



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

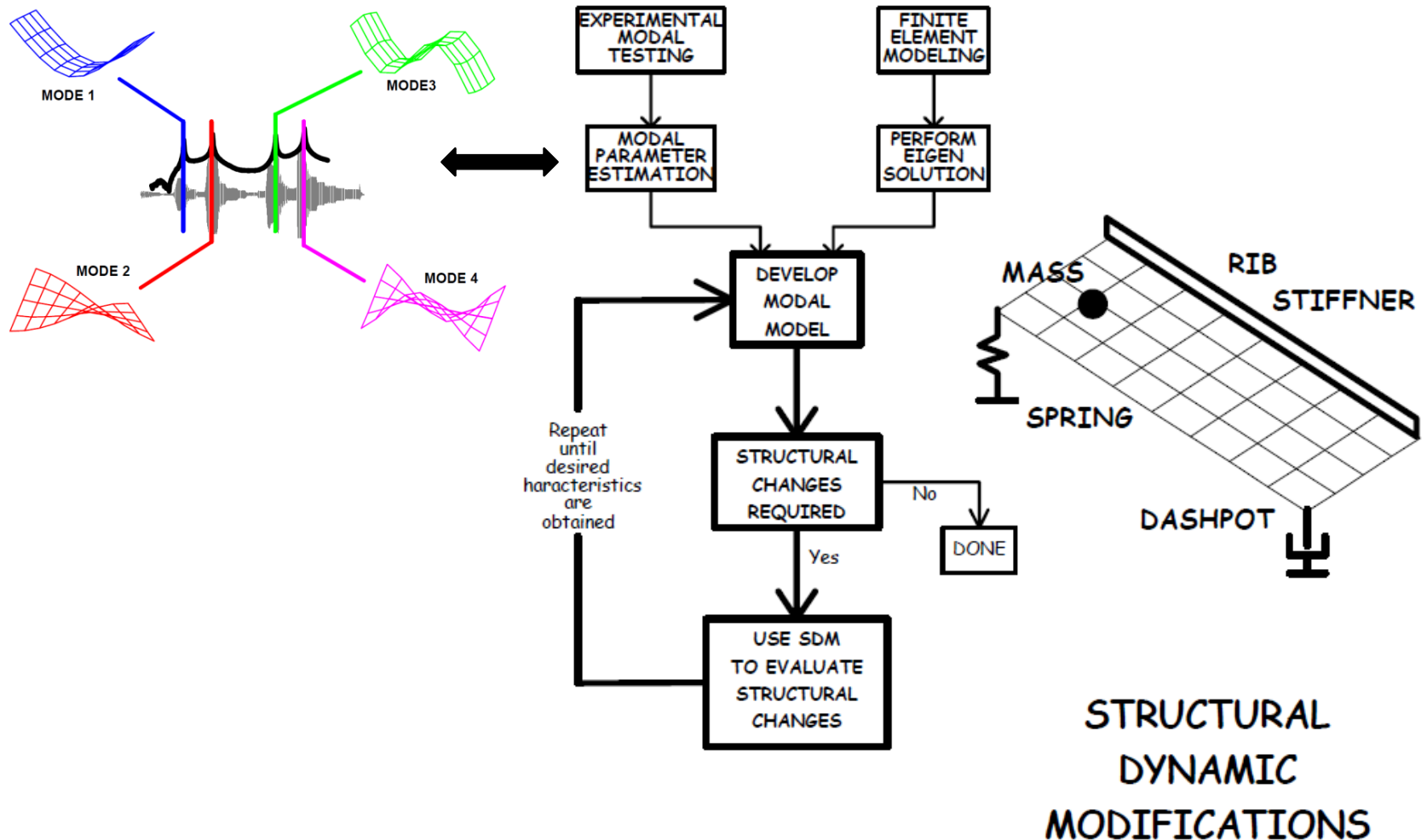
TRASDUTTORI DI SPOSTAMENTO, ACCELEROMETRI

ANALIZZATORE

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

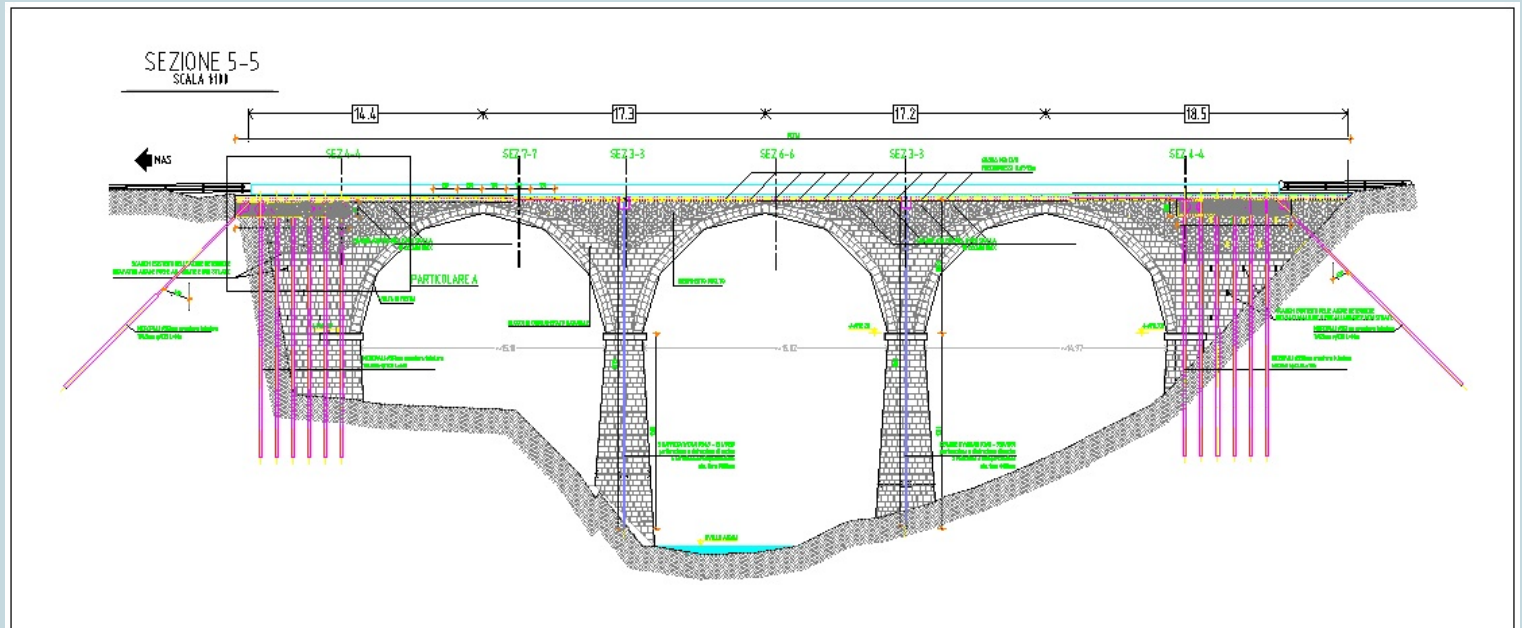
FREQUENZE, RAPPORTI DI SMORZAMENTO, MODI

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

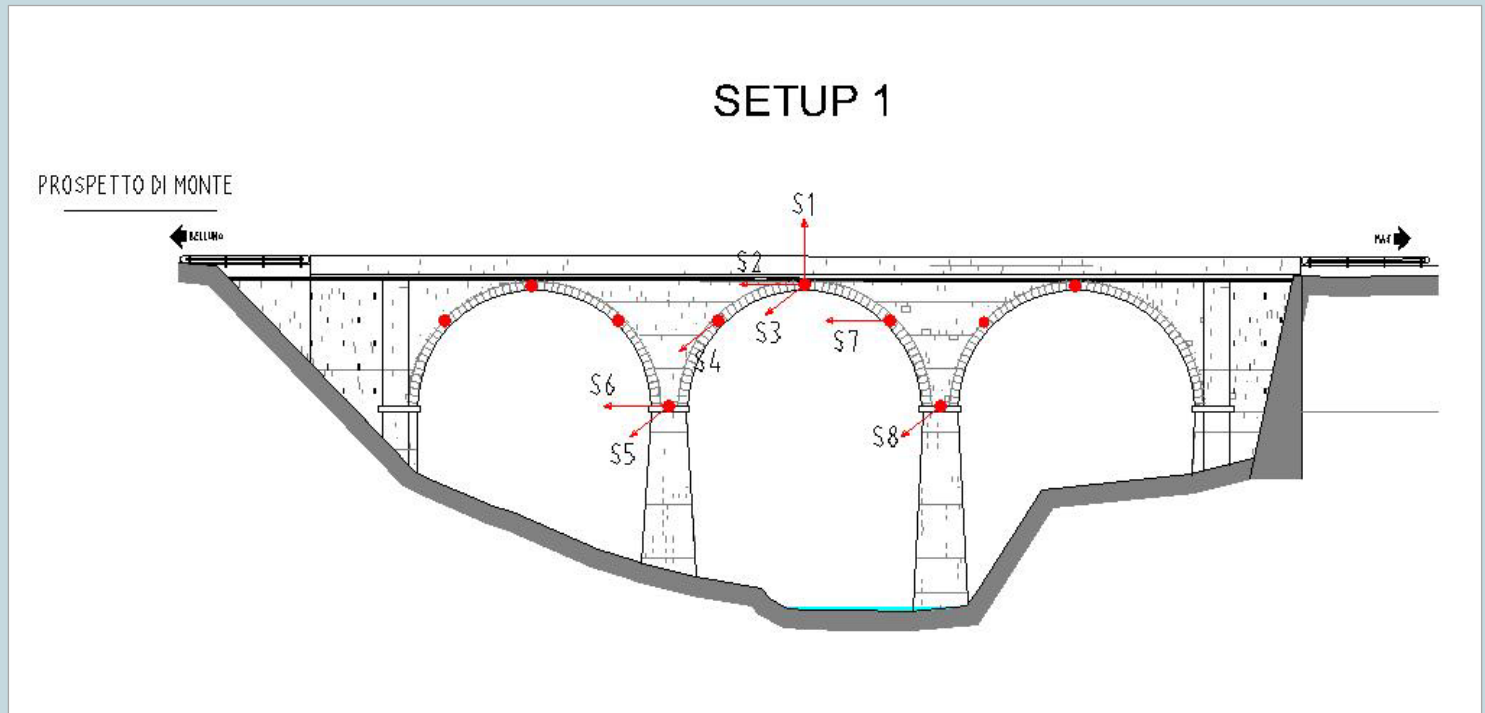
Attrezzatura: **8 accelerometri piezoelettrici** ad alta sensibilità (risoluzione di $6 \mu\text{g}$ m/s^2), in grado di registrare le vibrazioni nell'intervallo 0-100Hz.

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



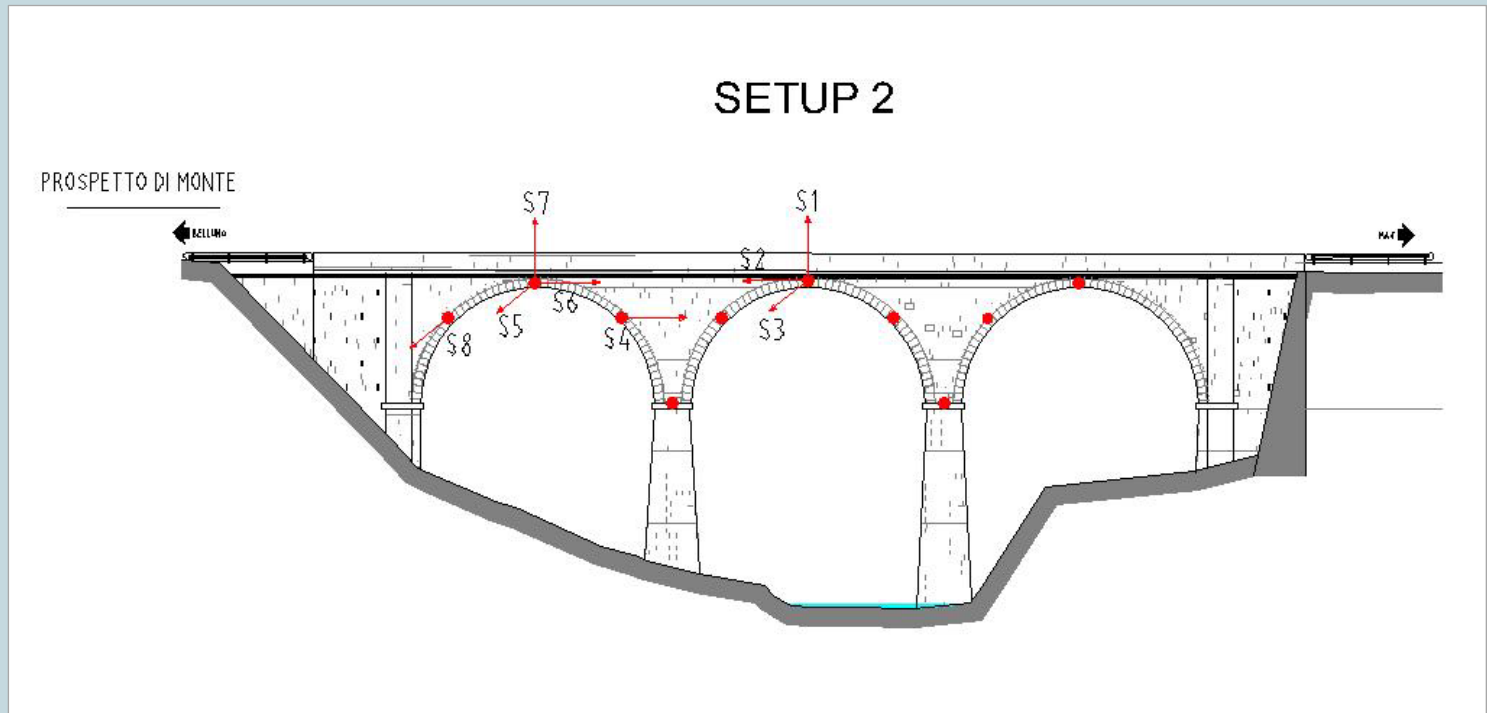
Trasduttori accelerometrici

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



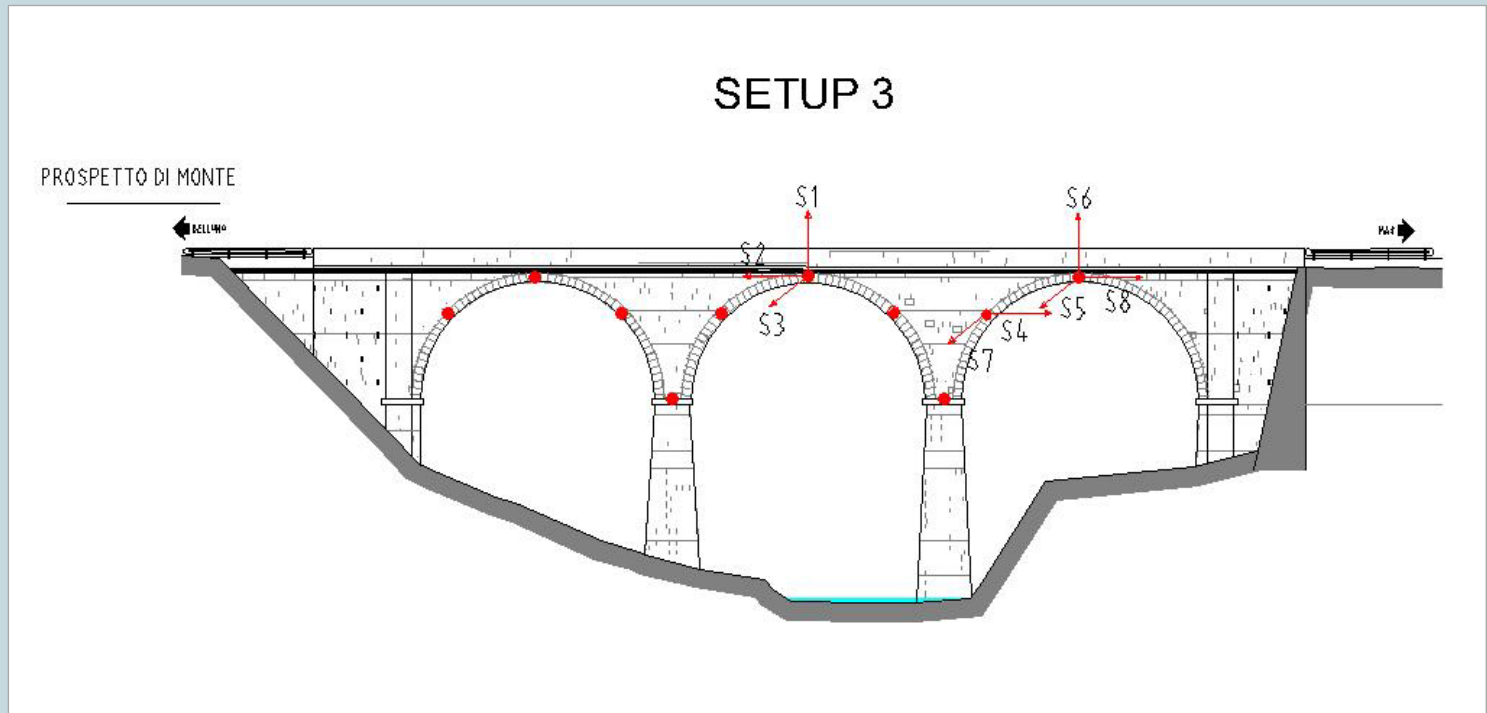
Setup 1

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.

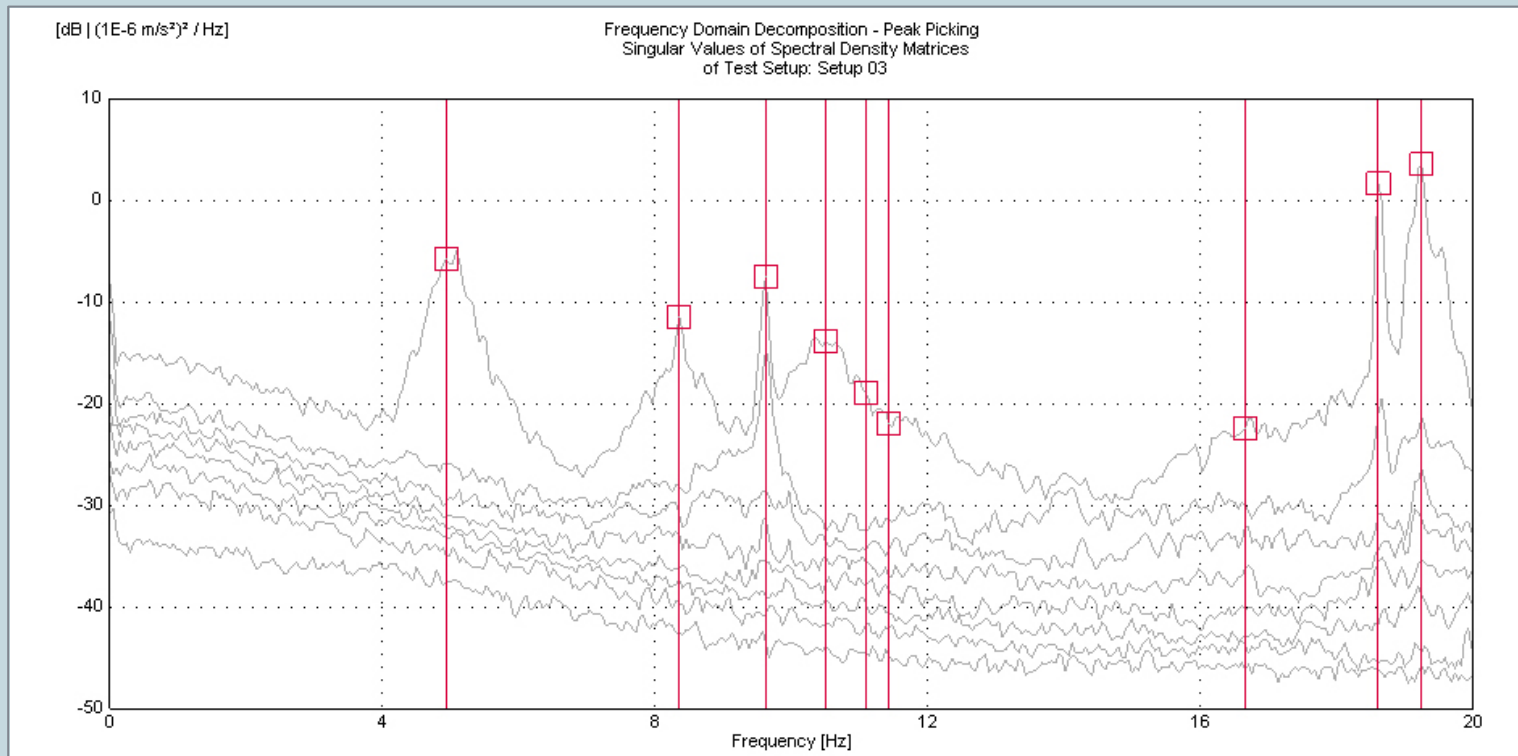


Grafico delle frequenze FDD

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

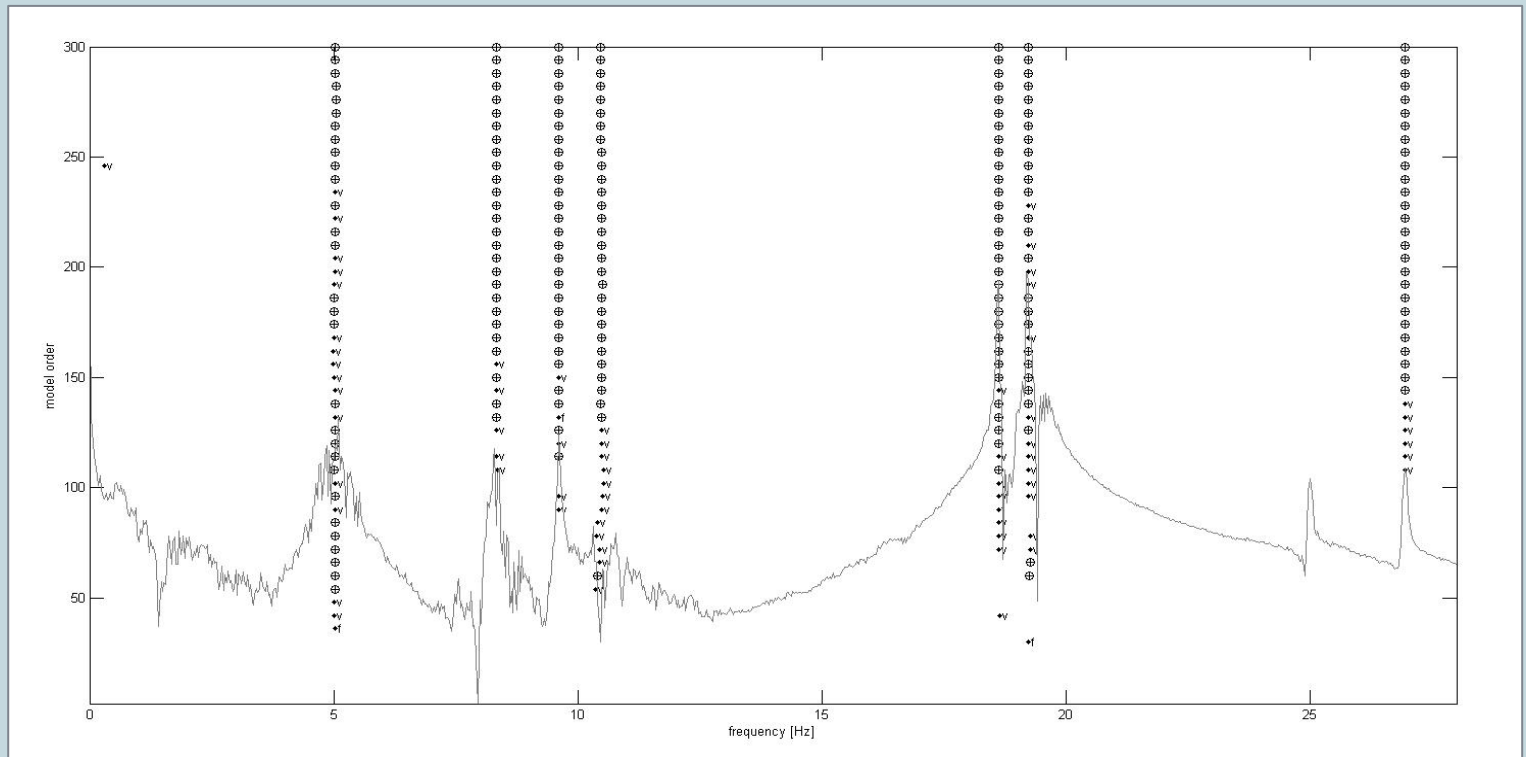


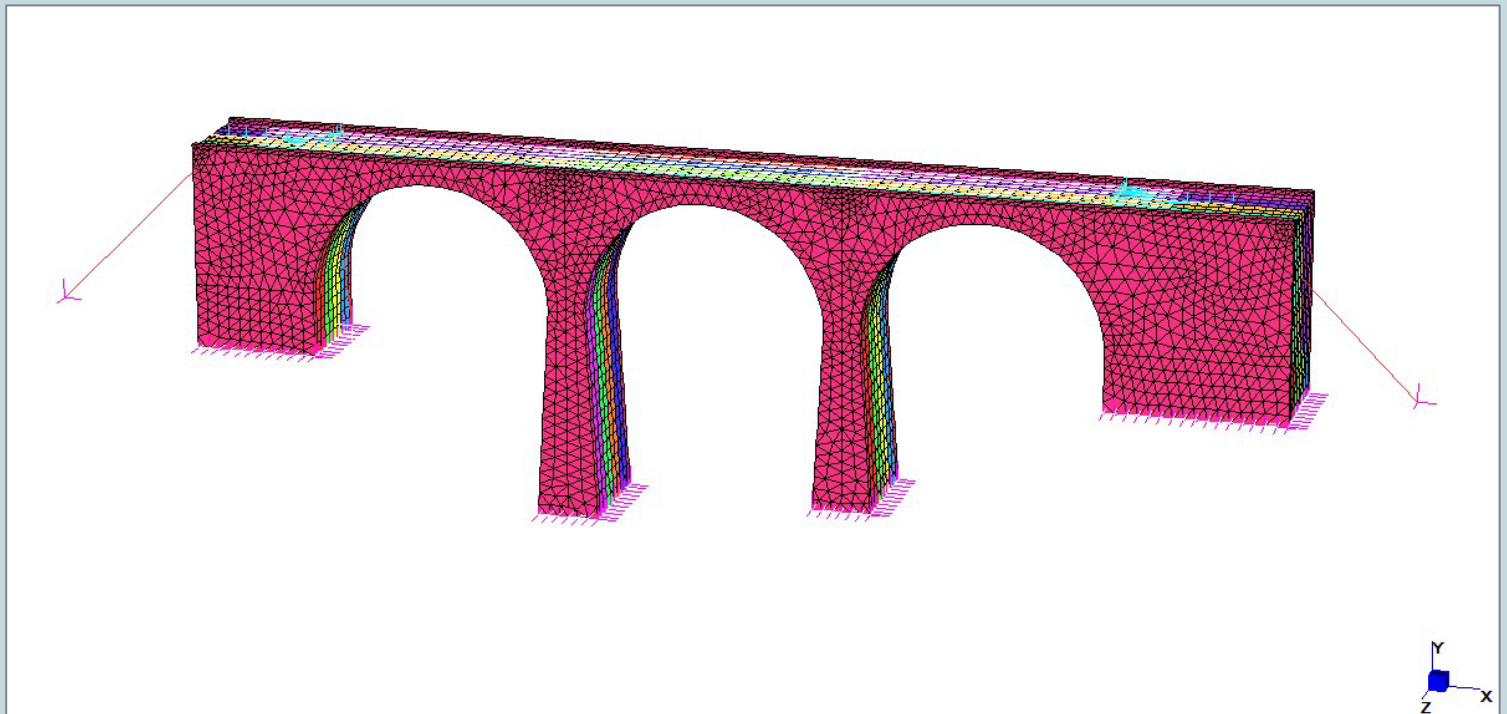
Grafico delle frequenze SSI

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).*

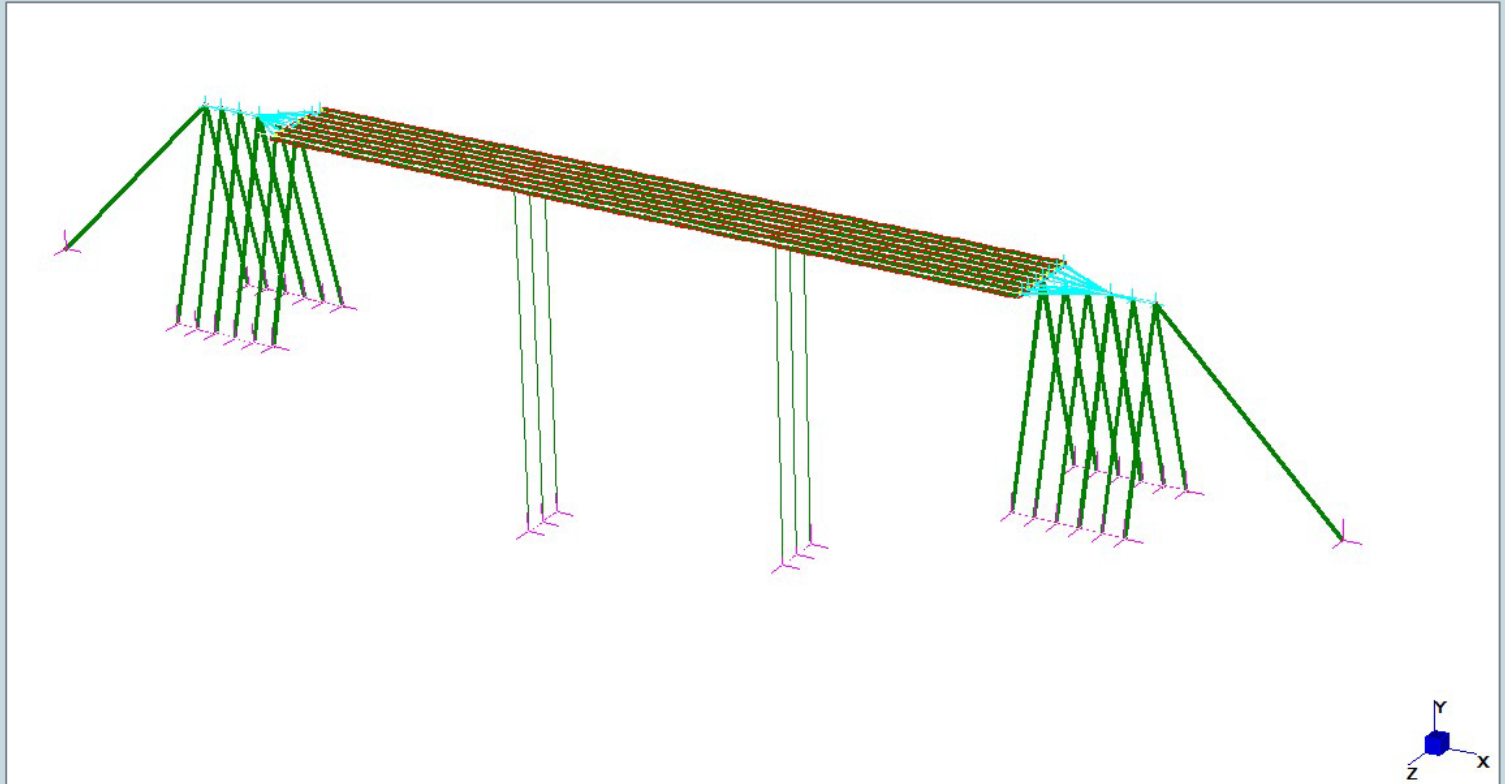


Modello FEM

Software utilizzato: **Straus7**

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

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

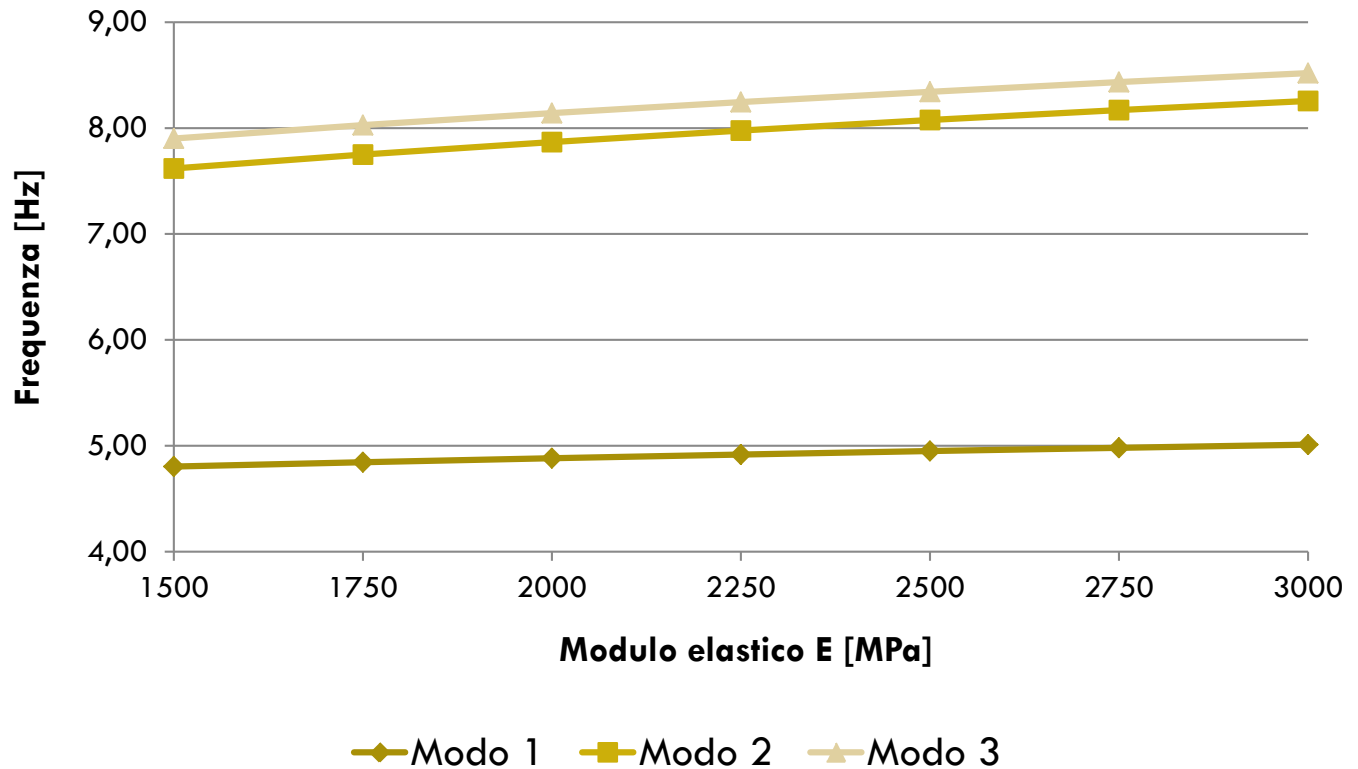


Modello FEM: Intervento di adeguamento

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.

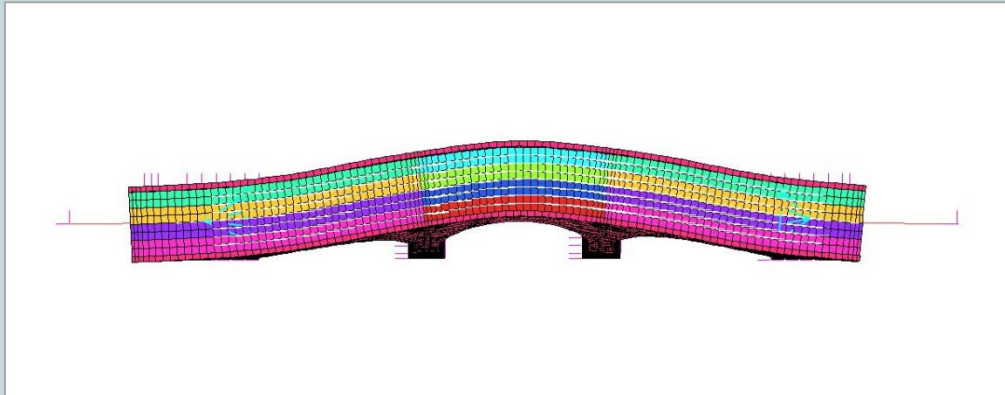
Non si sono eseguite prove sui materiali in laboratorio.

Mode	FDD f [Hz]	Model [FEM]		
		f [Hz]	Δ [%]	MAC
1	4,932	4,924	0,17	0,977
2	8,350	7,923	5,39	0,620
3	9,619	8,202	17,28	0,809
4	10,500	10,993	-4,48	0,825
5	11,080	11,193	-1,01	0,960
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

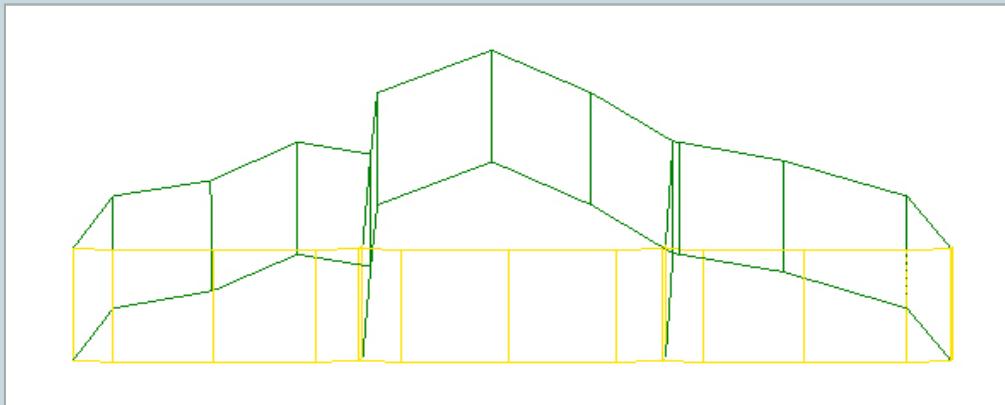
Modal Assurance Criterion (MAC)

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

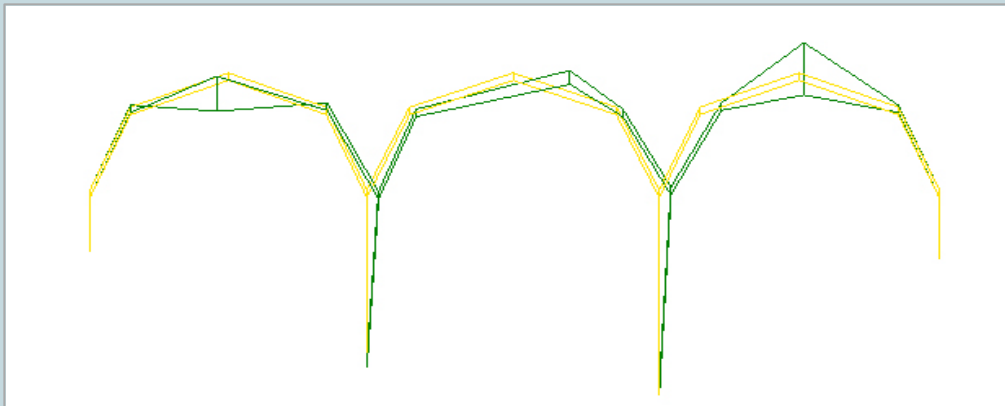
Modi di vibrare: confronto FEM vs Exp (FDD)

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

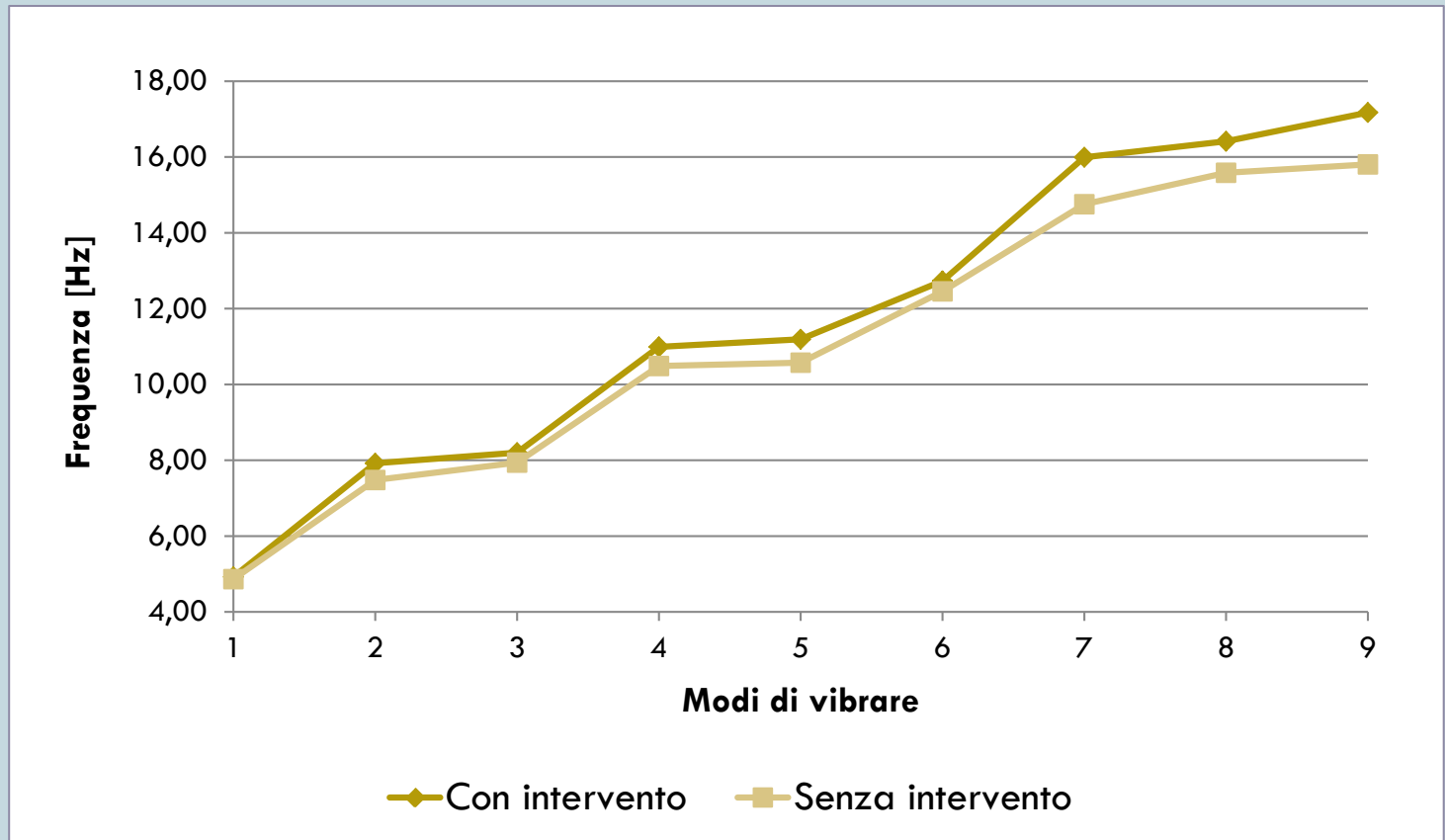


MODO 2
Sperimentale (FDD):
8,35 Hz

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.



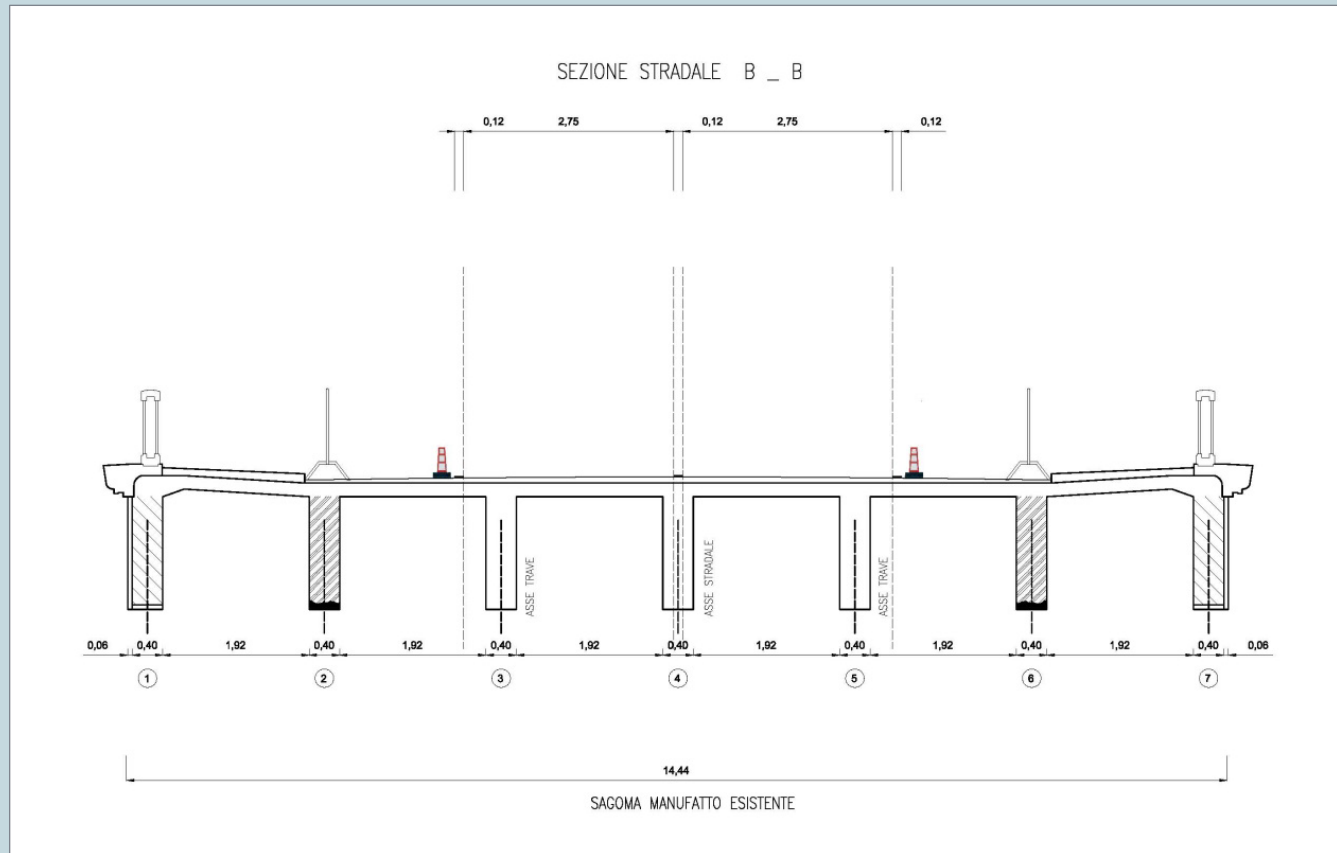
Confronto frequenze FEM con e senza intervento

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

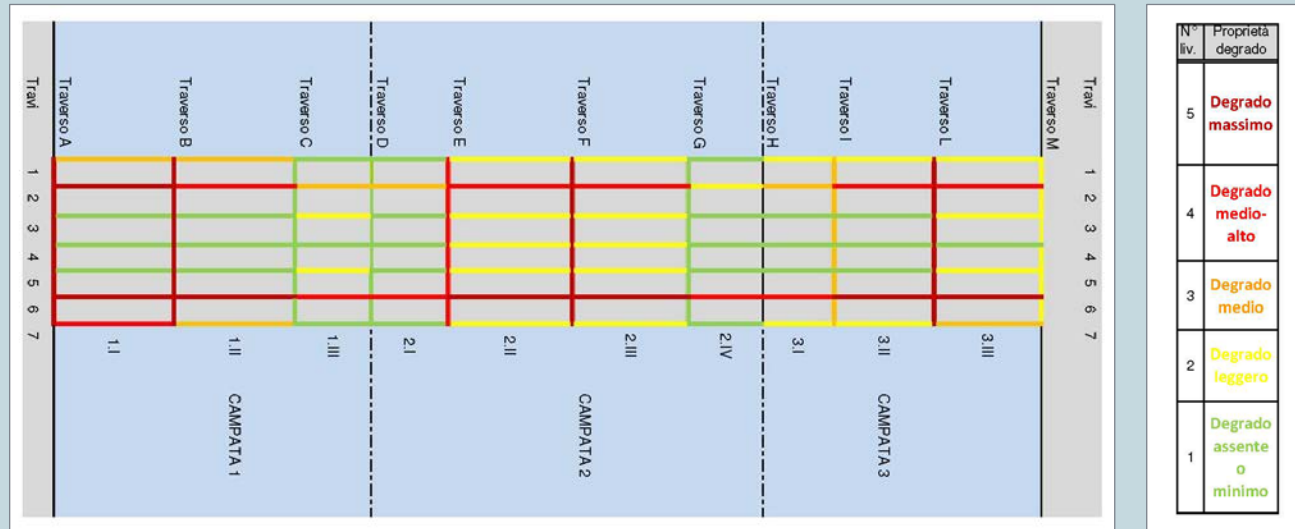
Il sopralluogo effettuato nei giorni 6 e 7 giugno 2011 ha avuto anche l'obiettivo di ottenere un inquadramento dello **stato attuale di degrado** della **struttura** e dei **materiali**.



- 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**.



- 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.

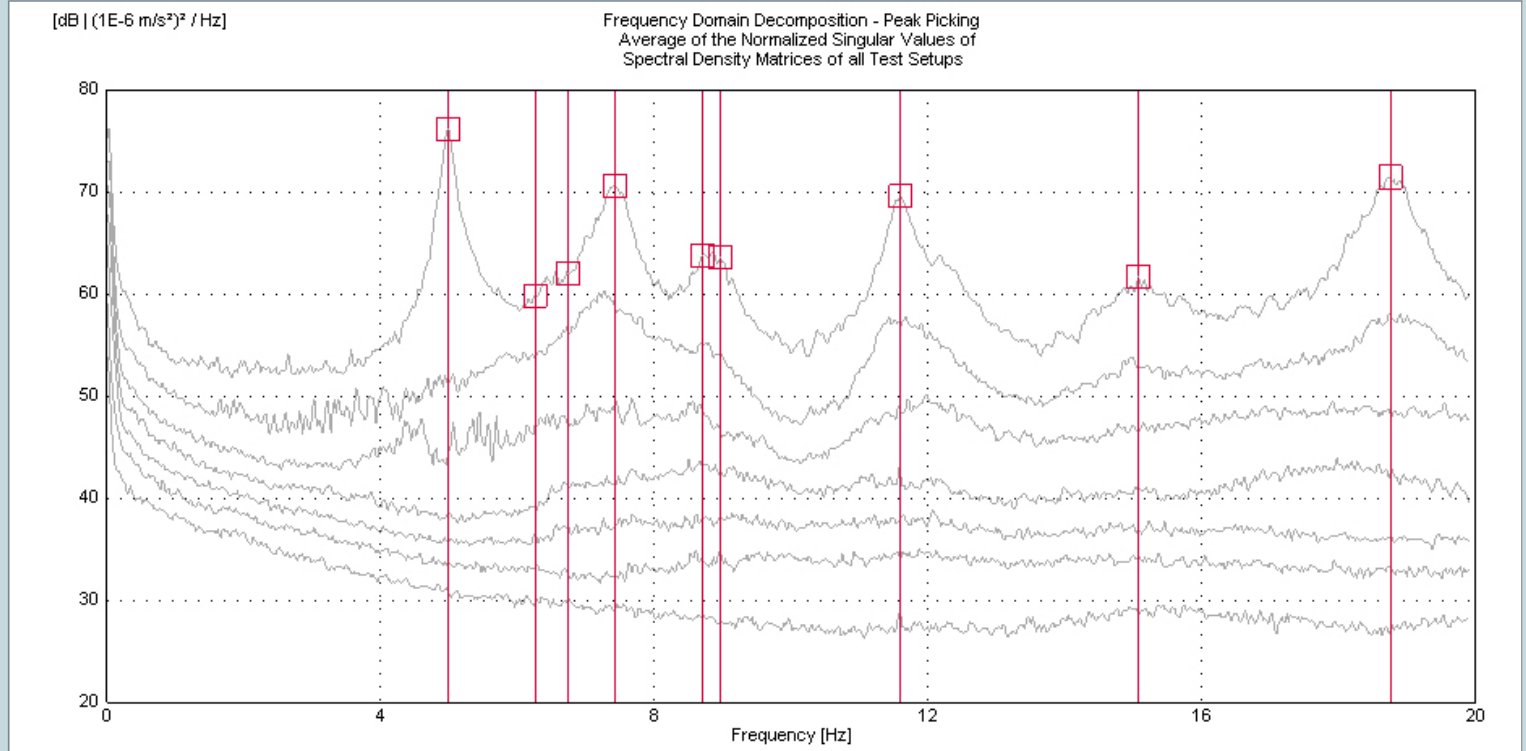
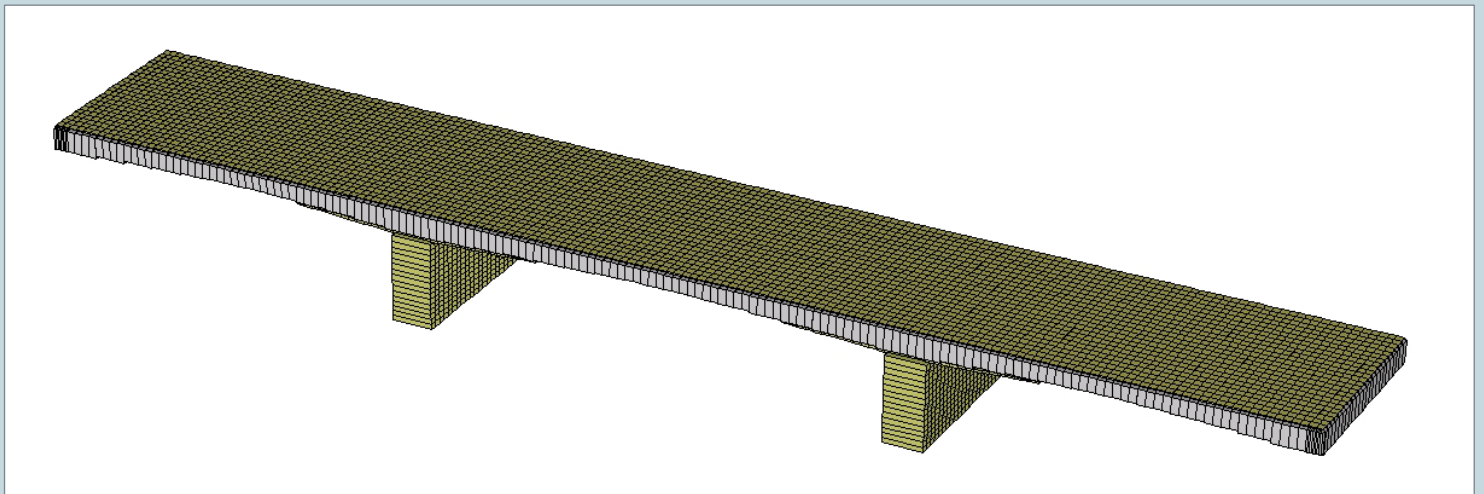
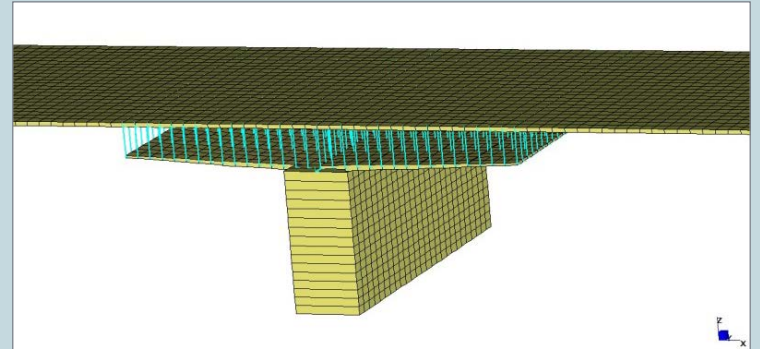
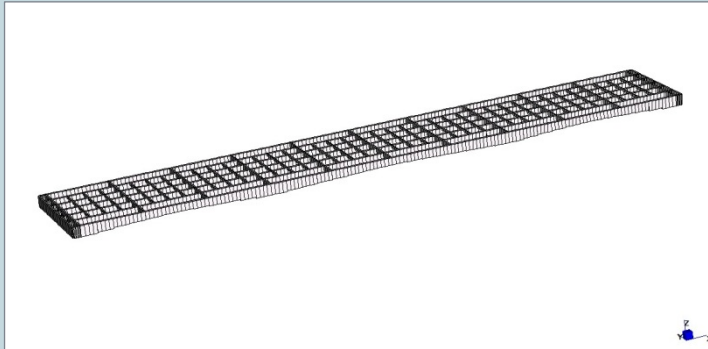


Grafico delle frequenze FDD

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



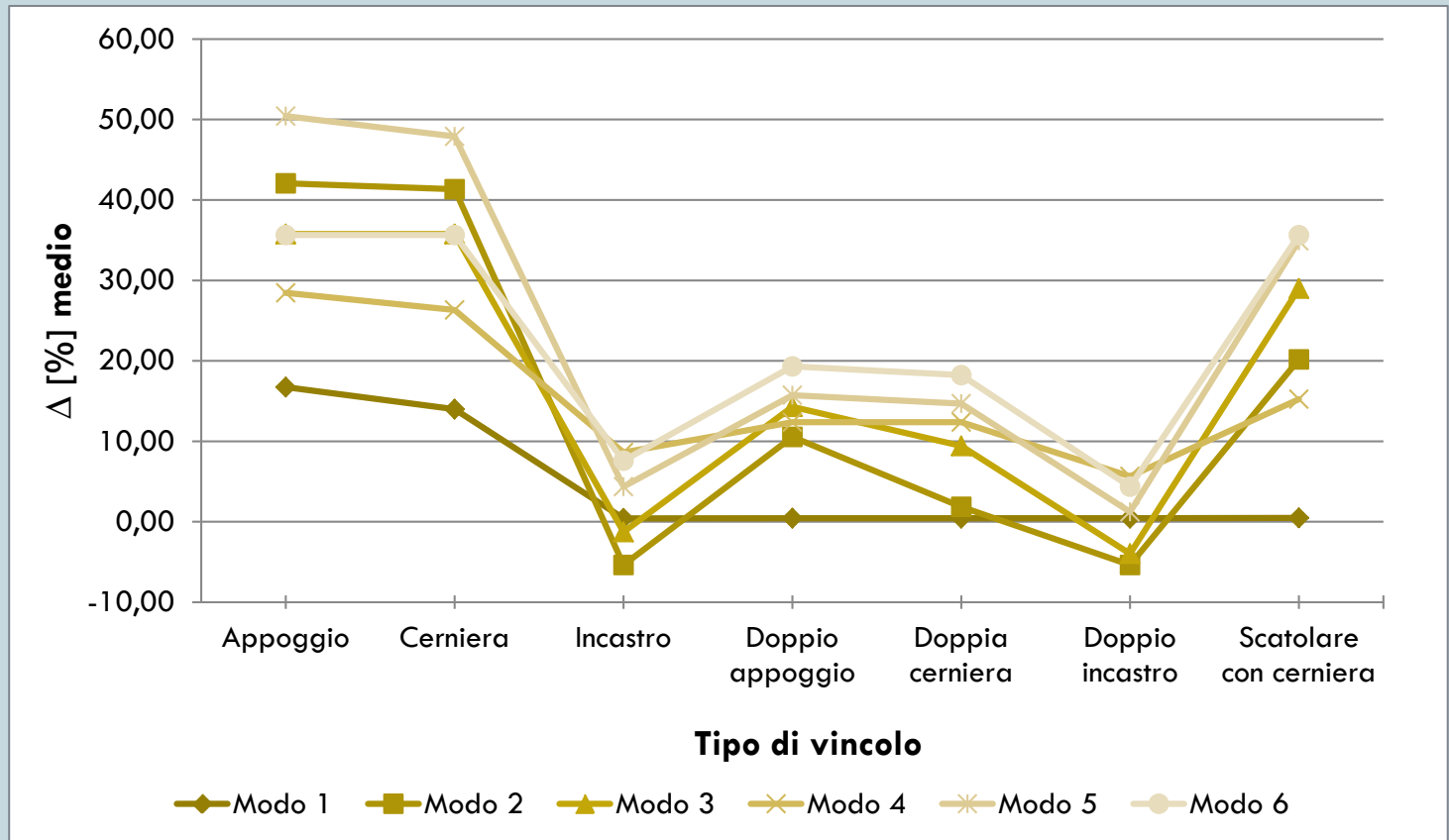
Modello FEM

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.

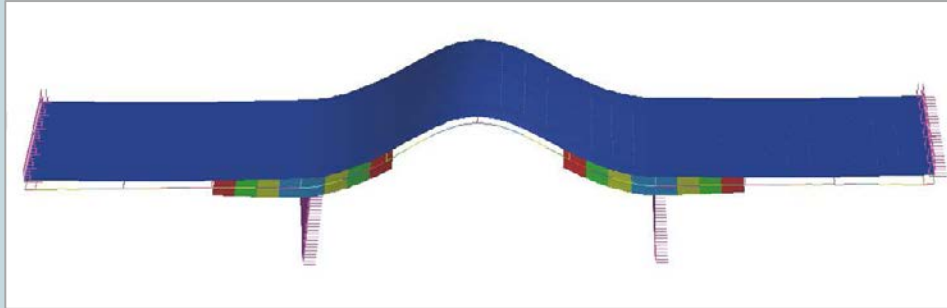
Si è valutata quindi l'influenza di una possibile modifica nella **modellazione dei vincoli** del sistema.

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

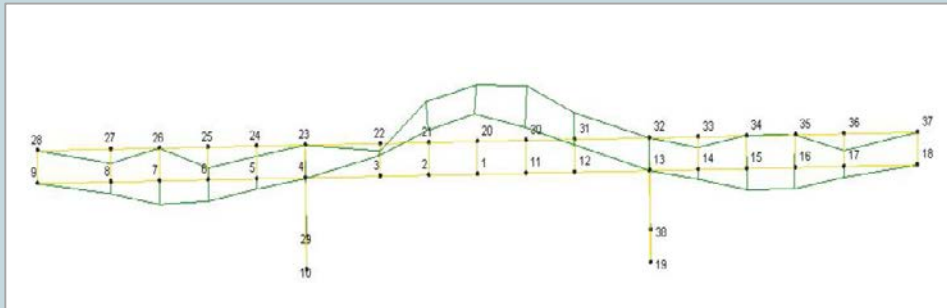
Modal Assurance Criterion (MAC)

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

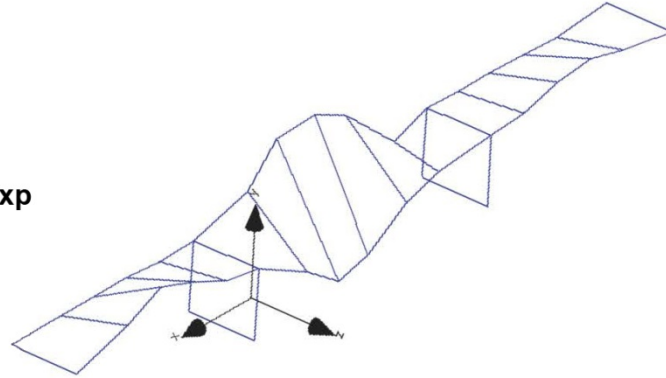
Modi di vibrare: confronto FEM vs Exp (FDD)

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

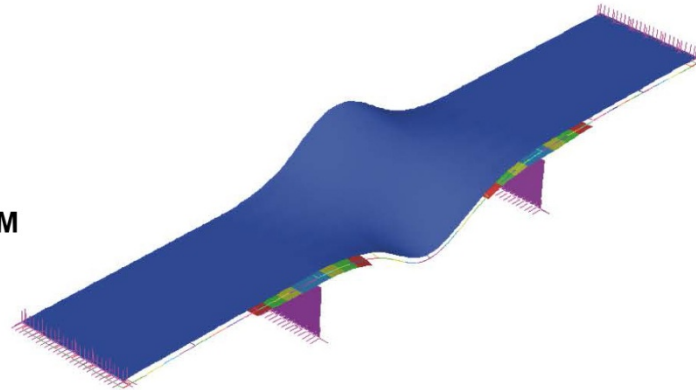
Modo 1, 2 e 3: **Flessione;**

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

4° modo Exp
7,422 Hz



4° modo FEM
6,605 Hz



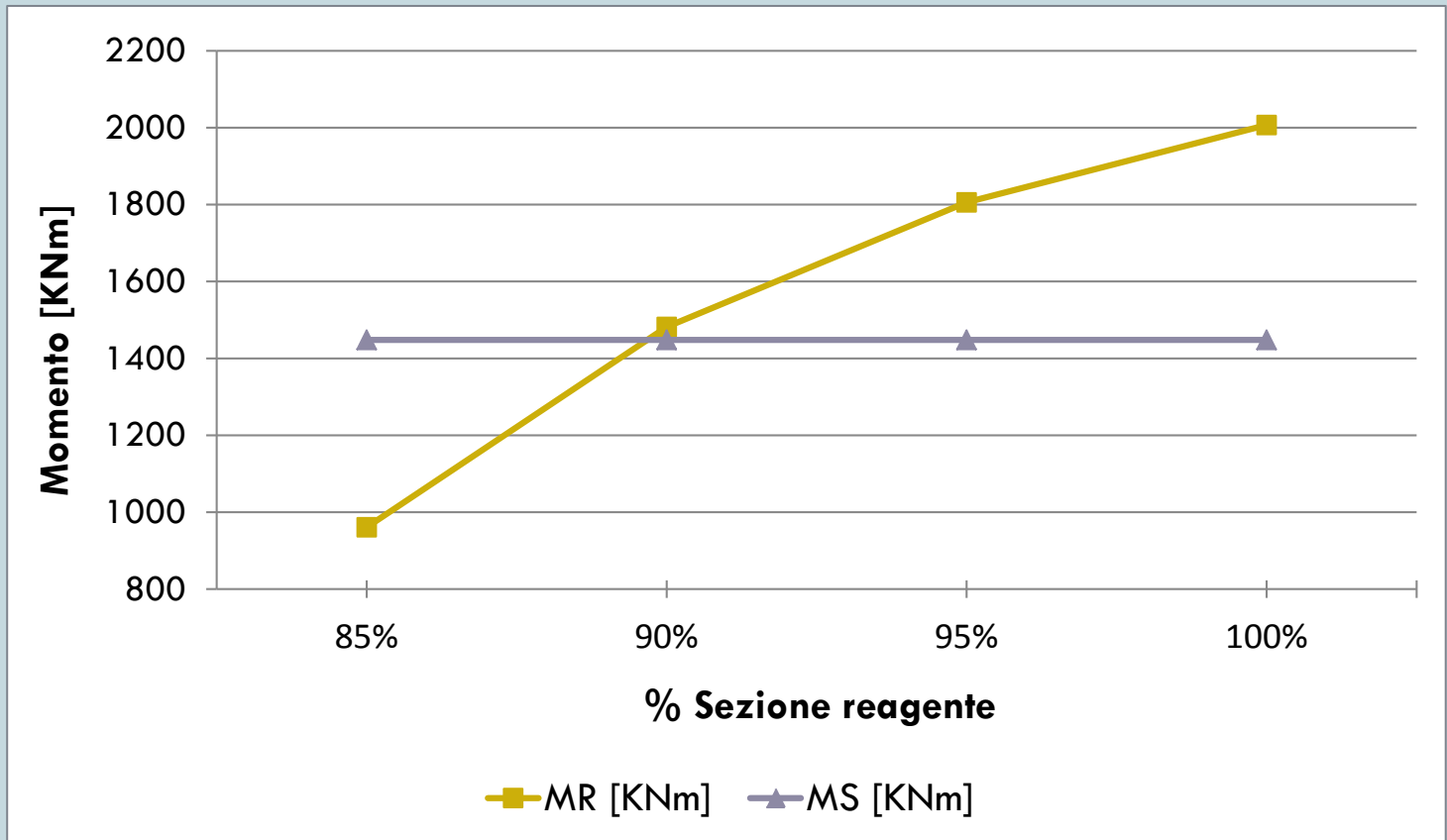
MODO 4
Numerico:
6,61 Hz

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.