

## **UNO STUDIO SPERIMENTALE E ANALITICO SUGLI EFFETTI DELL'INTERAZIONE TERRENO-STRUTTURA IN UN QUARTIERE DI MATERA**

Piro Annachiara

*Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italia*  
*annachiara.piro@unina.it*

Tragni Nicola

*Consiglio Nazionale delle Ricerche - IMAA, Tito Scalo Potenza, Italia*  
*nicola.tragni@imaa.cnr.it*

de Silva Filomena

*Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italia*  
*filomena.desilva@unina.it*

Calamita Giuseppe

*Consiglio Nazionale delle Ricerche - IMAA, Tito Scalo Potenza, Italia*  
*giuseppe.calamita@imaa.cnr.it*

Cristallo Filippo Maurizio

*Libero professionista*  
*geocristallo@gmail.com*

Gallipoli Maria Rosaria

*Consiglio Nazionale delle Ricerche - IMAA, Tito Scalo Potenza, Italia*  
*mariarosaria.gallipoli@imaa.cnr.it*

Silvestri Francesco

*Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italia*  
*francesco.silvestri@unina.it*

### **Sommario**

È ben noto come la risposta dinamica di un edificio possa essere influenzata dall'interazione con il terreno, che può portare ad un aumento o ad una riduzione della domanda sismica in virtù della combinazione tra le caratteristiche di struttura e terreno di fondazione. In questa nota vengono valutati gli effetti dell'interazione terreno-struttura su quattro edifici del comune di Matera, collocati su una formazione argillosa di spessore variabile che ricopre un substrato costituito da calcareniti poggianti su calcari. Sugli edifici sono state condotte misure di rumore ambientale per la determinazione del periodo fondamentale con tecnica HVSR. Pur avendo la stessa configurazione strutturale, gli edifici sono caratterizzati da periodi diversi e crescenti in funzione dello spessore dello strato di argilla su cui sono fondati. La variazione di periodo indotta dall'interazione terreno-struttura è stata poi determinata con un metodo analitico semplificato, che ha fornito risultati coerenti con le misure sperimentali. È stato quindi verificato che, in relazione alla variazione di spessore della formazione argillosa, la variazione di periodo determina incremento o diminuzione della domanda sismica valutabile sia dagli spettri da normativa che da quelli ottenuti dalla risposta sismica locale.

## 1. Il caso di studio

Matera è una città storica situata nell'Italia meridionale, ben nota per il suo peculiare assetto geomorfologico che ha fortemente condizionato il suo sviluppo urbano nel tempo (Fig. 1). Ricade in un'area di media pericolosità sismica, con accelerazione attesa al *bedrock*, *PGA*, pari a 0.14g per un tempo di ritorno di 475 anni.

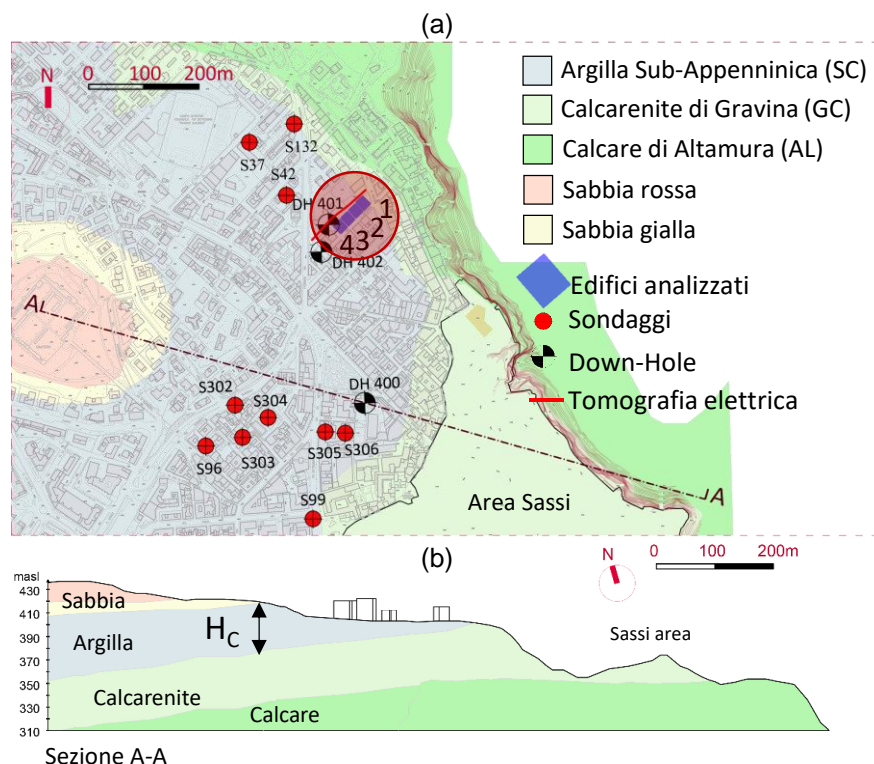


Fig. 1 Matera: (a) carta geologica con indicazione degli edifici analizzati e delle indagini; (b) sezione stratigrafica rappresentativa della variabilità dello spessore dell'argilla.

Le principali formazioni geologiche (Fig. 1b) affioranti nelle zone a Nord-Est e Sud-Est del centro urbano, così come nell'area dei "Sassi", sono il calcare di Altamura (AL) e la calcarenite di Gravina (GC). Quest'ultima è ricoperta da un deposito di argilla Subappenninica (SC) con spessori ( $H_c$ ) variabili da qualche metro, nella zona vicina ai Sassi, fino a 40–50 m nella zona più interna.

L'area oggetto di studio (indicata in rosso in Fig. 1a), ubicata a Nord dei "Sassi", è un quartiere di edilizia popolare costituito da circa 20 edifici realizzati in muratura di calcarenite nel periodo 1908-1935, posizionati a scacchiera e caratterizzati da due livelli a pianta rettangolare.

Per caratterizzare il sottosuolo dell'area di studio sono state eseguite, nell'ambito del progetto ReLUIS, una serie di indagini geognostiche e geofisiche nei pressi di una sede dell'Azienda Sanitaria Matera (ASM) e di alcune abitazioni private (Fig. 2a). Per definire la sezione stratigrafica di riferimento sono stati utilizzati i risultati ottenuti: (i) da una tomografia elettrica, (ii) da due sondaggi geognostici e relative prove down-hole, (iii) da misure di rapporti spettrali H/V del rumore ambientale. La tomografia elettrica (ERT), la cui traccia è indicata in rosso in Fig. 2a, restituisce la distribuzione della resistività elettrica apparente nella sezione di indagine, interpretabile come distribuzione dei litotipi caratterizzanti l'area di studio. La prova è stata eseguita con la configurazione elettrodica Dipolo-Dipolo (DD), caratterizzata da una maggiore sensibilità alle variazioni orizzontali di resistività. Le interfacce tra gli strati caratterizzati da diversa resistività sono compatibili con quelle tra argilla, calcareniti e calcari individuate attraverso i sondaggi DH-401 e DH-402 (Fig. 2b) eseguiti rispettivamente al centro e in prossimità dell'estremità Sud-Ovest della sezione investigata e in cui la

formazione argillosa (SC) mostra spessore crescente verso SO.

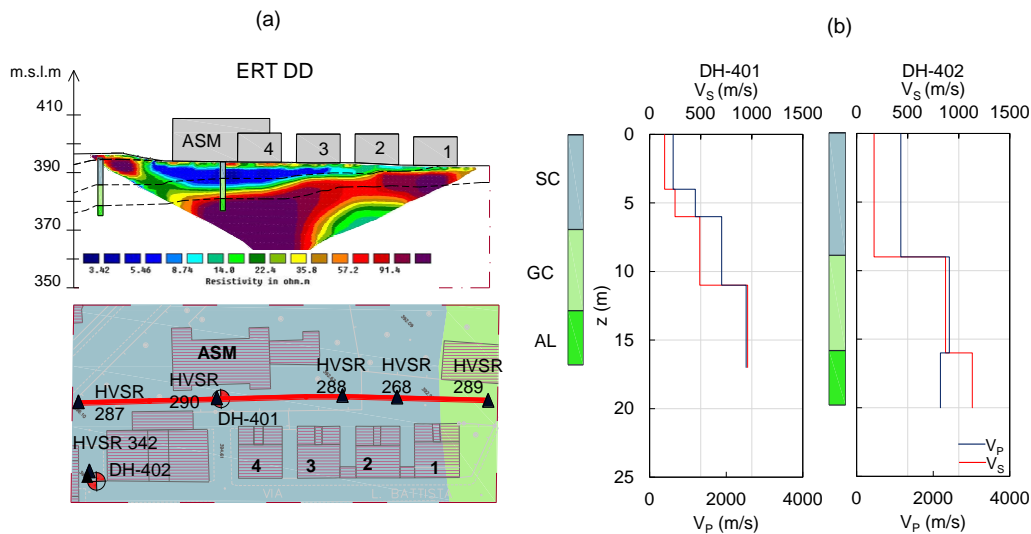


Fig. 2 (a) Planimetria dell'area di studio con indicazione delle prove eseguite e sezione del modello di resistività Dipolo-Dipolo; (b) stratigrafia e profili di  $V_S$  e  $V_P$  delle verticali DH401 e DH402

Dalle prove Down-Hole sono stati ottenuti i profili di  $V_S$  e  $V_P$  riportati in Fig. 2b, in cui la formazione argillosa (SC) mostra valori di  $V_S$  poco variabili (tra 146 m/s e 170 m/s), mentre la  $V_S$  della calcarenite varia da 870 m/s nella verticale DH-402 a 450 m/s nella verticale DH-401 per effetto della fratturazione; nei calcari (AL)  $V_S$  assume valori comunque elevati, pari a 960 m/s e 1132 m/s. I profili di  $V_S$  sono stati validati attraverso il confronto tra i rapporti spettrali H/V misurati sperimentalmente (HVSR 342 e 290 in Fig. 3a) e le funzioni amplificazione calcolate in termini di componenti orizzontali H/H lungo le colonne stratigrafiche riportate in Fig. 3b. In base alla tomografia di resistività, i profili stratigrafici e di velocità delle due verticali indagate sono stati quindi estrapolati in corrispondenza delle altre misure H/V (HVSR 288, 268, 289 in Fig. 3a), il cui sistematico accordo con le funzioni di amplificazione H/H ha permesso così di validare il modello di sottosuolo riportato in Fig. 3b.

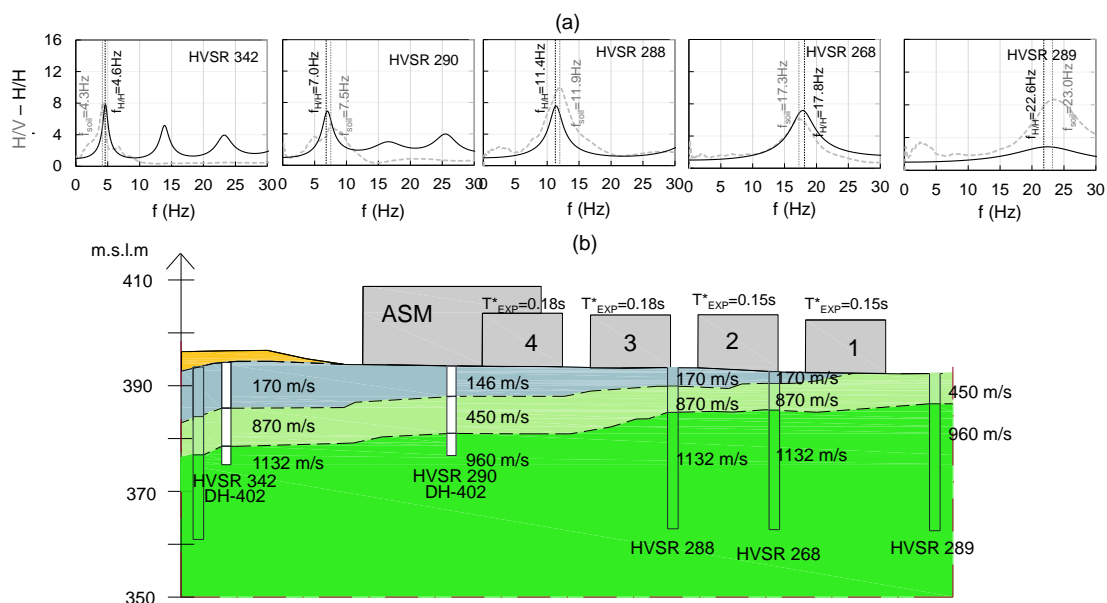


Fig. 3 (a) Confronti tra i rapporti spettrali H/V e le funzioni di amplificazione H/H; (b) modello geotecnico di sottosuolo.

## 2. Valutazione degli effetti di interazione terreno-struttura

### 2.1. Confronti frequenze sperimentali e analitiche

Gli effetti dell'interazione terreno-struttura sono stati valutati in termini di variazione del periodo fondamentale del sistema edificio-fondazioni-sottosuolo,  $T^*$ , rispetto a quello ottenibile considerando la struttura a base fissa,  $T_0$ . I valori di  $T^*$  sono stati successivamente confrontati con i valori sperimentali,  $T_{EXP}^*$ , ottenuti da misure HVSR sugli edifici analizzati (Tragni et al. 2021). L'analisi dei soli dati sperimentali riportati in Figura 3b evidenzia un incremento del periodo fondamentale all'aumentare dello spessore dello strato argilloso deformabile, basti osservare la differenza tra gli edifici #1 e #2 ( $T_{EXP}^*=0.15s$ ) e gli edifici #3 e #4 ( $T_{EXP}^*=0.18s$ ).

Per il calcolo di  $T^*$  sono stati utilizzati due metodi analitici, uno tradizionale basato sulla formulazione di Veletsos & Meek (1974), e l'altro proposto da Piro et al. (2020). Per applicare quest'ultimo metodo sono stati definiti i quattro schemi di riferimento mostrati in Fig. 4a, per ciascuno dei quali sono state definite le caratteristiche: (i) del sottosuolo all'interno del volume significativo in termini di modulo di rigidità al taglio,  $G$ , densità,  $\rho$  e  $V_s$ , (ii) della struttura in termini di larghezza, profondità del piano di posa, rigidità e densità delle fondazioni (quest'ultimo valore pari al valor medio riportato in Tab. C.8.5.1 delle NTC'18, per la muratura in tufo con tessitura irregolare).

Il periodo a base fissa è stato stimato da una correlazione con l'altezza del fabbricato ( $T_0 = 0.0137h$ ) ottenuta dai rapporti spettrali misurati sugli edifici in muratura di Matera fondati su calcarenite (Tragni et al. 2021). Come si osserva dalla Fig. 4b, i valori sperimentali risultano sovrastimati se calcolati con la procedura tradizionale (simboli vuoti), ma ben predetti dalla procedura di Piro et al. (2020) (simboli pieni).

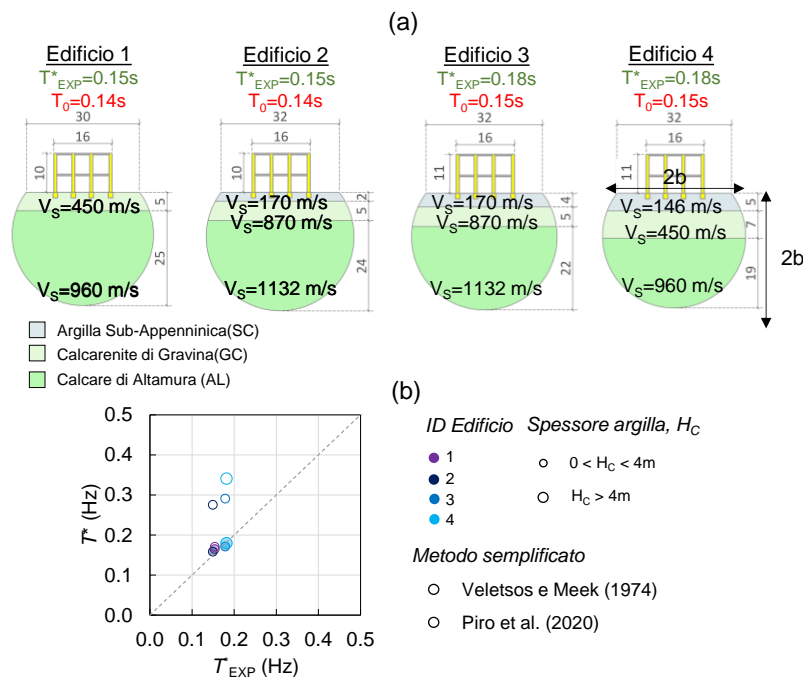


Fig. 4. (a) Schemi terreno-fondazione-edificio per l'applicazione del metodo semplificato (b) confronto tra valori sperimentali e analitici del periodo, calcolati con l'approccio tradizionale e quello proposto da Piro et al. (2020)

### 2.2. Spettri di risposta e valutazione della domanda sismica

La domanda sismica è stata calcolata utilizzando sia gli spettri di risposta da normativa sia eseguendo analisi monodimensionali di risposta sismica locale sulle colonne stratigrafiche al di sotto dei quattro edifici (Fig. 4a). Gli accelerogrammi di input sono stati selezionati nel catalogo SIMBAD (Smerzini et al., 2014) attraverso il codice Rexel (Iervolino et al., 2010) (i) magnitudo variabile tra 4 e 6, (ii)

distanza epicentrale variabile tra 0-30 km, (iii) intervallo di periodi d'interesse  $T_1=0.05$ s e  $T_2=2.0$ s, (iv) sottostima e sovrastima massima rispetto allo spettro di normativa (NTC'18) per sottosuolo di categoria A rispettivamente pari a 10% e 30% nell'intervallo di periodi  $[T_1 - T_2]$ .

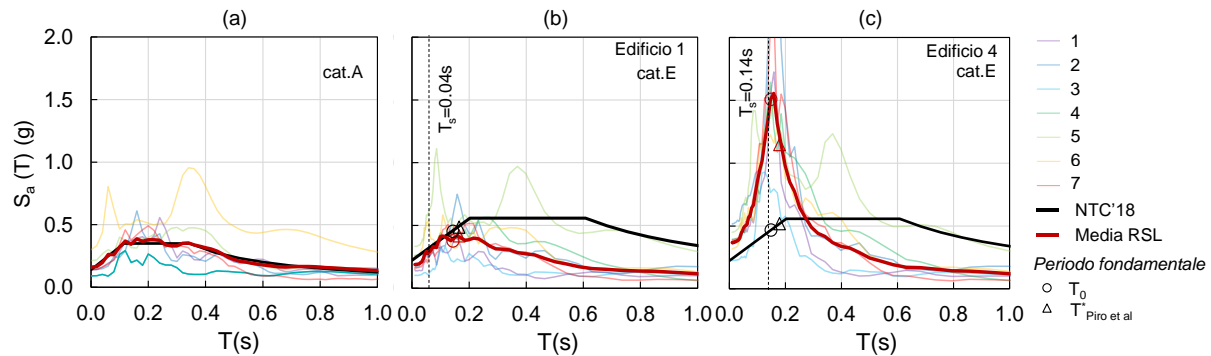


Fig. 5. (a) Spettri di accelerazione della serie di segnali selezionata; confronto tra gli spettri di risposta a piano campagna ottenuti dalle analisi di risposta locale e lo spettro da normativa per sottosuolo E, per gli edifici (b) #1 e (c) #4

La Fig. 5a mostra la compatibilità tra lo spettro da normativa e lo spettro medio degli accelerogrammi selezionati non scalati. Le analisi di risposta sismica locale (RSL) sono state eseguite con l'utilizzo del programma STRATA. Il comportamento non lineare e dissipativo dell'argilla (SC) è stato introdotto mediante le curve  $G/G_0-\gamma$  e  $D-\gamma$  proposte da Vucetic & Dobry (1991) per terreni con indice di plasticità  $IP=30\%$ , mentre per la calcarenite sono state utilizzate le curve suggerite da Vinale (1988) per tufo vulcanico. La Fig. 5b-c confronta gli spettri medi al piano campagna per le verticali sotto agli edifici #1 e #4 e lo spettro da normativa per sottosuolo di categoria E, attribuibile ad entrambi secondo i profili di  $V_s$ . Le linee verticali tratteggiate indicano il periodo del sottosuolo misurati sperimentalmente,  $T_s$ , mentre gli indicatori corrispondono alle ordinate spettrali associate ai periodi a base fissa e a base deformabile stimati con l'approccio di Piro et al. (2019) e Veletsos e Meek (1974). Nell'intervallo di periodi d'interesse (fino a poco meno di 0.4s), lo spettro di normativa è prossimo a quello medio RSL per l'edificio #1 in cui la calcarenite è affiorante ( $H_C=0$ ). Al contrario è poco cautelativo per l'edificio #4, laddove lo spessore di argilla  $H_C=4$ m. Si osserva inoltre che per l'edificio #4 si ha una condizione di risonanza tra terreno ( $T_s=0.14$ s) e struttura ( $T_0=0.15$ s). In questo caso, l'incremento di periodo da  $T_0$  a  $T^*$  comporta una riduzione significativa dell'accelerazione spettrale risultante dalle analisi di RSL, mentre condurrebbe ad un aumento, seppur relativamente modesto, di quella deducibile dallo spettro NTC. Per valutare se gli effetti dell'interazione terreno-struttura siano benefici o controproducenti, in Fig. 6 sono sintetizzati i confronti tra i valori di  $S_a$  ottenuti dallo spettro medio della RSL e dallo spettro di normativa (NTC) per tutti gli edifici analizzati.

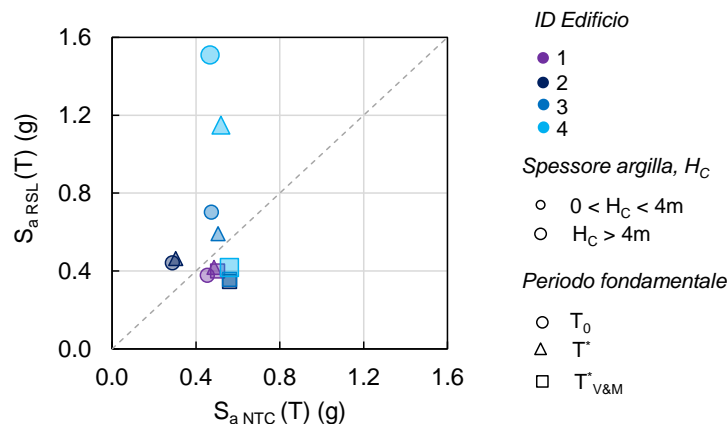


Fig. 6. Confronto tra le accelerazioni spettrali per condizioni di base fissa e considerando l'interazione terreno-struttura, ottenute da RSL e dallo spettro di normativa

L'incremento da  $T_0$  a  $T^*$  comporta la riduzione dell'ordinata spettrale valutata da RSL. Tale effetto cresce all'aumentare dello spessore di argilla,  $H_C$ . La stessa variazione di periodo conduce all'incremento modesto della domanda sismica NTC e poco influenzato dallo spessore d'argilla.

### 3. Conclusioni

Questo studio ha evidenziato la variabilità del periodo fondamentale misurato su quattro edifici nel comune di Matera caratterizzati da struttura analoga e fondati su uno strato di argilla abbastanza deformabile. Tale variabilità risulta connessa agli effetti di interazione dinamica terreno-fondazione-struttura verificata e quantificata applicando ai casi di studio l'approccio semplificato proposto da Piro et al. (2020) per la valutazione del periodo del sistema terreno-fondazione-struttura. Rispetto all'approccio tradizionale di Veletsos e Meek (1974), questo metodo permette di tenere conto di configurazioni complesse del sistema terreno-fondazione. I periodi calcolati risultano molto prossimi ai valori sperimentali, confermando gli effetti dell'interazione. Inoltre, il confronto è significativamente migliore rispetto a quello ottenuto applicando l'approccio tradizionale. Un'ulteriore verifica degli effetti dell'interazione terreno-struttura è stata effettuata determinando la domanda sismica associata ai periodi a base fissa e deformabile. All'aumentare dello spessore dello strato deformabile, l'aumento del periodo fondamentale comporta un aumento lieve dell'accelerazione spettrale da normativa e una riduzione significativa di quella media risultante da più accurate analisi di risposta sismica locale.

### Ringraziamenti

Questo studio è stato realizzato nell'ambito del Task 16.3 'Interazione Terreno-Fondazione-Struttura' del progetto ReLUIS-DPC 2022-2024 finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile.

### Bibliografia

- Iervolino I., Galasso C., Cosenza E. (2010). "REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis". *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8:339-362 <https://doi.org/10.1007/s10518-009-9146-1>
- NTC 2018: Norme Tecniche per le Costruzioni. DM 17/1/2018, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, G.U. n. 42, 20 Febbraio 2018, Roma
- Piro A., Tragni N., de Silva F., Parisi F., Gallipoli M.R., Silvestri F. (2021). "Valutazione degli effetti di interazione terreno-struttura su edifici in muratura del centro urbano di Matera". *Atti dell'Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2021*, AGI, Roma, ISBN: 9788897517153
- Piro A., de Silva F., Parisi F., Scotto di Santolo A., Silvestri F. (2020). "Effects of soil-foundation-structure interaction on fundamental frequency and radiation damping ratio of historical masonry building sub-structures". *Bulletin of Earthquake Engineering* 18, 1187–1212 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00748-4>
- Smerzini C., Galasso C., Iervolino I., Paolucci R. (2014). Ground motion record selection based on broadband spectral compatibility. *Earthquake Spectra*. <https://doi.org/10.1193/052312EQS197M>
- Tragni N., Calamita G., Lastilla L., Belloni V., Ravanelli R., Lupo M., Salvia V., Gallipoli M. R. (2021). "Sharing soil and building geophysical data for seismic characterization of cities using Clara Webgis: A case study of Matera (southern Italy)". *Applied Sciences (Switzerland)*;11. <https://doi.org/10.3390/app11094254>.
- Veletsos A., & Meek J.W. (1974). "Dynamic behavior of building-foundation systems". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 3:121-138
- Vinale F. (1988). "Caratterizzazione sismica del sottosuolo di un'area campione di Napoli ai fini di una microzonazione sismica." *Rivista Italiana di Geotecnica*, 22(2),77-100
- Vucetic M., & Dobry R (1991). "Effect of soil plasticity on cyclic response". *Journal of Geotechnical Engineering* 117:1(89). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89))