Patrizio Napoli
Manuela Cecconi
Vincenzo Pane
Giovanni Calabresi

Interazione terreno-vegetazione nei fenomeni superficiali di instabilità dei versanti

Università degli Studi di Perugia
Culture Territori Linguaggi – 5
2014

Culture Territori Linguaggi

CTL 5

Università degli Studi di Perugia
2014

Culture Territori Linguaggi

La Collana non periodica dell'Università degli Studi di Perugia «Culture Territori Linguaggi» (CTL) è costituita da volumi monografici pubblicati sia nel tradizionale formato a stampa, sia in modalità digitale disponibile sul web: una scelta, quest'ultima, concordata dal Comitato Scientifico per garantire ai contenuti la più ampia diffusione possibile e per poterne assicurare, nel contempo, la massima fruibilità.

La stessa intitolazione esprime efficacemente la natura e gli intenti della Collana, nella quale trovano spazio i più significativi risultati di studi e ricerche riconducibili ai molteplici e diversificati ambiti disciplinari afferenti alle competenze dell'Ateneo perugino o di collaboratori a esso collegati, così da offrire l'opportunità a docenti e ricercatori, nonché ai più meritevoli dottori di ricerca e laureati, di una sede qualificata nella quale pubblicare i frutti originali del proprio lavoro.

La Collana CTL si avvale di procedura di *peer review* per la presentazione e la pubblicazione di monografie scientifiche (in conformità agli standard stabiliti da Thomson ISI).

La Collana pubblica monografie scientifiche in lingua italiana, inglese, francese, tedesca e spagnola. I prodotti sono corredati in appendice da abstract in lingua inglese. Il Direttore della Collana riceve ed esamina la proposta di pubblicazione, richiede il manoscritto all'autore e trasmette la documentazione al referente dell'area di competenza tematica nel Comitato Scientifico. Il referente, dopo aver eliminato dal manoscritto ogni elemento di identificazione dell'autore, provvede a inoltrarlo a due revisori (membri del Comitato Scientifico, studiosi, esperti e professionisti), almeno uno dei quali esterno all'Ateneo. I revisori inviano al Direttore della Collana e al referente un parere relativo al testo scientifico, così articolato:

- accettabile per la pubblicazione;
- accettabile dopo revisioni secondarie;
- accettabile con revisioni sostanziali e conseguente riattivazione della procedura (in tal caso, i revisori che hanno formulato il primo giudizio saranno chiamati a valutare la conformità degli adeguamenti);

- non accettabile.

Il Direttore provvederà a trasmettere all'autore il risultato della valutazione. Qualora i pareri dei valutatori risultassero contrastanti, il testo sarà inviato a un ulteriore revisore scientifico, non informato delle opinioni espresse in precedenza dai colleghi. Se il giudizio è negativo il lavoro è respinto, altrimenti è ammesso; in tal caso seguirà una delle procedure sopra esposte. La durata totale della procedura varia in funzione della natura delle osservazioni formulate dai revisori scientifici e dalla sollecitudine con cui gli autori apportano le modifiche richieste.

Ogni due anni nel sito della Collana (www.ctl.unipg.it) viene pubblicato un elenco dei revisori che hanno valutato i testi pubblicati.

Comitato scientifico
Moreno Barboni, Marco Bastianelli, Andrea Bernardelli, Giuseppina Bonerba, Paolo Braconi, Alberto Calderini, Donata Castagnoli, Manuela Cecconi, Lucio Fiorini, Erminia Irace, Donato Loscalzo, Francesco Marcattili, Giancarlo Marchetti, Massimiliano Marianelli, Riccardo Massarelli, Marco Mazzoni, Lorenzo Medici, Laura Melelli, Alessandra Migliorati, Marco Milella, Massimiliano Minelli, Francesco Musotti, Maria Alessandra Panzanelli Fratoni, Paola Paolucci, Giovanni Pizza, Mirko Santanicchia, Massimiliano Tortora

Direttore
Fabio Fatichenti

Patrizio Napoli
Manuela Cecconi
Vincenzo Pane
Giovanni Calabresi

Interazione terreno-vegetazione nei fenomeni superficiali di instabilità dei versanti

Università degli Studi di Perugia

copyright © 2014
Tutti i diritti riservati

In copertina: esempio di versante vegetato (prima e dopo il trattamento) mediante l'utilizzo di impianti a radicazione profonda di tipo erbaceo (Orvieto, TR).

Università degli Studi di Perugia
Collana Culture Territori Linguaggi
www.ctl.unipg.it

0755852641; 0755853055
fabio.fatichenti@unipg.it; alberto.calderini@unipg.it

ISBN 9788890642173

Indice

Prefazione 11

Premessa 12

1. INTERAZIONE TERRENO-VEGETAZIONE: GENERALITÀ 15

2. MORFOLOGIA DEI SISTEMI RADICALI 18

3. IL CONTRIBUTO MECCANICO DELLE RADICI PROFONDE 23
3.1. Rapporto di area radicata (RAR) 34
3.2. Incremento di resistenza a taglio prodotto dagli apparati radicali 43
3.3. Analisi di stabilità di coltri superficiali di versante in presenza di vegetazione 44

4. IL CONTRIBUTO DELLE RADICI NEI FENOMENI DI INTERAZIONE DI NATURA IDRAULICA CON IL TERRENO 53
4.1. "Root-water uptake" 56

5. UN ESEMPIO DI ANALISI DI STABILITÀ DI VERSANTE 68

BIBLIOGRAFIA 82

Prefazione

Questa monografia rappresenta il prodotto finale di un'attività di studio e ricerca condotta presso l'Università di Perugia, con il supporto della società Prati Armati S.r.l. di Opera (Milano).

Desideriamo ringraziare in particolare l'Ing. Claudio Zarotti, Presidente e Amministratore Delegato di detta Società, per l'entusiasmo e l'energia trasmessaci per questo settore di ricerca, attuale e promettente. Il contributo economico offerto da Prati Armati ha inoltre consentito di finanziare borse di studio, indispensabili allo svolgimento di questo lavoro.

Siamo felici che il Prof. Giovanni Calabresi, già professore Ordinario di Geotecnica presso l'Università di Roma La Sapienza, abbia contribuito alla monografia. I suggerimenti e le idee da lui trasmesse nel corso dello studio sono state preziose.

Manuela Cecconi e *Vincenzo Pane*

Premessa

I fenomeni erosivi sul territorio italiano sono molto diffusi. In ragione del clima che caratterizza le nostre latitudini, il principale agente erosivo è rappresentato dalle precipitazioni meteoriche che erodono il terreno con azioni diverse. Il ruolo della vegetazione nella protezione dei versanti dall'erosione è stato a lungo studiato ed è documentato da ricerche sperimentali (Truong & Loch, 2004; Thornes, 1988; 1990; Bagarello et al., 2010; 2011; Wischmeier & Smith, 1965; Aina et al., 1979). Nell'ambito dell'ingegneria naturalistica, nel corso degli anni sono state sviluppate diverse tecniche di protezione del suolo; fra queste, emerge in Italia una recente ed innovativa tecnologia naturale (anni '90) che impiega esclusivamente piante erbacee perenni a radicazione profonda e consente di operare anche in aree in cui le condizioni pedo-climatiche erano fino a pochi anni fa ritenute proibitive per lo sviluppo della vegetazione. A differenza di molte altre tecniche tradizionali, impiegate per la mitigazione e il controllo dei fenomeni di erosione, tale tecnica può risultare oltremodo vantaggiosa, sia perché non vengono impiegati materiali sintetici quali biostuoie, geocelle, georeti, sia perché prevede un'unica fase di lavorazione; la messa in opera di fatto viene effettuata mediante semplice idrose-

mina sul versante di interesse, con grandi vantaggi di carattere tecnico-economico ed ambientale. Appare pertanto di efficace e rapida realizzazione e non richiede alcuna manutenzione.

Nell'ingegneria naturalistica, la suddetta tecnologia appare promettente anche nei riguardi dei fenomeni di instabilità superficiale dei versanti: l'inerbimento con radici profonde (dell'ordine di 2-3 m di lunghezza) e di elevata resistenza a trazione, può indurre effetti meccanici ed idraulici sulle condizioni di equilibrio del versante, tali da incrementare la resistenza a taglio del terreno ed il livello di sicurezza nei confronti di eventuali movimenti superficiali.

In particolare, gli effetti di natura meccanica, ampiamente riconosciuti in letteratura, sono evidentemente attribuibili ai processi di interazione radice/terreno. Altri effetti, di natura prevalentemente idraulica, non sono stati ad oggi parimenti studiati ed implementati, benché siano di fatto molto importanti (Pollen, 2007; Chirico et al., 2013). Basti citare il meccanismo secondo cui l'inerbimento e/o l'impianto di radici può ridurre significativamente, in funzione della stagionalità e delle condizioni pedoclimatiche del sito, il contenuto d'acqua del terreno, sia inibendo l'infiltrazione di acqua meteorica che attraverso l'assorbimento d'acqua da parte delle radici. La riduzione del grado di saturazione, dà generalmente luogo ad un incremento di resistenza al

taglio del terreno. Appare dunque interessante il poter valutare dal punto di vista quantitativo tali effetti, a partire dalla comprensione fenomenologica dei meccanismi di interazione meccanica/idraulica tra la vegetazione e il terreno.

Questi sono gli obiettivi che hanno motivato una recente attività di ricerca inerente l'analisi degli interventi di impianti radicali nel terreno per la stabilizzazione di coltri superficiali. Alcuni risultati dello studio sono presentati in questa monografia.

1. INTERAZIONE TERRENO-VEGETAZIONE: GENERALITÀ

L'incremento di resistenza a taglio offerto al terreno da impianti di radici con sviluppo di radicazione profondo è da tempo riconosciuto e studiato (Wu, 1979; Endo & Tsuruta, 1969; Gray & Ohashi, 1983; Pollen, 2004; Preti, Giadrossich, 2009; Bischetti, 2000).

Nel 1977 Waldron, uno dei pionieri nello studio del contributo stabilizzante offerto dagli apparati radicali alla resistenza del terreno, introduceva il concetto di effetto "diretto" ed effetto "indiretto" delle radici. Le radici delle piante hanno la capacità di incrementare direttamente la resistenza a taglio dei terreni radicati per interazione meccanica, agendo come dei sottilissimi ancoraggi – di resistenza a trazione elevata – che si sviluppano nel terreno (contributo diretto). Non di meno, le radici garantiscono un significativo contributo indiretto alla variazione della resistenza a taglio del terreno, associabile proprio a fenomeni di natura idrologica e idrogeologica (Figura 1). In particolare, grazie alla capacità dell'apparato epigeo di intercettare parte della precipitazione, e dell'intera pianta di assorbire acqua dal terreno trasferendola all'atmosfera per traspirazione, il grado di saturazione del terreno

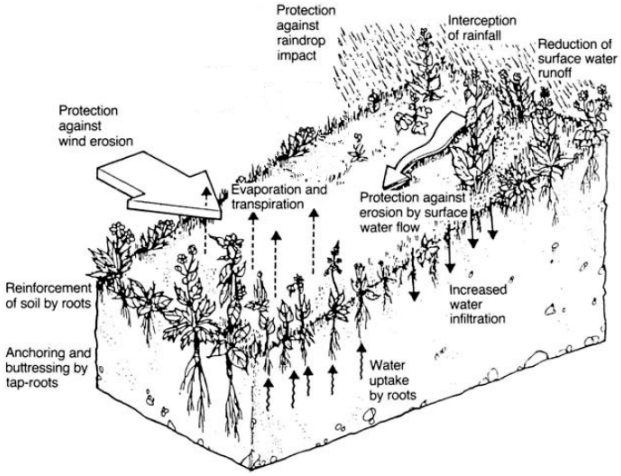


Figura 1 – Schematizzazione dei principali effetti della vegetazione, meccanici e idrologici (Coppin & Richards, 1990).

si riduce, con un corrispondente incremento di suzione; a tale aumento corrisponde generalmente un incremento della resistenza a taglio del terreno.

Il problema dell'interazione – di natura meccanica e idraulica – tra la radice ed il terreno diventa fondamentale allorché l'impianto con apparato radicale profondo abbia il duplice scopo di assolvere alla funzione di protezione dall'erosione e di contenere eventuali movimenti superficiali di instabilità dei versanti. Il problema è evidentemente complesso, dal momento che i fenomeni in gioco sono molteplici ed il loro stu-

dio richiede competenze specifiche in diversi settori, dall'agronomia, alla fisica dei terreni, all'idraulica. Da un punto di vista analitico-numerico, è fondamentale rispettare l'equazione di bilancio delle masse, tenendo conto dei fenomeni di evaporazione del suolo, traspirazione delle piante, infiltrazione di acqua nel terreno, ruscellamento lungo il pendio.

2. MORFOLOGIA DEI SISTEMI RADICALI

Per poter quantificare l'effetto benefico che un impianto radicale apporta allo strato di terreno in cui è radicato, occorre dapprima conoscerne le caratteristiche morfologiche. L'architettura di un apparato radicale è decisamente complessa e presenta una notevole variabilità, a seconda della specie, del tipo di terreno e delle condizioni climatiche del sito in cui la pianta si sviluppa, dalla disponibilità d'acqua e quindi del grado di umidità del terreno, dalla presenza o meno di nutrienti, e dall'età della pianta (Coutts, 1983; Laio et al., 2006; Preti et al., 2010).

Anche se i dati disponibili in letteratura per le diverse specie sono numerosi, essi sono sempre limitati ai siti di provenienza e possono fornire informazioni poco generalizzabili. Considerata, inoltre, l'elevata variabilità delle caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche del terreno nello spazio e nel tempo, le radici si trovano ad affrontare un ambiente mutevole al quale devono riuscire ad adattarsi. L'interazione tra suolo e radice è reciproca: il terreno induce delle modifiche nelle radici e queste ultime contribuiscono a modificare le caratteristiche del terreno radicato assorbendo nutrienti e rilasciando composti organici attraverso gli essudati radicali.

Tra le caratteristiche del sistema radice/terreno da tenere in conto, qualunque sia l'approccio seguito nella modellazione (vedi paragrafi successivi) vi è la "dinamicità" del suo comportamento e sviluppo. La radice non è una struttura "statica" e poco differenziata, ma un organo in continua modificazione ed adattamento in relazione all'ambiente circostante.

Lo sviluppo e la struttura dei sistemi radicali è difatti molto variabile; alcune specie sviluppano sistemi di tipo fittonante, altre sviluppano masse radicali di tipo fibroso fascicolato (vedi Figura 2); mentre il primo tipo è costituito da una struttura verticale, il *fittone*, da cui si dipartono ramificazioni di diverso ordine, il secondo tipo, *fascicolato*, presenta strutture dello stesso ordine, con un numero minore di classi diametriche, ma con una maggiore densità radicale (Amato, 2006b).

La configurazione geometrica dell'impianto radicale dipende fortemente dalle condizioni climatiche del sito, dalle caratteristiche pedologiche e dalla temperatura del terreno, dalla disponibilità di nutrienti e umidità, dalle associazioni con altri vegetali, dalla presenza di ostacoli meccanici ed infine dalla gestione antropica dell'area.

Le Figure 3 e 4 mostrano alcuni apparati radicali di specie erbacee, che mettono in evidenza oltre al volume di terreno coinvolto dalla radicazione, le diverse tipologie di sviluppo radicale.

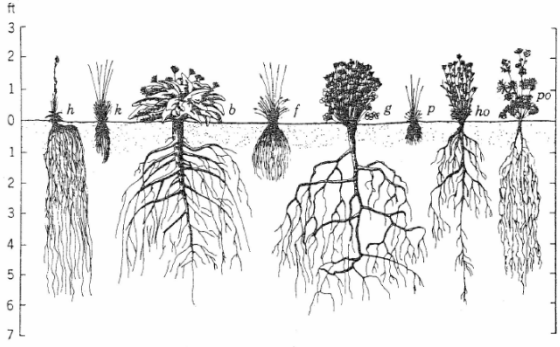


Figura 2 - Sviluppi radicali di differenti specie vegetali: *h*, Hieracium scouleri; *k*, Kaeleria cristata; *b*, Balsamorhiza sagittata; *f*, Festuca ovina ingrata; *g*, Geranium viscosissimum; *p*, Poa sandbergii; *ho*, Hoorebekia racemosa; *po*, Potentilla blaschkeana (Weaver, 1919).

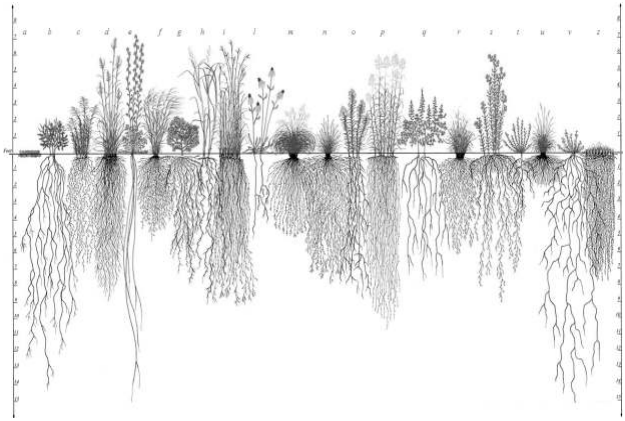


Figura 3 – Massima profondità di radicazione di alcune specie erbacee: *a*, Poa pratensis; *b*, Amorpha canescens; *c*, Solidago missouriensis; *d*, Sorghastrum nutans; *e*, Silphium laciniatum; *f*, Stipa spartea; *g*, Aster ericoides; *h*, Spartina pectinata; *i*, Andropogon gerardii; *l*, Echinacea pallida; *m*, sporabolus heterolepis; *n*, Bouteloua curtipendula; *o*, Kuhnia eupatorioides; *p*, Panicum virgatum; *q*, Baptisia leucantha; *r*, Andropogon scoparius; *s*, Silphium integrifolium; *t*, Petalostemum purpureum; *u*, Koeleria cristata; *v*, Liatris cylindracea; *z*, Buchloe dactyloides
(Conservation Research Institute, Illinois, www.conservationresearchinstitute.org).

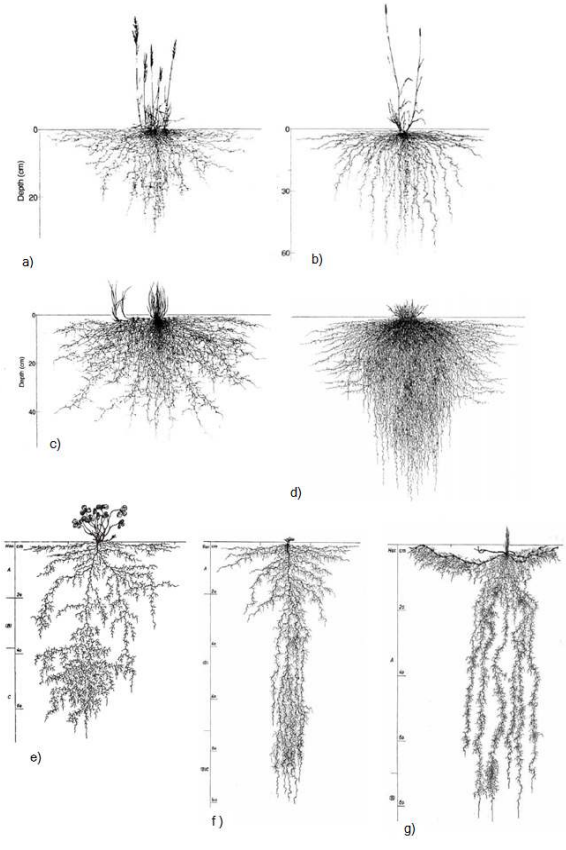


Figura 4 - Apparati radicali di specie erbacee, a) Poa pratensis, b) Phleum pratense, c) Festuca rubra, d) Lolium perenne, e) Trifolium repens, f) Lotus corniculatus, g) Agropyron repens (Kutschera & Sobotik, 1997).

3. IL CONTRIBUTO MECCANICO DELLE RADICI PROFONDE

Uno degli effetti principali legati alla presenza di vegetazione su un versante è quello di produrre un miglioramento delle caratteristiche geotecniche del terreno attraverso l'azione di rinforzo delle radici. Le radici delle piante, infatti, essendo dotate in genere di una ottima resistenza a trazione (dell'ordine delle decine di MPa) possono produrre un sensibile incremento della resistenza al taglio del terreno (Bonfanti & Bischetti 2001; Cazzuffi et al., 2001; Cazzuffi & Riccardi, 2002; Pollen & Simon, 2005; Mickovski & van Beek, 2009).

Il comportamento di un terreno radicato, in effetti, può essere assimilato a quello di un materiale composito, in cui fibre elastiche (le radici), con elevata resistenza a trazione, sono inserite all'interno della matrice di terreno. Nel noto modello semplificato di rinforzo per la singola radice (Gray & Leiser, 1989), uno stato di deformazioni di taglio nel terreno – causato dallo scorrimento lungo una potenziale superficie che delimita una porzione di terreno instabile – induce l'allungamento delle radici e lo sviluppo di tensioni di trazione all'interno di esse, compatibilmente con la massima resistenza della radice

stessa; tale stato tensionale agisce sul volume di terreno instabile dando luogo a forze esterne stabilizzanti che, anche se impropriamente, vengono tradizionalmente riguardate come incremento di resistenza a taglio. In particolare, l'approccio, più diffuso, e che deriva dall'osservazione di risultati sperimentali di prove di taglio diretto su campioni di terreno "radicati", si basa sull'interpretazione del contributo di rinforzo offerto dalle radici in termini di "pseudo-coesione aggiuntiva". Si osservi a tal proposito la Figura 5 ove sono rappresentati i risultati di una serie di prove di taglio diretto condotte su provini di sabbia " non radicati" e "radicati" con fibre (radici) di varia lunghezza.

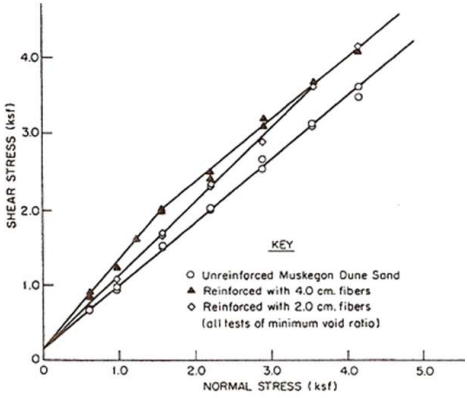


Figura 5 – Risultati di prove di taglio diretto, su provini di sabbia "radicati" e "non radicati" (Schlosser & Long, 1974).

Al di sopra di un certo livello tensionale, i provini di terreno "radicati" con fibre di maggiore lunghezza (4 cm, v. Fig. 5) risultano caratterizzati da inviluppi di rottura che assumono andamento parallelo a quello esibito dal terreno "non radicato"; tale evidenza sperimentale suggerisce che l'angolo di attrito del terreno (ϕ') può rimanere pressoché invariato, mentre la coesione (c') aumenta con il numero di radici. Tali risultati trovano un riscontro anche in studi più recenti quali quelli di Giadrossich et al. (2010). Se ne deduce che l'apporto benefico delle radici alla resistenza a taglio del terreno può essere tradotto, di fatto, in un incremento della sola aliquota coesiva della resistenza a taglio del terreno.

Evidentemente, tale incremento di resistenza può essere fondamentale nei problemi di stabilità dei versanti, anche se limitatamente a porzioni superficiali di terreno. Numerosi sono gli studi finalizzati a quantificare tale contributo positivo; ne sono un esempio i lavori di Waldron, 1977; Wu et al., 1979; 1988; 2013; Gray & Barker, 2004; Amato et al., 2006b; Mattia et al. 2005; Schwarz et al., 2010; Chirico et al., 2013.

Gli approcci proposti in tali lavori si differenziano tra loro per il livello di complessità con cui il sistema radice-terreno è modellato. I modelli proposti rinvenuti in letteratura possono essere così classificati:

- modelli semplificati basati sui metodi dell'equilibrio limite globale (Wu, 1979; Waldron, 1977; Gray & Ohashi, 1983);
- modelli basati sulle caratteristiche di deformabilità di materiali compositi rinforzati con fibre (Shewbridge & Sitar, 1989);
- modelli di tipo statistico (Wu et al., 1988).
- modelli Fiber Bundle Model (FBM) (Pollen & Simon, 2005).

Da un punto di vista applicativo, nello svolgimento di analisi di stabilità dei pendii, e di valutazione delle condizioni di sicurezza, i metodi di calcolo ascrivibili alla prima categoria di modelli – peraltro tra i più diffusi – prendono spunto dall'equazione che esprime il coefficiente di sicurezza di un pendio in terreni non radicati, opportunamente modificata per tenere conto del contributo delle radici. L'incremento di resistenza al taglio del terreno è correlato alla resistenza a trazione delle singole radici, purché la verifica a sfilamento della radice sia preventivamente soddisfatta.

Vale la pena ricordare il contributo di Wu (1979) e Waldron (1977) i quali, negli anni '70, proposero un semplice modello meccanico per la singola radice, basato sull'ipotesi di considerare il terreno radicato come un materiale composito all'interno del quale fibre lineari (radici) di elevata resistenza a trazione sono infisse in una matri-

ce multifase caratterizzata da resistenza minore. Il contributo radicale viene valutato come un termine aggiuntivo, $\Delta\tau_r$, che può essere direttamente inserito all'interno della relazione che esprime la resistenza a taglio dei terreni (criterio di rottura di Mohr-Coulomb):

$$\tau = c' + \sigma'_n \, tg\phi' + \Delta\tau_r \qquad (1)$$

In altri termini, le radici, per effetto degli sforzi di taglio che si generano a seguito dello scorrimento relativo di porzioni di terreno eventualmente coinvolte in un movimento superficiale di versante, mobilitano uno stato tensionale di trazione che quindi contribuisce ad incrementare la resistenza a taglio del terreno stesso.(Wu, 1979; Gray & Sotir, 1996; Pollen, 2004; Gray & Barker, 2004). Questo meccanismo è possibile fin quando non si raggiunge una condizione limite di:

- rottura della radice per superamento delle resistenza a trazione,
- sfilamento della radice dal terreno.

In realtà, lo sfilamento della radice dal terreno è poco comune in natura poiché le radici, infisse nel terreno, creano una sorta di effetto imbrigliante nel terreno circostante, oltre a emettere essudati, cioè sostanze organiche che modificano la struttura originaria del terreno ed incrementano sensibilmente la resistenza stessa allo sfila-

mento (Amato, 2006b). Inoltre, il fenomeno di sfilamento delle radici è parzialmente ostacolato dalla morfologia radicale che si presenta ramificata, rendendo più difficile l'estrazione meccanica della radice dal terreno stesso.

Allo scopo di valutare analiticamente e quantificare il contributo offerto dall'impianto radicale $\Delta\tau_r$, si consideri il modello di Wu (1979; 2013) riportato in dettaglio nello lo schema rappresentato in Figura 6 di una singola radice. Nonostante la sua semplicità, tale modello continua ad essere un punto di riferimento per la valutazione del rinforzo radicale. (Schmidt et al., 2001; Docker & Hubble, 2008; Bischetti et al., 2009).

La radice è rappresentata da una barra rigida inizialmente non deformata, verticale e ortogonale ad una potenziale superficie di scorrimento o superficie di taglio. A seguito dello scorrimento in direzione tangenziale al piano di taglio, la barra (radice) subisce una rotazione rigida, θ, nel tratto di spessore z, corrispondente alla banda di taglio.

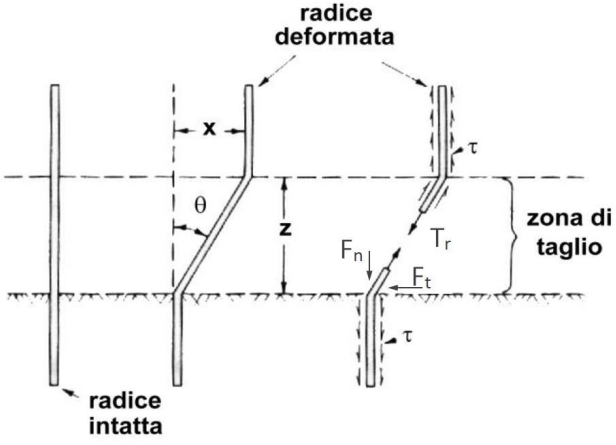


Figura 6 - Schema della singola radice attraverso una potenziale superficie di taglio (da Gray & Ohashi, 1983).

Si impongono ora le condizioni di equilibrio (di incipiente collasso) lungo il piano di scorrimento, indicando con T_r lo sforzo di trazione nella radice (sezione A_r), con componenti tangenziale, F_t, e normale, F_n, rispetto alla direzione di scorrimento orizzontale. Risulta:

$$F_t = T_r \, sin\theta \qquad (2)$$

$$F_n = T_r \, cos\theta \qquad (3)$$

La componente tangenziale F_t si oppone in modo diretto allo scorrimento, mentre la componente

normale F_n agisce incrementando l'azione normale sul piano di taglio.

Richiamando l'eq. 1), l'incremento di resistenza al taglio $\Delta\tau_r$ del terreno, per effetto della radice, risulta pertanto:

$$\Delta\tau_r = \frac{T_r}{A_s}\left[sin\theta + cos\theta tg\phi\right] = t_r \frac{A_r}{A_s}\left[sin\theta + cos\theta tg\phi\right] \tag{4}$$

Nell'eq. 4), t_r rappresenta la resistenza a trazione della radice singola [MPa], A_r l'area della sezione trasversale della radice e A_s l'area di terreno radicato di riferimento.

La resistenza a trazione della radice t_r dipende principalmente dalla specie erbacea e dal diametro delle radici (Bonfanti & Bischetti, 2001).

Molti Autori (Gray & Sotir, 1996; Burroughs & Thomas, 1977), con riferimento ad una singola specie, e sulla base di risultati sperimentali di prove di trazione, hanno ricavato la seguente relazione:

$$t_r = ad^{-b} \tag{5}$$

ove:

t_r	=	resistenza a trazione (MPa)
d	=	diametro (mm)
a e b	=	parametri dipendenti dalla specie

Si osservino, a titolo di esempio, i risultati sperimentali ottenuti da prove di trazione su diversi campioni ("varianti") di radici appartenenti a specie erbacee (Figura 7) delle famiglie delle *Graminacee e Leguminose* (Bischetti et al., 2009; Cazzuffi & Riccardi, 2002). I risultati mostrano valori molto elevati della resistenza a trazione delle radici, dell'ordine dei MPa, per radici sottili di diametro medio intorno ai 0.5-1.5mm. I valori di t_r possono, tuttavia, essere affetti da una grande variabilità, e ciò è dovuto all'influenza di fattori genetici e ambientali sullo sviluppo degli elementi radicali.

Il modello descritto e le eq. 2) ÷ 5) si riferiscono allo schema di radice singola. Risulta a questo punto necessario il poter generalizzare la trattazione ed estendere il rapporto di area radicata $RAR = A_r/A_s$ all'intero impianto radicale. A tal fine è indispensabile conoscere la geometria dell'apparato radicale ed il suo sviluppo con la profondità.

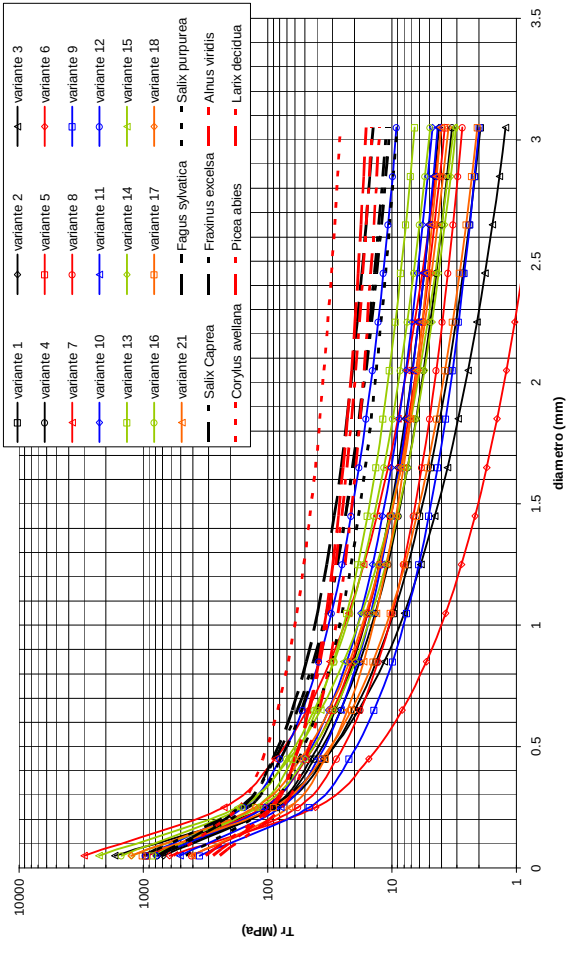


Figura 7 - Correlazioni resistenza a trazione - diametro ottenute da prove di resistenza a trazione su diverse specie erbacee (PratiArmati®) ed alcune specie arbustive ed arboree (da Bischetti et al., 2009).

Variante	d_{min} [mm]	d_{max} [mm]	$t_{r,min}$ [MPa]	$t_{r,max}$ [MPa]	a	b	R^2
1	0,35	0,55	43,31	110,23	39,25	-0,82	0,19
2	0,05	1,10	14,14	984,00	23,80	-1,05	0,76
3	0,65	1,25	13,13	37,69	21,15	-1,27	0,85
4	0,70	2,50	5,65	33,04	21,74	-1,11	0,58
5	0,25	0,45	22,65	59,45	14,88	-0,84	0,48
6	0,30	0,95	37,42	179,76	46,94	-0,56	0,34
7	0,30	0,65	42,53	133,05	35,27	-0,98	0,50
8	0,25	0,75	75,19	207,80	116,51	-0,24	0,06
9	0,60	1,50	14,49	37,51	21,00	-0,80	0,74
10	0,20	0,50	55,99	394,90	16,51	-2,00	0,93
11	0,20	0,60	56,62	468,15	26,50	-1,58	0,88
12	0,35	2,50	41,40	179,90	18,92	-2,06	0,80
13	0,05	0,72	8,33	645,15	10,40	-1,51	0,78
14	0,05	1,98	4,09	1120,81	16,71	-1,24	0,84
15	0,05	0,48	10,18	1375,58	8,66	-1,76	0,70
16	0,05	0,65	9,51	2897,93	16,77	-1,34	0,76
17	0,05	2,15	0,99	712,95	4,01	-1,68	0,93
18	0,05	0,53	50,76	3452,30	24,13	-1,61	0,90
21	0,05	0,58	29,47	1037,24	18,86	-1,24	0,72

Tabella 1 - Valori dei diametri, d_r, e resistenza a trazione, t_r, per i diversi campioni esaminati. Per ogni variante sono anche riportati i valori dei parametri *a, b* dell'eq. 5 (da Bischetti et al., 2009).

3.1. *Rapporto di area radicata (RAR)*

Come già osservato, lo studio della morfologia dell'apparato radicale riveste un ruolo fondamentale nel calcolo dell'incremento di resistenza al taglio che le radici offrono al terreno; tuttavia, come già osservato, la determinazione rigorosa della distribuzione delle radici con la profondità non è banale, a causa delle numerose variabili che condizionano l'effettivo sviluppo delle radici nel terreno circostante.

Nell'Equazione (4), la quantità A_r/A_s è nota nella letteratura specialistica come *"RAR, root area ratio"*. Questo rapporto tipicamente decresce con la profondità, ma presenta una grande variabilità che, ancora una volta, dipende, oltre che dalla specie, dalle proprietà del terreno e dalle condizioni climatiche ed ambientali (*e.g.*: Abe & Ziemer, 1991; Olsthoorn et al., 1991; Parker, van Lear, 1996; Osman & Barakbah, 2006; Zuo et al., 2004; Amato et al., 2006a; Preti et al., 2010; Mattia et al., 2005). Ne consegue che per una generica specie vegetale la funzione *RAR(z)* valutata al variare delle suddette condizioni può assumere valori significativamente diversi.

Figura 8 – Apparati radicali profondi, sviluppati all'interno di campionatori cilindrici (da PratiArmati®).

A tutto ciò si aggiunge l'impossibilità di analizzare accuratamente lo sviluppo degli apparati radicali delle piante a partire da campioni cilindrici preparati artificialmente in laboratorio (Figura 8), dal momento che le pareti del cilindro campionatore alterano in modo sostanziale il na-

turale accrescimento delle radici e dunque il rapporto di radicazione. Lo sviluppo radicale all'interno dei campionatori cilindrici può inoltre dipendere oltre che dal terreno utilizzato, dalle sue proprietà fisiche e dalla eventuale presenza di sostanze nutrienti.

L'unico modo per ottenere indicazioni realistiche in merito alla funzione *RAR(z)* è evidentemente quello di eseguire delle osservazioni sperimentali direttamente in sito (Figure 9a-9b).

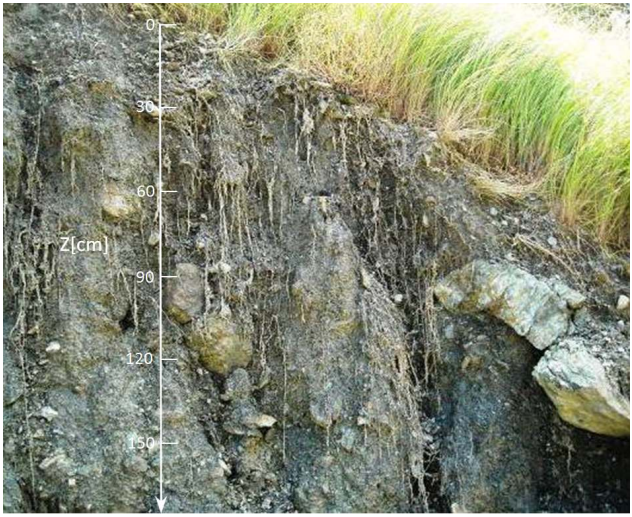


Figura 9a) – Esempio di sviluppo geometrico di un tipico apparato radicale profondo (da PratiArmati®).

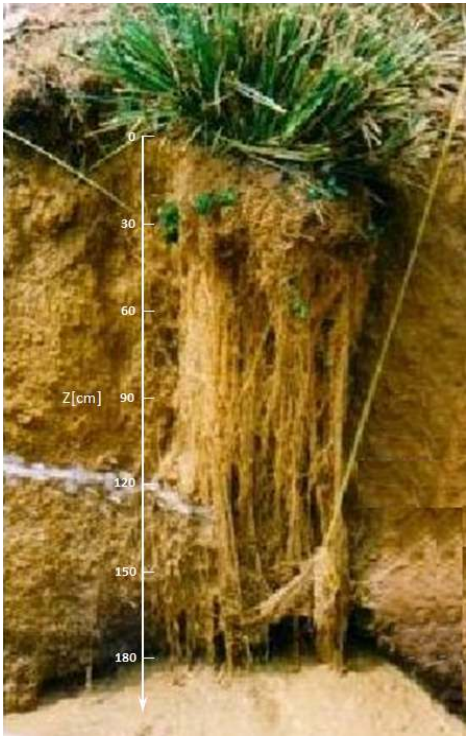


Figura 9b) - Esempio di sviluppo geometrico di un tipico apparato radicale profondo (da PratiArmati®).

A causa di questa intrinseca variabilità, la valutazione del rapporto di area radicata richiede, dunque, molta attenzione.

In questo studio, il profilo *RAR(z)* è stato definito sulla base del modello geometrico mostrato schematicamente in Figura 10, e proposto da Cecconi et al. (2012), con riferimento ad un sistema radicale di tipo *fascicolato.*

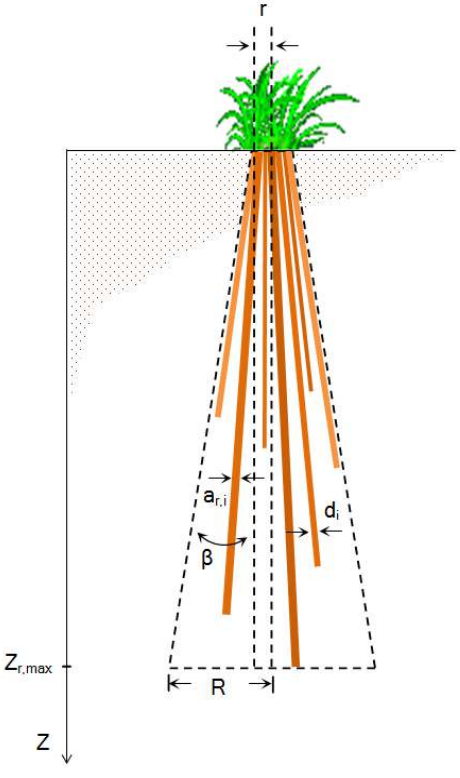


Figura 10 - Modello geometrico per un sistema radicale di tipo fascicolato (da Cecconi et al., 2012).

L'apparato radicale è costituito da radici profonde, fino a circa 2.0 m di profondità molto sottili, e caratterizzate da una straordinaria resistenza a trazione dell'ordine di 30 ÷ 60 MPa (Dalton et al., 1996; Erskine, 1992; Truong, 1999; Ke et al., 2003; Mickovski, van Beek, 2009). Il modello geometri-

co consiste di un tronco di cono con angolo di apertura β (variabile tra 10 ÷ 15°), con r raggio minore (al piano campagna) ed R raggio maggiore (alla massima profondità di radicazione, $z_{r,max}$). Nel modello, ciascuna singola radice ha diametro d_i, e area trasversale $a_{r,i}$. Il massimo valore del rapporto di area radicata, RAR_{max}, viene raggiunto in prossimità del piano campagna (p.c.).

Ad ogni profondità z dal p.c. l'area totale, $A_r(z)$, somma delle sezioni trasversali delle singole radici di diametro d_i, è data da:

$$A_r(z) = \sum_{1}^{m} n(z; d_i) \cdot a_{r,i} \qquad (6)$$

Nell'equazione (6), il numero di radici $n(z, d_i)$ varia con la profondità e con il diametro della radice; l'ipotesi è ragionevole tenuto conto che alcune radici non raggiungono la massima profondità di radicazione $z_{r,max}$.

Per poter valutare il profilo *RAR* con la profondità, sono state calcolate indipendentemente le quantità $A_r(z)$ e $A_s(z)$. Dal punto di vista numerico, $A_r(z)$, è stato calcolato dapprima dividendo la massima profondità di radicazione, $z_{r,max}$, in n. 25 strati di spessore pari a 10-15 cm, in funzione della massima profondità di radicazione, $z_{r,max}$, ed assegnando, per ogni strato, m classi diametriche. A tal fine, è stata utilizzata una funzione casuale in Excel (*random function*) che genera il numero di

radici $n(z,d_i)$ per ogni strato e per ciascuna classe diametrica d_i.

Considerato che per le specie erbacee esaminate, il numero di sistemi radicali di tipo fascicolato per ogni m^2 di terreno possa ragionevolmente variare nell'intervallo 10 ÷ 30, l'area totale di radici, $A_r(z)$ in corrispondenza del piano campagna vale approssimativamente $A_r = 2000$ mm^2.

Ora, per semplicità, e al fine poi di considerare nelle successive analisi di stabilità, l'incidenza delle radici per ogni striscia di larghezza pari a 1 m, è conveniente assimilare il volume di terreno radicato, A_s, ad un cilindro di raggio equivalente R^* (Cecconi et al., 2013):

$$R^* = r^2 + rz_{r,max} \tan\beta + \frac{1}{2}\left(z_{r,max} \tan\beta\right)^2 \quad (7)$$

In base a tale equazione, e tenuto conto dei valori numerici sopra citati, si ottiene il valore massimo del rapporto *RAR* al piano campagna pari a $RAR_{max} \cong 0.2\%$, in accordo con altri dati disponibili in letteratura (Cazzuffi & Riccardi, 2002; Preti, 2010).

La Figura 11 mostra una tipica distribuzione del rapporto di area radicata con la profondità, per una specie erbacea caratterizzata da radici profonde, quale *Eragrass.* I risultati ottenuti dalle differenti iterazioni numeriche condotte per generare la funzione $A_r(z)$ come dall'eq. 6) sono sta-

ti diagrammati insieme, al fine di evidenziare l'effetto del numero di radici $n(z,d_i)$ assegnato casualmente in ogni iterazione numerica.

Con riferimento alla Figura 11, si può notare che:

- i risultati di n.7 differenti analisi ricadono in un intervallo molto ristretto, producendo un profilo *RAR* ben definito.
- sebbene nell'esempio numerico, le radici raggiungono i 2 m di profondità, i valori di *RAR* diventano trascurabili per profondità $z > 1.5$ m.
- la distribuzione *RAR* ipotizzata può essere descritta da una funzione del tipo.

$$RAR(\%) = e^{-\left(\frac{z}{c}+f\right)}$$

con c (m) e f parametri di "curve fitting" (Cecconi et al., 2013):

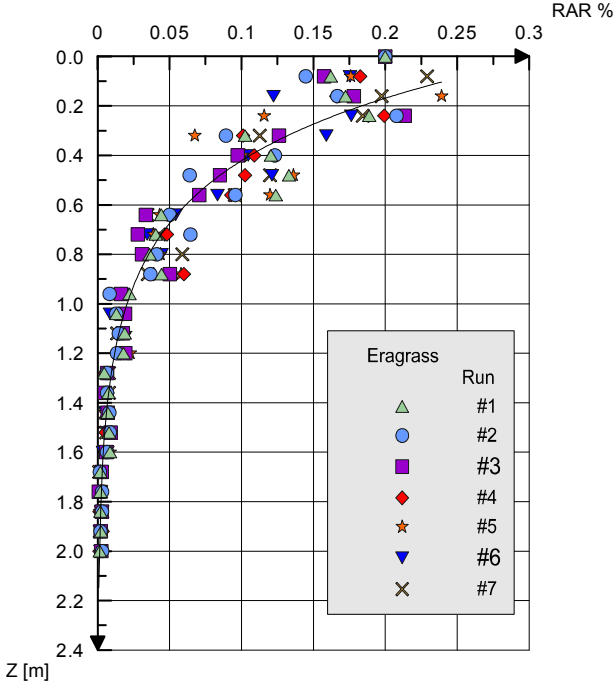


Figura 11 - Specie Eragrass: profili *RAR* ottenuti dalle analisi numeriche.

3.2. *Incremento di resistenza a taglio prodotto dagli apparati radicali*

Dall'estensione dell'eq. (4) all'intero sistema radicale, precedentemente illustrato (§3.1), il massimo incremento di resistenza al taglio $\Delta\tau_r$, prodotto da un apparato radicale caratterizzato da radici profonde di elevata resistenza a trazione, può essere determinato mediante l'eq. (8), vale a dire:

$$\Delta\tau_r(z) = RAR(z) \cdot \sum_{i=1}^{m} t_{r,i} \left(\cos\theta \tan\phi + \sin\theta \right) \qquad (8)$$

In questa equazione, $t_{r,}$ è la resistenza a trazione della *i-esima* radice di diametro d_i, e θ è l'angolo di distorsione della singola radice rispetto alla potenziale superficie di scorrimento (vedi Fig. 6).

Ai fini applicativi, l'impiego dell'eq. (8) richiede la preliminare valutazione di una lunghezza minima della radice, l_{min}, tale da impedire eventuali fenomeni di sfilamento della radice stessa dal terreno, prima del raggiungimento della massima resistenza a trazione (Waldron, 1977); difatti, la radice deve essere sufficientemente radicata nel terreno, cosicché la resistenza attritiva all'interfaccia radice/terreno possa eccedere la massima resistenza a trazione della radice e prevenire lo sfilamento della stessa. Ipotizzando la

radice come una fibra elastica cilindrica (Gray & Leiser, 1989), la minima lunghezza di radicazione è data dall'Equazione (9):

$$l_{min} = \frac{t_r d_r}{2\tau_{pr}} \qquad (9)$$

Se la lunghezza di radicazione è minore di l_{min}, allora la radice potrà sfilarsi prima che si raggiunga la sua massima resistenza a trazione. Nell'eq. (9), τ_{pr}, è la massima tensione tangenziale all'interfaccia radice/terreno.

3.3. *Analisi di stabilità di coltri superficiali di versante in presenza di vegetazione*

L'equazione (8) è stata impiegata per quantificare l'effetto meccanico di un impianto radicale profondo sulle condizioni di stabilità di un versante. A tal fine e, a titolo di esempio, è stato considerato un pendio caratterizzato da una coltre superficiale potenzialmente instabile dello spessore di 1 ÷ 1.5 m. Il problema può essere considerato monodimensionale e modellato mediante lo schema di *pendio indefinito*.

Sulla base delle considerazioni precedenti, il coefficiente di sicurezza, FS_r, per un terreno con angolo di attrito ϕ', e coesione c', può essere valutato con la seguente espressione:

$$FS_r = \frac{\tau_f + \Delta\tau_r}{\gamma z \cdot cos\,\alpha \cdot sin\,\alpha} = \left(1 - \frac{\gamma_w \cdot D_w}{\gamma z}\right) \cdot \frac{tan\,\phi'}{tan\,\alpha} + \frac{c' + \Delta\tau_r}{\gamma z \cdot cos\,\alpha \cdot sin\,\alpha} \qquad (10)$$

ove α è l'inclinazione del versante, mentre z e D_w sono rispettivamente la profondità della potenziale superficie di scorrimento e la distanza tra questa profondità e la superficie piezometrica.

Nel caso in esame, il terreno è caratterizzato da un angolo di attrito ϕ' = 30° e coesione nulla, mentre la falda è assente (D_w=0). L'inclinazione media del versante è piuttosto elevata, pari a α = ϕ' = 30°, mentre il sistema radicale è costituito dalla specie erbacea *Eragrass*, caratterizzata da radici di diametro medio d = 0.66 mm (d_{min}= 0.24 mm, d_{max}= 1.08 mm) e massima profondità di radicazione $z_{r,max}$ = 2 m.

I risultati dell'analisi di stabilità sono mostrati in Figura 12. Per il caso in esame, la figura mostra il profilo *RAR* (Fig. 12a) ed il corrispondente contributo meccanico delle radici alla resistenza a taglio del terreno, $\Delta\tau_r$ (Fig. 12b). In particolare, l'effetto favorevole dovuto alla presenza delle radici è messo in evidenza nella Figura 12c), dove i valori del coefficiente di sicurezza ottenuti per un versante radicato e privo di coesione, sono confrontati con quelli ottenuti, al contrario, per

un versante non radicato in terreni con resistenza attritiva e coesiva (c'= 5kPa, 10kPa).

L'incremento meccanico dovuto alla presenza delle radici porta ad un notevole aumento del coefficiente di sicurezza e tale incremento è confrontabile, nella porzione di terreno più superficiale (0.5 ÷ 1.5m) con quello indotto da un incremento di coesione di 10kPa; a profondità maggiori, il contributo meccanico diventa meno apprezzabile.

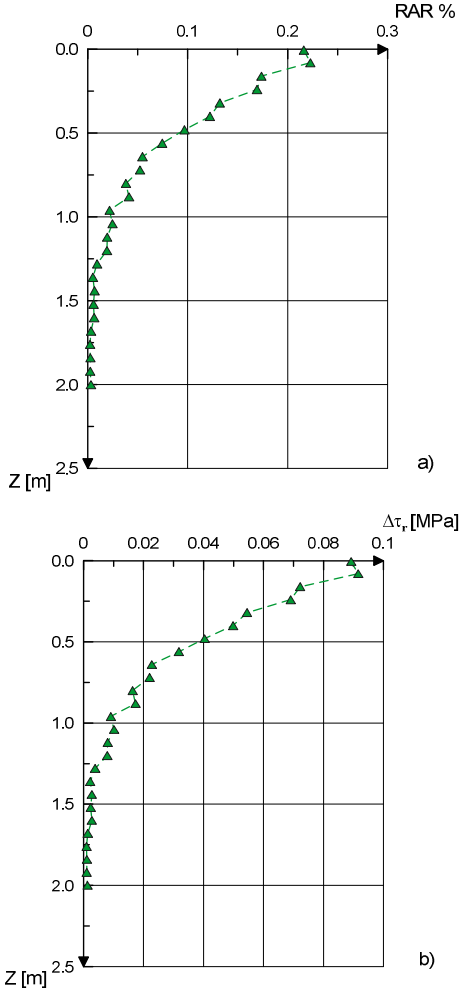


Figura 12 - Effetto del rinforzo meccanico apportato da un apparato radicale sulle condizioni di stabilità di un versante: a) profilo *RAR* (*Eragrass*); b) incremento di resistenza al taglio.

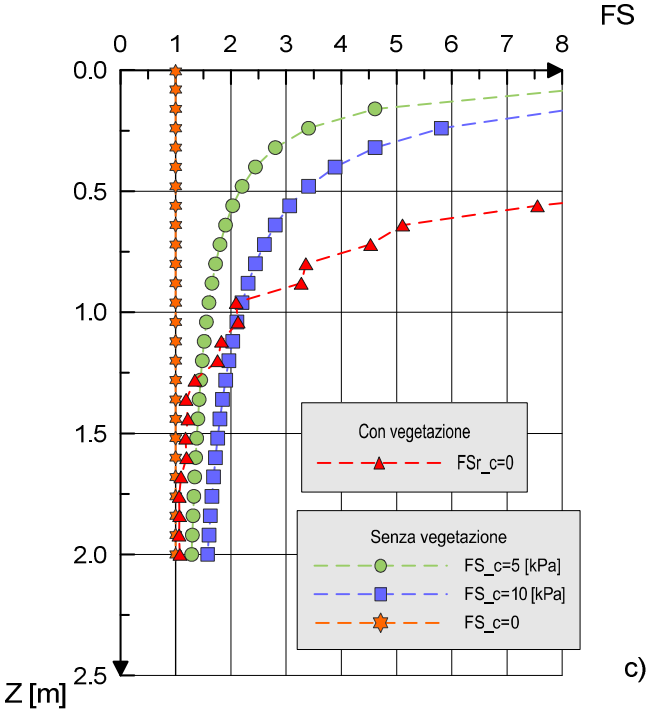


Figura 12c) - Effetto del rinforzo meccanico apportato da un apparato radicale (*Eragrass*) sulle condizioni di stabilità di un versante: andamento del coefficiente di sicurezza *FS* con la profondità.

La Figura 13 mostra l'effetto della specie erbacea sui profili *RAR*, sull'incremento di resistenza a taglio offerto dalle radici al terreno, e sulla distribuzione del coefficiente di sicurezza al variare della profondità. Le caratteristiche del versante sono le stesse del caso precedente. Si può osservare che, per tutte le specie erbacee selezionate, l'effetto benefico delle radici è massimo nella fascia di terreno superficiale inferiore al metro, e decresce bruscamente all'aumentare della profondità.

Infine, la Figura 14 rappresenta il coefficiente di sicurezza al variare del rapporto di area radicata per diverse specie erbacee: i risultati mostrano in modo molto chiaro l'effetto benefico di tutte le specie erbacee sulle condizioni di stabilità del versante, in funzione del rapporto *RAR*. A titolo di esempio, per ottenere un coefficiente di sicurezza pari a 3 - alla profondità di circa 1 m dal piano campagna - la *Variante 10* richiede un valore di *RAR* = 0.008 %, mentre per la specie *Eragrass* il rapporto di area radicata è, in prima approssimazione, circa 3 volte maggiore (*RAR* = 0.028 %); ciò dipende sia dai diversi diametri caratterizzanti la singola specie erbacea sia dai valori di resistenza a trazione propri della singola specie.

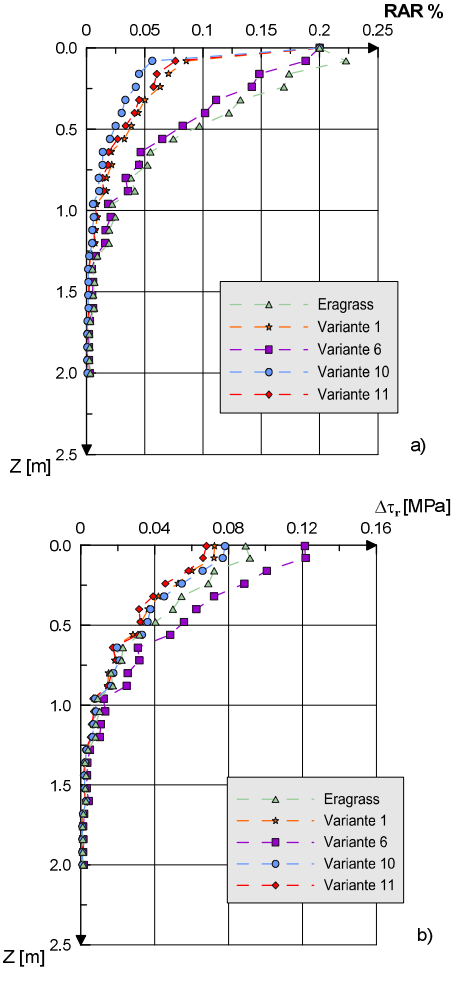


Figura 13 – Distribuzioni con la profondità (per differenti specie erbacee) di: a) *RAR* , b) $\Delta\tau_r$.

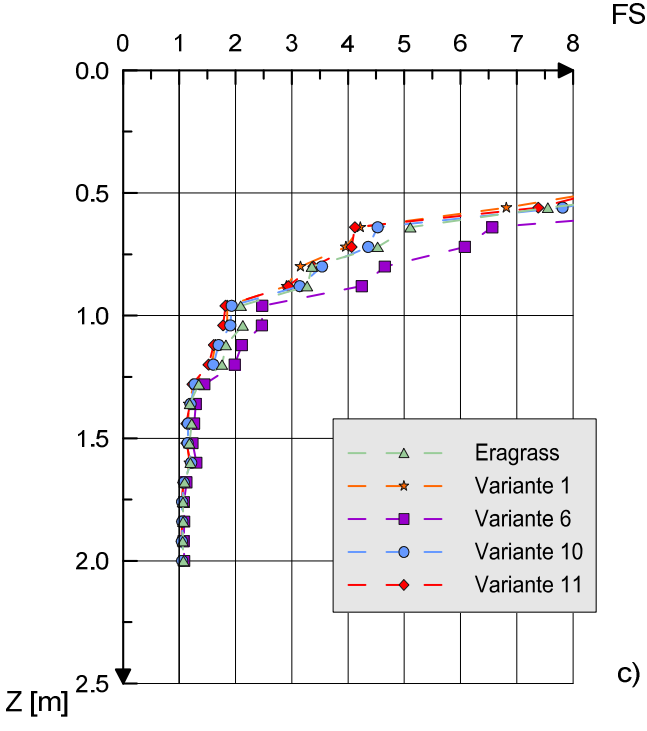


Figura 13 c) – Distribuzione con la profondità (per differenti specie erbacee) del coefficiente di sicurezza.

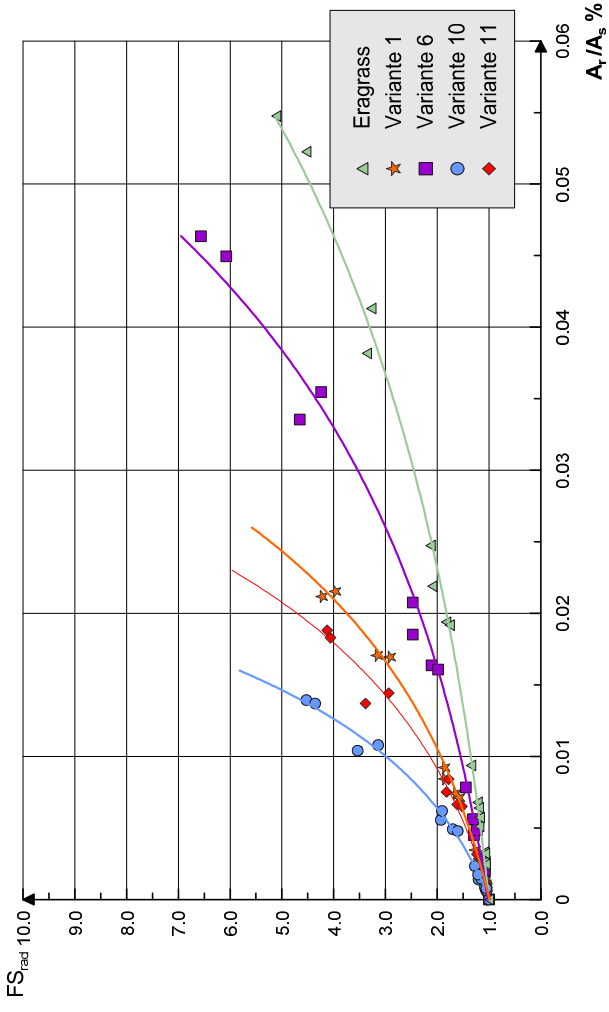


Figura 14 - Coefficiente di sicurezza FS_r in funzione del rapporto di area radicata, *RAR*. Effetto delle differenti specie erbacee sulla stabilità del versante (per z > 0.5m)

4. IL CONTRIBUTO DELLE RADICI NEI FENOMENI DI INTERAZIONE DI NATURA IDRAULICA CON IL TERRENO

Oltre a svolgere l'importante ruolo di rinforzo meccanico su descritto, l'impianto nel terreno di radici di specie erbacee può condizionare le proprietà idrauliche del terreno stesso. Gli effetti idraulici nei processi di interazione terreno/radice sono numerosi e vanno dalla intercettazione di parte delle piogge meteoriche, alla modifica delle caratteristiche idrauliche del terreno radicato. Alcuni dei processi sono a carico prevalente della parte epigea delle specie erbacee e dipendono dall'entità spaziale dell'area fogliare, mentre altri sono fortemente dipendenti dall'architettura radicale (Amato et al., 2006b).

Con riferimento allo schema di pendio indefinito, rappresentativo di coltri superficiali di versante, in presenza di impianti radicali profondi, occorre in primo luogo analizzare i diversi fenomeni di natura idraulica/meccanica che possono verificarsi a seguito di precipitazioni, quali l'infiltrazione di acqua nelle porzioni più superficiali di terreno generalmente in condizioni di parziale saturazione, il ruscellamento, l'evapotraspirazione.

La trattazione analitica di tali fenomeni è certamente molto complessa da comprendere e da modellare. L'equazione di bilancio di massa può essere scritta simbolicamente nel seguente modo:

$$P = I + R + ET \qquad (11)$$

ove P è la precipitazione, ET indica l'evapotraspirazione, I è la quantità di pioggia infiltrata nel terreno, R il ruscellamento.

La presenza di vegetazione quindi influisce, significativamente, sul bilancio idrologico dell'area di interesse, grazie alla capacità dell'apparato epigeo di intercettare parte della precipitazione e dell'intera pianta, a seguito dell'evento piovoso, di assorbire acqua dal terreno trasferendola all'atmosfera per traspirazione. Quest'ultimo processo, produce un incremento di suzione e conseguentemente un incremento della resistenza a taglio del terreno radicato (Rahardjo et al., 2011).

Recentemente, diversi Autori Nyambayo & Potts, 2010; Indraratna et al., 2006; Hemmati & Gatmiri, 2008) hanno proposto modelli matematici che tengano conto dei fenomeni di interazione tra terreno-clima-vegetazione, a partire dall'assorbimento radicale nello strato di terreno interessato (*root water-uptake*). In questi lavori, centrati principalmente sulla modellazione dell'evapotraspirazione e sui suoi effetti (incre-

mento di suzione), la quantità d'acqua che le radici riescono a sottrarre al terreno, viene valutata mediante un termine aggiuntivo all'equazione di continuità del flusso (*sink term*) che rappresenta il contenuto d'acqua volumetrico traspirato dalle radici nell'unità di tempo. Tale termine aggiuntivo dipende principalmente dal contenuto d'acqua volumetrico del terreno, dalla densità radicale, e dal tasso di traspirazione potenziale (Selim & Iskandar, 1978).

Nonostante nel presente studio, l'attenzione sia rivolta prevalentemente alla valutazione del ruolo - positivo - della vegetazione sulle condizioni di sicurezza nei fenomeni di potenziale instabilità di coltri superficiali di versante, nel corso dello studio sono state eseguite alcune analisi numeriche volte a evidenziare i diversi aspetti di natura idrologia e meccanica connessi con la vegetazione. A tal fine è stato utilizzato il codice numerico ad elementi finiti *Vadose/W* (GEOSLOPE International Ltd.). Il codice permette di modellare il flusso sia nella zona insatura che nella zona sotto falda, valutando sia l'evaporazione che la traspirazione dovuta alla presenza di vegetazione. In particolare, il flusso d'acqua viene determinato mediante l'utilizzo dell'equazione di Richards modificata in modo da poter includere il *sink term*, quest'ultimo valutato a partire dalle condizioni climatiche imposte al contorno, dall' indice di area fogliare (*leaf area*

index, LAI), dalla massima profondità di radicazione e dal tasso di traspirazione potenziale (Feddes et al., 1976; Prasad, 1988). Per quanto riguarda l'analisi di stabilità trattata nel paragrafo successivo, il codice di calcolo *Vadose/W* consente di poter determinare il profilo del contenuto d'acqua volumetrico del terreno (θ), il grado di saturazione (S_r) nonché il profilo di suzione (s). A partire da quest'ultimo è possibile valutare la resistenza a taglio del terreno (τ_{unsat}) nella zona vadosa, adottando (ad esempio) il criterio di rottura per terreni non saturi proposto da Vanapalli et al., 1996.

4.1. *"Root-water uptake"*

Come già accennato nei paragrafi precedenti, in presenza di vegetazione occorre anche tenere conto dei fenomeni di traspirazione ad essa correlati. Tali fenomeni sono alimentati dalla quantità d'acqua che le radici riescono a sottrarre al terreno, modificandone il contenuto volumetrico d'acqua. Nella valutazione *root-water uptake*, diversi sono gli approcci proposti in letteratura (Molz & Remson, 1981): secondo alcuni di tali approcci (microscopico) si analizza il flusso radiale d'acqua per ogni singola radice, idealizzata come un cilindro infinitamente lungo di raggio uni-

forme; secondo altri (approccio macroscopico), l'intero apparato radicale viene trattato come un unico elemento, in modo da poter sintetizzare i vari contributi dovuti da tutte le singole radici. In tale modo si ipotizza che l'intero apparato radicale riesca ad assorbire un certo volume d'acqua dal terreno radicato nell'unità di tempo. Quest'ultimo approccio si basa sull'equazione di Richards (1931) opportunamente modificata. In questo studio essa è stata riformulata in accordo con l'equazione proposta da Mathur & Rao (1999):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(k(h)\frac{\partial h}{\partial z} + k(h) \right) - S(z,t) \qquad (12)$$

ove θ è il contenuto volumetrico d'acqua, *h* è il carico idraulico totale e *k(h)* è la conducibilità idraulica del terreno. La quantità *sink term S(z,t)*, ovvero il contenuto d'acqua volumetrico rimosso per unità di tempo, dipende principalmente dal contenuto d'acqua del terreno, dalle sue caratteristiche idrauliche, dalla densità del profilo radicale e dal tasso di traspirazione potenziale (Feddes et al., 1976; Prasad, 1988). In letteratura sono ad oggi disponibili diverse equazioni per la determinazione di *S(z,t)*. Alcune di queste si basano sull'ipotesi che il tasso di traspirazione potenziale possa uguagliare l'assorbimento radicale lungo il profilo di terreno radicato:

$$S_{max}(z,t) = C(z,t) \cdot TR \qquad (13)$$

Nell'eq. (13), *TR* è il tasso di traspirazione potenziale delle specie erbacee e *C(z,t)* è un fattore "pesato" che dipende dalla densità di lunghezza radicale, dal contenuto d'acqua, e più in generale dalle proprietà idrauliche del terreno. Selim & Iskandar (1978) hanno proposto la seguente equazione per la valutazione di *C(z,t)*:

$$C(z,t) = \frac{k(h) \cdot L(z)}{\int_0^{z_{r,max}} k(h) \cdot L(z) dz}; \quad \int_0^{z_{r,max}} k(h) \cdot L(z) dz = 1 \qquad (14)$$

con *L(z)* (densità di lunghezza radicale, cm/cm^3).

Tuttavia, in condizioni reali la disponibilità d'acqua per la pianta non è illimitata. Una diminuzione del contenuto d'acqua del terreno conduce a degli incrementi di suzione, e pertanto la traspirazione reale sarà più bassa di quella potenziale (Nyambayo & Potts, 2010; Greco et al., 2013).

Quando il contenuto d'acqua del terreno è limitato, la quantità *root-water uptake* può essere ridotta mediante un fattore di riduzione α, funzione della suzione del terreno radicato.

$$S_\alpha = \alpha \cdot S_{max} \tag{15}$$

ove S_α (in questo caso) rappresenta il contenuto d'acqua volumetrico reale rimosso per unità di tempo. Il fattore di riduzione α, può essere modellato mediante l'approccio proposto da Feddes et al., 1978:

$$\begin{cases} \alpha(s) = 0 & s \le s_1 \\ \alpha(s) = \dfrac{s - s_1}{s_2 - s_1} & s_1 < s < s_2 \\ \alpha(s) = 1 & s_2 \le s \le s_3 \\ \alpha(s) = \dfrac{s - s_4}{s_3 - s_4} & s_3 < s < s_4 \\ \alpha(s) = 0 & s \ge s_4 \end{cases} \tag{16}$$

La quantità d'acqua assorbita dall' apparato radicale è nulla sia per valori di suzione superiori al punto di appassimento della pianta s_4, *wilting point*, sia per valori al di sotto del punto di anaerobiosi s_1, quest'ultimo causato da un eccesso d'acqua, mentre è costante e pari al suo valore massimo per valori intermedi, s_2 e s_3 (Fig. 15).

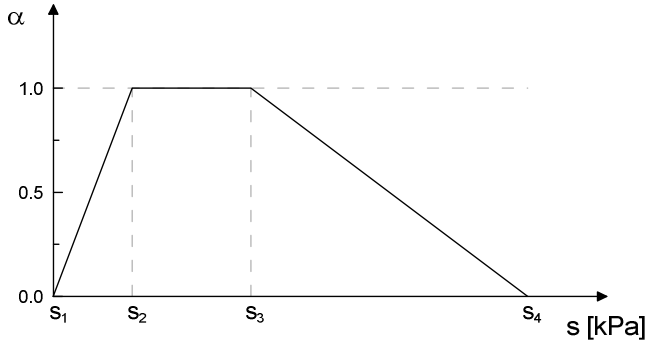


Figura 15 – Variazione del fattore di riduzione α al variare della suzione (adattata da Feddes et al., 1978)

L'assorbimento radicale a seguito di un evento pluviometrico, diventa apprezzabile su un intervallo di tempo sufficientemente lungo. Al fine di valutare e quantificare tale effetto nel tempo sono state condotte delle analisi numeriche agli elementi finiti con il codice *Vadose/W* (GEOSLOPE International Ltd.). In particolare, si è considerato il caso di un evento piovoso della durata di due giorni (v. Fig. 16) con precipitazione crescente da 40 a 80 mm (giorni t_2-t_3 figure 17÷20). La falda si trova ad una profondità di 12 m dal piano campagna (z_w = 12m); le proprietà idrauliche del terreno e le condizioni climatiche imposte al contorno sono ripotate in Tabella 2, così come le caratteristiche della vegetazione.

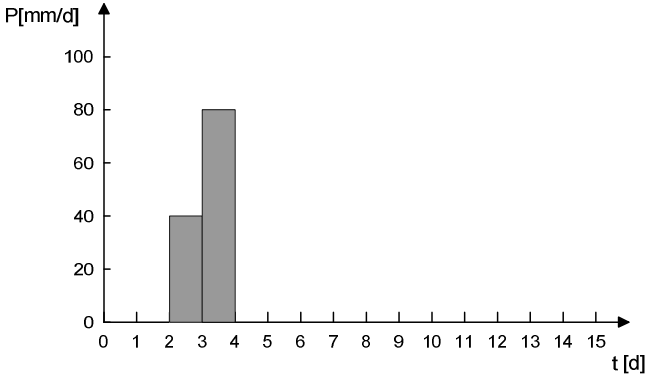


Figura 16 – Evento piovoso simulato nelle analisi

Come si può ben osservare dalle Figure 17 e 19, l'effetto dovuto all'assorbimento radicale diventa apprezzabile alcuni giorni dopo l'evento di pioggia e consiste in una sostanziale diminuzione del contenuto d'acqua con la profondità. In particolare, il contenuto d'acqua aumenta significativamente nello strato superficiale di terreno durante l'evento piovoso (secondo e terzo giorno (t_2,t_3), figura 17) ma poi decresce rapidamente nei giorni successivi all'evento, $t_6 \div t_{15}$.

In assenza di apparati radicali (Figure 18 e 20), la diminuzione del contenuto d'acqua rimane contenuta nella zona più superficiale di terreno (0 ÷ 0.4 m), a motivo principalmente dei fenomeni di evaporazione diretta dal suolo nudo, mentre si mantiene invariata a profondità maggiori.

Proprietà idrauliche del terreno		
Contenuto volumetrico d'acqua a saturazione	θ_s (m^3/m^3)	0.508
Contenuto volumetrico d'acqua residuo	θ_r (m^3/m^3)	0.120
Permeabilità del terreno a saturazione	k_s (m/s)	$1.1 \cdot 10^{-7}$
Curva di ritenzione idrica	n	1.39
(van Genuchten, 1980)	α^{-1} (kPa)	12.2
Vegetazione		
Massima profondità di radicazione	$z_{r,max}$ (m)	2
Diametro medio della radice	$d_{med.}$ (mm)	0.66
Indice di area fogliare	LAI	2.7
Root-water uptake	s_1 (kPa)	0
(Feddes et al., 1976; Greco et al., 2013;	s_2 (kPa)	5
Nyambayo, Potts, 2010)	s_3 (kPa)	150
	s_4 (kPa)	1500
Condizioni climatiche		
Temperatura massima	T_{max} (°C)	26
Temperatura minima	T_{min} (°C)	18
Velocità del vento	w (m/s)	3.6

Tabella 2- Proprietà idrauliche del terreno, della vegetazione e condizioni climatiche al contorno.

In definitiva, in presenza di vegetazione oltre all'evaporazione diretta dalla porzione di terreno superficiale, limitata in questo caso dalla presenza dell'apparato epigeo, 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.

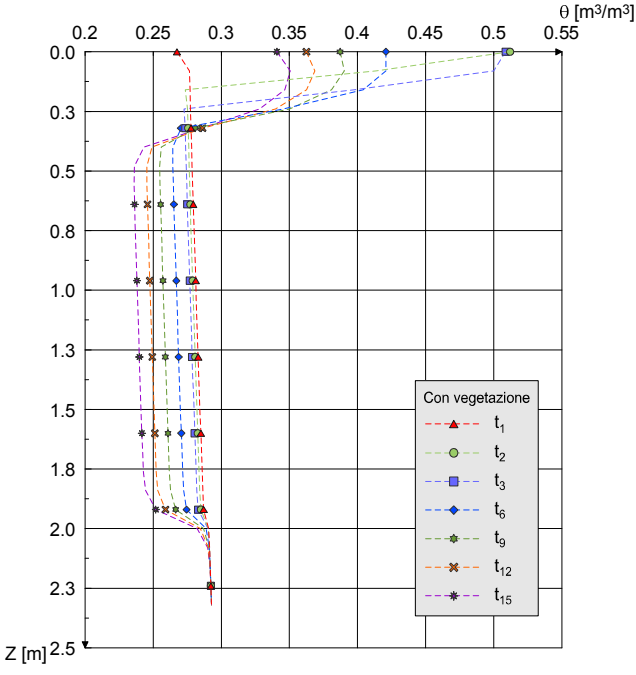


Figura 17 - Profili di contenuto volumetrico d'acqua con la profondità, ed al variare del numero di giorni, t_i, in presenza di vegetazione.

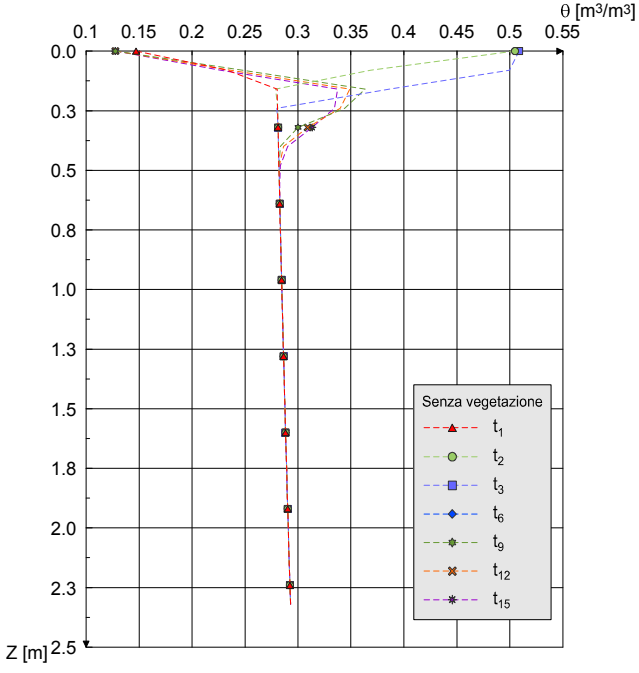


Figura 18 - Profili di contenuto volumetrico d'acqua con la profondità ed al variare del numero di giorni, t_i, in assenza di vegetazione.

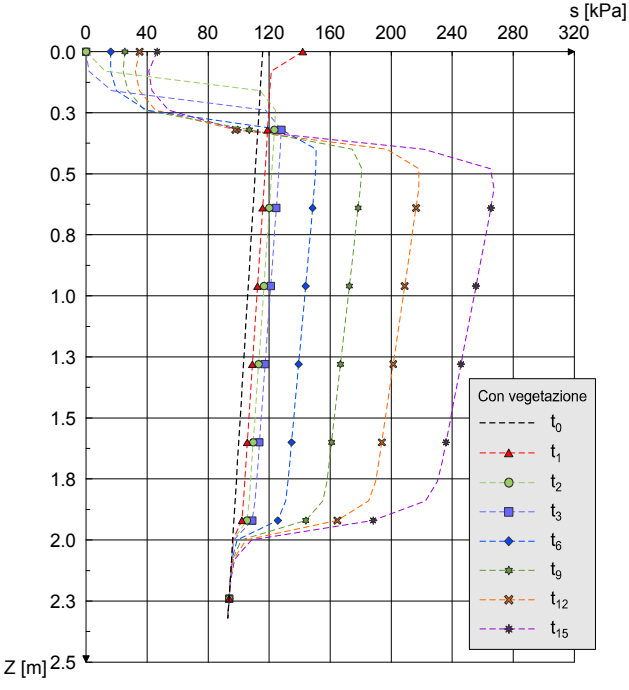


Figura 19 - Profili di suzione con la profondità, ed al variare del tempo, t_i, in presenza di vegetazione.

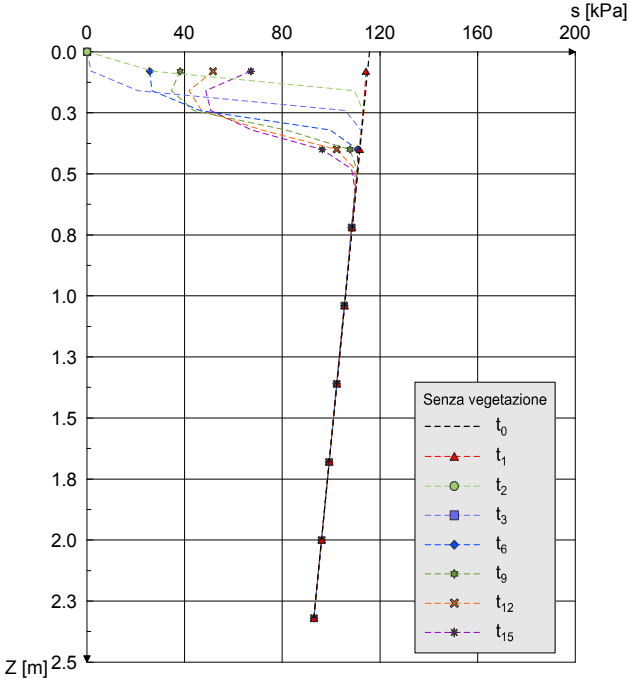


Figura 20 - Profili di suzione con la profondità, ed al variare del tempo, t_i, in assenza di vegetazione.

Le stesse analisi sono state ripetute al variare della pendenza del versante (Figura 21). Per una fissata profondità di osservazione (z = 1.6 m), in assenza di vegetazione sembra non esserci alcuna correlazione tra l'inclinazione del versante e la variazione del contenuto volumetrico d'acqua del terreno nel tempo, essendo quest'ultimo di fatto costante al variare dell' inclinazione α.

Al contrario, in presenza di radici, si osserva una diminuzione del contenuto d'acqua all'aumentare dell'inclinazione del versante e tale variazione aumenta nel tempo, con un corrispondente aumento dei valori di suzione.

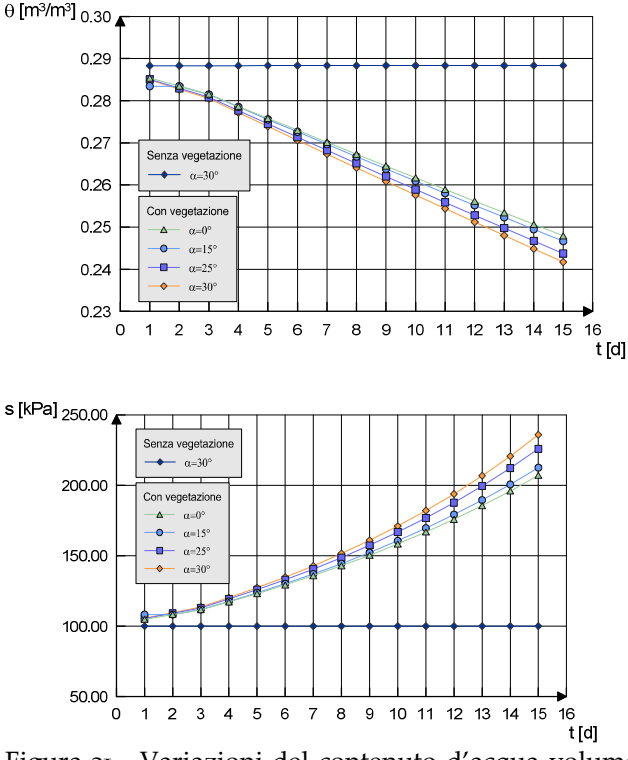


Figura 21 - Variazioni del contenuto d'acqua volumetrico, θ, e di suzione, *s*, in assenza ed in presenza di apparati radicali, al variare dell'inclinazione del versante, per una fissata profondità z = 1.6m, (falda alla profondità, z_w = 12m).

5. UN ESEMPIO DI ANALISI DI STABILITÀ DI VERSANTE

In questo capitolo sono illustrati i risultati ottenuti verifiche di stabilità di versante condotte con l'obiettivo primario di valutare gli effetti di natura idraulico/meccanica indotti dalla presenza di radici profonde nel terreno a seguito di un evento piovoso. Nelle analisi di stabilità, per il terreno è stato utilizzato il criterio di rottura proposto da Vanapalli et al. (1996) e modificato per poter inglobare il contributo meccanico apportato dalla presenza di radici. Il versante è stato modellato attraverso il metodo del pendio indefinito.

L'equazione che consente di determinare il coefficiente di sicurezza, in presenza di terreno radicato, può essere formulata nel seguente modo:

$$\begin{aligned} FS_r(z) &= \frac{\tau_{unsat}(z) + \Delta\tau_r(z)}{\gamma z \cdot cos\alpha \cdot sin\alpha} \\ &= \left(1 + \frac{S_r(z) \cdot s(z)}{\gamma z \cdot cos^2\alpha}\right)\frac{tan\phi'}{tan\alpha} + \frac{c' + \Delta\tau_r(z)}{\gamma z \cdot cos\alpha \cdot sin\alpha} \end{aligned} \qquad (17)$$

Come già indicato, per la valutazione della variazione del contenuto d'acqua e della suzione del terreno, durante e a seguito dell'evento piovoso, è stato utilizzato il software *Vadose/W*, men-

tre le analisi di stabilità sono state condotte con il software *Slope/W* dello stesso pacchetto *GeoStudio2007*.

Nell'esempio di calcolo, il versante di inclinazione α = 30°, è costituito da terreni granulari (ϕ'= 30°, c'=0), caratterizzati da una permeabilità (satura) k_s =1.08*10^{-7} (m/s). La falda si trova alla profondità z_w = 2.5 m dal piano campagna, mentre l'apparato radicale si estende fino ad una profondità di 2m. Il valore del *LAI* ("*leaf area index*") è pari a 2.7 (v. Tabella 3).

Nelle Figure 22-25 sono riportati i profili di contenuto d'acqua e di suzione sia nel caso di presenza di copertura vegetale che in assenza.

Come si può osservare dalla Figura 23, a seguito dell'evento di pioggia, il contenuto d'acqua iniziale nello strato di terreno radicato è prossimo a quello di saturazione e l'assorbimento d'acqua da parte delle radici è limitato, sebbene si osservi un incremento di suzione, rispetto al terreno non radicato (Figura 24), dell'ordine di 10 kPa (Figura 25) e conseguentemente un aumento del coefficiente di sicurezza, come si può notare dalla Figura 26.

Proprietà meccanico- idrauliche del terreno		
Inclinazione del versante	α (°)	30
Angolo di attrito del terreno	ϕ' (°)	30
Peso dell'unità di volume del terreno	γ (kN/m^3)	20
Peso specifico dei grani solidi	γ (kN/m^3)	25
Coesione efficace	c' (kPa)	0
Contenuto volumetrico d'acqua a saturazione	θ_s (m^3/m^3)	0.508
Contenuto volumetrico d'acqua residuo	θ_r (m^3/m^3)	0.120
Permeabilità del terreno a saturazione	k_s (m/s)	$1.1 \cdot 10^{-7}$
Curva di ritenzione idrica	n	1.39
(van Genuchten, 1980)	α^{-1} (kPa)	12.2
Vegetazione		
Massima profondità di radicazione	$z_{r,max}$ (m)	2
Diametro medio della radice	$d_{med.}$ (mm)	0.66
Indice di area fogliare	LAI	2.7
Root-water uptake	s_1 (kPa)	0
(Feddes et al., 1976 ; Greco et al., 2013;	s_2 (kPa)	5
Nyambayo, Potts, 2010)	s_3 (kPa)	150
	s_4 (kPa)	1500
Condizioni climatiche		
Temperatura massima	T_{max} (°C)	26
Temperatura minima	T_{min} (°C)	18
Velocità del vento	w (m/s)	3.6
Precipitazione al secondo giorno,t_2	P (mm/d)	40
Precipitazione al terzo giorno,t_3	P (mm/d)	80

Tabella 3 - Proprietà meccanico-idrauliche del terreno, caratteristiche della vegetazione e condizioni climatiche al contorno.

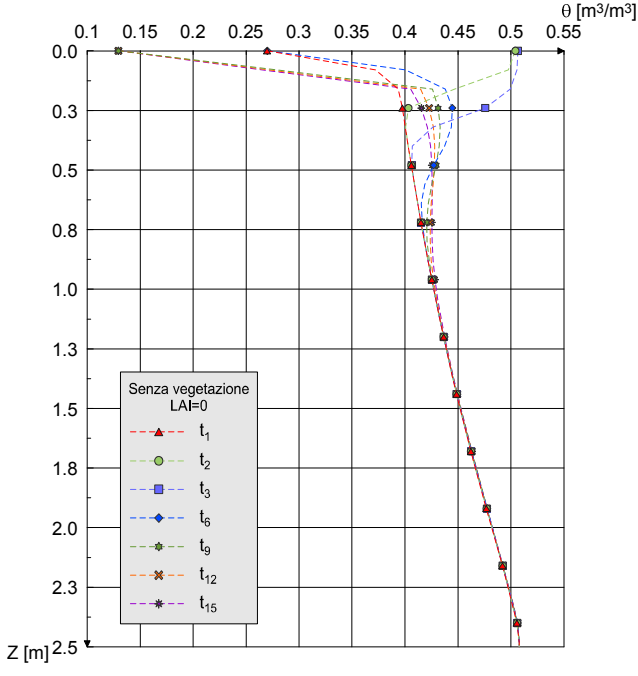


Figura 22 - Profili di contenuto volumetrico d'acqua (inclinazione pendio, α=30°, falda z_w = 2.5m dal pc), in assenza di vegetazione.

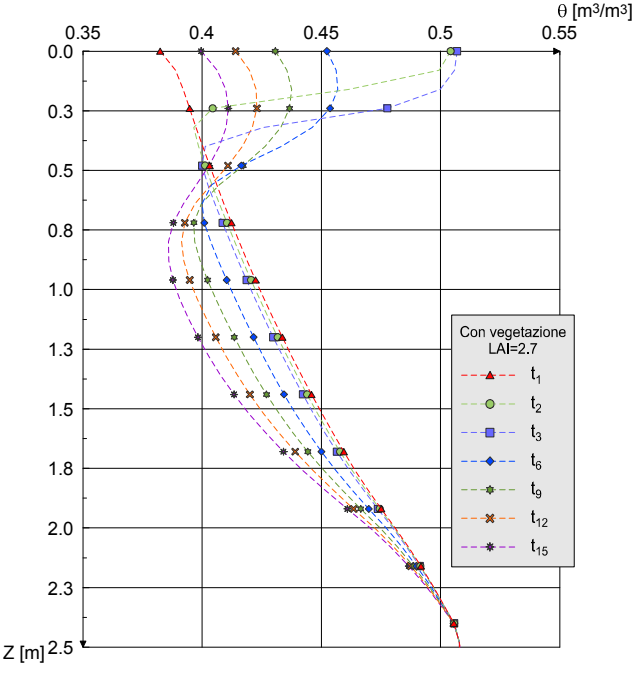


Figura 23 - Profili di contenuto volumetrico d'acqua (inclinazione pendio, α=30°, falda z_w = 2.5m dal pc), in presenza di vegetazione (LAI = 2.7).

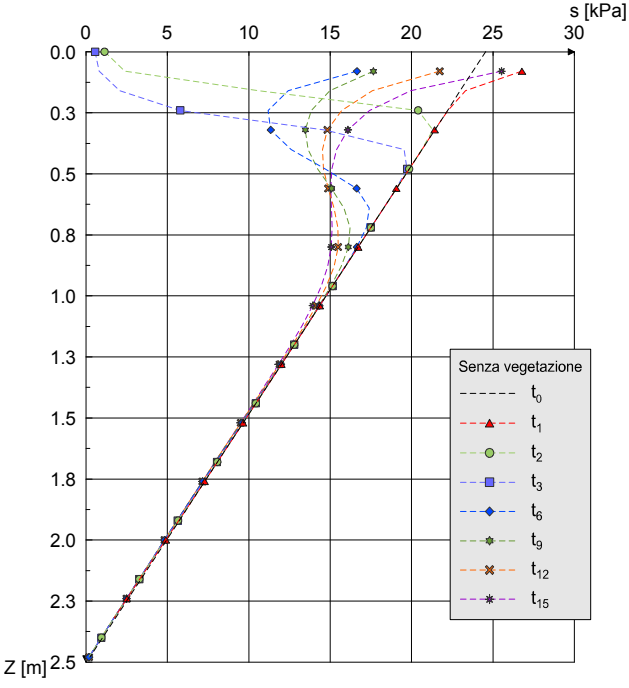


Figura 24 - Profili di suzione (inclinazione pendio, α=30°, falda z_w = 2.5m dal pc), in assenza di vegetazione.

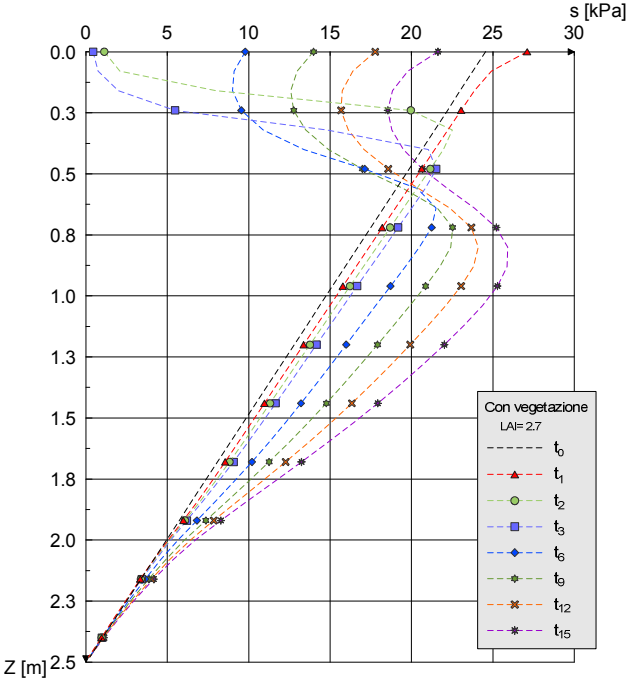


Figura 25- Profili di suzione (inclinazione pendio, α=30°, falda z_w = 2.5m dal pc), in presenza di vegetazione (LAI = 2.7).

Nella Figura 26 è rappresentato l'andamento del coefficiente di sicurezza (senza portare in conto il contributo di tipo meccanico) durante e a seguito dell'evento piovoso, valutato per potenziali su-

perfici di scorrimento a tre diverse profondità dal piano campagna, rispettivamente z = 0.4m, z = 0.8m e z = 1.6m; per quanto riguarda la vegetazione sono stati esaminati tre diversi valori di *LAI* (Belfiore & Urciuoli, 2005).

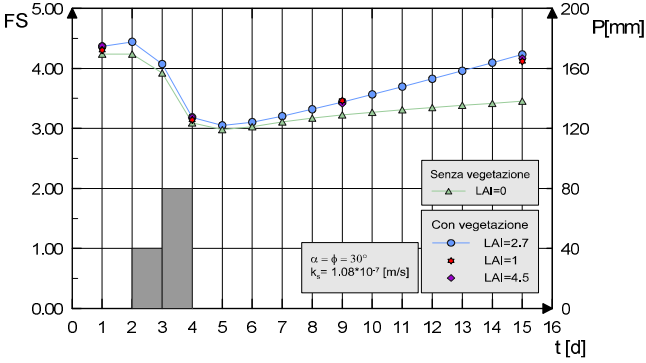


Figura 26a) - Variazione del coefficiente di sicurezza durante e a seguito di un evento piovoso: z = 0.4m.

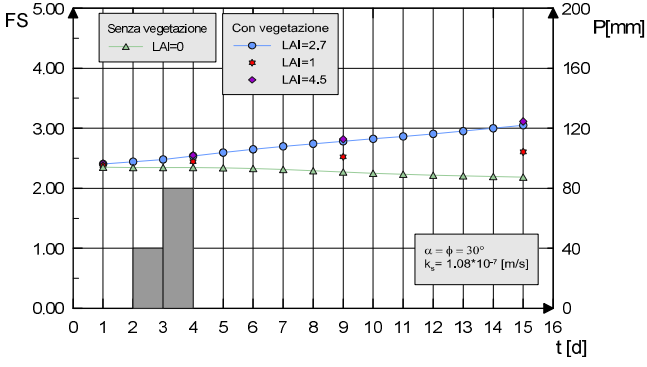
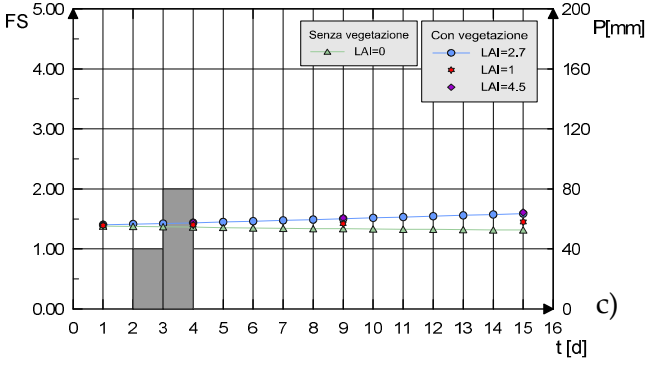


Figura 26b) - Variazione del coefficiente di sicurezza durante e a seguito di un evento piovoso: z = 0.8 m.



c)

Figura 26c) - Variazione del coefficiente di sicurezza durante e a seguito di un evento piovoso: z = 1.6 m.

Per profondità prossime al piano campagna (circa 0.4 ÷ 0.5 m), si nota come l'evento piovoso porti ad una brusca diminuzione del coefficiente di sicurezza (Figura 26a). L'effetto della vegetazione sulle condizioni di stabilità diventa apprezzabile solo alcuni giorni dopo l'evento. A profondità maggiori (circa 1 m), per il terreno in esame e per l'evento pluviometrico considerato, l'effetto della precipitazione sul coefficiente di sicurezza è meno apprezzabile, specie in presenza di impianto radicale. In quest'ultimo caso, infatti, l'infiltrazione di acqua nel terreno è condizionata dall'assorbimento radicale degli strati sovrastanti, con apprezzabile incremento di suzione già a partire da alcuni giorni dopo l'evento piovoso; ciò conduce ad un incremento del coefficiente di sicurezza (Rahardjo et al., 2011), diversamente da quanto osservato in assenza di vegetazione (Figura 26b). Per profondità vicine alla massima profondità di radicazione ($z_{r,max}$ = 2 m), l'assorbimento radicale non porta ad un apprezzabile variazione del coefficiente di sicurezza come nei casi precedenti (Figura 26c), a motivo del maggiore contenuto d'acqua iniziale in questa porzione di terreno e al minore assorbimento delle radici nella porzione terminale dell'apparato radicale. Le variazioni del contenuto d'acqua volumetrico sottratto dalle radici ($\theta_{sv} - \theta_{cv}$) e, conseguentemente, gli incrementi del coefficiente di sicurezza, dovuti all'effetto della vegetazione,

sono rappresentati in funzione del tempo nelle Figure 27 e 28.

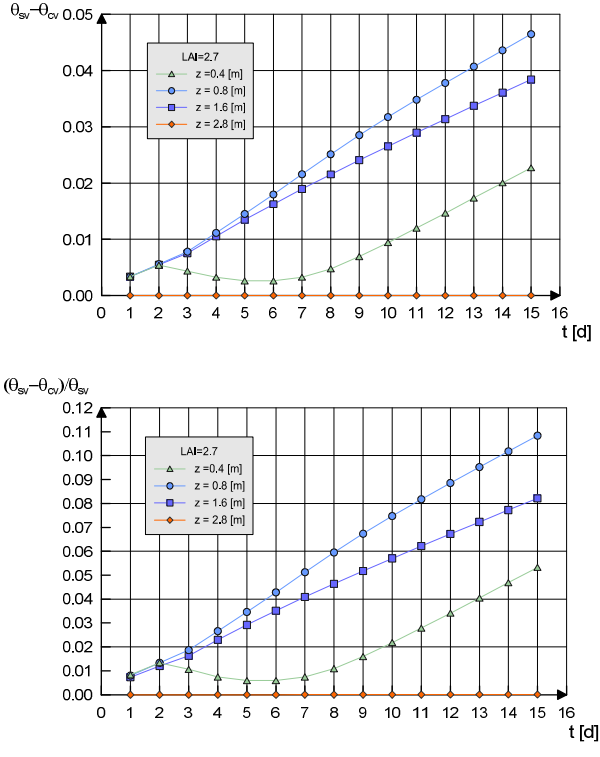


Figura 27 - Variazioni del contenuto d'acqua per effetto della vegetazione (z_w = 2.5m, $\phi' = \alpha$ =30°).

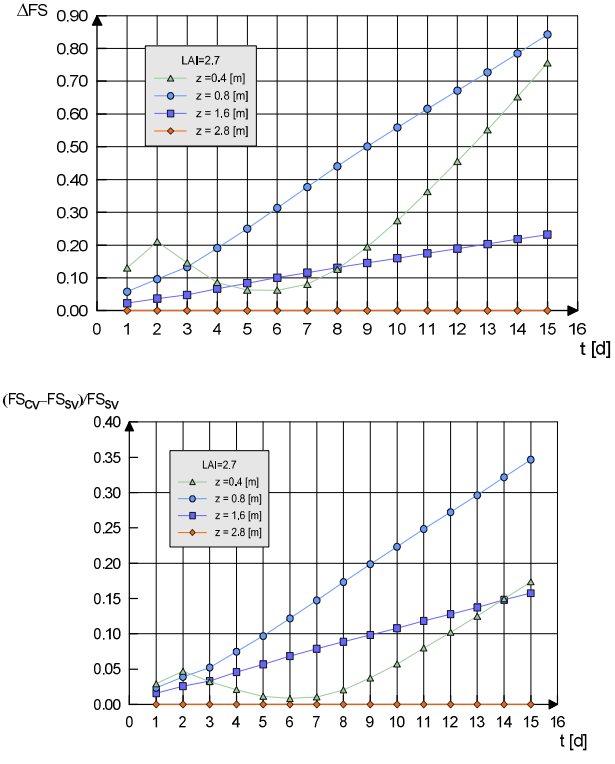


Figura 28 - Variazioni del coefficiente di sicurezza per effetto della vegetazione (z_w = 2.5m, ϕ' = α =30°).

Infine, nella Figura 29 è rappresentato l'andamento con la profondità del coefficiente di sicurezza ottenuto - per il caso in esame - considerando entrambi i contributi meccanico/idraulico offerti dalle radici, a confronto con quello ottenuto in assenza di vegetazione.

Come si può osservare l'incremento del coefficiente di sicurezza dovuto al contributo di natura idraulica di un impianto radicale è certamente minore di quello di tipo meccanico. Inoltre, come già osservato, il contributo idraulico diviene apprezzabile solo alcuni giorni dopo il verificarsi di un evento pluviometrico, e dalle analisi effettuate risulta essere tanto maggiore quanto più basso è il contenuto d'acqua iniziale del terreno. Ancora una volta si osserva, quindi, come la presenza di un impianto radicale profondo caratterizzato da radici sottili di elevata resistenza a trazione produca un effetto certamente favorevole sulle condizioni di stabilità del versante. In particolare, la somma dei due contributi, meccanico ed idraulico, porta ad un notevole aumento del coefficiente di sicurezza nella coltre superficiale del versante (fino ad 1÷1.5 m), al di sotto della quale tale incremento decresce gradualmente fino a raggiungere per $z = z_{r,max}$ il profilo di *FS* ottenuto per il terreno non radicato.

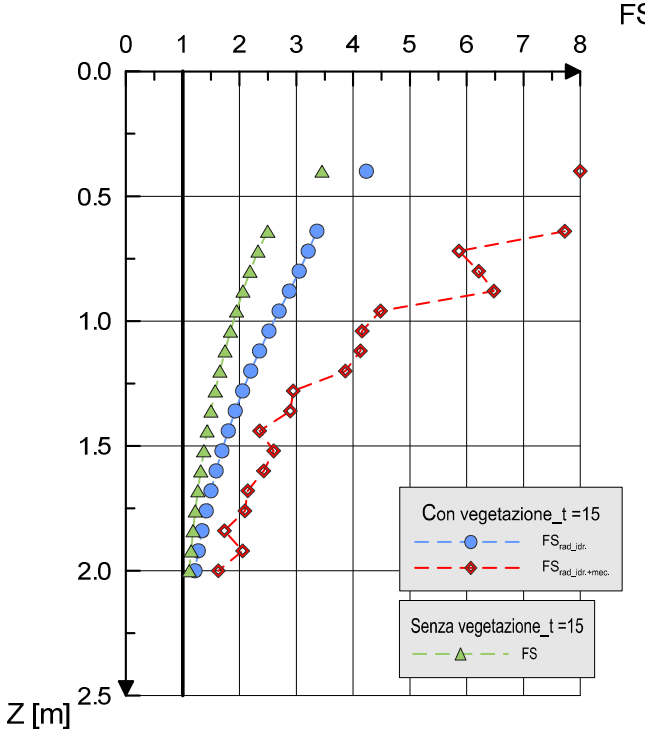


Figura 29 - Esempio di calcolo. Distribuzione con la profondità del coefficiente di sicurezza al tempo t = 15 giorni dopo l'evento di pioggia (v. anche Cecconi et al., 2013).

BIBLIOGRAFIA

ABE K., ZIEMER R., *Effect of tree roots on shear zone: modeling reinforced shear stress,* «USDA Pacific Southwest Research Station, Forest Service, USA», 1991.

AINA P.O., LAL R., TAYLOR G.S., *Effects of vegetal cover on soil erosion on an alfisol,* in *Soil Physical Properties and Crop Production in the Tropics* (eds R.Lal and R.J.Greenland). Wiley, Chichester, 1979, pp. 501–8.

AMATO M., BELFIORE G., MAZZOLENI S., URCIUOLI *G. Analisi del contributo meccanico della vegetazione alla resistenza delle coltri di terreno superficiale,* «Questioni di ingegneria geotecnica», Hevelius Edizioni 2006a.

AMATO M., LANDI G., MAZZOLENI S., *Il contributo della vegetazione alla stabilità dei terreni in pendio. Meccanismi e variabilità dei processi,* «Questioni di ingegneria geotecnica», Hevelius Edizioni 2006b.

BAGARELLO V., DI STEFANO C., FERRO V., PAMPALONE V., *Statistical distribution of soil loss and sediment yield at Sparacia experimental area, Sicily,* «Catena», 2010, n..82, pp. 45-52.

BAGARELLO V., DI STEFANO C., FERRO V., KINNEL P.I.A., PAMPALONE V., PORTO P., TODISCO F., *Predicting soil loss on moderate slopes using an empirical model for sediment concentration,* «Journal of Hydrology», 2011, n. 400, pp. 267-273.

BELFIORE G., URCIUOLI G., *Azione delle radici nell'interazione idrica fra sottosuolo ed atmosfera,* «IARG, Incontro Annuale Ricercatori di Geotecnica », Ancona, 2005.

BISCHETTI G.B., *Quantificazione dell'effetto dell'apparato radicale sulla stabilità dei versanti,* «Journal of Agricultural Engineering», 2000, 2, 70-81.

BISCHETTI G.B., CHIARADIA E. A., EPIS T., P*rove di trazione su radici di esemplari di piante pratiarmati®,* «Rapporto interno, Istituto di Idraulica Agraria, Università degli Studi di Milano», 2009.

BONFANTI F., BISCHETTI G.B. *Resistenza a trazione delle radici e modello di interazione terreno-radici,* «Rapporto interno, Istituto di Idraulica Agraria, Università degli Studi di Milano», 2001.

BURROUGHS E. R., THOMAS B.R. *Declining root strength in Douglas-fir after felling as a factor in slope stability,* «USDA Forest Service Research», 1977, Paper INT-190, pp. 27.

CAZZUFFI D., VILLA C., BONFANTI F., VITALI B., ZANELLA S., *Contributo quantitativo di diverse specie di piante alla stabilizzazione di pendii e versanti (Quantitative contribution of different species of plants to slope stability),* «Internal Report», 2001, n. 6323 Enel.Hydro. Milano, Italy.

CAZZUFFI D., RICCARDI A.G., *Indagine sperimentale sul contributo di piante Vetiver alla stabilizzazione di versanti (Experimental evaluation of the contribution of Vetiver plants to slope stability).* «Internal Report»,2002, n. A2/025337 CESI SpA. Milano, Italy.

CECCONI M., PANE V., NAPOLI P., CATTONI E. *Deep roots planting for surface slope protection,* «Electronic Journal of Geotechnical Engineering», 2012, n.17U, pp. 2809-2820.

CECCONI M., PANE V., NAPOLI P., ZAROTTI C. *Mechanical and hydraulic effects of deep roots planting on slope stability,* «TC 215 CPEG 2013 Symposium, Coupled Phenomena in Environmental Geotechnics», Torino, Italy , July 2013, pp. 533-540.

CHIRICO G.B., BORGA M., TAROLLI P., RIGON R., PRETI F., *Role of vegetation on slope stability under transient unsaturated conditions,* «Procedia Environmental Sciences», 2013, n. 19, pp. 932-941.

COPPIN N.J., RICHARDS I.G., *Use of vegetation in civil engineering construction,* «Industry Research and Information Association», Butterworths, London, 1990.

COUTTS MP. *Development of the structural root system of Sitka spruce.* «Forestry», 1983, n.56, pp. 1-16.

DALTON P.A., SMITH R.J., TRUONG P.N.V., *Vetiver grass hedges for erosion control on a cropped flood plain: hedge hydraulics,* «Agr. Water Manage», 1996, n.31, pp. 91–104.

DOCKER B.B., HUBBLE T.C.T., *Quantifying root reinforcement of river bank soils by four Australian tree species*, «Geomorphology», 2008, n. 100(3-4), pp. 401-418.

ENDO T., TSURUTA T., *The effect of the tree's root upon the shear strength of soil,* «68 Ann. Rep. Hokkaido Br., For. Experiment Station», 1969, pp. 167-182.

ERSKINE J.M., *Vetiver grass: its potential use in soil and moisture conservation in Southern Africa*, «S. Afr. J. Sci.», 1992, n.88, pp.298–299.

FEDDES R.A., KOWALIK P.J., ZARADNY H., *Simulation of field water use and crop yield*, «Simulation Monographs, PUDOC, Wageningen» Netherlands, 1978, pp. 189.

FEDDES R. A., KOWALIK P., MALINKA K. K., ZARADNY H., *Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function,* «Journal of Hydrology», 1976, n.31, pp. 13–26.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD., *Vadose/W*, GeoStudio2007, Calgary, Alberta, T2P 2Y5, Canada.

GIADROSSICH F., PRETI F., GUASTINI E., VANNOCCI P., *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*, «Geologia tecnica & ambientale», 2010, vol. 4/2010, pp. 5-12.

GRAY D.H., BARKER D., *Root-Soil Mechanics and Interactions, in Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology,* «Water Science and Application 8, American Geophysical Union», Wash-

ington, DC, 2004, pp. 125-139.

GRAY D. H., LEISER A. T., *Biotechnical slope protection and erosion control,* Krieger Publishing Company, 1989, Malabar, Florida.

GRAY D. H., OHASHI H. , *Mechanics of fiber reinforcement of sand,* «Journal of Geotechnical Engineering», ASCE, 1983, Vol. 109, n.3, pp. 335-353.

GRAY D. H., SOTIR R. B., *Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control,* «John Wiley and Sons», 1996.

GRECO R., COMEGNA L., DAMIANO E., GUIDA A., OLIVARES L., PICARELLI L., *Hydrological modelling of a slope covered with shallow pyroclasticdeposits from field monitoring data,* «Hydrol. Earth Syst. Sci.», 2013, n. 17, pp. 4001-4013.

HEMMATI S., GATMIRI B., *Numerical modeling of tree root water-uptake in a multiphase medium,* «In Unsaturated Soils: Advances in Geo-Engineering» (Toll DG, Augarde CE, Gallipoli D and Wheeler SJ (eds)). Taylor & Francis, 2008, pp. 785–790.

INDRARATNA B., FATAHI B., KHABBAZ H., *Numerical analysis of matric suction effects of tree roots,* «Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Geotechnical Engineering», 2006, n. 159, pp. 77-90.

KE C., FENG Z., WU X., TU F., *Design principles and engineering samples of applying vetiver ecoengineering technology for steep slope and riverbank stabilization.* «Proc 3rd Int'l Conf. on Vetiver, Guangzhou, China, China Agricultural Press», Beijing, 2003, pp. 365-374.

LAIO F., D'ODORICO P., RIDOLFI L., *An analytical model to relate the vertical root distribution to climate and soil properties.* «Geophysical Research Letters», 2006, n.33, L18401.

MATHURN S., RAO S., *Modeling water uptake by plant roots,* «Journal of Irrigation and Drainage Engineering», 1999, n. 125(3), pp. 159-165.

MATTIA C., BISCHETTI G.B., GENTILE F. *Biotechnical characteristics of root systems of typical Mediterranean species,* «Plant and Soil Springer», 2005 , n. 278, pp. 23-32.

MICKOVSKI S.B. , VAN BEEK L.P.H., *Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (Vetiveria zizan oides)*

plants grown in semi-arid climate, «Plant Soil»,2009, n. 324, pp. 43-56.

MOLZ F. J., REMSON I., *Models of water transport in the soil–plant system: A review.* «Water Resources Research», 1981, n. 17(5), pp. 1245-1260.

NYAMBAYO V.P., POTTS D.M., *Numerical simulations of evapotranspiration using a root water uptake model,* «Computer and Geotechnics» 2010, n. 37(1-2), pp. 175-186.

OLSTHOORN A. F. M., KELTJENS W. G., BAREN B., *Influence of ammonium on fine root development and rhizosphere pH of Douglas-fir seedlings in sand,* «Plant and soil», 1991, n. 133, pp. 75-81.

OSMAN N., BARAKBAH S.S., *Parameters to predict slope stability-soil water and root profiles,* «Ecol. Eng.», 2006, n. 28,pp. 90-95.

PARKER M. M., VAN LEAR D.H., *Soil heterogeneity and root distribution of mature loblolly pine stands in piedmont soils,* «Soil Science Society of America Journal», 1996, n. 60, pp. 1920-1925.

POLLEN N., *The Effects of Riparian Vegetation on streambank stability: Mechanical and Hydrological interactions.* «Ph.D. Thesis», King's College, University of London, 2004, pp. 320.

POLLEN N., *Temporal and spatial variability in root reinforcement of streambanks: Accounting for soil shear strength and moisture,* «Catena», 2007, n. 69, pp. 197-205.

POLLEN N., SIMON A., *Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model,* «Water Resources Research», 2005, n. 41, W07025.

PRASAD R., *A linear root water uptake model,* «Journal of Hydrology», 1988, n.99, pp. 297-306.

PRETI F., GIADROSSICH F., *Root reinforcement and slope bioengineering stabilization by Spanish Broom (Spartium junceum L.),* «Hydrol. Earth Syst. Sci.», 2009, n. 13, pp. 1713-1726.

PRETI F., DANI A., LAIO F., *Root profile assessment by means of hydrological, pedological and aboveground vegetation information for bioengineering purposes,* «Ecological Engineering», 2010, n.36, pp.305-316.

RAHARDJO H., SATYANAGA A., LEONG, E.C. *Unsatured soil mechanics for slope stabilization,* «Unsatured Soils: Theory and Practice» 2011, Kasetsart University, Thailand.

RICHARDS L.A., *Capillary conduction of liquids in porous mediums.* «Physics», 1931, n.1, pp. 318-333.

SCHLOSSER F., LONG N., *Recent Results in French Research on Reinforced Earth"*, «Journal of the Construction Division», 1974, Vol. 100, n.CO3, pp. 223-237.

SCHMIDT K.M., ROERING J.J., STOCK J.D., DIETRICH W.E., MONTGOMERY D.R., SCHAUB T., *The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range*, «Can. Geotech. J.», 2001, n.38, pp. 995-1024.

SCHWARZ M., PRETI F., GIADROSSICH F., LEMANN P., OR D. *Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy),* «Ecological Engineering», 2010, Vol. 36, Issue 3, pp. 285-291.

SELIM H.M., ISKANDAR I.K., *Nitrogen behavior in land treatment of wastewater: A simplified model,* «State of Knowledge in Land Treatment of Wastewater», Hanover, N.H.: Cold Regions Research and Engineering Lab., 1978, pp. 171-179.

SHEWBRIDGE S.E., SITAR N., *Deformation characteristics of reinforced sand in direct shear,* «Journal of Geotechnical Engineering», ASCE, 1989, n. 115(8), pp. 1134-1147.

THORNES J.B., *Competitive vegetation-erosion model for Mediterranean conditions,* « Erosion Assessment and Modelling, eds R.P.C.Morgan and R.J.Rickson», Commission of the European Communities Report EUR 10860 EN, 1988, pp. 255-82.

THORNES J.B., *The interaction of erosional and vegetational dynamics in land degradation: spatial outcomes,* «Vegetation and Erosion», Wiley, Chichester, 1990, pp. 41-53.

TRUONG P.N., *Vetiver grass technology for land stabilization, erosion and sediment control in the Asia Pacific region*. «Proc. First Asia Pacific Conference on Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilization», Manila, Philippines, April 1999, «Eros Control Assoc, Steamboat Springs», USA, pp. 72-84

TRUONG P., LOCH R., *Vetiver System for erosion and sediment control,* «Proc. 13th International soil conservation organisation conference», Brisbane, Australia, July 2004, pp 1-6

VAN GENUCHTEN M.TH., *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.* «*Soil Science Society of America Journal*», 1980, n. 44, pp. 892-898.

VANAPALLI S.K., FREDLUND D.G., PUFAHL D.E., CLIFTON A.W., *Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction,* « Canadian Geotechnical Journal», 1996, n. 33, pp. 379-392.

WALDRON L.J., *The shear stress resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil,* «Soil Sci. Soc. Am. J.», 1977, n. 41, pp. 843-849.

WEAVER J. E. *The ecological relations of roots,* «Carnegie Ins. Wash. Pub.», 1919, pp. 286.

WISCHMEIER W.H., SMITH D. D., *Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains,* «Agr. Handbook», 1965, n. 282, U.S. Dept. Agr., Washington, DC.

WU T.H., MCKINNELL W.P., SWANTON D.N., *Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska,* «Canadian Geotechnical Journal», 1979, 16, pp. 19–33.

WU T.H., BEAL P. E., LAN C., *In-situ shear test of soil-root systems,* «Journal of Geotechnical En-

gineering», 1988, n. 114(12), pp. 1376-1394.

Wu T.H., *Root reinforcement of soil: review of analytical models, test results, and applications to design.* «Canadian Geotechnical Journal», 2013, n.50, pp. 259-274.

ZUO Q., JIE F., ZHANG R., MENG L.A., *Generalized function of wheat's root length density distributions,* «Vadose Zone J. », 2004, n. 3, pp. 271-277.

Soil-vegetation effects on shallow slope instability

This manuscript focuses on the results of a recent study performed at University of Perugia on soil-vegetation interaction and its effects on shallow slope instability.

Slope vegetation is currently finding wide applications all over the world to mitigate erosive phenomena and improve slope stability. An innovative natural technology for slope protection has been recently developed in Italy; this uses only natural perennial grass plants with deep roots and allows operating in areas where climatic conditions were, until a few years ago, considered prohibitive for the development of vegetation. Such technology appears promising with regard to shallow slope instability; the plant roots induce mechanical and hydraulic effects on slope equilibrium, which typically increase the soil shear strength. The mechanical effects of vegetation result from the root/soil interaction processes, while the hydraulic effects derive from the significant reduction of water content enhanced by plant transpiration. The research sets as a final goal the quantitative assessment of both mechanical and hydraulic effects induced by roots on slope stability.

ISBN 9788890642173