

## **LIQUEFAZIONE DEI TERRENI PIROCLASTICI: COMPORTAMENTO NON DRENATO SOTTO SOLLECITAZIONI MONOTONE E CICLICHE**

M. de Cristofaro

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

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, in particolare alle loro caratteristiche quali l'essere leggere, fragili e porose. Confrontando i risultati delle prove triassiali non drenate monotone e cicliche condotte sul terreno di Cervinara, il concetto di stato stazionario viene utilizzato per definire il verificarsi della liquefazione. Una parte significativa del programma sperimentale è stata eseguita sul terreno di Rangiriri per evidenziare il ruolo della fragilità delle particelle piroclastiche sul verificarsi della liquefazione. Il confronto tra i risultati ottenuti sui due tipi di terreni piroclastici mostra la possibilità di spiegare il meccanismo non drenato dell'accumulo di sovrappressione neutra utilizzando il parametro di stato  $\psi$ . Il parametro  $\psi$  sembra essere utile anche per confrontare i risultati ottenuti sui terreni piroclastici con quelli ottenuti su sabbie ordinarie. Il parametro di stato ha un chiaro significato fisico che potrebbe essere utilizzato per definire un modello più affidabile del meccanismo non drenato accumulo della sovrappressione neutra per suoli di diversa natura.

### **1. Programma sperimentale**

#### *1.1 Materiale utilizzato*

I terreni utilizzati sono stati prelevati da due siti: il sito di Cervinara situato a nord-est di Napoli (Italia) e il sito di Rangiriri (Nuova Zelanda). I campioni indisturbati di Cervinara hanno un indice dei pori superiore a 2. I campioni sono stati prelevati utilizzando una fustella a parete sottile della stessa dimensione dei provini per la prova triassiale per ridurre al minimo il disturbo indotto dalle operazioni consecutive di campionamento, estrusione e rifilatura del campione. Le prove su Rangiriri sono state eseguite su provini ricostituiti con un indice dei pori di circa 1,5.

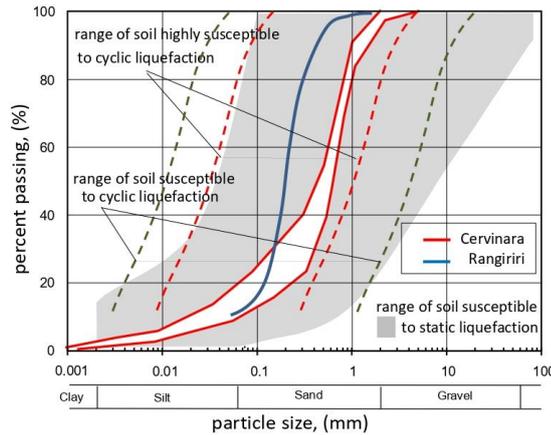


Figura 1. Curve granulometriche dei campioni usati (Hunter & Fell 2003)

Come mostrato dalle curve granulometriche illustrate in Fig.1, entrambi i terreni piroclastici, Cervinara e Rangiriri, 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). Entrambi i terreni sono caratterizzati da pesi per unità di volume che vanno da 11-14 kN/m<sup>3</sup>, indicazioni della loro struttura metastabile e collassabile (Musso & Olivares 2003).

### 1.2 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. Ogni strato è stato compattato delicatamente. Sono state utilizzate due diverse dimensioni convenzionali dei provini (cioè  $h = 7,6$  cm,  $d = 3,8$  cm e  $h = 7,2$  cm,  $d = 3,6$  cm). Tutte le prove sono state eseguite in un laboratorio a temperatura controllata di 22°C.

Tutte le prove sono state eseguite 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 due suoli vulcanici (Cervinara e Rangiriri) 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.

### 1.3 Test monotoni

Per definire l'SSL e il corrispondente parametro di stato  $\psi$ , la prima parte del programma sperimentale ha consistito 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.

### 1.4 Test ciclici

La seconda parte del programma sperimentale prevede prove triassiali cicliche su terreni piroclastici indisturbati e ricostituiti del terreno di Cervinara 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.

## 2. Definizione di stato stazionario

Per definire la condizione di stato stazionario, i risultati delle prove triassiali monotone, sia in compressione che in estensione, sono presentati nelle Figg. 2a e 2b. Nelle figure, l'SSL è rappresentata da una linea tratteggiata ottenuta dall'involuppo dei punti sul terreno indisturbato Cervinara (Olivares & Picarelli 2001; 2003) sia su campioni ricostituiti (Lampitiello, 2004; Picarelli et al., 2020) corrispondente alla fine delle prove triassiali ad un livello di deformazione assiale,  $\varepsilon_a$ , compreso tra il 15 e il 20%. Per confronto, nello stesso piano di compressione, viene tracciata anche la linea di compressione normale (NCL) ottenuta dal test di compressione isotropa eseguito su campioni indisturbati (Olivares et al. 2003), rappresentata da una linea tratteggiata blu. L'SSL per il terreno di Cervinara è caratterizzata da un angolo di inclinazione  $\lambda = 0,19$  e un valore di indice dei pori  $e = 2,25$  quando  $p' = 1$  kPa. Per i terreni di Rangiriri (Fig. 2b), l'SSL nel piano di compressione è caratterizzata da un angolo di inclinazione inferiore  $\lambda = 0,092$  e un indice dei pori  $e = 1,65$  per  $p' = 1$  kPa, in accordo con l'indice dei pori inferiore di questo terreno rispetto al terreno di Cervinara.

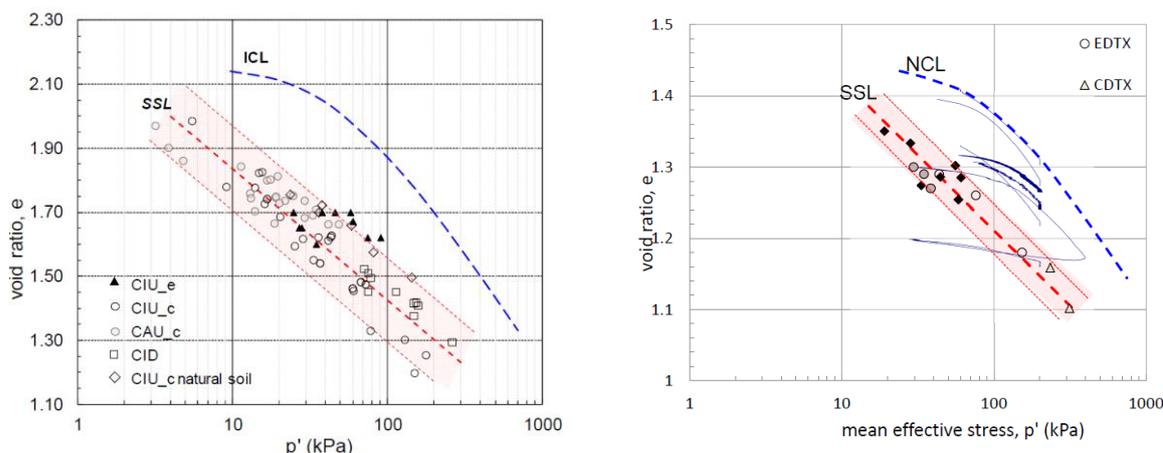


Figura 2. Condizioni di stato stazionario: a) Cervinara (Picarelli et al., 2020); b) Rangiriri

L'elevato indice dei pori, l'elevata compressibilità, e quindi l'elevata pendenza del SSL nel piano di compressione per entrambi i terreni vulcanici, sono probabilmente da attribuire alle peculiarità delle particelle di pomice (leggere, fragili e porose, e con porosità interna), che consentono la formazione di microstrutture aperte, metastabili e collassabili.

I risultati delle prove triassiali sono riportati per il terreno di Cervinara nel piano delle tensioni di Fig. 3a, per sollecitazioni efficaci iniziali comprese tra 20 e 200 kPa, ed esibendo una risposta instabile non drenata, cioè suscettibile a liquefazione statica (Olivares et al. 2019). L'involuppo di resistenza può essere descritto da un SSL caratterizzato da un'intercetta zero e da un valore di  $M = 1,55$  (corrispondente a  $\phi'_c = 38^\circ$ ) in compressione, e da  $M = 0,98$  (corrispondente a  $\phi'_e$  = leggermente inferiore  $36^\circ$ ) in estensione. Nel caso del suolo Rangiriri, i risultati presentati in Fig. 3b mostrano una risposta non drenata instabile e un involucro di resistenza descritto da un SSL nel piano delle tensioni caratterizzato da  $M = 1.42$  (corrispondente a  $\phi' = 35^\circ$ ) e da una intercetta di circa 4 kPa; non sono state riscontrate differenze significative tra SSL nei test di

estensione e compressione. Tutte le prove triassiali non drenate sul terreno di Cervinara sono caratterizzate da valori positivi di  $\psi$  (tra 0,1 e 0,4) e da percorsi di tensione instabili (cioè liquefazione statica), sia in compressione che in estensione. Inoltre, per il terreno di Rangiriri, tutte le prove presentate sono caratterizzate da valori di  $\psi$  positivi o prossimi allo 0 (tra 0,15 e 0), corrispondenti a percorsi di sollecitazione non drenati instabili o parzialmente instabili nonostante il valore dell'indice dei pori iniziale più basso (di circa 1,4). Questa è una prima indicazione che evidenzia il vantaggio di utilizzare il parametro di stato  $\psi$  al posto dell'indice dei pori  $e$  o della densità relativa nella definizione della suscettibilità alla liquefazione nel caso di suoli piroclastici, caratterizzati da particelle fragili. Le condizioni di stato stazionario nel piano di compressione ottenute sui due terreni vulcanici sono riportate in Fig. 4, insieme alla condizione di stato stazionario definita da Verdugo e Ishihara (1996) e da Yoshimine et al. 2006 per la sabbia di Toyoura. Entrambi i terreni vulcanici hanno una compressibilità molto elevata, come si evince dalle condizioni stazionarie, anche se l'SSL di Cervinara è caratterizzata da una compressibilità ben superiore all'SSL di Rangiriri. Le posizioni relative delle tre SSL nel piano di compressione riflettono la diversa natura dei terreni e probabilmente anche gli effetti della fragilità delle particelle.

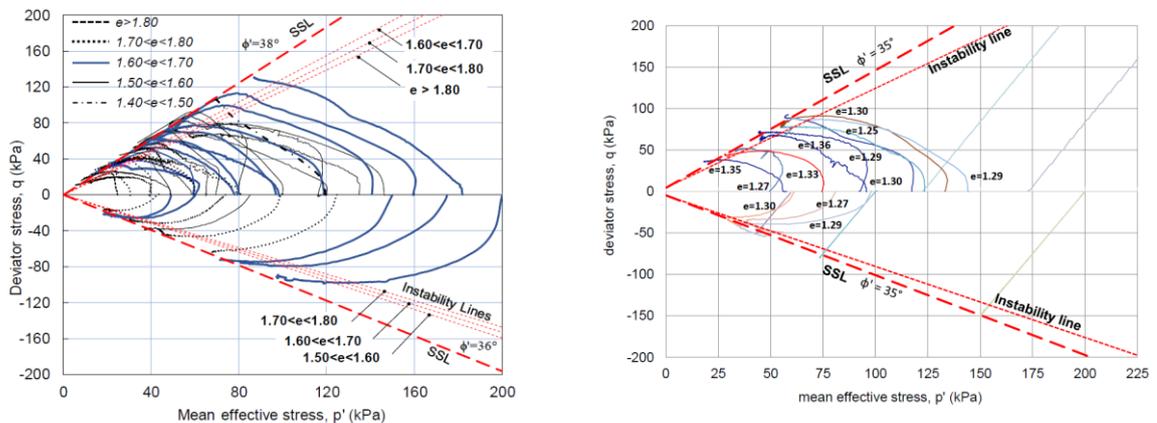


Figura 3. Stato stazionario e percorsi di sollecitazione in prove triassiali: a) Cervinara; b) Rangiriri

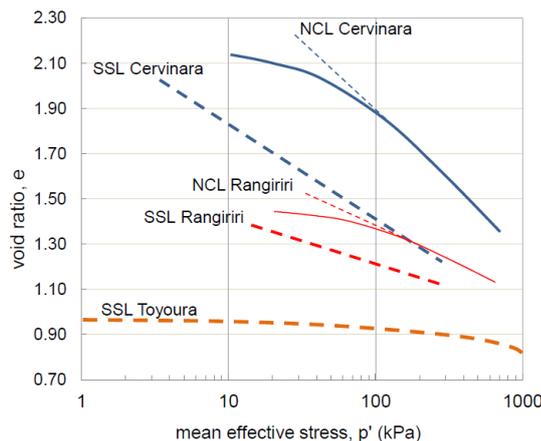


Figura 4. Stato stazionario nel piano di compressione

### 3. Risultati delle prove triassiali cicliche

Le seguenti considerazioni sono derivate dalle relazioni tra l'accumulo di deformazione assiale,  $\epsilon_a$ , e il rapporto di sovrappressione neutra,  $ru$ , in funzione del numero di cicli,  $nc$ .

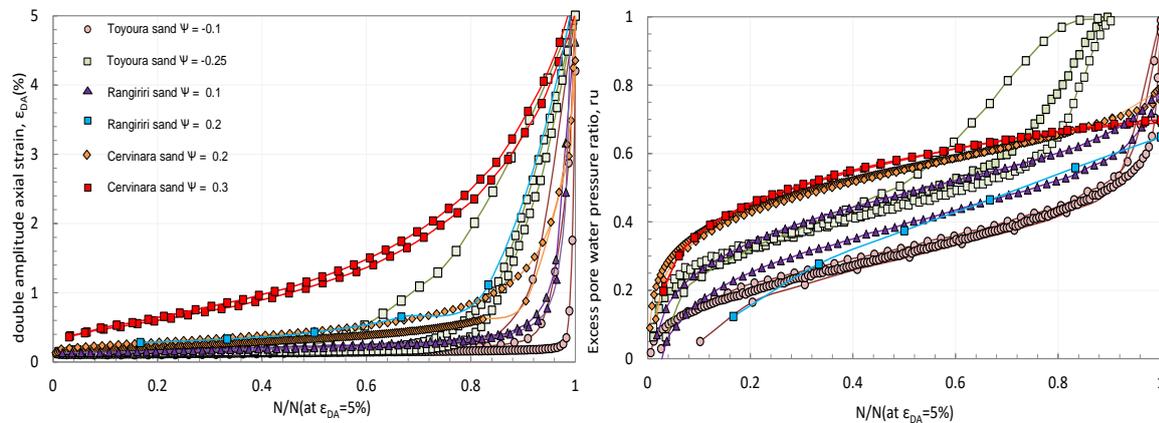


Figura 5. (a) rapporto di sovrappressione neutra e (b) deformazione assiale in doppia ampiezza rispetto al numero normalizzato di cicli; Cervinara  $p'_0=200$  kPa; Rangiriri  $p'_0=100$  e  $200$  kPa; Toyoura  $p'_0=100$

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 il 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. 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,  $D_r$ , che hanno valori sostanzialmente diversi per questi materiali.

L'ultima considerazione può essere fatta analizzando i grafici di  $\epsilon_a$  a rispetto a  $N_c/N(\epsilon_a=5\%)$  confrontando entrambi i materiali piroclastici con i risultati ottenuti sulla sabbia di Toyoura con valori di  $\psi$  negativi. Guardando i risultati, la risposta sembra essere sostanzialmente influenzata dal valore di CSR, cioè, all'aumentare del CSR, a parità di  $N_c/N(\epsilon_a=5\%)$ , maggiore è il livello di deformazione raggiunto. Questo risultato è probabilmente dovuto alla maggiore deformazione plastica nel terreno quando il percorso di sollecitazione è adiacente all'SSL nella regione di instabilità.

Con questi risultati si può ipotizzare che per suoli piroclastici con particelle fragili o non fragili, il parametro  $\psi$  può essere utilizzato come parametro discriminante per definire l'accumulo delle sovrappressioni neutre e l'insorgenza di liquefazione.

### 4. Conclusioni

I due depositi piroclastici saturi studiati in questo lavoro hanno strutture metastabili e collassabili, che possono contribuire al verificarsi di liquefazione sotto carico monotono, ciclico e dinamico. I risultati di un ampio programma sperimentale, in cui sono stati confrontati i risultati di prove triassiali non drenate monotone e cicliche eseguite su campioni prelevati dai depositi piroclastici di Cervinara (Italia) e Rangiriri (Nuova Zelanda), hanno mostrato il ruolo svolto dalla natura piroclastica del suolo sul meccanismo di

accumulo di sovrappressione neutra non drenato sotto taglio. Il concetto di stato stazionario è stato utilizzato per definire l'occorrenza della liquefazione sotto carico monotono e ciclico.

I risultati ottenuti hanno mostrato la possibilità di inquadrare la risposta non drenata e il corrispondente meccanismo di accumulo di sovrappressione neutra non drenato sotto taglio utilizzando il parametro di stato  $\psi$  piuttosto che attraverso la densità relativa o la porosità. Questo parametro  $\psi$  sembra essere utile per inquadrare i risultati ottenuti non solo per suoli piroclastici ma anche su sabbie di diversa natura, come mostrato nel caso della sabbia di Toyoura.

### 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.
- 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.
- 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), 817-833.