

## Un approccio innovativo per una migliore comprensione dell'interazione sismica tra suolo e strutture: il *test site* di Ferrara

B. PETROVIC<sup>1</sup>, S. PAROLAI<sup>1</sup>, M. ROMANELLI<sup>1</sup>, A. AFFATATO<sup>1</sup>, L. PETRONIO<sup>1</sup>,  
A. BARBAGALLO<sup>1</sup>, D. SORGO<sup>1</sup>, M. STEFANI<sup>2</sup> e R. CAPUTO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Trieste

<sup>2</sup> Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara

<sup>3</sup> Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

### 1. Scopo della ricerca

La presenza di faglie sismogeniche o potenzialmente tali implica in molte regioni del Mediterraneo un'elevata pericolosità sismica, che combinata all'esposizione e alla vulnerabilità degli edifici esistenti, concorre ad aumentare il rischio sismico e le perdite attese. Ciononostante, il miglioramento della pianificazione urbana basato su una stima robusta del rischio sismico a lungo periodo consente una sua mitigazione. In particolare, la pianificazione può essere significativamente migliorata tenendo conto della variabilità dello scuotimento del terreno a brevi distanze durante un terremoto, principalmente a causa delle variazioni delle caratteristiche meccaniche del sottosuolo. Per tale motivo, la maggior parte degli studi sulla variabilità locale dello scuotimento del suolo si è focalizzata sugli effetti sul campo d'onda dovuti a cambiamenti nelle proprietà fisiche dei corpi geologici superficiali (effetti di sito). Tuttavia, anche le interazioni tra singolo edificio e sottosuolo (interazione suolo-struttura), in termini di propagazione delle onde sismiche, possono modificare lo scuotimento del terreno stesso. L'edificio non si comporta quindi solo come un recettore passivo di vibrazioni, ma influenza esso stesso la vibrazione del terreno sottostante. Nelle aree urbane, queste interazioni si estendono alle interazioni tra un intero tessuto urbano ed il suolo, che vengono definite interazioni sito-città. Tali interazioni hanno molto probabilmente giocato un ruolo importante nella distribuzione del danno di eventi sismici passati. Ad esempio, la distribuzione del danneggiamento causato dal terremoto di *Ciudad de Mexico* nel 1985 non può essere spiegata solo considerando gli effetti di sito, ma viene meglio riprodotta da modelli che considerano l'interazione sito-città (p. es., Wirgin and Bard 1996; Guéguen *et al.*, 2000a). Siccome le interazioni tra edificio e suolo e tra sito e città non sono ancora state studiate in dettaglio e del tutto comprese, non vengono considerate né dai metodi convenzionali di progettazione strutturale, né nella valutazione del rischio sismico.

Gli effetti di interazione suolo-struttura e soprattutto di interazione sito-città sono stati principalmente studiati mediante simulazioni numeriche 2D e 3D (p. es., Kham *et al.*, 2006; Laurenzano *et al.*, 2010). La modellazione numerica consente di prevedere il movimento del suolo associato ad una ipotetica configurazione di geometrie e proprietà elastiche del dominio spaziale. Tuttavia, la modellazione numerica di questi effetti, sino ad oggi, ha solo utilizzato configurazioni semplificate e non è supportata da un confronto tra il campo d'onda sismico previsto e quello realmente osservato nelle vicinanze di un edificio, di diversi edifici o anche di un'intera città. Manca quindi un raffronto fra la modellazione numerica e le misure acquisite su casi concreti di interazione tra corpi geologici e strutture antropiche. Per tale motivo, i risultati di questi studi numerici non hanno fornito una chiara ed univoca spiegazione delle osservazioni empiriche. In

alcuni casi, essi hanno suggerito un aumento dello scuotimento nelle aree urbane dovuto alla presenza degli edifici e al loro accoppiamento con la struttura geologica superficiale, mentre in altri hanno proposto una diminuzione dello scuotimento dovuta all'effetto di smorzamento causato dalle strutture stesse (p. es., Gueguen *et al.*, 2002; Kham *et al.*, 2006).

Chiaramente, è necessario un esperimento che consenta la validazione dei modelli numerici attraverso il confronto con dati empirici, anche in presenza di ovvie difficoltà operative. L'analisi di tali dati può fornire informazioni nuove sul meccanismo di rilascio di onde sismiche da parte delle strutture e sui meccanismi di interazione struttura-suolo.

Su questo argomento, negli ultimi decenni, è stato realizzato solo un numero molto limitato di analisi basate su serie di dati empirici (p. es., Jennings, 1970; Kanamori *et al.*, 1991; Guéguen *et al.*, 2000b). Tuttavia, tali studi hanno evidenziato come alberi ed edifici, possano, a causa della loro oscillazione, modificare in modo significativo lo scuotimento del terreno (ad esempio Petrovic e Parolai, 2016; Petrovic *et al.*, 2018; Colombi *et al.*, 2016; Roux *et al.*, 2018). Un primo passo nello studio delle interazioni tra i singoli edifici e sottosuolo è stato fatto da Petrovic e Parolai (2016), i quali, utilizzando registrazioni di vibrazioni sismiche effettuate simultaneamente su un edificio e in un *array* verticale di sensori installati in foro, hanno potuto identificare le onde generate dall'edificio nel sottosuolo, fino a profondità di maggiori del centinaio di metri. La metodologia proposta è stata applicata a tre diversi contesti caratterizzati da diversi contrasti di impedenza fra suolo e struttura (Petrovic *et al.*, 2018), che hanno evidenziato come il meccanismo possa variare in condizioni differenti.

I recenti progressi nella strumentazione sismica e l'aumento della capacità computazionale rendono possibile effettuare esperimenti adeguati allo studio dei fenomeni di interazione suolo-struttura e dell'interazione sito-città, combinando l'analisi di dati empirici con quelli ottenuti da simulazioni numeriche. Grazie all'attuale disponibilità di strumentazione sismica a basso costo, ma di qualità sufficiente per l'applicazione a questi studi, è possibile realizzare installazioni di *array* sismici molto densi, sia sulla superficie terrestre che all'interno degli edifici, in modo da monitorare la propagazione e la variazione delle onde sismiche in aree urbane. Un ulteriore passo in avanti finalizzato al miglioramento della comprensione delle interazioni tra edifici e struttura del suolo e sottosuolo mediante l'utilizzo di dati empirici è stato realizzato nell'ambito del progetto CLARA e verrà illustrato in questa breve nota.

## 2. Sito di studio e impostazione dell'esperimento

Nel Comune di Ferrara (Fig. 1), è stato effettuato un esperimento innovativo per analizzare l'interazione suolo-struttura. Il *test site* selezionato risulta ideale allo scopo, grazie alla buona conoscenza del contesto geologico-stratigrafico ed alla semplicità della logistica: tre edifici simili per tipologia ed età di costruzione, situati in prossimità del campo di atletica di via Porta Catena a Ferrara. I primi 12 m di sottosuolo sono formati da argille oloceniche di piana interalvea; fra 12 e 25 m vi sono sabbie medio-grossolane, legate all'ultima glaciazione, fra 25 e 55 m si trovano fanghi continentali, contenenti corpi sabbiosi di canale fluviale. (Affatato *et al.*, 2019). I tre edifici considerati sono condomini, con 5 piani fuori terra e seminterrato, con struttura a telaio portante in cemento armato, tamponamenti in laterizio pieno o forato e copertura piana a terrazza, costruiti negli anni '60. Tale tipologia edilizia molto comune nell'area urbana di Ferrara, così come in gran



Fig. 1 - Set-up dell'esperimento sull'interazione suolo-struttura effettuato a Ferrara. I triangoli rossi rappresentano i sensori sismici che sono stati installati nell'edificio, i triangoli gialli quelli che sono stati installati sul campo di atletica.

parte della Pianura Padano-Veneta e dell'Italia, favorisce l'applicazione dei risultati qui ottenuti ad altri analoghi contesti geologico-costruttivi. La vicinanza e la disponibilità del campo sportivo di proprietà comunale, inoltre, ha consentito l'installazione di un grande numero di sensori su una superficie piana e libera da ostacoli. Si è quindi potuto studiare sia la propagazione delle onde sismiche nel sito, sia la struttura del sottosuolo, applicando metodi geofisici *ad hoc*, come la



Fig. 2 - Test site dell'esperimento interazione suolo-struttura previsto a Matera.

sismica a riflessione ad alta risoluzione. Per ragioni amministrative, non è stato possibile installare i sensori in tutti e tre gli edifici, come inizialmente previsto, ma solo nei due edifici esterni. Un secondo esperimento simile è previsto nel Comune di Matera, dove è presente anche lì un campo sportivo contiguo ad un condominio in cemento armato, ma in diverso contesto geologico caratterizzato da un sottosuolo carbonatico rigido, che permetterà di discriminare meglio il ruolo dinamico delle diverse tipologie di sottosuolo (Fig. 2).

La campagna di misurazioni effettuata nella città di Ferrara è durata due giorni. Sono stati installati 9 velocimetri (Lennartz 1 sec.) connessi ad acquisitori Reftek (Fig. 3a) nei due edifici esterni (Fig. 1a, triangolini rossi). Il segnale è stato registrato in continuo per tutta la durata dell'esperimento. I sensori sono stati installati sia al piano terra, sia in due punti sul tetto in entrambi gli edifici. Inoltre, sono stati installati due sensori nei piani intermedi, in uno dei due edifici, sulla stessa verticale. Al di là delle misure in continuo, alcune misure temporanee di rumore ambientale sono state eseguite in diversi punti sul tetto delle strutture in modo da caratterizzarne meglio il comportamento dinamico. Infine, per completare l'esperimento, sono stati installati 139 sensori sul campo di atletica (Fig. 1a, triangoli gialli). I 139 geofoni verticali di 4.5 Hz (Fig. 3c) sono stati installati sia lungo tre linee perpendicolari alle facciate degli edifici rivolte verso il campo di atletica, sia parallelamente ad esse (Linee 1,2,3, Fig. 1). Le registrazioni sul campo sportivo non sono state eseguite in continuo, per la limitata memoria degli acquisitori, ma mediante acquisizioni multiple, della durata di circa 4 minuti ciascuna. Un esempio delle registrazioni effettuate è presentato in Fig. 4. Da notare che per alcuni *data set* si sono verificati problemi di connettività tra i sensori e l'acquisitore (nel caso in Fig. 4. il sensore numero 47).

### 3. Risultati preliminari

Le analisi effettuate sono state motivate dall'assunzione che gli edifici, dopo essere stati messi in vibrazione da onde sismiche prodotte durante un terremoto o di origine antropica, modificano a loro volta lo scuotimento del suolo, agendo come fonti radianti secondarie. Le interazioni tra il campo d'onda incidente e quello generato dalle oscillazioni dei singoli edifici vengono studiate usando l'approccio di deconvoluzione applicato alle serie temporali registrate. In precedenti studi, si è dimostrato che le interazioni in oggetto possono essere analizzate mediante registrazioni simultanee di vibrazioni in una struttura edificata e a diverse profondità, in pozzi presenti nelle vicinanze (Petrovic e Parolai, 2016). Il campo d'onda generato dal singolo edificio può quindi interferire con quello generato da edifici posti nelle vicinanze. La velocità delle onde ed il loro tipo dominante possono presentare differenze a seconda della loro direzione di propagazione, tanto in prossimità della superficie quanto come in profondità. Per poter isolare nel campo d'onda misurato in superficie i contributi generati da diverse sorgenti e le loro mutue interazioni è quindi necessario effettuare le registrazioni sia in diverse posizioni delle strutture che nelle loro vicinanze. Questo è il motivo per cui si è proceduto all'installazione simultanea di sensori negli edifici e sul campo sportivo.

La prima fase di analisi delle registrazioni ottenute è consistita nell'identificazione delle caratteristiche dinamiche degli edifici, separatamente da quelle del suolo. Sono stati perciò calcolati i rapporti spettrali tra le registrazioni effettuate in diversi punti sul tetto e quelle simultanee alla base dello stesso edificio. I risultati sono riportati in Fig. 5. Grazie a tale



Fig. 3 - Strumentazione per l'indagine sull'interazione suolo-struttura e il comportamento dell'edificio: a) Reftek + 1s Lennarts; b) Tromino; c) Geofoni verticali a 4.5 Hz.

analisi è stato possibile identificare due picchi spettrali principali, a 3 e 4 Hz. Il picco a 3 Hz appare legato al movimento principalmente traslazionale, in direzione  $x$ , ed è particolarmente evidente nei punti 1 e 2 dell'edificio, a causa delle variazioni di rigidità della struttura, come si può evincere dall'analisi della planimetria. Il secondo picco a 4 Hz domina la componente  $x$  nei punti 1 e 2, e sulla componente  $y$  nei punti 3 e 4. Il picco è ben visibile in entrambe le componenti nei punti 5 e 6. Tale modo di vibrazione è stato interpretato come un modo rotazionale dell'edificio.

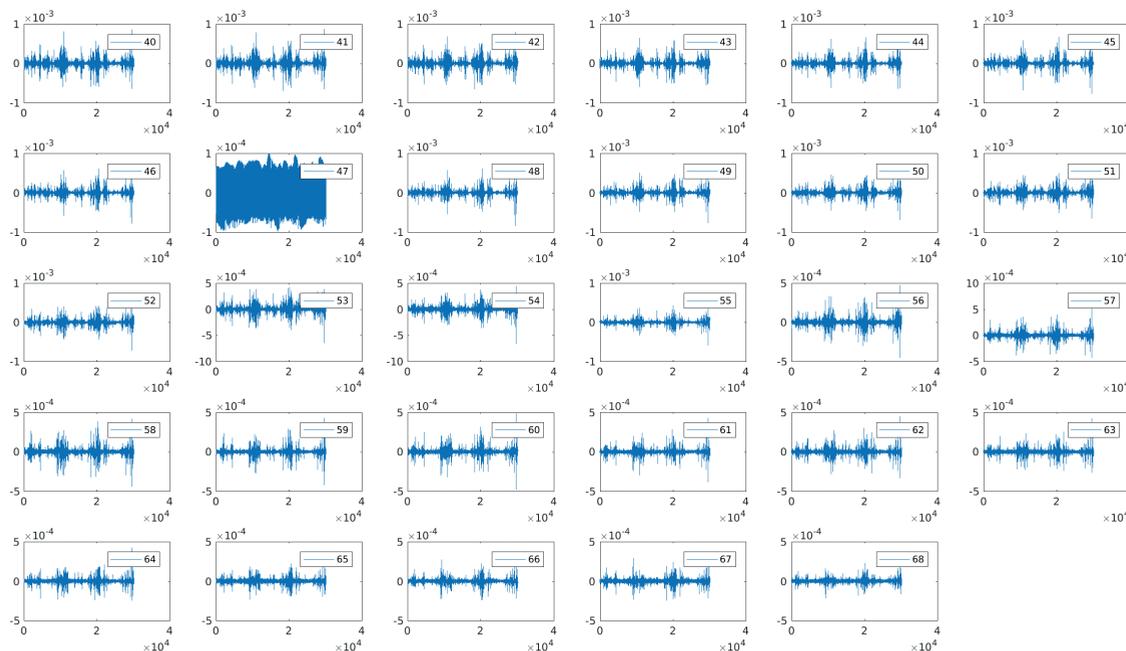


Fig. 4 - Esempio di registrazioni dei geofoni verticali a 4.5 Hz del rumore sismico su una linea sul campo sportivo.

Per identificare i segnali sismici rilasciati dall'edificio, si è successivamente iniziata un'analisi delle tracce registrate simultaneamente all'interno della struttura e sul campo sportivo. La Fig. 6 mostra, in modo preliminare, gli interferogrammi delle registrazioni di 4 minuti acquisite lungo la linea 1, usando come riferimento le registrazioni effettuate sul tetto dell'edificio, indicate in Fig. 6 come -45 m. Prima del calcolo degli interferogrammi, le tracce sono state filtrate tra 1 e 6 Hz,

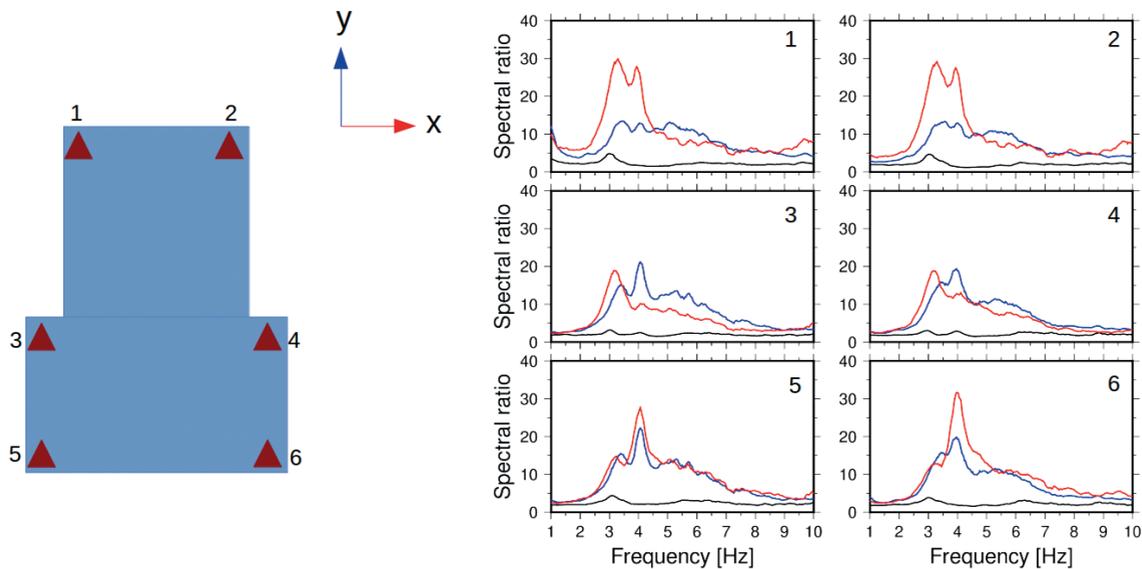


Fig. 5 - Rapporti spettrali calcolati utilizzando le registrazioni effettuate sul tetto dell'edificio e dal sensore installato alla sua base.

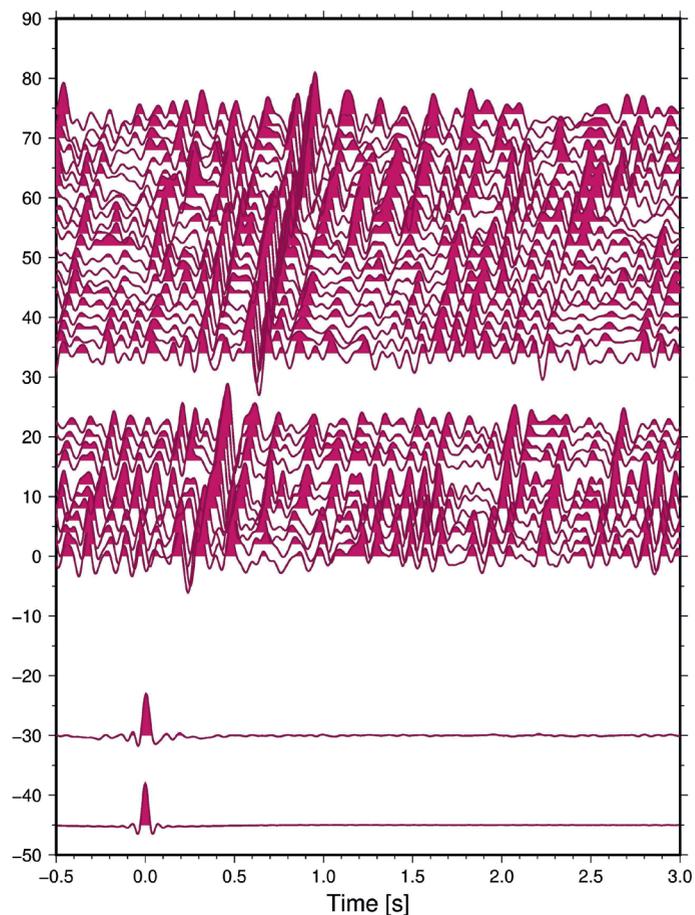


Fig. 6 - Interferogrammi calcolati utilizzando le registrazioni della linea 1 e considerando come riferimento la registrazione sul tetto della struttura.

banda di frequenza in cui, come dai risultati sopra indicati, vibra l'edificio. Già da questa analisi preliminare è possibile identificare un'onda secondaria generata alla base dell'edificio (-30 m in Fig. 6), che si propaga attraverso il campo.

#### 4. Considerazioni conclusive

I risultati preliminari ottenuti dall'analisi dei dati raccolti mostrano chiaramente che gli edifici studiati, una volta portati in oscillazione da onde sismiche, agiscono da sorgenti secondarie di onde che si propagano poi attraverso il campo sportivo. Si conferma che le misurazioni di vibrazioni ambientali registrate simultaneamente negli edifici e sul suolo sono uno strumento adeguato allo studio dell'interazione fra edificio e suolo. Ulteriori analisi sono tuttavia necessarie per meglio identificare le complesse mutue interazioni tra onde e per determinare se tali interazioni possano indurre un'amplificazione o una diminuzione dello scuotimento.

**Ringraziamenti.** Si ringraziano i condòmini e gli amministratori che, con la loro disponibilità, hanno contribuito allo svolgimento dell'esperimento.

## BIBLIOGRAFIA

- Colombi, A., Roux, P., Guenneau, S., Gueguen, P., Craster, R. V. (2016). *Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances*. Sci Rep 6:19238; doi:10.1038/srep19238
- Guéguen, P., Bard, P.-Y., Oliveira, C. S. (2000a). *Experimental and numerical analysis of soil motions caused by free vibrations of a building model*. Bull. Seism. Soc. Am. 90 (6), 2037-2043.
- Guéguen, P., Bard, P.-Y., Semblat, J. F. (2000b). *Engineering seismology: seismic hazard and risk analysis: seismic hazard analysis from soil-structure interaction to site-city interaction*. 12 WCEE, Auckland, NZ.
- Guéguen, P., Bard, P.-Y., Chávez-García, F.J. (2002). *Site-City seismic interaction in Mexico City-like environments: an analytical study*. Bull. Seism. Soc. Am. 92, 794-811.
- Jennings, P.C. (1970). *Distant motions from a building vibration test*, Bull. Seism. Soc. Am. 60, 2037-2043.
- Kanamori, H., Mori, J., Anderson, D. L., Heaton, T. H. (1991). *Seismic excitation by the space shuttle Columbia*. Nature 349, 781-782.
- Kham, M., Semblat, J.-F., Bard P.-Y., Dangla, P. (2006). *Seismic site-city interaction: main governing phenomena through simplified numerical models*. Bull. Seism. Soc. Am. 96(5), 1934-1951.
- Laurenzano, G., Priolo, E., Gallipoli, M. G., Mucciarelli, M., Ponzio, F.C. (2010). *Effect of vibrating buildings on free-field motion and on adjacent structures: The Bonifro (Italy) case history*, Bull. Seism. Soc. Am. 100 (2), 802-818.
- Petrovic, B. and Parolai, S. (2016). *Joint deconvolution of building and downhole strong-motion recordings: evidence for the seismic wavefield being radiated back into the shallow geological layers*, Bull. Seismol. Soc. Am. 106(4), 1720-1732.
- Petrovic, B., Parolai, S., Pianese, G., Dikmen, S. U., Moldobekov, B., Orunbaev, S., Paolucci, R. (2018). *Joint deconvolution of building and downhole seismic recordings: An application to three test cases*, Bulletin of Earthquake Engineering 16(3), 1633-1656, DOI: 10.1007/s10518-017-0215-6.
- Roux, P., Bindi, D., Boxberger, T., Colombi, A., Cotton, F., Douste-Bacque, I., Garambois, S., Gueguen, P., Hillers, G., Hollis, D., Lecocq, T. and Pondaven, I. (2018). *Toward Seismic Metamaterials: The METAFORÉ Project*. Seismological Research Letters, doi:10.1785/0220170196
- Wirgin, A., and Bard, P. Y. (1996). *Effects of buildings on the duration and amplitude of ground motion in Mexico city*. Bull. Seism. Soc. Am. 86(3), 914-920.