

# STUDIO DELL'INTERAZIONE DINAMICA TERRENO-SPALLA-SOVRASTRUTTURA PER UNA SPALLA DA PONTE

Davide Noè Gorini  
*Università di Roma Sapienza*  
*davideno.gorini@uniroma1.it*

Luigi Callisto  
*Università di Roma Sapienza*  
*luigi.callisto@uniroma1.it*

## Sommario

La spalla è la parte di un ponte che maggiormente interagisce con il terreno, inoltre il suo comportamento dinamico è influenzato anche dall'interazione con la sovrastruttura, producendo un reciproco scambio di forze di inerzia durante il sisma. In questa nota si illustra una metodologia per l'analisi della risposta dinamica di spalle da ponte attraverso l'applicazione a un particolare caso di studio, per il quale sono disponibili informazioni sia sui terreni di fondazione, sia sulla struttura in elevazione. Lo studio si avvale di modelli numerici di interazione accoppiati sviluppati con il codice di calcolo OpenSees, descrivendo il comportamento meccanico dei terreni mediante il modello costitutivo a plasticità diffusa di Manzari e Dafalias (2004), calibrato sui dati sperimentali. L'interazione dinamica tra la spalla e la struttura del ponte è stata studiata sia mediante la semplice applicazione di forze statiche equivalenti, sia attraverso lo sviluppo di un metodo di validità generale per l'identificazione di un modello strutturale equivalente. Il presente studio si colloca all'interno di un più ampio progetto di ricerca sulla dinamica delle spalle da ponte: in questa nota si mostrano alcuni risultati intermedi riguardanti la risposta sismica locale del sottosuolo Pantano, evidenziando gli effetti di multi-direzionalità del moto sismico, le azioni sismiche trasmesse in fondazione e alcune peculiarità relative alla propagazione del moto verticale.

## 1. Il viadotto Pantano

Il viadotto Pantano è stato progettato per essere la struttura di accesso al ponte sospeso sullo Stretto di Messina. Si tratta di un ponte a travata con lunghezza complessiva di circa 400 m, composto da tre impalcati curvilinei, due stradali e uno centrale ferroviario, che partendo dalla struttura terminale del ponte sospeso poggiano su cinque pile intermedie per poi terminare in corrispondenza della massiccia spalla situata sul lato Messina, come mostrato in Fig. 1 (a). I tre impalcati sono vincolati alla spalla tramite appoggi fissi, mentre presentano degli appoggi unidirezionali in corrispondenza delle pile, per consentire lo spostamento dell'impalcato solo nella direzione del proprio asse. Le pile hanno un'altezza progressivamente decrescente avvicinandosi alla spalla, compresa tra 36 m e 18 m, per

il sito del ponte è caratterizzato da un'elevata sismicità per la presenza di diverse segmentazioni di faglie attive. Come illustrato in Fig. 1 (b), la spalla del viadotto presenta delle dimensioni considerevoli e inoltre, in condizioni sismiche, è soggetta a elevate forze inerziali derivanti dalla sovrastruttura, in quanto il viadotto Pantano è stato progettato affinché trasmettesse gran parte delle azioni sismiche proprio alla spalla. Il sottosuolo nella zona della spalla è costituito per i primi 245 m da un deposito piuttosto omogeneo di Ghiaie di Messina, a partire dal quale si incontrano i Depositi Continentali, costituiti da un alternarsi di strati di sabbia e limo con presenza significativa di ghiaia, che si estendono sino al tetto dell'ammasso roccioso del Conglomerato di Pezzo, a 445 m di profondità rispetto la fondazione della spalla (Callisto et al. 2013). La quota piezometrica coincide ovunque con il livello medio marino, che si colloca a una profondità di 30 m dalla fondazione della

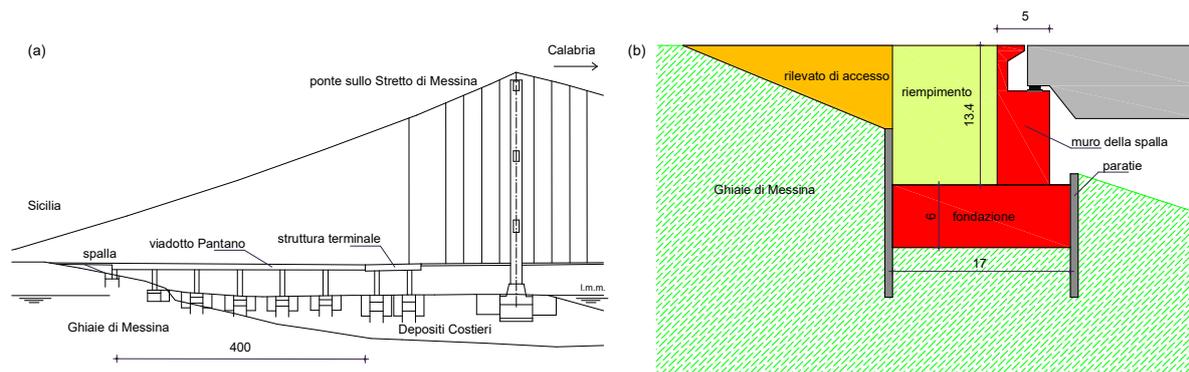


Fig. 1. (a) Sezione longitudinale del viadotto Pantano e del ponte sospeso sullo Stretto di Messina; (b) geometria della spalla del viadotto Pantano.

Tab 1. Proprietà dei terreni del sottosuolo Pantano nella zona della spalla

Unità	$z_f$ (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\varphi'$ (°)	$V_{s,m}$ (m/s)	$K_0$
MG1D – Ghiaie di Messina	30.0	19.8	0	38	305	0.65
MG1 – Ghiaie di Messina	85.0	22.0	0	38	400	0.65
MG2 – Ghiaie di Messina	112.0	22.0	0	38	505	0.65
MG3 – Ghiaie di Messina	245.0	22.0	0	38	1038	0.65
DC – Depositi Continentali	475.0	22.0	0	37	750	0.50
CP – Conglomerato di Pezzo	-	23.5	160	42	1700	-

spalla. I risultati di un ampio programma di indagini geotecniche in sito e di prove di laboratorio hanno permesso la realizzazione di un modello di sottosuolo per il viadotto Pantano. In Tabella 1 sono riassunte le principali proprietà fisiche e meccaniche dei depositi:  $z_f$  è la profondità dalla fondazione della spalla a cui termina lo strato,  $\gamma$  è il peso dell'unità di volume,  $c'$  è la coesione efficace,  $\varphi'$  è l'angolo di resistenza al taglio,  $V_{s,m}$  è la velocità media delle onde di taglio nel tratto considerato e  $K_0$  è il coefficiente di spinta a riposo.

## 2. Definizione delle azioni sismiche

La domanda sismica per il sito del viadotto Pantano è stata definita in accordo con le prescrizioni della normativa tecnica NTC 2008 attualmente in vigore, in cui vengono considerati quattro Stati Limite in condizioni sismiche: due Stati Limite di funzionalità e due relativi alle condizioni di sicurezza della struttura. Nel seguito si concentrerà la trattazione sulla risposta dinamica del sistema alla registrazione sismica di Tabas, a cui è stato applicato un fattore di scala di 0.75, selezionata come rappresentativa del contesto sismo-tettonico del sito e compatibile con lo spettro elastico di risposta su affioramento rigido associato a un periodo di ritorno di 2475 anni, che rappresenta lo scenario sismico più severo per l'opera in esame. In Fig. 2 si rappresenta il confronto, sia per le componenti orizzontali che per quella verticale del moto, tra gli spettri elastici di progetto, definiti per sottosuolo di Categoria A nel sito in esame, e quelli relativi alla registrazione di Tabas. I segnali accelerometri selezionati sono stati soggetti a una procedura di de-convoluzione, analoga a quella descritta da Callisto et al. (2013), che ha consentito di assegnare le azioni sismiche al contatto tra gli strati MG2 e MG3.

## 3. Modello di interazione terreno-spalla-sovrastuttura

È stata definita una procedura numerica per simulare accuratamente la risposta dinamica della spalla del viadotto Pantano, in cui viene esplicitamente valutata la modifica delle azioni che si produce per effetto della propagazione delle onde sismiche attraverso i terreni di fondazione, e nella quale si tiene in conto dei fenomeni di interazione che si attivano tra i vari componenti del sistema. Per la sovrastruttura, è stato introdotto un sistema meccanico equivalente, al fine di ottenere una valutazione

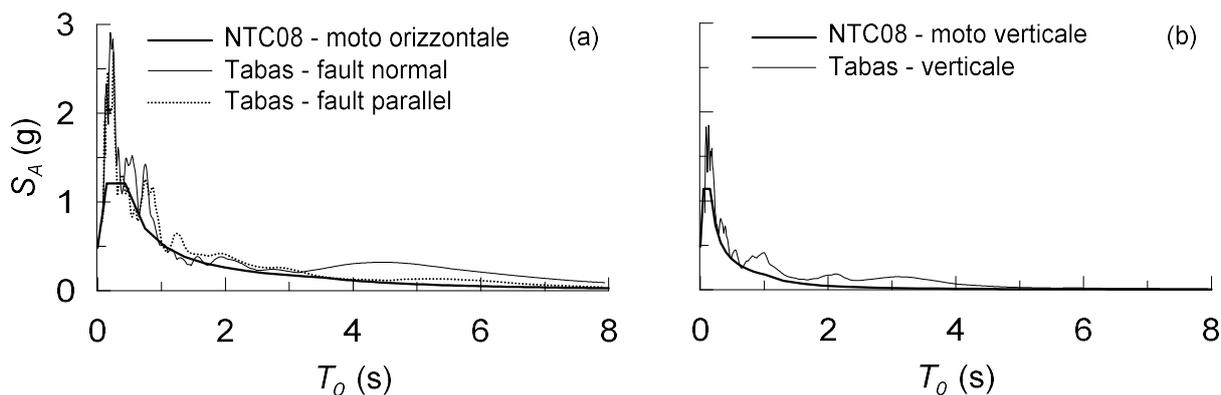
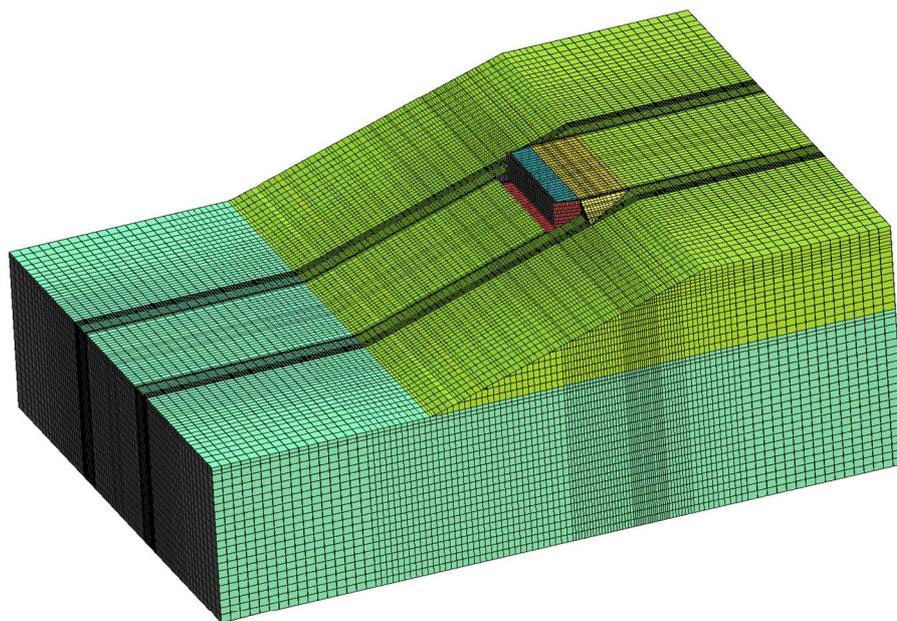


Fig. 2. Confronto tra gli spettri elastici di risposta di progetto per il sito del viadotto Pantano ( $T_R = 2475$  anni) e gli spettri relativi alla registrazione di Tabas per le componenti orizzontali (a) e verticale (b) del moto.

verosimile della dinamica locale della spalla e delle azioni sismiche che vengono trasmesse al resto del ponte. La tecnica di modellazione è stata interamente implementata nel codice di calcolo agli Elementi Finiti OpenSees (McKenna 1997). In Fig. 3 è mostrato un reticolo di calcolo che incorpora la spalla, il rilevato di accesso e il terreno di fondazione. Il calcolo si compone di una prima fase statica, in cui il modello viene assemblato partendo dalle condizioni di free field del sottosuolo, e dell'analisi dinamica, con opportuna modifica delle condizioni al contorno e applicazione delle barriere assorbenti di Lysmer & Kuhlemeyer (1969) lungo i contorni laterali per limitare l'estensione in pianta del modello. Il moto sismico è stato applicato alla base del dominio di calcolo nella forma di storie temporali di spostamenti, ottenuti dalla procedura di de-convoluzione descritta in precedenza.

### 3.1 Modello di sottosuolo e calibrazione del modello costitutivo di Manzari & Dafalias

Il dominio di sottosuolo è stato discretizzato tramite gli elementi esaedrici a otto nodi SSPbrickUP (Zienkiewicz et al. 1984) in cui è utilizzata una formulazione mista di tipo  $u-p$ . Il comportamento meccanico dei terreni è stato descritto mediante il modello a plasticità incrudente sviluppato da Manzari & Dafalias (2004) (modello MD) con l'obiettivo di ottenere un'accurata risposta del terreno in condizioni cicliche. I parametri costitutivi del modello sono stati calibrati sulla base di numerosi dati sperimentali derivanti sia da prove monotone che cicliche. Si è osservato che il modello MD è in grado di riprodurre con sufficiente accuratezza il comportamento meccanico del terreno solo in uno specifico intervallo di deformazioni. Più in dettaglio, si è trovato che una calibrazione basata soltanto su prove di laboratorio monotone conduce a una considerevole sovrastima delle sovrappressioni interstiziali in condizioni cicliche e, di conseguenza, a un'errata previsione del comportamento in condizioni non drenate. Si è allora deciso di calibrare il modello costitutivo affinché si avesse un buon confronto con i dati sperimentali in condizioni cicliche e, allo stesso tempo, una ragionevole risposta statica nell'intervallo di deformazioni di interesse per il problema in esame. In Fig 4, relativamente a una prova sperimentale triassiale monotona drenata e a una prova non drenata eseguita in condizioni cicliche, si osserva chiaramente come la calibrazione basata sulle sole prove monotone conduca a un comportamento ciclico assolutamente inverosimile: la risposta statica del modello, infatti, segue abbastanza fedelmente gli andamenti sperimentali, mentre in condizioni cicliche lo stato tensionale raggiunge la Linea di Stato Critico dopo un solo ciclo di carico per un'eccessiva generazione di sovrappressioni interstiziali. Al contrario, la calibrazione basata sulle prove cicliche conduce a un buon confronto con la risposta ciclica sperimentale, a costo di una sottostima delle deformazioni volumetriche che si verificano per l'applicazione di carichi monotoni. Tuttavia, nelle simulazioni dinamiche si considera il solo campo di spostamenti indotto dalla propagazione del moto sismico nel dominio di calcolo, per cui si ritiene accettabile la sovrastima di rigidità volumetrica in condizioni di carico monotone.



*Fig. 3. Mesh del modello di interazione tridimensionale terreno-struttura*

### *3.2 Rilevato di accesso e riempimento*

Il rilevato di accesso al viadotto e il riempimento della spalla sono le due zone di terreno, caratterizzate da una massa considerevole, che presentano una forte interazione con il muro centrale e i muri d'ala della spalla. Il riempimento è costituito da un misto cementato che conferisce un'elevata rigidità alla zona direttamente a contatto con la spalla. Pertanto, esso è stato assimilato a un mezzo monofase elasto-plastico perfetto, con modulo di Young pari a  $10^6$  kPa, che soddisfa le prescrizioni tecniche sulla rigidità, coefficiente di Poisson di 0.2, angolo di resistenza al taglio di  $38^\circ$  e coesione di 200 kPa. Nel calcolo, agli elementi del riempimento è stato associato uno smorzamento alla Rayleigh pari al 3% calibrato sul contenuto in frequenza dell'azione sismica considerata nelle analisi. Il rilevato è, invece, una zona di terreno che si trova nelle condizioni di parziale saturazione, in quanto la presenza di pressioni interstiziali negative conferisce una rigidità e resistenza non nulle a bassi stati tensionali. Il comportamento meccanico del misto granulometrico è stato descritto con il modello MD, calibrato per riprodurre una rigidità e una resistenza compatibili con la granulometria e il livello di costipamento di progetto.

### *3.3 Spalla e sovrastruttura*

La spalla del viadotto Pantano è stata progettata per essere una massiccia struttura in calcestruzzo armato con fondazione superficiale, di lunghezza pari a 17 m e larghezza 65 m in pianta, poggiante sullo strato più superficiale delle Ghiaie di Messina. Dato che la spalla ha una resistenza molto maggiore di quella degli elementi della sovrastruttura e del terreno, è ragionevole assumere che essa esibisca una risposta essenzialmente elastica in condizioni sismiche. Di conseguenza, la spalla è stata modellata tramite un insieme di elementi finiti tipo ShellMITC4 (Dvorkin et al. 1984) ai quali è stato inizialmente assegnato un modello elastico lineare con parametri costitutivi relativi a un calcestruzzo con classe di resistenza C32/40. Inoltre, a questi elementi è stato associato uno smorzamento alla Rayleigh, calibrato al fine di considerare un rapporto di smorzamento non superiore al 5% per tutti i modi significativi della spalla.

L'interazione dinamica tra la spalla e la sovrastruttura è stata modellata secondo due approcci con crescente complessità e accuratezza. Inizialmente, sono state applicate sul muro della spalla delle forze statiche equivalenti, da intendere in senso generalizzato, pensate come le forze di inerzia associate al

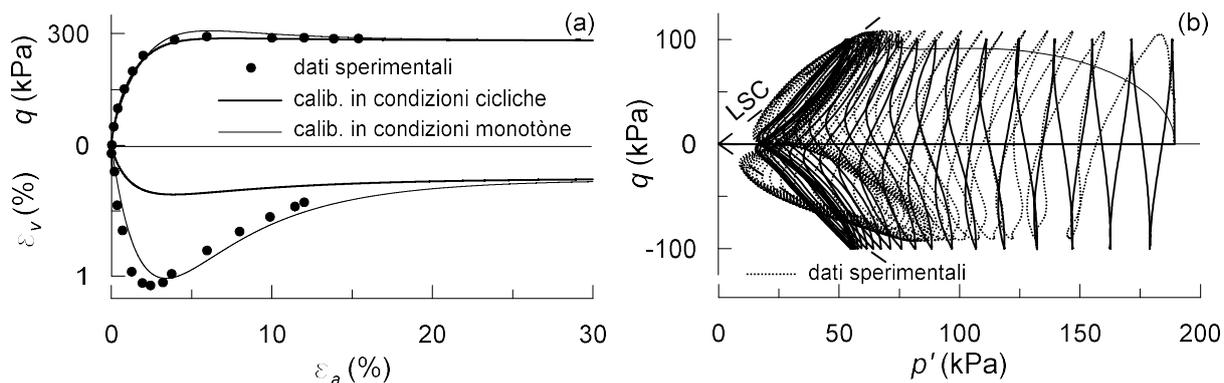


Fig. 4. Confronto tra la calibrazione del modello MD su prove cicliche e quella ottenuta sulla base delle sole prove monotone.

primo modo di vibrare significativo del ponte per il grado di libertà globale del sistema spalla considerato. Successivamente, è stato definito un metodo più rigoroso, concepito per riprodurre la trasmissione, dipendente dalla frequenza, delle forze di inerzia tra spalla e sovrastruttura attraverso un sistema meccanico equivalente formalmente identificato tramite un tensore di trasferimento. Il tensore rappresenta gli effetti globali della risposta dinamica multi-direzionale del ponte. La sua implementazione, che nel codice avviene separatamente dalla generazione della discretizzazione spaziale del dominio di calcolo, non è presentata in questa nota per motivi di spazio.

#### 4. Primi risultati: risposta dinamica del sito

Vengono mostrati alcuni risultati della risposta sismica del sottosuolo Pantano alla registrazione di Tabas compatibile con lo Stato Limite di collasso del viadotto Pantano. In Fig. 5 (a) è rappresentata una vista in pianta delle due componenti dello spostamento orizzontale, secondo le direzioni normale (FN) e parallela (FP) alla sorgente che ha originato la registrazione. Si nota come gli spostamenti al piano di posa della fondazione, sia nei valori massimi ( $u_{max}$ ) che in quelli finali ( $u_{perm}$ ), siano considerevoli e essenzialmente costanti al di sopra della falda, segno inequivoco che la resistenza del terreno viene raggiunta a profondità più elevate per il progressivo aumento delle pressioni interstiziali durante il sima. Gli spostamenti associati alla componente del moto fault normal (FN), agente nella direzione longitudinale del ponte, sono circa il doppio di quelli prodotti dal moto trasversale (FP), in quanto la prima è nettamente più severa della seconda, portando a una risposta combinata nel piano orizzontale (FN-FP) fortemente orientata verso la direzione longitudinale. La co-presenza delle due componenti del moto orizzontale conduce sempre a un'amplificazione degli spostamenti rispetto la propagazione mono-dimensionale mentre l'effetto del moto verticale sul campo di spostamenti orizzontale è più modesta. Questi effetti di multi-direzionalità del moto sismico sul campo di spostamenti si possono leggere in maniera duale nelle forme spettrali rappresentate in Fig 5 (b). Anche qui, infatti, considerare la bi-direzionalità del moto sismico nel piano orizzontale conduce a una risposta del terreno molto prossima a quella con sisma tri-componente, in quanto lo stato di tensione di taglio combinato nel piano orizzontale è il principale responsabile dell'attivazione dei meccanismi plastici nel terreno. Rispetto al moto alla base, le forme spettrali in fondazione mostrano una decisa amplificazione per periodi superiori a 1.1 s, dovuta alla deformabilità dei terreni attraversati, mentre per periodi inferiori si osserva una lieve de-amplificazione delle ordinate spettrali, con valori massimi quasi invariati proprio nella regione spettrale dove si ha accoppiamento con la risposta dinamica della struttura. Nel sottosuolo Pantano, la superficie libera della falda si trova a una profondità di 30 m dalla fondazione della spalla, e questo comporta una propagazione del moto verticale pressoché "rigida" sino a tale profondità, per poi invece subire modifiche in funzione della risposta dinamica dei terreni sopra falda. Nello specifico, in Fig 5 (c) si vede come, nel caso del sottosuolo Pantano ( $k=10^{-4}$  m/s), sopra la falda il terreno subisca degli abbassamenti permanenti che crescono quasi linearmente al

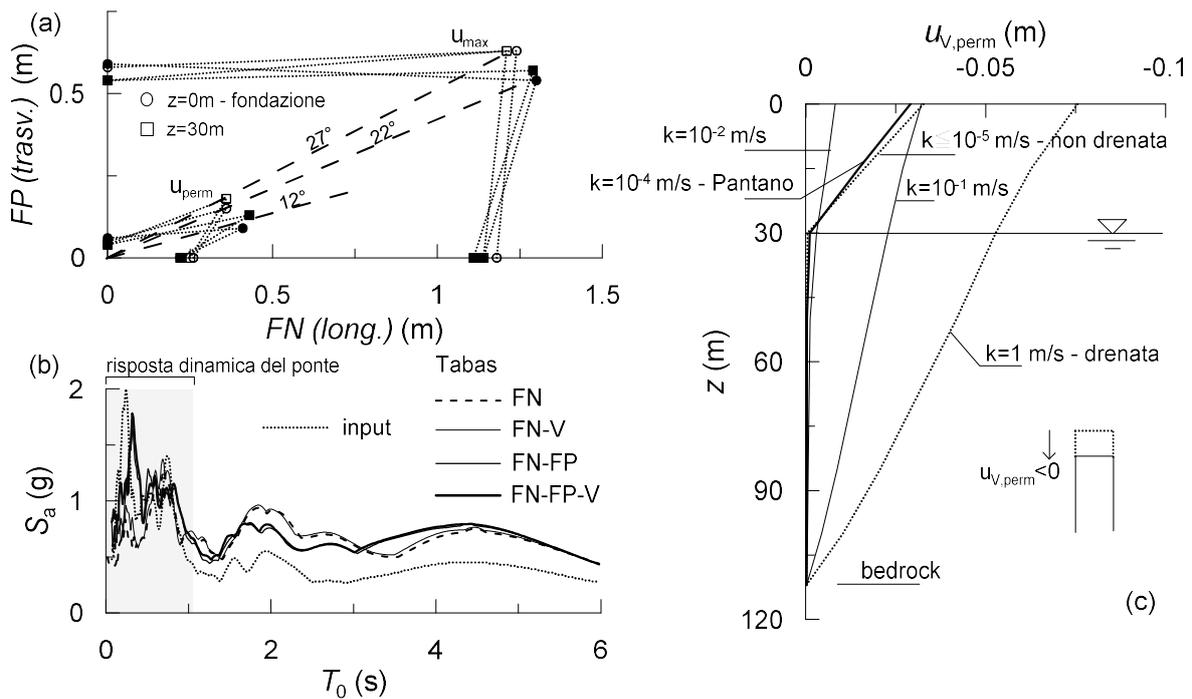


Fig. 5. Risposta sismica locale: (a) effetto della multi-direzionalità del moto sismico sugli spostamenti orizzontali valutati alla profondità della fondazione (cerchi) e alla profondità di 30 m (quadrati), sia in assenza (simboli vuoti) che in presenza (simboli pieni) del moto verticale; (b) spettri elastici di risposta in fondazione in direzione longitudinale all'asse del ponte; (c) effetto della propagazione del moto verticale sul profilo degli spostamenti verticali a fine sisma e influenza delle condizioni di drenaggio.

diminuire della profondità, dovuti a variazioni di pressione efficace media che provocano il raggiungimento della superficie di snervamento del modello costitutivo MD da parte dello stato tensionale corrente, mentre risultano trascurabili nella zona saturata. In quest'ultima, si evince come la risposta idro-meccanica accoppiata del terreno è molto prossima a quella non drenata, che si ottiene per valori del coefficiente di permeabilità  $k$  inferiore o uguale a  $10^{-5}$  m/s e gli abbassamenti in fondazione sono di 3 cm, cioè il 40 % di quelli che si avrebbero se non vi fosse acqua interstiziale.

## Bibliografia

- Callisto L., Rampello S., Viggiani G.M.B. (2013). "Soil-structure interaction for the seismic design of the Messina Strait bridge", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 52, 103-115.
- Dafalias Y.F., Manzari M.T. (2004). "Simple Plasticity Sand Model Accounting for Fabric Change Effects", *Journal of Engineering Mechanics*, 130(6), 622-634.
- Dvorkin E.N., Bathe K.J. (1984). "A continuum mechanics based four node shell element for general nonlinear analysis", *Engineering with Computers*, 1, 77-88.
- Lysmer J., Kuhlemeyer R.L. (1969). "Finite dynamic model for infinite media", *Journal of Engineering Mechanics Division*, 95(4), 859-877.
- McKenna F.T. (1997). Object oriented finite element programming: Frameworks for analysis, algorithms and parallel computing. Ph. D. dissertation, University of California, Berkeley, California.
- Zienkiewicz O.C., Shiomi T. (1984). "Dynamic behaviour of saturated porous media; the generalised Biot formulation and its numerical solution", *International Journal for Numerical Methods in Geomechanics*, 8, 71-96.