

**VALUTAZIONE DEGLI EFFETTI DI INTERAZIONE
TERRENO-STRUTTURA SU EDIFICI IN MURATURA
DEL CENTRO URBANO DI MATERA**

Piro Annachiara

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

Tragni Nicola

Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale, 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

Gallipoli Maria Rosaria

Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale, Tito Scalo
Potenza, Italia
mariarosaria.gallipoli@imaa.cnr.it

Parisi Fulvio

Università degli Studi di Napoli Federico II, Napoli, Italia
fulvio.parisi@unina.it

Silvestri Francesco

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

Sommario

Per valutare gli effetti dell'interazione terreno-struttura sul periodo fondamentale e sullo smorzamento che caratterizzano la risposta dinamica in campo lineare di una struttura in elevazione sono utilizzabili approcci analitici semplificati basati sull'oscillatore equivalente. Questi sono validi a rigore nelle ipotesi di sottosuolo omogeneo e fondazione regolare, mentre nei casi di sottosuolo stratificato e/o geometria irregolare delle fondazioni l'applicazione risulta problematica. In questa nota viene validato un approccio multidisciplinare applicato su diversi edifici in muratura del centro urbano di Matera. Poiché sono state eseguite misure di microtremori ambientali sia sul sottosuolo che sugli edifici, è stato possibile confrontare i valori di periodo ottenuti dalla procedura analitica semplificata con i valori sperimentali.

1. Metodologia

Gli approcci analitici tradizionali (Veletsos & Meek, 1974; Maravas et al., 2014) per stimare in forma speditiva la modifica del periodo strutturale indotta dalla deformabilità del sottosuolo sono difficili da applicare quando il sottosuolo è stratificato e la geometria delle fondazioni risulta irregolare. Per questi motivi Piro et al. (2020) hanno proposto una procedura, sintetizzata nel diagramma di flusso in Fig.1, basata su “parametri equivalenti” che consentono di applicare le formule analitiche semplificate

nei casi di configurazioni più complesse di sottosuolo e fondazione. La procedura è stata ottenuta dal confronto tra i risultati analitici ottenuti dagli approcci tradizionali e quelli di analisi dinamiche lineari su modelli completi sottosuolo-fondazione-struttura (SFS), assumendo configurazioni alternative del sistema di fondazione (superficiali o presenza di un piano interrato), un numero variabile di piani (due, tre o quattro) e differenti profili di sottosuolo (omogeneo o stratificato).

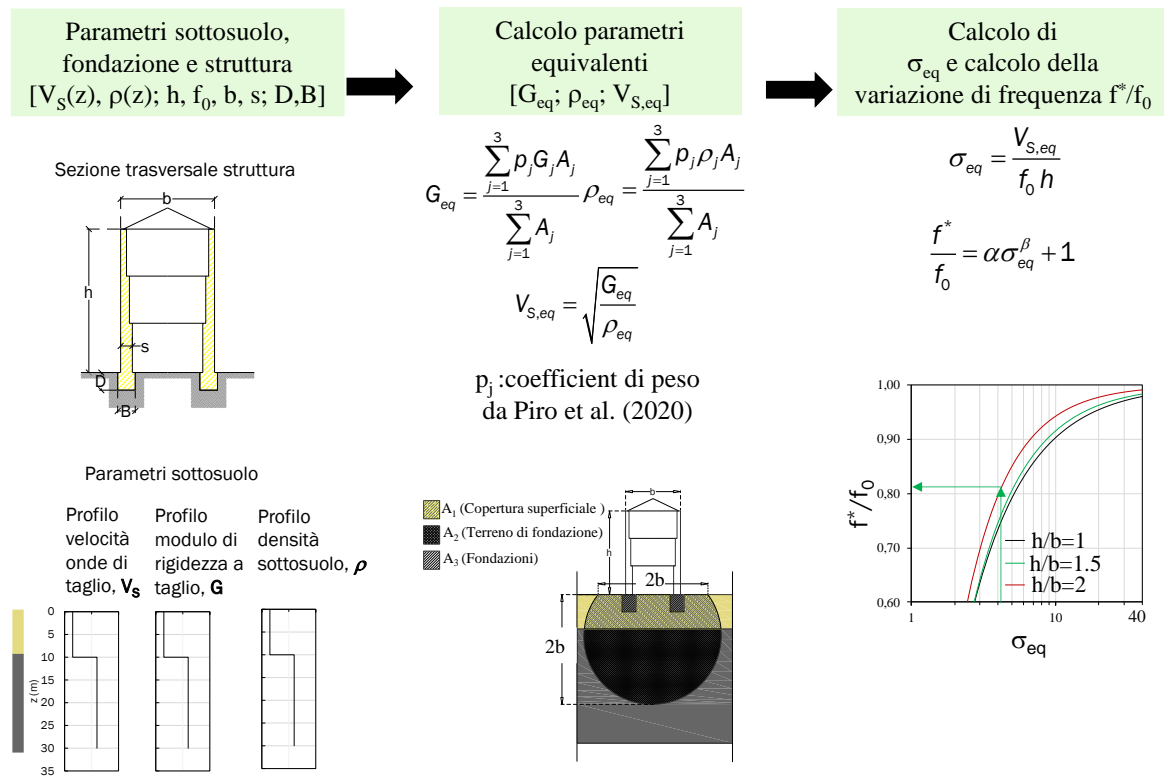


Fig.1. Diagramma di flusso della metodologia adottata nello studio

Per applicare l'approccio modificato occorre conoscere:

- l'altezza, h , la larghezza, b , e la frequenza a base fissa, f_0 , della struttura;
- l'interramento, D , e la larghezza, B , del sistema di fondazione;
- il profilo di velocità delle onde di taglio, V_s , e le proprietà meccaniche (modulo di rigidezza al taglio, G , e densità, ρ) dei materiali che ricadono nel volume significativo mobilitato dal cinemismo in fondazione, che si assume esteso per $2b$ in superficie e in profondità (indicato dalle aree A_j in Fig.1).

Al fine di considerare l'influenza dell'interramento della fondazione e del sottosuolo stratificato, sono stati ricavati dei coefficienti di peso, p_j , per calcolare i valori equivalenti, nel volume significativo, sia del modulo di rigidezza al taglio, G_{eq} , sia della densità, ρ_{eq} . Con tali valori viene ricavata la "velocità delle onde di taglio equivalente", $V_{s,eq}$ e la "rigidezza relativa sottosuolo-struttura equivalente", σ_{eq} . Infine, noto il rapporto di snellezza, h/b , del caso in esame viene stimata la variazione di frequenza f^*/f_0 (dove f^* è la frequenza del sistema sottosuolo-fondazione-struttura) come funzione di σ_{eq} attraverso l'espressione riportata in Fig.1, dove α e β sono coefficienti forniti da Piro et al. (2020) in funzione di h/b .

2. Applicazione al caso studio: Matera

La procedura descritta in precedenza è stata validata facendo riferimento ad uno studio del CNR-IMAA (Tito Scalo, Potenza) sulla città di Matera (Fig.2a). Nell'ambito del progetto CLARA (*Cloud platform and smart underground imaging for natural risk assessment - Smart Cities and Communities and Social Innovation*), Gallipoli et al. (2020) hanno eseguito 230 misure di microtremori ambientali a singola stazione (134 su terreno e 96 su strutture in muratura o in cemento armato), analizzate attraverso la tecnica del rapporto spettrale HVSr (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*).

Per questo studio sono stati scelti i 7 edifici in muratura mostrati in Fig. 2a e caratterizzati da proprietà strutturali simili a quelle considerate nello studio parametrico riportato da Piro et al. (2020) e collocati su sottosuolo deformabile.

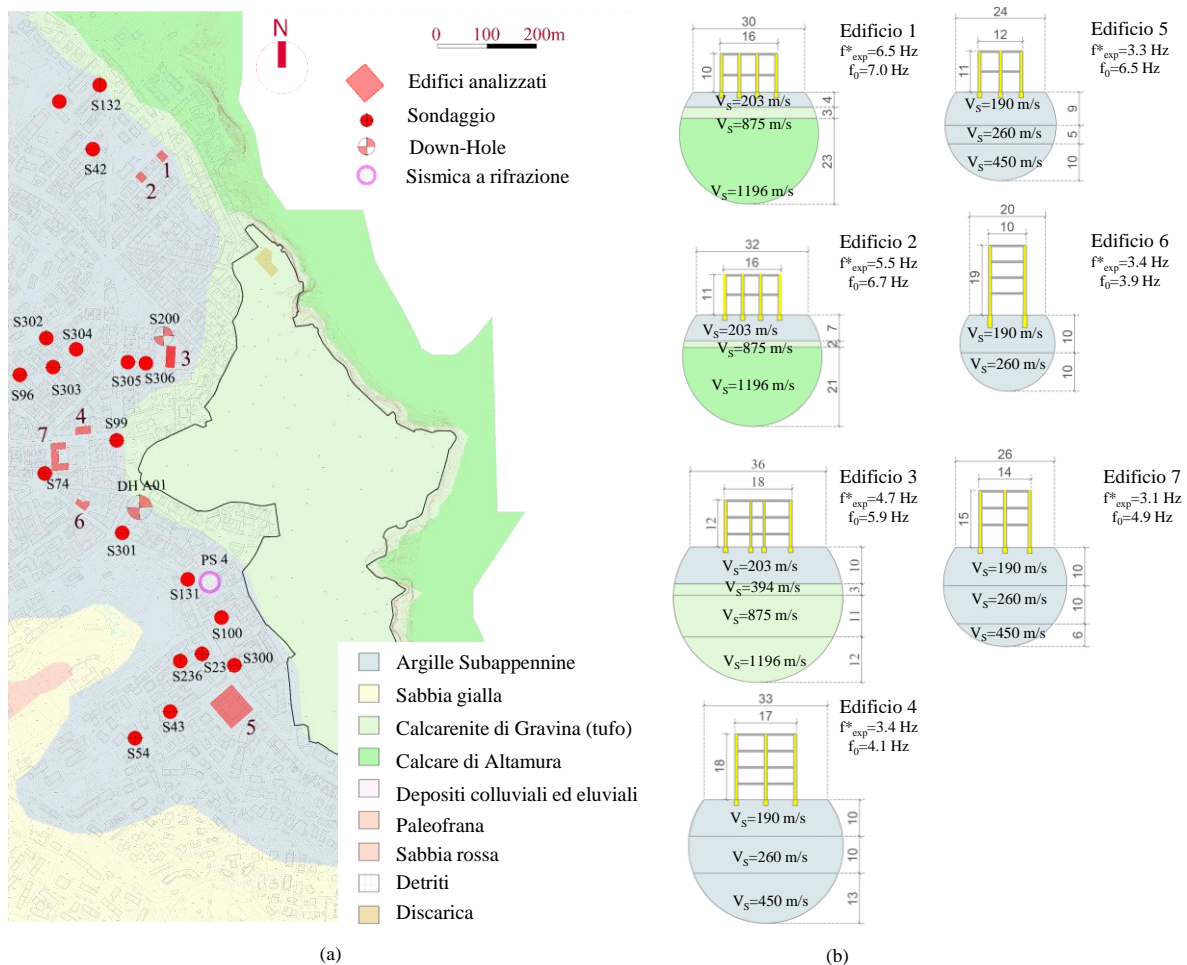


Fig.2. Matera: (a) carta geologica semplificata; (b) schemi SFS di riferimento per l'applicazione del metodo semplificato

Le principali formazioni geologiche (Fig.2a) affioranti nelle zone Nord-Ovest 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 si trova al di sotto di un deposito di argilla Subappenninica (SC) con spessori variabili da qualche metro, nella zona vicina ai Sassi, fino a 40–50 m nella zona più interna. Il sottosuolo è stato largamente investigato attraverso numerosi sondaggi, prove *down-hole* e prove sismiche a rifrazione (Gallipoli & Lupo, 2012) evidenziando come lo spessore delle argille aumenti da 7 m a 40 m, spostandosi da Est a Ovest, ovvero all'aumentare della distanza dall'affioramento delle calcareniti (Area dei Sassi). Le velocità delle onde di taglio dei differenti materiali (Tab. 1) sono state

ottenute sia da prove *down-hole* che di sismica a rifrazione, eseguite nei pressi degli edifici selezionati, mentre per la densità di ciascun materiale si è fatto riferimento a valori tipici per argille tenere (SC), rocce tenere (GC) e rocce dure (AL). Alla muratura, invece, sono state assegnate le proprietà riportate nelle NTC'18 (Tab. C.8.5.1), per la muratura in tufo con tessitura irregolare, in quanto rappresenta la tipologia muraria tipica del centro storico vicino alla zona dei “Sassi”.

	Argille subappenniniche (SC)	Calcarenite di Gravina (GC)	Calcere di Altamura (AL)	Muratura di tufo
V_s (m/s)	190-450	394-1195	945	–
ρ (kg/m ³)	1750	1950	2750	1600
G_0 (MPa)	63-354	303-3934	2456	450

Tab.1. Proprietà meccaniche dei differenti materiali.

L'altezza e la base degli edifici sono state ottenute da rilievi eseguiti da Gallipoli et al. (2020), mentre lo spessore della muratura è stato ottenuto con relazioni utilizzate nella pratica dell'arte per la progettazione degli edifici in muratura (Augenti & Parisi, 2019), che correlano il numero dei piani allo spessore della muratura. Per gli edifici a due piani è stato assunto uno spessore $s = 0.70$ m, per quelli a tre piani $s = 0.81$ m, per quelli a quattro $s = 0.93$ m e per quelli a cinque $s = 1.03$ m. La larghezza della fondazione è stata stimata aggiungendo 0.15 m a ciascun lato dei muri in elevazione, mentre la profondità del piano di posa è stata posta pari a 1.5 m per gli edifici a due e tre piani e a 2.00 per quelli a quattro o cinque piani. Il periodo a base fissa ($T_0 = 1/f_0$) è stato stimato da una correlazione con l'altezza ($T_0 = 0.0137h$) ottenuta dai rapporti spettrali misurati sugli edifici in muratura del centro urbano di Matera fondati su calcarenite (Gallipoli et al. 2020).

In Fig. 2b sono riportate le sezioni trasversali dei sette sistemi SFS analizzati, considerando la stratigrafia ottenuta dalle indagini geognostiche più prossime. Sono inoltre riportate le caratteristiche principali di ciascun edificio: altezza, h , base, b , frequenza a base fissa, f_0 e frequenza sperimentale, f_{EXP}^* , misurata lungo la sezione trasversale dell'edificio. Con riferimento agli edifici 1, 2 e 5, si può osservare, come, a parità di numero di piani, la frequenza fondamentale si riduce all'aumentare dello spessore delle argille, evidenziando l'influenza di tale aspetto sull'interazione terreno-struttura.

Dopo aver definito tutti i parametri del sistema SFS, sono stati assegnati i coefficienti di peso, p_j , confrontando i rapporti d'impedenza sismica, μ , tra la copertura superficiale e il terreno di fondazione caratterizzanti il volume significativo al di sotto degli edifici analizzati con quelli utilizzati nello studio parametrico di Piro et al. (2020) per diverse stratigrafie-tipo. Queste ultime sono state ottenute combinando le categorie di sottosuolo B, C e D secondo le NTC'18, in modo da ottenere sequenze D-B, D-C e C-B. Seguendo la procedura descritta in Fig.1 sono stati così calcolati i parametri equivalenti G_{eq} , ρ_{eq} e $V_{s,eq}$, indi σ_{eq} ed infine il corrispondente valore di f^*/f_0 .

In Fig. 3 sono riportati i confronti tra i periodi sperimentali, T_{EXP}^* , e quelli ottenuti dall'applicazione del metodo semplificato, T^* . Questi ultimi sono stati calcolati sia con il metodo proposto basato sui parametri equivalenti (simboli vuoti), sia attraverso l'approccio tradizionale (simboli pieni) basato sulla formulazione di Veletsos & Meek (1974), ovvero nel calcolo di σ (equazione in Fig. 1) è stata utilizzata come velocità delle onde di taglio quella dello strato di terreno in corrispondenza del piano di posa. Si osserva che i periodi ottenuti dalla formulazione tradizionale sono sempre maggiori rispetto ai valori sperimentali in quasi tutti i casi. Al contrario, i valori di periodo ottenuti con il metodo proposto sono molto prossimi a quelli sperimentali, evidenziando come la procedura sia promettente per stime speditive o comunque per poter identificare le situazioni in cui gli effetti dell'interazione terreno-struttura debbano essere presi in considerazione.

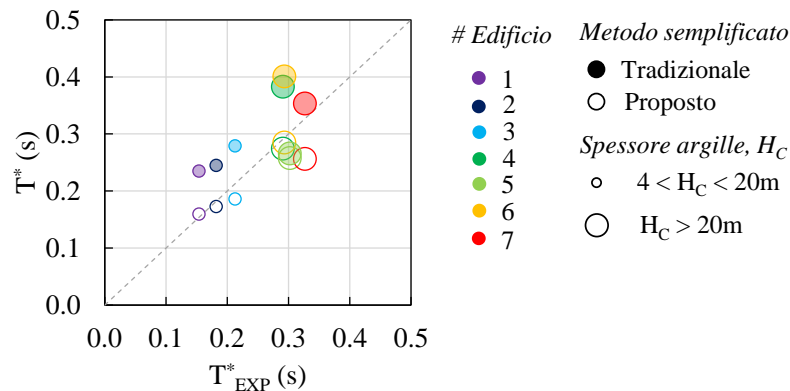


Fig.3. Confronto tra periodi sperimentali e analitici, quest'ultimi calcolati sia con l'approccio tradizionale che proposto nello studio.

3. Esempio applicativo del metodo semplificato

Di seguito è riportato un esempio applicativo della metodologia proposta all'edificio numero 4. Per quest'ultimo, infatti, è stata osservata una significativa differenza tra T_{EXP}^* e T_0 ($T_{EXP}^* = 0.29$ s e $T_0 = 0.24$ s). Come descritto nel paragrafo 1, sono stati ricavati: il profilo di velocità delle onde di taglio, V_s (Tab. 2); l'interramento e la larghezza delle fondazioni, rispettivamente $D = 2.0$ m e $B = 1.2$ m; l'altezza, la larghezza e la frequenza a base fissa della struttura, rispettivamente, $h = 18$ m, $b = 17$ m e $f_0 = 4.1$ Hz; ed infine il modulo di rigidezza al taglio, G , e la densità, ρ (Tab. 2), dei materiali ricadenti nel volume significativo che si estende per una profondità pari a 34 m.

j -sima parte del sistema SFS	V_s (m/s)	G (MPa)	ρ (kg/m ³)	A (m ²)
Strato (1)	190	63	1750	370
Strato (2a)	260	118	1750	206
Strato (2b)	450	354	1750	586
Fondazione (3)	–	450	1600	7.2

Tab.2 Proprietà meccaniche e aree degli elementi del sistema SFS ricadenti nel volume significativo.

*I numeri 1, 2 (sia a che b) e 3 si riferiscono, rispettivamente, allo strato superiore, a quello inferiore e alla muratura in fondazione in accordo al sistema SFS riportato in Piro et al. (2020).

La Fig. 2b mostra che il volume significativo intercetta tre strati della formazione argillosa caratterizzati da V_s crescenti. Per assegnare i coefficienti di peso, p_j , la procedura richiede di confrontare il rapporto d'impedenza tra la copertura superficiale e il terreno di fondazione caratterizzanti il volume significativo con i corrispondenti valori relativi alle stratigrafie-tipo considerate nello studio parametrico di Piro et al. (2020). In questo caso, si è ipotizzato di assumere come copertura superficiale (Fig.1) lo strato argilloso con V_s pari a 190 m/s entro cui si trovano le fondazioni, mentre come terreno di fondazione (Fig.1) è stato considerato un unico materiale equivalente ai due strati con V_s pari a 260 m/s e 450 m/s, assegnandovi una velocità media pesata rispetto agli spessori pari a 367 m/s.

Il rapporto d'impedenza μ_{12} è stato calcolato attraverso la seguente espressione:

$$\mu_{12} = \frac{(V\rho)_1}{(V\rho)_2} = \frac{(190\text{m/s} \times 1750\text{kg/m}^3)}{(367\text{m/s} \times 1750\text{kg/m}^3)} = 0.52 \quad (1)$$

dove i pedici 1 e 2 indicano, rispettivamente, la copertura superficiale e il terreno di fondazione sottostante. In funzione di tale rapporto d'impedenza, sono stati scelti i coefficienti di peso p_1 , p_2 e p_3

corrispondenti alla configurazione di sottosuolo D-C dello studio parametrico di Piro et al. (2020), ossia $p_1 = 0$, $p_2 = 0.03$ e $p_3 = 1.00$.

Le proprietà equivalenti, in termini di modulo di rigidezza al taglio (G_{eq}), densità (ρ_{eq}) e velocità delle onde di taglio ($V_{s,eq}$) sono state calcolate con le formule riportate in Fig. 1:

$$G_{eq} = \frac{(63\text{MPa} \times 370\text{m}^2 \times 0.00) + (118\text{MPa} \times 206\text{m}^2 \times 0.03) + (354\text{MPa} \times 586\text{m}^2 \times 0.03) + (450\text{MPa} \times 7.2\text{m}^2 \times 1.00)}{(370 + 206 + 586 + 7.2)\text{m}^2} = 8.7\text{MPa} \quad (2)$$

$$\rho_{eq} = \frac{(1750\text{kg/m}^3 \times 370\text{m}^2 \times 0.00) + (1750\text{kg/m}^3 \times 206\text{m}^2 \times 0.03) + (1750\text{kg/m}^3 \times 586\text{m}^2 \times 0.03) + (1600\text{kg/m}^3 \times 7.2\text{m}^2 \times 1.00)}{(370 + 206 + 586 + 7.2)\text{m}^2} = 45.4\text{ kg/m}^3 \quad (3)$$

$$V_{s,eq} = \sqrt{\frac{8.7\text{MPa}}{45.4\text{ kg/m}^3}} = 438\text{ m/s} \quad (4)$$

Successivamente, sono stati calcolati σ_{eq} ed il corrispondente valore di f^*/f_0 nel seguente modo:

$$\sigma_{eq} = \frac{438\text{m/s}}{18\text{m} \times 4.1\text{Hz}} = 6.00 \quad (5)$$

$$\frac{f^*}{f_0} = -1.37 \times 6.00^{-1.38} + 1 = 0.88 \quad (6)$$

ed infine è stato ottenuto il valore di f^* per l'edificio numero 4:

$$f^* = 3.6\text{Hz} \quad (7)$$

molto prossimo al valore di frequenza misurato ossia: $f_{EXP}^* = 3.4\text{Hz}$.

Ringraziamenti

Questo studio è stato realizzato all'interno del progetto ReLUIS-DPC 2019-2021 finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile, all'interno del Task 16.3 'Soil-Foundation-Structure Interaction'. Gli autori, inoltre, ringraziano il geologo Filippo Maurizio Cristallo per la sua disponibilità e il supporto.

Bibliografia

- Augenti N. & Parisi F.; 2019: *Teoria e tecnica delle strutture in muratura*. Hoepli Milan, Italy [in Italian]
- Gallipoli, M.R., & Lupo, M.; 2012: Caratterizzazione dei terreni e risposta sismica locale dell'area urbana di Matera. Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici Studi teorici ed applicazioni professionali a cura di Marco Mucciarelli, ARACNE editrice S.r.l. ISBN 978-88-548-4495-7. ARACNE editrice S.r.l., pp. 323-342.
- Gallipoli M.R., Calamita G., Tragni N., Pisapia D., Lupo M., Mucciarelli M., Stabile T.A., Perrone A., Amato L., Izzi F., La Scaleia G., Maio D., Salvia V.; 2020: Evaluation of soil-building resonance effect in the urban area of the city of Matera (Italy). *Engineering Geology* 272, July 2020, 105645. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105645>
- Maravas A, Mylonakis G, Karabalis DL.; 2014: Simplified discrete systems for dynamic analysis of structures on footings and piles. *Soil Dynamic Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2014.01.016>
- NTC; 2018: Norme Tecniche per le Costruzioni. DM 17/1/2018, Italian Ministry of Infrastructure and Transportation, G.U. n. 42, 20 February 2018, Rome, Italy (in Italian).
- 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>
- Veletsos A. & Meek J.W.; 1974: Dynamic behavior of building-foundation systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 3:121-138