

EFFETTO DELL'INTERAZIONE TERRENO-STRUTTURA SULL'IDENTIFICAZIONE DINAMICA DI UN PONTE IN C.A.P. DEL 1950

A. Ambrosino, A. De Angelis, S. Sica

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi del Sannio

anambrosino@unisannio.it

M. R. Pecce

Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università di Napoli Federico II

pecce@unina.it

Sommario

Il lavoro analizza il ruolo dell'interazione terreno-struttura (SSI) sulla identificazione dinamica di un ponte in cemento armato precompresso (c.a.p.), che attraversa il torrente San Nicola a Benevento. Il ponte fu progettato negli anni '50 dall'ing. Riccardo Morandi con l'innovativa tecnica di precompressione da lui brevettata. Per la caratterizzazione dinamica del ponte è stato sviluppato un modello 3D agli elementi finiti con il software MIDAS FEA NX. Il modello numerico, oltre alle pile e all'impalcato, comprende anche un'adeguata porzione di sottosuolo su cui poggiano le due pile. Lo studio è stato articolato in due fasi di calcolo. Dapprima è stata modellata la sola sovrastruttura ipotizzata a vincoli fissi. Successivamente è stato risolto il modello completo, comprensivo di impalcato, pile, fondazioni e terreno. I risultati ottenuti dai due set di analisi hanno consentito di estrapolare, per confronto, il ruolo dell'interazione terreno-struttura sull'identificazione dinamica del ponte. Tale ruolo risulta trascurabile per i primi modi di vibrare del ponte, che sono di tipo traslazionale, mentre è significativo per i modi superiori di tipo torsionale.

1. Introduzione

Negli ultimi anni si sono verificati diversi crolli di ponti sia in Italia sia all'estero. Ciò può essere ricondotto a un diffuso stato di degrado delle strutture in c.a. per la carenza di un'adeguata manutenzione delle infrastrutture viarie. Appare, pertanto, sempre più urgente, specialmente per il nostro Paese, l'analisi dello stato di fatto dei ponti esistenti. Tale urgenza è amplificata anche dall'elevata sismicità di gran parte del territorio italiano per cui ponti e viadotti rappresentano reti infrastrutturali di rilevanza strategica per la gestione dell'emergenza sismica e post-sismica. Infatti, oltre a garantire la via di fuga per la popolazione locale, essi sono anche parte delle arterie principali per l'arrivo dei mezzi di soccorso. L'identificazione dinamica dei ponti rappresenta oggi una tecnica sempre più diffusa, supportata da numerosi studi e ricerche, per l'implementazione di modelli accurati e affidabili, necessari per eseguire analisi di complessità sempre maggiore. Poiché i ponti in c.a. sono in genere caratterizzati da un notevole sviluppo lineare (centinaia di metri o chilometri), l'analisi della sola sovrastruttura, schematizzata con vincoli fissi alla base, potrebbe non sempre rappresentare correttamente ed esaustivamente la reale risposta dinamica dell'opera.

Se intervengono fenomeni di interazione (SSI) con il terreno di fondazione e laterale, la risposta dinamica della sovrastruttura può modificarsi sostanzialmente e tale modifica per ponti e viadotti di notevole luce si può combinare a sua volta con gli effetti di asincronia del moto di base in relazione all'eterogeneità locale del sottosuolo in corrispondenza delle fondazioni delle pile.

In letteratura sono presenti diversi studi che contemplano l'interazione terreno-struttura dei ponti. Nella maggior parte dei casi, tali studi sono condotti tramite approcci semplificati di tipo disaccoppiato, che

consistono nell'analizzare separatamente gli effetti di sito in condizioni *free-field*, l'interazione cinematica per la definizione del moto di input (FIM) e l'interazione inerziale (metodo delle sottostrutture). L'obiettivo di questo lavoro è quello di stabilire se è significativo o meno il ruolo della SSI sull'identificazione dinamica di un ponte in cemento armato precompresso (c.a.p.), che ha un'importanza strategica per la città di Benevento. Il ponte è caratterizzato dalla particolarità di presentare una pila con fondazione che funge anche da spalla (pila-spalla). È stato, pertanto, costruito un dettagliato modello tridimensionale della sovrastruttura (impalcato+pila), delle fondazioni e del sottosuolo interagente con esse. Infine, sono state calcolate per via numerica le forme modali e le frequenze proprie di oscillazione del ponte e confrontate con quelle sperimentali provenienti dalla campagna di indagini descritta in De Angelis et al. (2021).

2. Il ponte San Nicola (Benevento, Italia)

Il ponte San Nicola, situato nel comune di Benevento, collega l'area di Capodimonte alla zona alta della città, detta Cretarossa (Fig. 1). Il ponte è stato progettato tra il 1952 e il 1955 dall'ing. Riccardo Morandi, progettista anche del ben più famoso ponte sul fiume Polcevera a Genova, crollato nel 2018. Un'analisi dettagliata del Ponte San Nicola è riportata negli studi di De Angelis et al. (2021) e Pecce et al. (2020), di cui nel seguito si riportano i dati essenziali.



Fig 1. Vista laterale (a) e dettaglio della pila-spalla (b) del Ponte San Nicola

Il ponte presenta una luce di 80 m con due sbalzi laterali ciascuno di 20 m ed è realizzato in calcestruzzo precompresso (Fig. 2). La precompressione, che era una tecnologia emergente per l'epoca, è stata applicata con 252 cavi ancorati mediante uno dei brevetti dell'ingegnere Morandi. L'impalcato è costituito da 4 travi a cassone collegate da una soletta superiore e da un sistema di 29 traversi di altezza e spessori variabili. Nella zona di momento negativo la sezione è stata completata da una controsoletta inferiore che forma una sezione a cassone multicellulare con 8 celle. La larghezza totale del ponte è di 9 m con una carreggiata di 7 m.

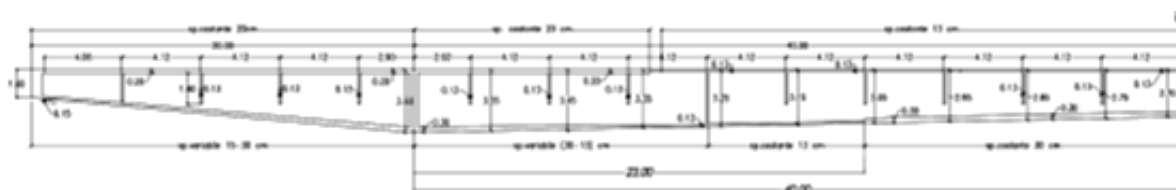


Fig 2. Sezione longitudinale impalcato del Ponte San Nicola

La struttura risulta molto complessa e innovativa per l'epoca, anche per quanto riguarda lo schema geometrico della fondazione (Fig. 3). Inoltre, a differenza di quanto accade in altri casi in cui si individuano distintamente gli elementi strutturali dell'opera (impalcato, pila, spalla), il ponte San Nicola si configura come un caso raro di ponte con pila-spalla. La pila è costituita da otto pilastri della larghezza variabile da 1,50 m a 4,00 m con spessore costante di 40 cm ed è vincolata alla sottostante fondazione

mediante una cerniera realizzata con un sistema di armature incrociate (Fig. 1b). La fondazione riprende l'articolazione della pila stessa poiché è costituita da 8 "lamine" (terminologia utilizzata da Morandi) dello spessore di 40 cm (corrispondenti ai pilastri che formano la pila) collegate in testa con un elemento trasversale pieno. A seguito di vari saggi eseguiti in fondazione nel 2020, si è scoperto che tra le lamine è presente un terreno di riempimento corrispondente granulometricamente a una sabbia.

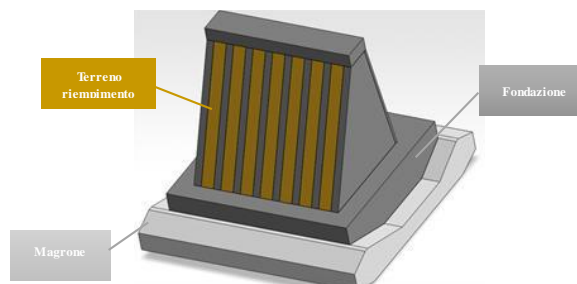


Fig. 3. Dettaglio 3D della fondazione - spalla-del Ponte San Nicola

3. Studio geotecnico

Per la caratterizzazione geotecnica del sottosuolo su cui poggiano le due pile del ponte San Nicola, si è fatto riferimento ai risultati di diverse indagini geognostiche eseguite nel mese di novembre 2020 nonché a studi pregressi del 2015, svolti nello stesso sito per la stabilizzazione del pendio in destra idraulica del torrente San Nicola. Complessivamente sono stati eseguiti 3 sondaggi a carotaggio continuo con annesse prove SPT e prelievo di campioni indisturbati, 1 prova sismica Down Hole corredata da una prova MASW e da una prova HVSR in prossimità della pila destra. La prova HVSR ha fornito picchi della funzione di amplificazione del sottosuolo in corrispondenza delle frequenze di 2 Hz, 4.5 Hz, 10 Hz e 16 Hz. Le fondazioni delle due pile del ponte si attestano sulla facies più grossolana (sabbia con ciottoli eterometrici) dei depositi alluvionali (Sg) del fiume Calore, intercalati da sottili strati di limo sabbioso (Lsa). Inferiormente è stata rinvenuta l'argilla grigio azzurra, identificabile come *bedrock* per il sito in esame. Sui campioni indisturbati di argilla e limo prelevati nel corso dei sondaggi sono state eseguite prove edometriche e triassiali del tipo CIU e CID. In sintesi, i terreni su cui poggiano le spalle del ponte San Nicola possono essere caratterizzati con i parametri riportati in Tab 1.

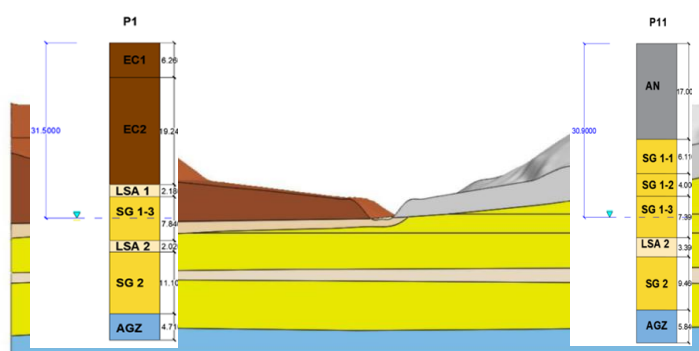


Fig. 4. Sezione stratigrafica long. e dettaglio in corrispondenza delle pile

Layer	Vs [m/s]	γ [kN/m ³]	c' [kPa]	ϕ' [°]	ν [-]
AN	374	18	-	20,77	0,33
EC1	185-226	18	8,72	24,37	0,36
LSA1	325	18,45	15,63	18,72	0,36
SG1	298-645	21,26	-	34,49	0,39
LSA2	661	18,45	15,63	18,72	0,46
SG2	680	21,26	-	34,49	0,46
AGZ	652	18,78	9,51	21,31	0,47

Tab 1. Principali proprietà fisiche e meccaniche

4. Modellazione numerica: modello a base fissa ed effetto della SSI

Per l'identificazione dinamica del ponte è stato sviluppato un modello 3D agli elementi finiti tramite MIDAS FEANX. Come già anticipato, sono stati generati due modelli di calcolo: uno a base fissa e un modello completo che include sovrastruttura, fondazioni e terreno. Il modello con la sola sovrastruttura (Fig. 5) rappresenta il riferimento per valutare l'eventuale contributo del terreno sulla risposta dinamica complessiva dell'opera.

4.1 Modello a base fissa

Per quanto riguarda le proprietà meccaniche del calcestruzzo dell'impalcato e delle pile sono stati utilizzati gli stessi valori caratterizzati in uno studio precedente (De Angelis et al. 2021). L'impalcato e le pile sono stati modellati tramite elementi solidi (Fig. 5), per i quali l'analisi è sicuramente più onerosa rispetto all'utilizzo di elementi monodimensionali e bidimensionali.



Fig 5. Modello a base fissa del ponte San Nicola generato in MIDAS FEA NX

Il marciapiede in acciaio, aggiunto in un secondo momento dopo la costruzione del ponte, è stato modellato attraverso l'inserimento di una trave longitudinale (elemento *frame*), con rigidità trasversale equivalente al sistema marciapiede-guard-rail-parapetto, che corre lungo tutto l'impalcato. Alla base delle pile è stata inserita una cerniera. La prova dinamica in sito (De Angelis 2021) ha evidenziato che il Ponte San Nicola, allo stato attuale, presenta gli sbalzi laterali vincolati orizzontalmente per effetto del riempimento con cemento del giunto di dilatazione e verticalmente a causa di opere di contenimento (gabbionate) realizzate successivamente alla costruzione del ponte. Coerentemente, nel modello strutturale all'estremità degli sbalzi del ponte sono stati inseriti vincoli fissi in orizzontale e vincoli cedevoli in verticale. Per l'identificazione dinamica del ponte è stata condotta un'analisi modale. I risultati ottenuti in termini di frequenze fondamentali con annesse forme modali (Tab 2) e deformate modali (Fig. 6) sono stati confrontati sia con i dati sperimentali sia con precedenti previsioni numeriche condotte con il codice SAP2000 tramite utilizzo di elementi *shell* (De Angelis et al., 2021). Si riscontra una risposta più rigida del modello 3D sviluppato in MIDAS FEA NX rispetto al modello SAP2000. Tale differenza può essere attribuita, a parità di proprietà dei materiali, all'utilizzo nel presente studio di elementi solidi per la modellazione della sovrastruttura. In termini di forme modali si riscontra in generale una buona corrispondenza con i valori ricavati sperimentalmente.

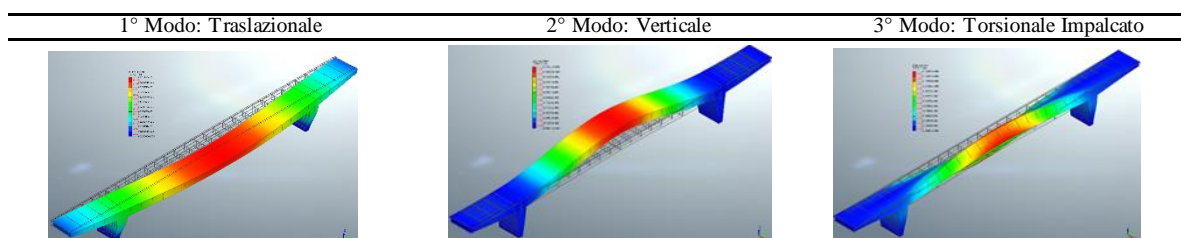


Fig 6. Forme modali numeriche modello a base fissa

MODO	Sperimentale	Num. SAP2000		Num. MIDAS	
	f [Hz]	f [Hz]	D _r [%]	f [Hz]	D _r [%]
1	1.18	1.91	38	1.97	40
2	2.12	2.16	2	2.22	5
3	5.69	4.16	-37	6.61	14

Tab 2. Confronto tra frequenze fondamentali numeriche e sperimentali

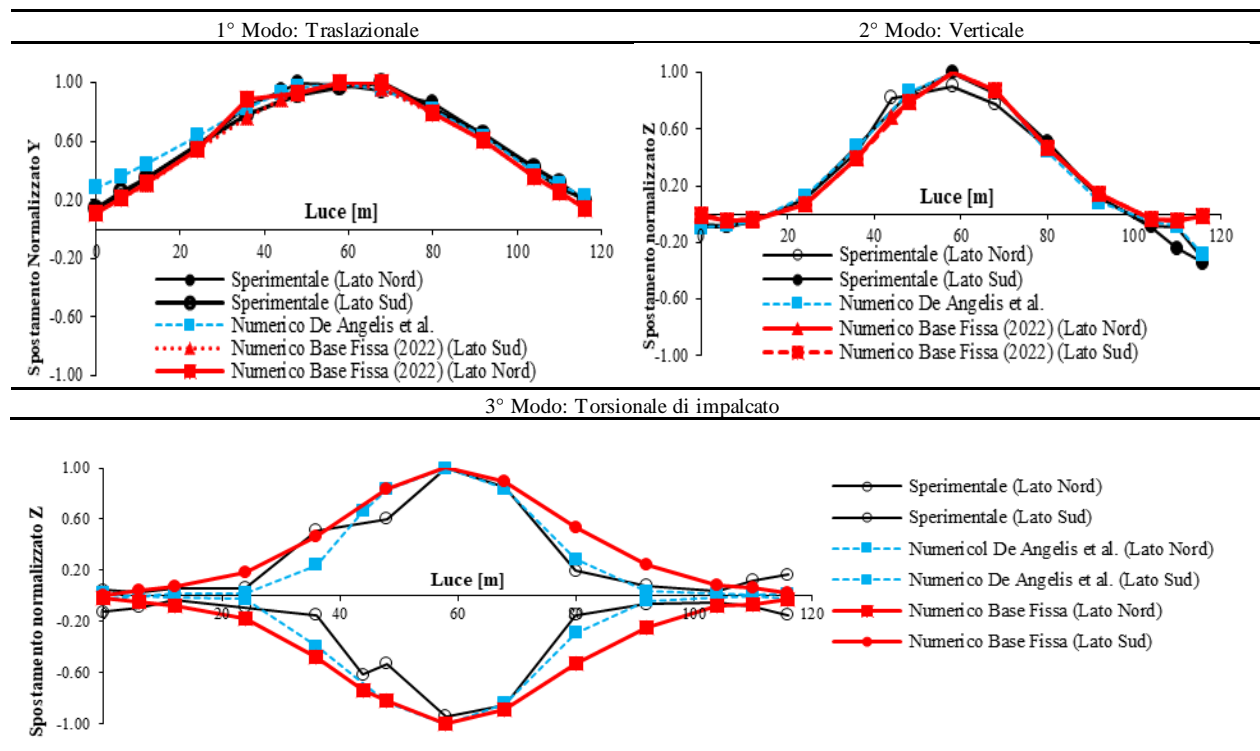


Fig. 7. Confronto tra deformate modali sperimentali e numeriche lungo le due carreggiate del ponte

4.2 Modello completo (SSI)

Il modello completo è stato ottenuto aggiungendo alla sovrastruttura le fondazioni delle pile e la porzione di sottosuolo interagente con il ponte. L'implementazione della reale morfologia della valle su cui sono poggiate le pile del ponte è stato sicuramente uno degli aspetti più complessi affrontato in questo lavoro di modellazione. A tal fine, si è fatto riferimento al rilievo fotogrammetrico del Comune di Benevento, da cui sono state estratte le curve di livello 3D utilizzate per ricreare la superficie topografica del sito in corrispondenza del ponte. Successivamente sono state implementate le singole stratigrafie di sondaggio e create le superfici stratigrafiche di raccordo. Il complessivo dominio di analisi, su cui è stato poi incardinato il ponte, corrisponde a un volume di terreno di dimensioni 250m x 200m x 57 m.

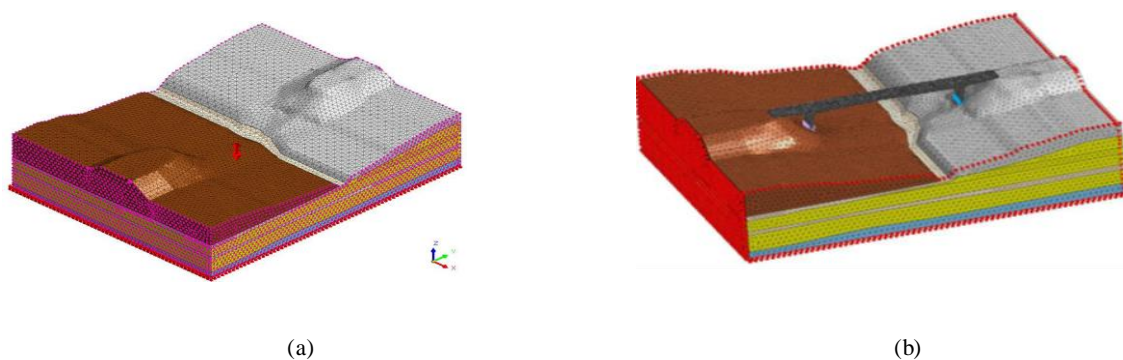


Fig 8. Dominio di terreno (a) e modello completo (b) modellato in MIDAS

Sul modello completo (Fig. 8b) è stata eseguita un'analisi modale, i cui risultati sono riportati in Fig. 9. e Tab. 3. Si osserva un migliore accordo dei risultati numerici con i dati sperimentali. Rispetto al modello a base fissa, il miglioramento della previsione numerica in presenza di SSI si osserva prevalentemente sul terzo modo di vibrare.

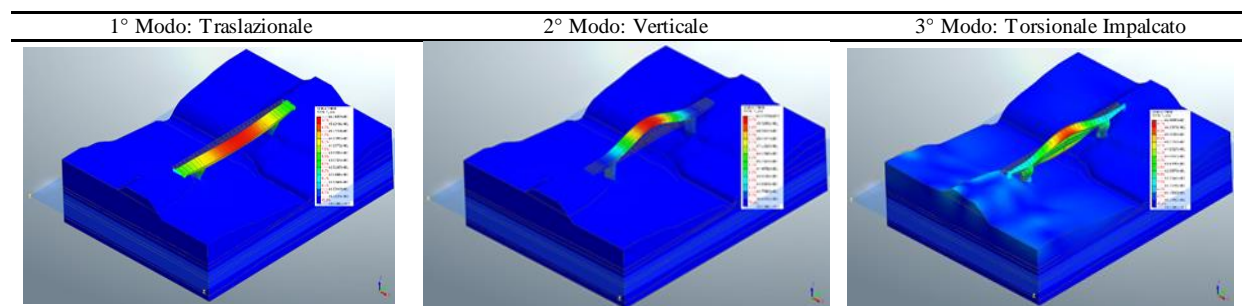


Fig 9. Forme modali numeriche con contributo dell'SSI

Modo	Sperimentale	Num. SSI (2022)	
	f [Hz]	f [Hz]	D _r [%]
1	1.18	1.56	24
2	2.12	2.08	-2
3	5.69	6.02	5

Tab 3. Confronto tra frequenze fondamentali e sperimentali

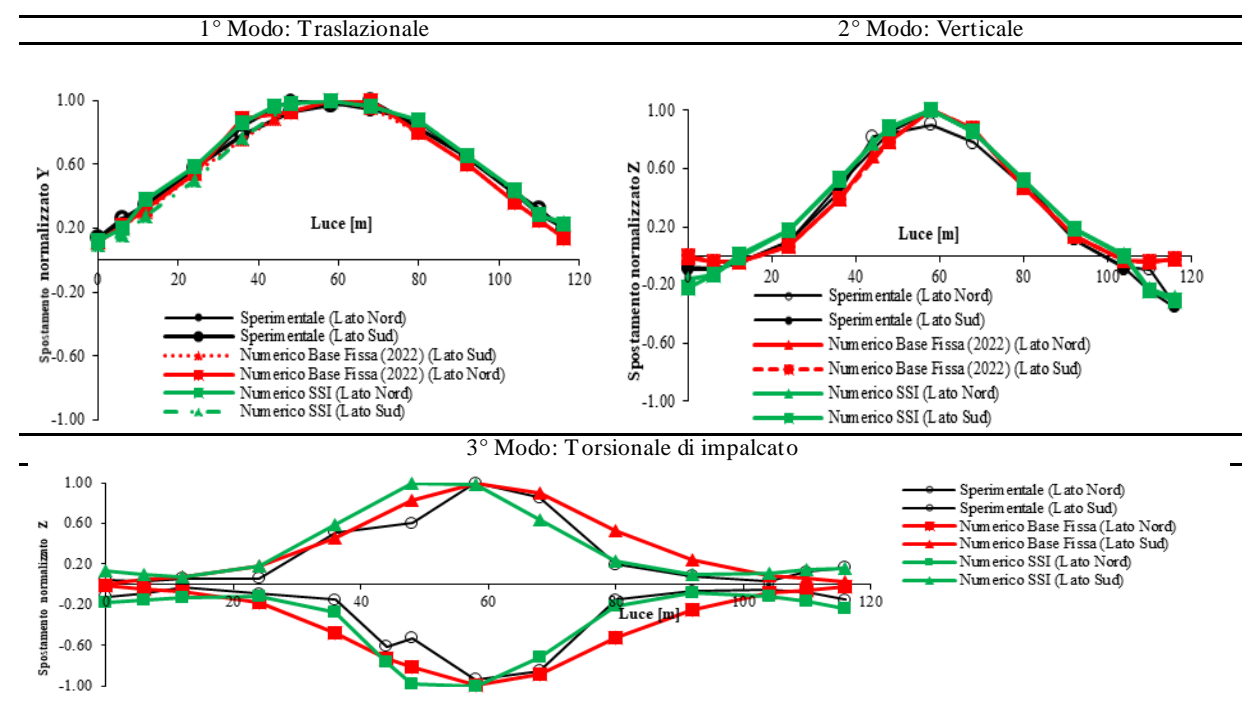


Fig 10. Confronto tra le deformate modali numeriche e sperimentali lungo le due carreggiate del ponte

5. Conclusioni

In questa nota sono stati descritti i primi risultati di uno studio numerico finalizzato alla valutazione dell'effetto di interazione terreno-struttura sull'identificazione dinamica di un ponte in calcestruzzo armato precompresso del 1950. L'obiettivo dello studio è quello di definire un modello accurato della struttura necessario per effettuare analisi sismiche di tipo avanzato. Sulla base dei risultati ottenuti in queste prime analisi numeriche, si può concludere che il semplice modello a base fissa consente di riprodurre forme modali e valori di frequenza prossimi a quelli ricavati sperimentalmente ma con un errore percentuale ancora significativo; il contributo della SSI consente di riprodurre in maniera più soddisfacente i valori di frequenza e le forme modali ricavate sperimentalmente, riducendo l'errore percentuale soprattutto per quanto riguarda il modo di vibrare torsionale.

Bibliografia

M.R. Pecce, F. Santamato, E. Ciampa, E. Cosenza, (2019). "The design approach of a Prestressed Concrete bridge

constructed in 1950s in Italy”. Proc. of the International fib Symposium on Conceptual Design of Structures, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid, Spain, Sept 26-28.

A. De Angelis, G. Esposito, G. Maddaloni, E. Cosenza and M. Pecce, (2021). “Ambient vibration test on an existing prestressed concrete bridge”. COMPDYN 2021 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering M. Papadrakakis, M. Fragiadakis (eds.) Streamed from Athens, Greece, 27–30 June 2021.

Carbonari S, Dezi F, Leoni G. (2011) “Seismic soil-structure interaction in multi-span bridges: application to a railway bridge.” Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 40(11): 1219-1239.

Elgamal A, Yan L, Yang Z, Conte JP. “Three-dimensional seismic response of Humboldt Bay bridge-foundation-ground system.” Journal of Structural Engineering, 2008: 134(7): 1165-76.

Gara F, Regni M, Roia D, Carbonari S, Dezi F. (2019) “Evidence of coupled soil-structure interaction and site response in continuous viaducts from ambient vibration tests.”. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 408-422.