

# Análise de Estabilidade de um Talude de Corte Submetido a Técnicas de Bioengenharia

Camyla Magarete Magalhães de Oliveira

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/ PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, [camyla@gmail.com](mailto:camyla@gmail.com)

Hugo Portocarrero

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/ PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, [hugoport@esp.puc-rio.br](mailto:hugoport@esp.puc-rio.br)

Tácio Mauro Pereira de Campos

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/ PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, [tacio@puc-rio.br](mailto:tacio@puc-rio.br)

Aluísio Granato de Andrade

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/ Embrapa-Solos, Rio de Janeiro, Brasil, [aluisio.granato@gmail.com](mailto:aluisio.granato@gmail.com)

Fernando Nóbrega Mendes Protásio

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/ PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, [protasio.fernando@gmail.com](mailto:protasio.fernando@gmail.com)

Francisco Escobar

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/ PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil, [chico.escobar@gmail.com](mailto:chico.escobar@gmail.com)

**RESUMO:** Este trabalho tem como objetivo analisar o incremento de resistência ao cisalhamento de um talude de corte localizado no Aeroporto Internacional do RJ – Galeão/Tom Jobim, proporcionado pela vegetação implantada por meio da aplicação de técnicas de bioengenharia. Para determinar os parâmetros foram realizados ensaios de caracterização e cisalhamento direto em amostras com raízes da espécie arbustiva *Acacia auriculiformis* e sem a presença de raízes, o que foi possível graças à existência de uma faixa do talude desprovida de vegetação. Os corpos de prova foram retirados na profundidade de 0 a 0,35m. Foi verificada a área radicular presente no perfil de solo por meio do programa SIARCS da Embrapa, e posteriormente foram realizadas análises de estabilidade utilizando os métodos do talude infinito (T.I.) e de Morgenstern-Price (M&P), este último com auxílio do *software* GEOSLOPE. Os resultados obtidos nesta pesquisa indicaram diferenças consideráveis nos parâmetros obtidos nas amostras com e sem raízes, sendo encontrada uma coesão efetiva ( $c'$ ) de 4,83 kPa e ângulo de atrito efetivo ( $\phi'$ ) de 21,76° nos corpos de prova sem raízes e  $c'$  igual a 5,98 kPa e  $\phi'$  de 31,25° nos corpos de prova com raízes. Foi obtido um maior fator de segurança nas análises de estabilidade considerando o solo com raízes (1,47 pelo método de M&P) em relação ao solo sem raízes (1,05 pelo mesmo método). Os resultados indicam a importância de investigações futuras envolvendo repetições com diferentes estágios de desenvolvimento da vegetação, diferentes espécies vegetais e uso dos parâmetros como área radicular, massa fresca de raízes, dentre outros nos corpos de prova e no perfil de campo.

**PALAVRAS-CHAVE:** talude de corte, reforço radicular, cisalhamento direto, estabilidade.

## 1 INTRODUÇÃO

As técnicas de bioengenharia de solos para estabilização de taludes consistem na utilização de raízes e troncos como elementos para contenção e proteção do solo. Tais técnicas envolvem ainda a utilização combinada de vegetais e elementos inertes (como concreto, pedra, madeira e geotêxteis), visando à estabilização e o controle de processos erosivos, o que pode ser aplicado a taludes e encostas, margens de rios, sistemas de trilhas, aterros sanitários e áreas mineradas dentre outros.

A ampliação da consciência dos efeitos nocivos da degradação ambiental e a comprovação através de inúmeros estudos recentes de que o uso da vegetação é uma alternativa ecológica, de baixo custo para problemas de contenção de encostas, tem incentivado o desenvolvimento do conhecimento do papel da vegetação na estabilidade de taludes e encostas, permitindo assim aumentar cada vez mais a eficácia dos projetos de recuperação ambiental em áreas urbanas e rurais.

Dentre os principais efeitos benéficos da vegetação conhecidos destaca-se o seu aspecto regulador do regime hidrológico, além do incremento da resistência dos solos promovido por mecanismos como o reforço radicular. Por outro lado, a ação dos ventos sobre as copas das árvores, além de seu próprio peso, poderá gerar sobrecargas e instabilidade em taludes e encostas.

Para avaliar a distribuição dos sistemas radiculares no perfil do solo, na maioria dos trabalhos, é aberta uma trincheira, sendo realizadas as aferições e tomadas imagens por meio de desenho (croqui), câmara fotográfica ou filmadora.

Essa distribuição do sistema radicular ao longo do perfil pode ser analisada com auxílio de uma malha com 1 x 1 m, com 20 cm de quadrícula e um total de 400 cm<sup>2</sup> de superfície por quadrícula, segundo procedimento sugerido por Jorge (1999). Desta maneira, o número de raízes no perfil pode ser contado visualmente nesta etapa, a partir da tomada de imagens de cada uma das quadrículas separadamente.

Neste sentido, com o objetivo de auxiliar no estudo de raízes, cobertura vegetal, porosidade

do solo, área e doenças foliares, dentre outras, foi desenvolvido pela EMBRAPA-CNPDIA o Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo - *SIARCS*<sup>®</sup>, que se utiliza de processamento e análise de imagens digitais (Jorge & Crestana, 1996). O *SIARCS* possui uma ferramenta que subdivide a imagem original em função do número de colunas e linhas desejadas, quantificando o percentual de área radicular em cada uma delas.

Alguns autores consideram o método de imagens digitalizadas um dos mais eficientes, já que os resultados podem levar a maior exatidão do que os obtidos por contagem manual (Jorge, 1999; Schroth *et al.*, 1999). No entanto, há necessidade de melhor preparo dos perfis, assim como de equipamento digitalizador especial (câmara digital e computador), o que faz com que esse método seja uma forma de avaliação mais custosa (Vega *et al.*, 2005).

Os ensaios desenvolvidos para estimar a influência do reforço das raízes sobre a resistência ao cisalhamento dos solos podem ser divididos em quatro tipos: testes de tensão de tração, arrancamento (*pull out*), cisalhamento *in situ* e cisalhamento em laboratório.

Em testes de tensão de tração tradicionais e frequentemente realizados até hoje (Abernethy, 1999), normalmente um segmento de raiz é tensionado e o valor máximo de tensão na ruptura é medido (Burroughs & Thomas, 1977; Ziemer & Swanson, 1977, Nakane *et al.* 1983; Abe *et al.* 1986).

Os testes de arrancamento medem a resistência máxima ao arrancamento da raiz no solo, composta por um atrito tangencial entre o solo e as raízes, sendo influenciada pela elasticidade das raízes, ramificação, presença de “cabeleira” ou raízes finas e a resistência à tração nas junções das raízes (Abe & Ziemer, 1991). Este ensaio é iniciado com a exposição de uma camada de solo reforçado com raiz, através de escavação. Feito isso, utiliza-se uma espécie de pinça, que será movimentada por meio de um tifor, sendo as tensões de arrancamento monitoradas em uma célula de carga acoplada a um sistema de aquisição de dados (Portocarrero *et al.*, 2006). Endo & Tsuruta (1969) foram uns dos primeiros a desenvolver uma metodologia de avaliação dos efeitos das raízes no solo através de testes de

cisalhamento *in situ* com blocos moldados em solo contendo raízes vivas. Lawrance *et al.* (1996) apresentaram resultados de ensaios utilizando tal tipo de técnica que, apesar de propiciar informações valiosas é, de um modo geral, de difícil execução.

Cisalhamento em laboratório, utilizando tanto equipamentos de cisalhamento direto quanto triaxial, requer amostras consideradas representativas do solo com raízes, o que nem sempre é de fácil obtenção.

Eon (2009) realizou ensaios de arrancamento de raízes de duas espécies arbóreas implantadas na área estudada: a *Acacia auriculiformis* e *Mimosa caesalpiniaefolia*. Nestes ensaios mediu-se a força de tração no decorrer do ensaio, até o momento da ruptura ou do arrancamento da raiz do solo. Para realização do experimento, foi utilizado um tifor com capacidade de duas toneladas, uma célula de carga em Z com capacidade de uma tonelada e um leitor de dados (modelo 3101C da Alfa Instrumentos), empregado para monitorar a força de tração exercida no decorrer do tempo (Figura 1).

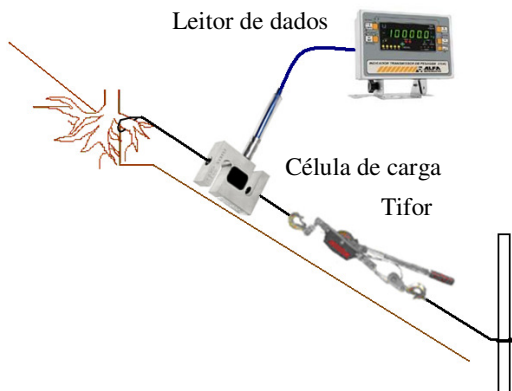


Figura 1. Diagrama do ensaio de arrancamento.

Este trabalho teve como objetivo analisar o incremento de resistência ao cisalhamento de um talude de corte localizado no Aeroporto Internacional do RJ – Galeão/Tom Jobim, proporcionado pela vegetação implantada por meio da aplicação de técnicas de bioengenharia. Para determinar os parâmetros foram realizados ensaios de caracterização e cisalhamento direto em amostras com raízes da espécie arbustiva *Acacia auriculiformis* e sem a presença de raízes, o que foi possível graças à existência de uma faixa do talude desprovida de vegetação.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

O talude estudado está localizado na área degradada do Galeão conhecida como Área z. Esta área foi explorada como área de empréstimo durante a década de 1970 e vem sendo recuperada através da implantação de técnicas de bioengenharia de solos desde 2007 sob a supervisão da Embrapa Solos. Um trabalho de monitoramento hidrológico vem sendo conduzido no talude desde então, mediante a implantação de uma instrumentação automatizada para medição da umidade e sucção no solo, parâmetros meteorológicos e hidrossedimentológicos, bem como referentes ao desenvolvimento da vegetação (Portocarrero, 2009).

A execução das estratégias de RAD ocorreu de junho de 2007 a março de 2008. As principais etapas de recuperação da área Z compreenderam (op. cit., 2009): conformação de um talude de corte com inclinação de 1:1,5, 60m de extensão e 15m de comprimento de rampa na vertente mais degradada da área Z e instalação de parcelas de controle de erosão (Figura 2); direcionamento dos fluxos de água superficiais através da construção de terraços e bacias de sedimentação; recobrimento do solo com aparas de grama de modo a protegê-lo contra erosão pluvial e escoamento superficial; plantio de cordões de Capim Vetiver para contenção da enxurrada na crista do talude.



Figura 2. Parcelas antes do trabalho de revegetação. (Portocarrero, 2009).

Posteriormente foram instaladas três parcelas revegetadas com técnicas distintas e mais uma parcela vazia, com solo exposto para fins de comparação. As técnicas de bioengenharia de solos utilizadas em cada parcela compreenderam (Figura 3):

- Parcela I: método adaptado da Embrapa

para recuperação de áreas degradadas envolvendo plantio em linhas de capim Vetiver e utilização de leguminosas arbustivas e arbóreas de rápido crescimento, inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos arbusculares;

- Parcela II: parcela vazia para fins de controle;
- Parcela III: plantios de gramíneas e leguminosas rasteiras através de hidrossemeadura;
- Parcela IV: aplicação de biomanta anti-erosiva com semeio a lança.



Figura 3. Parcelas I e II após revegetação (setembro de 2009 - Portocarrero, 2009).

## 2.2 Avaliação da resistência ao cisalhamento em solos reforçados com raízes

O solo estudado foi retirado no terço médio do talude, nas parcelas I (com vegetação) e II (sem vegetação). Para avaliar o reforço radicular em um solo, foram realizados dois procedimentos: análise do perfil de solo (método das trincheiras) e ensaios de cisalhamento em corpos de prova moldados a partir do perfil contendo raízes da espécie arbustiva *Acacia auriculiformis* (4 anos e 10 meses após o transplantio), e em amostras do mesmo solo sem a presença de raízes.

A análise do perfil foi realizada por meio de imagens digitais utilizando-se o Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo - *SIARCS*<sup>®</sup> (Jorge & Crestana, 1996). As raízes que apareceram na face do perfil de solo foram pintadas com tinta branca ou azul para facilitar o contraste, conforme ilustra a Figura 4, tendo sido utilizado uma quadrícula de 26x20 cm na aquisição das imagens.

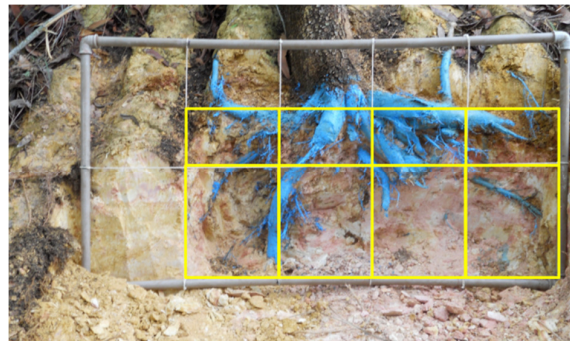


Figura 4. Perfil de solo com as raízes pintadas e com a quadrícula utilizada no auxílio da digitalização das imagens.

Os blocos indeformados foram extraídos na mesma posição onde foi escavado o perfil de solo para a avaliação do sistema radicular da *Acacia auriculiformis* (Portocarrero, 2009), sendo também realizada uma coleta de um bloco sem a presença de raízes, localizado na mesma faixa de solo, a 2 metros de distância do primeiro (Figura 5).



Figura 5. Coleta de blocos indeformados com auxílio de chibanca. Observa-se a heretogeneidade do solo, acima mais amarelado (a), e abaixo avermelhado (b).



### 2.3 Análises de estabilidade

Para fazer a análise de estabilidade do talude, foram realizados ensaios de cisalhamento direto em amostras de solo com e sem raízes. Os fatores de segurança foram determinados através dos métodos do talude infinito (T.I.) e de Morgenstern-Price (M&P).

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Avaliação do perfil de solo

A seguir são descritos os resultados das avaliações dos sistemas radiculares de um indivíduo da *Acacia auriculiformis* 1760 dias após o transplântio. No que diz respeito às avaliações pelo SIARCS, a Figura 6 e a Tabela 1 mostram os resultados obtidos.

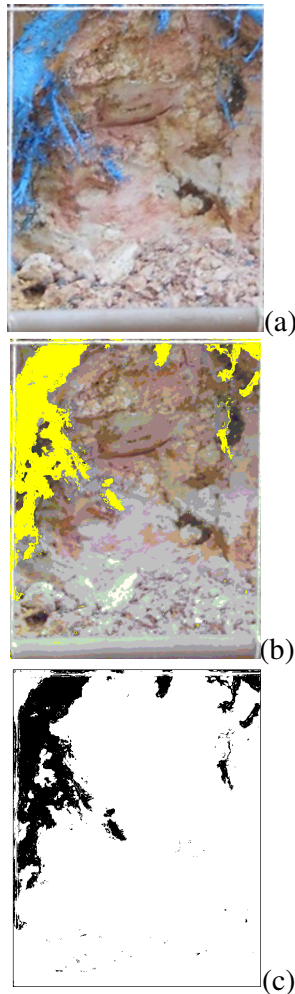


Figura 6. Processo de aquisição de imagens e binarização para a interpretação no SIARCS.

Tabela 1. Área radicular (%) de *Acacia auriculiformis* aos 1760 dias após o transplântio.

Quadrante	% Raízes	Quadrante	% Raízes
1	27,31	5	10,65
2	57,66	6	12,75
3	72,75	7	9,48
4	14,89	8	4,49
Área Radicular Média (%) = 26,25			

O sistema radicular atingiu uma profundidade máxima de 1m. A raiz pivotante não foi detectada no perfil de solo, porém constatou-se que as raízes secundárias laterais assumiram um crescimento vigoroso, chegando a 10 cm de diâmetro. A malha de raízes finas encontrada é pouco desenvolvida em relação às raízes principais que ancoram a árvore.

### 3.3 Ensaios de cisalhamento direto

A Tabela 2 e a Tabela 3 mostram características geotécnicas dos corpos de prova. O solo é bastante heterogêneo quanto à coloração, que varia de tons de roxo, vermelho e amarelo, e quanto a textura por vezes arenosa ou argilosa, com concreções lateríticas em algumas faixas. A heterogeneidade pode ser percebida em sua estrutura, que se apresenta estratificada.

Tabela 2. Características geotécnicas dos corpos de prova sem raízes.

$\sigma_N$ (kPa)	$G_s$	$w_i$ (%)	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e$	$S_i$ (%)	$w_f$ (%)
41	2,7	12,0	16,4	14,7	0,8	40,9	25,9
79		12,8	16,7	14,8	0,8	44,6	26,3
10		14,6	17,3	15,1	0,7	53,3	29,2
21		11,6	17,5	15,7	0,7	46,4	27,1

Tabela 3. Características geotécnicas dos corpos de prova com raízes.

$\sigma_N$ (kPa)	$G_s$	$w_i$ (%)	$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e$	$S_i$ (%)	$w_f$ (%)
41	2,6	15,27	18,51	16,06	0,60	66,9	25,68
84		18,27	18,12	15,32	0,67	70,9	23,85
7,45		19,48	17,73	14,84	0,73	70,0	26,61
22		20,52	18,03	14,96	0,71	75,2	27,25

A Figura 7 e a Figura 8 mostram os resultados dos ensaios de cisalhamento direto executados, respectivamente, no solo sem e com raízes.

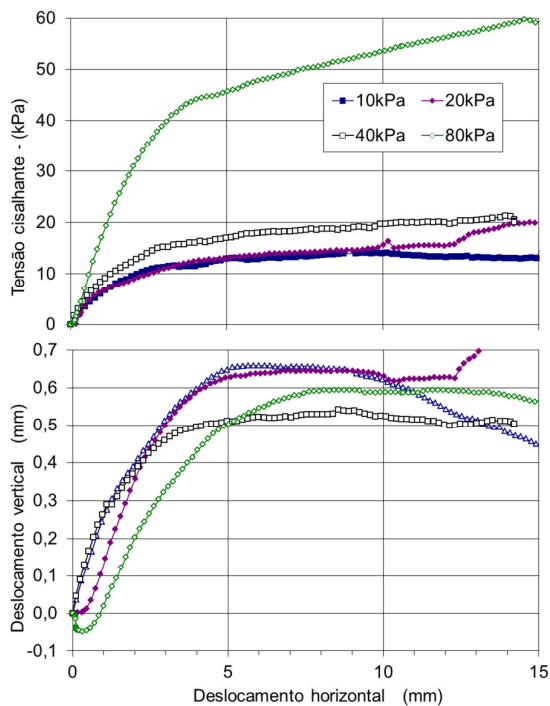


Figura 7. Resultados dos ensaios de cisalhamento para corpos de prova sem raízes.

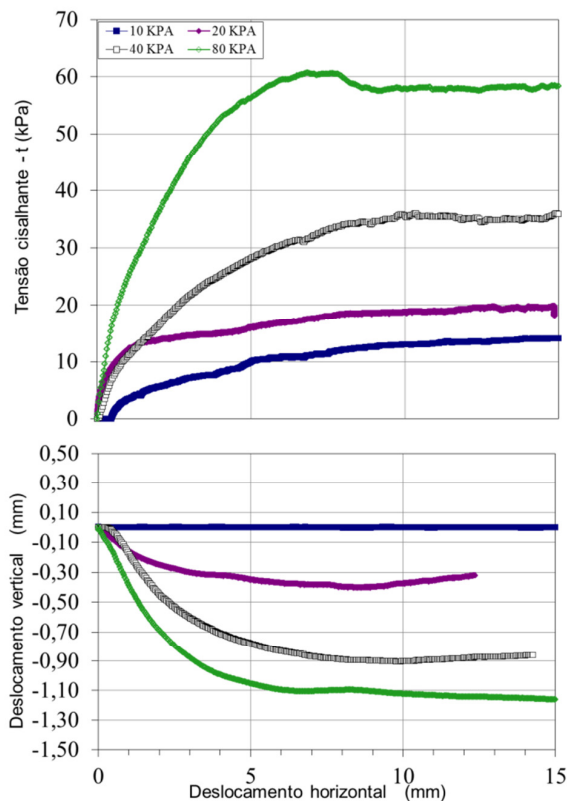


Figura 8. Resultados dos ensaios de cisalhamento para corpos de prova com raízes.

Tomando como base a Figura 7 e a Figura 8, bem como a metodologia sugerida por de

Campos e Carrillo (1995) foram definidas as tensões na ruptura (valores de tensão normal vertical -  $\sigma_{rup}$  e tensão cisalhante -  $\tau_{rup}$  na ruptura) para os solos com e sem raízes indicadas na Tabela 4.

Tabela 4. Interpretação dos ensaios de cisalhamento.

Sem Raízes		Com Raízes	
$\sigma_{rup}$ (kPa)	$\tau_{rup}$ (kPa)	$\sigma_{rup}$ (kPa)	$\tau_{rup}$ (kPa)
9,9	11,4	7,3	10,6
21,5	10,3	22,3	13,5
42,12	14,99	44,4	32,6
81,3	37,8	89,9	60,7

Com estes dados foram definidas as envoltórias de resistência mostradas na Figura 9. Os ajustes foram realizados utilizando-se três dos quatro pontos em cada série de dados devido à dispersão dos resultados experimentais. No caso da envoltória para o solo sem raízes o coeficiente de correlação obtido com esta metodologia foi de 0,965, sendo que o mesmo seria de 0,900 considerando-se toda a série de dados. No caso do solo com raízes foi obtido um coeficiente de correlação de 0,999 seguindo o mesmo princípio.

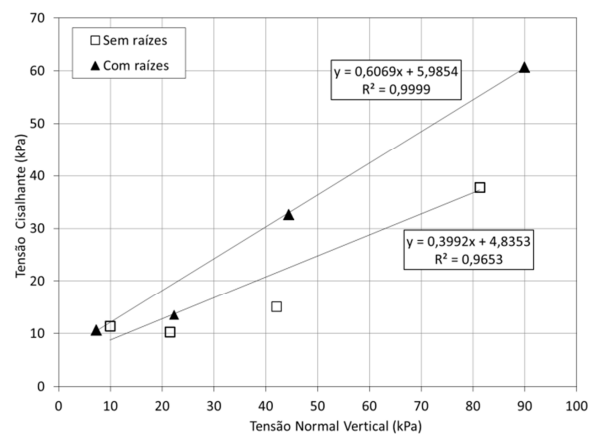


Figura 9. Envoltórias de resistência obtidas. A reta tracejada representa a envoltória do solo com raízes.

A partir das envoltórias mostradas na Figura 9 foram definidos os parâmetros de resistência ( $c'$  e  $\phi'$ ), conforme indicado na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros de resistência.

Análise	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)
C.P. Sem Raízes	4,83	21,76
C.P. Com Raízes	5,98	31,25

Os resultados obtidos nesta pesquisa indicam que a presença do sistema radicular da *Acacia auriculiformis* nos corpos de prova ocasionou em um aumento significativo na coesão (de 4,83kPa para 5,98kPa) e no ângulo de atrito (de 21,76° para 31,25°).

### 3.4 Análises de estabilidade

No cálculo do fator de segurança, tanto pelo método de Morgenstern-Price, como pelo método do talude infinito (com a superfície de ruptura imposta a 1,5m), os resultados mostraram-se superiores na análise considerando os parâmetros de resistência do solo com raízes, chegando a 1,47 (M&P), como mostrado na Figura 10, e 1,39 (T.I.), em relação ao solo sem raízes, onde o fator obtido foi de 1,05 e 1,01 respectivamente (Figura 11).

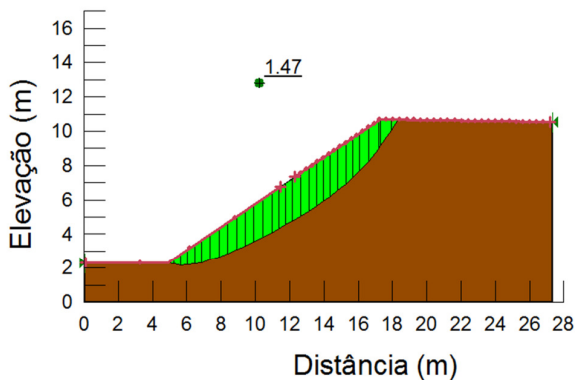


Figura 10. Resultado da análise de estabilidade com raízes.

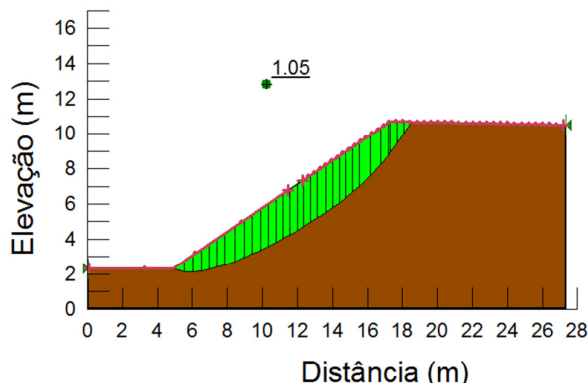


Figura 11. Resultado da análise de estabilidade sem raízes.

## 4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa indicaram

que houve um acréscimo acentuado nos parâmetros de resistência obtidos nas amostras com raízes. Foi obtido um maior fator de segurança nas análises de estabilidade considerando o solo com raízes (1,47) em relação ao solo sem raízes (1,05), pelo método de Morgenstern-Price. Observa-se que devido à dispersão dos resultados experimentais foi necessária a exclusão de alguns pares de dados de  $\sigma_{rup}$  e  $\tau_{rup}$  na definição das envoltórias de resistência, visando melhorar as correlações obtidas em seus traçados.

Deve-se levar em consideração que nas simulações foi utilizado somente um material para todo o corpo do talude, no caso o solo com ou sem raízes. Tal consideração é uma simplificação e pode levar a uma sobrestimativa do fator de segurança para o solo com raízes, e o mesmo não ocorre nos taludes, visto que a vegetação desenvolve-se a partir da superfície e cria uma zona de raízes com espessura, para o caso estudado (conforme visto no subitem 3.2) da ordem de 1m ocupando uma área radicular média de 26,25%.

Os resultados desta pesquisa destacam a importância de investigações futuras envolvendo repetições em diferentes estágios de desenvolvimento da vegetação, diferentes espécies vegetais, e ainda ajustes dos parâmetros de resistência encontrados em função das áreas radiculares (ou massa fresca de raízes) nos corpos de prova e no perfil de campo.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi desenvolvido como parte do Projeto PRONEX E-26/111.436/2010, desenvolvido em parceria com a Embrapa-Solos e Infraero. Os autores agradecem o apoio dado pela FAPERJ, CNPq, e CAPES.

## REFERÊNCIAS

- Abe, K.; Ziemer, R.R. (1991) Effect of tree roots on a shear zone: modeling reinforced shear stress. *Canadian Journal of Forest Research*, Ottawa, v.21, p.1012-1019.
- Abernethy, B. (1999) *The role of riparian tree roots in reinforcing riverbanks*. Tese de Doutorado. Monash University, Clayton.
- Burroughs, E.R.; Thomas, B.R. (1977) Declining roots strength in Douglas fir after falling as a factor in slope

- stability, *Forest Service. Research paper, INT-190*, Ogden: Forest Service. 27p.
- de Campos, T.M.P. and Carrillo, C.W. (1995) - "Direct Shear Testing on an Unsaturated Soil from Rio de Janeiro" - *Unsaturated Soils* - Alonso & Delage editors, A.A. Balkema Publishers - ISBN 90 5410 583 6 - *1st. International Conference on Unsaturated Soils* - Paris - Vol. I, pp.31-38.
- Endo, T.; Tsuruta, T. (1969) The effect of tree roots upon the shear strength of soil. *Annual Report of the Hokkaido Branch, Tokio Forest Experiment Station*, Tokyo, v. 18, p. 168-179.
- Eon, C. M. (2009) *Avaliação da Resistência ao Cisalhamento de Raízes no Campo*, Projeto Final de Curso, Graduação em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Jorge, L.A.C. (1999) Descrição detalhada do método de trincheira com produção de imagens para o uso do SIARCS, *Workshop sobre desenvolvimento do sistema radicular: Metodologias e estudos de casos*. Aracajú: Embrapa Tabuleiros Costeiros, p. 255-268.
- Jorge, L.A.C; Crestana, S. (1996) SIARCS® 3.0: novo aplicativo para análise de imagens digitais aplicado a ciência do solo. *Congresso Latino Americano de Ciência do Solo Águas de Lindóia-SP, Solo Suelo 96*. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo. 5p. CD-ROM.
- Lawrance, C.J.; Rickson, R.J.; Clarck, J.E. (1996) The effect of grass roots on the shear strength of colluvial soils in Nepal. *Advances in Hillslope Processes*, v. 2. Chichester: J Wiley.
- Portocarrero, H. (2009) *Avaliação do efeito de técnicas de bioengenharia em parâmetros hidrossedimentológicos utilizando instrumentação automatizada*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- Portocarrero, H.; Andrade, A. G. de; de Campos, T. M. P.; Fernandes, N. F. (2006) Aspectos hidrológicos e mecânicos da vegetação na estabilidade de taludes e encostas naturais. *Séries Embrapa, Série Documentos*. Rio de Janeiro.
- Schroth, G.; D'angelo, S.A.; Schaller, M.; Haag, D. & Rodrigues, M.R.L. (1999) Root research methods for humid tropical agro-forestry systems – a management perspective. *Workshop sobre Desenvolvimento do Sistema Radicular: Metodologias e Estudo de Casos, I*, Aracaju, Anais. Embrapa Tabuleiros Costeiros, p.219-230.
- Vega, F.V.A.: Bovi, L.M.A.; Júnior, G.G.; Berton, R.S. (2005). Lodo de esgoto e sistema radicular da pupunheira. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 29, p.259-268.