

VERIFICHE A LIQUEFAZIONE MEDIANTE L'UTILIZZO DI SEGNALI SIMULATI

Francesco Gargiulo

Università degli Studi di Napoli Federico II
francesco.gargiulo6@unina.it

Rocco Ceres

Università degli Studi di Napoli Federico II
r.ceres@studenti.unina.it

Lucia Mele

Università degli Studi di Napoli Federico II
lucia.mele@unina.it

Giovanni Forte

Università degli Studi di Napoli Federico II
giovanni.forte@unina.it

Anna d'Onofrio

Università degli Studi di Napoli Federico II
anna.donofrio@unina.it

Francesco Silvestri

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

Sommario

Il presente lavoro è finalizzato alla valutazione della suscettibilità a liquefazione di un'area sita nella zona costiera del comune di Casamicciola Terme, a nord dell'isola di Ischia, nel Golfo di Napoli. L'isola è stata storicamente interessata da terremoti vulcano-tettonici che, anche se caratterizzati da moderati livelli di magnitudo, hanno causato danni significativi e, in alcuni casi, perdite di vite umane. L'area costiera a nord dell'isola è caratterizzata da depositi piroclastici sciolti sotto falda e, per questo, suscettibili al fenomeno della liquefazione. Al fine di caratterizzare l'azione sismica da utilizzare nelle verifiche, data la carenza di registrazioni, si è ricorso alla simulazione dei segnali sismici utilizzando il software EXSIM. La sorgente sismogenetica utilizzata per la simulazione dei segnali è quella proposta da De Novellis et al. (2018), responsabile dell'evento verificatosi il 21 Agosto 2017, nonché dei principali terremoti storici del 1881 e 1883. Le incertezze nella simulazione degli input, sono state investigate variando i principali parametri che caratterizzano la sorgente, ovvero magnitudo momento e stress drop. Infine, le verifiche a liquefazione nel sito di interesse sono state effettuate sia con metodi semi-empirici basati sui risultati di prove penetrometriche dinamiche, sia a partire dai risultati di analisi dinamiche semplificate. I risultati di questo lavoro mostrano come il fenomeno si inneschi anche per valori moderati di magnitudo e accelerazione di picco.

1. Introduzione

La sismicità delle aree vulcaniche attive è in genere caratterizzata da terremoti di magnitudo medio-bassa. Tuttavia, anche eventi vulcano-tettonici con intensità moderata ($4 < M_w < 5$) possono generare accelerazioni elevate ed a loro volta danni e vittime soprattutto a causa della loro scarsa profondità ipocentrale (Convertito & Zollo, 2011). Un esempio può essere ritrovato nel terremoto del 21 Agosto 2017 che ha colpito duramente

l'area costiera di Casamicciola Terme, nell'Isola di Ischia. L'assetto geologico dell'isola è piuttosto complesso e costituito da materiale vulcanico lapideo e successioni piroclastiche sia in posto che rimaneggiate. Nelle aree prospicienti la costa i terreni di copertura sono granulari ed in condizioni sature con falda sub-affiorante, il che rende tali aree potenzialmente suscettibili a fenomeni di liquefazione. In questo studio, si sono condotte verifiche a liquefazione sia con metodi semi-empirici che dinamici semplificati per un sito ubicato nel Comune di Casamicciola (Figura 1). Particolare attenzione è stata rivolta alla valutazione del potenziale sismico capace di innescare il processo di liquefazione.

2. Modellazione sorgente sismica

In Figura 1 è raffigurata l'area di studio e la sorgente sismica ricavata per il terremoto occorso sull'isola il 21 Agosto 2017 da De Novellis et al. (2018), attraverso uno studio geofisico multiparametrico. Si tratta di una faglia normale con andamento E-W e immersione a sud. I parametri completi sono riportati in Tabella 1.

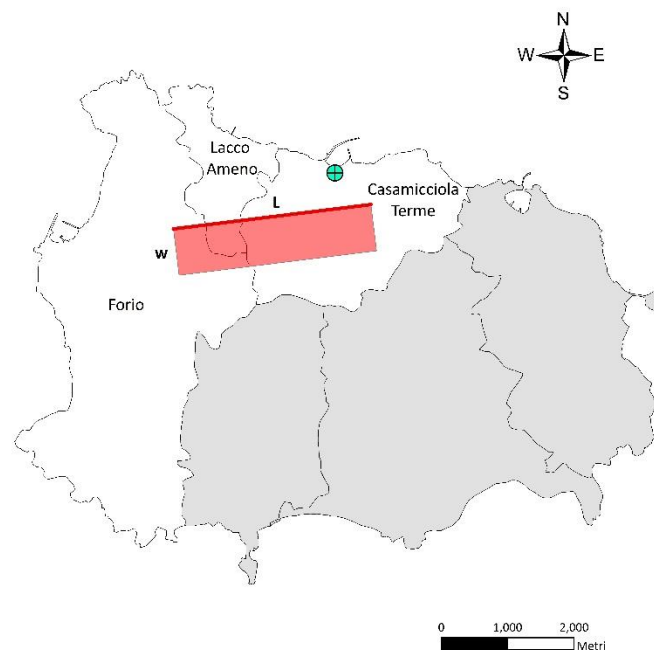


Fig 1. Localizzazione della sorgente in rosso e sito dove sono state effettuate le verifiche

Tabella 1. Parametri della sorgente in Figura 1

| L | w | profondità | strike | dip | rake | tipo di meccanismo |
|------|------|------------|--------|-----|------|--------------------|
| [m] | [m] | [m] | [°] | [°] | [°] | [-] |
| 3000 | 1800 | 0 | 83 | 67 | -85 | normale |

La modellazione della sorgente (Figura 1) utilizzata per simulare accelerogrammi sintetici è stata effettuata con il software EXSIM (Assatourians & Atkinson 2012; Atkinson & Assatourians, 2014). Si tratta di un algoritmo di simulazione stocastica open-source scritto in FORTRAN, che genera serie temporali di accelerazioni. Il generico piano di faglia, avente una dimensione specifica in base al suo momento sismico, è suddiviso in una serie di sotto-sorgenti, ciascuna delle quali è trattata come una sorgente puntiforme. Le serie temporali delle sorgenti sono modellate utilizzando il modello stocastico a sorgenti puntiformi sviluppato da Boore (1983, 2003) e l'accelerogramma finale è dato dalla convoluzione di sorgente, percorso e sito:

$$a(t)=[sorgente \times percorso \times sito](t) \quad (1)$$

In tutte le simulazioni è stato utilizzato un modello crostale (Nardone et al. 2020) caratterizzato da un valore medio di velocità delle onde S di 2027 m/s, densità di 2500 kg/m³, e un modello di attenuazione anelastica dipendente dalla frequenza $Q(f) = 51f^{0.6}$, dove Q rappresenta il fattore di qualità ed f la frequenza. Inoltre, si è considerato uno spreading geometrico inversamente proporzionale al quadrato della distanza, $1/R^2$ (dove R è la distanza minima del sito dalla faglia). Il piano di faglia è stato ipotizzato come rettangolare ed è stato suddiviso in un numero appropriato di sotto-faglie della dimensione 0.21×0.22 km², che sono state modellate come sorgenti puntiformi caratterizzate da uno spettro ω^{-2} . Lo stress-drop σ - differenza tra lo sforzo iniziale ed il livello di attrito statico a frattura avvenuta - è stato stimato con la relazione proposta da Kanamori & Anderson (1975):

$$\sigma = \frac{8}{3\pi} \cdot \frac{M_0}{w^2 L} \quad (2)$$

Dove L e w sono le dimensioni della sorgente (Figura 1 e Tabella 1) ed M_0 è il momento sismico, legato alla magnitudo dalla seguente legge di scala:

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.3 \quad (3)$$

Infine, il numero di Mach ($\beta = V_{rup}/V_s$) è stato posto pari a 0.7 come ci aspetta per terremoti di moderata intensità in aree vulcaniche (Convertito et al. 2012).

Tabella 2. Modelli utilizzati per la simulazione di accelerogrammi sintetici

| modello | M_0 [Nm] | M_w | σ [bar] | $a_{bedrock}$ [g] |
|---------|------------|-------|----------------|-------------------|
| 1 | 1.1E+15 | 4.0 | 0.98 | 0.05 |
| 2 | 1.6E+15 | 4.1 | 1.39 | 0.05 |
| 3 | 2.2E+15 | 4.2 | 1.96 | 0.12 |
| 4 | 3.2E+15 | 4.3 | 2.76 | 0.15 |
| 5 | 4.5E+15 | 4.4 | 3.90 | 0.18 |
| 6 | 6.3E+15 | 4.5 | 5.50 | 0.26 |

Essendo l'area di studio pianeggiante non è stato applicato un coefficiente di amplificazione topografica, mentre gli effetti di sito sono stati tenuti in conto in maniera semplificata attraverso la valutazione del coefficiente di amplificazione stratigrafica. Quest'ultimo, nelle analisi con metodi semi-empirici è stato definito in base alla classe di sottosuolo. Per le verifiche avanzate gli effetti di sito sono stati invece valutati attraverso analisi di risposta sismica locale.

3. Verifiche a liquefazione

Le verifiche sono state effettuate nel sito localizzato a Piazza delle Scuole nel comune di Casamiciola Terme (Figura 1). In questo sito, nell'ambito del progetto MASLIDE, finanziato dall'Università di Napoli Federico II, sono state effettuate prove penetrometriche, prove downhole e sono stati prelevati alcuni campioni indisturbati sui quali sono state eseguite prove cicliche in laboratorio (Figura 2). In Figura 2 è riportata una colonna stratigrafica rappresentativa del modello geologico dell'area di Casamiciola. Nei primi metri si ritrovano dei depositi piroclastici di natura prevalentemente sabbiosa, che passano con la profondità a materiale cineritico più fino. Questi poggiano su un continuo livello di argille di origine marina spesso circa 10 m, al di

sotto del quale si ritrovano prodotti vulcanici grossolani, quali scorie e brecce. Il passaggio a questo materiale più scoriaceo trova riscontro anche in un incremento dei valori di velocità di propagazione delle onde di taglio che passano da 360 a 512 m/s.

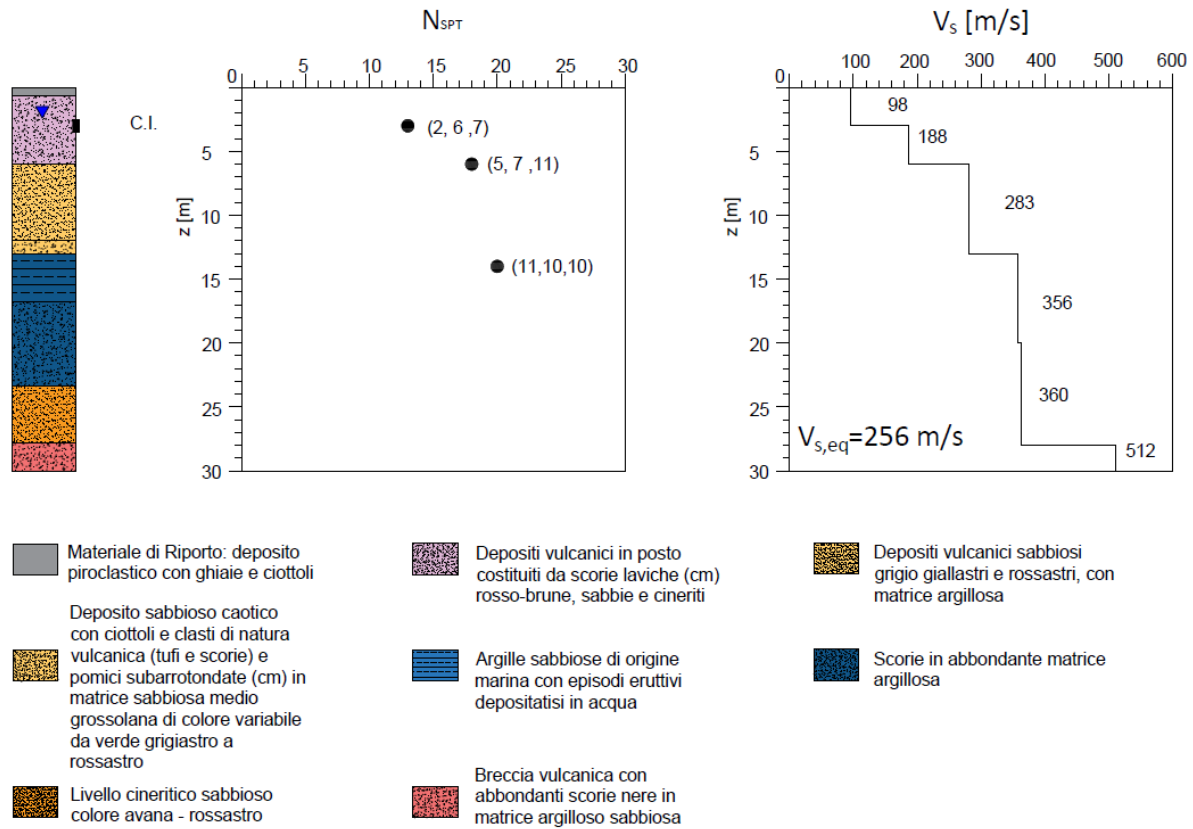


Figura 2. Profilo stratigrafico con descrizione delle formazioni e numero di colpi dell'SPT fino alla profondità di 20 m

3.1 Analisi semplificate

Le analisi semplificate sono state effettuate sui depositi dei primi 15 m mediante i metodi semi-empirici che utilizzano le correlazioni proposte da Idriss & Boulanger (2014). Sono stati utilizzati i risultati di prove SPT alle profondità rispettivamente di 3 m, 6 m e 14 m. Il fattore di sicurezza (*FS*) per le verifiche a liquefazione è definito come il rapporto tra capacità stimata dai valori di *N_{SPT}* e domanda (Eq. 4). Tipicamente, sia la capacità che la domanda sismica sono valutate in termini di rapporti di sollecitazione ciclica (*CRR* - *Cyclic Resistance Ratio* e *CSR* - *Cyclic Stress Ratio*).

$$CSR = 0.65 \cdot \frac{\tau_{max}}{\sigma_v'} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_v'}{\sigma_v'} \cdot r_d \quad (4)$$

in cui il prodotto $(a_{max}/g)\sigma_v'$ rappresenta lo sforzo tangenziale massimo alla generica profondità *z* nell'ipotesi di colonna di terreno rigido, ricondotto a una tensione tangenziale equivalente attraverso il coefficiente 0.65 che porta in conto la variabilità nel tempo della sollecitazione ciclica. La deformabilità del terreno è invece tenuta in considerazione attraverso il coefficiente *r_d* che è un fattore di riduzione dello sforzo di taglio. Si riportano in Figura 3 i risultati in termini di confronto *CSR-CRR* e di profilo di *FS* con la profondità, nei quali la verifica risulta essere sempre soddisfatta.

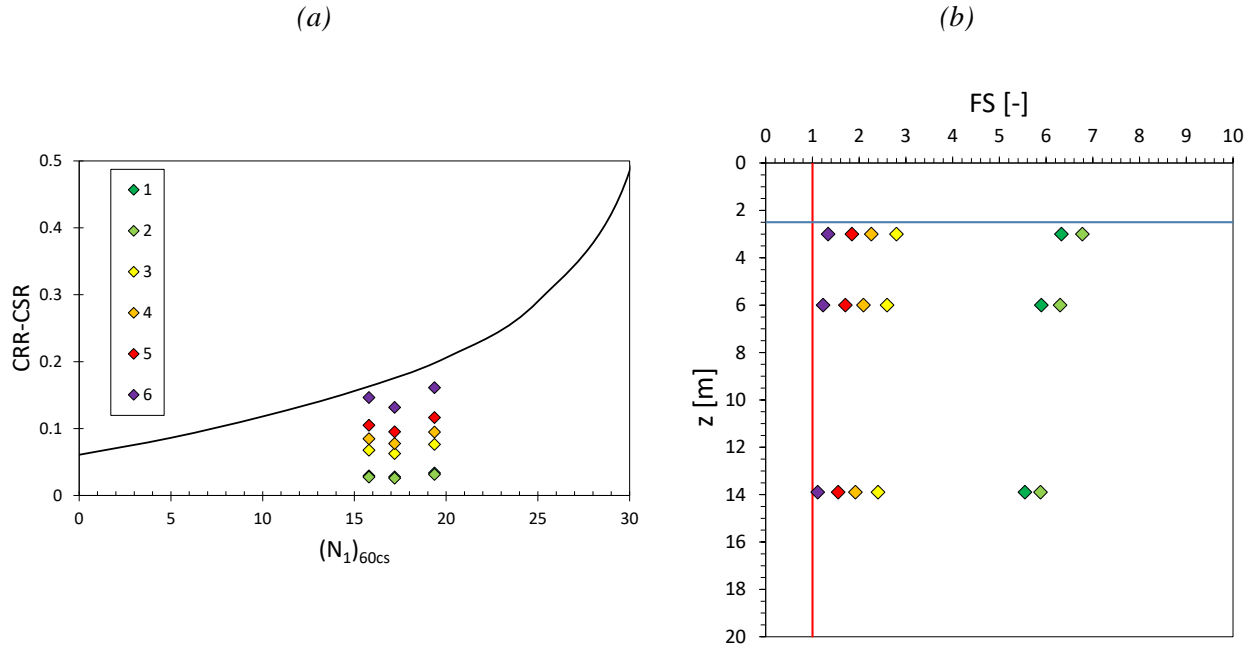


Figura 3. Abaco di liquefazione per SPT (a) e profilo del rapporto CRR/CSR (b)

3.1 Analisi dinamica semplificata

Gli accelerogrammi al bedrock ottenuti dalle simulazioni sono stati propagati con il software SCOSSA (Tropeano et al. 2019) che consente di effettuare analisi 1D non lineari nel dominio del tempo. I risultati dell'analisi dinamica in tensioni totali sono stati utilizzati per valutare il potenziale di liquefazione, confrontando il valore di CSR, ottenuto facendo propagare gli accelerogrammi simulati alle profondità di interesse (3 m) con la resistenza massima del terreno, CRR_{lab} , desunta dalla curva di resistenza ciclica ricavata attraverso prove di taglio semplice ciclico (CSS). La curva di resistenza ciclica è stata ricavata da provini indisturbati relativi ad un campione prelevato alla profondità di 2.5-3 m (Figura 2). I provini sono stati consolidati ad una tensione verticale di 50 kPa e successivamente sottoposti a sollecitazioni cicliche sinusoidali. Il CRR_{lab} è stato valutato in corrispondenza di un numero di cicli equivalenti (N_{eq}) che può essere valutato utilizzando relazioni fornite dalla letteratura che correlano N_{eq} ai parametri sintetici che rappresentano le registrazioni dei terremoti. In questo lavoro si è fatto riferimento alla formula di Biondi et al. (2012).

$$\ln N_{eq} = \alpha + \beta \cdot \ln a_{max} + \gamma \cdot \ln I_a + \delta \cdot \ln v_0 + \varepsilon \cdot \ln D_{5-95} \quad (5)$$

Dove a_{max} è l'accelerazione massima, I_a è l'intensità di Arias, v_0 è il numero di passaggi per lo zero e D_{5-95} è la durata significativa. Per quanto riguarda il CSR, questo è stato calcolato considerando una sollecitazione ciclica equivalente con un'ampiezza di $\tau_{eq} = 0.65 \tau_{max}$. I risultati vengono mostrati in Figura 4 nel piano N vs CRR-CSR. In questo secondo approccio, i risultati mostrano che già a partire da valori di M_w 4.2 la verifica non risulta essere soddisfatta.

4. Conclusioni

Il presente lavoro mira ad individuare l'influenza dei parametri di sorgente nella simulazione di input sismici per la valutazione del potenziale di liquefazione. Dai risultati delle analisi svolte utilizzando i metodi semi-empirici si evince come in nessun caso si osserva il fenomeno di liquefazione. Contrariamente a quanto riportato in letteratura, nel caso in esame, gli approcci avanzati hanno restituito risultati più conservativi, dove già a partire da valori di M_w pari a 4.2 la verifica non risulta essere soddisfatta. Per tale motivo, negli ulteriori sviluppi futuri di questo lavoro saranno approfondite le indagini di laboratorio finalizzate alla caratterizzazione delle curve di resistenza ciclica di questi materiali, notoriamente eterogenei ed anisotropi, al fine di effettuare analisi dinamiche avanzate in tensioni efficaci.

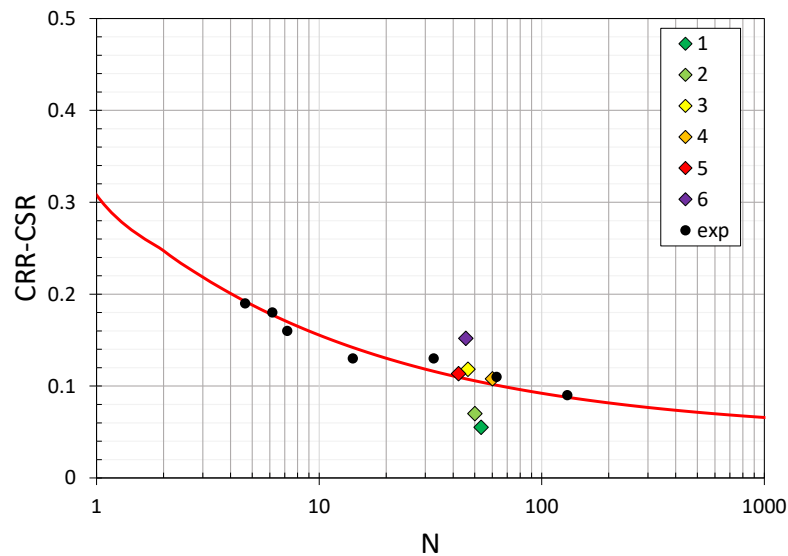


Figura 4. Risultati di analisi dinamiche semplificate nel piano N vs $CRR-CSR$ a 3 metri di profondità

Bibliografia

- Andrus R. D., Stokoe K. H. (2000). Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 126. 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:11(1015).
- Assatourians K., Atkinson G. (2012). EXSIM12: A Stochastic Finite-Fault Computer Program in FORTRAN. <http://www.seismotoolbox.ca>.
- Atkinson G., Assatourians K. (2014). Implementation and Validation of EXSIM (A Stochastic Finite-Fault Ground-Motion Simulation Algorithm) on the SCEC Broadband Platform. *Seismological Research Letters*. 86. 48-60. 10.1785/0220140097.
- Biondi G., Cascone E., Di Filippo G. (2012). Affidabilità di alcune correlazioni empiriche per la stima del numero di cicli di carico equivalente. *Associazione Geotecnica Italiana*. 2: 11-41.
- Boore, D. M. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 73, 1865–1894.
- Boore, D.M. (2003). Simulation of ground motion using the stochastic method. *Pure and Applied Geophysics*. 160, 635-675.
- Boulanger R. W., Idriss I. M. (2014). CPT and SPT based liquefaction triggering procedures. *Center for geotechnical modeling*, Davis (California), 1-134
- Convertito V., Zollo A. (2011). Assessment of pre-crisis and syn-crisis seismic hazard at Campi Flegrei and Mt. Vesuvius volcanoes, Campania, southern Italy. *Bulletin of Volcanology*. 73:767–783. 10.1007/s00445-011-0455-2.
- Convertito V., Caccavale M., De Matteis R., Emolo A., Wald D.J., Zollo A. (2012). Fault extent estimation for near-real time ground-shaking map computation purposes. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 102:578–586
- De Novellis V., Carlino S., Tramelli A., Pepe, S. et al. (2018). The 21 August 2017 Ischia (Italy) Earthquake Source Model Inferred From Seismological, GPS, and DInSAR Measurements. *Geophysical Research Letters*. 10.1002/2017GL076336.
- Kanamori, H., Anderson, D. (1975). Theoretical Basis of Some Empirical Relations in Seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 65. 1073-1095.
- Nardone L., Manzo R., Galluzzo D., Pilz M. et al. (2020). Shear wave velocity and attenuation structure of Ischia island using broad band seismic noise records. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 401. 106970. 10.1016/j.jvolgeores.2020.106970.
- Tropeano G., Chiaradonna A., d'Onofrio A., Silvestri F. (2019). A numerical model for non-linear coupled analysis of the seismic response of liquefiable soils. *Computers and Geotechnics*, 105, 21.