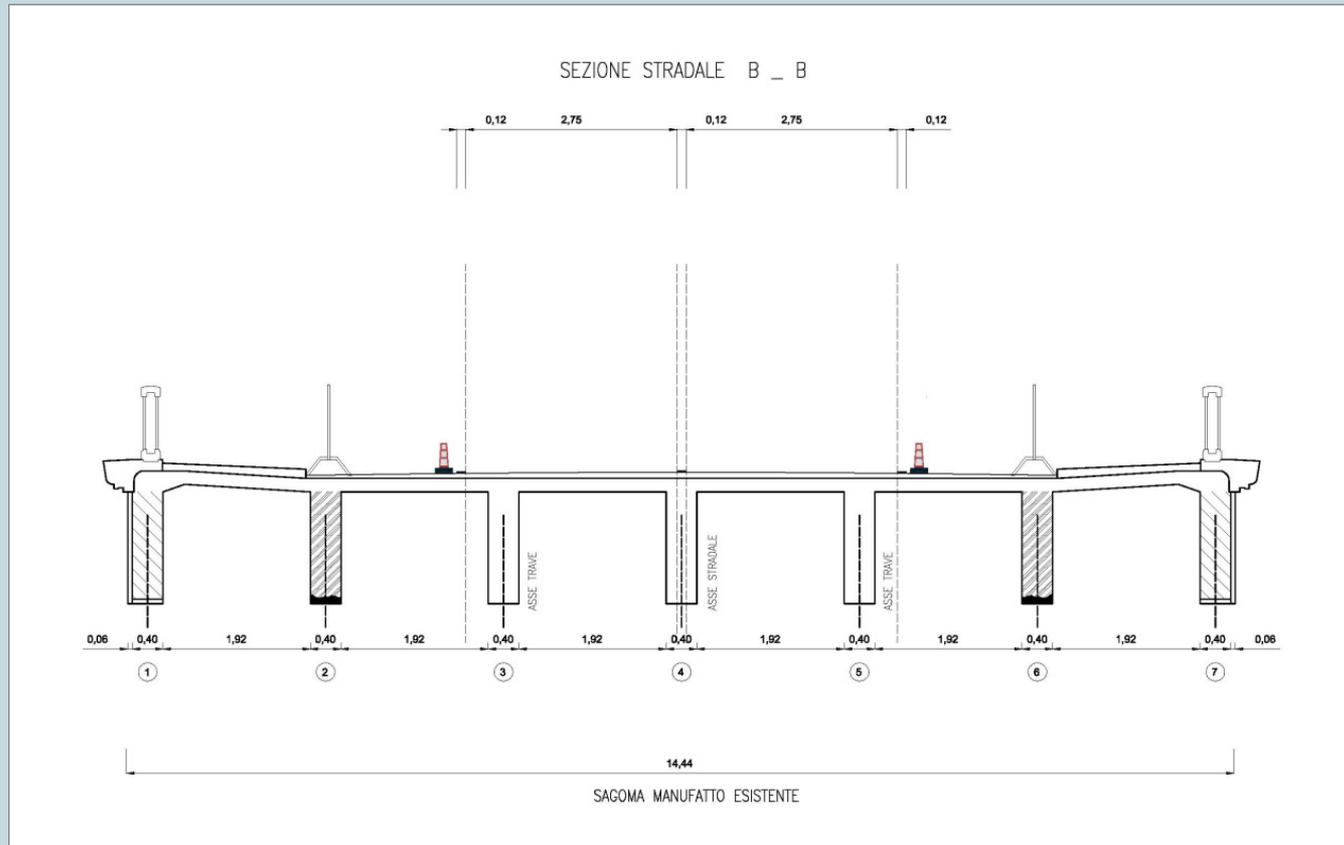
## Confronto frequenze FEM con e senza intervento

In termini di **frequenze naturali** FEM, si riscontra una differenza media del **4,20%** tra il modello pre-intervento e quello post-intervento.

Diminuiscono inoltre del **4%** anche le **deformazioni trasversali**.

# Ponte Nuovo del Popolo, Verona





## Sopralluogo: Rilievi geometrici

Il primo sopralluogo *in situ* si è svolto il giorno **6 giugno 2011**, all'interno di un progetto di collaborazione con l'**Amministrazione Comunale di Verona**.

Il rilievo ha riguardato la geometria degli elementi strutturali, la presenza e la geometria delle armature (*FerroScan*), l'identificazione dello schema statico.

| Numero livello | Proprietà degrado        |
|----------------|--------------------------|
| 1              | Degrado assente o minimo |
| 2              | Degrado leggero          |
| 3              | Degrado medio            |
| 4              | Degrado medio-alto       |
| 5              | Degrado massimo          |

- Definizione di una scala di valori per la valutazione del degrado;**
- Ispezione visiva e strumentale;
- Assegnazione di un valore estimativo dello stato di ammaloramento per ogni elemento strutturale.

## Sopralluogo: Quadro generale del danno

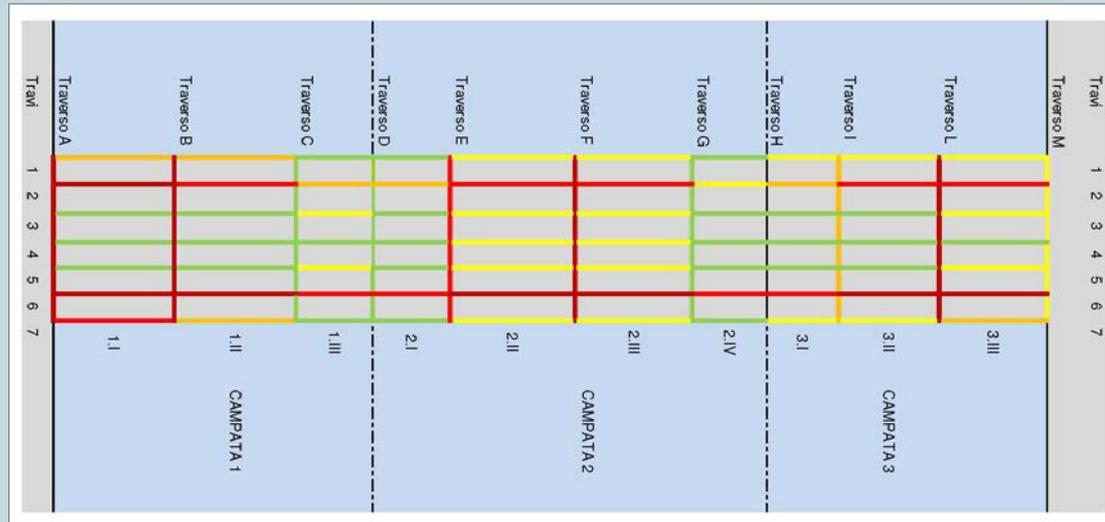
Il sopralluogo effettuato nei giorni 6 e 7 giugno 2011 ha avuto anche l'obiettivo di ottenere un inquadramento dello **stato attuale di degrado** della **struttura** e dei **materiali**.



- Definizione di una scala di valori per la valutazione del degrado;
- Ispezione visiva e strumentale;**
- Assegnazione di un valore estimativo dello stato di ammaloramento per ogni elemento strutturale.

## Sopralluogo: Quadro generale del danno

Il sopralluogo effettuato nei giorni 6 e 7 giugno 2011 ha avuto anche l'obiettivo di ottenere un inquadramento dello **stato attuale di degrado** della **struttura** e dei **materiali**.



| N° liv. | Proprietà degrado        |
|---------|--------------------------|
| 5       | Degrado massimo          |
| 4       | Degrado medio-alto       |
| 3       | Degrado medio            |
| 2       | Degrado leggero          |
| 1       | Degrado assente o minimo |

- ❑ Definizione di una scala di valori per la valutazione del degrado;
- ❑ Ispezione visiva e strumentale;
- ❑ **Assegnazione di un valore estimativo dello stato di ammaloramento per ogni elemento strutturale.**

## Sopralluogo: Quadro generale del danno

Il sopralluogo effettuato nei giorni 6 e 7 giugno 2011 ha avuto anche l'obiettivo di ottenere un inquadramento dello **stato attuale di degrado** della **struttura** e dei **materiali**.



- Resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo;
- Modulo elastico del calcestruzzo;
- Prove sclerometriche sul calcestruzzo;
- Resistenza a trazione dell'acciaio;
- Modulo elastico dell'acciaio.

## Caratterizzazione materiali: Prove di laboratorio

Il 7 giugno 2011 durante i sopralluoghi sono stati effettuati **10 carotaggi sul calcestruzzo** e si sono estratte **4 barre di armatura**.

I parametri che caratterizzano i materiali sono stati utilizzati nella modellazione numerica e nelle verifiche.



## Test accelerometrici *in situ*

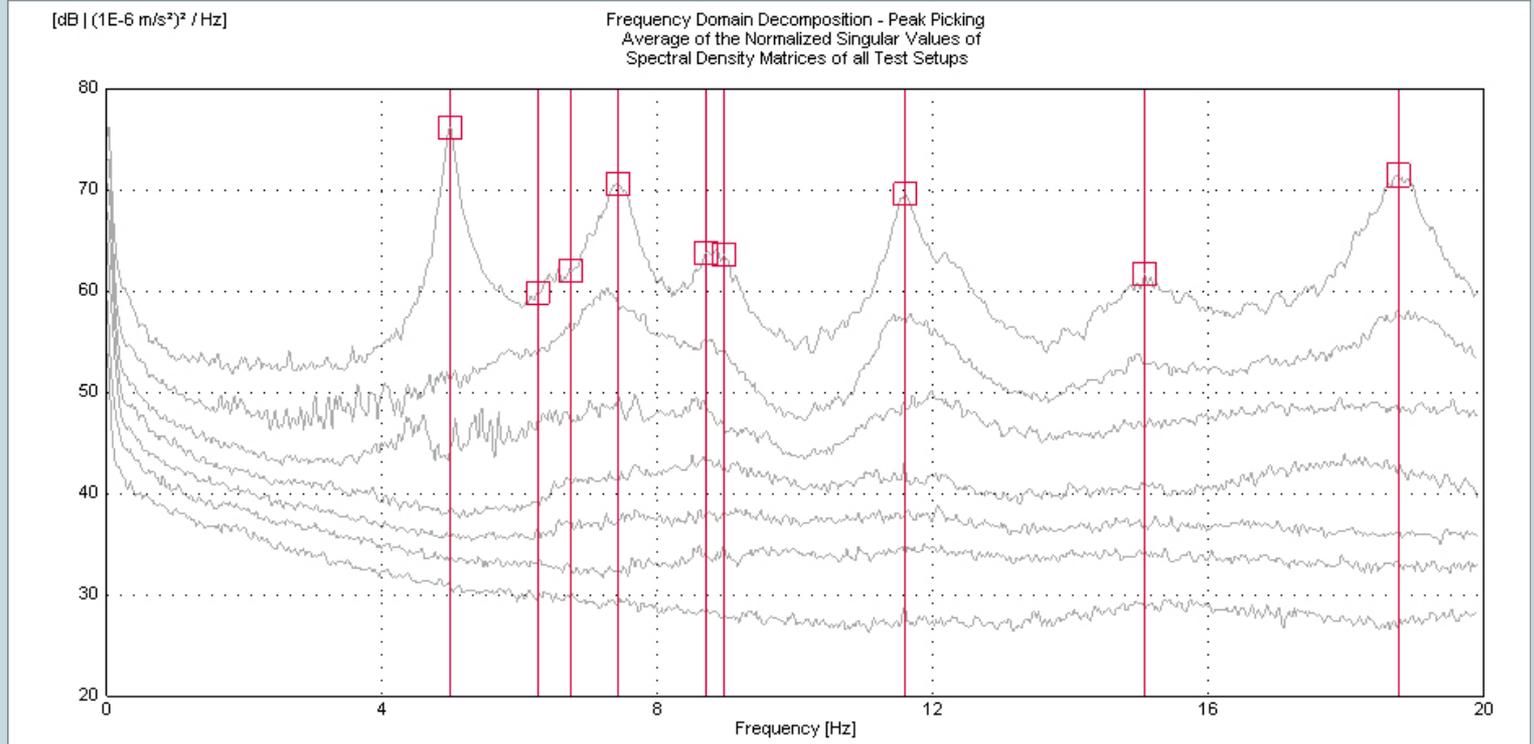
La campagna di acquisizione si è svolta nei giorni **11 e 12 giugno 2011**, all'interno di un progetto di collaborazione con il **Comune di Verona**.

Si è utilizzata la tecnica di **Output-Only Identification**: sola eccitazione ambientale.



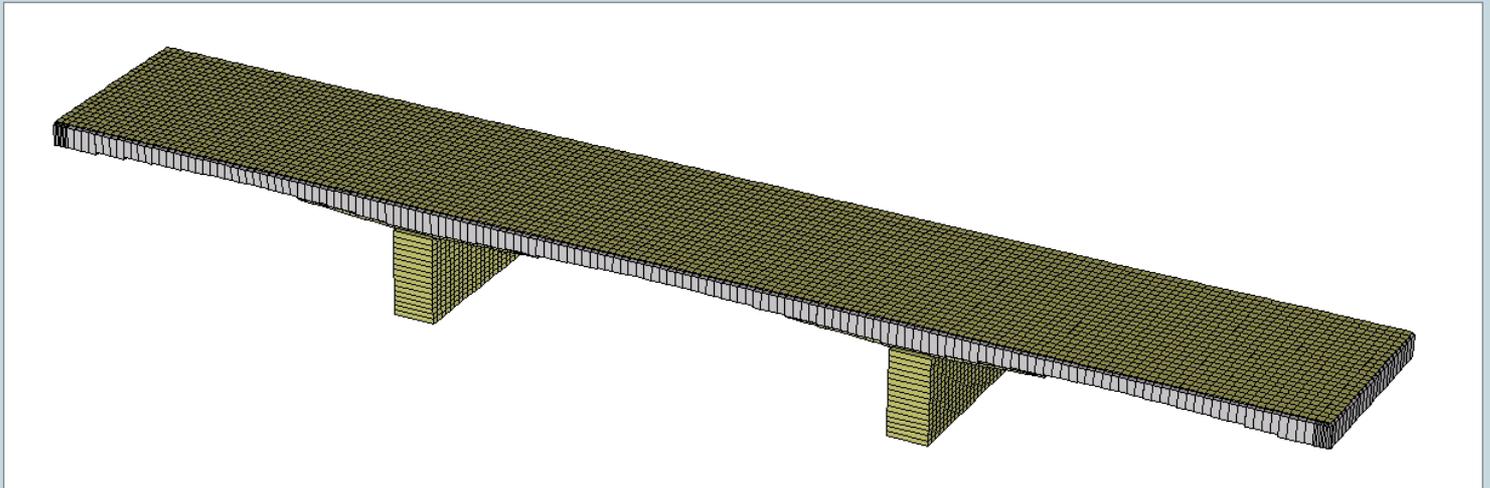
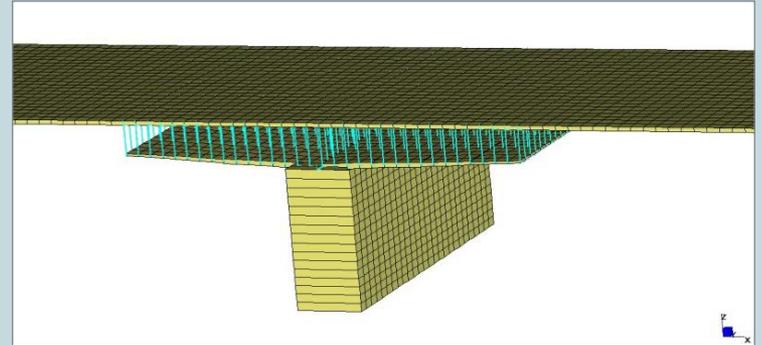
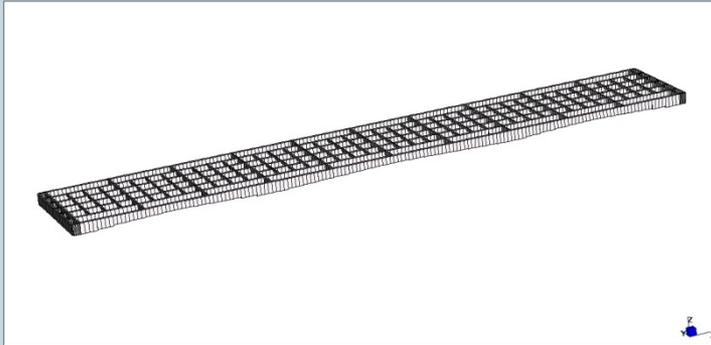
## Fissaggio degli accelerometri sulla sede stradale

Per motivi logistici durante i due giorni di acquisizione dei dati dinamici si è dovuto ricorrere ad una riduzione della carreggiata transitabile, da due ad una sola corsia.



## Grafico delle frequenze FDD

Sono evidenziati i picchi in corrispondenza dei modi rilevati, con l'utilizzo della tecnica del *Peak-Picking (Frequency Domain)*.



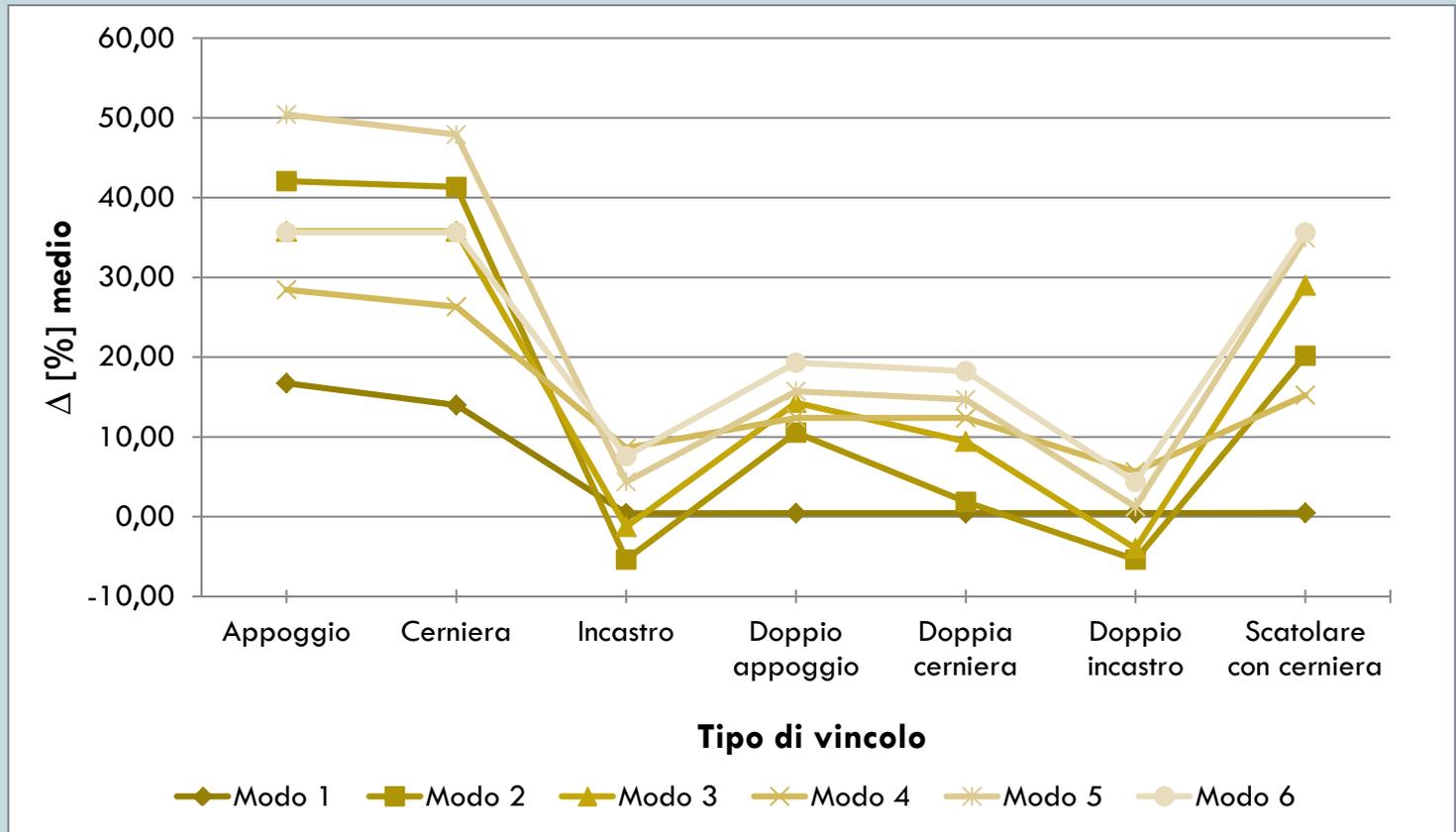
## Modello FEM

Software utilizzato: **Straus7**

Travi, traversi, travetti: **Elementi beam;**

Soletta d'impalcato, pile: **Elementi plate;**

Collegamenti rigidi tra soletta superiore e inferiore: **Rigid link.**



## Analisi parametriche FEM: Vincoli sulle spalle

Il modello FEM presentava in origine una **rigidezza inferiore** a quella identificata tramite i test accelerometrici.

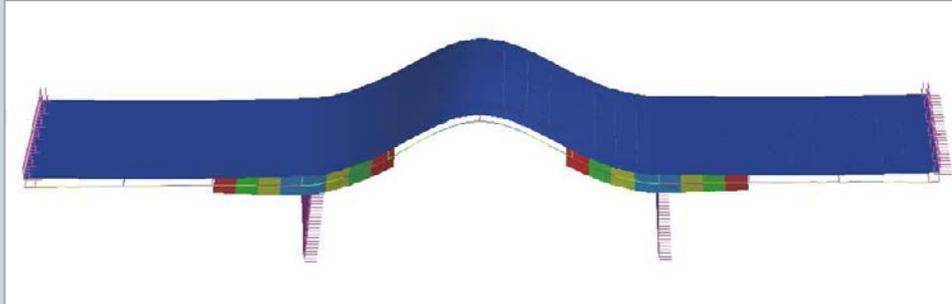
Si è valutata quindi l'influenza di una possibile modifica nella **modellazione dei vincoli** del sistema.

| Mode | FDD f [Hz] | Model [FEM] |              |              |
|------|------------|-------------|--------------|--------------|
|      |            | f [Hz]      | $\Delta$ [%] | MAC          |
| 1    | 4,980      | 4,958       | 0,44         | <b>0,852</b> |
| 2    | 6,250      | 5,654       | 10,55        | <b>0,866</b> |
| 3    | 6,738      | 5,895       | 14,29        | <b>0,827</b> |
| 4    | 7,422      | 6,605       | 12,37        | <b>0,920</b> |
| 5    | 8,691      | 7,510       | 15,73        | <b>0,860</b> |
| 6    | 8,960      | 7,510       | 19,31        | <b>0,760</b> |

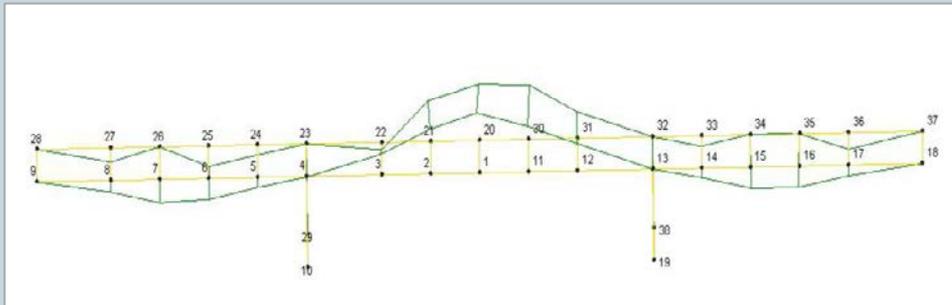
## Modal Assurance Criterion (MAC)

Il MAC fu ideato da *R.J. Allemang* e *D.L. Brown* per fornire un singolo valore numerico che desse indicazione sul **grado di correlazione tra forme modali**.

Il MAC assume **valore pari a 1** quando vi è **perfetta correlazione** modale, mentre quando le forme modali sono **totalmente scorrelate** esso assume **valore nullo**.



**MODO 1**  
**Numerico:**  
**4,96 Hz**



**MODO 1**  
**Sperimentale (FDD):**  
**4,98 Hz**

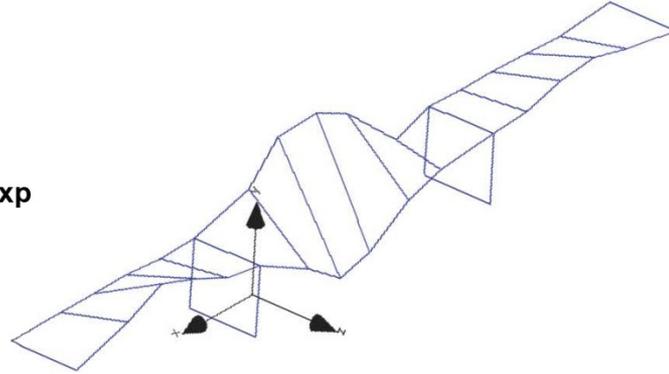
## Modi di vibrare: confronto FEM vs Exp (FDD)

Per i primi 6 modi di vibrare c'è alta correlazione tra modi sperimentali e FEM.

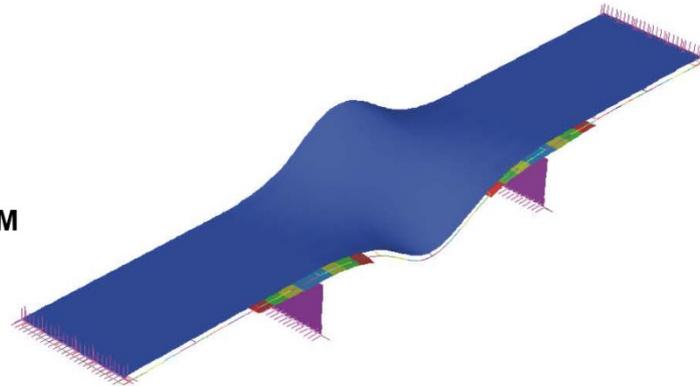
Modo 1, 2 e 3: **Flessione;**

Modo 4, 5 e 6: **Torsione.**

4° modo Exp  
7,422 Hz



4° modo FEM  
6,605 Hz



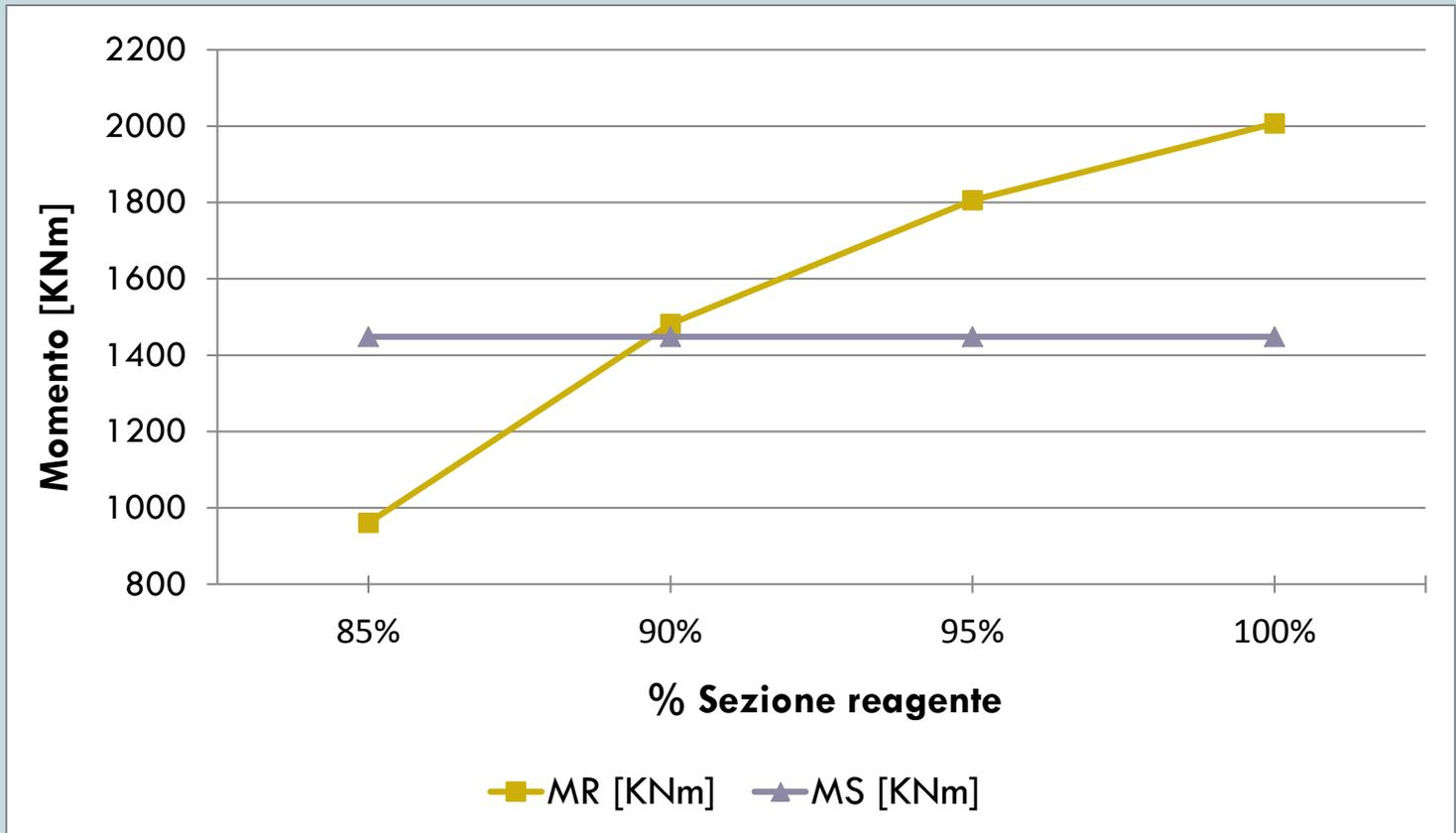
**MODO 4**  
**Numerico:**  
**6,61 Hz**

**MODO 4**  
**Sperimentale (FDD):**  
**7,42 Hz**

## Modi di vibrare: confronto FEM vs Exp (FDD)

Per i primi 6 modi di vibrare c'è alta correlazione tra modi sperimentali e FEM.

Il primo modo di vibrare è di tipo flessionale in direzione trasversale, il secondo è di tipo flessionale in direzione longitudinale, mentre il terzo è di tipo torsionale.



## Valutazione di sicurezza: TRAVE 6

Si è eseguita una valutazione di sicurezza statica e dinamica sugli elementi maggiormente ammalorati.

Confronto tra  $M$  resistente e  $M$  sollecitante **al variare della sezione reagente** per la Trave 6, in corrispondenza della mezzera della campata centrale.

# Conclusioni

## PONTE SUL TORRENTE GRESAL, Belluno

**Calibrazione modello FEM** tramite I.D.  
avvenuta con **successo**

**L'intervento di adeguamento funziona:**

- Stabilizzazione del cinematismo di collasso dell'arco nel suo piano di appartenenza;
- Stabilizzazione del cinematismo di collasso a ribaltamento della muratura fuori piano;
  - Aumento medio del 4,2% delle frequenze naturali;
- Diminuzione del 4% delle deformazioni trasversali massime.

# Conclusioni

## PONTE NUOVO DEL POPOLO, Verona

**Calibrazione modello FEM** tramite I.D.  
avvenuta con **successo**

Valutazione di sicurezza statica e dinamica:

- Considerando carichi per ponti di Prima Categoria e **sezioni di progetto interamente reagenti**, il ponte risulta verificato;
- Considerando le **sezioni ammalorate parzializzate** (carbonatazione calcestruzzo, corrosione acciaio), si rende necessario un intervento.

Ipotesi per un **possibile adeguamento**:

- Interventi immediati di ripristino e rinforzo strutturale, con costi elevati;
- Limitazione dei carichi e installazione di un sistema di monitoraggio continuo, con costi relativamente bassi.