

Misure sperimentali del comportamento di pile da ponte soggette a scalzamento

*Original*

Misure sperimentali del comportamento di pile da ponte soggette a scalzamento / Aimar, M.; Civera, M.; Quattrone, A.; Sabia, D.; Foti, S.; Chiaia, B.. - ELETTRONICO. - 1:(2024). ( Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica - IARG 24 Gaeta (Ita) 04-06/09/2024).

*Availability:*

This version is available at: 11583/3001550 since: 2025-07-04T15:53:50Z

*Publisher:*

Edizioni AGI

*Published*

DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)



## MISURE SPERIMENTALI DEL COMPORTAMENTO DI PILE DA PONTE SOGGETTE A SCALZAMENTO

Aimar Mauro

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino, Torino  
mauro.aimar@polito.it*

Civera Marco

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino, Torino  
marco.civera@polito.it*

Quattrone Antonino

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino, Torino  
antonino.quattrone@polito.it*

Sabia Donato

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino, Torino  
donato.sabia@polito.it*

Foti Sebastiano

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino, Torino  
sebastiano.foti@polito.it*

Chiaia Bernardino

*Dipartimento di Ingegneria Strutturale Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino, Torino  
bernardino.chiaia@polito.it*

### Sommario

Le azioni idrauliche sono considerate una delle principali cause di collasso dei ponti e, tra queste, lo scalzamento delle fondazioni gioca un ruolo importante. Tuttavia, la valutazione delle condizioni delle fondazioni dei ponti esistenti è un'attività complessa. Infatti, una caratterizzazione completa è spesso ostacolata dalla limitata accessibilità e, in alcuni casi, dalla mancanza di informazioni disponibili sulla progettazione geotecnica. D'altra parte, un'efficace identificazione dello scalzamento è fondamentale per una previsione accurata delle prestazioni a lungo termine del ponte, anche per la pianificazione di eventuali interventi di riqualificazione. Il presente lavoro presenta i risultati di uno studio sperimentale condotto su un viadotto stradale in Piemonte soggetto a scalzamento, nel quale sono state effettuate misure dinamiche sulla sovrastruttura e sulle fondazioni. Ciò consente di ottenere la risposta del sistema terreno-struttura e di rilevare asimmetrie nel comportamento delle fondazioni dovute alla presenza dello scalzamento. Questo studio dimostra il potenziale delle misure in sito come strumento per la caratterizzazione delle condizioni di scalzamento di ponti esistenti e quindi per un'efficace identificazione di situazioni potenzialmente critiche.

### 1. Introduzione

I ponti che attraversano corsi d'acqua sono soggetti a notevoli rischi di natura idraulica, che ne rappresentano la causa principale di collasso (ad es., Kirby *et al.* 2015). Tra questi, lo scalzamento alle fondazioni delle pile da ponte rappresenta un fattore particolarmente insidioso, in quanto esso comporta

una variazione della capacità portante e della rigidità della fondazione (ad es., Ciancimino *et al.* 2022), con effetti deleteri sulle prestazioni del ponte e un incremento della vulnerabilità sismica (ad es., Ganesh Prasad e Banerjee 2013; Wang *et al.* 2014; Foti *et al.* 2023). Inoltre, la presenza di scalzamento spesso non è facilmente identificabile tramite ispezioni visive (ad es., Briaud *et al.* 2011).

Il presente contributo descrive una campagna di caratterizzazione dinamica effettuata sull'impalcato e sulle pile di un tratto di un viadotto stradale situato a Inverso Pinasca (Piemonte). Il tratto in esame è soggetto a un marcato scalzamento a causa della migrazione dell'alveo del torrente Chisone, che scorre lateralmente allo stesso. Da questo punto di vista, una peculiarità del presente studio riguarda la relativa posizione del ponte rispetto al fiume, che lo costeggia anziché attraversarlo. In questo breve contributo vengono inoltre presentati alcuni risultati preliminari delle interpretazioni delle misure eseguite sulle pile del tratto di interesse, mentre la trattazione circa la risposta dell'impalcato è riportata in Aimar *et al.* (2024b).

## **2. Caso studio: descrizione e criticità**

Il viadotto di Inverso Pinasca è situato nell'omonimo comune, che si trova nella parte Sud-occidentale della Città Metropolitana di Torino. Esso è parte di una bretella stradale costruita tra il 2004 e il 2005 per migliorare il collegamento tra Torino e l'alta Val Chisone. L'impalcato del viadotto è costituito da quattro tratti a travata continua, per una lunghezza complessiva di 1849,90 m, mentre la larghezza è pari a 14,6 m. L'impalcato poggia su 45 pile relativamente tozze, in quanto l'altezza oscilla tra 1 m e 3 m, le quali si fondano su una palificata costituita da 8 o 10 pali del diametro di 1,5 m e profondità variabile tra 14 m e 33 m.

Il presente studio si focalizza sul tratto meridionale del viadotto, il quale presenta un profilo planimetrico misto, con tratti rettilinei e curvilinei e si inserisce tra il Torrente Chisone (lato Est) e il centro abitato di Inverso Pinasca (lato Ovest). Il tratto in esame è separato dalle restanti porzioni del viadotto mediante giunti di dilatazione; pertanto, il comportamento è virtualmente indipendente dalle altre. A seguito di ripetuti eventi alluvionali che hanno interessato la Val Chisone (i più recenti nel 2010 e nel 2016), il canale principale del fiume è progressivamente migrato verso la destra orografica, inducendo un forte scalzamento delle fondazioni delle pile nella porzione settentrionale del tratto di interesse, denotate con numerazione da P8 a P10 in Figura 1. La Figura 1 include anche alcune fotografie che illustrano lo stato di dissesto a metà dell'anno 2023 (Aimar *et al.* 2024a). Nello specifico, si riscontrano l'esposizione della parte superiore dei pali di fondazione e uno scalzamento generale delle pile, con profondità fino a 3,8 m per la pila P9 (calcolata dalla superficie inferiore del pulvino). Occorre osservare che il foro di scalzamento non è simmetrico a causa della presenza di una scarpata localizzata più o meno presso l'asse longitudinale del ponte. Pertanto, solo metà della fondazione è esposta. Inoltre, il foro di scalzamento al di sotto del pilastro P8 è stato parzialmente riempito con terreno grossolano per prevenire l'ulteriore erosione in questa porzione.

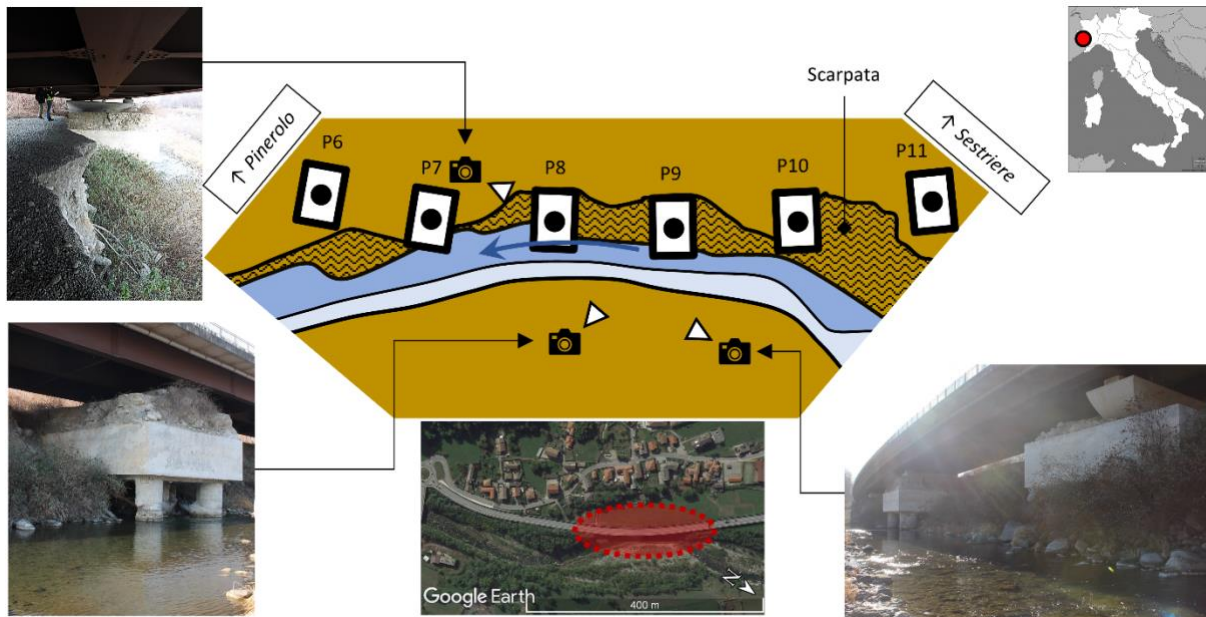


Figura 1. Mappa del tratto di interesse del viadotto, con relativa documentazione fotografica dello stato di dissesto rilevato a metà del 2023.

### 3. Campagna di misurazioni sperimentali

Alla luce dell'evidenza circa la presenza dello scalzamento, si è deciso di effettuare una campagna di caratterizzazione dinamica del sistema struttura-fondazione mediante misurazioni della risposta sia dell'impalcato sia delle pile, secondo un duplice obiettivo. Da un lato, le misurazioni consentono di stimare i parametri modali della sovrastruttura. Questi possono essere in seguito impiegati per la calibrazione di un modello numerico avanzato per analizzare le prestazioni del sistema, ad esempio in presenza di altre azioni quali sismi. Inoltre, si sono valutate eventuali peculiarità del comportamento del sistema terreno-struttura per cogliere l'influenza dello scalzamento sulla risposta dinamica, in particolare in termini di asimmetrie anomale nel comportamento potenzialmente indotte dallo scalzamento stesso. A tal fine, l'indagine si è concentrata su una porzione del viadotto comprendente parti interessate e non interessate dallo scalzamento, al fine di effettuare uno studio comparativo delle corrispondenti risposte.

La campagna di misure ha previsto l'installazione di sensori accelerometrici sia sull'impalcato sia sulle pile (Figura 2). Nello specifico, sono stati impiegati 13 accelerometri monoassiali capacitivi (modello PCB 3701G3FA3G) e 5 accelerometri piezoelettrici triassiali (modello PCB 356B18), principalmente disposti lungo le travi longitudinali esterne dell'impalcato in corrispondenza della porzione soggetta a scalzamento, ossia tra le pile P7 e P10 (si veda Figura 1). Inoltre, sulle pile P7, P8 e P9 sono stati collocati sensori piezoelettrici ad alta sensibilità (10 V/g; modello PCB 393B04), sia in configurazione monoassiale verticale che multiassiale. Per tutte le pile è stata adottata una disposizione minima dei sensori, composta da quattro accelerometri verticali agli angoli più uno/due orizzontali, per individuare asimmetrie sia nella risposta verticale che in quella orizzontale. Tuttavia, è stata adottata una disposizione densa di sensori per la pila P9, essendo questa soggetta a maggiore scalzamento (si veda Figura 1). I sensori sono stati collocati alla sommità dei pulvini, ma si può ritenere che la risposta vibrazionale misurata sia identica a quella della platea di fondazione, a causa della ridotta deformabilità delle pile.

L'acquisizione è stata effettuata tramite un sistema di acquisizione LMS Siemens SCADAS a 40 canali, utilizzando una frequenza di campionamento di 256 Hz, e sono state misurate le vibrazioni ambientali e quelle indotte dal passaggio dei veicoli sopra l'impalcato.

Il numero limitato di canali e di sensori ad alta sensibilità rispetto alle posizioni di misura ha indotto a eseguire le misurazioni attraverso più setup. In tutti i setup, gli accelerometri sull'impalcato e parte di quelli installati sulla pila P9 sono stati mantenuti inalterati, anche per fornire un riferimento per la normalizzazione delle misure, mentre i sensori ad alta sensibilità sono stati di volta in volta riposizionati per misurare simultaneamente le vibrazioni delle coppie di pile P7-P9 e P7-P8. La logica alla base di questa strategia è quella di analizzare la risposta relativa di ciascuna coppia di pile, al fine di cogliere in maniera efficace eventuali differenze nel comportamento.

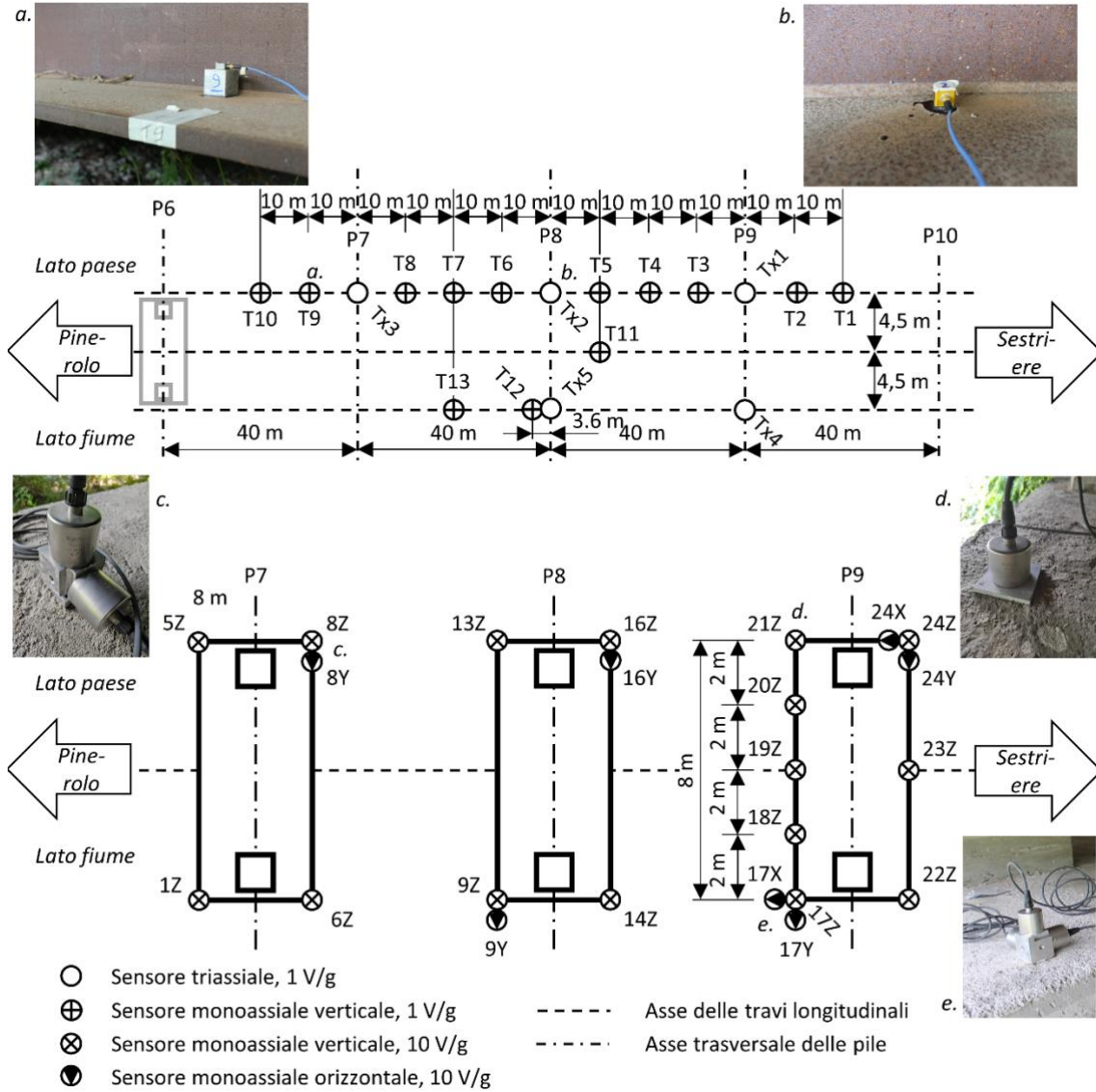


Figura 2. Mappa indicante le posizioni dei sensori lungo le travi longitudinali dell'impalcato (sopra) e sui pulvini (sotto), con incluse fotografie degli accelerometri monoassiali capacitivi (a), degli accelerometri piezometrici triassiali (b) e degli accelerometri ad alta sensibilità in configurazione monoassiale (d), biassiale (c) e triassiale (e).

#### 4. Risultati preliminari

Al fine di effettuare una valutazione preliminare della risposta dinamica delle pile, questo studio ha analizzato il valore di valore efficace (o ampiezza Root Mean Square, RMS) dell'accelerazione verticale (qui etichettata come  $a_z$ ) registrata ai vertici di ciascun pulvino. Questo approccio, adottato in Foti e Sabia (2010), si fonda sul criterio secondo il quale variazioni asimmetriche delle condizioni di supporto

per sistemi relativamente rigidi (come lo scalzamento delle pile tozze in esame) si traducono in un'asimmetria nell'ampiezza delle vibrazioni. Per una stima più affidabile,  $a_z$  è stata calcolata a partire da finestre temporali di 10 s estratte dai dati registrati, ciascuna corrispondente al passaggio di un veicolo sull'impalcato del viadotto. La Figura 3 mostra la stima di  $a_z$  per le pile P7 e P9, cioè quelle con le fondazioni meno e più scalzate (Figura 1). I risultati sono raggruppati in base al lato di applicazione del carico (lato paese vs. lato fiume). Inoltre, si evidenzia l'andamento sul lato a monte e sul lato a valle, per indagare le asimmetrie sia in direzione paese-fiume sia lungo l'asse longitudinale del ponte. Infine, per ogni carico considerato, i valori di  $a_z$  sono normalizzati rispetto al loro valore medio ( $a_{z,avg}$ ), per eliminare l'influenza dell'entità del carico stesso.

In tutti i casi, si osserva un maggiore  $a_z$  sul lato corrispondente all'applicazione del carico, compatibilmente con le attese. Tuttavia, si possono osservare alcune differenze rilevanti quando si confronta il comportamento dinamico di P9 e P7. Da un lato, la distribuzione spaziale di  $a_z$  è simile quando i veicoli passano sul lato della città, in termini di asimmetria. Invece, per i carichi sul lato del fiume,  $a_z$  è quasi uniforme in P7 (in quanto il valore normalizzato è vicino all'unità), mentre si osservano variazioni maggiori per P9. Pertanto, a parità di carichi, i livelli di vibrazione in P9 sono fortemente asimmetrici rispetto a P7, presumibilmente a causa delle variazioni di rigidezza indotte dallo scalzamento. Inoltre, in P9,  $a_z$  è significativamente maggiore a valle che a monte. Questa peculiarità si osserva sia sul lato città che sul lato fiume, per tutti gli impulsi di carico e i lati di applicazione considerati. La discrepanza è invece minore in P8 (non riportato in questo contributo) e quasi trascurabile in P7. Questo risultato è in qualche modo inaspettato, poiché l'erosione agisce principalmente lungo l'asse longitudinale del ponte e non dovrebbe produrre differenze rilevanti nella risposta tra monte e valle. Invece, questa evidenza potrebbe indicare che le variazioni di rigidezza nel sistema terreno-struttura dovute allo scalzamento si verificano anche lungo la direzione di flusso del fiume e non solo nella direzione trasversale, come ci si potrebbe aspettare dalle informazioni disponibili. Questo potrebbe essere una conseguenza della curvatura del canale fluviale, che determina una morfologia complessa della scarpata di scalzamento.

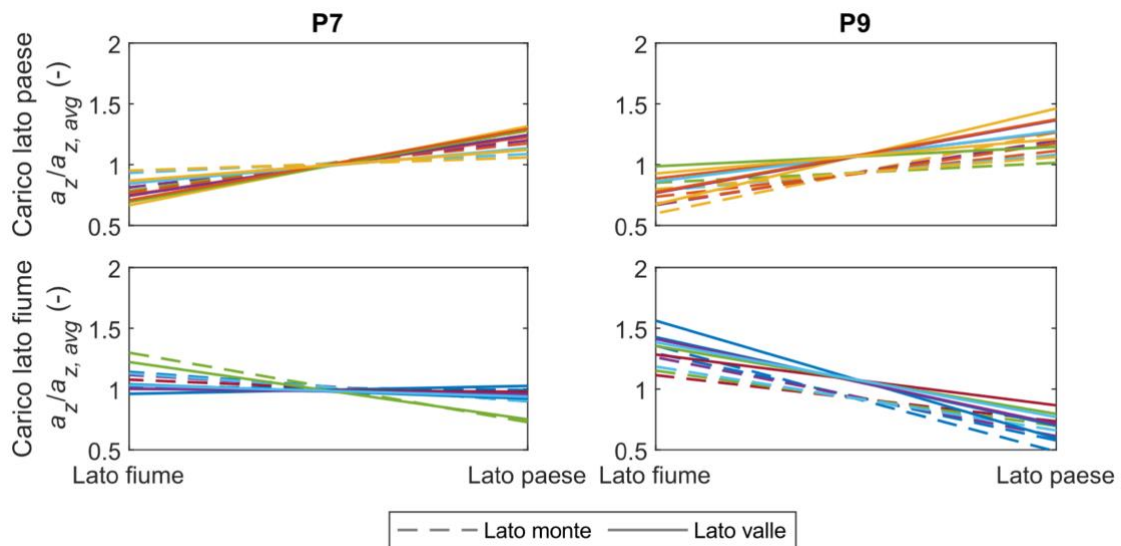


Figura 3. Stime del valore normalizzato di accelerazione RMS  $a_z/a_{z,avg}$  ai pulvini delle pile P7 e P9, per carichi applicati lato fiume e lato paese. I risultati sono raggruppati secondo il lato considerato per il calcolo del valore RMS, ossia lato monte oppure lato valle. Nello specifico, a ogni colore corrisponde uno specifico carico (ossia un veicolo in transito sull'impalcato), con la linea continua che rappresenta il livello di vibrazione osservato lato valle e la linea tratteggiata che rappresenta la risposta lato monte.

## 5. Conclusioni e future attività

Il presente studio ha descritto una campagna sperimentale condotta per valutare la risposta dinamica di un viadotto stradale a più campate nei pressi di Torino, interessato da scalzamento alla fondazione. L'indagine ha riguardato la risposta dell'impalcato e delle fondazioni su una porzione del ponte comprendente sia pile soggette a scalzamento sia pile non erose. La logica alla base di questa strategia è quella di analizzare la risposta relativa di porzioni vicine del ponte, con diverse condizioni di scalzamento. In questo contributo sono stati esposti alcuni risultati preliminari dell'elaborazione dei dati sperimentali relativi alle pile, mentre la trattazione circa la risposta dell'impalcato è riportata in Aimar *et al.* (2024b). I risultati hanno dimostrato la presenza di un comportamento asimmetrico nell'ampiezza delle vibrazioni delle pile, che può essere attribuito alla disomogeneità della distribuzione della rigidità del terreno dovuta allo scalzamento. D'altra parte, si prevede nel breve termine di effettuare delle analisi più approfondite sulla risposta delle pile, nonché di procedere a un'approfondita identificazione dei modi di vibrazione dell'impalcato congiuntamente alle pile stesse. Inoltre, poiché l'ente gestore dell'infrastruttura (Città Metropolitana di Torino) sta pianificando interventi di adeguamento di tipo idraulico e geotecnico nel breve termine, si prevede di ripetere nuovamente la campagna di misure, per confrontare il comportamento dinamico del viadotto prima e dopo tali interventi.

### Ringraziamenti

Il lavoro descritto costituisce parte delle attività di ricerca sviluppate dagli autori nell'ambito del "PNRR": SPOKE 7 "CCAM, Connected Networks and Smart Infrastructure" - WP4, del partenariato esteso "PNRR": PE6 RETURN SPOKE VS3 e del progetto DPC-ReLUI5 2024-2026 sponsorizzato dal Dipartimento di Protezione Civile della Presidenza del Consiglio dei Ministri. Gli autori ringraziano anche la Città Metropolitana di Torino, in particolare gli Ing. Matteo Tizzani, Marco Benso e Giovanni Luca Zagardo, per il supporto dato durante questa attività di ricerca.

### Riferimenti bibliografici

- Aimar, M., Civera, M., Foti, S., Chiaia, B. (2024a). "Preliminary Insights from Surveys of Bridges at High Scouring Risk in West Piedmont". II Fabre Conference – Existing bridges, viaducts and tunnels: research, innovation and applications (FABRE24), Genova.
- Aimar, M., Civera, M., Foti, S., Chiaia, B., Quattrone, A., Sabia, D. (2024b). "Dynamic measurements for assessing bridge response to foundation scour". IABMAS 2024: 12th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Copenhagen.
- Briaud, J.L., Hurlbaeus, S., Chang, K.A., Yao, C., Sharma, H., Yu, O.Y., Darby, C., Hunt, B.E., Price, G.R. (2011). "Realtime monitoring of bridge scour using remote monitoring technology". In.: Texas Transportation Institute.
- Ciancimino, A., Jones, L., Sakellariadis, L., Anastasopoulos, I., Foti, S. (2022). "Experimental assessment of the performance of a bridge pier subjected to flood-induced foundation scour", *Géotechnique*, 72, 998-1015.
- Foti, S., Sabia, D. (2010). "Influence of foundation scour on the dynamic response of an existing bridge", *Journal of bridge engineering*, 16, 295-304.
- Foti, S., Aimar, M., Ciancimino, A., Giordano, L. (2023). "Influence of scour of foundations on the seismic performance of bridges". In *SECED 2023 Conference*. Cambridge, UK.
- Ganesh Prasad, G., Banerjee, S. (2013). "The impact of flood-induced scour on seismic fragility characteristics of bridges", *Journal of Earthquake Engineering*, 17, 803-828.
- Kirby, A., Roca, M., Kitchen, A., Escarameia, M., Chesterton, O. (2015). Manual on scour at bridges and other hydraulic structures. Ciria.
- Wang, Z., Padgett, J.E., Dueñas-Osorio, L. (2014). "Risk-consistent calibration of load factors for the design of reinforced concrete bridges under the combined effects of earthquake and scour hazards", *Engineering Structures*, 79, 86-95.