

Riassunto tesi magistrale: “Sismica e archeologia industriale: il ponte di Riccardo Morandi a Vagli di sotto (LU)”

Nel panorama sismico italiano, la Garfagnana, area montana della provincia di Lucca, rientra fra le zone a sismicità medio-alta e con un'esposizione del territorio agli eventi sismici molto elevata. È, infatti, una regione attraversata da un complesso sistema di faglie attive, prevalentemente montuosa, caratterizzata da pendii molto acclivi costituiti da ammassi rocciosi alterati a struttura complessa, con valli più o meno strette e profonde.

Come dimostrato dai danni provocati dal terremoto del 1920, e da recenti studi, in tale regione sono numerosi i centri abitati di interesse storico-culturale che, per la loro particolare configurazione geomorfologica, possono essere sede, in occasione di terremoti, oltre che di fenomeni di instabilità e di scorrimenti lungo faglie e contatti geologici, anche di fenomeni di amplificazione del moto sismico e di risonanza.

Dal punto di vista storico-architettonico la Garfagnana ospita opere ingegneristico-architettoniche di grande valore, come il ponte della Maddalena a Borgo a Mozzano e il ponte sul fiume Serchio a Villetta (LU), prevalentemente costruite prima del 2009, anno in cui in Italia sono entrate in vigore le nuove Norme Tecniche sulle Costruzioni (DM 14/01/2008) che hanno rivoluzionato la progettazione in zona sismica. Queste opere sono pertanto potenzialmente vulnerabili rispetto ai terremoti tipicamente attesi (sulla base dello studio dei terremoti passati) in quella zona. Va rammentato infatti che contrariamente al pensiero comune, che recita che se un'opera antica è giunta fino ai giorni nostri allora era senza dubbio costruita bene, l'analisi monumentale storica rivela invece che la gran parte del patrimonio architettonico ha subito grandi danni a seguito di numerosi terremoti, danni che sono poi stati riparati o semplicemente tamponati (ossia resi invisibili all'occhio ma senza comportare miglioramento alla resistenza della struttura) in vario modo e in vari tempi.

In questa tesi ci siamo concentrati sul celebre ponte pedonale sito a Vagli di Sotto, in Garfagnana (Lucca). L'opera fu progettata dall'ingegnere Riccardo Morandi nel 1953 per mettere in comunicazione l'abitato di Vagli di Sopra con i paesi circostanti, dopo l'allagamento della valle sottostante ad opera di una diga in costruzione nello stesso anno (1941-1946). L'opera presa in esame è stata scelta, oltre che per le soluzioni costruttive adottate nell'impiego del cemento armato e per la severità dei terremoti che nel recente passato hanno colpito la regione, per la particolare caratteristica di rimanere parzialmente sommersa dalle acque del bacino artificiale di Vagli di Sotto. In ultimo occorre sottolineare

che il ponte è stato costruito in una zona in cui la progettazione antisismica moderna prevedrebbe accortezze molto diverse.



Figura 1: foto del Ponte di Vagli scattata rispettivamente il 16/10/2015 (ad invaso svuotato) e il 10/02/2016 (ad invaso parzialmente riempito).

Gli obiettivi dell'elaborato di tesi sono: comprendere se l'area di fondazione dell'opera sia soggetta a fenomeni di amplificazione del moto sismico, capire se la struttura abbia modi propri di vibrare prossimi a quelli del sottosuolo ed infine definire lo spettro di risposta della struttura, con l'intento di valutarne la vulnerabilità. Una curiosità è che gli spettri di risposta sono stati ricavati sia a ponte emerso che sommerso cosicché il confronto ci ha permesso di verificare come e se il livello dell'acqua influenzi la risposta dinamica del ponte (mentre questo è relativamente comune per opere come le dighe, si tratta di una opportunità ben più rara nel caso di ponti).

Abbiamo dunque effettuato una caratterizzazione dinamica completa del sottosuolo di fondazione e della struttura, sia dal punto di vista sperimentale in condizioni passive che dal punto di vista teorico-modellistico in condizioni attive (cioè in presenza di terremoto). La caratterizzazione dinamica sperimentale dell'opera è stata effettuata prima ad invaso completamente svuotato e quindi con i pilastri del ponte a contatto con l'aria. Questa condizione si verifica solamente ogni 20 anni circa, quando il bacino a monte della diga viene completamente svuotato per operazioni di controllo e manutenzione della diga stessa. Questa condizione si è fortunatamente verificata tra l'estate e l'autunno del 2015, momento in cui siamo riusciti ad effettuare le misure sia sul ponte che sul sottosuolo di fondazione (altrimenti sommerso).

Abbiamo poi effettuato la stessa caratterizzazione in condizioni di invaso pieno, a febbraio 2016.

I risultati ottenuti possono essere usati sia per monitorare l'invecchiamento della struttura e gli effetti che questo implica sul suo comportamento dinamico sia per verificare, dopo futuri terremoti, se il comportamento dinamico sarà rimasto invariato o se si dovrà pensare che sia intervenuto qualche danno strutturale; offrendo così un quadro generale sullo stato dell'opera al fine della manutenzione e della tutela del bene culturale.

La tesi è articolata come segue: dopo aver introdotto la sismicità dell'area di studio, basata sull'analisi della storia sismica di Vagli di Sotto e della Garfagnana, e sulla probabilità che, in un dato periodo di riferimento (tempo di ritorno), possa verificarsi un sisma che superi una prefissata intensità, abbiamo ampiamente inquadrato, la geologia, la tettonica e la stratigrafia del complesso appenninico interessato. Nonostante la carenza di dati sismici in alcuni periodi storici, dovuta ipoteticamente a motivi economico-politici dell'epoca (fino al 1481), si è arrivati a confermare che l'area montana oggetto del nostro studio, essendo attraversata da un complesso sistema di faglie attive rientra fra le zone a sismicità medio-alta e con un esposizione del territorio agli eventi sismici molto elevata ($a_g = 0,25 g$, $Tr = 949$ anni, NTC2008).

Descritta la storia costruttiva dell'opera oggetto del nostro studio, e quindi tutti gli elementi costruttivi della stessa, si è proceduto alla misurazione delle frequenze di risonanza fondamentali del sottosuolo di fondazione del ponte e ad una stima della stratigrafia di sito (quindi della profondità del bedrock sismico), ovvero alla determinazione di un profilo di V_S (velocità delle onde di taglio) che tenga conto di tutte le risonanze misurate e rilevanti per l'opera interessata.

La prova sismica passiva a stazione singola (H/V) vincolata con la tecnica attiva MASW è il metodo più semplice per verificare se nel sito esista la possibilità di amplificazione per motivi stratigrafici e a quali frequenze. Questa tecnica mista rappresenta un buon compromesso in termini di costi e di profondità d'indagine in quanto è possibile, tramite fit congiunto della curva H/V, estendere in profondità le velocità superficiali misurate con la prova attiva MASW e permette, quindi, di evidenziare le risonanze di cui dover tener conto nella successiva modellazione del sottosuolo di fondazione del ponte. Questa prova appare la prima da applicare sia nell'ambito della progettazione che della pianificazione territoriale in quanto dà informazioni immediate sulle criticità del sito e sulle profondità (frequenze) minime alle quali dovranno arrivare eventuali successive indagini.

Abbiamo ottenuto i seguenti risultati mostrati in figura 2 e 3, riassunti nelle tabelle

1, 2 e 3:

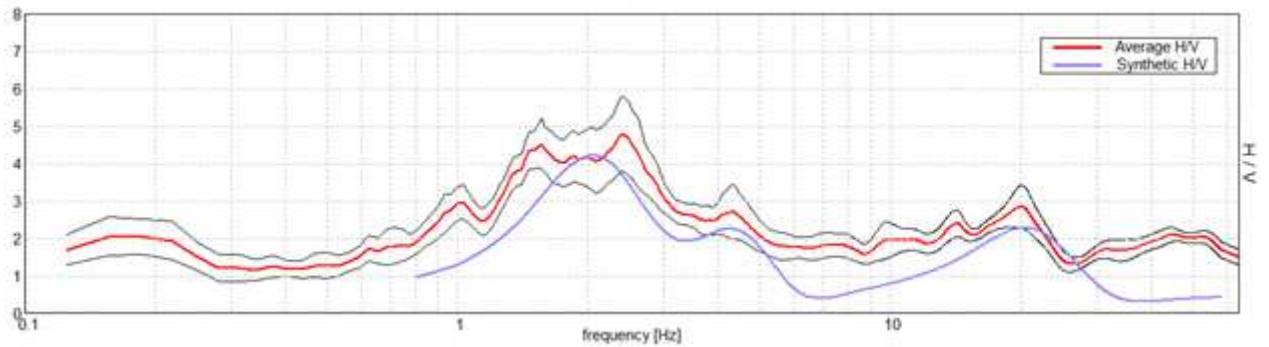


Figura 2: horizontal to vertical spectral ratio (H/V) (fit congiunto in blu e curva sperimentale in rosso) in prossimità della spalla del ponte confrontato con quello sperimentale. Picco fondamentale di risonanza dell'H/V sintetico a $(2,4 \pm 0,6)$ Hz nel range di frequenze $(0 \div 64)$ Hz.

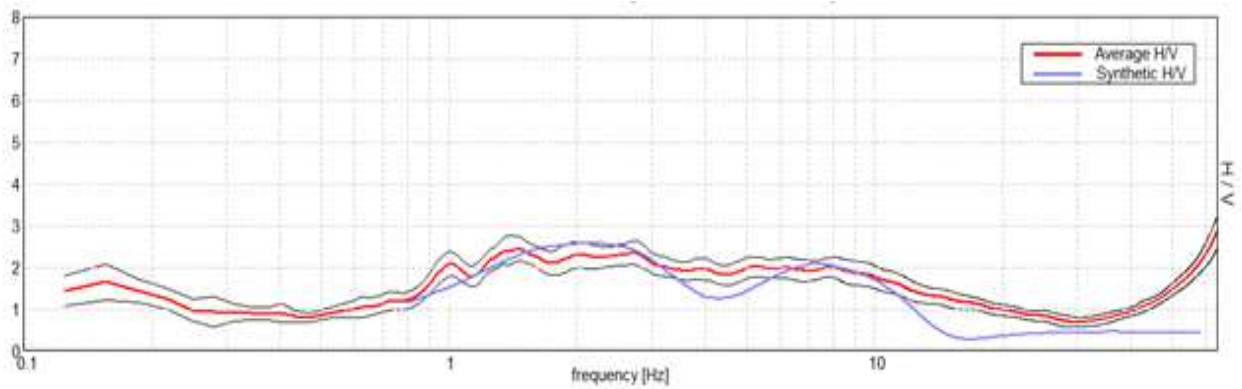


Figura 3: horizontal to vertical ratio (H/V) del terreno in prossimità del pilastro. Amplificazione stratigrafica per risonanza diffusa tra $(1,3 \pm 0,5)$ Hz e $(10,0 \pm 0,5)$ Hz. Il valore di picco ottenuto dal fit della curva H/V risulta essere $(2,2 \pm 0,5)$ Hz.

Terreno	Frequenza fondamentale (Hz)
Fondazione spalla	$2,4 \pm 0,6$
Fondazione pilastro	$(1,3 \pm 0,5) < f < (10,0 \pm 0,5)$

Tabella 1: frequenze fondamentali di risonanza del terreno di fondazione del ponte in prossimità della spalla e del pilastro, estrapolate dal fit congiunto della curva H/V.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
2.00	2.00	170	0.48
20.00	18.00	310	0.47
80.00	60.00	600	0.46
inf.	inf.	950	0.45

Tabella 2: valori relativi al terreno in prossimità della spalla del ponte. 3 strati rilevati.

Profondità alla base dello strato [m]	Spessore [m]	Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
4.50	4.50	170	0.48
16.50	12.00	330	0.47
46.50	30.00	450	0.46
131.50	85.00	710	0.46
inf.	inf.	880	0.45

Tabella 3: valori relativi al terreno di fondazione del pilastro del ponte, 4 strati rilevati.

Successivamente si è proceduto alla misurazione delle frequenze modali flessionali trasversali e verticali, delle corrispettive deformate modali del ponte, e delle relative masse percentuali coinvolte da ogni modo, analizzando gli spettri di accelerazione nelle componenti E-W, N-S e Z ottenuti tramite 5 sismometri Tromino sincronizzati via radio disposti in maniera tale da enfatizzare l'ampiezza massima del moto nella componente orizzontale e verticale. Il comportamento torsionale del ponte è stato trascurato, stante la ridottissima larghezza dell'impalcato (2.5 m, trattasi di una passerella pedonale). Le misure sono state effettuate prima ad invaso svuotato in data 16/10/2015 secondo lo stendimento in figura 4 e figura 5 e successivamente a invaso parzialmente riempito, in data 10/02/2016 ottenendo i seguenti risultati mostrati in figure 6 e 7 e riassunti in tabella 4:

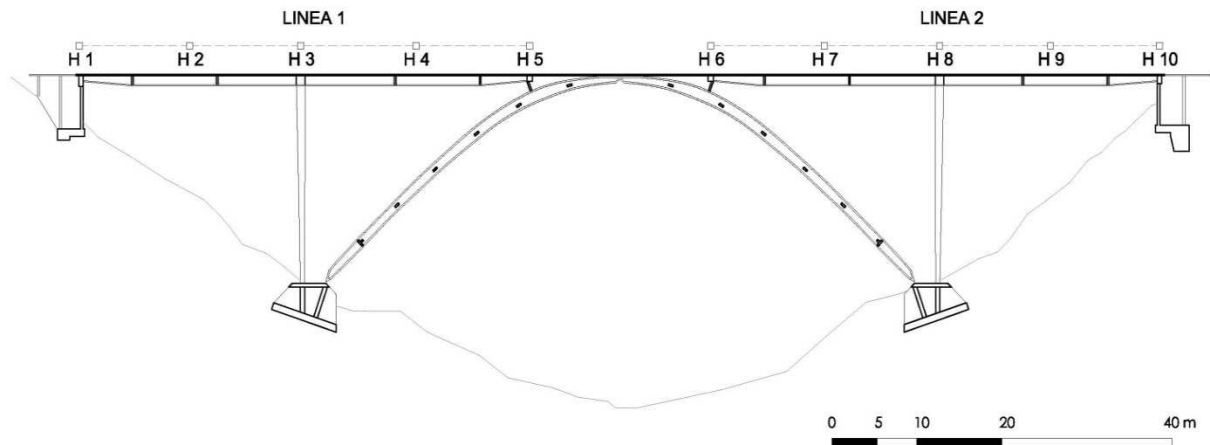


Figura 4: stendimento sismometri Linea 1-Linea 2 (i sismometri da H1-H5 sono posizionati rispettivamente: all'inizio del primo telaio; a metà della prima luce; sul pilastro; a metà della seconda luce, alla fine del primo telaio. I sismometri da H6-H10 sono posizionati rispettivamente: all'inizio del secondo telaio; a metà della prima luce; sul pilastro; a metà della seconda luce, alla fine del secondo telaio).

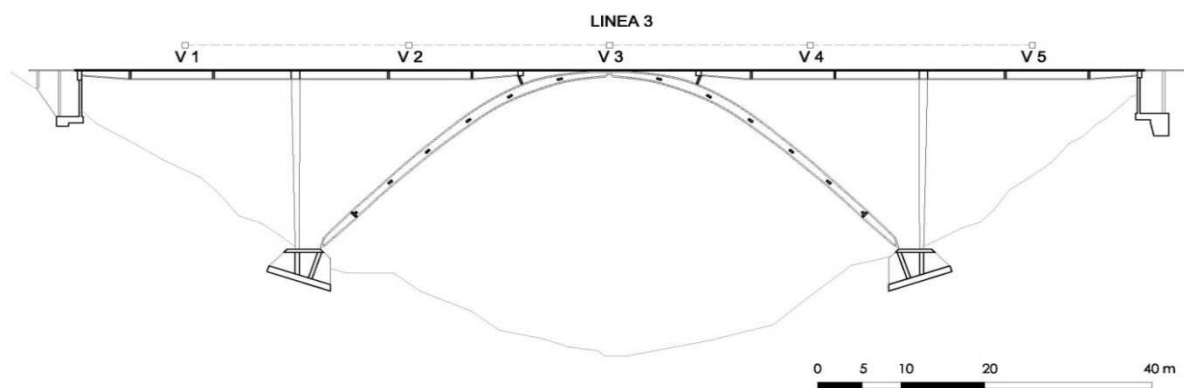


Figura 5: stendimento sismometri Linea 3 (i sismometri da V1-V5 sono posizionati rispettivamente: a metà della prima luce del primo telaio, a metà della seconda luce del primo telaio, a metà della prima luce del secondo telaio e a metà della seconda luce del secondo telaio).

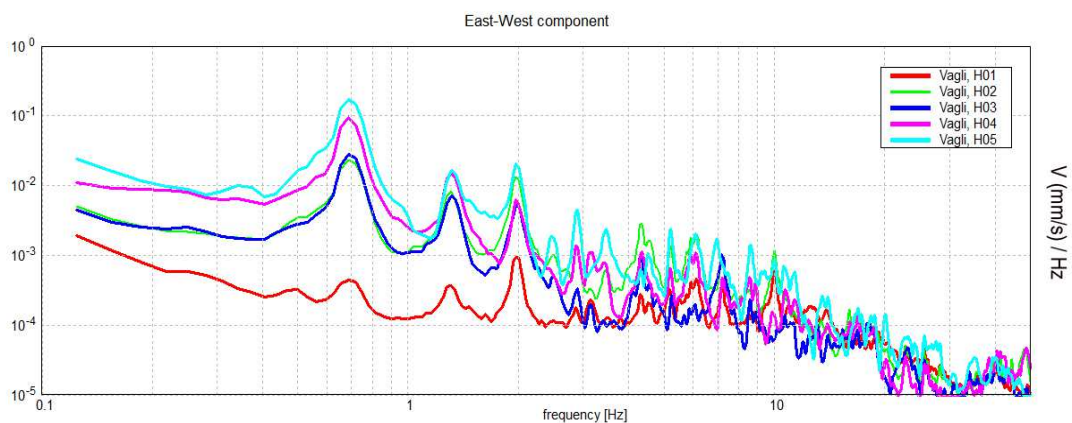


Figura 6: componente modale trasversale a invaso vuoto: spettro assoluto di ampiezza in velocità registrato sul primo telaio (H1-H5). Risultati analoghi a quelli ottenuti sul secondo telaio in termini di frequenza

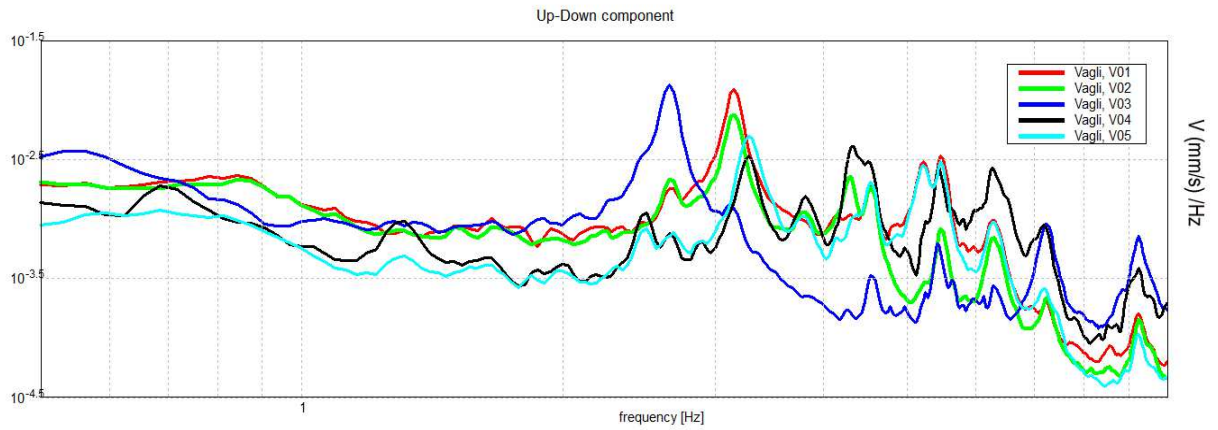
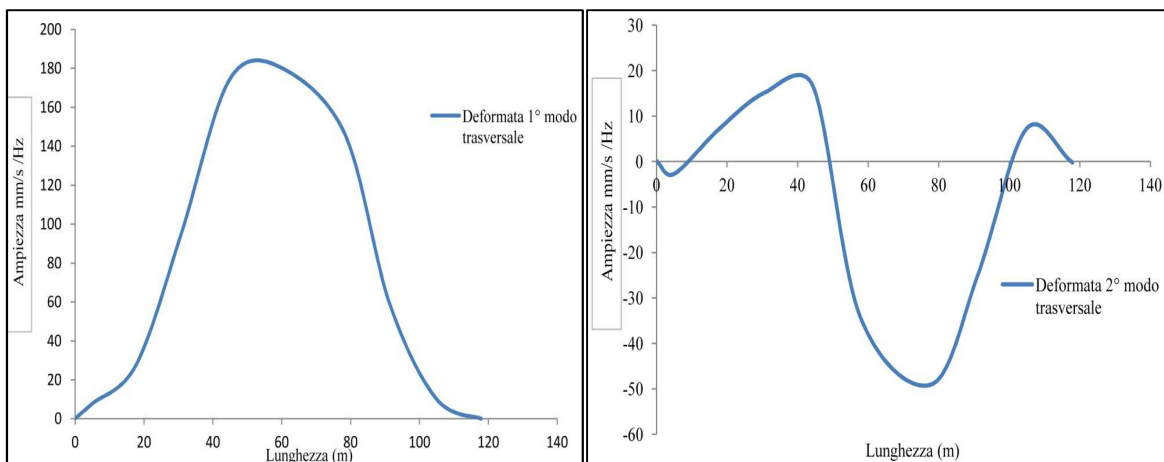


Figura 7: componente verticale: spettro assoluto di ampiezza in velocità registrato come descritto in figura 5 (V1-V5).

Modo	Frequenza (Hz)	Meccanismo Modale	Massa impalcato partecipante(%)
1	0,7	Flessionale trasversale	44
2	1,3	Flessionale trasversale	9
3	2,0	Flessionale trasversale	5
4	3,1 (telaio sinistro) 2,8 (arco a tre cerniere) 3,2 (telaio destro)	Flessionale verticale	n.a.

Tabella 4: frequenze dei modi di vibrare principali del ponte (incertezza di 1σ pari a $\pm 0,03$ Hz) a invaso svuotato.



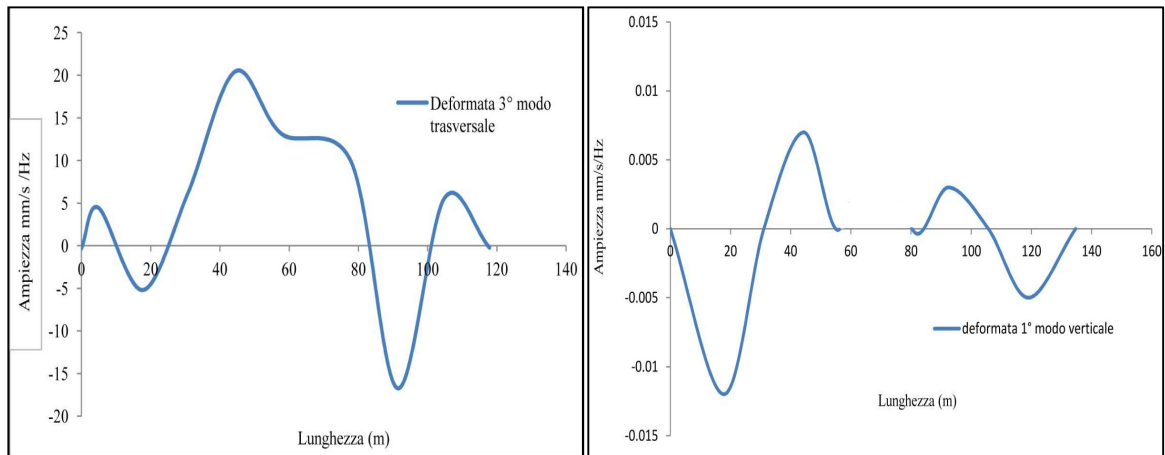


Figura 8: deformate modali sperimentali, in ordine dall'alto, del 1° modo, 2° modo e 3° modo flessionale trasversale e 1° modo flessionale verticale in basso a destra.

Ad invaso parzialmente riempito da circa 17 m d'acqua il comportamento dinamico del ponte è osservabile nelle figure 10, 11, 12, 13 (in rosso) dove è stato confrontato con il comportamento dinamico ad invaso vuoto (in verde) .

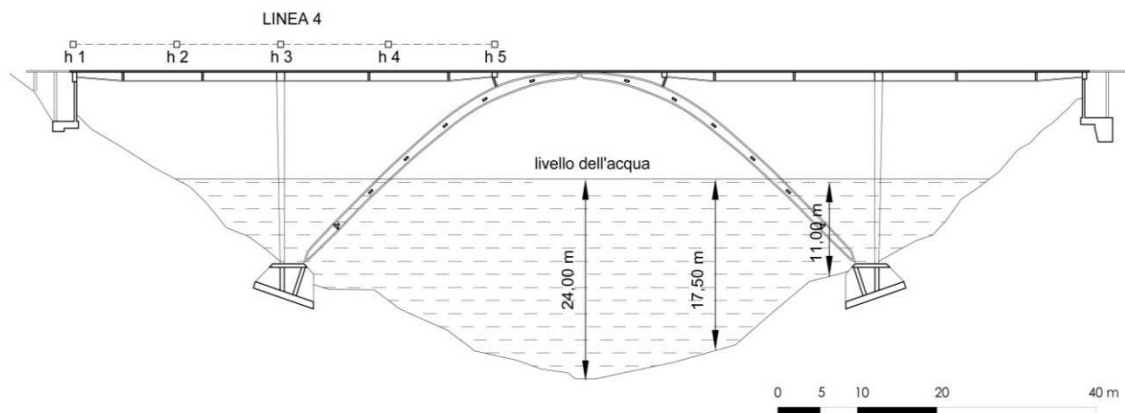


Figura 9: sezione in scala del ponte con livello dell'acqua di circa 24 m dal fondale e 11 m dalle fondazioni dei pilastri. Linea 4: Stendimento dei Tromino per la valutazione dei modi flessionali trasversali e verticali (h1-h5 rispettivamente sulla spalla, a metà della prima luce, sulla pila, a metà della seconda luce e alla fine del primo telaio).

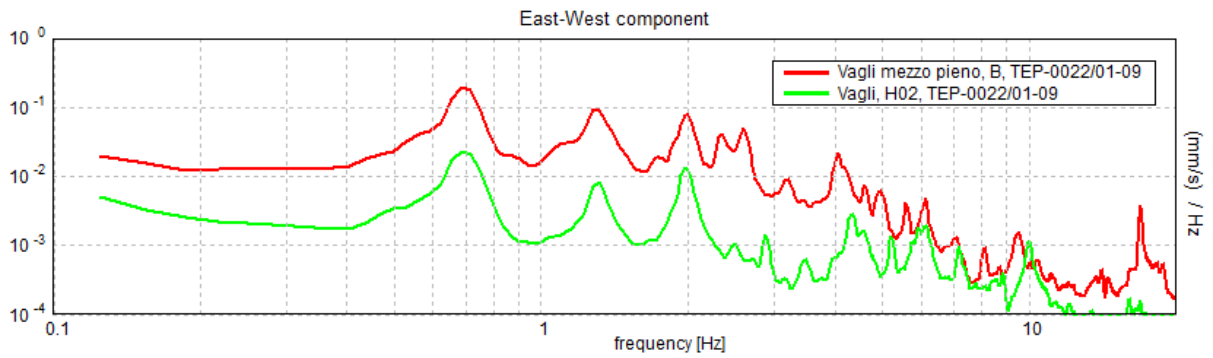


Figura 10: confronto componenti modali trasversali tra invaso mezzo pieno (rosso) e invaso vuoto (verde): spettro assoluto di ampiezza in velocità registrato sul primo telaio (h2(B) – H2).

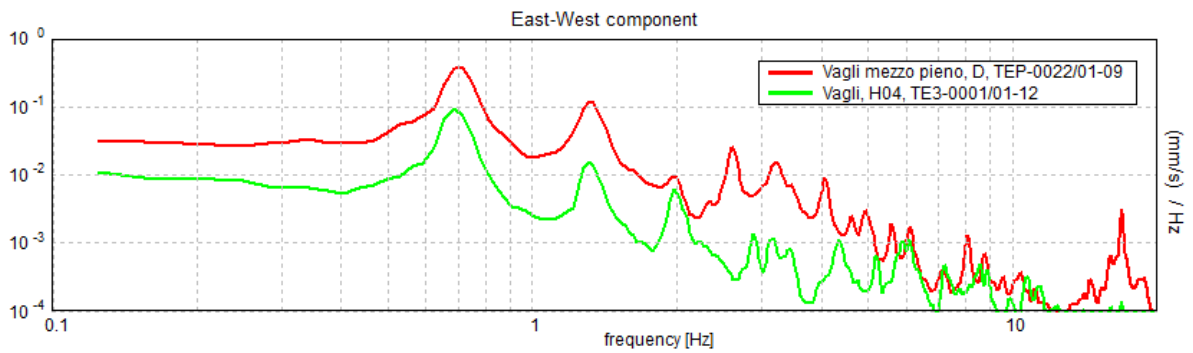


Figura 11: confronto componenti modali trasversali tra invaso mezzo pieno (rosso) e invaso vuoto (verde): spettro assoluto di ampiezza in velocità registrato sul primo telaio (h4(D) – H4).

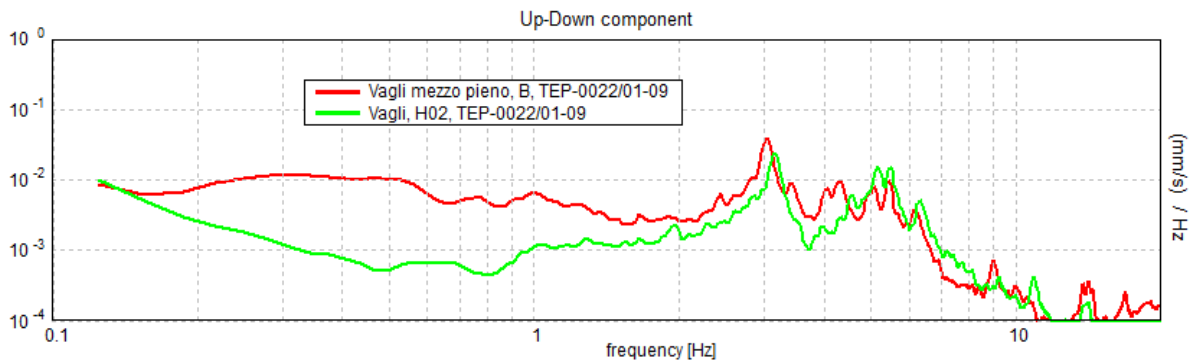


Figura 12: confronto componenti modali verticali tra invaso mezzo pieno (rosso) e invaso vuoto (verde): spettro assoluto di ampiezza in velocità registrato tra spalla e pilastro del primo telaio (h2(B) – H2).

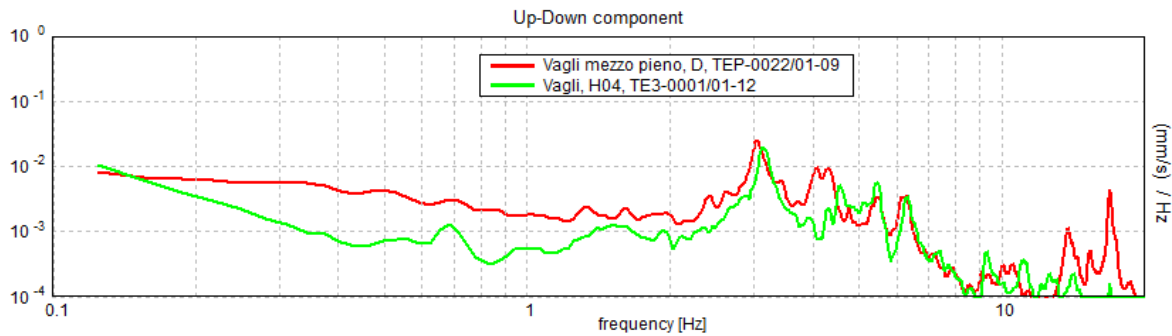


Figura 13: confronto componenti modali verticali tra invaso mezzo pieno (rosso) e invaso vuoto (verde): spettro assoluto di ampiezza in velocità registrato tra pilastro e fine del primo telaio (h4(D) – H4).

Abbiamo notato, dunque, che il primo modo flessionale verticale presenta lievi differenze in frequenza (dell'ordine di $\pm 0,1$ Hz), così come l'ampiezza delle deformate modali, da cui si desume che il telaio sinistro è meno rigido dell'altro. Due elementi strutturali in apparenza identici come i due telai del ponte in esame possono in realtà avere comportamenti dinamici differenti in ragione della loro rigidità intrinseca (a parità di massa e distribuzione della stessa) e dell'interazione suolo-struttura che può variare nel caso di opere spazialmente estese come i ponti. A 2,8 Hz si osserva invece sulla verticale il modo di vibrare relativo all'arco.

Dal confronto con le misure effettuate a invaso mezzo pieno, si è osservato che non ci sono variazioni significative di frequenza nei modi orizzontali. Questo conferma una cosa ovvia, ossia che l'acqua non trasmette sforzi di taglio e che il ponte non risente della presenza del fluido lungo la componente trasversale. Curiosamente, però, si è notato che il primo modo flessionale verticale a invaso semi-pieno ha abbassato la sua frequenza fondamentale. Questo può essere spiegato in prima ipotesi come un effetto lubrificante dell'acqua sulle cerniere di fondazione del ponte. In secondo luogo è plausibile che il peso della colonna d'acqua agente sulle fondazioni ne inibisca il rocking, cosa che si può riflettere sull'impalcato come una variazione di frequenza propria.

Del ponte, libero dall'influenza dell'acqua, abbiamo effettuato anche una modellazione dinamica agli elementi finiti col software *Midas Civil 2015*, presso lo studio Matildi+Partners di Bologna (ing. S. Isani, ing. A. Boscaro). L'obiettivo è stato quello di definire un modello meccanico in grado di descrivere con un sufficiente grado di accuratezza il comportamento dinamico del ponte nell'intervallo di frequenze di interesse per l'analisi sismica. Le deformate dei primi 4 modi ottenute da modello sono illustrate nella figura che segue, mentre il confronto tra i dati sperimentali e quelli da modello è dato in tabella 6.

Si può osservare che il modello numerico riproduce fedelmente le frequenze e le forme modali sperimentali riguardanti i primi quattro modi di vibrare del ponte. Al contrario i valori di massa percentuale coinvolta da ogni modo, calcolati secondo il modello numerico sono differenti da quelli rilevati dal calcolo sperimentale (60% secondo i dati sperimentali, 90% secondo il modello numerico F.E.M.) in quanto, in quest'ultimo, abbiamo considerato la massa del solo impalcato e non quella dei pilastri e dell'arco. Quindi il 58% della massa partecipante ai modi fondamentali dell'impalcato è un valore sicuramente sottostimato.

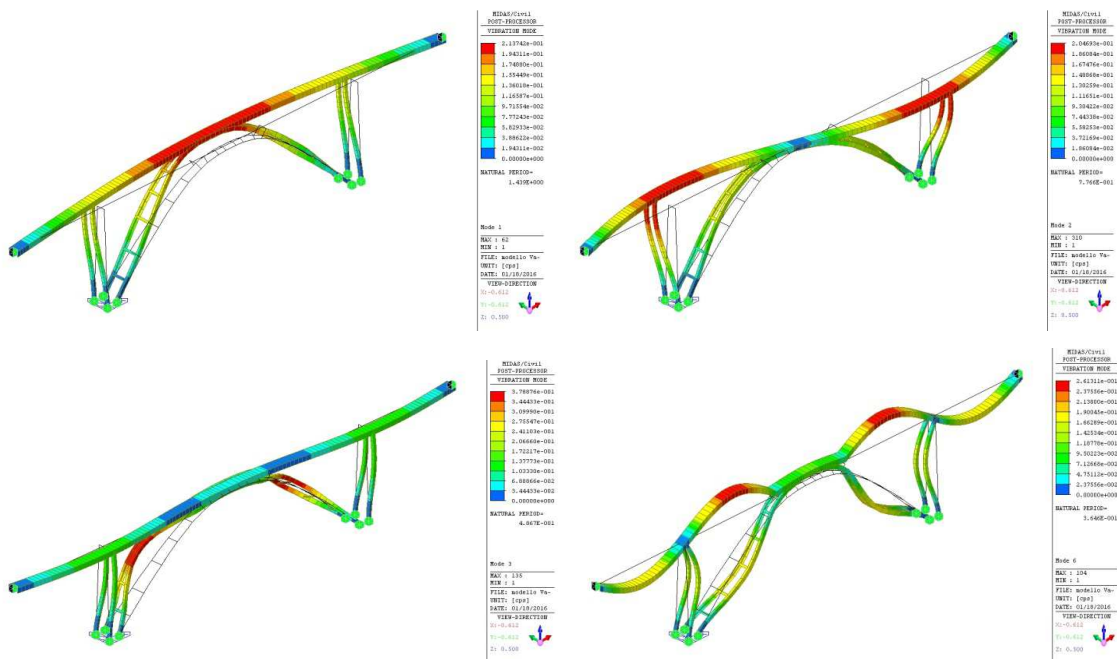


Figura 14: rispettive deformate modali numeriche in 3D del 1°modo, 2° modo e 3° modo flessionale trasversale e 1°modo flessionale verticale (in basso a destra).

Numero modale	Frequenza propria (Hz)	Meccanismo modale	Massa partecipante(%) da modello numerico
1	0,7	Trasversale flessionale	73
2	1,3	Trasversale flessionale	13
3	2,0	Trasversale flessionale	4
4			

5			
6	2,8	Verticale flessionale	n.a.

Tabella 5: frequenze modali e corrispettivo valore di massa percentuale coinvolta da ogni modo. Valori ottenuti dal modello numerico.

Definito per quali frequenze il sottosuolo risuona e per quali invece il ponte risuona, è stato dunque possibile valutare se esistano le condizioni per il fenomeno di “doppia-risonanza” suolo-struttura. Confrontando i dati del sottosuolo con quelli del ponte (tabelle 1 e 4) possiamo concludere che la struttura è al sicuro da doppia risonanza per quanto riguarda i modi orizzontali trasversali (non c’è coincidenza di risonanze suolo-struttura fino ad un intorno del 40% in frequenza).

Una condizione di coincidenza di risonanze può esistere per il primo modo verticale. Tuttavia, un aggravio di qualche frazione dell’accelerazione di gravità sulle forze agenti in verticale non è preoccupante per questo ponte.

Abbiamo, infine, effettuato una analisi numerica di risposta sismica locale volta alla modellazione teorica della funzione di trasferimento del moto sismico dal bedrock alla superficie e al calcolo degli spettri di risposta elastici. Gli spettri di risposta rappresentano il valore massimo dell’accelerazione orizzontale che l’opera in esame è chiamata a sostenere nel caso del terremoto tipicamente atteso al sito, entro la vita nominale dell’opera stessa. Gli spettri di risposta ottenuti dall’analisi numerica sono stati ricavati utilizzando, come input, terremoti naturali selezionati con l’ausilio del software Rexel e terremoti artificiali costruiti da noi tramite Matlab. I risultati sono mostrati come media e deviazione standard nella figura sottostante sia per il caso della spalla che per il caso del pilastro, e sono messi a confronto con lo spettro semplificato di normativa NTC(2008) ottenuto per il sito nel caso di categoria di sottosuolo B. Nel caso in esame sarebbe possibile progettare opere di questo tipo anche con approcci semplificati, che si rivelano persino più cautelativi di quelli non semplificati per la quasi totalità dell’intervallo di frequenze indagato. Questo è ancora più evidente a lunghi periodi, come quelli propri del ponte (figura 15).

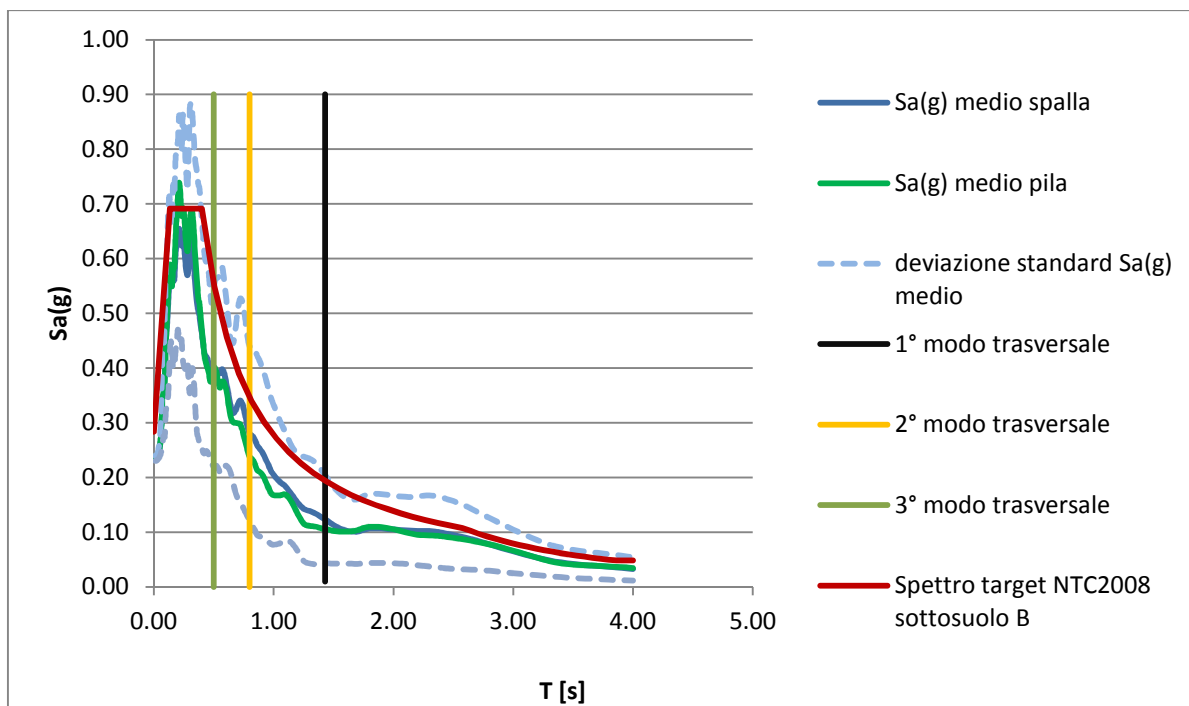


Figura 15: collocazione dei modi vibrazionali trasversali della struttura nello spettro di risposta.

Dall'analisi modale effettuata, infatti, sappiamo che i primi 3 modi di vibrare del ponte mobilitano quasi il 90% della massa dello stesso, e questi sono pertanto sufficienti a livello normativo per progettare o verificare la struttura rispetto alle azioni sismiche. Il primo modo trasversale (0,7 Hz) ricade in una regione dello spettro decisamente favorevole. Precisamente a questa frequenza il ponte è chiamato a sostenere accelerazioni orizzontali di $(0,15 \pm 0,05)g$, valore addirittura inferiore a quello che arriverebbe al bedrock sismico di quel sito, previsto dalle NTC (2008) essere pari a 0,24 g.

Il 2° modo ($\sim 0,8$ s) e il 3° modo ($\sim 0,5$ s) flessionale trasversale si collocano, invece, in una regione dello spettro meno favorevole. A queste frequenze il ponte è chiamato a sostenere accelerazioni orizzontali $(0,4 \pm 0,2)g$ per il 3° modo e $(0,3 \pm 0,2)g$ per il 2° modo. Dato, però, che il contributo di massa percentuale che partecipa al massimo spostamento del ponte al 2° e 3° modo trasversale è molto inferiore rispetto al contributo di massa percentuale che partecipa al massimo spostamento dovuto al 1° modo; l'opera è pertanto da ritenersi relativamente insensibile rispetto ai terremoti che sono attesi in questa zona, nonostante sia stata costruita in tempi di normative sulle costruzioni poco attente al sisma.

Se dunque, non appare essere il sisma il motivo principale di preoccupazione per questo ponte, esistono altre dinamiche degne di attenzione?

Il ponte è, per gran parte del tempo (oserei dire sempre), immerso nelle acque del bacino artificiale dunque il degrado dei materiali (in particolare delle cerniere di fondazione) sarebbe un elemento da approfondire. Inoltre, in caso di sisma, potrebbero verificarsi frane sismo-indotte che potrebbero coinvolgere il ponte direttamente (es. frane in prossimità delle spalle) o indirettamente (frammenti di materiale nell'invaso) mettendone così in pericolo l'incolumità e la stabilità della struttura stessa.

La caratterizzazione dinamica effettuata fotografa lo stato del ponte ad oggi. Tali risultati potranno essere usati per verificare e quantificare l'entità di eventuali danni strutturali intervenuti a seguito di un futuro sisma o per quantificare l'invecchiamento strutturale nel tempo. Questo tipo di indagini sta diventando pratica di routine nel monitoraggio volto alla tutela dei beni culturali archeologici e delle grandi opere perché permette di ottenere una grande quantità di informazioni quantitative in tempi estremamente brevi e con metodi del tutto non invasivi.

Candidati:

Dott.ssa geol. Francesca Bulgarelli

Dott. Francesco Cipriani

Relatore:

Prof.ssa geol. Silvia Castellaro

Correlatore:

Dott. ing. Stefano Isani