

## UN CAMPO PROVA PER STUDIARE L'INTERAZIONE DI GRAMINACEE A RADICAZIONE PROFONDA CON TERRENI PIROCLASTICI

Mariagiovanna Moscariello, Sabatino Cuomo, Vito Foresta  
*Università di Salerno*

[mamoscariello@unisa.it](mailto:mamoscariello@unisa.it), [scuomo@unisa.it](mailto:scuomo@unisa.it), [vforesta@unisa.it](mailto:vforesta@unisa.it)

### Sommario

La nota è incentrata sull'analisi del ruolo di apparati radicali rispetto alla risposta idro-meccanica di terreni piroclastici parzialmente saturi, frequentemente interessati dall'innescò di frane superficiali pluvio-indotte e da processi erosivi, anch'essi innescati da eventi meteorici intensi. Vengono presentati i risultati preliminari di prove in sito e di laboratorio relative all'interazione terreno-vegetazione.

### 1. Introduzione

L'interazione terreno-radici riveste particolare importanza, perché la vegetazione può essere utilizzata come soluzione di bio-ingegneria (alias ingegneria della natura) per mitigare i processi erosivi ed eventualmente alcuni tipi di frane (es. frane superficiali meteo-indotte). Gli effetti perseguibili a scala del versante consistono nella riduzione dell'erosione e del trasporto solido a valle, unitamente alla stabilizzazione dello strato superiore del suolo a opera degli apparati radicali.

Le radici delle piante incrementano la resistenza meccanica (Reubens et al., 2007) e influenzano il comportamento idraulico. Quantificare tali effetti è piuttosto complesso a causa delle molteplici interazioni tra radici e terreno e della variabilità spaziale del sistema terreno-radici. Le radici possono agire da rinforzo del terreno sostenendo sollecitazioni di trazione, flessione e taglio, ma allo stesso tempo possono sfilarsi dal terreno. Di conseguenza, per valutare l'incremento di resistenza dovuta alle radici è necessario studiare l'intero sistema terreno-radici a diverse scale e per differenti livelli di sollecitazione. La resistenza dell'intero sistema dipende, infatti, sia dal terreno e sia dalle proprietà delle radici. Nella nota sono esposti i risultati sperimentali ottenuti con prove in sito e di laboratorio eseguite per monitorare l'evoluzione dell'interazione terreno-vegetazione.

### 2. Metodi

#### 2.1 Caratterizzazione del sito

La sperimentazione è stata eseguita in località S. Mauro (Nocera Inferiore, Sa), non distante dai rilievi dei Monti di Sarno e Monte Albino, e da aree già sede di fenomeni franosi intensi (Sarno, 1998; Nocera Inferiore, 2005).

Il sito è stato monitorato sia nella fase precedente la semina, sia durante l'intera crescita delle specie erbacee. In particolare, prima della semina, il terreno è stato caratterizzato con prove in laboratorio relative al contenuto d'acqua, all'indice dei vuoti e alle proprietà meccaniche del terreno, ed in sito sono state effettuate periodiche campagne di misura della temperatura, contenuto d'acqua e suzione.

I valori massimi, minimi e medi della temperatura giornaliera e le altezze di pioggia giornaliera sono state monitorate utilizzando i dati della stazione S. Mauro del Centro Funzionale Multirischi della Protezione Civile Regione Campania. Tale mole di dati è servita per una stima dell'evapotraspirazione, effettuata con l'equazione di Hargreaves (1985), che richiede un numero inferiore di parametri

meteorologici rispetto alla più utilizzata equazione FAO di Penman-Monteith. La formula di Hargreaves è stata utilizzata tenendo conto dei coefficienti correttivi proposti da Mendicino e Senatore (2013) per le regioni del Sud Italia ed in particolare per la stazione S. Marzano (posta a circa 5 km dal sito di indagine). L'evapotraspirazione potenziale, secondo la formula di Hargreaves, è riportata nell'eq. 1

$$ET_0 = C \cdot R_e(T + 17.8) \cdot \sqrt{\Delta T} \quad (1)$$

dove  $C = 0.0019$ ;  $R_e$  è la radiazione extraterrestre, che dipende dal mese e dalla latitudine;  $\Delta T$  è variazione della temperatura giornaliera (Mendicino e Senatore, 2013). Per ottenere la massima evapotraspirazione, dipendente dallo stato dalla copertura vegetale, bisogna moltiplicare l'evapotraspirazione potenziale ( $ET_0$ ) per il coefficiente colturale ( $k_c$ ), che è specifico per ogni coltura e diverso per ogni suo stadio vegetativo.

Per le specie erbacee sono state considerate 4 fasi: fase iniziale ( $k_c = 0.3 - 0.4$ ), fase di crescita ( $k_c$  crescente fino a circa  $0.8 - 1.0$ ), fase di pieno sviluppo ( $k_c > 1$ ), fase di maturazione ( $k_c$  decrescente fino a  $0.3 - 0.5$  a maturazione piena). Per completare la caratterizzazione del sito e monitorare le modifiche dovute alla presenza delle specie erbacee, la suzione è stata misurata periodicamente alle profondità di 0.2 m e 0.6 m con tensiometri Quick Draw. Per la profondità di 0.2 m sono stati stimati anche i contenuti d'acqua, in modo da poter ricostruire le curve caratteristiche delle tre specie erbacee. I dati sono stati interpolati utilizzando il modello di van Genuchten (1980).

## 2.2 Caratterizzazione delle specie erbacee

Le tre specie erbacee utilizzate (qui denominate convenzionalmente PV, PM e AG) sono appartenenti alla famiglia delle "graminacee", ma selezionate tra quelle particolari specie – rare in natura - che sono in grado di sviluppare un apparato radicale nel terreno tale da raggiungere profondità di 2-3 m. Per caratterizzare le tre specie erbacee, i diametri delle radici e la loro architettura è stata analizzata prelevando campioni indisturbati a profondità comprese tra 0 m e 0.30. I diametri sono stati misurati con la tecnica dell'analisi delle immagini (software Fiji, ImageJ). I risultati sono stati poi interpolati con curve di distribuzione normale.

## 2.3 Resistenza a taglio dei terreni vegetati e non (in condizione di totale e parziale saturazione)

Le condizioni iniziali ed al contorno delle prove di taglio diretto sono state fissate in modo da riprodurre le condizioni di tensione tipiche dei pendii interessati da frane superficiali. La tensione verticale netta è stata fissata in base ai dati presenti in letteratura relativamente al criterio di resistenza dei terreni piroclastici, alla geomorfologia delle aree coinvolte da frane di tipo colate ed alla modellazione numerica della fase di innesco. Sono state scelte le tensioni verticali nette nell'intervallo tra 25 kPa e 60 kPa, corrispondenti ad uno spessore della coltre piroclastica compreso tra 1.0 m e 3 m. Le prove sono state condotte sia a contenuto d'acqua costante sia a suzione costante, utilizzando l'apparecchiatura di taglio diretto standard e quella a suzione controllata.

I risultati delle prove di taglio diretto sono stati interpretati utilizzando la formulazione proposta da Bishop (1959) per le tensioni efficaci:

$$\sigma' = \sigma - u_a + S_r(u_a - u_w) \quad (2)$$

dove  $\sigma$  è la tensione totale,  $\sigma - u_a$  è la tensione netta;  $S_r$  è il grado di saturazione;  $u_a - u_w$  è la suzione. Per tenere conto della presenza di radici all'interno dei campioni, che occupano parte dei pori del terreno, è stato adottato il modello proposto da Ni et al. (2016), che permette di modellare i cambiamenti nell'indice dei vuoti, indotti dalle radici:

$$e = \frac{e_0 - R_v(1 + e_0)}{1 + R_v(1 + e_0)} \quad (3)$$

dove  $e_0$  è l'indice dei vuoti del terreno non vegetato,  $R_v = V_r/V_s$  è il rapporto in volume delle radici con  $V_r$

il volume delle radici e  $V_s$  volume del terreno.

Il criterio di resistenza è definito dalla formulazione unificata:

$$\tau = c' + [\sigma - u_a + S_r(u_a - u_w)] \tan \varphi' \quad (4)$$

$\varphi'$  è l'angolo di attrito e  $c'$  è la coesione, che comprende sia la coesione del terreno non radicato, sia un termine aggiuntivo dovuto alla presenza delle radici. Il termine coesivo aggiuntivo,  $c_{roots}$ , è stato quantificato da Preti and Schwarz (2006) in funzione della resistenza a trazione media delle radici,  $T_r$ , dell'angolo di distorsione a taglio, nella banda di taglio, al momento alla rottura della radice,  $\xi$ , e del Rapporto dell'Area delle Radici (RAR),  $c_{roots} = 0.4 \cdot (\sin \xi + \cos \xi \tan \varphi') \cdot T_r \cdot RAR$ . Per la stima del RAR è stata ipotizzata una radice di forma cilindrica della radice e con sviluppo prevalentemente verticale; pertanto, è possibile adoperare l'approssimazione proposta da Ni et al. (2018), dove  $RAR = R_v$ .

### 3. Caratterizzazione del sito di prelievo dei campioni

Il campo prova, seminato con le tre specie erbacee è stato suddiviso in 9 zolle, in modo da avere 3 zolle seminate per ogni specie.

Il terreno in sito è di natura piroclastica, sabbia con limo, con peso specifico  $G_s=2.70$ , appartenente alla classe B della classifica proposta da Bilotta et al. (2005). L'indice dei vuoti,  $e$ , ed il contenuto d'acqua,  $w$ , sono stati monitorati, con prove di laboratorio, prelevando campioni, nei i primi 0.30 m di profondità, in un intervallo temporale compreso tra le operazioni di preparazione (diserbatura, fresatura) e la semina. L'indice dei vuoti dei campioni, prelevati nei primi 0.05 m, risulta maggiore di 1.3, mentre quelli prelevati nello strato inferiore hanno  $1.0 \leq e \leq 1.2$ . Il contenuto d'acqua,  $w$ , al contrario, risulta meno variabile all'aumentare della profondità e compreso tra 0.25 e 0.33. In sito,  $w$  è stato misurato ad una profondità media di circa 0.2 m, dove possono essere osservati i principali effetti dell'evapotraspirazione e della vegetazione. Per il terreno non vegetato (fig.1a), è possibile definire un andamento medio di  $w$  nel tempo, che è principalmente da attribuire al bilancio precipitazioni-evapotraspirazione.

In figura 1b, sono stati riportati i dati per l'anno successivo alla semina. Nei primi 40 giorni dalla semina il campo è stato irrigato regolarmente (circa 8 mm/g per i primi 20 giorni e 3 mm/g per altri 20 giorni).

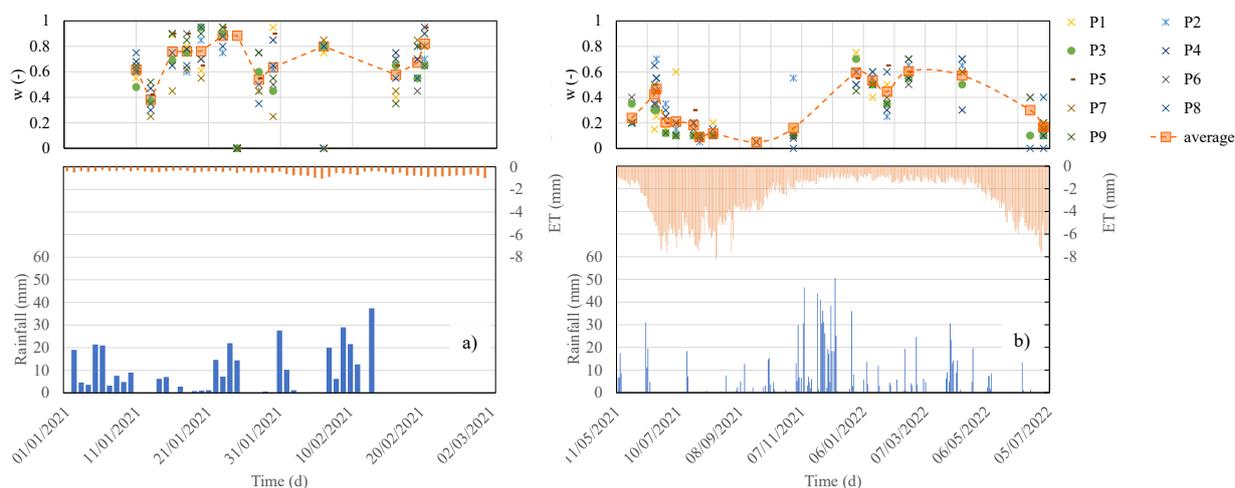


Fig 1. a) Contenuto d'acqua, altezze di pioggia ed evapotraspirazione per il terreno non vegetato; b) Contenuto d'acqua, altezze di pioggia ed evapotraspirazione per il terreno vegetato: P1-P2-P3 specie PV; P4-P5-P6 specie AG; P7-P8-P9 specie PM.

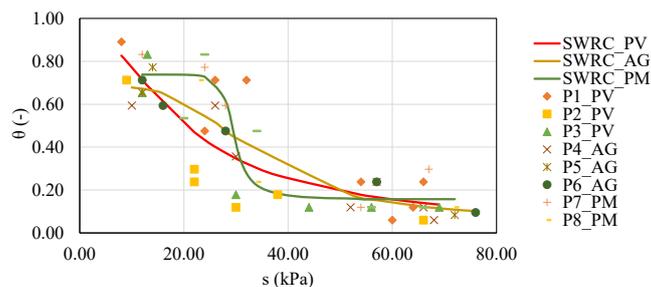


Fig 2. Curve caratteristiche da misure in sito per le tre specie erbacee (PV, PM e AG) alla profondità di 0.2 m.

Tabella 2. Parametri ottenuti interpolando i dati con il modello proposto da van Genuchten (1980):  $\theta_s$  = contenuto d'acqua volumetrico saturo;  $\theta_r$  = contenuto d'acqua volumetrico residuo;  $\alpha$  e  $n$  parametri del modello.

	$\theta_s$ (-)	$\theta_r$ (-)	$\alpha$ (1/kPa)	$n$ (-)	$R^2$
PV	0.93	0	0.07	2.26	0.68
AG	0.68	0.06084	0.03	3.98	0.94
PM	0.74	0.15674	0.03	17.90	0.91

In tale intervallo temporale,  $w$  alla profondità di 0.2 m risulta superiore a 0.15, anche in assenza di precipitazioni e con alti valori di evapotraspirazione (70-80 mm/g). Successivamente l'irrigazione è stata interrotta per favorire lo sviluppo in profondità delle radici. In assenza di irrigazione, l'andamento del contenuto d'acqua segue quello delle precipitazioni. Confrontando le figure 1a e 1b, si nota che il contenuto d'acqua nei terreni vegetati risulta più basso di quello registrato negli stessi mesi nel terreno non vegetato. In definitiva, in presenza di vegetazione oltre all'evaporazione diretta, si aggiunge anche l'assorbimento radicale che porta ad una riduzione del contenuto d'acqua e ad un sostanziale incremento di suzione del terreno che si protrae nel tempo.

Dalle misure di suzione e dei contenuti d'acqua, per le tre specie erbacee, sono state ottenute le curve di ritenzione riportate in figura 2, i cui parametri sono riassunti in tabella 1.

#### 4. Caratterizzazione delle specie erbacee

Gli apparati radicali delle tre specie erbacee presentano tre diverse architetture. In particolare, la specie PV ha una radice diritta più importante e radici secondarie laterali di diametro più piccolo (Fig. 3a); la specie AG ha radici tutte con diametro simile, che hanno origine nella parte basale del fusto (Fig. 3c); la specie PM ha radici con caratteristiche intermedie tra PV ed AG (Fig. 3b), ma sono ricoperte da una sostanza gelatinosa, che offre una maggior aderenza tra le radici ed il terreno circostante. Dalla analisi delle immagini è stato possibile ricavare delle curve di distribuzione normale per descrivere la variabilità dei diametri nei campioni utilizzati per eseguire le prove di resistenza a taglio. La specie AG ha bassi valori medi del diametro (Fig. 3d) e bassa deviazione standard, associate anche a bassi valori di  $R_v$  (Fig. 4b), costanti con la profondità.

L'indice dei vuoti dei campioni radicati è stato confrontato con quello dei campioni raccolti prima della semina (Fig. 4a). La presenza di radici della specie AG comporta una lieve diminuzione dell'indice dei vuoti, allo stesso modo si comporta la specie PM, ma la riduzione di  $e$  risulta più evidente a profondità maggiori di 0.15 m. La specie PV induce una consistente riduzione dell'indice dei vuoti particolarmente evidente per il campione C2 PV.

#### 5. Resistenza a taglio

Le prove di taglio sono state interpretate in termini di tensioni verticali,  $\sigma'$ , tensioni tangenziali,  $\tau$ , deformazioni verticali,  $\epsilon_a$ , e spostamenti orizzontali.

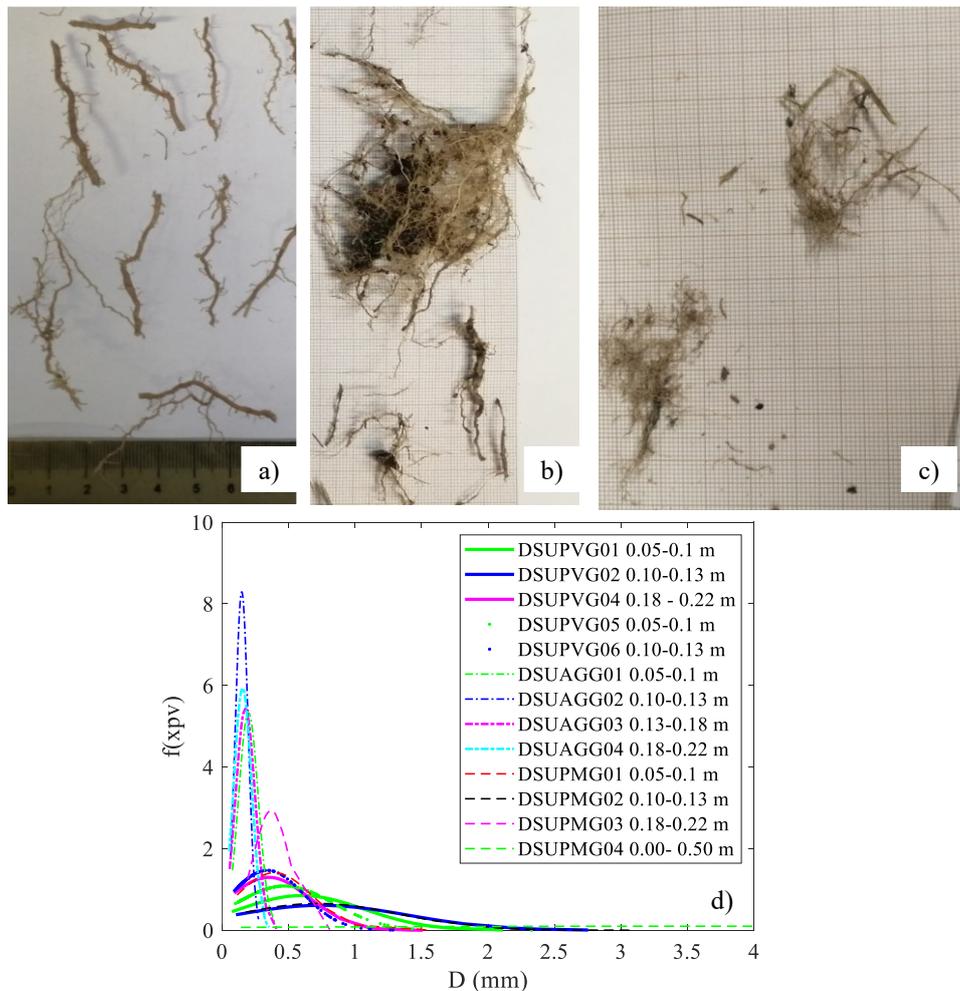


Fig 3. Esempio di apparato radicale delle tre specie erbacee: a) PV, b) PM e c) AG. Tali immagini sono state utilizzate per effettuare le misurazioni dei diametri con la tecnica dell'analisi delle immagini; d) i risultati dell'analisi sono riportati in termini di distribuzioni normali.

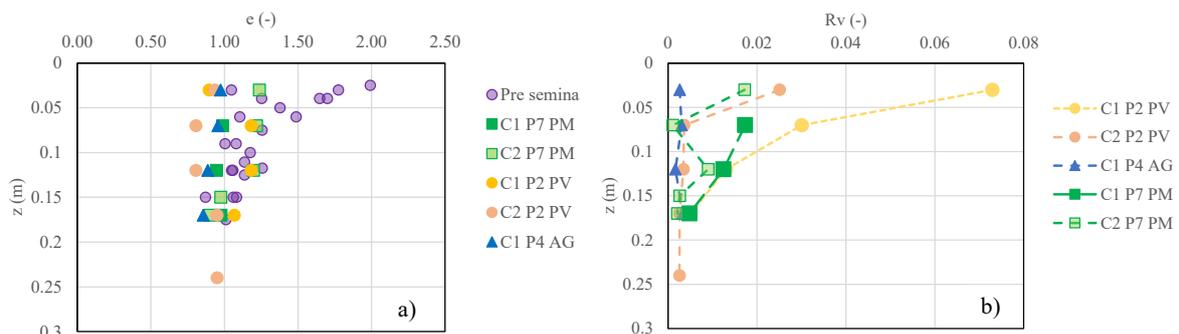


Fig 4. a) evoluzione dell'indice dei vuoti da terreno non vegetato (Pre semina) a terreno vegetato.

I campioni di terreno non vegetato presentano un comportamento dilatante e nessuno di essi raggiunge lo stato critico. I parametri di resistenza ottenuti sono  $c' = 6.44 \text{ kPa}$  e  $\varphi' = 39.3^\circ$ . Tali parametri sono in accordo con quelli riportati in letteratura per i terreni piroclastici (Moscariello et al., 2020 e 2022). Allo stesso modo, i campioni di terreno vegetato hanno un comportamento dilatante, e le tre specie erbacee inducono tutte un incremento della resistenza a taglio. L'evidenza sperimentale indica un complessivo incremento di resistenza del terreno, come atteso, ma con effetti differenti sulle aliquote attritiva e coesiva. Il maggior incremento di coesione si ha per la specie PM ( $c' = 42.43 \text{ kPa}$ ,  $\varphi' = 26.73^\circ$ ). Le specie PV ed AG mostrano un incremento di coesione paria a  $29.06 \text{ kPa}$  e  $20.05 \text{ kPa}$  rispettivamente, con angoli di attrito di poco inferiore a quello esibito dal terreno non vegetato.

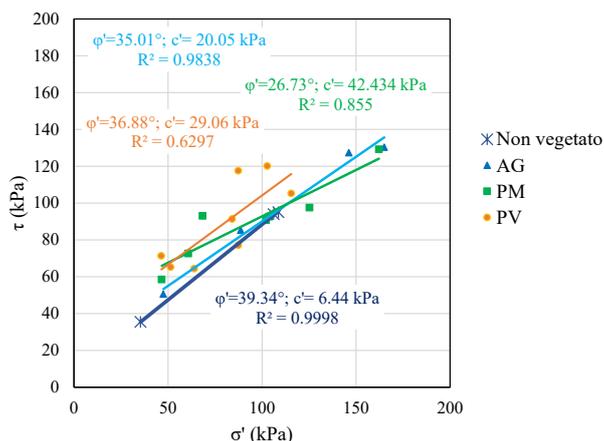


Fig 5. Criteri di resistenza del terreno non vegetato e di quello vegetato con le specie erbacee PV, PM e AG.

L'incremento meccanico dovuto alla presenza delle radici porta ad un incremento di coesione anche superiore a 10kPa.

## 6. Conclusioni

La nota riassume i risultati preliminari della sperimentazione, tuttora in corso, che ha come obiettivo caratterizzazione meccanica ed idraulica, in condizioni di parziale e totale saturazione di terreni piroclastici radicati con specie erbacee a radicazione profonda. I risultati illustrati nella nota sono stati ottenuti con campagne di misura in sito e con prove di taglio diretto su campioni indisturbati.

Le successive fasi della ricerca riguarderanno l'analisi del ruolo di apparati radicali rispetto alla risposta idro-meccanica di terreni piroclastici parzialmente saturi, frequentemente interessati dall'innesco di frane superficiali pluvio-indotte e da processi erosivi, anch'essi innescati da eventi meteorici intensi. Ulteriori percorsi tensio-deformativi e profondità di indagine maggiori dovranno essere investigate con prove di laboratorio ed in sito.

## Ringraziamenti

La presente ricerca è stata sostenuta dal Progetto "Sperimentazione ed analisi del comportamento idro-meccanico di terreni vegetati" (Responsabile del Progetto: prof. Sabatino Cuomo), e dalla Società Prati Armati S.r.l. (Ingg. Claudio e Marcello Zarotti).

## Bibliografia

- Bishop, A.W. (1959). The principle of effective stress. Tek Ukeblas; 39, pp. 859–863.
- Moscariello, M., Chen, Y., Cuomo, S., & Buscarnera, G. (2020). Modelling of simple shear tests on volcanic unsaturated sands. In E3S Web of Conferences (Vol. 195, p. 02021). EDP Sciences.
- Moscariello, M., Chen Y., Cuomo S., Buscarnera, G. (2022) Calibration of a constitutive model for volcanic sands under simple shear conditions. Acta Geotechnica
- Ng, C. W. W., Ni, J. J., Leung, A. K., Wang, Z. J. (2016). A new and simple water retention model for root-permeated soils. *Géotechnique Letters*, 6(1), 106-111.
- Ni, J. J., Leung, A. K., Ng, C. W. W., & Shao, W. (2018). Modelling hydro-mechanical reinforcements of plants to slope stability. *Computers and Geotechnics*, 95, 99-109.
- Preti F. Schwarz M. (2006) On root reinforcement modelling. Geophysical Research Abstracts, vol. 8, EGU General Assembly 2006, 2–7 April.
- Reubens, B., Poesen, J., Danjon, F., Geudens, G., Muys, B. (2007). The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. *Trees Struct. Funct.* 21 (4), 385–402.