

## RISPOSTA NON DRENATA DI TERRENI PIROCLASTICI SOTTO SOLLECITAZIONI MONOTONE E CICLICHE

M. de Cristofaro

*Dipartimento di Ingegneria, Università della Campania “Luigi Vanvitelli”  
martina.decrisofaro@unicampania.it*

E. Damiano

*Dipartimento di Ingegneria, Università della Campania “Luigi Vanvitelli”  
emilia.damiano@unicampania.it*

L. Olivares

*Dipartimento di Ingegneria, Università della Campania “Luigi Vanvitelli”  
lucio.olivares@unicampania.it*

R.P. Orense

*Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, University of Auckland  
r.orense@auckland.ac.nz*

M.S. Asadi

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Shahid Bahonar University of Kerman  
asadi.sadeq@gmail.com*

N. Netti

*Dipartimento di Economia, Management e Istituzioni, Università di Napoli “Federico II”  
nadia.netti@unina.it*

### Sommario

La presenza di terreni piroclastici influenza significativamente la vulnerabilità del territorio nei confronti di eventi estremi di carattere sia idrogeologico che sismico. I depositi piroclastici hanno generalmente una struttura metastabile e collassabile, che può portare alla loro liquefazione sotto carico monotono, ciclico e dinamico. La loro struttura potrebbe essere in parte attribuita alla natura delle particelle piroclastiche ed al meccanismo di deposizione che conferiscono alle particelle particolari caratteristiche di leggerezza, fragilità e porosità interna. Nella definizione della risposta di tali depositi, particolare attenzione è stata dedicata all'analisi dei meccanismi di accumulo delle sovrappressioni neutre in condizioni non drenate, finalizzata alla definizione della suscettibilità alla liquefazione. La sperimentazione condotta ha indicato la possibilità di inquadrare la risposta dei terreni piroclastici all'interno della teoria dello stato stazionario. Il confronto tra i risultati ottenuti dalle prove triassiali non drenate monotone e cicliche eseguite su diversi terreni piroclastici, ha permesso di spiegare il meccanismo di accumulo delle sovrappressioni neutre in condizioni non drenate utilizzando il parametro di stato  $\Psi$ . Tale parametro sembra essere utile anche per confrontare i risultati ottenuti con quelli ottenuti su sabbie ordinarie. Il parametro di stato  $\Psi$  ha un chiaro significato fisico e può facilmente essere implementato in un modello più affidabile di accumulo di sovrappressione neutra non drenata e di valutazione della liquefazione.

### 1. Introduzione

La liquefazione di depositi sabbiosi saturi ha causato ingenti danni alle strutture e alle infrastrutture nei più recenti eventi sismici. Pertanto, vi è una crescente necessità di disporre di metodi affidabili per stimare gli effetti indotti dalla liquefazione. Dal 1970, diversi lavori si sono concentrati sulla risposta non drenata e sul comportamento sotto sollecitazioni cicliche di terreni saturi limosi / sabbiosi (ad esempio, Castro 1969; Ishihara et al. 1975; Sladen et al. 1985; Yamamuro & Lade 1997; Dobry 1995; Youd & Idriss 2001). Di conseguenza, gli aspetti principali della liquefazione delle sabbie ordinarie sono ora ben compresi e sono disponibili procedure semi-empiriche per valutare la loro resistenza alla liquefazione (Ishihara 1993; Idriss & Boulanger 2008). Il comportamento dei terreni piroclastici sotto sollecitazioni cicliche rimane, invece, ancora poco compreso e alcuni concetti sono stati sviluppati solo

a livello qualitativo (Silvestri et al. 2014; Licata, 2015).

Ad esempio, alcuni autori hanno focalizzato l'attenzione sulla risposta non drenata e sul meccanismo di accumulo delle sovrappressioni neutre dei terreni piroclastici evidenziando le peculiarità di questi terreni e le differenze che emergono nei risultati rispetto alle sabbie ordinarie (con particelle non fragili). Queste differenze si traducono in diverse caratteristiche di deformabilità dei materiali piroclastici, qualunque sia il livello di deformazione, e quindi in un diverso meccanismo di accumulo non drenato delle sovrappressioni neutre, nonché in una diversa resistenza alla liquefazione.

Asadi et al. 2020, concentrandosi sul modulo di rigidità a taglio a piccole deformazioni ( $G_{max}$ ) delle sabbie pomicee naturali fragili ottenute con bender element in prove triassiali, illustrano che il  $G_{max}$  delle sabbie pomicee è considerevolmente inferiore a quello della sabbia di Toyoura (con particelle non fragili) a parità di densità relativa.

Molti ricercatori hanno sviluppato modelli costitutivi all'interno della teoria dello stato critico che corrispondono alla liquefazione statica e ciclica (ad esempio, Bobei et al. 2009; Rahman et al. 2014, 2019). Sebbene i modelli mostrino alcune limitazioni quando applicati alla simulazione dei fenomeni di liquefazione, esplicitando il legame tra instabilità non drenata statica e ciclica permettono di comprendere la relazione tra fenomeni di liquefazione o di mobilità ciclica in funzione dei parametri di stato.

Approcci più semplificati, ma probabilmente migliori come strumenti predittivi, sono stati formulati di recente, compresi modelli di liquefazione come quello di Chiaradonna et al. 2016. Il modello di previsione semplificato è stato proposto come relazione polinomiale tra il rapporto di sovrappressione neutra,  $r_{us}$ , e il danno normalizzato,  $k/k_L$  (cioè il rapporto tra il danno e quello valutato quando si verifica la liquefazione) in cui i parametri del modello sono essenzialmente parametri di adattamento alla curva. Gli autori, utilizzando i dati disponibili in letteratura per diversi tipi di terreni, hanno dimostrato che la relazione tra parametri del modello e densità relativa  $D_r$ , frazione argillosa  $CF$ , resistenza ciclica  $CSR$ , e pressione di confinamento efficace  $\sigma'_0$ , non sono apprezzabili e non sufficienti a catturare la risposta dei terreni granulari; quindi, è necessario considerare altri parametri che incorporino proprietà di indice e di stato che, se utilizzate per normalizzare la risposta di diversi tipi di sabbie, possano rendere i risultati comparabili anche se il terreno ha particelle di diversa natura.

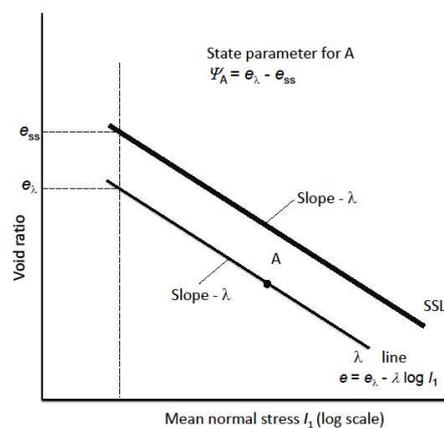


Fig 1. Definizione del parametro di stato  $\psi$  (Been & Jefferies 1985).

Il confronto tra i risultati ottenuti su diversi terreni piroclastici in test triassiali monotoni non drenati, ha mostrato la possibilità di descrivere la risposta del terreno e la suscettibilità alla liquefazione statica utilizzando parametri di stato (Olivares & Picarelli 2001; Olivares et al. 2019) e utilizzando il concetto di stato stazionario (Picarelli et al. 2020). Olivares et al. 2003 e Lampitiello 2004 hanno mostrato la

possibilità di indagare la risposta non drenata utilizzando come parametro di stato,  $\psi$  (Been & Jefferies 1985).

Nell'ambito del concetto di stato stazionario, l'instabilità non drenata o la liquefazione statica delle sabbie può essere prevista attraverso semplici test triassiali non drenati che si riferiscono al parametro di stato iniziale  $\psi$ , che rappresenta la differenza tra gli indici dei pori, iniziale e critico, sulla linea di stato stazionario (*SSL*), per lo stesso valore di tensione efficace media effettiva  $p'$  ( $\psi = e_A - e_{SS}$ ).

Il comportamento non drenato del terreno è instabile (liquefazione) per  $\psi > 0$  e stabile (assenza di liquefazione) per  $\psi < 0$ ; è intermedio quando  $\psi$  è vicino allo zero.

## 2. Programma sperimentale

### 2.1 Materiale utilizzato

I terreni investigati sono stati prelevati da tre differenti siti di natura piroclastica della Regione Campania presenti su pendii ad elevata pendenza ma caratterizzati da un differente processo di deposizione: Cervinara, situato a nord-est di Napoli, dove è presente un deposito da caduta; il colle dei Camaldoli, il rilievo più alto presente a nord della città di Napoli, dove è presente un deposito da flusso e Agnano, collocato all'interno dei centri eruttivi dei Campi Flegrei dove è presente un deposito da surge. Per evidenziare il ruolo della fragilità delle particelle piroclastiche sulla liquefazione, una parte significativa della sperimentazione è stata condotta su provini ricostituiti del terreno piroclastico di Rangiriri (Nuova Zelanda).

Le proprietà dei terreni investigati sono riassunte nella Tabella 1 dove  $D_{max}$  è il diametro massimo delle particelle,  $G_s$  è il peso specifico e  $n$  è la porosità.

Tabella 1. Caratteristiche fisiche dei terreni investigati.

Sito	$D_{max}$ (mm)	$G_s$	$n$ (%)
Cervinara	8	2.58	70
Camaldoli	6	2.49	54
Agnano	10	2.55	45/51
Rangiriri	1	2.54	60

Come mostrato dalle curve granulometriche illustrate in Fig. 2, tutti i terreni piroclastici selezionati sono essenzialmente sabbie limose con un contenuto di fine non trascurabile. Queste curve granulometriche ricadono all'interno dei fusi granulometrici per terreni suscettibili a liquefazione statica e ciclica (Hunter e Fell, 2003).

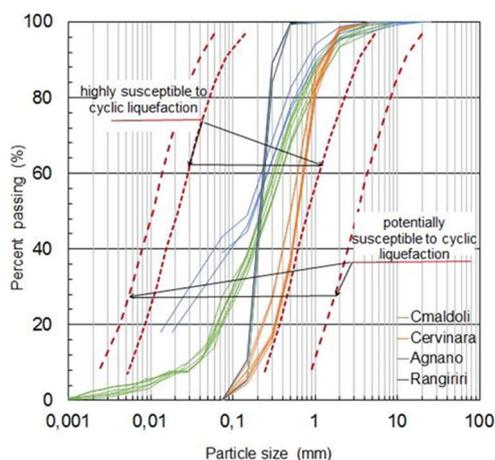


Fig 2. Curve granulometriche dei campioni usati (Hunter & Fell 2003).

## 2.2 Preparazione del campione

La tecnica di ricostituzione adottata, coerente con il metodo descritto da Ladd (1974), è risultata la più adatta alla riproduzione di provini con porosità così elevate come i campioni naturali del suolo piroclastico di Cervinara. Il terreno umido ( $W$  circa 30%) pesato è stato diviso in 10 parti uguali ed è stato posto direttamente all'interno dello stampo in 10 strati di uguale spessore. Tutte le prove sono state eseguite in un laboratorio a temperatura controllata di 22°C. Tutti i provini sono stati direttamente saturati nell'apparato triassiale, modificato per saturare il provino al suo interno (Olivares e Picarelli 2001) utilizzando un flusso di CO<sub>2</sub> attraverso il provino e un successivo flusso di acqua disaerata applicando nel corso della saturazione una tensione netta/tensione effettiva massima di 30/60 kPa per prevenire il verificarsi di deformazioni volumetriche significative indesiderate.

Il programma sperimentale svolto sui suoli vulcanici investigati ha le seguenti finalità:

- definire la condizione di stato stazionario dei terreni;
- definire il meccanismo non drenato di accumulo delle sovrappressioni neutre dovuto al carico ciclico in funzione dei parametri derivati dalla teoria di stato stazionario;
- definire la suscettibilità alla liquefazione.

## 2.3 Prove triassiali monotone

Per definire l'SSL e il corrispondente parametro di stato  $\psi$ , è stata effettuata una rielaborazione ed una reinterpretazione di risultati sperimentali di letteratura e la realizzazione di un programma di prove triassiali integrativo. La prima parte del programma sperimentale è consistita nell'effettuare prove triassiali monotone, di compressione e di estensione su terreno ricostituito di Rangiriri. I provini sono stati consolidati isotropicamente ad una pressione di confinamento effettiva  $\sigma'_0$  compresa tra 50 e 200 kPa. Nel caso del terreno di Cervinara, è disponibile un'ampia sperimentazione sia per materiali indisturbati (Olivares & Picarelli 2001; 2003) che ricostituiti (es. Olivares et al. 2019; Picarelli et al. 2020), comprese prove triassiali monotone, di compressione e di estensione. Nel caso dei Camaldoli e di Agnano, è disponibile una sperimentazione simile (Carrieri, 2013).

## 2.4 Prove triassiali cicliche

La seconda parte del programma sperimentale prevede prove triassiali cicliche su terreni piroclastici indisturbati e ricostituiti del terreno di Cervinara, Camaldoli, Agnano e ricostituiti di Rangiriri. I provini sono stati consolidati isotropicamente a tensioni efficaci medie  $p'$  comprese tra 100 e 200 kPa. Tutte le prove cicliche sono state eseguite applicando un carico sinusoidale con una frequenza di 1 ciclo/180 s. Il programma sperimentale ha previsto l'applicazione di CSR compresi tra 0.1 e 0.250 e valori di  $\psi$  compresi tra 0.07 e 0.37. Le prove vengono poi messe a confronto con i risultati ottenuti su un terreno non piroclastico quale la sabbia di Toyoura che presenta valori di  $\psi$  negativi. Convenzionalmente, l'insorgenza della liquefazione viene valutata in due modi: (1) sviluppo di pressioni interstiziali in eccesso pari al 95% dello stress effettivo iniziale; o (2) sviluppo di una deformazione assiale di doppia ampiezza del 5%. Prove eseguite con differenti rapporti di sollecitazione hanno permesso di esaminare il meccanismo di accumulo della sovrappressione neutra e la relazione con la resistenza ciclica CSR e il numero di cicli necessari per ottenere la liquefazione.

## 3. Risultati sperimentali

### 3.1 Definizione dello stato stazionario

La sperimentazione condotta ha indicato la possibilità di inquadrare la risposta dei terreni piroclastici all'interno della teoria dello stato stazionario rendendo possibile la definizione della suscettibilità alla liquefazione. Utilizzando la condizione di stato stazionario, nel piano di compressione, come elemento discriminante è infatti possibile distinguere depositi liquefacibili da quelli non liquefacibili.

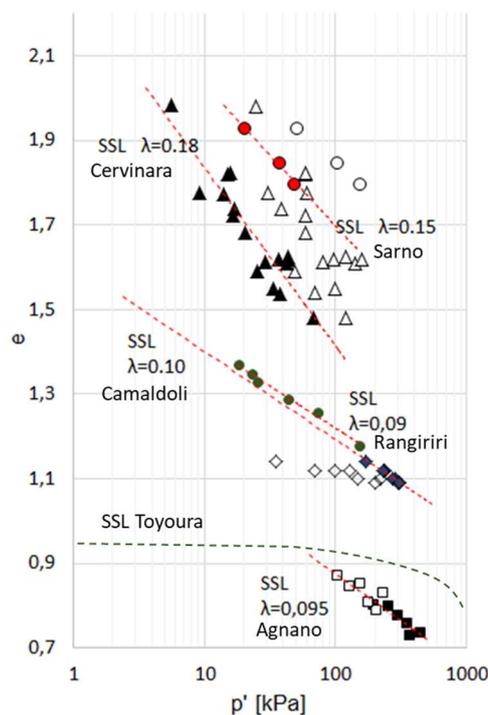


Fig 3. Piano di compressione: condizioni di stato stazionario dei terreni investigati.

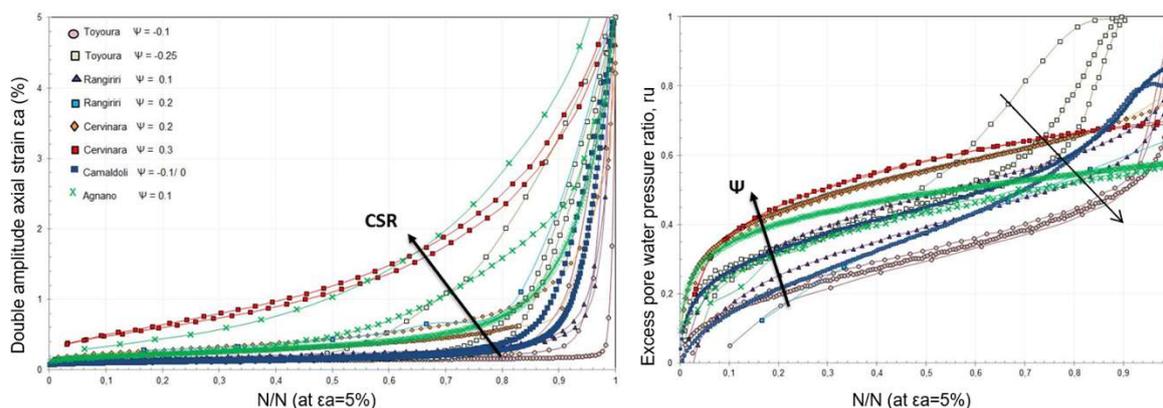
In Fig.3, sono riportate le condizioni di stato stazionario nel piano di compressione per i depositi piroclastici della regione Campania, in particolare sono state riportate le condizioni di stato stazionario per Cervinara e Sarno rappresentative di depositi da caduta e le condizioni di stato stazionario per Camaldoli ed Agnano rappresentative di depositi da flusso. Per confronto nel piano di compressione viene riportata anche la condizione di stato stazionario per il terreno piroclastico di Rangiriri (NZ) con

particelle di elevata fragilità, e per la sabbia di Toyoura, che non presenta particelle porose e fragili come in un terreno piroclastico.

L'SSL per i depositi piroclastici da caduta presenta una pendenza  $\lambda$  compresa tra 0.18 (Cervinara) e 0.15 (Sarno) mentre per i depositi da caduta (Camaldoli ed Agnano) è minore ( $\lambda$  circa 0.1), anche i terreni di Rangiriri, presentano un angolo di inclinazione inferiore e di circa 0,09. Toyoura presenta una pendenza decisamente minore e pari a 0.02 nel range di stato tensionale utilizzato per la sperimentazione.

### 3.2 Risultati delle prove triassiali cicliche

Definita la condizione di stato stazionario è possibile associare il parametro  $\psi$  ad ogni prova di compressione triassiale ciclica. Nelle figure è riportata una sintesi dell'intera sperimentazione in termini di accumulo di deformazione assiale,  $\epsilon_a$ , e di rapporto di sovrappressione neutra,  $ru$ , in funzione del numero di cicli normalizzato rispetto al numero di cicli corrispondente al 5% di deformazione.



I terreni di Cervinara, caratterizzati da un elevato indice dei pori alla fine della fase di consolidazione ( $1,4 < e < 1,7$ ;  $0,1 < \psi < 0,4$ ) in prove triassiali monotone non drenate, sono suscettibili a liquefazione a causa della loro risposta non drenata instabile nel piano delle tensioni. Per le prove triassiali cicliche l'inizio della liquefazione ciclica si manifesta sempre in termini di sviluppo di una deformazione assiale  $\epsilon_a$  del 5%, corrispondente ad un rapporto di sovrappressione  $ru$  tra 0,58 e 0,75, anche se i valori di  $ru$  sono compresi tra 0,31 e 0,45 quando  $N_c/N(\epsilon_a=5\%) = 0,1$ . Simili risultati si ottengono nel caso dei provini ricostituiti anche se il valore di  $\psi$  è leggermente inferiore ( $0,2 < \psi < 0,3$ ). Per i terreni ricostituiti di Rangiriri con parametro  $\psi$  positivo ma inferiore a fine consolidazione ( $0,1 < \psi < 0,2$ ), anche se caratterizzati da un indice dei pori significativamente più basso ( $1,3 < e < 1,4$  per  $p' = 100$  kPa;  $1,2 < e < 1,3$  per  $p' = 200$  kPa) come nel caso del terreno di Cervinara, l'inizio della liquefazione ciclica avviene con lo sviluppo del 5% di deformazione assiale,  $\epsilon_a$ , ad un parametro di sovrappressione neutra,  $ru$ , che è leggermente superiore a quello del terreno di Cervinara (cioè tra 0,65 e 0,91); anche  $ru = 0,2\%$  è leggermente inferiore per  $N_c/N(\epsilon_a=5\%)$  tra 0.1 e 0.3.

I risultati ottenuti sui Camaldoli, con valore di  $\psi$  prossimi a zero, sembrano essere assimilabili al caso di Rangiriri.

Nel caso della sabbia di Toyoura caratterizzata da valori di  $\psi$  negativi il raggiungimento della liquefazione ciclica si manifesta sempre in corrispondenza di un valore di  $ru$  pari ad 1.

Questi risultati sembrano dimostrare la migliore influenza del parametro  $\psi$  rispetto ad altri parametri, come l'indice dei pori,  $e$ , o la densità relativa,  $Dr$ , che hanno valori sostanzialmente diversi per questi materiali.

## 4. Conclusioni

Presentando i risultati nel piano di compressione e identificando la linea di stato stazionario SSL, è stato possibile rappresentare i risultati in termini del parametro  $\psi$  (invece di densità relativa  $Dr$ ), consentendo così una migliore normalizzazione dei risultati.

La sperimentazione condotta indica la possibilità di utilizzare  $\psi$  come parametro chiave per modellare le curve che descrivono il processo di accumulo delle sovrappressioni neutre e le curve di deformazione

plastica con il numero di cicli, rendendo i risultati per i terreni piroclastici comparabili con quelli ottenuti per altri tipi di terreno.

### Bibliografia

- Asadi, MB, Asadi, MS, Orense, RP, Pender, MJ. (2020). "Small-strain stiffness of natural pumiceous sand". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(6).
- Asadi, MS, Asadi, MB, Orense, RP, & Pender, MJ (2018). "Undrained cyclic behaviour of reconstituted natural pumiceous sands". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(8).
- Asadi, MS, Orense, RP, Asadi, MB, & Pender, MJ. (2019). "Maximum dry density test to quantify pumice content in natural soils". *Soils and Foundations*, 59(2), 532-543.
- Been, K, Jefferies, M (1985). "A state parameter for sands". *Géotechnique*, 35(2), 99-112.
- Bobei, DC, Wanatowski, C, Lo, SR, Gnanendran, T, Rahman, MM. (2009). "Modified state parameter for characterizing static liquefaction of sand with fines". *Canadian Geotechnical Journal*, 46(3), 281-295.
- Castro, G. (1969). "Liquefaction of Sands". *Soil Mechanics Series No. 81*. Harvard University, Cambridge, NII.
- de Cristofaro, M., Olivares, L., Orense, R. P., Asadi, M. S., & Netti, N. (2022). Liquefaction of Volcanic Soils: Undrained Behavior under Monotonic and Cyclic Loading. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002715](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002715)
- Dobry, R, Baziar, MH. (1995). "Residual strength and large deformation potential of loose silty sands". *Journal of Geotechnical Engineering*, 121(12), 896-906.
- Hunter, G, Fell, R. (2003). "Mechanics of failure of soil slopes leading to "rapid" failure. In *Proceedings of the International Conference on Fast Slope Movements Prediction and Prevention for Risk Mitigation*, Napoli, Italy. 283-290.
- Idriss, IM, and RW Boulanger. (2008). *Soil Liquefaction during Earthquakes*. Oakland, CA: Earthquake Engineering Research Institute.
- Ishihara, K, Tatsuoka F, Yasuda F. (1975). "Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses". *Soils and Foundation*, 15(1), 29-44.
- Ishihara, K. (1993). "Liquefaction and flow failure during earthquakes". *Geotechnique*, 43(3): 351-451.
- Ladd, RS, (1974). "Specimen preparation and liquefaction of sands." *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE.
- Lampitiello, S. (2004). "Resistenza non drenata e suscettività alla liquefazione di ceneri vulcaniche della Regione Campania". *PhD Thesis*, Seconda Università di Napoli.
- Musso, A, and Olivares, L. (2003). "Post-failure evolution in flowslide: Transition from static liquefaction to fluidization." *Proc., Occurrence and Mechanisms of Flows in Natural Slopes and Earthfills*, Sorrento, Patron, Bologna, Italy.
- Licata, V. (2015). A laboratory and field study on cyclic liquefaction of a pyroclastic soil. PhD. Thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II.
- Olivares L, Lampitiello S, Picarelli L.(2003). "Undrained shear strength of pyroclastic soils involved in flowslides." *Int. Conf. on Fast Slope Movements - Prediction and Prevention for Risk Mitigation IC-FSM2003*, Napoli, Maggio, Patron Editore – Bologna – 1: 405-412, ISBN: [8855528335](#), [8855526995](#).
- Olivares, L, Damiano, E, Netti, N, De Cristofaro, M. (2019). "Geotechnical properties of two pyroclastic deposits involved in catastrophic Flowslides for implementation in early warning systems". *Geosciences* 9, 24.
- Olivares L. & Picarelli, L. (2001). "Occurrence of flowslide in soils of pyroclastic origin and considerations for landslide hazard mapping". *Fourteenth Southeast Asian Geotechnical Conference*, Hong Kong, 1, 881-886.
- Olivares L & Picarelli, L. (2003). "Shallow flowslides triggered by intense rainfalls on natural slopes covered by loose unsaturated pyroclastic soils". *Géotechnique*; 53 (2), 283-287.
- Picarelli, L, Olivares, L, Lampitiello, S, Darban, R, Damiano, E, (2020). "The undrained behavior of an air-fall volcanic ash". *Geosciences*. 10(2), 60.
- Verdugo, R and Ishihara, K. (1996). "The steady state of sandy soils". *Soils and Foundations*, 36 (2), 81-92.
- Yamamuro, JA, and Lade, PV. (1997). "Static liquefaction of very loose sands." *Canadian Geotechnical Journal*, 34, 905-917.
- Yoshimine, M, Nishizaki, H, Amano, K, and Hosono, Y. (2006). "Flow deformation of liquefied sand under constant shear load and its application to analysis of flow slide of infinite slope". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 26 (2-4), 253-264.
- Youd, TL, and Idriss IM, (2001). "Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils". *J. Geotechnical Geoenvironmental Engineering*, 127 (10), 817-83.