

ISSN 1517-2627

Dezembro, 2006

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Solos
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 88

Aspectos Hidrológicos e Mecânicos da Vegetação na Estabilidade de Taludes e Encostas Naturais

*Hugo Portocarrero
Aluísio Granato de Andrade
Tácio Mauro Pereira de Campos
Nelson Ferreira Fernandes*

Embrapa Solos
Rio de Janeiro, RJ
2006

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1.024 Jardim Botânico. Rio de Janeiro, RJ

Fone: (21) 2179-4500

Fax: (21) 2274.5291

Home page: www.cnps.embrapa.br

E-mail (sac): sac@cnps.embrapa.br

Comitê Local de Publicações

Presidente: Aluísio Granato de Andrade

Secretário-Executivo: Antônio Ramalho Filho

Membros: Marcelo Machado de Moraes, Jacqueline S. Rezende Mattos, Marie Elisabeth C. Claessen, José Coelho de A. Filho, Paulo Emílio F. da Motta, Vinícius de Melo Benites, Rachel Bardy Prado, Maria de Lourdes Mendonça S. Brefin, Pedro Luiz de Freitas.

Supervisor editorial: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Revisor de Português: *André Luiz da Silva Lopes*

Normalização bibliográfica: *Marcelo Machado Moraes*

Editoração eletrônica: *Pedro Coelho Mendes Jardim*

1ª edição

1ª impressão (2006): online

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

631.44

B295 Portocarrero, Hugo.

Aspectos hidrológicos e mecânicos da vegetação na estabilidade de taludes e encostas naturais / Hugo Portocarrero ... [et al.]. – Dados eletrônicos – Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

(Série Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627 ; 88)

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: <<http://www.cnps.embrapa.br/solosbr/conhecimentos.html>>

Título da página da Web (acesso em 7 set. 2006).

1. Recuperação ambiental. 2. Regime Hidrológico. I. Andrade, Aluísio Granato de. II. Campos, Tácio Mauro Pereira de. III. Fernandes, Nelson Ferreira. IV. Título. V. Série.

Autores

Hugo Portocarrero

Geógrafo, MSc. Doutorando do programa de pós-graduação em Geotecnia da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro PUC-Rio. Endereço: R. Marquês de São Vicente, 225, Gávea. Rio de Janeiro, RJ. Cx. Postal: 38097; tel.: (55 21) 3114-1001. email: hugoport@civ.puc-rio.br.

Alúisio Granato de Andrade

Eng^o Agrônomo, PhD. Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento da Embrapa Solos. Endereço: Rua Jardim Botânico, 1.024 - Jardim Botânico - Rio de Janeiro, RJ - Brasil - CEP 22460-000. Tel.: (021) 2274 4999 - Fax: (021) 2274 5291. email: aluisio@cnps.embrapa.br.

Tácio Mauro Pereira de Campos

Eng^o Civil, PhD. Professor do Departamento de Engenharia Civil da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro PUC-Rio. Endereço: R. Marquês de São Vicente, 225, Gávea. Rio de Janeiro, RJ. Cx. Postal: 38097; tel.: (55 21) 3114-1001. email: tacio@civ.puc-rio.br.

Nelson Ferreira Fernandes

Geólogo, PhD. Professor adjunto do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ. Endereço: Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza – CCMN. Instituto de Geociências – IGEO Departamento de Geografia. Bloco G2 - Salas 25 e 27. Cidade Universitária - Ilha do Fundão - Rio de Janeiro. CEP: 21941-570. Telefone: (21) 2590-1880. FAX: (21) 2598-9474. email: nelsonff@acd.ufrj.br.

Apresentação

A remoção da cobertura vegetal, além de causar impactos sobre a biodiversidade e sobre os recursos solo e água, acarreta redução da estabilidade das encostas, tornando-as mais suscetíveis a deslizamentos e processos erosivos. Isto se torna relevante nas circunstâncias atuais, onde o desmatamento e a eliminação da cobertura vegetal vem sendo realizados em grande escala.

A ampliação do conhecimento sobre o papel da vegetação na estabilidade de taludes e encostas naturais permitirá aumentar cada vez mais a eficácia dos projetos de recuperação ambiental em áreas urbanas e rurais. Têm-se comprovado através de inúmeros estudos recentes que o uso da vegetação é uma alternativa altamente ecológica e de baixo custo para problemas de contenção de encostas.

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 naturais.

O presente documento apresenta aspectos hidrológicos e mecânicos da vegetação que interferem positivamente ou negativamente na estabilização

destas áreas. Longe de buscar esgotar o tema, procurou-se nesta revisão abranger os diversos aspectos e variáveis envolvidas nas análises de estabilidade de encostas e taludes com vegetação, assim como os efeitos da remoção da vegetação nestes locais.

O aspecto da prevenção da erosão superficial foi incluído, tendo em vista que os efeitos dos processos erosivos atuando sobre uma encosta tendem a desestabilizá-la com a formação de sulcos, ravinas e voçorocas que também constituem fenômenos relacionados à instabilidade das encostas.

Tendo como base as diretrizes acima mencionadas, esta publicação apresenta no Capítulo 1 aspectos referentes à vegetação e sua importância no controle da erosão, e no Capítulo 2 aspectos referentes à estabilidade de taludes propriamente dita, dentro do âmbito da geotecnia. Por último, são tecidas algumas conclusões onde se destaca a importância de uma análise tanto dos aspectos benéficos quanto adversos ao uso da vegetação para a estabilização de taludes e encostas naturais.

Celso Vainer Manzatto
Chefe Geral da Embrapa Solos

Sumário

Introdução	9
Vegetação, hidrologia e controle da erosão	10
Estabilidade de encostas – aspectos favoráveis e desfavoráveis da vegetação	16
Reforço mecânico das raízes	17
Coesão aparente	20
Ancoragem vertical	20
Suporte lateral	21
Quantificação do reforço radicular	22
Modelos teóricos do reforço de solo por raízes	23
Morfologia das raízes	27
Quantificação das raízes nos perfis de solo	30
Ensaio <i>in situ</i> de reforço mecânico das raízes	31
Modificação da umidade dos solos	33
Arqueamento e reforço das encostas	34
Sobrecarga da vegetação	36
Conclusões	37
Referências Bibliográficas	38

Aspectos hidrológicos e mecânicos da vegetação na estabilidade de taludes e encostas naturais

Hugo Portocarrero

Alúcio Granato de Andrade

Tácio Mauro Pereira de Campos

Nelson Ferreira Fernandes

Introdução

Os mecanismos de influência da vegetação na estabilidade de taludes e encostas naturais podem ser agrupados de forma ampla em dois conjuntos: hidrológicos e mecânicos. Os aspectos mecânicos estariam associados a interações físicas entre o sistema radicular, folhagem e o talude. Os aspectos hidrológicos estariam associados à influência da vegetação no ciclo hidrológico.

A sistematização da influência da vegetação sobre a estabilidade das encostas proposta por Greenway (1987) é conveniente, abrangendo os principais aspectos geotécnicos. A Figura 1 e a tabela 1 sintetizam de forma clara tais aspectos.

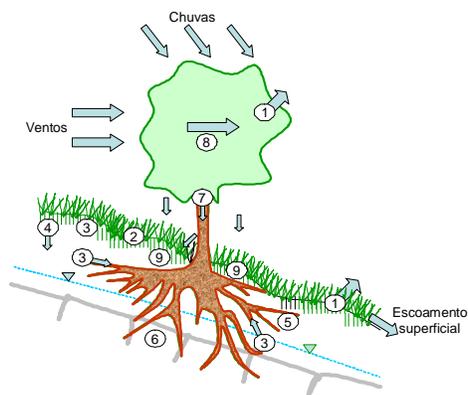


Figura 1. Influência da cobertura vegetal sob a estabilidade das encostas. Numeração referente à tabela 1 (adaptado de GREENWAY, 1987).

Tabela 1. Efeitos da vegetação na estabilidade das encostas.

Aspectos Hidrológicos (aspectos de fluxo)	Influência na estabilidade
1) As folhagens interceptam as chuvas, ocasionando perdas por evaporação e adsorção, reduzindo a quantidade de água disponível para a infiltração.	Benéfico
2) As raízes e galhos aumentam a rugosidade do terreno e a permeabilidade dos solos, gerando aumento na capacidade de infiltração, por vezes excessiva.	Adverso
3) As raízes extraem umidade do solo, que é perdida para a atmosfera via transpiração, levando a uma redução das poro-pressões ou aumento da sucção.	Benéfico
4) A redução da umidade dos solos provocada pela vegetação pode acentuar o processo de formação de fendas e rachaduras, resultando em maior capacidade de infiltração.	Adverso
Aspectos mecânicos (aspectos de resistência)	Influência na estabilidade
5) As raízes reforçam o solo, aumentando a resistência ao cisalhamento.	Benéfico
6) As raízes podem estar ancoradas em substrato firme, provendo sustentação ao manto de solo acima na encosta através de arqueamento e suporte.	Benéfico
7) O peso das árvores pode sobrecarregar a encosta, aumentando as componentes normais descendentes.	Adverso / benéfico (dependendo da situação)
8) A vegetação exposta aos ventos transmite forças dinâmicas às encostas.	Adverso
9) As raízes unem partículas do solo, reduzindo a susceptibilidade à erosão.	Benéfico

Vegetação, hidrologia e controle de erosão

Os efeitos hidrológicos da vegetação abordados a seguir possuem influência na estabilidade dos taludes tanto em termos de resistência, controlando o estado de saturação dos solos, quanto em termos de controle de erosão, através da redução do escoamento superficial e do aumento da capacidade de infiltração. Primeiramente serão enfatizados aspectos referentes ao controle da erosão, sendo os aspectos de resistência abordados no capítulo sobre estabilidade.

Sabe-se que o mais importante efeito hidrológico da vegetação é a redução dos processos erosivos atuantes sobre uma encosta, estabilizando-a e evitando a formação de sulcos, ravinas e voçorocas. Os principais aspectos relacionados a este efeito encontram-se listados a seguir:

1) Intercepção da água das chuvas – a parte aérea (copas arbóreas ou arbustivas) e serrapilheira absorvem parte da energia cinética das chuvas e previnem a impermeabilização que ocorre nos solos através do mecanismo conhecido como salpico (*rainsplash*, ver figura 2).

2) Retenção – as raízes retêm partículas dos solos enquanto os resíduos em superfície (serrapilheira) filtram a remoção de sedimentos por escoamento superficial.

3) Retardamento – a serrapilheira aumenta a rugosidade do terreno reduzindo a velocidade do escoamento superficial.

4) Infiltração – as raízes e serrapilheira auxiliam na manutenção da porosidade e permeabilidade dos solos.

5) Transpiração – depleção da umidade dos solos por evapotranspiração causa um atraso na saturação dos solos e, conseqüentemente, na geração do escoamento superficial.



Figura 2. Fotografia digital de uma gota d'água incidindo sob solo descoberto. Observa-se o impacto das gotas gerando o fenômeno conhecido como salpico ou *rainsplash*, que promove a desagregação estrutural em superfície, acarretando em posterior redeposição e selamento, formando uma camada impermeável (fotografia extraída de RITTER, 2006).

Para taludes e encostas, em ambientes tropicais, a vegetação define um papel fundamental na dinâmica hidrológica, promovendo fluxos característicos e alterando a distribuição da umidade. São diversos os casos de encostas e taludes sujeitos à instabilização em função de intensificação dos processos erosivos. Uma vez que se tenha retirado qualquer parcela de cobertura vegetal, por menor que seja, começam a se formar sulcos; estes podem evoluir para ravinas, que com o tempo poderão comprometer de forma drástica a estabilidade destes ambientes.

Trabalhos voltados para a compreensão do papel da vegetação nos processos hidrológicos e erosivos têm sido desenvolvidos por vários autores, em âmbito nacional e internacional, ressaltando a necessidade de observações empíricas

de campo e laboratório com a finalidade de aumentar o conhecimento específico sobre o papel dos sistemas radiculares (ALLEMÃO et al. 1995; COELHO NETTO, 1987; GREENWAY, 1987; SANJU; GOOD, 1993).

A seguir serão citados alguns exemplos de situações onde a vegetação define um papel crucial na estabilidade de taludes em função do controle da erosão. Serão apresentados dados do Projeto de Recuperação de Áreas Degradadas em aeroportos brasileiros, trabalho realizado pela Embrapa Solos em parceria com a INFRAERO. O objetivo é avaliar casos de taludes com problemas de erosão nos diferentes biomas brasileiros.

Na Figura 3, podem ser observados problemas de erosão em taludes de corte do Aeroporto Internacional de Confins – MG, no bioma do cerrado. A vegetação local é classificada como Cerrado Tropical Subcaducifólio, e os solos identificados como Latossolos Vermelho-amarelos e Cambissolos, desenvolvidos a partir de cobertura detritica pré-intemperizada (geotecnicamente os solos identificados são residuais jovens e residuais maduros). Nota-se que a cobertura esparsa de gramíneas não foi suficiente nos taludes para controlar a erosão, diferentemente da área com vegetação arbustiva. As gramíneas, que têm sido utilizadas como uma panacéia em problemas de revegetação, podem possuir entretanto limitações referentes ao pegamento e fixação no solo, dependendo principalmente da densidade da camada superficial dos solos, da fertilidade e da pluviosidade.



Figura 3. Problemas de erosão em taludes de corte do Aeroporto Internacional de Confins MG.

Na Figura 4, no Aeroporto Internacional de Manaus, observa-se um talude de corte desprovido de vegetação apresentando erosão em sulcos e ravinas sob bioma denominado Amazônia. O solo é o Latossolo Amarelo (solo residual maduro), sendo o material de origem relacionado à cobertura sedimentar terciária (Formação Barreiras). Acima do talude, nota-se uma vegetação densa, classificada como contato Floresta-Cerrado, com altura média entre 5 e 10 metros, composta de elementos arbóreos esclerófilos, alguns decíduais, contorcidos, cujas copas se tocam.

Pode-se observar que, uma vez retirada a densa cobertura vegetal presente, o ambiente apresenta sérias limitações em relação a fixação e pegamento em projetos de revegetação de taludes. O Projeto de Recuperação de Áreas Degradadas nos aeroportos brasileiros, trabalho realizado pela Embrapa Solos (parceria com a INFRAERO), contempla revegetar este talude utilizando-se uma vegetação mais rústica, composta de leguminosas arbóreas e arbustivas inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos, favorecendo o rápido estabelecimento dos sistemas radiculares.



Figura 4. Talude de corte desprovido de vegetação apresentando erosão em sulcos e ravinas em talude do Aeroporto de Manaus.

Também no Aeroporto Internacional de Manaus, na Figura 5, pode-se observar taludes de corte próximos à pista de taxiamento apresentando forte processo de erosão laminar, em sulcos e ravinamentos. Nesta situação mais drástica é recomendada a utilização de práticas mecânicas de baixo custo, como a cons-

trução de paliçadas e barreiras para contenção do escoamento superficial, de modo a possibilitar um melhor pegamento da vegetação de cobertura.



Figura 5. Taludes de corte próximo à pista de taxiamento do aeroporto de Manaus, apresentando forte processo de erosão laminar, em sulcos e ravinamentos.

A vegetação pode afetar a distribuição das poro-pressões nos solos ao interceptar a chuva e diminuir a velocidade do escoamento superficial, aumentando a permeabilidade e porosidade, e reduzindo também a quantidade de água no solo via evapotranspiração (TERWILLIGER, 1990). Tem sido também dada ênfase em grande parte dos estudos atuais à questão da influência da serrapilheira e as copas arbóreas no regime hidrológico dos solos (MIRANDA, 1992; VALLEJO, 1982, CASTRO JÚNIOR, 1991, entre outros).

O papel da vegetação na dinâmica hidrológica, em ambiente florestal, é normalmente dividido em influência das partes aéreas: copas arbóreas (folhagem e arquitetura das galharias, interceptação e fluxo de atravessamento), troncos (rugosos ou lisos, com presença ou não de sapopemba – geração de fluxo de tronco); e das partes subterrâneas: raízes (extração de umidade do solo, definição de rotas preferenciais de infiltração, ancoragem e reforço mecânico). Alguns autores ressaltam o papel da camada de serrapilheira, capaz de reter umidade em até 200% de seu peso seco e também da malha fina de raízes abaixo desta camada (ALLEMÃO et al. 1995). O processo hidrológico em áreas florestadas se inicia com a interceptação das chuvas pela vegetação, tendo como precipitação terminal (água que atinge o piso

florestal) a soma da água proveniente dos fluxos de atravessamento e de tronco (GREENWAY, 1987). A partir daí a água é interceptada e armazenada pela serrapilheira, desempenhando um importante papel na redistribuição das águas em função da variabilidade da estrutura e disposição espacial deste material (VALLEJO, 1982).

Alguns estudos avaliaram ainda a participação das raízes nos processos de estruturação física dos solos (BONNEL et al. 1981), ou a formação de ductos pela decomposição das raízes mortas (CASTRO JÚNIOR, 1991) que, juntamente com a intensa atividade da fauna do solo, propiciam alta permeabilidade em ambientes florestais.

Normalmente plantas arbóreas propiciam maior estabilidade do que gramíneas (ANDRADE, 1997; GRAY; SOTIR, 1996), porém deve-se sempre atentar para a especificidade de cada ambiente. A pesquisa em bioengenharia (uso da vegetação na estabilização de taludes e encostas) enfrenta atualmente um desafio para seu desenvolvimento. Os estudos sobre o papel da vegetação na estabilidade das encostas normalmente se concentraram em áreas florestadas e desmatamentos, porém observa-se hoje a falta de dados comuns de projetos de revegetação utilizando a mesma seleção espécies. Observa-se nestes projetos uma grande variedade de opções em relação às espécies e consórcios utilizados, faltando por isso dados comparativos.

Sabe-se que as várias formas de interceptação e redistribuição dos fluxos das chuvas são funções de variações na morfologia das plantas e arquitetura das copas arbóreas, sendo que o mecanismo de *"throughfall"* apresenta comportamentos pontuais acentuadamente discrepantes. Este comportamento depende da magnitude e intensidade das chuvas, umidade antecedente, velocidade e direção dos ventos etc, conforme pode ser observado nos gráficos de variação deste parâmetro em função de diferentes magnitudes. A serrapilheira possui capacidade de retenção de água, o que implica numa redução da erosividade das chuvas, pelo impedimento do gotejamento direto sobre o solo, diminuindo a erosão superficial, evitando assim a selagem do topo do solo e permitindo altas taxas de infiltração (VALLEJO, 1982, COELHO NETTO, 1985, 1987; CASTRO JÚNIOR, 1991, entre outros). Em fun-

ção da estrutura dos materiais, bem como da existência de descontinuidades hidráulicas neste sistema, podem ocorrer processos de escoamento superficial sobre a serrapilheira, denominado de fluxo superficial descontínuo (COELHO NETTO, 1987).

Com o suprimento das demandas biológicas de água dos vegetais pelas raízes, reduz-se diretamente o conteúdo de umidade na zona de raízes, alterando a distribuição da umidade (e das pressões de água nos poros do solo, ou poro-pressões) muito além da zona de raízes. De fato, em toda a sua complexidade, a influência da vegetação sob o ciclo hidrológico e o regime de umidade dos solos tem sido tema de inúmeros estudos (GRAY; LEISER, 1982; GRAY; SOTIR, 1996; COELHO NETTO, 1985, 1987; GREENWAY, 1987).

Estabilidade de encostas - aspectos favoráveis e desfavoráveis da vegetação

Os estudos dos efeitos da vegetação sob a estabilidade de encostas tiveram seu início nos anos 60 (GREENWAY, 1987). A natureza interdisciplinar destes estudos é digna de nota. Apesar das análises detalhadas da estabilidade de encostas serem normalmente trabalho de engenheiros geotécnicos e geólogos, as interações orgânicas entre a vegetação e o solo são compreendidas por agrônomos, pedólogos, engenheiros florestais e biólogos, o que indica a necessidade de uma abordagem interdisciplinar.

De fato é surpreendente o caráter recente dos estudos relacionados à interação solo/vegetação. O que se observa é que esta temática foi, por muito tempo, negligenciada em detrimento de estudos sobre solos reforçados com materiais artificiais (como solo grampeado).

As formas através das quais a vegetação afeta na distribuição das forças no talude foram agrupadas de forma simples por Gray e Leiser (1982) e também posteriormente por Gray e Sotir (1996):

- 1) reforço mecânico das raízes;
- 2) modificação da umidade do solo;

- 3) reforço e arqueamento promovidos pelos talos engastados e ancorados no solo;
- 4) sobrecarga exercida pelo peso da vegetação;
- 5) efeito cunha; e
- 6) efeito alavanca.

As primeiras três influências/efeitos sempre tendem a aumentar a estabilidade das encostas. A quarta, a sobrecarga, pode ter efeito tanto benéfico quanto adverso, dependendo da localização da vegetação no talude e de sua inclinação. Estas influências hidromecânicas serão comentadas em maior detalhe nos tópicos adiante.

As duas últimas influências/efeitos, efeito cunha e efeito alavanca, tipicamente afetam os taludes de forma adversa à estabilidade, porém normalmente estes componentes são completamente balanceados pelos efeitos benéficos. Ventos fortes atuando no talude podem introduzir momentos que atuam no sentido de desestabilizá-lo, através da transferência de forças dinâmicas para a vegetação e formação de braço de alavanca. Brown e Sheu (1975) em seus estudos sobre desmatamento de florestas estabeleceram um complexo modelo teórico de análise. Porém, conforme estudado por Wu et al. (1979), estas forças tendem a ser relativamente pequenas, sendo as forças geralmente transmitidas ao talude em torno de 1 kPa.

Reforço mecânico das raízes

O papel das raízes na estabilidade de encostas naturais tem sido intensamente estudado. Ziemer e Swanston (1977) mostraram evidências de que a remoção das raízes (às vezes a morte das mesmas) gera um aumento da frequência de deslizamentos. Tentativas de mensurar os efeitos de reforço mecânico das raízes têm trazido resultados diversos. Alguns estudos têm revisado extensivamente os processos físicos de reforço radicular em taludes (WU et al. 1979; WU; WATSON, 1998).

O reforço radicular nas encostas e sua influência na estabilidade dos taludes tem sido, de fato, o principal objeto de estudo dentro do âmbito do papel da

vegetação na estabilidade dos taludes desde seus primórdios. A base do conhecimento necessário a estes tipos de avaliações encontra-se fisiologia e a ecologia radicular. A pesquisa sobre raízes teve seu início no começo do século dezoito. Hales em 1727 escavou raízes de plantas cultivadas para observar sua morfologia. Posteriormente, por quase 150 anos, a pesquisa estagnou. Os novos escritos só foram surgir ao final do século dezanove, com o advento dos fertilizantes químicos.

A fisiologia e a ecologia radicular são campos da ciência biológica importantes para o entendimento de como e porque as raízes das plantas crescem. A fisiologia radicular é o estudo dos reais processos necessários ao desenvolvimento radicular, como divisão celular e mecanismos de absorção de nutrientes. A ecologia radicular, por outro lado, é o estudo dos fatores ambientais que interferem no crescimento e estrutura das raízes. Fatores ambientais como umidade, disponibilidade de nutrientes, densidade do solo e grau de fraturamento do saprolito são apenas alguns dos parâmetros ecológicos de interesse na ciência da ecologia radicular (BÖHM, 1979).

Segundo O'Loughlin e Ziemer (1982), estes estudos tem sido canalizado essencialmente em quatro áreas de atuação principais:

- 1) medições de laboratório e campo da contribuição das raízes para a resistência dos solos;
- 2) avaliações indiretas da contribuição dos sistemas radiculares para a resistência dos solos, através de cálculos indiretos de densidade radicular, dados de distribuição e morfologia;
- 3) desenvolvimento teórico das análises de estabilidade, em particular retroanálises, utilizando-se as características dos solos e a geometria dos taludes para estimar as contribuições dos sistemas radiculares para a estabilização das encostas;
- 4) estudos de laboratório da força individual das raízes amostradas de plantas vivas e as taxas de decaimento depois da morte da raiz/ planta.

Os solos reforçados com raízes e fibras de raízes se comportam como um material composto no qual fibras elásticas com tensão de tração relativamente

elevada estão permeadas numa matriz de solo plástica. O acréscimo de forças se dá em função de forças de tração geradas entre as fibras e a matriz.

As raízes promovem um reforço no solo, aumentando sua resistência máxima e a grandes deformações, o que normalmente pode ser interpretado de duas maneiras diferentes (GRAY; LEISER, 1982). A primeira interpreta o reforço linear das fibras no solo pela redução anisotrópica da taxa de deformação na direção do reforço (Figura 6).

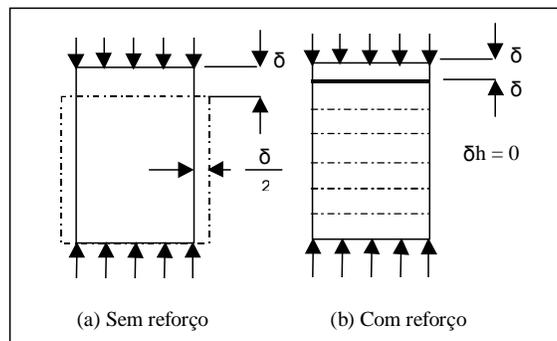


Figura 6. Efeito do reforço linear na deformação dos solos (adaptado de GRAY; LEISER, 1982).

A segunda interpretação é que o reforço de fibras confere ao solo uma pseudo-coesão, elevando a posição da envoltória de resistência de um material (figura 7).

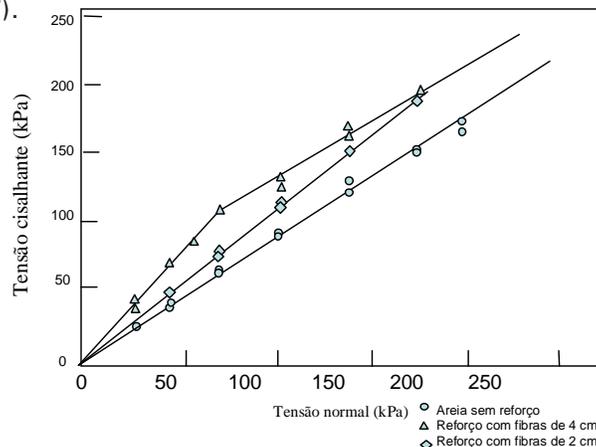


Figura 7. Influência do reforço com fibras nas envoltórias de resistência de areia de duna seca de Muskegon. A razão de área radicular (A_r/A , ou área da sessão transversal da amostra preenchida por raízes sobre área preenchida por solo) igual a 50%, orientação perpendicular ao plano de cisalhamento (adaptado de GRAY; LEISER, 1982).

O uso do termo coesão para este tipo de reforço vem sendo contestado recentemente por ser uma simplificação por vezes inadequada dos processos atuantes em um talude em relação ao reforço radicular.

Coesão aparente

Apesar de muitos autores se referirem ao aumento da coesão dos solos devido ao reforço radicular, na verdade somente uma pequena parcela das raízes atua neste sentido, isto é, de maneira coesiva.

A coesão descreve um processo de atração entre partículas, normalmente ocasionado por pequenas forças eletrostáticas (coesão verdadeira ou efetiva) ou sucção matricial (coesão aparente) na matriz do solo (BRADY; WEIL, 1999). Solos argilosos e siltosos normalmente exibem uma força de coesão limitada, que resulta na estruturação dos solos e na formação dos agregados. Solos arenosos ou grosseiros não apresentam virtualmente nenhuma coesão verdadeira, e apresentam baixíssima coesão aparente, já que as forças matriciais entre os grãos são baixas e não existem forças eletrostáticas entre as partículas.

Entretanto, a agregação das partículas existe também devido à existência de microfilamentos de raízes e fibras de fungos. As ligações entre as partículas são estabelecidas quando os microfilamentos começam a unir diferentes partículas dos solos.

Ancoragem vertical

Muitos pesquisadores têm constatado a presença de raízes expostas em escarpas resultantes de deslizamentos (KINAKIN, 2003; GRAY; MEGAHAN, 1981). Estas raízes podem estar quebradas ou inteiras. Cada ocorrência reflete a interação solo/raiz. Raízes quebradas indicam que as forças de atrito da interface solo/raiz foram maiores que a tensão de tração das raízes. Raízes intactas indicam o inverso.

Ambas as situações mostram o papel de ancoragem exercido pelos sistemas radiculares. O comportamento é semelhante ao solo reforçado com grampos, que ajuda a suportar o peso estático da encosta (HOEK; BROWN, 1980).

Observa-se, porém, que não ocorre aumento das tensões normais na encosta, portanto não há atrito adicional mobilizado.

A resistência máxima das raízes é mobilizada assim que começa o movimento da massa de solo (NORRIS; GREENWOOD, 2000). Se as forças atuantes no solo em um talude ou encosta forem menores que a tensão de tração das raízes somada ao atrito na interface solo/raiz, o deslizamento pode ser contido. Fica claro deste modo que estas raízes não adicionam coesão ao solo, no sentido mais estrito do termo (GREENWAY, 1987).

Suporte lateral

O efeito de suporte lateral tem sido observado em muitos estudos (WU; WATSON, 1998; PRESTON; CROZIER, 1999). Uma malha de raízes finas de numerosas plantas diversas pode resultar em uma camada fina e altamente reforçada de solo. Esta camada poderá segurar o solo em movimento impedindo pequenos deslizamentos. Quando combinado ao efeito de ancoragem dos solos promovido pelas raízes mais profundas, o comportamento é semelhante ao de um reforço com geotêxtil ancorado. Este tipo de reforço não é representativo de coesão. Um tipo adicional de suporte lateral ocorre quando as raízes verticais de ancoragem dos solos estabelecem colunas no solo que promovem arqueamento a montante, o que será estudado mais adiante. Krogstad (1995) sintetizou estes diversos aspectos do reforço radicular de forma clara, conforme na figura 8.

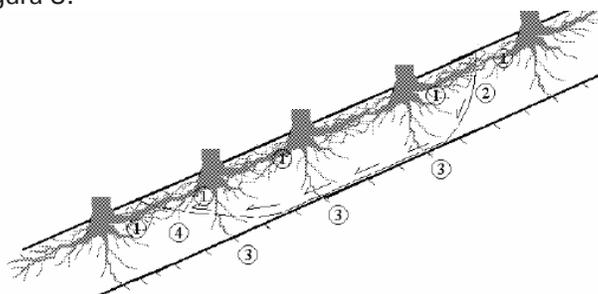


Figura 8. Mecanismos de reforço radicular. 1 - a densa malha de raízes próximas ao caule ou tronco cria blocos reforçados de solos; 2 - o entrelaçamento das raízes de diferentes indivíduos gera a formação de um grande bloco reforçado; 3 - raízes profundas chegam à rocha ancorando os solos; 4 - blocos estáveis promovem arqueamento e estabilizam sessões superiores dos taludes (KROGSTAD, 1995).

O reforço promovido pelos micro-filamentos de raízes nos agregados de solo constitui um processo de aumento da coesão dos solos. Muitos pesquisadores têm utilizado este termo para indicar o efeito de reforço mecânico promovido pelas raízes no solo, mais interessados em como embutir este acréscimo de resistência nos cálculos de estabilidade do que no processo mecânico envolvido.

Quantificação do reforço radicular

Estimativas de reforço radicular têm sido baseadas inicialmente no tamanho das raízes, tensão de tração e tipo de estrutura (WU et al. 1999). Outros métodos incluem o uso de avaliações com caixas de cisalhamento montadas *in-situ* (WU; WATSON, 1998; NORRIS; GREENWOOD, 2000). Cálculos incluindo a estrutura das raízes podem ser realizados somente após a ocorrência de rupturas ocasionando na exposição da mesma. Testes *in situ* tem que ser extrapolados para as adjacências, sendo que diferenças nas propriedades dos solos e no crescimento vegetal poderão confinar estas avaliações a pequenas áreas.

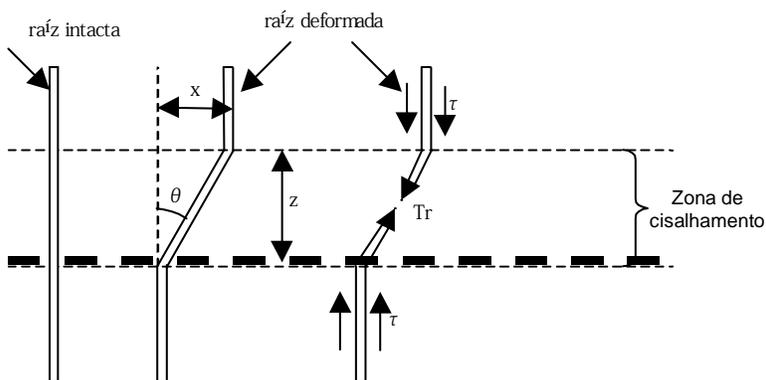
Incluir o reforço radicular como parte da coesão dos solos impossibilita a avaliação dos efeitos de poro-pressão na interface solo/raiz (no atrito da interface), o que pode gerar sobrestimativas dos valores de reforço radicular em retroanálises de deslizamentos. Quando estes valores forem utilizados futuramente, poderá haver, portanto, sobrestimativa dos valores de reforço radicular e do fator de segurança da encostas.

Uma alternativa (análoga ao procedimento adotado em cálculos da mecânica das rochas) é a utilização de modelos de aspereza ou rugosidade de juntas. Nestes casos, a resistência ao cisalhamento em uma superfície planar áspera é incrementada pela rugosidade, aumentando o ângulo de atrito na superfície, sendo que dados obtidos em ensaios de cisalhamento direto *in situ* poderiam ser utilizados nesta linha de raciocínio.

Assim o uso do termo coesão (isto é, o acréscimo de coesão promovido pelas raízes) nas discussões de reforço radicular tem acarretado normalmente em confusão sobre os mecanismos envolvidos.

Modelos teóricos do reforço de solo por raízes

Já existem na literatura vários modelos teóricos do reforço de solos por raízes. Inicialmente, um modelo simples de reforço de solo por fibras submetido a cisalhamento direto foi desenvolvido independentemente por Waldron (1977), Wu (1976) e Brenner e James (1977) (figura 9).



Legenda:

Z – espessura da zona de cisalhamento.

X – deflexão horizontal da raiz.

θ - ângulo de distorção cisalhante.

T_R – tensão de tração nas raízes.

T – atrito lateral ao longo da raiz.

Figura 9. Modelo de reforço perpendicular de raiz atravessando uma zona de cisalhamento. Adaptado de Gray e Leiser, 1982.

Matematicamente, a mobilização da resistência à tração das raízes traduz-se em um aumento da resistência ao cisalhamento do solo pela seguinte equação:

$$\Delta S_R = t_R [\cos\theta \tan\phi + \text{sen}\theta]$$

Onde:

ΔS_R – aumento de resistência ao cisalhamento.

θ - ângulo de distorção cisalhante.

φ – ângulo de atrito interno.

t_R – tensão de tração média nas raízes por unidade de área de solo.

A tensão de tração média das raízes por unidade de área do solo (t_R) pode ser determinada pela expressão:

$$t_R = T_R (A_R/A)$$

Onde:

T_R – tensão de tração nas raízes.

(A_R/A) – razão da área radicular pela área da seção transversal do solo ocupada pelas raízes.

A razão de área radicular (RAR ou *root area ratio*) tem sido um parâmetro utilizado extensivamente para descrever as relações entre densidade radicular e área total ocupada por raízes no solo (BURROUGHS; THOMAS, 1977; BÖHM, 1979; WU et al. 1979). A área da seção transversal das raízes (A_R) pode ser determinada pela contagem do número de raízes de diferentes classes de tamanho (n_i) em uma dada área de seção transversal de solo (A), sendo, portanto, igual ao somatório do produto do número de raízes, em cada classe de tamanho, por suas áreas correspondentes:

$$t_r = T_r \frac{\sum n_i \cdot a_i}{A}$$

Onde:

n_i – número de raízes da classe de tamanho i ;

a_i – área da seção transversal das raízes da classe de tamanho i ;

A – área de solo considerada.

No caso de sistemas naturais de raízes, a resistência à tração tende a variar com o tamanho e o diâmetro das raízes. Assim, o termo da tensão de tração deve ser incluído dentro do somatório:

$$t_r = \frac{\sum T_i n_i a_i}{A}$$

Onde:

T_i – tensão de tração nas raízes da classe de tamanho i .

Para o ângulo de distorção cisalhante (θ) variando entre 40° e 70° e ângulo de atrito interno (ϕ) entre 25° e 40° , o valor do termo do colchete varia de 1,0 a 1,3 (Figura 10). Assumindo-se o valor médio deste intervalo como sendo um valor razoável para o termo entre colchetes, a máxima contribuição de resistência cisalhante das raízes para o solo pode ser estimada, em uma primeira aproximação, como sendo:

$$\Delta S_R = 1,15t_R$$

O comprimento mínimo (L_{\min}) da raiz, com um diâmetro uniforme (d_R), necessário para mobilizar toda a resistência à tração e prevenir o seu arrancamento, é dado pela expressão:

$$L_{\min} > \frac{T_R d_R}{2\tau'_R}$$

Onde:

L_{\min} - comprimento mínimo para mobilizar toda a resistência à tração das raízes durante o cisalhamento;

d_R - diâmetro das raízes;

T_R - tensão de tração nas raízes;

τ'_R - máxima tensão cisalhante tangencial ou resistência ao arrancamento entre as fibras e o solo.

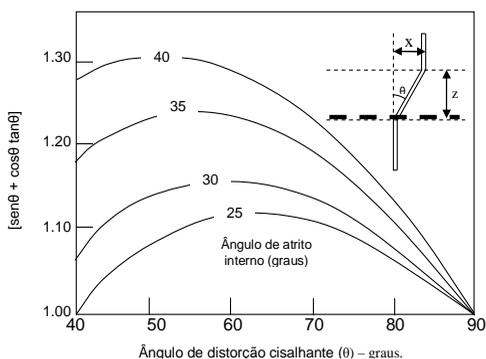


Figura 10. Variação do termo entre colchetes para diferentes valores de (GRAY; LEISER, 1982).

Existe também um modelo mais generalizado de reforço de solos por raízes (GRAY; LEISER, 1982), que considera o ângulo de inclinação inicial (i) (ver Figura 11).

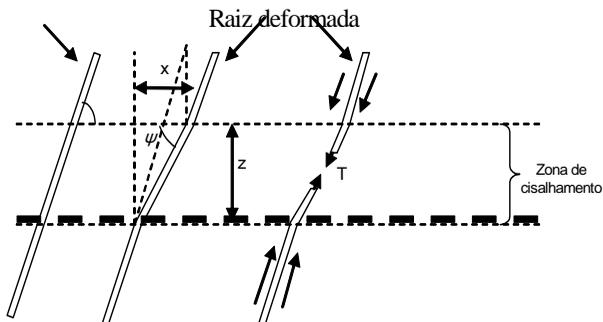


Fig. 11. Modelo de reforço de raiz inclinada atravessando uma zona de cisalhamento (GRAY; LEISER, 1982).

O aumento da resistência cisalhante é dado pela seguinte expressão:

$$\Delta S_R = t_R [\sin (90-\Psi) + \cos (90-\Psi) \tan \phi]$$

$$\Psi = \tan^{-1} \frac{1}{k + (\tan i)^{-1}}$$

Onde:

k – razão de distorção cisalhante ($= x/z$).

Os maiores valores do termo entre colchetes constam para valores de i próximos à $45 + \phi / 2$ (inclinação de 60° , $\phi = 30^\circ$, Figura 12).

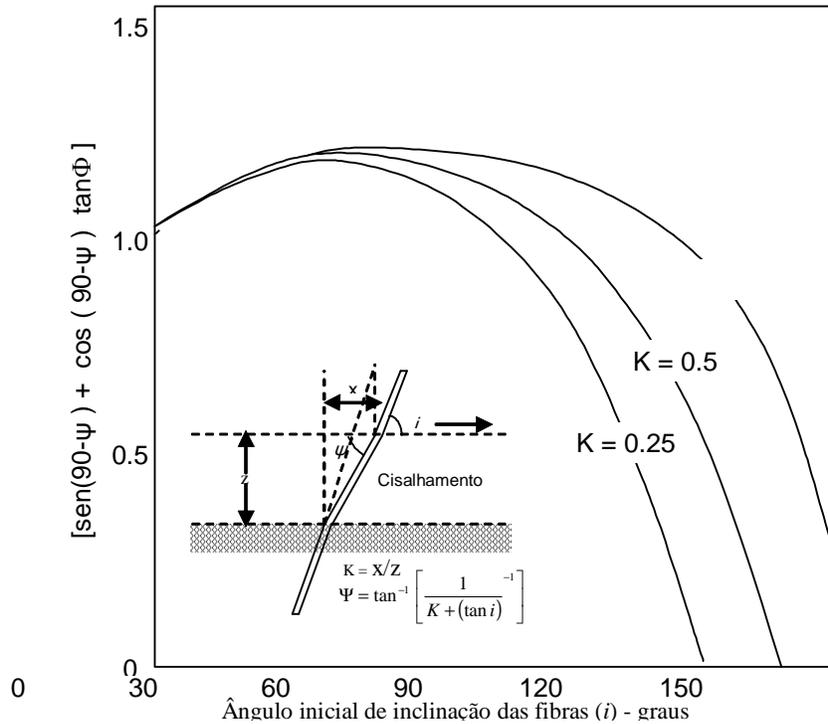


Figura 12. Valores do termo entre colchetes para diferentes valores de i e k (de GRAY; LEISER, 1982).

Morfologia das raízes

Pesquisadores têm utilizado diferentes técnicas para observação dos sistemas radiculares, incluindo escavação de trincheiras e caminhos subterrâneos com paredes de vidro. Recentemente os métodos de análise radicular têm se subdividido em dois tipos básicos: *in situ* e *ex situ*. Métodos *in situ* consistem em avaliações em trincheiras pelo método dos perfis (BÖHM, 1979, GRAY et al. 1991; ABERNETHY, 1999). Métodos *ex situ* variam desde a dissecação das raízes do solo (ANDRADE, 1997, ver figura 13), exposição de todo o sistema radicular com jato d'água, como executado na Nova Zelândia (WATSON; O'LOUGHLIN, 1985) até a formação de sessões cônicas hidraulicamente com as raízes expostas em Ohio (RIESTENBERG, 1994). Estes métodos têm sido muito utilizados para a avaliação do efeito do desmatamento na força radicular (BURROUGH; THOMAS, 1977; ZIEMER; SWANSTON, 1977; ZIEMER, 1981).

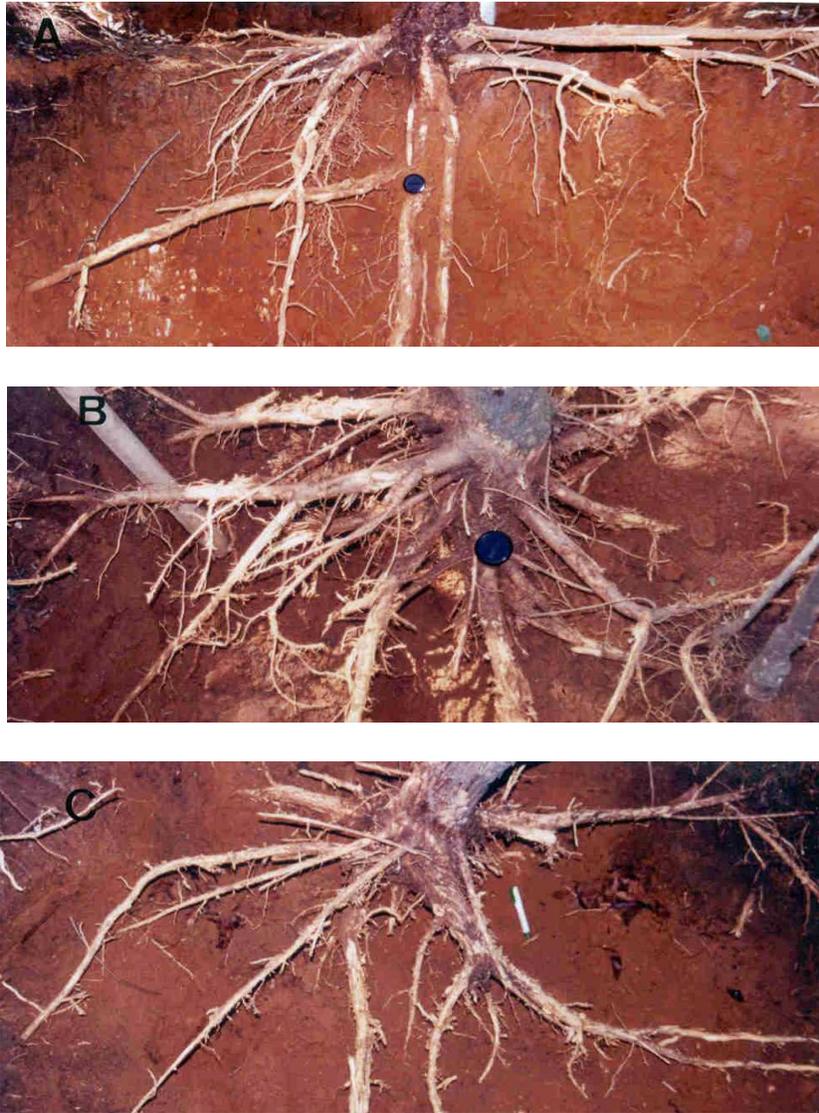


Figura 13. Sistemas radiculares dissecados de *Mimosa Caesalpiniaefolia* (A); *Acácia Mangium* (B) e *Acácia Holosericea* (C), espécies leguminosas arbóreas rústicas utilizadas para projetos de reflorestamento (de ANDRADE, 1997).

Em relação à escolha das plantas mais adequadas na estabilização de solos é importante conhecer o comprimento e a extensão de ramificação que suas raízes podem alcançar. O desenvolvimento e a estruturação dos sistemas radiculares dependem, em geral, de suas características genéticas e do meio ambiente (GRAY; LEISER, 1982).

Uma forma de classificar a arquitetura dos sistemas radiculares foi proposta por Pritchett (1979) descrevendo-os de acordo com o hábito radicular, que está relacionado à forma, direção e distribuição das raízes grandes e que define sua arquitetura, em função da intensidade radicular, que se refere à forma, distribuição e número de raízes pequenas (ANDRADE, 1997). Pritchett apresentou em seu trabalho três tipos (figura 14): o pivotante que possui raiz ou raízes na direção vertical; o fasciculado que apresenta várias ramificações a partir do tronco; e o superficial, onde a maior parte das raízes está distribuída horizontalmente na superfície do solo.

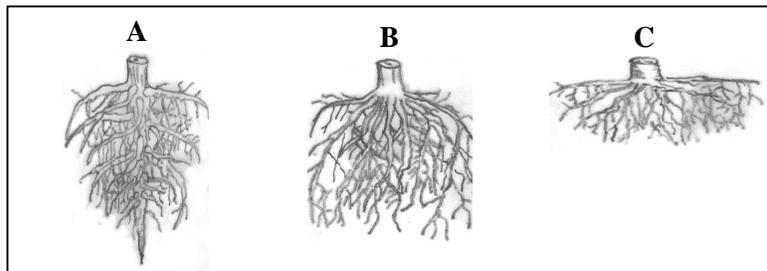


Figura 14. Arquitetura dos sistemas radiculares de acordo com a nomenclatura proposta por Pritchett: A - Pivotante; B - Fasciculado; C - Superficial (adaptado de PRITCHETT, 1979).

A tensão de tração das raízes tende a variar de acordo com a idade e tamanho das raízes, conforme exemplo mostrado na figura 15. Sabe-se que as raízes possuem uma resistência à tração muito maior quando vivas. Estudando raízes de cedros, Burroughs e Thomas (1977) e Ziemer (1981) mostraram que raízes de 25 mm de diâmetro possuem inicialmente resistência à tração em torno de 10 a 60 MPa, sendo que estes valores caem mensalmente em torno e 300 a 500 kPa após o morte do indivíduo. Nota-se que estes são valores de resistência individual das raízes, que podem ser obtidos de

testes em laboratório para a medição direta da resistência à tração das raízes Yarbrough (2000). Os valores de incremento de resistência ao cisalhamento promovido pela vegetação estão normalmente em uma ordem de grandeza abaixo destes valores, em função da razão de área radicular. Yarbrough (2000), em seu estudo sobre matas ciliares encontrou valores de 0 a 240 kPa para o reforço radicular das encostas.

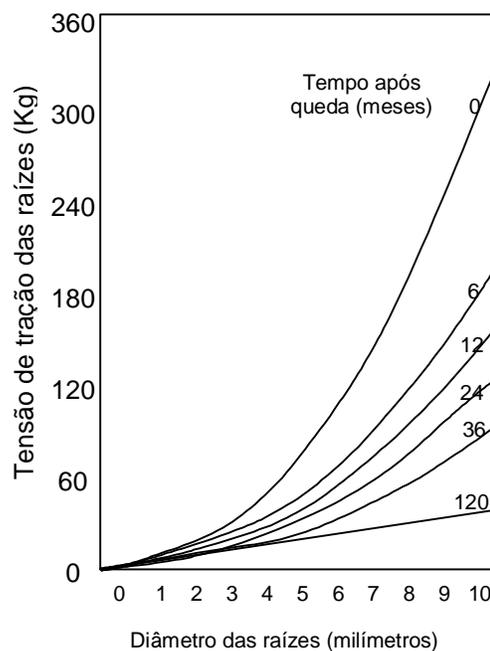


Figura 15. Variabilidade dos valores de tensão de tração das raízes de Pinheiros da Costa do Pacífico em função da idade e tamanho das raízes (adaptado de GRAY; LEISER, 1982).

Quantificação das raízes nos perfis de solo

Nos primeiros estudos sobre quantificações das raízes nos solos aproximações rudimentares já eram realizadas com grids e placas de acrílico (BÖHM, 1979). O método permitia mapear as raízes in situ e transportar as placas para análise posterior. Técnicas desenvolvidas por Böhm, 1979; Gray e Sotyr, 1996 utilizaram placa de acrílico com papel acetato para o mapeamento. A limitação é o tempo para o acesso à morfologia completa das

raízes (só perfis, ficando difícil a determinação de certas morfologias questionáveis), dificultando a identificação de raízes pivotantes, requer por isso interpretação dos dados.

Atualmente, têm-se optado pela utilização de câmeras digitais para mapear os perfis, permitindo a análise posterior com softwares. O método é similar visto que são retiradas imagens dos perfis da mesma forma que na placa de acrílico (figura 16).



Figura 16. Aparato para obtenção de imagens com câmera digital das raízes do solo. Observa-se a malha para referência e o suporte montado da câmera (de YARBROUGH, 2000).

Ensaios *in situ* de reforço mecânico das raízes

Inúmeros testes de campo e laboratório já foram desenvolvidos para estimar a influência do reforço das raízes sobre a resistência ao cisalhamento dos solos. Os tipos de ensaios podem ser divididos basicamente em 4 tipos: testes de tensão de tração, arrancamento, cisalhamento *in situ* e cisalhamento em laboratório.

Nos 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).

Testes de arrancamento medem a resistência máxima ao arrancamento da raiz no solo, sendo, portanto um teste *in situ* (Figura 17). No ensaio inicia-se com a exposição de uma camada de solo reforçado com raiz, através de escavação. Posteriormente utiliza-se uma espécie de pinça, que será movimentada através de um tirfor, sendo as tensões de arrancamento monitoradas em uma célula de carga acoplada a um sistema de aquisição de dados.

Tsukamoto (1987) reportaram que estes valores podem ser obtidos em função do diâmetro das raízes, sendo independentes das condições da encosta e tipo de raiz (pivotante, lateral etc.). A resistência ao arrancamento seria composta por um atrito tangencial entre o solo e as raízes, seria influenciada pela elasticidade das raízes, ramificação, presença de "cabeleira" ou raízes finas e a resistência a tração nas junções das raízes (ABE; ZIEMER, 1991).

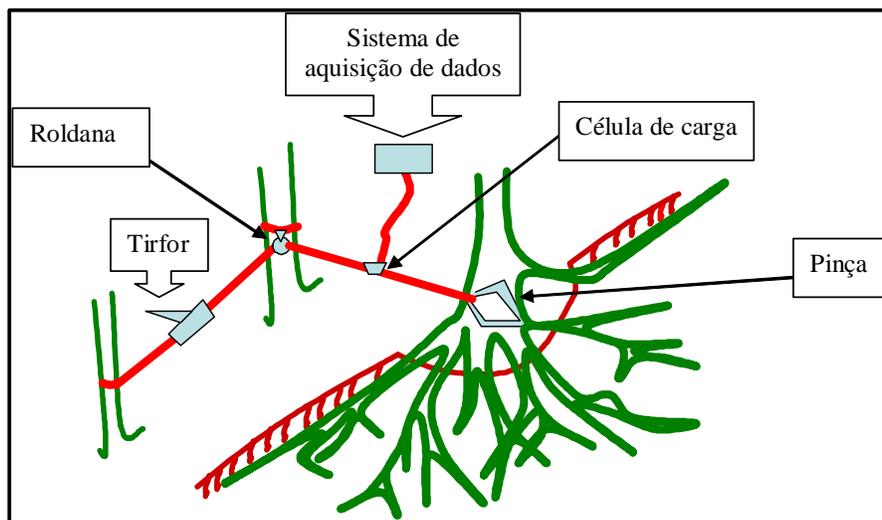


Figura 17. Diagrama do teste de arrancamento (adaptado de ABE; ZIEMER, 1991).

Endo e Tsuruta (1969) foram os primeiros a desenvolver uma metodologia de avaliação destes efeitos em larga escala em campo, com o estabelecimento de testes de cisalhamento direto em campo, que também é muito difundido em diferentes modelos, como o de Lawrance et al. (1996), conforme figura 18; Zou et al. (1997). Estes testes são de difícil execução, porém são importantes para a avaliação dos modelos teóricos existentes.

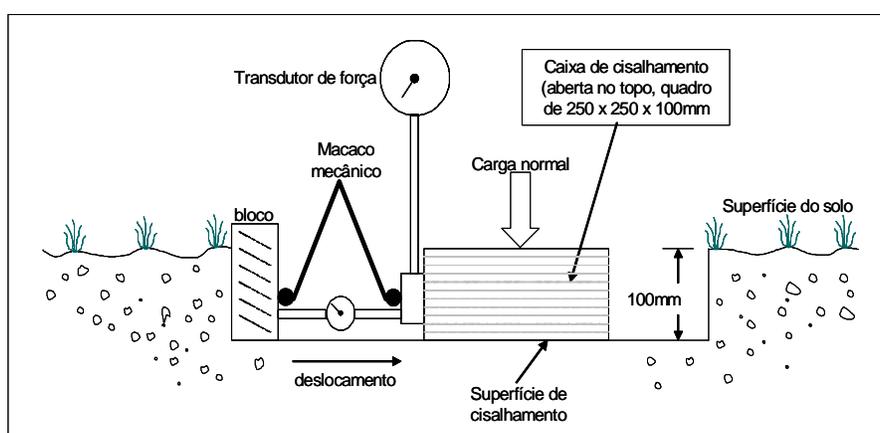


Figura 18. Ensaio de cisalhamento *in situ* realizado por Lawrance et al. (1996). A carga é aplicada em uma caixa aberta que é colocada após se esculpir cuidadosamente um bloco de solo. A carga cisalhante é aplicada por um macaco hidráulico e as tensões são medidas em um transdutor de pressão.

Modificação da umidade dos solos

A vegetação pode afetar a estabilidade das encostas pela modificação do regime hidrológico no solo. Isto ocorre devido à evapotranspiração e a interceptação de água nas folhagens das copas arbóreas ou da serrapilheira, como já foi anteriormente mencionado. Além dos aspectos hidrológicos, relacionados essencialmente ao controle de erosão, a vegetação atua (“juntamente” com as propriedades dos solos) modificando a distribuição da sucção matricial (ou poro-pressão, em taludes e encostas saturadas). Este último efeito é muito complexo e não será dada maior ênfase neste trabalho ao assunto.

Arqueamento e reforço das encostas

O reforço ou contenção lateral contra deslizamentos superficiais de taludes é proporcionado pela firme ancoragem dos troncos rígidos das árvores. O arqueamento em taludes ocorre na tentativa do solo em mover-se em torno ou através de uma fileira de árvores firmemente ancoradas em uma camada.

Alguns modelos teóricos já foram desenvolvidos neste sentido. Wang e Yen (1974) introduziram um modelo teórico para descrever e prever a magnitude das forças laterais atuantes em uma fileira de árvores pelo movimento do solo através delas (Figura 19).

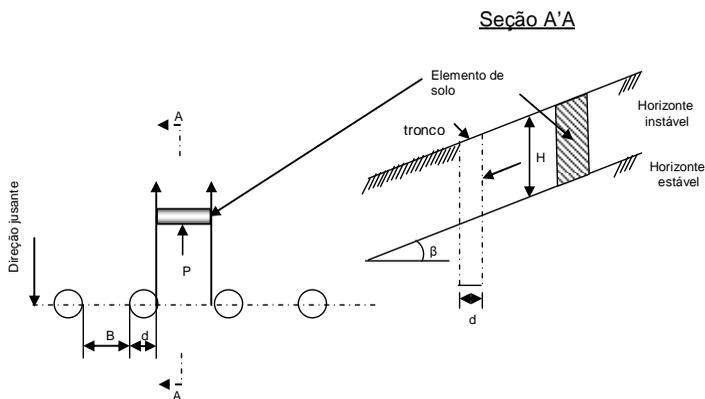


Figura 19. Deformação plástica pela ação de arqueamento através de uma fileira de árvores engastadas em um talude de acordo com a teoria de Wang e Yen (1974).

De acordo com este modelo a força total P desenvolvida contra uma “estaca” (no caso o tronco da árvore) de diâmetro d embutida num talude com solo de espessura H é dada pela expressão:

$$P = \frac{K_0}{2} d \gamma H^2 + \left(\frac{K_0}{2} \gamma H - p \cdot BH \right)$$

Onde:

P – força total desenvolvida contra o tronco da árvore embutida no talude;

B – espaçamento entre as árvores;

H – espessura da camada de solo;

d – diâmetro da árvore embutida;

K_0 – coeficiente de empuxo em repouso;

p – pressão lateral média ou pressão de arqueamento entre as árvores;

γ – peso específico do solo.

O limite máximo de distância entre as árvores (B_{crit}) de acordo com este mesmo modelo é dado pela expressão:

$$B_{crit} = \frac{HK_0(K_0 + 1)\tan\phi + \frac{2c}{\gamma}}{\cos\beta(\tan\beta - \tan\phi_1) - \frac{c_1}{\gamma H \cdot \cos\beta}}$$

Onde:

B_{crit} – espaçamento crítico entre as árvores embutidas (limite);

c – coesão do solo;

c_1 – coesão ao longo da superfície de ruptura;

β – ângulo da encosta;

ϕ e ϕ_1 – ângulo de atrito no solo e na superfície de ruptura.

Conforme pode ser observado na Figura 20, o B_{crit} é um parâmetro muito sensível a variações na coesão dos solos. Assumindo-se $c = 0$ o valor de $B_{crit} = 4$ ft para $\phi_1 = \frac{1}{2}$. Observa-se que pequenos acréscimos de c geram um grande aumento no B_{crit} . Estes acréscimos de c podem se dar por: reforço das raízes; cimentação; capilaridade (Ψ); dupla camada etc.

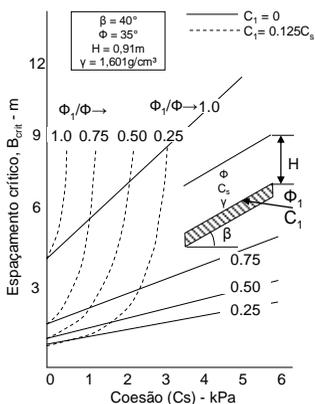


Figura 20. Variabilidade dos valores de B_{crit} em função de c , para diferentes valores de ϕ (adaptado de GRAY; LEISER, 1982).

Sobrecarga da vegetação

A condição em que a sobrecarga favorece a estabilidade das encostas, de acordo com Gray e Leiser (1982), ocorre quando:

$$c < \gamma_w H_w \tan\phi \cos^2\beta$$

Onde:

c – coesão do solo;

γ_w – peso específico da água;

H_w – altura do nível piezométrico do talude;

ϕ – ângulo de atrito interno do solo;

β – ângulo de inclinação do talude.

A relação indica que a sobrecarga é benéfica para as seguintes situações:

- baixos valores de coesão;
- elevado atrito;
- elevado nível piezométrico;
- em taludes relativamente suaves.

Conforme vem sendo frisado pela literatura nos últimos anos (GRAY; LEISER, 1982), são raras as situações em que a sobrecarga exercida pela vegetação exerce um efeito negativo sobre a estabilidade das encostas.

Conclusões

Segundo estudos teóricos e experimentais tem sido possível comprovar que a vegetação pode exercer efeitos favoráveis ou desfavoráveis na estabilização de encostas. De uma maneira geral, pode-se observar que os principais efeitos são benéficos, o que faz da vegetação uma excelente alternativa para a solução de problemas de estabilização de encostas, regulando o regime hidrológico e incrementando a resistência dos solos através do reforço radicular, efeito de arqueamento etc. É importante salientar, em relação às encostas naturais, que a remoção da cobertura vegetal, comprovadamente, causa problemas de estabilidade das encostas. Isto se torna relevante nas circunstâncias atuais, onde o desmatamento e a eliminação da cobertura vegetal vem sendo realizados em grande escala.

No entanto seu uso deve ser feito com cautela, pois podem ocorrer efeitos adversos resultantes da implantação ou existência de vegetação em alguns locais, como o aumento na capacidade de infiltração excessivo, a exposição da vegetação aos ventos que pode transmitir forças dinâmicas às encostas, e também o peso das árvores, que pode sobrecarregar a encosta, aumentando as componentes normais descendentes.

A grande vantagem do uso da vegetação na estabilização das encostas é a oportunidade de utilização de uma solução altamente ecológica e de baixo custo. É necessário para tanto ainda que sejam realizadas pesquisas mais aprofundadas sobre o tema, permitindo que a solução de estabilização das encostas com vegetação possa ser amplamente utilizada e apoiada em sólidos conhecimentos técnicos.

Referências Bibliográficas

ABE, K.; IWAMOTO, M.; SAMORI, T. 1986 Strength of binding soil by tree root. In: JAPANESE FOREST SOCIETY ANNUAL MEETING, 38., 1986, Kanto **Transactions...** Kanto: JFS, 1986. p 217-220.

ABE, K.; ZIEMER, R. R. Effect of tree roots on a shear zone: modeling reinforced shear stress. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 21, n. 7, p. 1012-1019, July 1991.

ABERNETHY, B. **The role of riparian tree roots in reinforcing riverbanks.** 1999. Thesis (Doctor of Science) - Monash University, Clayton.

ALLEMÃO, A. V. F.; NUNES, V. M.; JANSEN, R. C.; COELHO NETTO, A. L. 1995. Distribuição espacial dos sistemas radiculares em ambiente montanhoso florestal. VI In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 6., Goiânia, 1995. **Anais...** Goiânia, 1995. p. 296-301.

ANDERSON, C. E. **AST 324.** Disponível em: <<http://www3.abe.iastate.edu/AST324/index.html>>. Acesso em: 20 out. 2007. Apresentação online do curso de graduação Agricultural Systems Technology (AST 324) - Soil and Water Conservation Management, da Iowa State University.

ANDRADE, A. G. **Ciclagem de nutrientes e arquitetura radicular de leguminosas arbóreas de interesse para revegetação de solos degradados e estabilização de encostas.** 1997. 168 f. Tese (Doutorado) - UFRRJ, Seropédica.

BÖHM, W. **Methods of studying root systems.** Berlin: Springer, 1979. xxi, 188 p. (Springer. Ecological studies, v. 33).

BONNEL, M.; GILMOR, D. A.; SINCLAIR, D. F. Soil hydraulic properties and their effects on surface and subsurface water transfer in tropical forest catchment. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 26, n. 1, p 1-18, Mar. 1981.

BRADY, N. WEIL, R. **The nature and properties of soils**. 12th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. 881 p.

BRENNER, R. P.; JAMES, S. M. Effect of roots on shear strength of a colluvial soil. In: DANUBE-EUROPEAN CONFERENCE OF SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 5., 1977, Bratislava. **Proceedings...** Bratislava, 1977. p. 77-78.

BROWN, C. B.; SHEU, M. S. Effects of deforestation on slopes. **Journal of the Mechanics and Foundations Division**, Reston, v. 101, n. 1, p. 147-165, 1975. Título atual: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, da ASCE.

BURROUGHS, E. R.; THOMAS, B. R. **Declining roots strength in Douglas fir after felling as a factor inslope stability**. Ogden: Forest Service, 1977. 27 p. (Forest Service. Research paper, INT-190).

CASTRO JUNIOR, E. **O papel da fauna endopedônica na estruturação física do solo e seu significado para a hidrologia de superfície**. 1991. 150 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Geografia, UFRJ, Rio de Janeiro.

COELHO NETTO, A. L. Overlandflow production in a tropical rain forest catchment: the role of litter cover. **Catena**, Braunschweig, v. 14, n. 3, p. 213-231, June 1987.

COELHO NETTO, A. L. **Surface hidrology and soil erosion in a tropical montainous rainforest drainage basin, Rio de Janeiro**. 1985. 181 p. Tese (Doutorado) - Katholieke Universiteit Leuven, Leuven.

ENDO, T.; TSURUTA, T. The effect of tree roots upon the shear strenght of soil. **Annual Report of the Hokkaido Branch, Tokyo Forest Experiment Station**, Tokyo, v. 18, p. 168-179, 1969.

GRAY, D. H.; LEISER, A. T. **Biotechnical slope protection and erosion control**. Melbourne [Flórida, Estados Unidos]: Krieger, 1982. 288 p.

GRAY, D. H.; MacDONALD, A.; THOMANN, T.; BLATZ, I.; SHIELDS, F. D. **The effects of vegetation on the structural integrity of sandy levees**. Vicksburg: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1991. 145 p. (WES. Technical report, REMR-EI-5).

GRAY, D. H.; MEGAHAN, W. F. **Forest vegetation removal and slope stability in the Idaho Batholith**. Ogden: Forest Service, 1981. 23 p. (United States Forest Service. Research paper, INT-271).

GRAY, D. H.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, Reston, v. 108, n. 3, p. 335-353, 1983. Título atual: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. Publicado pela ASCE.

GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. **Biotechnical and soil bioengineering stabilization: a practical guide for erosion control**. J. Wiley, 1996. 440 p.

GREENWAY, D. R. Vegetation and slope stability. In: ANDERSON, M. G.; RICHARDS, K. S. (Ed.) **Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology**. Chichester: J. Wiley, 1987. p. 187-230.

HOEK, E. BROWN, E. T. **Underground excavations in rock**. London: Institute of Mining and Metallurgy, 1980. 527 p.

KINAKIN, D. The confusion of root "cohesion". **Aspect**, Vancouver, v. 5, n. 3, p. 6-9, July 2003.

KROGSTAD, F. A physiology and ecology based model of lateral root reinforcement of unstable hillslopes. 1995. 44 p. Thesis (Master of Science) – University of Washington, Seattle.

LAWRANCE, C. J.; RICKSON, R. J.; CLARCK, J. E. The effect of grass roots on the shear strength of colluvial soils in Nepal. In: ANDERSON, M. G.; BROOKS, S. M. **Advances in hillslope processes**, v. 2. Chichester: J. Wiley, 1996. p. 857-868.

MIRANDA, J. C. de. **Intercepção das chuvas pela vegetação florestal e serrapilheira nas encostas do Maciço da Tijuca**: Parque Nacional da Tijuca, RJ. 1992. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Geografia, UFRJ, Rio de Janeiro.

NAKANE, K.; NAKAGAWA, K.; TAKAHASHI, F. Change in tensile strength of Japanese red pine roots after death by fire. **Journal of the Japanese Forestry Society**, Tokyo, v. 65, n. 5, p.155-165, May 1983.

NORRIS, J. E.; GREENWOOD, J. R. In-situ shear and pull-out testing to demonstrate the enhanced shear strength of root reinforced soil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 8., 2000, Cardiff. **Landslides in research, theory and practice**. London: Thomas Telford, 2000. p. 1123-1128.

O'LOUGHLIN, C.; ZIEMER, R. R. The importance of root strength and deterioration upon edaphic stability of steep land forests. INTERNATIONAL UNION OF FOREST RESEARCH ORGANIZATIONS WORKSHOP, 1982, Corvallis, Oregon. **Proceedings...**: P.1.07-00: ecology of subalpine ecosystems as a key to management. 1982. Corvallis: Oregon State University, 1982. p. 70-78.

PRESTON, N.; CROZIER, M. Resistance to shallow landslides failure through root-derived cohesion in east coast hill country soils, North Island, NZ. **Earth Surface Processes and Landforms**, Hoboken, v. 24, n. 8, p. 665-675, Aug. 1999.

PRITCHETT, W. L. **Properties and management of forest soils**. New York: J. Wiley, 1979. 500 p.

RIESTENBERG, M. M. **Anchoring of thin colluvium by roots of sugar maple and white ash on hillslopes in Cincinnati**. Washington, DC: United States Government Printing Office, 1994. 25 p. (United States Geological Survey Bulletin, 2059-E).

RITTER, M. E. Erosion by rain splash. In: RITTER, M. E. **The Physical environment: an introduction to physical geography, 2/e**. Disponível em: <http://www.uwsp.edu/geo/faculty/ritter/geog101/textbook/title_page.html>. Acesso em: 8 set. 2006. (Courtesy USGS DDS 21).

SANJU, U. M.; GOOD, R. E. Vertical root distribution in relation to soil properties in New Jersey Pineland forests. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 150, n. 1, p. 87-97, Mar. 1993.

TERWILLIGER, V. J. Effects of vegetation on soil slippage by pore pressure modification. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 15, n. 6, p.553-570, Sep. 1990.

TSUKAMOTO, Y. Evaluation of the effect of tree roots on slope stability. **Bulletin of the Experimental Forests**, Tokyo, n. 23, p.65-124, 1987.

VALLEJO, L. R. **A influência do "litter" na distribuição das águas pluviais**. 1982. 88 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Geografia, UFRJ, Rio de Janeiro.

WALDRON, L. J. Shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, n. 5, p. 843-849, Sep./Oct. 1977.

WANG, W. L.; YEN, B. C. Soil arching in slopes. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York, n. 100, v. 1, p. 61-78, 1974. Título atual: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, da ASCE.

WATSON, A.; O'LOUGHLIN, C. L. Morphology, strenght and biomass of Manku roots and their influence on slope stability. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 15, n. 3, p. 337-348, 1985.

WU, T. H. **Investigation of landslides on Prince of Wales Island, Alaska.** Columbus: Ohio State University, 1976. 94 p. (Ohio State University. Geotechnical engineering report, n. 5).

WU, T. H.; WATSON, A.; EL-KHOULY, M. Soil root interaction and slope stability. In: ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON GROUND AND WATER BIOENGINEERING FOR EROSION CONTROL AND SLOPE STABILIZATION, 1., 1999, Manila. **Proceedings...** Steamboat Springs: IECA, 1999.

WU, T. H.; WATSON, A. In situ shear tests of soil blocks with roots. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, v. 35, n. 4, p. 579-590, Aug. 1998.

WU, T. H. SWANSTON, D. N.; McKINNELL, W. P. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, v. 16, n. 1, p. 19-33, Feb. 1979.

YARBROUGH, L. D. **Channel bank stability analysis and design:** considering the effects of riparian vegetation and root reinforcement. 2000. Thesis (Master of Science) - University of Mississippi, Oxford.

ZIEMER, R. R. Roots and the stability of forested slopes. In: SYMPOSIUM ON EROSION AND SEDIMENT TRANSPORT IN PACIFIC RIM STEEPLANDS, 1981, Christchurch. **Proceedings of a...** Washington, DC: IAHS, 1981. p. 343-361. (IAHS-AISH publication number 132).

ZIEMER, R. R.; SWANSTON, D. N. **Root strength changes after logging in southeast Alaska.** Washington, DC: Forest Service, 1977. 10 p. (Forest Service. Research note PNW 306).

ZOU, Y.; WATTS, D.; CHENG, X.; LI, Y.; LUO, H.; XIU, Q. The traction effect of lateral roots of *Pinus yunnanensis* on soil reinforcement: a direct in situ test. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 190, p. 77-86, Mar. 1997.