



Mitigazione dei Rischi Naturali per la Sicurezza  
e la Mobilità nelle Aree Montane del Mezzogiorno

**PNR 2015-2020**

Area di Specializzazione *Smart, Sicure and Inclusive Communities*



## Obiettivo Realizzativo 4

### **Sviluppo di un sistema integrato di monitoraggio**

**La geofisica per la caratterizzazione del comportamento strutturale dei ponti: il caso studio del Ponte della Gravina (Matera, Italia Meridionale)**

Serlenga, V<sup>1</sup>, Gallipoli, MR<sup>1</sup>, Ditommaso, R<sup>2,3</sup>, Ponzo, CF<sup>2</sup>, Tragni, N<sup>1,2</sup>, Perrone, A<sup>1</sup>, Stabile, TA<sup>1</sup>, Calamita, G<sup>1</sup>, Vignola, L<sup>4</sup>, Lapenna, V<sup>1</sup>

<sup>1</sup> IMAA, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Tito Scalo, PZ, Italia

<sup>2</sup> Scuola di Ingegneria, Università di Basilicata, Potenza, Italia

<sup>3</sup> SISIA S.r.l., Venosa, PZ, Italia

<sup>4</sup> Mallet S.r.l., Villa d'Agri, PZ, Italia

Novembre 2022



UNIONE EUROPEA  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Estratto della Raccolta dei Rapporti Tecnici di Disseminazione del Progetto MITIGO – Volume 2

© 2022 Università degli Studi della Basilicata

Editrice Universosud – Potenza

ISBN 9788899432935



Questa pubblicazione è stata realizzata con il cofinanziamento dell'Unione Europea – FESR, PON Ricerca e Innovazione 2014-2020.

[www.ponricerca.gov.it](http://www.ponricerca.gov.it)



UNIONE EUROPEA  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Ministero dell'Università  
e della Ricerca



PON  
RICERCA  
E INNOVAZIONE  
2014 - 2020

Mitigazione dei Rischi Naturali  
per la Sicurezza e la Mobilità nelle  
Aree Montane del Mezzogiorno





UNIONE EUROPEA  
Fondo Sociale Europeo



## INDICE

<b>SOMMARIO</b> .....	3
<b>Introduzione</b> .....	3
<b>Materiali e metodi</b> .....	5
<b>Risultati e discussioni</b> .....	6
<b>CONCLUSIONI</b> .....	11
<b>Bibliografia</b> .....	12



UNIONE EUROPEA  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Mitigazione dei Rischi Naturali  
per la Sicurezza e la Mobilità nelle  
Aree Montane del Mezzogiorno





UNIONE EUROPEA  
Fondo Sociale Europeo



## SOMMARIO

In questo rapporto viene illustrato un approccio ingegneristico e geofisico innovativo proposto da un gruppo di ricercatori geofisici del CNR-IMAA, in collaborazione con l'Università degli Studi della Basilicata e l'ANAS, per la caratterizzazione strutturale di infrastrutture civili, come i ponti. L'approccio proposto, basato sull'utilizzo di tecniche di telerilevamento e in situ speditive, a basso costo, non invasive e non distruttive, consente di investigare alcune infrastrutture viarie individuate nell'ambito del progetto MITIGO con il triplice scopo di: 1) validare l'approccio presentato; 2) fornire una iniziale caratterizzazione delle proprietà statiche e dinamiche dell'infrastruttura scelta; 3) studiare la possibile interazione tra l'infrastruttura, il suo sistema di isolamento di base e i suoli di fondazione. A tal proposito le caratteristiche geofisiche degli strati più superficiali del sottosuolo sono in fase di valutazione attraverso l'esecuzione di indagini geoelettriche e sismiche. Le caratteristiche strutturali principali del ponte, descritte dalle frequenze principali di vibrazione, dai relativi parametri di smorzamento e dalle forme modali del ponte, potranno essere ricavate dall'analisi di dati geofisici indipendenti mediante tecniche sismiche ed elettromagnetiche, nel dominio della frequenza e del tempo. I risultati ottenuti saranno integrati tra loro e confrontati con quelli relativi ai modelli numerici del ponte, se disponibili. In questo rapporto si sintetizzano i risultati già trovati in indagini precedenti.

## Introduzione

I ponti costituiscono una parte essenziale dell'assetto viario di qualsiasi nazione e il loro possibile deterioramento, causato dalla normale usura del tempo e dalle deformazioni indotte dagli eventi naturali (frane, smottamenti, cedimenti differenziali, eventi sismici), può avere forti impatti dal punto di vista sociale, economico e di sicurezza. In Italia è ancora fresco il ricordo della tragedia del Ponte Morandi nell'agosto del 2018, quando il collasso del 15% della struttura causò 43 vittime e più di 500 sfollati. Nel nostro paese è stato stimato che circa 10000 ponti richiedono un controllo specifico e accurato del loro grado di sicurezza statica (Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici), soprattutto a causa degli alti volumi di traffico giornalieri che aumentano la percentuale di rischio associata all'infrastruttura. Inoltre, il verificarsi di possibili fenomeni naturali, oltre ad impattare direttamente sulla struttura, può innescare pericolosi fenomeni di risonanza con il suolo di fondazione.

La necessità di sviluppare e applicare sistemi di monitoraggio che consentano di caratterizzare l'infrastruttura viaria da un punto di vista sia statico che dinamico e di descrivere l'evoluzione delle sue proprietà nel tempo è diventata sempre più crescente. Le comunità scientifica e professionale stanno sperimentando nuovi approcci di investigazione basati sull'utilizzo di reti di sensori innovativi che permettono di acquisire dati in continuo e in real-time dell'infrastruttura allo scopo di superare le limitazioni connesse all'utilizzo dei metodi tradizionali basati su ispezioni visive.

In tale ambito, l'equipe di ricercatori geofisici del CNR-IMAA, in collaborazione con l'Università degli Studi della Basilicata e ANAS, nell'ambito del progetto MITIGO sta sperimentando un approccio geofisico integrato basato sull'utilizzo di tecniche a basso costo, non invasive e non distruttive, in situ e da remoto, per la determinazione dei parametri strutturali fondamentali (frequenze principali di vibrazione, relativi smorzamenti equivalenti e forme modali) di una infrastruttura viaria. Si tratta di un upgrade e del



UNIONE EUROPEA  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Mitigazione dei Rischi Naturali  
per la Sicurezza e la Mobilità nelle  
Aree Montane del Mezzogiorno



miglioramento dell'approccio sviluppato dagli stessi ricercatori del CNR-IMAA nell'ambito del progetto "Sviluppo di una Piattaforma per l'erogazione di servizi innovativi basati su dati di Osservazione della Terra" (SPOT) finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico (MISE). La validazione della metodologia proposta in SPOT è stata effettuata sul ponte Gravina (Fig.1a), un ponte ad arco sospeso ubicato sulla strada Statale Bradanica 655 nei pressi di Matera. Tale ponte risulta caratterizzato da un impalcato in cemento armato che si sviluppa su un'unica campata e dal sovrastante arco in acciaio. Nel progetto MITIGO l'approccio proposto sarà applicato per investigare il viadotto Monticello (Fig.1b), un ponte in cemento armato ad undici campate, a loro volta sostenute da dieci pile, posizionato lungo la strada Statale Basentana 407 nei pressi di Potenza. La scelta di una diversa tipologia di ponte consentirà di verificare l'applicabilità dell'approccio proposto in diversi contesti e l'eventuale necessità di effettuarne un adeguamento e conseguente miglioramento.

Di seguito si descrive l'approccio geofisico sviluppato e si mostrano, a titolo esemplificativo, i risultati ottenuti sul ponte Gravina. Il ponte, lungo 144 m e largo 18.80 m, è stato ultimato nella primavera del 2015 e aperto alla circolazione veicolare nel 2016. Oltre alle caratteristiche sovraccitate, alla sua base presenta 8 isolatori elastomerici (4 sotto le basi dell'arco e 4 sotto le travi principali).

L'approccio proposto e applicato per lo studio del ponte Gravina (Serlenga et al., 2021) si è basato sulla registrazione e analisi di due tipi di dati geofisici (sismici ed elettromagnetici) acquisiti sia attraverso test on-demand, sia nel corso di un monitoraggio in continuo dell'infrastruttura durato circa 1 anno. Inoltre, al fine di studiare possibili interazioni infrastruttura/ suolo, è stata effettuata una caratterizzazione dei terreni di fondazione mediante l'applicazione di tecniche geoelettriche e sismiche.



Figura 1. a) Vista del Ponte Gravina da lato valle, direzione Matera. b) Viadotto Monticello, sito test del progetto MITIGO



UNIONE EUROPEA  
Fondo Sociale Europeo



## Materiali e metodi

La caratterizzazione strutturale del Ponte Gravina è stata ottenuta acquisendo dati geofisici (sismici ed elettromagnetici) fra loro indipendenti. In particolare, nel periodo giugno 2019 - marzo 2020 sono state effettuate sia campagne geofisiche di acquisizione on-demand (tre: il 12 Luglio 2019, il 29 Ottobre 2019 ed il 22 Gennaio 2020; Fig. 2c) che registrazioni permanenti di dati in tempo reale per tutto il periodo di investigazione.

Per l'acquisizione dei dati sismici sono stati utilizzati sensori accelerometrici e velocimetrici direttamente installati sulla struttura. I primi sono stati posizionati in quattro punti distinti del ponte (Fig.2) e hanno consentito la registrazione in tempo reale di terremoti locali e regionali (Permanent Real-time Earthquake Monitoring: PREaMO); i velocimetri sono invece stati posizionati in quattro distinte configurazioni (Fig.2), per registrare rumore sismico ambientale nei tre giorni delle campagne on-demand. I dati di rumore sismico sono stati acquisiti sia nelle normali condizioni di operatività del ponte (Ambient Vibration Tests - Operational Conditions: AVT-OC) che adottando come sorgenti di vibrazione dei Veicoli Speciali (Ambient Vibration Tests – Special Vehicles: AVT-SV) (Green, 1995; Salawu and Williams, 1995; Farrar et al., 1997).

L'acquisizione elettromagnetica è stata effettuata durante la campagna on-demand del 29 ottobre 2019, nel corso della quale sono stati eseguiti anche i test di acquisizione di rumore sismico. La metodologia adottata ha richiesto l'impiego del radar interferometrico IBIS-S, uno strumento capace di eseguire a distanza il monitoraggio completo dell'intera infrastruttura.

I dati geofisici acquisiti sono stati analizzati nel dominio del tempo e della frequenza, per stimare le principali proprietà strutturali dell'infrastruttura, ovvero le frequenze principali di vibrazione, i relativi parametri di smorzamento e le forme modali del ponte. Tali proprietà sono state stimate applicando tecniche di analisi di dati sismici ed elettromagnetici fra loro complementari.



UNIONE EUROPEA  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Mitigazione dei Rischi Naturali  
per la Sicurezza e la Mobilità nelle  
Aree Montane del Mezzogiorno



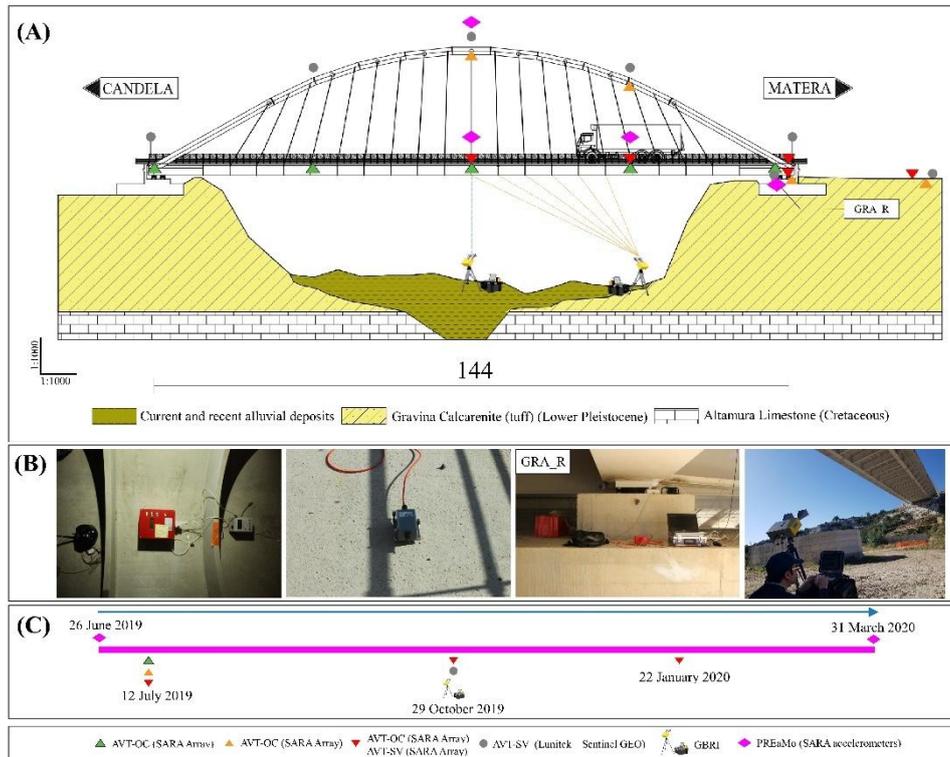


Figura 2. a) Schema del ponte con configurazioni di accelerometri (diamanti rosa), velocimetri (triangoli e cerchi) e interferometro radar (GBRI-Ground Based Radar Interferometer). b) Immagini dei sensori adottati: da sinistra verso destra: accelerometro all'interno del ponte; velocimetro sull'impalcato; velocimetro sulla spalla del ponte; interferometro radar. c) Schema temporale delle indagini effettuate.

Per la caratterizzazione geofisica del sottosuolo e l'individuazione di possibili effetti di interazione suolo-infrastruttura sono state realizzate tre tomografie di resistività elettrica ad alta risoluzione (ERT; Sharma e Verma, 2015), oltre all'acquisizione di rumore sismico ambientale tramite l'utilizzo di una singola stazione e di un array sismico 2D disposto direttamente sul terreno.

## Risultati e discussioni

### Caratterizzazione geofisica dei terreni di fondazione

L'analisi dei dati geofisici acquisiti sul terreno di fondazione del ponte Gravina (Fig.3) ha confermato l'assenza di significativi effetti di amplificazione locale e fenomeni di interazione suolo-infrastruttura: infatti, come osservabile dai risultati delle ERT, le fondazioni dell'opera poggiano su terreno molto resistivo ascrivibile al materiale calcarenitico (Calcareniti di Gravina) (Fig.3b). Lo strato più conduttivo, correlabile con le meno compatte Argille Sub-appenniniche, affiora in un'area più distante dai terreni di fondazione (Fig.3d). Tali osservazioni sono state confermate anche dalle misure di rumore sismico a stazione singola HVNSR\_1 e HVNSR\_2; la prima (Fig.3c) non mostra alcun picco di ampiezza, evidenziando le caratteristiche proprie di una misura eseguita direttamente sul compatto terreno calcarenitico (Calcareniti di Gravina); la seconda, invece (Fig.3e), mostra un forte picco di ampiezza a circa 21 Hz correlabile con il sottile strato di



depositi argillosi-limosi il cui spessore tende a crescere allontanandosi dall'infrastruttura. Tale contrasto geologico, a circa 3 m di profondità, è anche evidenziato dall'analisi dei dati dell'array sismico 2-D, che hanno contribuito ad ottenere un modello della variazione in profondità delle velocità di propagazione delle onde S (Fig. 3d).

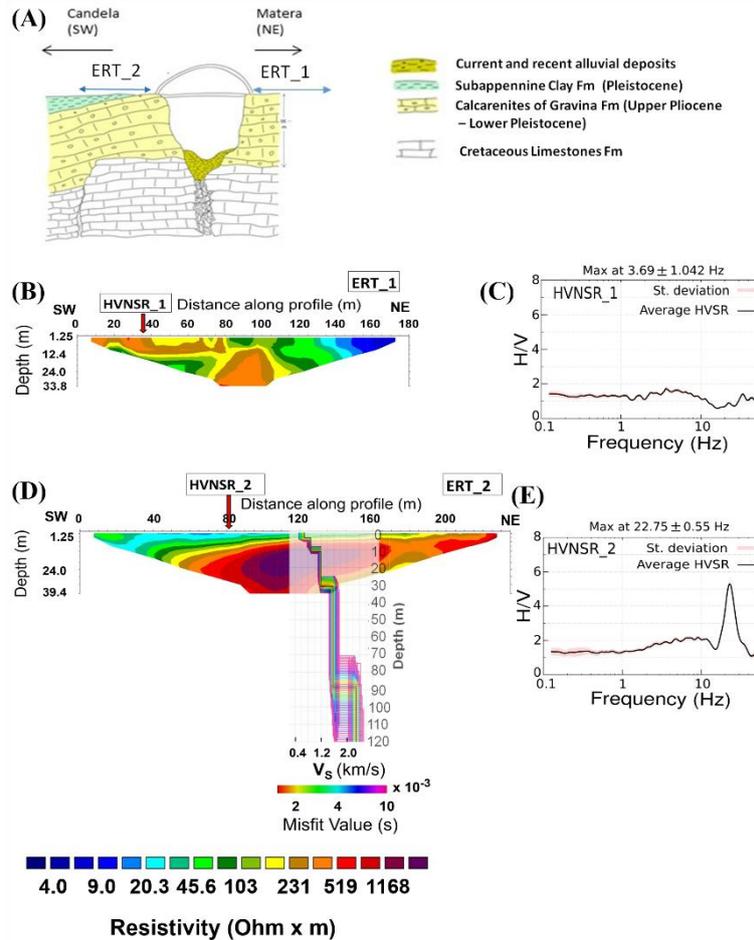


Figura 3. a) Schema geologico dei suoli di fondazione del Ponte Gravina. b) ERT\_1. c) HVNSR\_1. d) ERT\_2. e) HVNSR\_2.

### Monitoraggio dell'infrastruttura

I segnali sismici registrati dai velocimetri ed accelerometri installati sulla struttura (terremoti e rumore sismico ambientale acquisito in entrambe le tipologie di test) sono stati analizzati utilizzando diversi metodi, sia nel dominio del tempo che della frequenza. Ciò ci ha permesso di caratterizzare il comportamento dinamico dell'infrastruttura sia nel suo complesso che in diversi punti dell'impalcato, attraverso l'identificazione delle sei frequenze modali dell'infrastruttura (tabella 1) e dei loro relativi contributi nelle diverse posizioni del ponte. I dati elettromagnetici, analizzati mediante interferometria radar a microonde hanno, invece, permesso di recuperare solo le frequenze di vibrazione relative alle componenti verticali del moto (Tabella 1). In accordo con quanto previsto per un sistema strutturale in



acciaio, è stato stimato un fattore di smorzamento viscoso equivalente approssimativamente pari al 2 – 3% per ciascuna delle frequenze principali di vibrazione (Tabella 1). Le forme modali relative alla 1° e alla 3° frequenza principale del ponte sono state determinate sperimentalmente dall'analisi dei dati di rumore sismico ambientale acquisiti il 12 luglio 2019, rivelando un'ottima corrispondenza con quelle numeriche indicate dal progettista. I risultati ottenuti analizzando diverse tipologie di dati acquisiti indipendentemente e applicando diversi metodi geofisici, hanno mostrato un'ottima consistenza (Tabella 1): infatti, i valori delle frequenze principali stimate utilizzando le diverse indagini rivelano una differenza massima di 0.1 Hz.

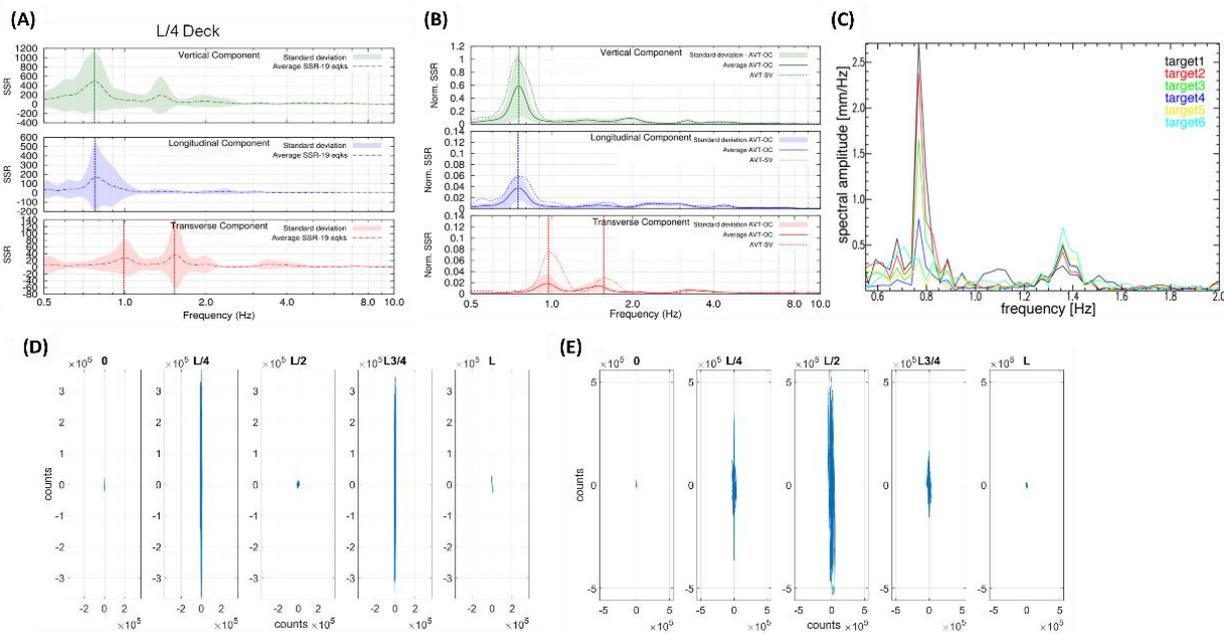


Figura 4. a) Analisi tramite il metodo dello Standard Spectral Ratio (Borcherdt et al., 1970) dei dati da terremoto registrati dall'accelerometro posizionato ad L/4 (impalcato). Si notano i modi di vibrazione a 0.75 Hz sulla componente verticale e a 0.95 Hz e 1.5 Hz sulla componente trasversale. Sulla componente longitudinale, con ampiezze spettrali inferiori, si osservano picchi in corrispondenza della frequenza di vibrazione pari a 0.75 Hz, osservata sulla componente verticale b) Analisi tramite il metodo dello Standard Spectral Ratio su dati di rumore sismico ambientale registrati dai velocimetri ad L/4 (impalcato). Si notano i modi di vibrazione a 0.75 Hz sulla componente verticale e a 0.95 Hz e 1.5 Hz sulla componente trasversale. Sulla componente longitudinale, con ampiezze spettrali inferiori, si osservano picchi in corrispondenza della frequenza di vibrazione pari a 0.75 Hz, osservata sulla componente verticale c) Modi di vibrazione a 0.75 Hz e 1.35 Hz stimati dall'analisi dei dati elettromagnetici. d) Forma modale relativa al primo modo di vibrazione. e) Forma modale relativa al terzo modo di vibrazione.



	<b>Freq. Fondamentali OMA</b>	<b>Freq. Fondamentali SSR</b>	<b>Freq. Fondamentali MRI</b>	<b>Smorzamento</b>	<b>Direzione del moto</b>
1° modo	0.76 Hz	0.76 Hz	0.75 Hz	2-3%	VERTICALE/LONGITUDINALE
2° modo	0.97 Hz	0.97 Hz		2-3%	TRASVERSALE
3° modo	1.3 Hz	1.35 Hz	1.35 Hz	2-3%	VERTICALE/LONGITUDINALE
4° modo	1.5 Hz	1.5 Hz		2-3%	TRASVERSALE
5° modo	2.0 Hz			2-3%	VERTICALE/LONGITUDINALE
6° modo	2.2 Hz	2.1 Hz		2-3%	TRASVERSALE

Tabella 1. Caratteristiche dinamiche del Ponte Gravina stimate attraverso OMA, SSR, MRI e LDM.

Le trasformate di Fourier dei segnali di rumore sismico ambientale registrati nella prima campagna on-demand hanno permesso di evidenziare il contributo relativo ai modi di vibrare sulla componente longitudinale, trasversale e verticale (Fig. 5).

In corrispondenza delle frequenze 0.75 Hz, 1.3 Hz e 2.0 Hz si osservano i picchi di ampiezza spettrale maggiore sulla componente verticale; ciò nonostante, una percentuale minore di energia alle stesse frequenze è esibita anche lungo la componente longitudinale. La componente trasversale, invece, mostra picchi spettrali alle frequenze di 0.98 Hz, 1.5 Hz e 2.2 Hz, le cui ampiezze sono di un ordine di grandezza inferiore rispetto a quelle osservate sulla componente verticale del moto.



UNIONE EUROPEA  
Fondo Sociale Europeo

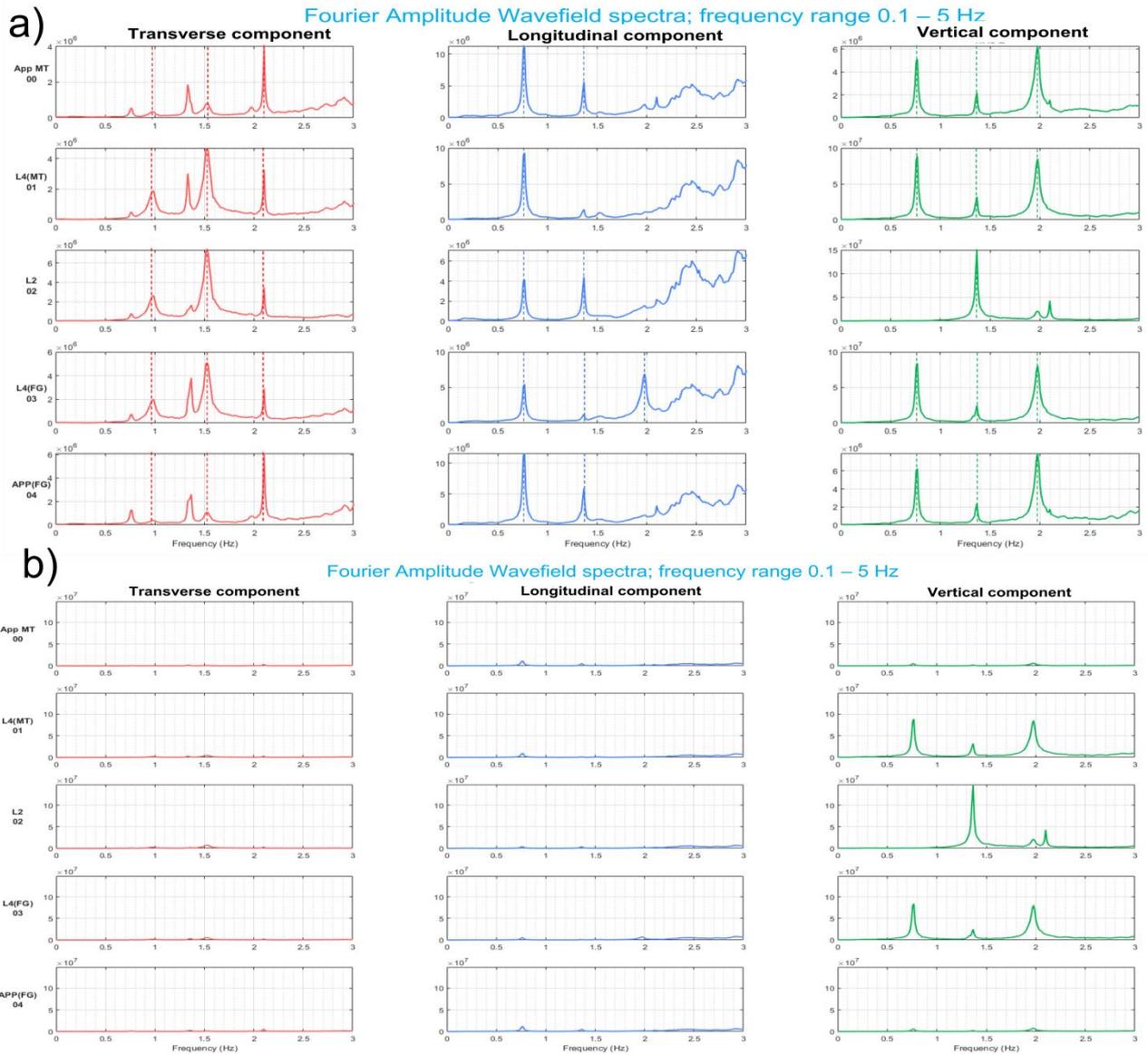


Figura 5 Trasformate di Fourier dei segnali sismici registrati dai sensori velocimetrici posizionati in cinque diversi punti della struttura, per ciascuna componente (trasversale, longitudinale e verticale). Nella figura a), il limite superiore dell'asse delle ampiezze spettrali è diverso per ciascuna registrazione. Nella figura b), il limite superiore di tutti i grafici è equivalente al massimo spettrale della componente verticale registrata dal sensore posizionato a metà dell'impalcato. In tal modo, si apprezza chiaramente che la componente verticale risulta essere quella che maggiormente contribuisce ai modi di vibrare della struttura.



UNIONE EUROPEA  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Mitigazione dei Rischi Naturali  
per la Sicurezza e la Mobilità nelle  
Aree Montane del Mezzogiorno





UNIONE EUROPEA  
Fondo Sociale Europeo



## CONCLUSIONI

La conoscenza delle proprietà iniziali del ponte ottenuta mediante l'approccio metodologico proposto e validato definisce il punto di partenza per successive analisi basate sull'implementazione di modelli numerici predittivi necessari per un duplice scopo:

- monitorare le prestazioni del ponte, al fine di determinare le migliori strategie di manutenzione dell'infrastruttura;
- definire soglie critiche utili per individuare, in maniera semi-automatica, alcune criticità nel comportamento dinamico dell'infrastruttura monitorata.

L'approccio proposto presenta quindi dei risvolti estremamente positivi e delle importanti ricadute soprattutto in termini di prevenzione e riduzione dei costi di manutenzione e/o riparazione.

Il monitoraggio continuo, speditivo e di maggior dettaglio dell'infrastruttura permette di individuare rapidamente eventuali malfunzionamenti, anomalie di comportamento e criticità indotte da coazioni/forzanti esterne consentendo un ripristino tempestivo delle condizioni ottimali, con conseguente riduzione dei costi sul ciclo di vita delle opere. Inoltre, il controllo delle infrastrutture effettuato secondo l'approccio proposto potrebbe consentire di passare da un sistema manutentivo basato su controlli a prefissate scadenze temporali ad un sistema di interventi effettuati 'a richiesta' in base alle effettive condizioni strutturali, con conseguente riduzione dei costi ed aumento della sicurezza e dell'efficienza.



UNIONE EUROPEA  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Mitigazione dei Rischi Naturali  
per la Sicurezza e la Mobilità nelle  
Aree Montane del Mezzogiorno





UNIONE EUROPEA  
Fondo Sociale Europeo



## Bibliografia

Serlenga, V, Gallipoli, MR, Ditommaso, R, Ponzio, CF, Tragni, N, Perrone, A, Stabile, TA, Calamita, G, Vignola, L, Carso, RF, Pietrapertosa, D, Lapenna, V, "An integrated approach for structural behavior characterization of the Gravina Bridge (Matera, Southern Italy)", *Structural Health Monitoring*, vol. 20, no. 6, pp 3371-3391, January 2021.

Green, MF, "Modal Test Methods for Bridges: A Review", *Proceedings of the 13th International Modal Analysis Conference*, Nashville, Tennessee, February 13-16, 1995. ISBN: 0912053488.

Salawu, OS, Williams, C, "Review of Full-Scale Dynamic Testing of Bridge Structures", *Engineering Structures*, 17(2), 113-121, February 1995.

Farrar, CR, Duffey, TA, Cornwell, PJ, Doebling, SW, "Excitation Methods for Bridge Structures", *Proceedings of the 17th International Modal Analysis Conference*, Kissimmee, Florida, 1, 1063-1068, 1997.

Borcherdt, RD, "Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay", *Bulletin of Seismological Society of America*, 60, 29-61, February 1970.

Sharma, S, Verma, GK, "Inversion of Electrical Resistivity Data: A Review", *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 9(4), 400-406, May 2015.



UNIONE EUROPEA  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Mitigazione dei Rischi Naturali  
per la Sicurezza e la Mobilità nelle  
Aree Montane del Mezzogiorno





[www.mitigoinbasilicata.it](http://www.mitigoinbasilicata.it)

## Obiettivo Realizzativo n. 4

### Sviluppo di un sistema integrato di monitoraggio

Questa pubblicazione è stata realizzata con il cofinanziamento dell'Unione Europea - FESR, PON Ricerca e Innovazione 2014-2020".

[www.ponricerca.gov.it](http://www.ponricerca.gov.it)

Responsabile della pubblicazione:

Università degli Studi della Basilicata

Scuola di Ingegneria

Via dell'Ateneo Lucano 10

85100 Potenza



UNIONE EUROPEA  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



Mitigazione dei Rischi Naturali  
per la Sicurezza e la Mobilità nelle  
Aree Montane del Mezzogiorno

