

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/326271093>

# VALIDAZIONE DI UNA PROCEDURA NUMERICA PER L'ANALISI DI INTERAZIONE DINAMICA TERRENO-FONDAZIONE-STRUTTURA DI TELAI IN ACCIAIO

Conference Paper · July 2018

CITATIONS

0

READS

148

3 authors:



**Victoria Aprile**

Università degli Studi G. d'Annunzio Chieti e Pescara

5 PUBLICATIONS 8 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Giuseppe Brando**

Università degli Studi G. d'Annunzio Chieti e Pescara

80 PUBLICATIONS 645 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Alessandro Pagliaroli**

Università degli Studi G. d'Annunzio Chieti e Pescara

166 PUBLICATIONS 995 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Call for papers: Special Issue on site response and microzonation [View project](#)



Seismic Risk And Resilience Assessment At Urban Scale: Framework Proposal Of A Gis-Based Approach. [View project](#)

## VALIDAZIONE DI UNA PROCEDURA NUMERICA PER L'ANALISI DI INTERAZIONE DINAMICA TERRENO- FONDAZIONE-STRUTTURA DI TELAI IN ACCIAIO

Victoria Aprile\*, Giuseppe Brando, Alessandro Pagliaroli  
Università "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara, Dipartimento di Ingegneria e Geologia  
\*e-mail: victoria.aprile@unich.it

### Sommario

La risposta sismica di una struttura è il risultato di complessi fenomeni di mutua interazione che avvengono tra tre sistemi interconnessi: terreno di fondazione, struttura di fondazione e sovrastruttura.

La presente nota illustra, con riferimento a due differenti tipologie strutturali in acciaio, la validazione di una procedura di simulazione numerica dell'interazione dinamica terreno-fondazione-struttura, attraverso l'implementazione del cosiddetto metodo diretto, il quale prevede un unico modello che include il terreno, la fondazione e la sovrastruttura.

La procedura numerica è validata mediante la riproduzione di risultati di prove su tavola vibrante, utilizzando il programma di calcolo alle differenze finite FLAC2D. La modellazione del sottosuolo è implementata con elementi a comportamento isteretico non lineare e criterio di rottura alla Mohr-Coulomb. Le fondazioni, superficiali e profonde, sono modellate come elementi a comportamento elastico e sono connesse al terreno mediante l'utilizzo di elementi di interfaccia. La sovrastruttura è costituita da due tipologie strutturali in acciaio, caratterizzate da diverso comportamento dissipativo non lineare e tipologia di fondazione: *struttura intelaiata* (MRF) e *struttura a controventi concentrici* (CBF).

### 1. Introduzione

Le strutture in acciaio sono ampiamente utilizzate per la progettazione antisismica poiché possono garantire ottimi livelli di sicurezza strutturale nei confronti delle azioni indotte dal terremoto. Infatti, sfruttando la capacità deformativa plastica di specifici elementi, tali strutture permettono di dissipare una significativa quantità di energia associata all'azione sismica, garantendo, laddove siano rispettate semplici regole progettuali, meccanismi globali caratterizzati da elevata duttilità.

Sebbene così diffuse, tuttavia, la pratica comune progettuale è quella di considerare tali strutture vincolate rigidamente alla base, prescindendo dallo studio dei fenomeni che si generano a causa dell'interazione dinamica con il terreno. La risposta dinamica di strutture fondate su depositi soffici può essere, invece, significativamente diversa dalla risposta su deposito rigido. Questo accade perché le strutture con vincoli flessibili alla base hanno un numero maggiore di gradi di libertà, differente rigidità e frequenza e, quindi, differenti caratteristiche dinamiche. Inoltre, una parte dell'energia vibrazionale delle strutture su vincoli flessibili, viene dissipata per radiazione attraverso il mezzo terreno o per smorzamento dovuto alla fondazione (scorrimento relativo all'interfaccia fondazione-terreno). Tutti i fenomeni sopradescritti causano allungamento del periodo  $T$  e aumento dello smorzamento  $D$  rispetto alla struttura a base fissa, in funzione del rapporto relativo di rigidità tra il terreno e la struttura. Lo scopo di questa nota è quello di validare una procedura di analisi numerica dell'interazione dinamica terreno-fondazione-struttura considerando due tipologie di strutture in acciaio che presentano diverse rigidità e diversi meccanismi dissipativi. Sono trattate, in particolare, le tipologie strutturali intelaiate (Moment Resisting Frame MRF) e a controventi concentrici (Centrically Braced Frame CBF).

Nei telai di tipo MRF le forze orizzontali dovute all'azione sismica sono essenzialmente assorbite dalle membrature principali (travi, colonne e giunzioni) attraverso la loro rigidità flessionale e tagliante. Per ottenere un meccanismo di collasso globale duttile, i telai MRF devono essere progettati affinché si verifichi la formazione delle cerniere plastiche alle estremità degli elementi trave, evitando la plasticizzazione degli elementi colonna (*Fig.1a*). Nei telai CBF, l'azione sismica è fondamentale

assorbita da elementi aggiuntivi (i controventi) che, oltretutto costituiscono gli elementi dissipativi durante un terremoto distruttivo (Fig.1b). Il comportamento dei controventi dipende dalla loro configurazione geometrica: nei controventi concentrici disposti a X, le diagonali in compressione sono soggette a fenomeni di instabilità e hanno quindi capacità dissipativa nulla (Fig.1c), mentre le diagonali tese sono deputate ad assorbire pienamente le forze orizzontali e, snervandosi, a garantire capacità dissipativa. Le due tipologie strutturali si differenziano per le diverse tipologie di fondazione usualmente adottate: fondazioni profonde (pali) per il CBF e superficiali per i telai MRF.

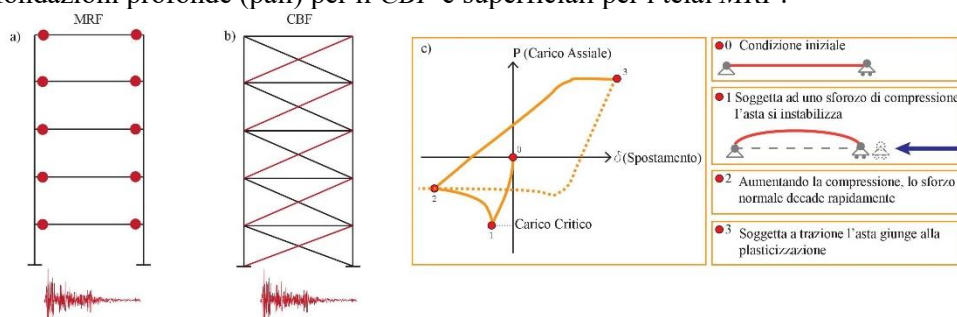


Fig. 1 a) edificio intelaiato (MRF) b) edificio a controventi concentrici (CBF) c) Comportamento dei controventi nel telaio CBF

## 2. Moment Resisting Frame (MRF)

La validazione della procedura di simulazione numerica è stata implementata riproducendo tre distinti test su tavola vibrante ottenuti da letteratura relativi a: i) deposito di terreno in condizioni di free-field (assenza di struttura); ii) fondazione superficiale parzialmente incassata nel sottosuolo; iii) telaio MRF a base fissa.

### 2.1 Free-Field

Sono stati considerati i risultati sperimentali ottenuti da test su tavola vibrante del laboratorio BLADE dell'Università di Bristol nell'ambito del progetto europeo SERIES [1]. Il modello di sottosuolo testato sulla tavola vibrante è costituito da due strati di sabbia asciutta: strato superiore caratterizzato da sabbia Leighton Buzzard (LB) frazione E, quello inferiore formato da sabbia LB per l'85% di frazione B e per il 15% di frazione E (Fig.2a). Per modellare il comportamento isteretico non lineare del terreno, è stato utilizzato il modello "Hysteretic Damping" (sigmoidal 4) tarato in funzione delle curve sperimentali di variazione del modulo di taglio normalizzato  $G/G_0$  e del rapporto di smorzamento  $D$  di Vucetic e Dobry (PI=0) [2]. Inoltre, è stata implementata una funzione di variazione del modulo di taglio  $G$  in funzione della profondità e uno smorzamento di Rayleigh del 5%. L'input, un moto armonico sinusoidale di 20Hz e accelerazione massima 0.1g, è stato applicato al bordo inferiore del modello sotto forma di storia temporale di accelerazione. Nella Fig.2b sono riportati i risultati in termini di profilo di accelerazioni massime a confronto con i risultati del test.

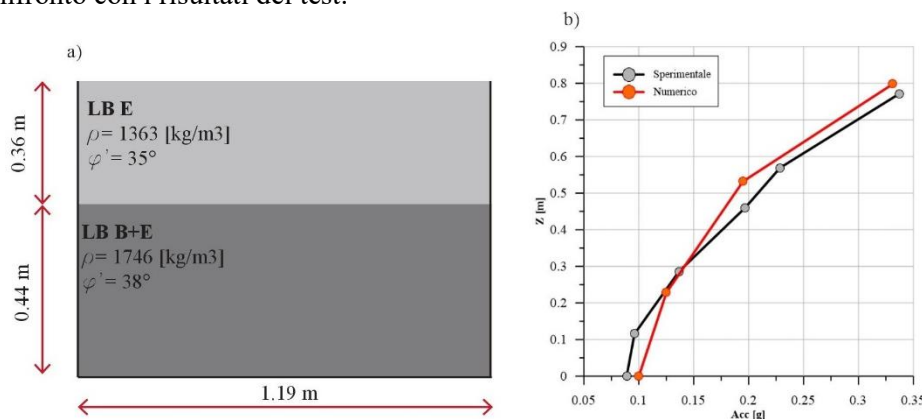


Fig. 2 a) Modello fisico b) Confronto dei risultati numerici e sperimentali in termini di profilo di accelerazioni massime lungo la profondità

## 2.2 Fondazione Superficiale

Il test sperimentale considerato, svolto all'Università di Bristol, è un test su tavola vibrante di una fondazione superficiale su deposito sabbioso [3]. Il terreno testato è la sabbia asciutta "Leighton Buzzard", con caratteristiche riportate in (Fig.3a).

La fondazione consiste in un blocco di cemento di dimensioni 0.4x0.4x0.95 [m], inglobato nel terreno per una profondità di 0.1 [m]. Il blocco è soggetto ad un carico verticale dato da tre piastre in acciaio di 10 [kN] ognuna. Per il modello costitutivo, utilizzato in FLAC2D per modellare il terreno, è stato adottato un comportamento elastico-perfettamente plastico, con criterio di rottura di Mohr-Coulomb caratterizzato da angolo di attrito  $\phi=50^\circ$  e angolo di dilatanza  $\psi=20^\circ$ . Inoltre, per il terreno è stato assunto un modello isteretico di tipo "Hysteretic Damping" (sigmoidal 4), tarato in funzione della curva di variazione di  $G/G_0$  ottenuta da prove di colonna risonante effettuate sul provino di terreno (Leighton Buzzard Sand) e della curva sperimentale di variazione del rapporto di smorzamento  $D$  di Seed e Idriss [4].

Il blocco di fondazione e le piastre in acciaio, sono state modellate a comportamento elastico con l'aggiunta dello smorzamento di Rayleigh. La fondazione è stata considerata connessa al terreno attraverso elementi di interfaccia che simulano un contatto di tipo attritivo. L'interfaccia è stata assunta come costituita da una serie di elementi elasto-plastici, dotati di rigidità costante in direzione normale e di taglio e caratterizzate da resistenza a taglio definita dal criterio di rottura di Mohr-Coulomb. Le proprietà degli elementi di interfaccia sono state correlate alle proprietà degli elementi del terreno adiacenti, risultando, dunque, caratterizzati dal valore dell'angolo di attrito e di dilatanza del terreno e rigidità posta 10 volte rispetto a quella del terreno. Le condizioni di vincolo riproducono le condizioni del test sperimentale, l'input è stato applicato sotto forma di accelerazione avente forma sinusoidale con frequenza pari a 5 Hz e ampiezza massima pari a 0.265 g. I confronti numerico-sperimentale sono mostrati in Fig. 3 in termini di accelerazione orizzontale (Fig. 3b), spostamento verticale (Fig. 3c) ed orizzontale (Fig. 3d) del deposito e accelerazione in testa alla struttura.

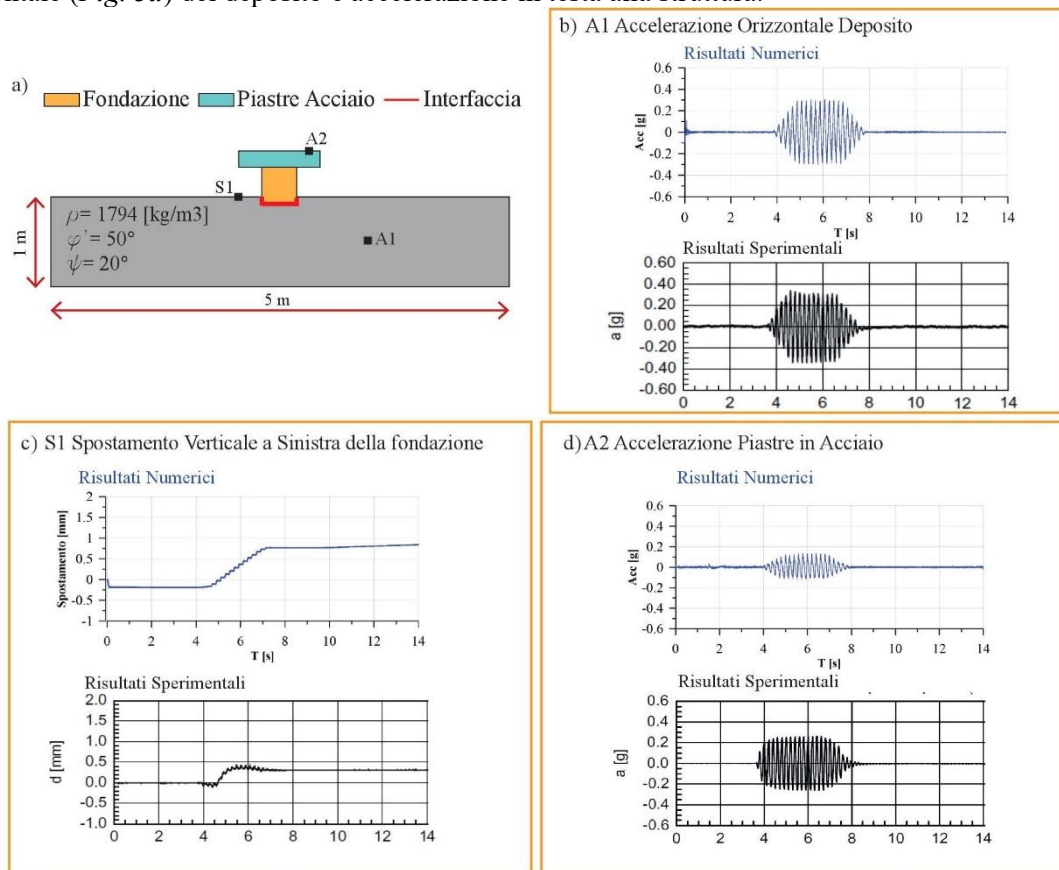


Fig. 3 a) Modello fisico e confronto dei risultati numerici e sperimentali: b) Storia temporale in accelerazione c) Storia temporale spostamento verticale d) Storia temporale accelerazione in testa alle piastre in acciaio

### 2.3 Struttura Intelaiata (MRF)

La validazione del modello numerico del telaio *MRF* è stata svolta riproducendo test su tavola vibrante di un modello in scala terreno-struttura, effettuate presso “University of Technology Sydney” (UTS) [5]. Il modello è costituito da 15 piastre in acciaio che rappresentano i solai di piano (500x500x10 [mm]), 4 piastre verticali in acciaio per piano che costituiscono le colonne (500x40x2 mm) e una piastra di fondazione in acciaio (400x400x2 mm) (Fig. 4a). Il prototipo ha un periodo di vibrazione fondamentale pari a 0.47 [s] e una massa totale pari a 106 [kg].

La struttura, fissata alla tavola vibrante, è stata testata sotto l’influenza di quattro registrazioni storiche: Kobe (1995), Northridge (1994), El Centro (1940) e Hachinohe (1968). Il modello numerico è stato realizzato in FLAC2D utilizzando le dimensioni fisiche del prototipo. La struttura è stata vincolata rigidamente alla griglia del terreno, a cui sono stati assegnati valori elevati di rigidità in maniera tale da simulare le condizioni di struttura a base fissa.

Per considerare il comportamento non lineare degli elementi strutturali, sono state introdotte cerniere plastiche in corrispondenza delle sezioni di estremità, assumendo, quindi, che gli elementi strutturali rispondano elasticamente fino a quando raggiungono il valore del momento plastico definito.

Agli elementi strutturali è stato inoltre assegnato un valore di smorzamento di Rayleigh del 2%. L’analisi è stata svolta utilizzando come input l’accelerogramma del terremoto di Kobe del 1995. Nel seguito vengono riportati i risultati ottenuti in termini di spostamenti laterali massimi del telaio a base fissa posti a confronto con i risultati sperimentali (Fig. 4b).

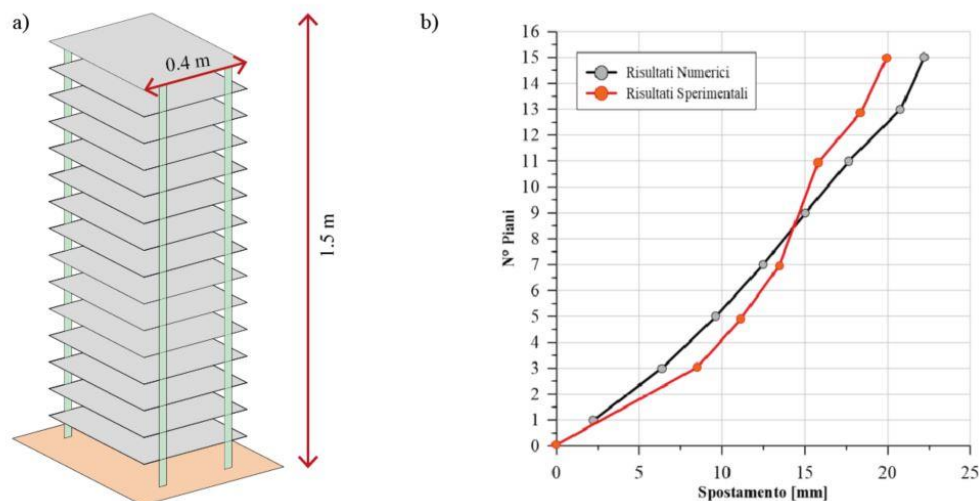


Fig. 4 a) Modello fisico b) Confronto dei risultati numerici e sperimentali in termini di spostamenti laterali

### 3. Concentrically Braced Frame (CBF)

La validazione della procedura numerica ha previsto la riproduzione di test eseguiti sia su una fondazione profonda (pali), sia su un telaio *CBF* a base fissa.

#### 3.1 Fondazioni Profonde

Nell’ambito del progetto di ricerca europeo SERIES, descritto in 2.1, sono stati svolti test su tavola vibrante di pali immersi in terreno sabbioso. Il modello fisico è costituito da due strati di sabbia sovrapposti, con caratteristiche riportate in (Fig. 5a), e da un gruppo di 5 pali in alluminio che attraversano i due strati (Fig. 5a). Il modello numerico del sottosuolo è quello validato in 2.1 con l’aggiunta di 5 elementi strutturali “pile” disponibili in FLAC2D. Gli elementi strutturali sono connessi al terreno adiacente mediante l’utilizzo di elementi di interfaccia costituiti da molle a taglio e a sforzo normale caratterizzate da comportamento elasto-plastico. Le proprietà delle molle sono state desunte a partire dalle caratteristiche del terreno. Per quanto riguarda le molle a taglio, è stato assunto un angolo di attrito pari a 2/3 rispetto a quello del terreno e una rigidità equivalente pari a 10 volte quella del mezzo sabbioso. Le proprietà delle molle normali vengono invece stimate usando il metodo analitico di

Georgiadis per pali immersi in terreni non coesivi, mediante la simulazione di una prova di carico laterale [6]. Per valutare l'accuratezza del modello numerico, è stato simulato un *pullover test* che consiste nell'applicazione di piccoli incrementi di carico laterale alla testa del palo e nel monitorare lo spostamento laterale indotto. In (Fig. 5b) sono riportati i risultati, in termini di forza applicata in testa al palo e spostamento massimo registrato, a confronto con quelli ottenuti dal test sperimentale.

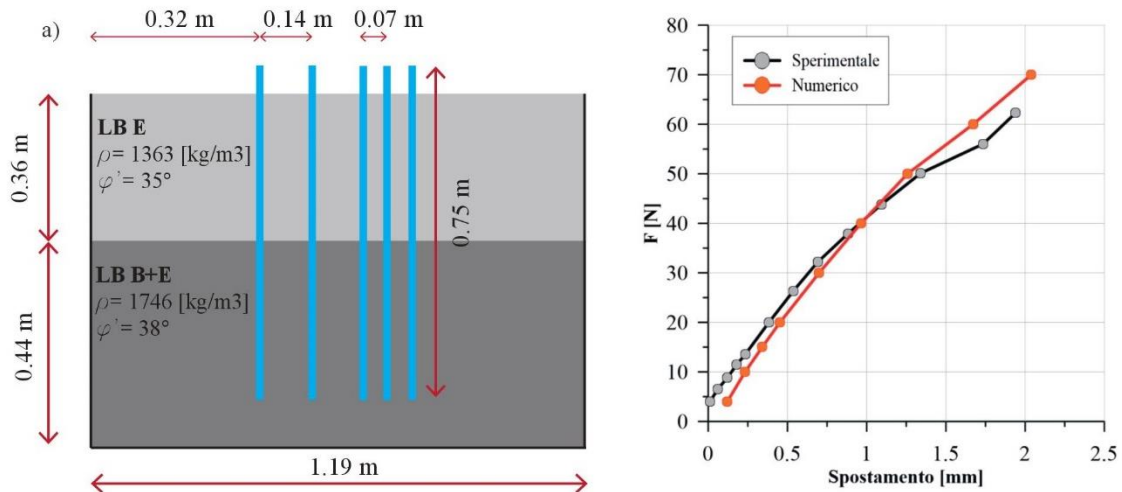


Fig. 5 a) Modello fisico b) Confronto dei risultati numerici e sperimentali in termini di spostamenti massimi da pullover test.

### 3.2 Struttura a Controventi Concentrici (CBF)

È stato riprodotto il test su tavola vibrante, svolto presso “Laboratory for Earthquake Engineering of the National Technical University of Athens”, di un modello in scala reale di un telaio a controventi concentrici ad una sola campata e piano (Fig. 6a) [7]. La struttura è stata caricata con una massa di 10000 [kg], le colonne (HE 160 M) e le travi (HE 180 A) sono state progettate per avere un comportamento elastico e collegamenti di tipo cerniera. I controventi (Sez. rettangolare cava: 50x20x2.5 [mm]) sono stati rigidamente connessi superiormente alla flangia inferiore della trave trasversale e, inferiormente, alla tavola vibrante.

Il modello numerico è costituito da una griglia di terreno, a cui sono stati assegnati elevati valori di rigidità per riprodurre la base fissa del test sperimentale, elementi “beam” per travi e colonne ed elementi “liner” per i controventi. Travi e colonne sono state modellate con comportamento elastico e con collegamenti di tipo cerniera (“pin”). Utilizzando l’elemento “liner” per modellare i controventi, è stato possibile controllare l’instabilità del controvento compresso poiché in grado di sviluppare un comportamento differente a trazione e a compressione. Differentemente dagli elementi “beam”, gli elementi “liner” includono un modello elasto-plastico con resistenza, massima e residua, allo snervamento a trazione e compressione. Sono stati assegnati dunque ai controventi tre parametri di resistenza corrispondenti ai tre punti del grafico riportato in Fig. 1c: 1) Resistenza allo snervamento di compressione:  $70\% f_{yd}$ ; 2) Resistenza residua allo snervamento di compressione:  $30\% f_{yd}$ ; 3) Resistenza allo snervamento di trazione:  $f_{yd}$ . Infine, al modello è stato assegnato un valore dello smorzamento di Rayleigh pari al 3%. L’analisi è stata svolta utilizzando come input l’accelerogramma del terremoto di El Centro del 1940. Nella figura seguente vengono riportati i risultati ottenuti in termini di storia temporale di accelerazione nel punto A1 posto sulla trave trasversale (Fig. 6b) e storia temporale dello sforzo normale nel controvento (Fig. 6c).

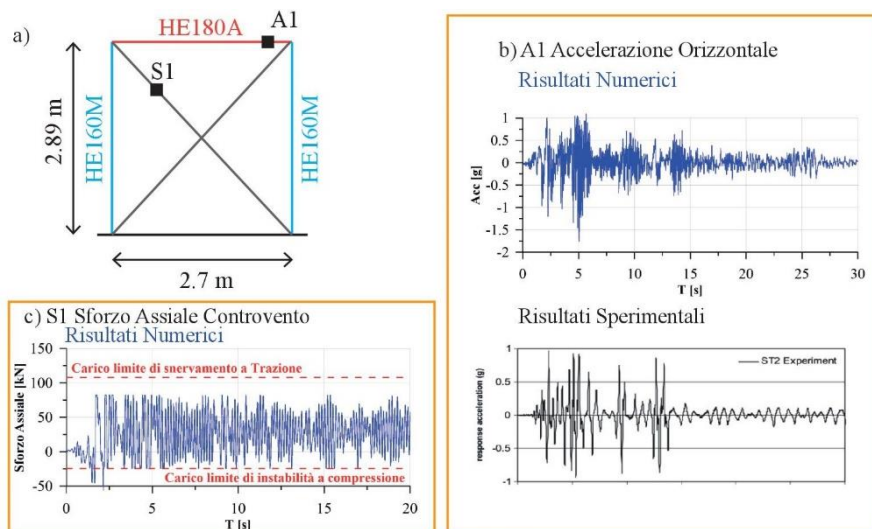


Fig. 6 Modello fisico (a) e confronto dei risultati numerici e sperimentali in termini di: b) storia temporale in accelerazione nel punto A1, c) storia temporale sforzo assiale nel controvento

#### 4. Risultati e sviluppi futuri

La nota ha riportato i risultati ottenuti a valle del confronto tra prove su tavola vibrante eseguite su depositi *free-field*, fondazioni superficiali e profonde, telai in acciaio di diversa tipologia (MRF e CBF) e analisi numeriche eseguite mediante il codice di calcolo FLAC2D. Il confronto ha evidenziato che la procedura numerica adottata per modellare i vari elementi (terreno, elementi di interfaccia, elementi strutturali) riesce a descrivere con buona approssimazione quanto ottenuto sperimentalmente. La criticità maggiore è legata alla necessità di modellare l'instabilità del controvento compresso nel telaio CBF, che esibisce un comportamento differente a compressione e a trazione. Il modello necessita di altre analisi di calibrazione per controllare il comportamento ciclico dell'elemento strutturale. La procedura numerica validata verrà utilizzata per eseguire analisi parametriche di interazione dinamica terreno-fondazione-struttura attraverso il metodo diretto. Nello specifico si effettueranno analisi facendo variare le caratteristiche geometriche dei telai, numero dei piani, luce e numero delle campate per investigare un ampio campo di variazione del periodo proprio di vibrazione. Per quanto riguarda la tipologia di sottosuolo, saranno scelti depositi sabbiosi asciutti caratterizzati da diversi profili di velocità delle onde di taglio Vs. Come input delle analisi saranno utilizzati accelerogrammi naturali di intensità crescente per investigare la risposta non lineare del terreno e della fondazione. L'obiettivo è quello di valutare l'influenza dell'interazione dinamica sulla risposta globale del sistema al variare della rigidità relativa tra terreno e fondazione.

#### Bibliografia

- [1] Durante, M. G. (2015). Experimental and numerical assessment of dynamic soil-pile-structure interaction. *PhD thesis*, Università degli Studi di Napoli Federico II.
- [2] Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of geotechnical engineering*, 117(1), 89-107
- [3] Massimino, M. R., & Maugeri, M. (2013). Physical modelling of shaking table tests on dynamic soil-foundation interaction and numerical and analytical simulation. *Soil Dynamics and Earth. Engineering*, 49, 1-18.
- [4] Seed, HB & Idriss, IM. (1970). Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses. *Earthquake engineering research center.*, report no. EERC 70-10
- [4] Tabatabaiefar, S. H. R., Fatahi, B., & Samali, B. (2014). Numerical and experimental investigations on seismic response of building frames under influence of soil-structure interaction. *Adv. Str. Eng.*, 17(1), 109-130.
- [5] Georgiadis, M., Anagnostopoulos, C., & Saflekou, S. (1992). Centrifugal testing of laterally loaded piles in sand. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(2), 208-216.
- [6] Goggins, J., & Salawdeh, S. (2013). Validation of nonlinear time history analysis models for single-storey concentrically braced frames using full-scale shake table tests. *Earth. Eng. & Struct. Dyn.*, 42(8), 1151-1170.