



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

FLORE

Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

Metodologie sperimentali per l'esecuzione di provedi taglio diretto su terre rinforzate con radici **Experimental methodologies for the direct**

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

Original Citation:

Metodologie sperimentali per l'esecuzione di provedi taglio diretto su terre rinforzate con radici
Experimental methodologies for the direct shear testson soils reinforced by roots / F.Giadrossich;
F.Preti; E.Guastini; P.Vannocci. - In: GEOLOGIA TECNICA & AMBIENTALE. - ISSN 1722-0025. - STAMPA. -
4/2010:(2010), pp. 5-12.

Availability:

The webpage <https://hdl.handle.net/2158/406066> of the repository was last updated on

Terms of use:

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

Publisher copyright claim:

La data sopra indicata si riferisce all'ultimo aggiornamento della scheda del Repository FloRe - The above-mentioned date refers to the last update of the record in the Institutional Repository FloRe

(Article begins on next page)



Metodologie sperimentali per l'esecuzione di prove di taglio diretto su terre rinforzate con radici

Experimental methodologies for the direct shear tests on soils reinforced by roots

Giadrossich F.^{1*}, Guastini E.¹, Preti F.¹, Vannocci P.²

¹ Dipartimento di Economia, Ingegneria, Scienze e Tecnologie Agrarie e Forestali, Università degli Studi di Firenze, Via S. Bonaventura, 13 - 50145 Firenze.

² Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, Via G. La Pira, 4 - 50121 Firenze

(* Corresponding author: Filippo Giadrossich - Dipartimento di Economia, Ingegneria, Scienze e Tecnologie Agrarie e Forestali, Università degli Studi di Firenze - Via S. Bonaventura, 13 - 50145 Firenze - e-mail: filippo.giadrossich@unifi.it

a b s t r a c t

Root apparatus profoundly modify the hydrological and geotechnical characteristics of the soil, making it less inclined to collapse when under shear stress. During the last years many authors carried out different researches in the attempt to scientifically establish the actual role of vegetation on the slopes and at which extent. In this sense, models have been developed capable of foreseeing potential risks. These models are based on assumptions which are empirical or have many experimental variables, tweaked with simulations, both in situ and in the laboratory, using plants or artificial fibres of different nature and shear apparatus built on purpose.

*The experimental tests proposed in this paper have been carried out following the direct shear test, according to the standard defined by Casagrande, and they examine in a small scale the behaviour of rooted soil samples. For the tests we used *Castanea sativa M.* and *Robinia pseudoacacia L.* roots. The test conditions are deliberately and necessarily simplified, carried out on recreated test pieces, using two different methods developed during the experiments, using a variable number of roots. The interesting aspect of this kind of test, is the possibility to underline the behaviour of the soil until its failure (but not roots failure) occurs. At the same time we carried out tensile tests on roots of the same species.*

Besides the laboratory tests, in field tests were carried out with the Bore-hole Shear Test (BST), with the hypothesis of the same experimental conditions of the laboratory.

Results were compared to the most recent models for the calculation of the additional cohesion and also the relation between roots activation strength and the resistance to failure was analysed. The results obtained with the proposed methods are coherent with the expected results, and they show an increase of the apparent cohesion and not significant variations of the angle of internal friction. Analogously, the data in situ show that the soil shear strength is positively modified by the increase of the RAR, which is in inverse proportion to the depth. The use of the Bore-hole shear test deserves to be deepened, in order to know the actual efficacy of this tool in perceiving the soil root density.

Keywords: *Casagrande direct shear test, Roots, Castanea sativa M., Robinia Pseudoacacia L., Bore-hole shear test.*

1. Introduzione

L'apparato radicale nel suolo modifica notevolmente le caratteristiche strutturali e di resistenza a taglio. La presenza della vegetazione sui versanti è stata ed è tutt'ora uno degli aspetti più dibattuti in relazione alla stabilità del terreno in pendenza. In particolar modo, dagli anni settanta ad oggi il ruolo della vegetazione è stato indagato innumerevoli volte e con approcci diversi, *in situ* ed in laboratorio, utilizzando piante o fibre di varia natura e apparati di taglio appositamente costruiti.

Sono state formulate varie teorie per cercare di stabilirne l'effettiva entità e sviluppare modelli matematici in grado di prevedere l'approssimarsi di eventuali situazioni di rischio.

Il concetto di base rimane comunque sempre lo stesso: nel momento in cui nel terreno considerato crescono delle radici, la situazione può essere assimilata a quella di una matrice in cui siano immerse delle fibre sulle quali vengono distribuiti gli sforzi.

L'effetto più rilevante della presenza di radici in un terreno è, dal punto di vista dei movimenti di versante, l'incremento che queste forniscono alla resistenza al taglio. L'interesse di questa proprietà risulta evidente nel momento in cui si considera che l'aumento delle pressioni interstiziali in un terreno (per esempio a causa di un



evento piovoso) determina una riduzione della resistenza a taglio della matrice che quindi muove verso una condizione di instabilità. Le caratteristiche morfologiche delle fibre, la loro distribuzione e orientamento, la resistenza a trazione, il modulo elastico e l'attrito che si genera all'interfaccia suolo-radice sono in relazione con l'entità del rinforzo fornito. Uno dei parametri meccanici di più difficile stima è la quantificazione dell'attrito tra suolo e radice [WALDRON, 1977; WU *et al.*, 1988a; GRAY e BARKER, 2004; DUPUY *et al.*, 2005a; WU, 2007] il quale è influenzato dal tipo di suolo, coesivo o non coesivo, dall'angolo di attrito interno e dal contenuto d'acqua [FAN e SU, 2008; POLLEN, 2008; SIVAKUMAR BABU *et al.*, 2008]. ENNOS [1989] riporta inoltre che i capillari e gli essudati radicali favoriscono l'ancoraggio delle giovani radici migliorando il contatto e quindi l'attrito. Queste caratteristiche sono considerate rilevanti nella prevenzione di frane superficiali e tali parametri vengono utilizzati nei modelli atti a stimare la resistenza al taglio del terreno radicato [GRAY e LIESER, 1982; POLLEN, 2004; SCHWARZ, 2009; GREENWAY, 1987; GREENWOOD *et al.*, 2004; CAMMERAAT *et al.*, 2005; VAN BEEK *et al.*, 2005]. OPERSTEIN e FRYDMAN [2000] hanno riscontrato un andamento essenzialmente costante dell'angolo di attrito interno ed un aumento della coesione apparente all'aumentare della quantità di radici. L'angolo d'attrito interno del materiale è scarsamente influenzato dalla presenza di rinforzi [WALDRON e DAKESSIAN, 1981; GRAY e OHASHI, 1983] e dallo spessore della zona di taglio [ABERNETHY e RUTHERFURD, 2001]. Altri autori affermano che lo sforzo di taglio è direttamente proporzionale al rapporto tra la superficie radicata e la lunghezza delle radici al di sopra di un certo limite. Questi risultati sono supportati da diversi autori che hanno usato prove triassiali consolidate drenate come GRAY e AL-REFEAI [1986].

È interessante notare come esistano parametri che risultano maggiormente significativi rispetto alle differenze di resistenza ultima a trazione per quantificare la resistenza a taglio conferita al terreno dalla presenza delle radici come la morfologia e l'elasticità della radice: si ricordano in merito gli studi sulla resistenza a sfilamento (attrito) delle radici [RIESTENBERG, 1994; STOKES *et al.*, 1996; NORRIS, 2005, SCHWARZ *et al.*, 2010], così come quelli relativi alle differenze nella distribuzione spaziale e nell'orientamento dell'apparato radicale [ABERNETHY e RUTHERFURD, 2001].

Molti autori rilevano che il maggior contributo alla stabilità del terreno è fornito dalle radici sottili e identificano il diametro di queste nell'intervallo da 1 a 2 mm [O'LOUGHLIN, 1974a; BURROUGHES e THOMAS, 1977; O'LOUGHLIN e WATSON, 1979; ZIEMER, 1981; JACKSON *et al.*, 1997; NILAWERA e NUTALAYA, 1999; OPERSTEIN e FRYDMAN, 2000; ABERNETHY e RUTHERFURD, 2001; GRAY e BARKER, 2004; TOSI, 2007; DE BAETS *et al.*, 2008; DOCKER e HUBBLE, 2008].

Il metodo proposto da WU [1976] per calcolare la resistenza del terreno radicato si basa sulla resistenza ultima a trazione delle radici coinvolte. Grazie a prove sperimentali, molti autori hanno potuto verificare negli anni che esso porta a sovrastime ingenti, tra il 91% e il 215% della resistenza a taglio misurata direttamente [POLLEN *et al.*, 2004; POLLEN e SIMON, 2005; MICKOVSKI *et al.*, 2007; DOCKER e HUBBLE, 2008]. Soluzioni per questa discrepanza hanno visto sia l'adozione di coefficienti di riduzione [GREENWOOD *et al.*, 2004; POLLEN *et al.*, 2004; PRETI, 2006] che la proposta di nuovi modelli previsionali [POLLEN *et al.*, 2004; SCHWARZ *et al.*, 2009].

Numerose sono state le prove di taglio effettuate su terreno rinforzato da radici o fibre naturali o artificiali, sia con prove *in situ* che con prove di laboratorio [ENDO e TSURUTA, 1969; WALDRON, 1977; WALDRON e DAKESSIAN, 1981; WALDRON e DAKESSIAN, 1982; GRAY e AL-REFEAI, 1986; ARENICZ e CHOWDHURY, 1988; SHEWBRIDGE e SITAR, 1989; SCHMIDT e ROERING, 2001; DOCKER e HUBBLE, 2008].

La distribuzione e la disposizione delle radici risultano uno dei parametri di più complessa determinazione dato che solamente con lo scavo manuale si può giungere a studiare sistemi radicali intatti. La disposizione di fibre disposte casualmente rispetto al terreno è un parametro che influenza le caratteristiche di resistenza della matrice, giungendo al maggior contributo per inclinazioni tra i 40° e i 70° [GRAY e LIESER, 1982; WU, 2007; DANJON *et al.*, 2007].

Ciò posto, nella preparazione dei provini è stato utilizzato il modello proposto da numerosi autori, secondo cui l'attraversamento del piano di taglio da parte di fibre perpendicolari offre un'approssimazione sufficiente per la stima del rinforzo dovuto alla naturale disposizione casuale degli apparati radicali [GRAY e OHASHI, 1983; MAHER e GRAY, 1990; NIKLAS, 1992; GRAY e BARKER, 2004; POLLEN *et al.*, 2004; STOKES *et al.*, 2007].

I test eseguiti nel presente lavoro utilizzano gli standard delle prove geotecniche con l'aggiunta delle radici, al fine di verificare, a piccola scala, la proprietà di un terreno radicato secondo il modello proposto e sviluppato da WU [1976], WALDRON [1977] e WU *et al.* [1979]. Tale modello è basato sulla resistenza a trazione delle radici e sulla percentuale di area radicata intesa come somma dell'area della sezione di ogni radice passante un piano



orizzontale posto ad una certa profondità (denominata RAR, Root Area Ratio), ed un coefficiente di correzione. La forza aggiuntiva si manifesta come un incremento di coesione proporzionale al numero di radici ed al loro diametro. In riferimento al modello di rottura di Coulomb - Terzaghi, estendendo l'equazione al suolo radicato, esso diventa:

$$\tau = c + \Delta s + \sigma_n \cdot \tan\phi$$

dove:

τ = resistenza al taglio

c = coesione totale

Δs = coesione aggiuntiva dovuta alle radici

σ_n = tensione normale al netto della pressione interstiziale

ϕ = angolo di attrito interno del terreno

L'equazione di WU [1976] utilizzata con le prove di taglio si basa su tre assunti: le radici sono disposte ortogonalmente al piano di taglio, le radici sono flessibili, linearmente elastiche e di diametro uniforme, l'angolo di attrito del suolo non dipende dalla presenza di radici.

Il modello assume che la forza aggiuntiva dovuta alle radici dipenda dall'area totale delle radici che intersecano il piano di taglio:

$$\Delta s = Tr (Ar/A)$$

Tr è la media della resistenza a trazione delle radici e (Ar/A) è il rapporto tra la somma dell'area delle radici che attraversano il piano di taglio e l'area del terreno considerato (che viene chiamato RAR, acronimo di Root Area Ratio).

La relazione tra sforzo di trazione e diametro della radice è generalmente accettata come seguire una legge esponenziale [HATHAWAY e PENNY, 1975; BURROUGHES e THOMAS, 1977; ABE e IWAMOTO, 1986; COMMANDEUR e PYLES, 1991; GRAY e SOTIR, 1996; NILAWEERA e NUTALAYA, 1999; BISCHETTI *et al.*, 2005; PRETI e GIADROSSICH, 2009] ed è ottenuta sperimentalmente per ogni specie vegetale considerata:

$$Tr = a D^{-b}$$

dove a e b sono parametri dovuti alle specie e D è il diametro della radice. Recenti ricerche di GENET *et al.* [2005, 2008] mostrano che la resistenza a trazione dipende dal contenuto di cellulosa, che può variare con le locali condizioni di crescita.

La componente tangenziale si oppone alla forza di taglio e la componente normale aumenta la pressione sulla superficie di taglio e la resistenza del suolo come mostrato nella figura 1. Il rinforzo dovuto alle fibre (considerando in termini di coesione delle radici) può essere scritta come:

$$\Delta s = Tr (Ar/A) (\cos\alpha \tan\phi + \sin\alpha)$$

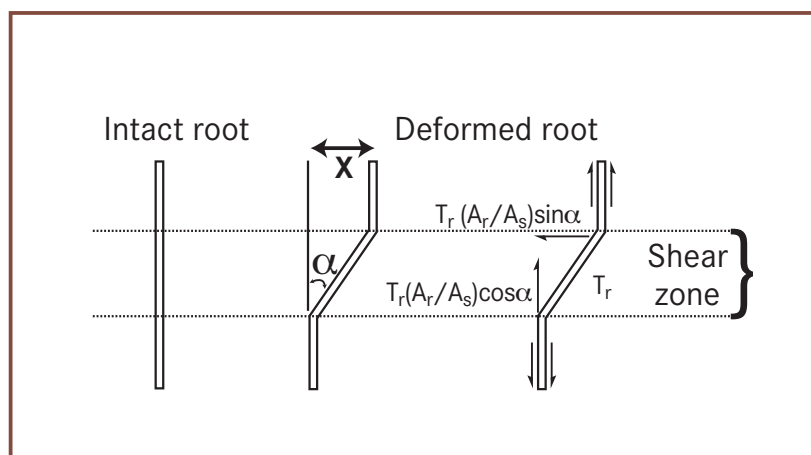


Fig. 1 - Da SCHMIDT e ROERING, 2001.



dove ϕ è l'angolo di attrito interno, α è l'angolo formato dalla radice in verticale e la sua deformazione. Si può dimostrare che per α compreso tra 40° e 90° e ϕ compreso tra 25° e 40° , che sono considerati generalmente valori realistici [WU *et al.*, 1979], la componente tangenziale assume valori compresi tra 1,0 e 1,3. L'uso comune del valore di 1.15 [WALDRON, 1977] o di 1.2 [WU *et al.*, 1979], potrebbe portare ad una significativa sovrastima della coesione delle radici [POLLEN *et al.*, 2005; SCHWARZ *et al.*, 2009]. L'equazione è scritta frequentemente in una formula generale come segue:

$$\Delta s = k' \text{Tr} (A_r/A) = 1.2 \text{Tr} (A_r/A)$$

dove k' rappresenta il fattore per la scomposizione della forza di trazione delle radici in accordo con l'angolo di distorsione delle stesse rispetto al piano di taglio.

Il modello originale assume che tutte le radici attraversando la superficie di taglio si rompino allo stesso tempo. Nei casi reali, ci si aspettava che le radici si rompessero in tempi diversi, basandosi sul loro spessore, sulla loro direzione di crescita e sulla loro tortuosità. Tale situazione, tipica di materiali compositi, costituiti da fibre infilate in una matrice, ed il fenomeno della progressiva rottura di un fascio di radici durante lo sforzo di trazione è stato dimostrato da una serie di esperimenti di trazione ed è stato osservato da diversi autori [WALDRON e DAKESSIAN, 1981; RIESTENBERG, 1994; NORRIS, 2005; DOCKER e HUBBLE, 2008; OPERSTEIN e FRYDMAN, 2000; POLLEN e SIMON, 2005; SCHWARZ *et al.*, 2009]. Il modello tende a sovrastimare il rinforzo dovuto alle radici, ed il valore ottenuto può essere considerato solo come il massimo dei rinforzi potenziali. Un fattore K'' può essere introdotto per tenere conto della rottura non simultanea delle radici assumendo un valore medio tra quelli ottenuti da diversi autori pari a 0.39 [PRETI, 2006], e l'equazione può essere scritta come segue:

$$\Delta s = k' k'' \text{Tr} (A_r/A) = 1.2 \cdot 0.39 \text{Tr} (A_r/A)$$

Materiali e metodi

Suolo

Il suolo utilizzato per i test è stato prelevato in località Vinchiana (Lucca), in un versante vegetato sul quale è avvenuta una frana nel 2001, in conseguenza di piogge che causarono numerose frane e smottamenti in varie località della Toscana. I prelievi dei campioni di suolo sono stati quattro, due su terreno superficiale e due su terreno sotto il piano di scivolamento, indicati rispettivamente C1, C2 e C3, C4.

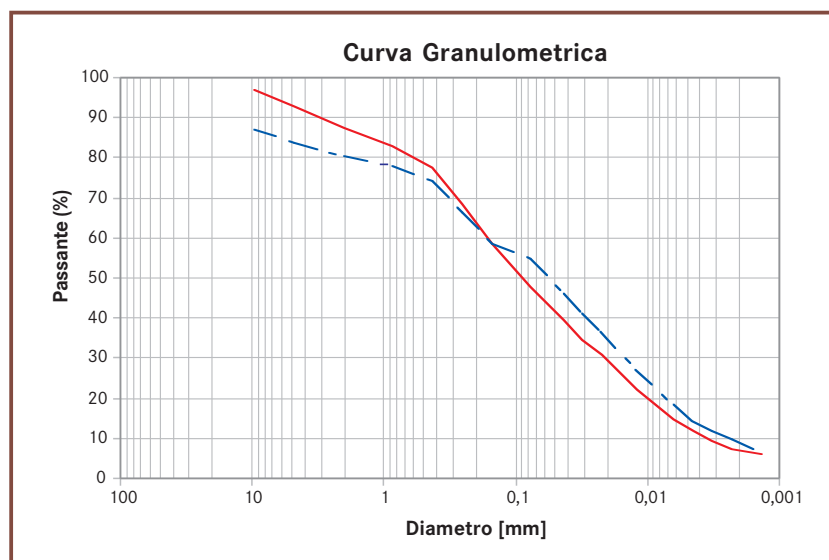


Fig. 2 - Curve granulometriche medie dei campioni superficiali (C1 e C2, linea rossa continua) e profondi (C3 e C4, linea blu tratteggiata); si nota negli strati più profondi il maggiore contenuto di particelle di piccolo diametro, così come la presenza di materiale litico di maggiori dimensioni.

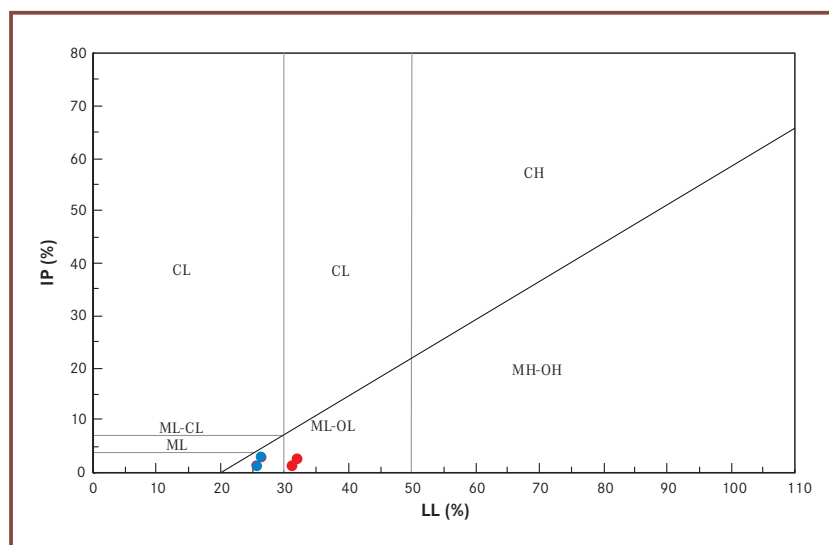


Fig. 3 - Diagramma di Casagrande per la classificazione del terreno relativo ai campioni superficiali C1 e C2 in azzurro e ai campioni profondi C3 e C4 in rosso. Si nota la maggiore proprietà plastica del terreno prelevato al di sotto del piano di scivolamento.

Il procedimento con il quale è stato preparato il materiale per la costruzione dei provini, considerando i valori del suolo indisturbato, ha seguito i seguenti criteri:

- essiccazione in forno del campione di terreno (a temperature non superiori a 110°C);
- setacciatura del campione, utilizzando la frazione di campione passante al setaccio 40 (0.425 mm)
- 160 g di terreno anidro;
- 32 g (20%) di acqua distillata;
- saturazione del campione.

Tutti i provini sono stati realizzati con medesimi valori di densità, umidità iniziale e tipo di materiale.

Radici

Le radici utilizzate nei provini appartengono a due delle specie tra le più diffuse sull'Appennino toscano: Robinia (*Robinia pseudoacacia* L.) e Castagno (*Castanea sativa* M.). Per ottenere la RAR desiderata all'interno del provino è stato utilizzato un numero variabile di radici mantenendo costante il diametro, prossimo al millimetro ($1 \pm 0,05$ mm), questo sia per un fattore di scala del provino che per eliminare la variabile della diversa distribuzione delle forze tra radici di diverso diametro, che in questo tipo di esperimento non potrebbe essere valutata. Come assunto da WU *et al.* [1979], si suppone nel presente lavoro che le forze siano uniformemente distribuite tra le radici. I valori di RAR utilizzati sono 0,0446%, 0,1086% e 0,1753%, corrispondenti rispettivamente a 2, 5 e 8 radici. In un suolo vegetato, mediamente, i valori di RAR di 0,05-0,17% erano stato misurati in campo da WU [1976], mentre altri autori hanno riscontrato intervalli diversi indifferenti soprassuoli tra 0,14-0,93% [MEGAHAN *et al.*, 1978, citato in ABERNETHY e RUTHERFURD, 2001], tra 0,01-0,756% [ABERNETHY e RUTHERFURD, 2001], e tra 0,08-0,8% [DE BAETS, 2008].

Costruzione dei provini

Le prove di taglio sono state effettuate su provini ricostruiti [RAVILOLO, 1993], in maniera da poter inserire in ogni provino un numero di radici tale da raggiungere un rapporto di area radicata (R.A.R.) prefissato. Questo, insieme all'utilizzo di radici di diametro uniforme, porta alla realizzazione di una serie di prove in condizioni pressoché costanti; si ha quindi la possibilità di analizzare i dati di molte prove paragonabili, valutarne l'andamento medio e quindi giungere ad un risultato al netto di variazioni istantanee. La costruzione di provini radicati ha



avuto un suo sviluppo perfezionando di volta in volta la tecnica. Al terzo tentativo siamo arrivati a poter costruire provini in modo standard e ripetibile.

Si riportano in breve le fasi che hanno portato a sviluppare tale metodologia.

Inizialmente sono state eseguite prove di taglio diretto su provini standard, su materiale setacciato, per verificare le effettive proprietà meccaniche. Nei primi tentativi di preparazione con le radici, queste venivano fatte passare attraverso un piano d'appoggio forato (simile a quello della figura 5) e tenute verticali a mano mentre il provino veniva loro ricostruito intorno. I problemi riscontrati riguardavano principalmente la stabilità degli stessi blocchetti di terra: la movimentazione di questi comportava sistematicamente il loro sfaldamento, contrariamente a quanto succedeva con i provini non radicati. Una doppia considerazione ha portato allo sviluppo di un secondo metodo di creazione dei provini, reputato più fedele allo stato naturale: l'accrescimento della radice e la produzione di essudati radicali creano attorno alla radice una zona di terreno a densità leggermente maggiore; nella costruzione dei provini la porzione più prossima alle radici era sistematicamente la meno compattata, per il rischio sia di ledere la radice stessa, sia di compromettere l'ortogonalità al piano di taglio. È stato quindi ideato un supporto per creare preventivamente dei "panetti" di terra attorno alle singole radici e che sarebbero stati inseriti nel provino (ved. figure 4 e 5).

Come si può osservare dalla figura 4, la terra viene posta nella canaletta e leggermente pressata per creare un "letto" su cui disporre la radice che spoggerà attraverso le due feritoie. Altra terra viene pressata sopra fino a creare un panetto quasi cilindrico; questo sarà poi sfilato dalla canaletta, la quale è flessibile per facilitare l'estrazione. Il provino viene realizzato su apposite piastre che presentano 5 (per provini con 2 o 5 radici) o 8 (per provini con 8 radici) fori che consentono di appoggiare i panetti verticalmente (Fig. 5) lasciando fuoriuscire la radice dalla porzione inferiore. Nonostante fosse un buon metodo, la conclusione a cui si è giunti è stata che fosse opportuno sviluppare una nuova metodologia in quanto la costipazione del suolo intorno ai panetti per completare il provino risultava molto difficoltosa all'aumentare del numero di radici. I provini costruiti con questo metodo sono contrassegnati dalla sigla PTT.



Fig. 4 e 5 - Blocchetto di preparazione dei panetti di terra e fase di costruzione di un provino PTT.

Per risolvere le difficoltà del metodo PTT, è stato ideato un sistema che prevede la costruzione con stratificazione ortogonale al piano di taglio, anziché parallela. A questo scopo è stata realizzata una scatola di plexiglass ove dar forma al provino, con feritoie attraverso le quali vengono inserite le radici in fase di costruzione (Fig. 6 e 7). La costruzione prevede l'alternarsi di strati di terreno su cui vengono di volta in volta appoggiate le radici. I provini costruiti con questo metodo sono contrassegnati dalla sigla PLX. Le radici sporgono di circa 2 centimetri dalla superficie del provino in modo che quando quest'ultimo viene inserito nella scatola di taglio, le radici possano essere piegate in direzione ortogonale alle alette della piastra metallica forata, garantendo un adeguato ancoraggio durante la prova.

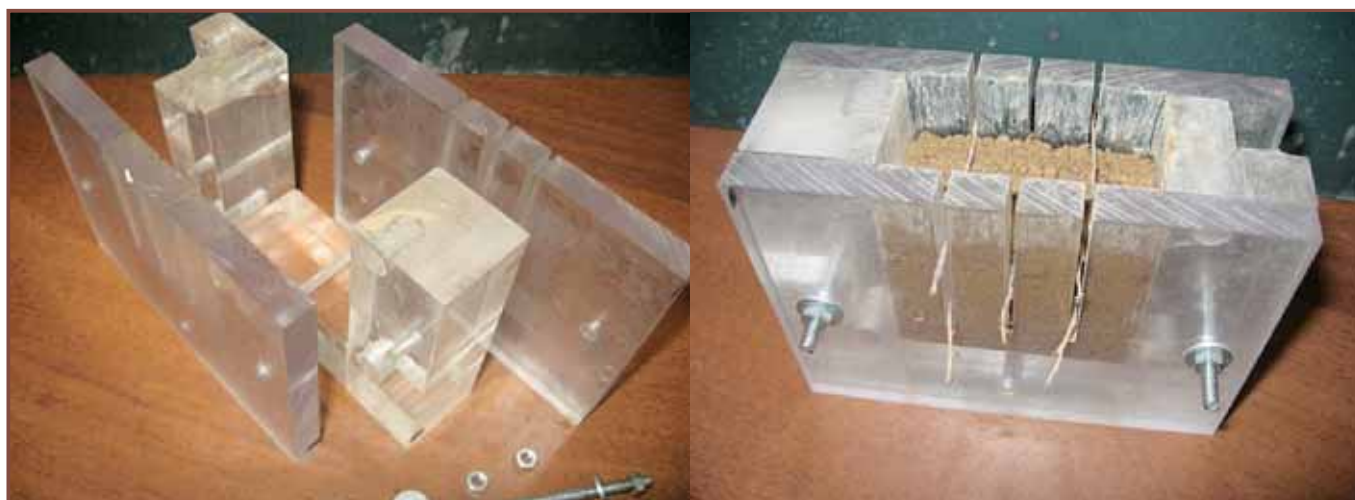


Fig. 6 e 7 - Scatola di plexiglass esplosa e fase di costruzione di un provino PLX.

La tabella 1 mostra tutte le prove realizzate suddivise per tipologie di provino, specie utilizzata. La scelta dei valori di carico (50, 100, 150, 200 kPa) ha voluto simulare le pressioni che si possono riscontrare a profondità diverse in un terreno che può essere soggetto a frane superficiali. Da campioni prelevati al di sotto del piano di scorrimento (circa 1 m di profondità) si è potuto constatare che le radici erano praticamente assenti e di conseguenza sono state escluse prove radicate a consolidazioni maggiori. Le prove di taglio sono state condotte in condizioni consolidate drenate (CD) con velocità cautelativa pari a 0,004 mm/min.

Oltre alle prove di laboratorio sono state realizzate in campo una serie di prove con il Borehole Shear Test (BST) [LUTENEGGER A.J., HALBERG G.R., 1981; DAPPORTO S. *et al.*, 2000; TOFANI V. *et al.*, 2006] a consolidazioni di 20, 30, 40 e 50 kPa e profondità di 20, 40 e 60 cm.

Tab. 1 - Schema riassuntivo dei provini realizzati con le due specie utilizzate *Robinia pseudoacacia* (RP) e *Castanea sativa* (CS); si distinguono la preparazione classica di provino ricostruito senza radici (standard), quella con panetto di terra (PPT) e quella con scatola di plexiglass (PLX). Le prove con il Borehole Shear Test sono state eseguite su due fori, ognuno a tre profondità, con quattro valori di pressione e tempi di consolidazione di 10-15 minuti.

Specie	Preparazione	N. radici	Consolidazione
-	STANDARD	-	50 kPa, 100 kPa, 150 kPa
RP	PTT	2	50 kPa, 100 kPa, 150 kPa
		5	50 kPa, 100 kPa, 150 kPa
		8	50 kPa, 100 kPa, 150 kPa
CS	PTT	2	50 kPa, 100 kPa, 150 kPa
		5	50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa
		8	50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa
	PLX	2	50 kPa, 100 kPa, 150 kPa
		5	50 kPa, 100 kPa, 150 kPa
		8	50 kPa, 100 kPa, 150 kPa
		Profondità	
-	BST	20 cm	20 kPa, 30 kPa, 40 kPa, 50 kPa
		40 cm	20 kPa, 30 kPa, 40 kPa, 50 kPa
		60 cm	20 kPa, 30 kPa, 40 kPa, 50 kPa



Risultati

I seguenti grafici riassumono i risultati delle prove condotte in laboratorio, vedendo posti in relazione i valori di τ , resistenza a taglio [kPa] e di carico normale σ [kPa]. Le figure 8, 9 e 10 riportano la coesione apparente, determinata dall'intercetta sull'asse delle ordinate, e l'angolo d'attrito interno in funzione del numero di radici presenti, ognuno rappresentato dalla pendenza della retta di interpolazione. La figura 8 è relativa ai provini con radici di Robinia, la figura 9 relativa ai provini con radici di Castagno, mentre la figura 10 rappresenta i dati cumulati. Osservando i risultati considerando le singole specie non risultano differenze significative. È rilevante notare che all'aumentare delle prove considerate, diminuiscono le differenze che si possono riscontrare tra provini preparati con il metodo PTT e PLX, risultando praticamente identici nei valori limite ma con una diversa pendenza le rette delle prove a 2 e 5 radici. La figura 11 riporta anche i valori delle prove condotte con il BST effettuate in prossimità di piante di Robinia.

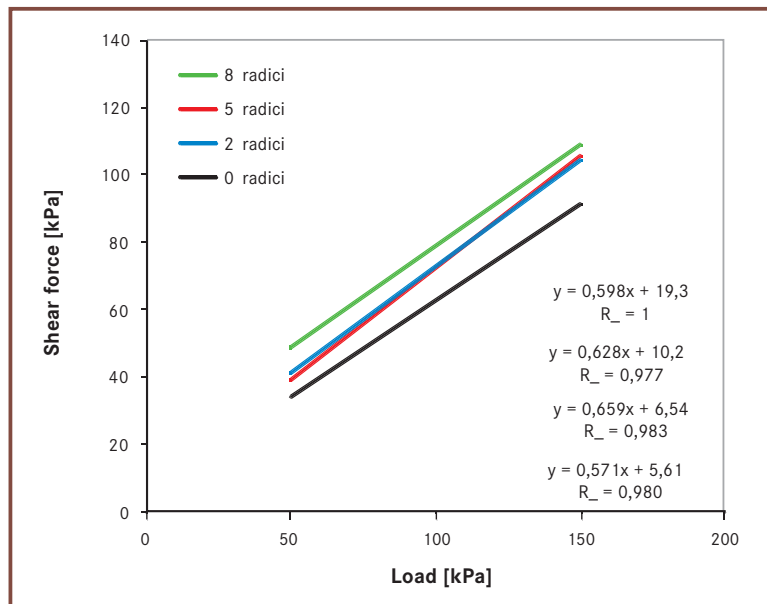


Fig. 8 - Forza di taglio in relazione al carico di consolidazione per provini con radici di Robinia (*Robinia pseudoacacia*).

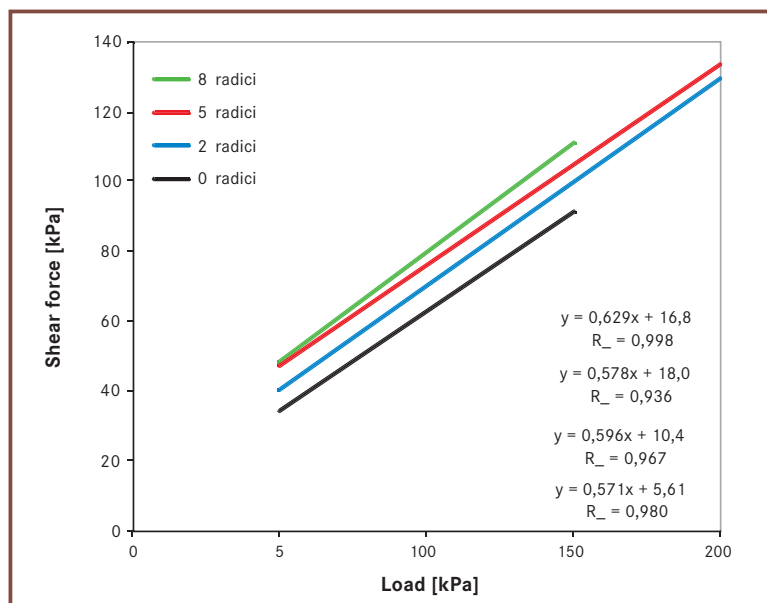


Fig. 9 - Forza di taglio in relazione al carico di consolidazione per provini con radici di Castagno (*Castanea sativa*).

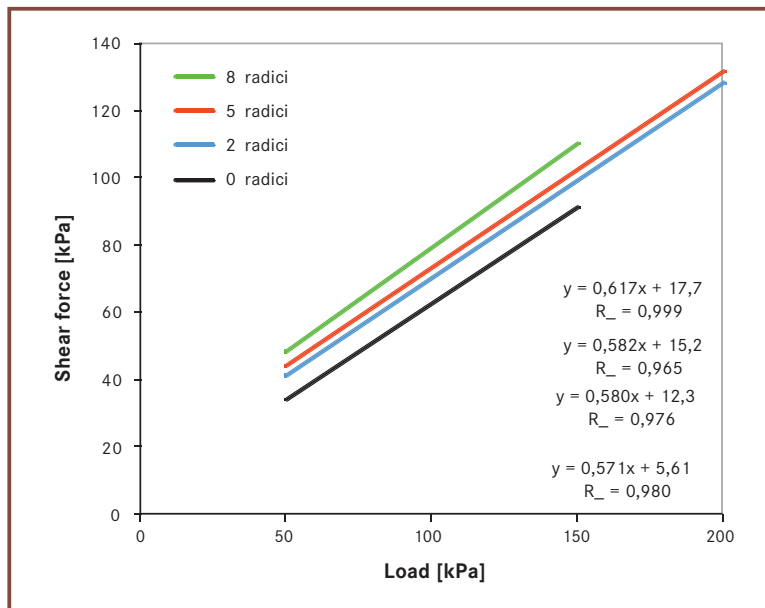


Fig. 10 - Forza di taglio in relazione al carico di consolidazione ed al numero di radici nel provino di tutte le prove effettuate.

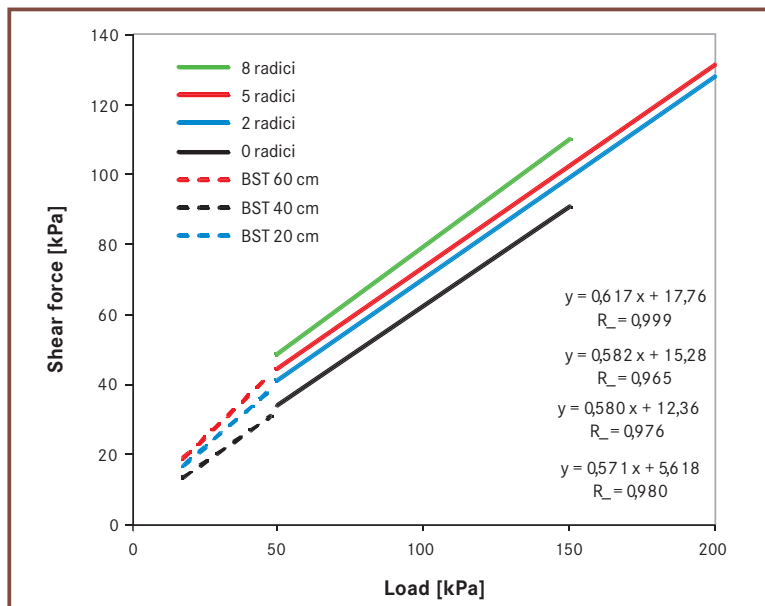


Fig. 11 - Relazione tra la resistenza a rottura τ [kPa] sulle ordinate e il carico normale σ [kPa] sulle ascisse, per i provini eseguiti con il metodo PTT con radici di *Robinia pseudoacacia* e prove BST.

Le regressioni lineari per i valori delle prove condotte con il BST a 20, 40 e 60 centimetri di profondità non sembrano indicare una relazione con la densità teorica delle radici, ovvero i valori di RAR infatti diminuiscono esponenzialmente con la profondità. La densità reale non è conosciuta e può essere molto variabile. Anche l'effettiva capacità dello strumento (BST) di rilevare l'influenza delle radici sulla coesione del suolo è legata alla maggiore compattazione del terreno ma un contatto diretto con la radice altererebbe la prova. I test indicano che a 20 centimetri di profondità si avrebbero valori corrispondenti ad una RAR di 0,0446% (per confronto con le prove a taglio diretto, pari a due radici di un millimetro su una superficie di 6x6 cm), mentre a 40 centimetri di profondità le prove BST mostrano l'assenza di radici, con una retta di regressione simile a quella delle prove di taglio diretto standard. Nonostante le nostre riserve sull'applicabilità del metodo BST nei riguardi delle radici, altri autori



[NORMANIZA OSMAN, S.S. BARAKBAH, 2006] hanno trovato positive correlazioni con strumenti simili, ovvero utilizzando un penetrolgger (Eijkelkamp Agrisearch Equipment, model 06.15, The Netherlands) e Vane Tester (Eijkelkamp Agrisearch Equipment, model 14.05, The Netherlands).

Nelle presenti prove non viene raggiunta la tensione di rottura delle radici, ovvero il massimo valore di T_r (assunto pari a 39800 kPa), ma la radice viene attivata per una percentuale di forza calcolato sullo spostamento relativo alla prova di taglio. Dalla curva sforzo deformazione di prove di trazione per radici dello stesso diametro utilizzato nelle prove di taglio, si potrebbe ottenere la verifica di tale coefficiente.

La variabilità interclasse dei nostri dati è statisticamente non significativa e quindi i valori di RAR adottati sono quelli medi utilizzati per i provini con 2, 5 e 8 radici (0,0446%, 0,1086%, 0,1753% rispettivamente). La quota di coesione dovuta alla presenza delle radici è stata ricavata come differenza tra i valori dei provini radicati e di quelli non radicati ottenuti da prove standard.

Discussione e Conclusioni

I test sperimentali che vengono proposti nel presente lavoro utilizzano il metodo del taglio diretto secondo lo standard definito da Casagrande, per verificare il comportamento di campioni di terra radicati a piccola scala. Le condizioni di prova sono volutamente e necessariamente semplificate, ma questo tipo di test fornisce la possibilità di controllare tutti gli assunti della formula di WU *et al.* [1979] e di evidenziare la resistenza delle radici nella fase iniziale della loro messa in trazione fino alla rottura del suolo. Il provino ricostruito radicato pur lontano dal ricreare le interazioni reali tra suolo e radici, può fornire indicazioni circa il comportamento fisico di tratti di radici geometricamente molto ben definiti prima della rottura durante una sollecitazione a taglio di un blocco di terreno in condizioni controllate. Il metodo di costruzione del provino permette di effettuare ripetizioni confrontabili tra loro.

Per quanto riguarda le diverse specie vegetali utilizzate, dall'analisi dei dati non risultano differenze evidenti tra i valori di coesione apparente fornite da radici di Robinia o radici di Castagno. Si nota come all'aumentare del numero di prove i risultati siano più coerenti. Considerando la totalità delle prove viene riscontrato un incremento di resistenza fornito dalle radici poco più che proporzionale alla percentuale di rinforzo, avallando così i risultati di SHEWBRIDGE e SITAR [1989], mentre quelli di GRAY e OHASHI [1983] rilevano una proporzionalità della resistenza nei confronti del rapporto di superficie radicata. Questa discrepanza nei risultati può plausibilmente essere attribuita al fatto che per valori molto bassi di percentuale di rinforzo l'andamento poco si discosta dalla proporzionalità. Osservando le relazioni lineari tra provini con 0, 2, 5, 8 radici risulta che la variazione dell'angolo d'attrito interno può essere trascurata nel considerare le proprietà meccaniche di un terreno radicato, ovvero, il contributo delle radici sembra influenzare solo la coesione del suolo.

I diversi metodi utilizzati per realizzare provini radicati ricostruiti hanno portato a risultati simili. Il metodo della scatola in plexiglass consente una più facile ripetibilità delle prove dovuta alla semplicità nel disporre le radici nel provino, anche in numero elevato. Anche se presentano una certa variabilità nei valori a due e cinque radici, i valori massimi e minimi coincidono. Fatte queste considerazioni i risultati ottenuti con il metodo proposto sono in linea con i risultati attesi, presentando incrementi della coesione apparente c' e variazioni non significative dell'angolo di attrito interno ϕ .

La ricerca si concentra oggi sui meccanismi di interazione tra radice e suolo, la distribuzione e la trasmissione delle forze durante la prime fasi di distacco di una frana superficiale. È comunemente accettato che il modello di WU sovrastima ampiamente la resistenza e considera tale resistenza costante durante lo sfilamento della radice (che può o meno arrivare a rottura dopo un certo spostamento), e vengono presi oggi in maggiore considerazione il più recente modello di POLLEN e SIMON [2004] che considera la redistribuzione delle forze secondo il diametro o la superficie della radice, ed il modello di SCHWARZ *et al.* [2010] nel quale viene inserito anche il ruolo della morfologia delle radici ed il tipo di suolo durante la progressiva attivazione della radice causata dallo spostamento.

RINGRAZIAMENTI

Le prove geotecniche sono state realizzate presso il laboratorio geotecnico del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze e presso la ditta Igetecma s.a.s di Montelupo Fiorentino (FI) che ringraziamo per la disponibilità.



Bibliografia

1. ABERNETHY B., RUTHERFURD A.I. (2001): *The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement*. Hydrological Processes, 15: 63-79.
2. ARENICZ R.M., CHOWDHURY R.N. (1988): *Laboratory investigation of earth walls simultaneously reinforced by strips and random reinforcement*. Geotechnical Testing Journal, Dec. 1988, 241.
3. BISCHETTI G.B., CHIARADIA E.A., SIMONATO T., SPEZIALI B., VITALI B., VULLO P., ZOCCO A. (2005): *Root strength and root area of forest species in Lombardy*. Plant Soil, 278: 11-22.
4. BURROUGHS E.R., THOMAS B.R. (1977): *Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability*. USDA Forest Service Research Paper INT-190, 1-27.
5. CAMMERAAT L.H., VAN BEEK R., KOOIJMAN A. (2005): *Vegetation succession and its consequences for slope stability in SE Spain*. Plant Soil, 278: 135-147.
6. COMMANDEUR P.R., PYLES M.R. (1991): *Modulus of elasticity and tensile strength of Douglas-fir roots*. Canadian Journal of Forest Research, 21: 48-52.
7. DANJON F., BARKER D.H., DREXHAGE M., STOKES A. (2007): *Using 3D plant root architecture in models of shallow slope stability*. Ann Bot (Lond). 2008 May; 101(8): 1281-1293.
8. DAPPORTO S., FOCARDI P., VANNOCCI P. (2000): *La parametrizzazione geotecnica di un materiale non saturo mediante prove in sito*. Geologia Tecnica & Ambientale, N. 3, pp. 5-11.
9. DE BEATS S., POESEN J., REUBENS B., WEMANS K., DE BAERDEMAEKER J., MUYS B. (2008): *Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength*. Plant and Soil, 305: 207-226.
10. DOCKER B.B., HUBBLE T.C.T. (2008): *Quantifying root-reinforcement of river bank soils by four Australian tree species*. Geomorphology, 100: 401-418.
11. DUPUY L., FOURCAUD T., STOKES A. (2005A): *A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension*. European Journal of Soil Science, 56: 319-327.
12. EKANAYAKE J.C., PHILLIPS C.J. (1999A): *A model for determining thresholds for initiation shallow landslides under near-saturated conditions in the East Coast region, New Zealand*. J Hydrol (NZ), 38: 1, 1-28.
13. ENDO T., TSURUTA T. (1969): *The effect of tree roots upon the shearing strength of soil*. Annual Report of Hokkaido Branch, Tokio forest Experimental Station, 18, pp. 168-179.
14. ENNOS A.R. (1989): *The mechanics of anchorage in seedlings of sunflower, Helianthus annuus L.* New Phytologist, 113: 185-192.
15. FAN C.C., SU C.F. (2008): *Role of roots in the shear strength of rootreinforced soils with high moisture content*. Ecological Engineering, 33: 157-166.
16. GENET M., KOKUTSE N., STOKES A., FOURCAUD T., CAI X, J.I. J., MICKOVSKI S.B. (2008): *Root reinforcement in plantation of Cryptomeria japonica D. Don: effect of tree age and stand structure on slope stability*. Forest Ecology and Management 256: 1517-1526.
17. GENET M., STOKES A., SALIN F., MICKOVSKI S.B., FOURCAUD T., DUMAIL J., VAN BEEK L.P.H. (2005): *The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots*. Plant and Soil, 278: 1-9.
18. GRAY D.H., BARKER D. (2004): *Root-soil mechanics and interactions. Riparian vegetation and fluvial geomorphology*. Water science and application, 8: 113-123.
19. GRAY D.H., LEISER A.J. (1982): *Biotechnical Slope Protection and Erosion Control*. Van Nostrand Reinhold, New York.
20. GRAY D.H., OHASHI H. (1983): *Mechanics of fiber reinforcement in sand*. Journal of Geotechnical Engineering, 109: 335-353.
21. GRAY D.H., AL-REFEAI T. (1986): *Behavior of fabric versus fiber reinforced sand*. Journal of Geotechnical Engineering, 112(8): 804-826.
22. GREENWAY D.R. (1987): *Vegetation and slope stability*. In: Anderson MG, Richards KS (eds) "Slope Stability". Wiley, Chichester, pp. 187-230.
23. GREENWOOD J.R., NORRIS J.E., WINT J. (2004): *Assessing the contribution of vegetation to slope stability*. J. Geotech. Eng., 157: 199-208.
24. HATHAWAY R.L., PENNY D. (1975): *Root strength in some Populus and Salix clones*. New Zealand Journal of Botany, 13: 333-344.
25. HEAD K.H. (1988): *Manual of Soil Laboratory Testing*. Vol. 2 "Permeability, shear strength and compressibility tests". Pentech Press, London, Plymouth.
26. JACKSON R.B., MOONEY H.A., SCHULZE E.-D. (1997): *A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents*. Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.A., 94: 7362-7366.
27. LUTENEGGER A.J., HALBERG G.R. (1981): *Borehole shear test in geotechnical investigations*. American Society for Testing and Materials STP, 740: 556-578.
28. MAHER M.H., GRAY D.H. (1990): *Static response of sands reinforced with randomly distributed fibers*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 116, n. 11, p.1661-1677.
29. MEGAHAN W.F., DAY N.F., BLISS T.M. (1978): *Landslide occurrence in the western and central Northern Rocky Mountain Physiographic Province in Idaho*. Fifth North American Forest Soils Conference, Fort Collins. Colorado State University.
30. MICHALOWSKI R.L., CERMAK J. (2003): *Triaxial compression of sand reinforced with fibers*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(2): 125-136.
31. MICKOVSKI S.B., BENGOUGH A.G., BRANSBY M.F., DAVIES M.C.R., HALLET P.D., SONNENBERG R. (2007): *Material stiffness, branching pattern and soil matrix potential affect the pullout resistance of model root systems*. European Journal of Soil Science, 58: 1471-1481.
32. NIKLAS K.J. (1992): *Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function*. University of Chicago Press, Ill.
33. NILAWEERA N.S., NUTALAYA P. (1999): *Role of tree roots in slope stabilisation*. Bulletin Engineering Geology of the Environment, 57: 337-342.
34. NORRIS J.E. (2005): *Root reinforcement by hawthorn and oak roots on a highway cut-slope in Southern England*. Plant and Soil, 278: 43-53.
35. NORMANIZA OSMAN, S.S. BARAKBAH (2006): *Parameters to predict slope stability – Soil water and root profiles*. Ecological Engineering, doi:10.1016/j.ecoleng.2006.04.004
36. O'LOUGHLIN C.L., WATSON A.J. (1979): *Root-wood strength deterioration in Radiata Pine after clearfelling*. New Zealand Journal of Forestry Science, 39(3): 284-293.



37. O'LOUGHLIN C. L. (1974A): *Study of tree root strength deterioration following clearfelling*. Can. J. For. Res., 4107-113.
38. OPERSTEIN V., FRYDMAN S. (2000): *The influence of vegetation on soil strength*. Ground Improvement, 4: 81-89.
39. POLLEN N., SIMON A., COLLISON A. (2004): *Advances in assessing the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. Riparian vegetation and fluvial geomorphology*. Water science and application, 8: 125-139.
40. POLLEN N., SIMON A. (2005): *Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model*. Water Resources Research, 41: w07025.
41. PRETI F. (2006): *Stabilità dei versanti vegetati*. Cap. 10, in: Sauli G., Cornelini P., Preti F., Manuale 3 d'Ingegneria Naturalistica "Sistemazione dei versanti". Regione Lazio, Roma, 137-168, http://www.regione.lazio.it/web2/contents/ingegneria_naturalistica/manuale_versanti/Cap_10_10.pdf, 2006 (in Italian)
42. PRETI F., GIADROSSICH F. (2009): *Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish Broom (Spartium junceum L.)*. Hydrol. Earth Syst. Sci., 13: 1713-1726.
43. RAVIOLO P.L. (1993): *Il Laboratorio Geotecnico - Procedure di prova, elaborazione, acquisizione dati*. Ed. Controls, Milano.
44. RIESTENBERG M.M. (1994): *Anchoring of thin colluvium by roots of Sugar maple and White ash on hillslope in Cincinnati, US*. Geological Survey Bulletin, 2059-E: 1-25.
45. SCHMIDT K.M., ROERING J.J., STOCK J.D., DIETRICH W.E., MONTGOMERY D.R., SCHAUB T. (2001): *The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range*. Canadian Geotechnical Journal, 38: 995-1024.
46. SCHWARZ M., PRETI F., GIADROSSICH F., LEHMANN P., OR D. (2010): *Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy)*. Ecological Engineering, Volume 36, Issue 3, March 2010, Pages 285-291, doi:10.1016/j.ecoleng.2009.06.014
47. SHEWBRIDGE S.E., SITAR N. (1989): *Deformation characteristics of reinforced soil in direct shear*. J. Geotech. Eng., 115: 1134-1147.
48. SIVAKUMAR BABU G.L., VASUDEVAN A.K., HALDAR S. (2008): *Numerical simulation of fiber-reinforced sand behaviours*. Geotextiles and Geomembranes, 26: 181-188.
49. STOKES A., ABD.GHANI M., SALIN F., DANJON F., JEANNIN H., BERTHIER S., KOKUTSE A.D., FROCHOT H. (2007A): *Root morphology and strain distribution during tree failure on mountain slopes*. In: Stokes A., Spanos I., Norris J.E., Cammeraat L.H. (eds), "Eco- and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability". Developments in Plant and Soil Sciences, Volume 103, Springer Publishers, Dordrecht, pp. 165-173.
50. STOKES A., BALL J., FITTER A.H., BRAIN P., COUTTS M.P. (1996): *An experimental investigation of the resistance of model root systems to uprooting*. Annals of Botany, 78: 415-421.
51. TOFANI V., VANNOCCI P., DAPPORTO S., CASAGLI N. (2006): *Infiltration, seepage and slope instability mechanisms during the 20-21 November 2000 rain storms in Tuscany, Central Italy*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 1025-1033.
52. TOSI M. (2007): *Root tensile strength relationships and their slope stability implications of three shrubs species in the Northern Apennines (Italy)*. Geomorphology, 87: 268-283.
53. VAN BEEK L.P.H., WINT J., CAMMERAAT L.H., EDWARDS J.P. (2005): *Observation and simulation of root reinforcement on abandoned Mediterranean slopes*. Plant and Soil, 278: 55-74.
54. WALDRON L.J., DAKESSIAN S. (1981): *Soil reinforcement by roots: calculation of increased soil shear resistance from root properties*. Soil Science, 132(6): 427-435.
55. WALDRON L.J. (1977): *The shear stress resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil*. Soil Science Society of America Proceedings, 41: 843-849.
56. WU T.H., MCKINNELL W.P., SWANSTON D.N. (1979): *Strength of tree roots and landslides on Price of Wales Island, Alaska*. Canadian Geotechnical Journal, 16: 19-33.
57. WU T.H. (2007): *Root reinforcement: analyses and experiments*. In: Stokes et al. (eds). "Ecoand Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability", Springer; 21-30.
58. ZIEMER R.R. (1981): *Roots and stability of forested slopes*. Erosion and sediment transport in Pacific Rim Steeplands Pub. 132 IAHS, 343-361.