



GLI ACCELEROGRAMMI RAPPRESENTANO IL MOTO DEL TERRENO DURANTE UN TERREMOTO?

S. Castellaro

Alma Mater Studiorum Università di Bologna
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Viale C. B. Pichat 8, 40127 Bologna

Sommario

In tempi recenti, il verificarsi di un forte terremoto è immediatamente seguito dalla diffusione nei social, e in report tecnici, degli accelerogrammi con la massima accelerazione del terreno, degli spettri di risposta e di grandi dibattiti. Contestualmente, ad ogni evento si riapre la questione della possibile sottostima a livello normativo della componente verticale del moto.

Esiste però un problema di fondo sul quale probabilmente non ci si interroga abbastanza: le registrazioni sismiche sono davvero una rappresentazione fedele del moto del terreno, nella banda di frequenze di interesse per l'ingegneria?

Premessa

Agli albori della sismologia strumentale, le stazioni sismiche venivano poste rigorosamente su roccia, poiché era riconosciuto che i terreni sciolti provocassero disturbi, al tempo non pienamente comprensibili, nelle registrazioni (Bormann, 2002). L'interesse della sismologia, a quei tempi, non era tanto orientato alle ricadute ingegneristiche quanto ai problemi aperti della sismologia, ossia la localizzazione degli ipocentri, la determinazione della magnitudo, la comprensione del meccanismo di sorgente sismica (la faglia) e dei percorsi effettuati dalle onde sismiche. In altri termini, problemi a frequenze basse o molto basse.

Collocare le stazioni su sola roccia comportava però una distribuzione spaziale non ottimale della rete, così che negli anni le stazioni sismiche iniziarono ad essere ubicate su ogni tipo di terreno, continuando però a seguire le stesse regole costruttive delle stazioni in roccia. Queste prevedevano che i sismometri fossero posizionati su pilastri di calcestruzzo affondati nella roccia oppure su fondazioni rigide, create appositamente per ospitare più strumenti.

Se da un lato tra una fondazione in calcestruzzo e una roccia si ha continuità di impedenza sismica¹, può dirsi lo stesso per una fondazione su un terreno sciolto?

Questo tipo di installazione può modificare il moto registrato e le grandezze derivate, tra cui l'accelerazione di picco (PGA) e gli spettri di risposta, che tutti usiamo nella progettazione in zona sismica? Può modificare il moto registrato anche in altri problemi di quantificazione delle vibrazioni?

¹ L'impedenza sismica è il prodotto tra densità del mezzo e la velocità di propagazione di un'onda sismica nello stesso.

La stazione sismica: il terzo incomodo tra sensore e terreno

Il ruolo della fondazione

In Italia, le stazioni sismiche più datate sono collocate all'interno di cabine elettriche di trasformazione/distribuzione. Le stazioni nuove sono collocate tendenzialmente su pilastri di calcestruzzo 'isolati' per mezzo di un taglio da una fondazione circostante e ospitano non raramente anche altri strumenti, ad esempio meteorologici (Figura 1). Nei giorni immediatamente successivi ai terremoti vengono installate anche stazioni temporanee, in luoghi necessariamente meno controllati e noti. Nel resto del mondo i principi di installazione sono molto simili.

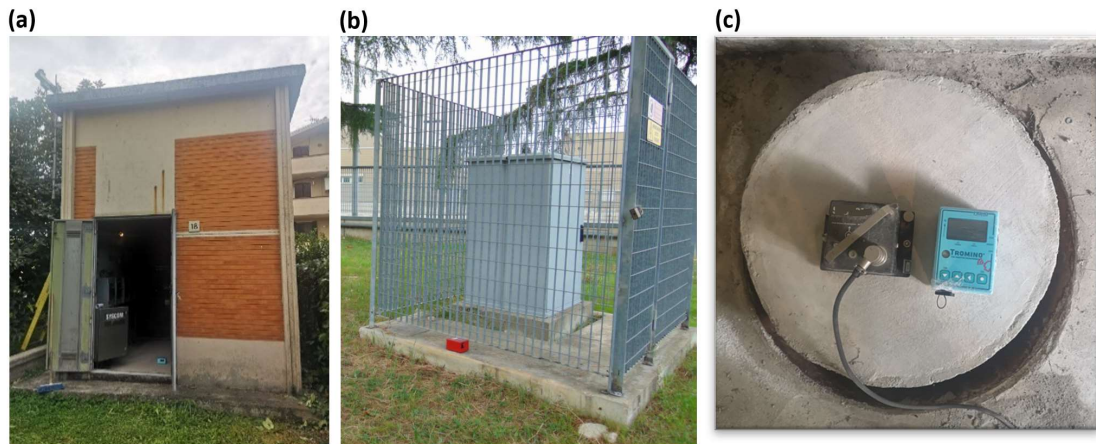


Figura 1: Esempi di tipiche installazioni sismiche in Italia: a) entro cabina elettrica (stazione di Mirandola, MRN), b) armadio in vetroresina, c) dettaglio dei sensori sismici su pilastro 'isolato' dalla fondazione in calcestruzzo.

Uno dei principi base della fisica sperimentale è che, per non alterare il segnale, tra l'oggetto di misura e il ricevitore non vadano poste interfacce. Qualora questo non sia possibile, l'interfaccia deve essere in continuità di impedenza. Se l'interfaccia ha una impedenza maggiore (come tipicamente accade per le fondazioni sui terreni sciolti), l'ampiezza del moto trasmesso al ricevitore cala, e viceversa (Zoeppritz, 1919).

In aggiunta, una fondazione rigida non può assecondare e descrivere fedelmente movimenti orizzontali del terreno con lunghezze d'onda inferiori a o confrontabili con le dimensioni in pianta della fondazione stessa (il che corrisponde a frequenze superiori a qualche hertz o decina di hertz; Luco et al., 1986; Bycroft, 1978 e 1980; Castellaro et al., 2022). Questo fenomeno, esemplificato nello schema di Figura 2, si osserva facilmente nelle stazioni sismiche e si manifesta come un rapporto tra gli spettri orizzontali (H) e verticali (V) del moto, registrato dagli strumenti al loro interno, inferiore a 1 ($H/V < 1$) in alta frequenza. In questi casi, è la componente orizzontale del moto ad essere depressa alle alte frequenze mentre la componente verticale è quasi inalterata.

Lo stesso rapporto acquisito su terreno naturale, immediatamente al di fuori della fondazione, torna tipicamente ad essere maggiore o uguale a 1.

In Figura 3 si riporta un esempio concreto del fenomeno appena descritto per la stazione di Mirandola, nota per aver registrato in campo vicino la prima scossa del 20 maggio 2012. Si vede molto bene come la componente verticale di quel terremoto, registrata dal sismometro collocato sul pilastro/fondazione di Figura 1a, c, sia superiore a quelle orizzontali sopra 9 Hz (Figura 3a).

Questo è anche quanto quella stazione misura in condizioni di tremore ambientale, come si vede bene dal rapporto $H/V < 1$ sopra 9 Hz registrato sul pilastro (P, curva grigia in Figura 3b).

Tuttavia, lo stesso rapporto acquisito sul terreno naturale appena al di fuori della fondazione non ha affatto queste caratteristiche (S, curva rossa in Figura 3b).

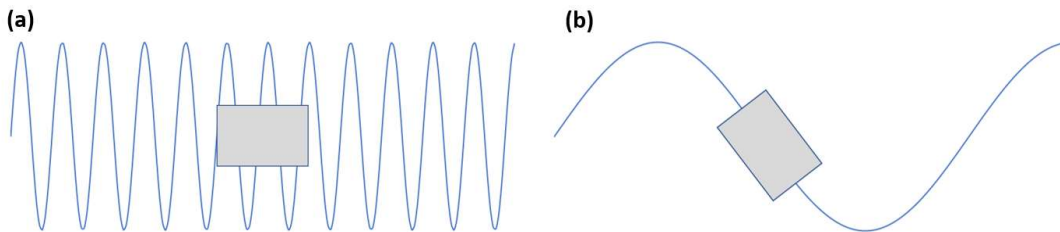


Figura 2: Schematizzazione in pianta di uno degli effetti legati alla fondazione: a) la fondazione non asseconda le onde in alta frequenza come invece accade nel caso b) di onde a bassa frequenza.

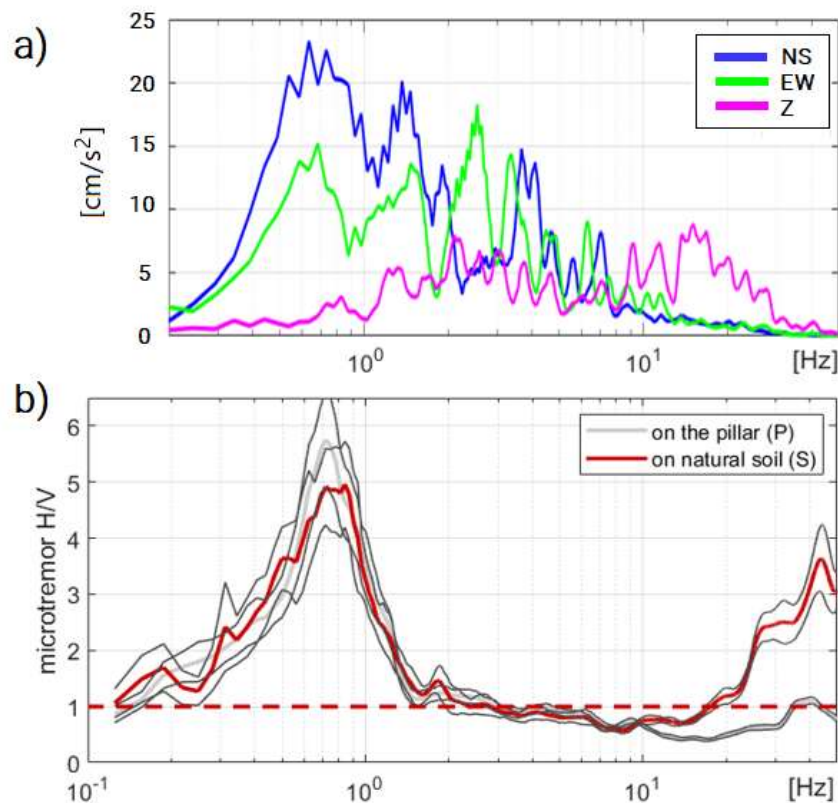


Figura 3: Stazione di Mirandola (MRN). a) Spettri in ampiezza delle 3 componenti ottenuti dalla registrazione dell'evento del 20 maggio 2012. Si osserva l'attenuazione delle componenti orizzontali per frequenze sopra 10 Hz. b) Rapporto H/V del microtremore registrato sul pilastrino interno alla cabina (P) e sul terreno naturale (S). L'effetto fondazione è ben visibile per frequenze sopra 10 Hz.

Gli strumenti posti su o circondati da fondazioni, registrano sempre un moto orizzontale attenuato in alta frequenza e il fenomeno è tanto più evidente quanto più scadente è il terreno su cui appoggiano e quanto più estesa è la fondazione in pianta (Castellaro e Mulargia, 2009). Il fenomeno è stato osservato e modellato già a partire dalla fine degli anni '70, tanto che le fondazioni spesse e rigide venivano tipicamente consigliate nella costruzione delle centrali nucleari, per ridurre il moto trasmesso alle strutture soprastanti (Bycroft, 1978 e 1980).

È stato inoltre mostrato da più autori che l'eventuale pilastrino di supporto dei ricevitori (Figura 1c), isolato mediante un taglio sul perimetro rispetto alla fondazione, non porta ad alcun reale beneficio perché il moto del terreno (che non ha mai la sola incidenza dal basso verso l'alto) continua ad essere alterato dalla presenza della fondazione e tale alterazione è trasmessa al pilastrino attraverso il terreno (Mucciarelli et al. 2003; Castellaro et al., 2022).

In conclusione, quando in alta frequenza si osserva una componente verticale del moto maggiore delle orizzontali, la prima domanda che ci si dovrebbe porre è se non siano le

componenti orizzontali ad essere deamplificate a causa della presenza di una fondazione o di un terreno rigido artificiale.

Il ruolo della struttura ospitante

Sismometri e accelerometri sono spesso installati all'interno di strutture (cabine, edifici, o altri manufatti) adibite anche ad altri scopi. Nonostante la consapevolezza che la struttura ospitante debba essere più piccola possibile, sovente, per necessità pratiche, non lo è.

La struttura che ospita gli strumenti di misura è a sua volta messa in moto dagli eventi sismici (o dal microtremore ambientale) e questa vibrazione viene radiata nuovamente al terreno. Il risultato è che, in questi casi, il sismometro non darà una fedele rappresentazione del moto del solo terreno libero ma conterrà anche il moto trasmesso dalla struttura al terreno (Ditommaso et al., 2010; Hollender et al., 2020, Castellaro et al. 2022).

In Figura 4 portiamo un esempio per la stazione di Corleone (Palermo) per la quale i dati ufficiali di installazione indicano un presunto picco spettrale del moto nel terreno a 6-7 Hz che è in realtà riconducibile al periodo proprio di vibrazione della cabina (Castellaro et al., 2022).

Le cabine di vetroresina moderne (Figura 1b), benché siano piccole e leggere, continuano a costituire, nell'immediata vicinanza dello strumento, un oscillatore in alta frequenza che altera il moto in campo libero del terreno (tipicamente attorno a 10 Hz).

Anche gli altri edifici in prossimità delle stazioni sismiche hanno un ruolo importante sul segnale registrato dai sismometri (si veda il filone di ricerca sul tema della 'soil-city interaction'). Il moto di strutture grandi come viadotti, palazzi, torri eoliche, è facilmente individuabile nelle registrazioni, anche con metodi passivi in microtremore, fino a decine o persino centinaia di metri dalle strutture stesse.

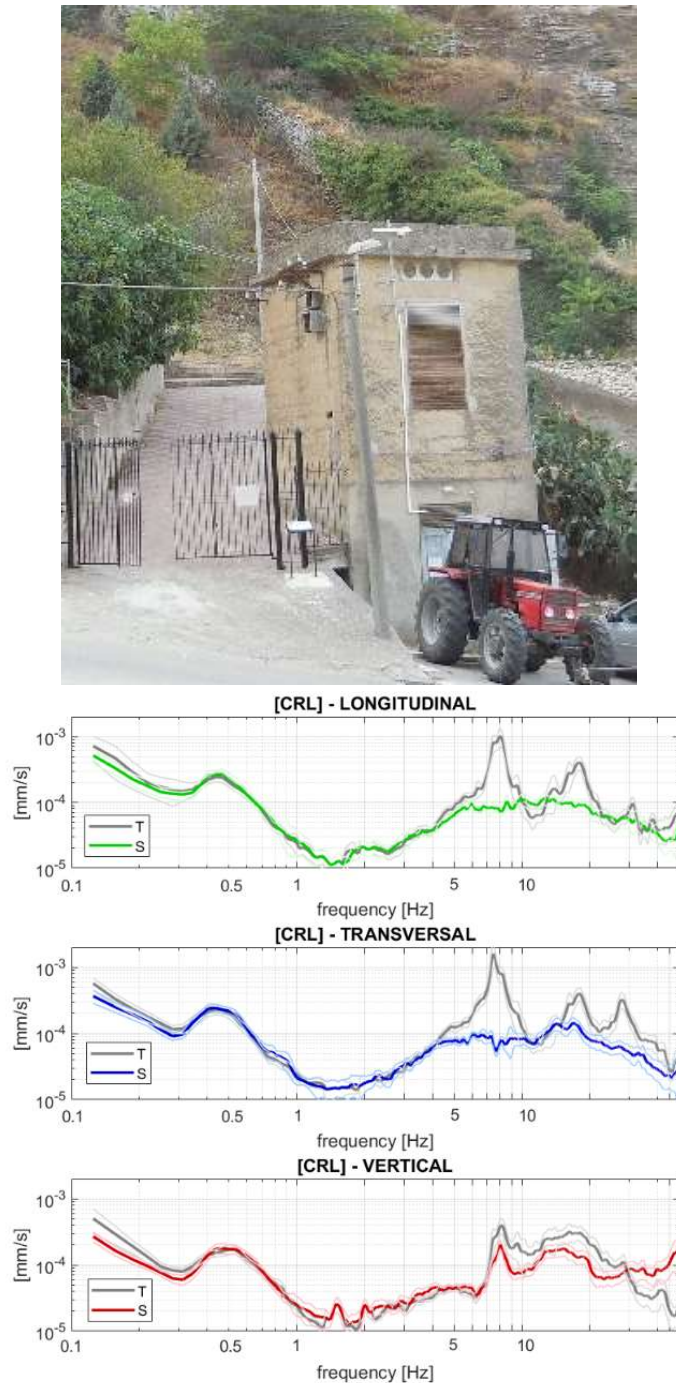


Figura 4: Stazione di Corleone (CRL) per la quale i dati ufficiali dell'installazione indicano un'amplificazione stratigrafica del moto del terreno a 6-7 Hz. Gli spettri registrati in passiva sul tetto della cabina (T) e sul terreno naturale nelle immediate vicinanze (S), mostrano chiaramente che il picco a 6-7 Hz registrato dal sismometro è il modo di vibrare della cabina e non è una caratteristica del terreno.

Altri elementi che disturbano il rapporto sensore-terreno

I sismometri e accelerometri installati in via permanente nelle stazioni sismiche non sono strumenti wireless. Sono sempre collegati a grossi cavi di alimentazione e trasmissione dati, come illustrato ad esempio in Figura 1c.

I cavi, durante un terremoto, oscillano a loro volta. Nonostante la loro massa sia relativamente piccola, essi sono a diretto contatto con gli strumenti di misura e il disturbo indotto dalla loro vibrazione non ci risulta essere mai stato oggetto di studio.

Esistono poi, particolarmente per gli strumenti ad ampia banda, una serie di problemi elettronici che possono avere ripercussioni importanti sulla registrazione di eventi impulsivi e vanno corretti prima che il dato possa essere impiegato in modo utile, rappresentativo e consapevole.

Conclusioni

Una cosa è quindi certa: il moto registrato da un sismometro o da un accelerometro è, sì, il moto del terreno ma – particolarmente alle medio-alte frequenze – con l'aggiunta di un grande numero di altre variabili che devono essere attentamente valutate prima di trarre qualsiasi conclusione sulla PGA, sugli spettri di risposta, sulle curve di attenuazione e su qualsiasi altra grandezza derivata.

È in atto un encomiabile sforzo per descrivere sistematicamente almeno alcune di queste variabili (banca dati [CRISP - Home \(ingv.it\)](http://www.crisp.ingv.it)) anche se per ora l'attenzione maggiore è rivolta alla descrizione della stratigrafia sismica di sito (V_{s30} , V_{sH} , ecc.) e le informazioni sull'installazione sismica e sulle interazioni con l'ambiente circostante sono date, quando presenti, solo in modo qualitativo.

A seguito di ogni terremoto, entro poche ore o addirittura minuti, i siti e i canali di informazione sono sommersi da spettri di risposta derivati dalle registrazioni disponibili, con commenti di accompagnamento generalmente affrettati.

Prima di calcolare uno spettro di risposta o una PGA, sarebbe doveroso interrogarsi su quale strumento, posto dove, con che cosa intorno, abbia registrato quel moto e in quale misura quel segnale sia davvero rappresentativo del moto del terreno.

I diversi autori qui citati, e altri ancora, hanno mostrato che il segnale registrato dalle stazioni sismiche può non essere fedele al moto del solo terreno già da pochi hertz in su.

Ci auguriamo che questo breve scritto contribuisca ad aumentare la consapevolezza sulla necessità di conoscere l'intera catena strumentale e le sue interazioni con l'ambiente per giungere a conclusioni scientificamente sostenibili, non solo quando si misurano terremoti ma anche quando si misurano vibrazioni in senso più generale.

Bibliografia

- Bormann, P. (2002). New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2), Deutsches GeoForschungszentrum GFZ, IASPEI, Potsdam, Germany.
- Bycroft, G.N. (1978). Soil-structure interaction at higher frequency factors, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 5, 235-248.
- Bycroft, G.N. (1980). Soil-foundation interaction and differential ground motions, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 8, 235-248
- Castellaro, S., F. Mulargia (2009). The effect of velocity inversions on H/V, *Pure and Applied Geophysics* 166, 567-592.
- Castellaro, S., G. Alessandrini, G. Musinu (2022). Seismic Station Installations and Their Impact on the Recorded Signals and Derived Quantities. *Seismological Research Letters* 93 (6), 3348–3362.
- Ditommaso, R., M.R. Gallipoli, M. Mucciarelli, F.C. Ponzio (2010). Effect of a single vibrating building on free-field ground motion: numerical and experimental evidences, *Bulletin of Earthquake Engineering* 8, 693–703.
- Hollender, F., Z. Roumelioti, E. Maufroy, P. Traversa, A. Mariscal (2020). Can we trust high-frequency content in strong-motion database signals? Impact of housing, coupling, and installation depth of seismic sensors, *Seismological Research Letters* 91, 2192-2205.
- Luco, J., H. L. Wong (1986). Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion, *Earthq. Eng. Struct. Dynam.* 14, 891–908.
- Luco, J. E., J. G. Anderson, and M. Georgevich (1990). Soil-structure interaction effects on strong motion accelerograms recorded on instrument shelters, *Earthq. Eng. Struct. Dynam.* 19, 119–131.
- Mucciarelli, M., M.R. Gallipoli, F.C. Ponzio, M. Dolce (2003). Seismic waves generated by oscillating building, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 23, 255-262.
- Zoepfritz, K. (1919). On reflection and propagation of seismic waves, *Gottinger Nachrichten* 1, 66-84.

