



**DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA CIVILE PER  
L'AMBIENTE ED IL TERRITORIO**  
XVI Ciclo - Nuova Serie (2014-2017)  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO**

**THE EFFECTS OF ROOTS ON THE  
HYDRO-MECHANICAL BEHAVIOR OF  
UNSATURATED PYROCLASTIC SOILS**

**GLI EFFETTI DELLE RADICI SUL COMPORTAMENTO  
IDRO-MECCANICO DEI TERRENI PIROCLASTICI  
PARZIALMENTE SATURI**

**ING. VITTORIA CAPOBIANCO**

Relatore:  
PROF. ING. LEONARDO CASCINI

Coordinatore  
PROF. ING. FERNANDO FRATERNALI

Correlatori:  
PROF. ING. SABATINO CUOMO  
ING. VITO FORESTA

## ABSTRACT

Pyroclastic soils are widely diffused all over the world and they are characterized by high porosity and an open metastable internal structure. In situ they usually cover the shallowest layers of slopes in unsaturated conditions. As consequence, they are often involved in rainfall induced flow-like landslides triggered, during the rainy season, by water infiltration in unsaturated pyroclastic soils on steep slopes. The rain water infiltration leads to the volumetric collapse of the metastable structure in unsaturated conditions, and to liquefaction in fully saturated conditions. Once triggered, the propagating mass can reach great distances and cause many damages when it impacts with structures or infrastructures. These damages can be count as loss of life and economic damages.

As risk mitigation measures for these rainfall induced flow-like landslides, structural and passive control works such as dissipative basins and/or brindles have been usually adopted over the centuries.

An alternative sustainable risk mitigation measure can be represented by bio-engineering techniques, since they use natural elements such as woods or vegetation for stabilizing slopes prone to failure.

The effectiveness of bio-engineering practices depends firstly on the soil properties. This aspect was investigated by carrying out an experimental study on the effect of soil nutrients on the plant growth and how this is reflected on the soil hydraulic response. It was found that nutrient availability in soil enhance the plant growth, particularly the root number, and this increases the effectiveness of the vegetation on induced soil suction during evapotranspiration.

After this preliminary study, the hydro-mechanical behavior of pyroclastic soils (widely known as rich in nutrients) permeated by roots of perennial graminæ, typically used for controlling surface erosion, was investigated.

From drying (Evapotranspiration) and wetting (Infiltration) test results it can be claimed that the presence of roots influences mostly the shallowest layers of the soil (up to 1.2 m). In particular, during drying the effect of roots on induced soil suction is highlighted in dry season, when air temperatures are high and the vegetation is florid. On the other hand,

during wetting, the presence of roots tends to delay the water infiltration, even if the magnitude of suction reduction depends on the initial condition.

Oedometer tests provided original insights on the role of roots on the internal structure of these collapsible soils. In particular, it was found that during root growth, the soil structure tends to reduce its porosity and this is reflected into a reduction of the collapsibility of the root permeated soil during wetting in unsaturated condition.

Shear strength of rooted soil, performed through consolidated drained and undrained triaxial tests, show that the presence of roots increases both total cohesion and the internal friction angle, proportionally with the root biomass in the soil. Moreover, consolidated triaxial test results in undrained conditions showed that during post-failure stage the presence of roots reduces drastically the increment of pore water pressures avoiding the probability of static liquefaction of the material.

All those insights allow having a basic framework to design further experimental investigations in order to consider this technique a sustainable risk mitigation measure in unsaturated pyroclastic soils of the Campania region.

## SOMMARIO

La presente ricerca nasce dall'esigenza di investigare la fattibilità dell'utilizzo di piante erbacee a radicazione profonda, comunemente impiegate per contrastare l'erosione superficiale dei versanti, per la stabilizzazione di coltri piroclastiche che sono sistematicamente sede nel territorio campano di fenomeni di primo distacco indotti da precipitazioni e che, per la loro struttura metastabile, evolvono in colate rapide di fango.

In considerazione sia della complessità dell'argomento e sia della necessità di definire la complessa interazione tra apparato radicale e terreni parzialmente saturi, l'attività di ricerca si è focalizzata sulla quantificazione degli effetti che le piante erbacee a radicazione profonda inducono sulla variazione delle proprietà idro-meccaniche di terreni piroclastici tipici del territorio campano.

Al fine di perseguire l'obiettivo preposto, l'attività di ricerca svolta nell'ambito del corso di dottorato è stata divisa in 3 parti così definite:

- 1) Studio sperimentale sull'effetto delle radici sulla riduzione della collassabilità nei terreni piroclastici parzialmente saturi (I anno);
- 2) Studio sperimentale sull'effetto delle radici sulla variazione della risposta idraulica dei terreni piroclastici (I-II-III anno)
- 3) Studio sperimentale sull'effetto delle radici sulla variazione dei parametri di resistenza al taglio dei terreni radicati (III anno);

Ognuno di questi argomenti di ricerca è stato approfondito mediante l'analisi sistematica della letteratura ed un confronto diretto dei risultati sperimentali ottenuti in terreno piroclastico radicato rispetto a quelli conseguiti in terreno privo di vegetazione.

Nell'ambito del periodo di studio all'estero svolto presso l'Hong Kong University of Science and Technology (HKUST) nel corso del II anno di dottorato, è stato inoltre approfondito un argomento collaterale all'attività principale della ricerca che rappresenta il punto di partenza per il passaggio dalla sperimentazione in laboratorio a quella in sito e che ha riguardato lo:

- 4) Studio sperimentale dell'influenza delle proprietà chimiche del terreno sulla crescita delle radici.

L'analisi sistematica della letteratura si è concentrata sul comportamento dei terreni piroclastici parzialmente saturi che, avendo hanno una struttura metastabile, risultano collassabili a seguito della variazione del grado di saturazione indotto da precipitazioni meteoriche critiche.

Con riferimento a questo tema la letteratura fornisce elementi significativi per le cineriti di classe A (Bilotta et al., 2006; Bilotta et al., 2008), che si differenzia da quella di classe B per la granulometria più fine, valori di porosità maggiori e

densità specifica delle particelle solide minore.

Scarsi sono, viceversa, i contributi in letteratura sulla collassabilità della cinerite di classe B (Bilotta et al., 2005), che ricopre gli strati più superficiali delle coperture piroclastiche dei rilievi campani e che risultano le più suscettibili a fenomeni franosi pluvio-indotti (Cascini et al., 2008, 2013). Da sottolineare, infine, che il tema del ruolo delle radici nella stabilizzazione delle coltri piroclastiche è totalmente assente nella letteratura scientifica.

Sono state condotte prove a collasso in edometro convenzionale su provini di terreno rimaneggiato con contenuto d'acqua iniziale e tensione verticale netta di consolidazione costanti ma differenti valori di porosità iniziale. Per ogni prova effettuata è stato calcolato il coefficiente di collassabilità (Abelev, 1948) che è risultato direttamente proporzionale al valore della porosità iniziale del campione e ha confermato anche per le piroclastiti di classe B la stessa tendenza mostrata dalle piroclastiti di classe A a ridursi di volume a seguito di saturazione per tensione netta agente costante. Riduzione di volume che è risultata proporzionale all'aumento della porosità iniziale del terreno.

Sulla base di questi studi si è investigato il ruolo delle radici sulla modifica della struttura dei terreni piroclastici, in particolare sulla modifica del comportamento a collasso in condizioni di parziale saturazione. A tal fine una serie di campioni di terreno vegetato, con porosità iniziale differente, sono stati sottoposti a prove a collasso in edometro convenzionale.

Dai risultati ottenuti, si è osservata un'iniziale riduzione della porosità del terreno dovuta ad un duplice effetto: aumento del contenuto d'acqua e aumento del confinamento delle particelle per effetto della presenza delle radici. Tale effetto si è poi riflesso sui valori di coefficiente di collassabilità calcolati al termine delle prove, nettamente inferiori a quelli osservati per terreni non vegetati.

Tale studio è stato condotto mediante la realizzazione di un modello fisico di laboratorio che consiste in una colonna di dimensioni 200 cm di altezza e 20 cm di diametro, riempita di terreno piroclastico secondo le tecniche standard consigliate dalla letteratura (Ladd, 1977). Sensori di contenuto d'acqua e tensiometri per la misura della suzione sono stati applicati a 4 differenti profondità di indagine lungo la colonna. E' stata poi realizzata una seconda colonna di terreno non vegetato anch'essa strumentata per effettuare il confronto con i risultati ottenuti nella colonna vegetata.

Nel corso della sperimentazione sono stati effettuati due tipi di test:

1. Test di drying (Evapotraspirazione) in varie stagioni dell'anno allo scopo di quantificare la variazione di suzione e del contenuto d'acqua per effetto dei processi fisici legati all'interazione apparato radicale-ambiente;
2. Test di wetting (Infiltrazione con pioggia artificiale) al fine di quantificare l'abbattimento della riduzione di suzione durante i processi

di infiltrazione monodimensionale dovuto alla presenza dell'apparato radicale.

I risultati conseguiti hanno confermato che la presenza di un apparato radicale profondo in terreni piroclastici parzialmente saturi comporta una articolata e complessa modifica della loro risposta idraulica, soprattutto negli strati più superficiali, in cui le variazioni di suzione e contenuto d'acqua per effetto delle sollecitazioni esterne (drying o wetting) sono risultate più evidenti.

Le misure dei parametri idraulici realizzate nel corso della sperimentazione costituiranno dati di input per future modellazioni numeriche.

Il rinforzo meccanico delle radici nei terreni è stato ampiamente studiato in letteratura attraverso prove di taglio diretto in sito e in laboratorio effettuate su vari tipi di terreni radicati con radici di piante o alberi (Waldron, 1977; Wu, 2013). Tuttavia le prove di taglio diretto portano con sé una serie di limitazioni: la superficie di scorrimento è imposta, la prova avviene solo in condizioni drenate, non è possibile misurare le variazioni di pressioni neutre.

I risultati presenti nella letteratura evidenziano sia il ricorso costante a prove di taglio diretto e sia opinioni contrastanti in merito al ruolo che le radici giocano sul rinforzo meccanico del terreno radicato (Graf et al., 2009; Zhang et al., 2010; Hu et al., 2013). Inoltre, l'effetto di un apparato radicale di piante erbacee sulla resistenza a rottura dei terreni, in particolare quelli di origine piroclastica non è ancora presente in letteratura.

Le prove triassiali consolidate drenate e non drenate sono state condotte su provini di terreno radicati e su provini di terreno non radicati al fine di quantificare l'effetto delle radici sul rinforzo meccanico dei terreni piroclastici. I provini di terreno radicati sono stati prelevati dalla colonna di terreno realizzata nell'ambito dell'attività di ricerca sulla risposta idraulica richiamata nella parte 2. A tal fine è stata messa a punto una procedura di estrusione e di campionamento di provini radicati da destinare a prove triassiali ed esportabile per altri modelli fisici.

I parametri di resistenza al taglio sono stati correlati con le caratteristiche delle radici al fine di comprendere le modalità con le quali l'apparato radicale influenza la resistenza al taglio del terreno.

Dai risultati si evince che in generale la presenza di un apparato radicale produce un rinforzo meccanico, ancorché di entità limitata, dei terreni attraverso un duplice effetto: aumento dell'angolo d'attrito interno e aumento della coesione della matrice terreno-radici. Ben più significativo è, viceversa, risultato il comportamento a rottura dei terreni in condizioni non drenate essendosi sistematicamente osservata una tendenza del materiale radicato a cambiare comportamento da contraente a dilatante durante l'applicazione dello sforzo deviatorico. Aspetto questo di primaria importanza ai fini della inibizione della collassabilità nelle coltri piroclastiche radicate e, quindi, della conseguente evoluzione in colate di fango.

L'effetto benefico della vegetazione sulla stabilizzazione dei pendii è strettamente legato alla distribuzione spaziale dell'apparato radicale all'interno del sottosuolo che dipende principalmente dal PH del terreno e dalla sua composizione chimica (Stokes et al., 2009). Per studiare l'influenza della composizione chimica (presenza dei principali nutrienti) del terreno sullo sviluppo delle radici è stata condotta una sperimentazione presso il laboratorio di Geotecnica dell'Hong Kong University of Science and Technology sotto la supervisione del prof. Charles W.W. Ng della durata di 5 mesi.

La sperimentazione condotta presso il laboratorio di Geotecnica della HKUST è stata finalizzata allo studio dell'effetto dell'applicazione dei principali nutrienti (nitrogeno: N, fosforo: P e potassio: K) nel terreno CDG (Completely Decomposed Granite) di Hong Kong, sullo sviluppo dell'apparato radicale e la variazione di suzione da esso indotto. Due serie di colonne vegetate (3 colonne per ogni serie) sono state disposte in una camera a temperatura e umidità controllata: in una serie è periodicamente applicata una soluzione liquida di nutrienti (NPK), mentre l'altra è stata irrigata con acqua. I cilindri sono stati opportunamente strumentati a varie profondità con sensori di umidità e tensiometri, per la misura dei parametri idraulici durante i test idraulici effettuati. Al termine della crescita radicale sono state confrontate le caratteristiche delle radici e dell'apparato fogliare delle piante cresciute in terreno ricco di nutrienti con quelle cresciute in terreno tal quale.

Si è osservato in generale un miglioramento dello stato di salute che si riflette sia in un aumento del numero di foglie nella zona epigea, sia in un incremento della densità radicale, e della crescita di radici laterali, nelle piante cresciute in terreno ricco di nutrienti. Dalle misure di suzione e contenuto d'acqua durante i test di drying effettuati sui cilindri, inoltre, il miglioramento dello stato di salute della pianta ha contribuito ad una risposta idraulica maggiore da parte del terreno, in cui si sono misurati valori di suzione nettamente maggiori rispetto a quelli misurati in terreno senza nutrienti. Tale studio ha rappresentato un punto di partenza per la comprensione dello sviluppo spaziale delle radici nei terreni piroclastici, ricchi di potassio e, in minore quantità, di azoto e fosforo, dal momento che la sperimentazione condotta a Salerno è limitata ad uno sviluppo in verticale dell'apparato radicale (colonna 1D).

Dallo studio sperimentale condotto nel corso dei tre anni di dottorato, i risultati in termini di rinforzo idro-meccanico da parte di piante graminacee a radicazione profonda nei terreni piroclastici possono considerarsi estremamente promettenti aprendo la strada all'impiego di questa tecnica eco-sostenibile nella stabilizzazione dei versanti naturali del territorio campano soggetti a innesco di frane indotte da precipitazioni. Sulla base della sperimentazione svolta si potrà, quindi, dare l'avvio alla necessaria sperimentazione tramite la realizzazione di campi prova nell'ambito dei quali investigare la effettiva distribuzione spaziale delle radici e la loro risposta idro-meccanica in sito.