

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL-PPGEC

REVISÃO DOS EFEITOS DA VEGETAÇÃO EM TALUDES

Marta Regina Tocchetto Lemes

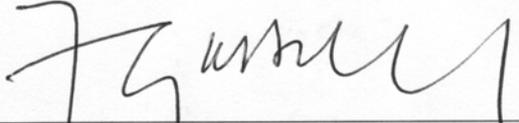
Dissertação para a obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA

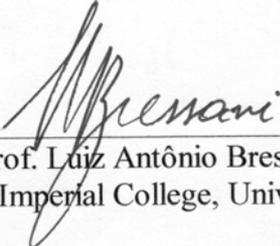
Porto Alegre

2001

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de *Mestre em Engenharia* e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.



Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal
Coordenador do PPGEC / UFRGS



Prof. Luiz Antônio Bressani
Ph. D., Imperial College, Univ. Lodon/ Inglaterra

Banca Examinadora:

- *Prof. Adriano Virgílio Damiani Bica*

Ph. D., Univ. Surrey / Inglaterra

- *Prof. Carlos Ricardo Trein (Fac. Agronomia / UFRGS)*

Ph. D., Crafield University / Inglaterra

- *Prof. Rinaldo José Barbosa Pinheiro (UFSM / RS)*

Dr., PPGEC / UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE QUADROS.....	viii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT	x
1 INTRODUÇÃO	1
2 HISTÓRICO	5
3 FISIOLOGIA DA VEGETAÇÃO	9
3.1 Movimento e Utilização da água pela vegetação	9
3.2 Evapotranspiração	10
4. RAÍZES	14
4.1 Morfologia da Raízes	14
4.2 Resistência ao Cisalhamento do Sistema Solo-Raiz	19
4.2.1 Modelo de reforço do solo por raízes	27
5 EFEITOS DA VEGETAÇÃO SOBRE O SOLO	32
5.1 Efeitos gerais da vegetação.....	36
5.1.1 Efeitos hidrológicos	36
5.1.2 Efeitos mecânicos	39
5.2 Erosão	44
5.3 Medidas de Controle	53
5.4 Poro-Pressão e Sucção	57
5.5 Efeitos em Argilas	62

6 VEGETAÇÃO EM TALUDES	68
6.1 A Influência da Vegetação	68
6.2 Métodos de Reposição da Cobertura Vegetal	73
6.3 Experiências de Obras	76
6.4 Casos históricos	78
7. MODELOS GEOMECÂNICOS DE TALUDES	80
7.1. Taludes de Cortes Rodoviários (1:1)	80
7.1.1 Cortes em solos arenosos finos	80
7.1.2 Cortes em solos residuais de granitóides	84
7.1.3 Cortes em solos argilosos plásticos	84
7.1.4 Cortes em perfil de alteração de materiais granulares	85
7.1.5 Cortes em solos saprolíticos com diaclasamento	86
7.1.6 Cortes em solos estratificados	87
7.1.7 Cortes em materiais rochosos	88
7.2 Taludes de Aterros Rodoviários (1:1,5)	89
7.3 Taludes Infinitos	90
7.4 Encostas Naturais com Rupturas Profundas	91
8 CONCLUSÕES	93
9 SUGESTÕES DE PESQUISA	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
ANEXO A – VEGETAÇÃO NATIVA DA REGIÃO SUL.....	111

ANEXO B - A VEGETAÇÃO NA CONSERVAÇÃO DO SOLO – SUGESTÕES DE VEGETAÇÃO A SER UTILIZADA.....	113
ANEXO C - TIPOS DE SOLOS DO RGS.....	126
ANEXO D - MÉTODOS DE MEDIDA DIRETA DE SUCÇÃO	128

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 4

Figura 1 – Influência do reforço de fibra na resistência ao cisalhamento de areias densas.....	20
Figura 2 – Influência do diâmetro das raízes na percentagem de deformação.....	23
Figura 3 – Influência do diâmetro das raízes na tensão de ruptura.....	24
Figura 4 – Contribuição das raízes na resistência ao cisalhamento em solo cultivado....	26
Figura 5 – Modelo de reforço de raiz.....	28
Figura 6 – Oscilação do termo $(\sin \theta + \cos \theta \cdot \tan \phi)$	31

CAPÍTULO 5

Figura 7 – Fluxogramas comparativos do ciclo hidrológico de solo nu e de solo com raízes.....	34
Figura 8 – Interações da água da chuva-vegetação-solo.....	35
Figura 9 – Razão de perda de solo devida à desagregação dos pingos de chuva.....	37
Figura 10 – Contenção e arqueamento.....	40
Figura 11 - Influência da utilização do solo e tipo de vegetação na infiltração.....	53

CAPÍTULO 6

Figura 12 – Tipos de talude.....	68
Figura 13 – Erosão versus inclinação.....	70
Figura 14 – Influência da quantidade de raiz e da tensão normal na resistência ao cisalhamento do solo.....	71

CAPÍTULO 7

Figura 15 – Corte em solo arenoso fino – Retaludamento e vegetação rasteira.....	82
Figura 16 – Utilização da drenagem de pé para melhoras as condições do corte.....	82
Figura 17– Drenagem de face em cortes rodoviários.....	83
Figura 18 – Corte em solo arenoso fino – Vegetação rasteira associada a arbustos.....	83
Figura 19 – Corte em solo granular. Vegetação com diferentes comprimentos de raiz...	84
Figura 20 – Corte em solo argiloso – Vegetação com raízes superficiais associada a poucos exemplares de raízes mais profundas.....	85
Figura 21 – Cortes em perfil de alteração.....	85
Figura 22 – Corte em perfil de alteração – Retaludamento.....	86
Figura 23 (a) – Cortes em taludes estratificados – Camadas de pequena espessura.....	87
Figura 23 (b) – Cortes em taludes estratificados – Camada arenosa mais espessa.....	88
Figura 24 (a) – Influência das raízes de árvores em cortes em materiais rochosos – Fraturas horizontais e favoráveis.....	88
Figura 24 (b) – Influência das raízes de árvores em cortes em materiais rochosos – Fraturas desfavoráveis.....	89
Figura 25– Aterros rodoviários – Utilização de “ <i>brush layer</i> ”	90
Figura 26 – Talude infinito com três camadas: solo/camada de transição/rocha.....	90
Figura 27 – Talude infinito com solo sobre rocha.....	91
Figura 28 – Ruptura profunda em taludes naturais.....	91

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO 4

Quadro 1 – Resistência à tração de algumas espécies de plantas da Europa.....22

CAPÍTULO 5

Quadro 2 – Efeitos gerais da vegetação sobre o solo.....33

Quadro 3 – Fator C para diferentes condições de cobertura do solo.....51

Quadro 4 – Características físicas dos solos em diferentes formas de uso.....55

Quadro 5 – Influência do tipo de utilização do solo na infiltração.....55

Quadro 6 – Influência do tipo de utilização do solo na perda de solo e da água.....56

Quadro 7 – Limites máximos de perda de solo.....56

ANEXO A

Quadro 8 – Nome científico e vulgar de espécies de plantas da Região Sul.....111

ANEXO D

Quadro 9 – Técnicas mais comuns de medida de sucção do solo.....128

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre a influência da vegetação nos taludes naturais e artificiais.

A pesquisa procurou focar a captação e a liberação da água pelos vegetais, a influência das raízes pivotantes e fasciculadas como reforço do solo, analisar os efeitos benéficos e adversos da presença da vegetação nos taludes e a recuperação ou estabelecimento de vegetação no solo. Apresenta ainda um estudo de casos de modelos geomecânicos onde avalia a utilização dos tipos de vegetação, levando em conta o comprimento das raízes aplicado para cada situação específica de corte ou de aterro.

O trabalho mostra diversos aspectos relacionados à estabilização de taludes através da vegetação, que são contraditórios na literatura. Diversos pontos são levantados para estudo adicional posterior em relação à interceptação da chuva, infiltração e sobrecarga. Os efeitos mecânicos das raízes são evidenciados e sua influência em taludes rasos é demonstrada.

ABSTRACT

The study presents a literature review on the influence of vegetation on natural and artificial slopes.

The review was focused on the vegetation water uptake and evaporation and the effects of tap and fasciculate roots on the soil reinforcement. It also considered the benefits offered by the vegetation presence on slopes as well as its disadvantages, and the recovery and establishment of the vegetation onto the soil.

This study discusses the application of geomechanical models with different types of vegetation and considering the root length for specific situations of cuts and fills in different materials.

Many different aspects related to the use of vegetation for the slopes stabilization were discussed. It was observed that different researchers presented opposite opinions about this issue. Many aspects related with the rain interception, water infiltration and soil overload were discussed and some questions were organized for future studies. The root mechanical effects and its influence on the shallow slopes was demonstrated.

1 INTRODUÇÃO

A preocupação em utilizar vegetação para estabilização de taludes remonta aos anos de 1500, na China. Apesar disso, por muito tempo o assunto não parece ter merecido suficiente atenção daqueles que planejam e decidem sobre as obras que vão interferir na natureza. Atualmente esse cuidado vem crescendo e espera-se, em alguns anos, atingir um maior desenvolvimento nessa área.

Presentemente os esforços das ciências se voltam sobremaneira para a prevenção de problemas e acidentes. É nesse sentido que se organizou este trabalho. Ele pretende salientar a importância das relações solo-vegetação-umidade, de forma particular, a influência em taludes, através de uma revisão de bibliografia que trata do assunto, visando a um maior esclarecimento dos fenômenos decorrentes dessa relação. Torna-se importante esta preocupação em função da natureza como um todo e do grande contingente de pessoas que vivem ou circulam nas proximidades dos taludes.

Dentro dos países que mais se destacaram nesse estudo, salientam-se os Estados Unidos, principalmente com o Alasca, e o Japão. No Brasil é necessária uma intensificação na pesquisa desse campo como forma preventiva de acidentes presentes e futuros, levando-se em consideração a formação geográfica de suas várias regiões. Um entendimento do ecossistema é essencial para compreender as relações solo-vegetação-umidade de modo a estimar o comportamento de taludes vegetados.

A influência da vegetação na estabilização dos solos tem efeitos benéficos e adversos em taludes. Como efeito positivo da vegetação podemos citar a diminuição da quantidade de água que alcança o solo, provocada pela interceptação da chuva por parte da folhagem; a remoção da umidade do solo pela evaporação e pela transpiração das plantas, tendo como consequência, a diminuição da poro-pressão positiva ou a elevação da sucção, o que acarreta um aumento da resistência ao cisalhamento do solo; o aumento da coesão do conjunto solo-raiz provocado pela resistência do sistema de raízes da vegetação, que aumenta substancialmente o coeficiente de segurança do talude e leva a um incremento de resistência ao cisalhamento disponível (Wu *et al.*, 1979).

Como efeitos adversos da vegetação nos taludes, alguns autores como Pontes (1981), Greenway (1989) e Morgan e Rickson (1995) citam o aumento da rugosidade do solo pelas raízes, o que pode elevar o nível de infiltração e um conseqüente aumento da permeabilidade superficial devido à abertura de trincas, quando há um ressecamento significativo.

Alguns autores como Nolan, Tschantz e Weaver, citados por Gray (1995), incluem como efeitos adversos o peso das árvores sobre o talude, mas Gray (1970) afirma que é insignificante o acréscimo de carga na direção talude abaixo ocasionado pela componente do peso nessa direção e que a componente do peso das árvores perpendicular ao talude tenderá a incrementar a resistência ao cisalhamento do solo. Já, em 1995, o mesmo autor reconhece que a localização de árvores em barragens deve ser considerada em toda análise de estabilidade para avaliar o efeito total dessa vegetação no balanço de forças. Suarez (1997) em seu trabalho considera que a sobrecarga devida ao peso próprio da vegetação geralmente não é significativa, mas a força do vento, agindo sobre essa vegetação, torna-se uma carga importante.

A remoção total da vegetação do talude pode produzir a formação de uma camada superficial impermeável pelo selamento superficial do terreno, ocasionado pelas partículas finas desagregadas que obstruem os poros do solo e impedem a infiltração, provocando o arrastamento de grandes quantidades de solo sobre a superfície.

O efeito da vegetação nos taludes resulta, portanto, do balanço entre estas influências benéficas e adversas.

A remoção da vegetação pode ocasionar a pobreza de um país devido a uma severa erosão do vento, afirma Morgan (1995), referindo-se ao ocorrido na Islândia, onde as florestas que cobriam 65% de sua área foram desaparecendo em virtude do corte das árvores para utilização na construção e como matéria prima para o carvão mineral. Com o pastejo por ovinos, a grama estava sendo aniquilada. Os arbustos não resistiam ao encobrimento e à abrasão da força do vento com areia e também foram sendo reduzidos, ficando o solo suscetível aos efeitos da ação erosiva do vento. Hoje, a vegetação está reduzida a 25%. O autor ainda comenta que áreas com menos de 25% de cobertura vegetal são mais afetadas pela erosão do vento e áreas com mais de 75% de cobertura vegetal não estão sujeitas a essa erosão.

As superfícies de solo expostas ao intemperismo, formadas por trabalhos de terraplanagem, estão sujeitas a processos erosivos com conseqüências danosas, tanto para a obra em si, como para toda a região onde ela se localiza, o que constitui prejuízos econômicos e sociais.

A recuperação conservacionista de áreas degradadas, até bem pouco tempo, não era considerada importante no Brasil. Contudo, pela crescente preocupação mundial com as reservas naturais, já temos leis que regulamentam as questões ambientais e, hoje em dia, os órgãos rodoviários nacionais preocupam-se em adequar-se à nova realidade, já que o impacto ambiental de um empreendimento rodoviário é sentido por muitos anos (Rodarte *et al.*, 1998).

No Rio Grande do Sul, a cobertura de mata nativa que, no início da colonização do estado, perfazia em torno de 40% de sua superfície, em 1998 não chegava a 5%, dados obtidos no “Projeto Biodiversidade” do Estado do Rio Grande do Sul (Rio Grande do Sul, 1998). Atualmente, esse quadro está se revertendo no estado, único em todo o território nacional a possuir um inventário florestal com dados exatos, cujos resultados do levantamento realizado, projeto executado pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em convênio com a Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA), mostram que a área coberta por florestas dobrou nos últimos dez anos; passou de um índice em torno de 5% em 1983, para um índice entre 9,4% a 11,4% do território gaúcho, significando uma recuperação de 33 mil quilômetros quadrados de florestas. Bem verdade, essa recuperação não se deve apenas pela conscientização quanto aos problemas ambientais, mas também em razão da crise no meio rural, que induziu o pequeno agricultor a abandonar suas roças, principalmente nas encostas de morros, pouco produtivas e, também, em razão do êxodo rural (Duplica..., 2000; RS...,2001).

A ocorrência de deslizamentos de taludes de terra no Brasil e no mundo tem sérias conseqüências para a vida humana, para as edificações e estradas e também para o meio ambiente. Por essa razão, este tema tem preocupado as autoridades e os técnicos da área. O revestimento vegetal reduz a erosão superficial e pode melhorar as condições de estabilidade dos taludes, e seu entendimento é o objetivo deste trabalho.

No capítulo II é apresentado um breve histórico, mostrando a importância da utilização da vegetação como agente estabilizador e reparador dos solos.

No capítulo III, a fisiologia da vegetação, com o movimento e a utilização da água pela vegetação e como se processa o fenômeno da evapotranspiração.

O capítulo IV trata da morfologia das raízes, seu crescimento, a resistência ao cisalhamento do sistema solo-raiz e apresenta, também, o modelo de reforço do solo por raízes, desenvolvido por Wu em 1976.

No capítulo V estão resumidos da literatura consultada, os efeitos da vegetação sobre o solo e, como sub-itens, medidas de controle da erosão, os fenômenos da poro-pressão e sucção e alguns casos dos efeitos em solos argilosos.

As influências da vegetação em taludes são apresentadas no capítulo VI, com indicações de alguns métodos para a recomposição da cobertura vegetal e, ainda, experiências de obras e casos históricos.

No capítulo VII é feita a avaliação de uma série de situações geotécnicas ligadas à área rodoviária, considerando alguns tipos de materiais geotécnicos onde se estuda a influência e aplicações de vegetação junto a intervenções usuais ou possíveis.

As conclusões principais são apresentadas no capítulo VIII e as sugestões para futuros estudos no capítulo IX.

2 HISTÓRICO

Para controle de erosão em taludes e para estabilização de cicatrizes de escorregamentos têm sido utilizados, há muitos anos, gramíneas, arbustos e árvores. Já em 1591, tem-se notícia do emprego de “chorões” para estabilizar um aterro durante a dinastia Ming na China (Lee, 1985, citado por Greenway, 1989). A contribuição histórica da Europa mostra relatos do século XIX, de tentativas de reparos de taludes íngremes e a técnica de plantio de “chorões”. (Greenway, 1989.) Atualmente na Alemanha, França e Estados Unidos, as leis que regulam as atividades agrícolas ou de urbanização são severas, devendo cada projeto ser acompanhado por planos de controle da erosão do solo e escoamento das águas pluviais (Álvares, 1984).

Nos anos 20, os resultados de estudos quantitativos em erosão de solos salientaram a importância da vegetação como a chave da defesa contra esse problema. A pesquisa da erosão expandiu rapidamente pela sua grande importância, e uma consequência desse trabalho foi o desenvolvimento da Equação Universal de Perda de Solo, proposta em 1965 por Wischmeier e Smith, para prever as perdas de solo (Greenway, 1989).

Tradicionalmente o efeito da vegetação era negligenciado, mas observações feitas em atividades comerciais de corte de madeira em regiões dos Estados Unidos, Canadá, Japão e Nova Zelândia conduziram à preocupação de quantificar a influência da vegetação na estabilidade. A partir dos anos 60 foi incrementada a atenção para os efeitos da vegetação na estabilidade de taludes e, a partir dessa década, foram registradas as primeiras tentativas para quantificar esse efeito em diversos países, embora alguns trabalhos anteriores mostrassem uma apreciação qualitativa dessa influência (Greenway, 1989).

No Brasil foi criado o Instituto de Geotécnica no Estado da Guanabara, após grandes escorregamentos ocorridos em janeiro de 1966 na Serra do Mar devido a chuvas intensas, com o objetivo exclusivo de estudar e encontrar soluções para os problemas do controle da erosão e recuperação das encostas. O primeiro trabalho executado pelo Instituto foi o reflorestamento da encosta a montante da Rua Tabatinguera (Pereira, 1968). Esse autor indica estar provado ser a proteção vegetal o método mais barato e eficaz para o controle da erosão.

De acordo com Nogueira (1977), foi executado um trabalho pioneiro de recomposição de mata ciliar para proteger as margens do Rio Jaguari, em Cosmópolis, São Paulo, onde uma indústria açucareira substituiu a mata nativa pela cana de açúcar e em 1954 o diretor dessa indústria sugeriu a transformação do pasto que então existia em mata com o mesmo aspecto fitofisionômico do século passado. As formações florestais remanescentes garantiram o sucesso do trabalho.

Em 1969 o Governo Brasileiro, por iniciativa do Departamento Nacional de Obras de Saneamento, solicitou assistência técnica à Organização dos Estados Americanos para um estudo do controle da erosão no Noroeste do Estado do Paraná, onde o problema ocorria de forma mais dramática no Brasil (Mazuchowski, 1981).

Em 1972, o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de São Paulo realizou os primeiros estudos para identificação e classificação das erosões urbanas nos municípios das bacias hidrográficas dos rios do Peixe, Paranapanema, Pardo e Grande. Em 1975 executou uma ampla análise para determinar as causas, efeitos e possíveis alternativas para solucionar o problema. Em 1976 desenvolveu um projeto para a contenção e recuperação da maior boçoroca urbana de São Paulo, localizada em Assis, e para que o projeto servisse de modelo para outros projetos de prevenção e controle da erosão urbana. Em 1980 o DAEE desenvolveu o “Programa de Contenção da Erosão Urbana no Estado de São Paulo”, que além da análise do problema, apresenta como principais soluções:

- execução de pequenas obras hidráulicas e civis e de recuperação paisagística das áreas, com o objetivo de prevenir a formação de novas boçorocas,
- execução completa e integrada de obras que envolvem os sistemas, entre outros, viário, de drenagem, de dissipação de energia hídrica, de terraplanagem e de paisagismo, com o objetivo de controlar o processo erosivo e recuperar a área degradada (Almeida e Zadra, 1981).

Ferreira (1981) relata que em 1975 o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem solicitou ao Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) que providenciasse estudos para deter o fenômeno erosivo que estava ocorrendo na rodovia Manaus-Porto Velho (Br-319). O IPR contratou então o Instituto de Pesquisas IRI, de cujas pesquisas de campo e laboratório resultou o Manual de Revestimento Vegetal – Projeto de Pesquisa sobre Revegetação na BR – 319, Trecho Manaus-Porto Velho. A partir de 1975 o IPR desenvolveu um estudo de erosão

superficial em taludes de corte através de contrato com a firma Trafecon, para pesquisa de estabilidade de taludes. Como resultados dessa pesquisa foi elaborado o manual “Recomendações para proteção de taludes contra erosão superficial – Projeto, execução e manutenção de obras”.

Dias (1982) refere-se à preocupação da Alcoa Alumínio S/A, que em 1978 firmou convênio de pesquisa com o Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Viçosa, para recuperar áreas de mineração a céu aberto da bauxita. Dos estudos resultou o relatório final “Recomendações para a recuperação de superfícies mineradas” e foi firmado em 1980 um convênio com a Fundação de Desenvolvimento da Universidade de Campinas (FUNCAMP), com o objetivo de avaliar os recursos vegetais da região.

Álvares (1984) relata o trabalho do agrônomo Rodolfo Geiser no projeto de paisagismo do consórcio Alumar, na ilha de São Luiz, no Maranhão, iniciado em 1982, cujo objetivo básico consistiu em promover as espécies nativas a fim de manter as características naturais da região. Refere-se também este autor ao trabalho de reflorestamento em Poços de Caldas pelo Plano Diretor de Paisagismo da Alcoa, iniciado em 1980, e executado pelo agrônomo Geiser em conjunto com outros profissionais da área, utilizando o eucalipto associado a plantas nativas. Álvares também relata o trabalho do mesmo agrônomo, iniciado em 1966, na recomposição da Ilha das Cabras, no litoral de São Paulo, onde a vegetação havia sido totalmente devastada.

Após grandes deslizamentos ocorridos no verão de 1966/1967, na Serra do Mar, em Caraguatatuba, o Instituto Florestal de São Paulo realizou um trabalho de reflorestamento da área. Plantou *Pinus spp*, que apesar de desenvolver bem, modificou as características ecológicas da região, por não ser uma planta nativa daquela área (Instituto de Botânica de São Paulo, 1989).

No final da década de 70 e início de 80, pesquisadores denunciaram modificações na vegetação da Serra do Mar, como folhas danificadas e troncos mortos em pé (paliteiros), pela morte de determinadas espécies arbóreas. Pesquisadores do Instituto de Botânica observaram que essas ocorrências também eram comuns na Reserva Biológica do Alto da Serra de Paranapiacaba e iniciaram estudos para determinar as possíveis causas e conseqüências (Instituto de Botânica de São Paulo, 1989).

Em janeiro de 1985 ocorreram grandes deslizamentos em Cubatão, ocasionados por chuvas intensas que deixaram à mostra centenas de cicatrizes de solo nu (ravinas) e chamaram a atenção para o perigo a que estava sujeita toda a população de Cubatão. Foi criada, então, pelo Governo de São Paulo, uma comissão envolvendo a prefeitura de Cubatão e diversos órgãos responsáveis pelo setor para avaliar o problema e estudar soluções. A primeira proposta de plantio nas ravinas foi feita pelas indústrias de Cubatão, que passaram a semear gramíneas, principalmente do gênero *Brachiaria*, o que causou muita polêmica, pois a introdução de plantas exóticas poderia provocar alterações ecológicas inesperadas e indesejadas (Instituto de Botânica de São Paulo, 1989).

Foi criado em 1998, no Estado do Rio Grande do Sul, o Projeto Biodiversidade que é uma parceria envolvendo o Departamento de Recursos Naturais Renováveis (DRNR), a Secretaria de Agricultura e Abastecimento (SAA), a Associação Riograndense de Empreendimentos de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER), a Fundação Estadual de Pesquisas Agropecuárias (FEPAGRO) e prefeituras municipais, que tem por objetivo estimular o pequeno produtor rural a recuperar em sua propriedade as áreas de preservação permanente (áreas de proteção do solo e das águas, onde a vegetação não pode ser explorada para uso de madeira), pelo plantio e cuidados de mudas e espécies nativas (vide anexo A - vegetação nativa da Região Sul).

Está se tentando agora fazer o reflorestamento da Serra do Mar com espécies nativas da Mata Atlântica, pois o sucesso dessa tentativa apontaria para uma recuperação real da vegetação, conservando as condições ecológicas de origem.

3 FISIOLOGIA DA VEGETAÇÃO

3.1. Movimento e Utilização da Água pela Vegetação

Marsland (1996) afirma que para haver movimento de água deve existir uma diferença de potencial hídrico, havendo alguns processos básicos envolvidos no movimento da água do solo até a atmosfera, passando através da vegetação. Segundo Raven *et al.* (1996), esses processos são: o fluxo de massa, a difusão e a osmose.

O fluxo de massa é o movimento total de água que ocorre por diferenças de potencial hídrico (energia potencial da água). A difusão é o resultado do movimento individual aleatório de moléculas, a favor de um gradiente de concentração, isto é, de uma área mais concentrada para uma área menos concentrada da substância. A osmose é caracterizada quando a membrana celular permite a passagem da água e impede a passagem de outras substâncias. A água é o solvente da solução e as substâncias dissolvidas na água são o soluto. Este fenômeno resulta do movimento da água de uma solução com maior potencial hídrico para uma solução com menor potencial hídrico ou, na ausência de outros fatores que agem sobre o potencial hídrico, como a pressão, o movimento da água ocorre de uma região de menor concentração de solutos para uma região de maior concentração de solutos. A natureza do soluto não afeta o potencial hídrico, mas sua presença diminui esse potencial. A osmose resulta em um aumento de pressão pela entrada de água através da membrana para a região de menor concentração de água (Raven *et al.*, 1996).

A quantidade de água requerida pela árvore para satisfazer suas necessidades fisiológicas é denominada demanda d'água (Lawson e O'Callaghan, 1995). A demanda d'água varia com a estação, através do tempo de vida da árvore, com o tamanho e espécie da vegetação, com as condições atmosféricas, fatores climáticos e características de crescimento do lugar, como aspecto do talude, umidade disponível e tipo de solo (Greenway, 1989). A quantidade de água absorvida por qualquer planta é muito maior que a que qualquer animal de peso equivalente necessita. A maior parte dessa água, em torno de 99%, é liberada para a atmosfera em forma de vapor d'água, num processo chamado de transpiração, que pode ocorrer em qualquer parte do vegetal acima do solo, mas é nas folhas que acontece mais intensamente esse fenômeno (Raven *et al.*, 1996).

3.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração é o efeito combinado da evaporação e transpiração da planta, fenômeno que retira umidade do solo. O potencial de evapotranspiração depende do tipo de vegetação, do tipo de solo e das condições climáticas (Schofield e Penman, 1948; Suarez, 1997; Styczen e Morgan, 1995). Scheichtl (1980), citado por Greenway (1989), relata que, numa floresta de árvores de folhas decíduas na Europa, uma perda por transpiração anual típica de 1000kg de água por metro quadrado de floresta é duas vezes maior que numa floresta de abetos (folhas perenes), cuja perda por transpiração é de 500kg de água . m⁻² de floresta.

As plantas do gênero *Phreatophytes* são plantas reconhecidamente efetivas na promoção da evapotranspiração, como o salgueiro (Wu, 1995).

Ravina (1983) aponta que a natureza e densidade da vegetação influenciam diretamente nas trocas de umidade no solo e, pela influência que tem sobre os fatores causadores desses fenômenos, pode ter também influência indireta na contração e expansão do solo.

Para promover a fotossíntese, a planta necessita da luz solar, o que acarreta a exposição de sua superfície ao sol, provocando o fenômeno da transpiração. Os cloroplastos (local da fotossíntese), além da luz solar, precisam também de dióxido de carbono, que penetra na célula vegetal por difusão. Isso só acontece quando o dióxido de carbono está em solução, pois a membrana plasmática (que faz o transporte de substâncias para o interior e para o exterior da célula) é praticamente impermeável ao dióxido de carbono na forma gasosa. Por isso o gás deve estar diluído em água que, ao entrar em contato com o ar, evapora. A maior parte da água perdida na transpiração, mais de 90%, ocorre nos estômatos (pequenas aberturas encontradas na epiderme dos órgãos aéreos da planta, principalmente nas folhas). Os movimentos dos estômatos resultam da variação da pressão de turgor (que é a pressão desenvolvida no interior da célula pela entrada de água por osmose) nas células-guarda (células que circundam as pequenas aberturas na epiderme, os estômatos),. O que mantém ou não o turgor é o movimento osmótico de entrada ou saída da água das células ao longo de um potencial hídrico. A abertura do estômato ocorre quando solutos são acumulados nas células-guarda (diminuindo o potencial hídrico). O fechamento ocorre pelo processo inverso (Raven *et al.*, 1996).

O estômato liga a área interna da folha à atmosfera. Apesar de ocorrer também nos caules, folhas, flores e frutos, tende a ser em maior número na parte superior das folhas. As folhas têm entre 1000 e 100.000 estômatos por cm^2 de área de folha (Moore, 1995, citado por Marsland, 1996). Para que a transpiração ocorra, além da abertura e fechamento do estômato, a atmosfera deve ter potencial de água menor que a folha. A redução da umidade relativa do ar aumenta este gradiente e aumenta a transpiração. O vento, ao deslocar o ar úmido do contorno da planta substituindo-o por ar mais seco, e a elevação da temperatura do ar e da folha provocam um aumento da pressão de vapor d'água na folha, aumentando o potencial para evaporação (Marsland, 1996; Raven *et al.*, 1996).

Quando a água evapora pelo processo da transpiração, estabelece-se um gradiente de potencial hídrico das folhas para a solução do solo na superfície das raízes, que ocasiona o movimento da água do solo para a planta e depois para a atmosfera (Raven *et al.*, 1996).

Marsland (1996) compara a árvore a um modelo de bomba que controla a osmose e a transpiração. A osmose regula a entrada de água do solo para a árvore e a transpiração regula a liberação da água para a atmosfera. A água é primeiramente removida das camadas mais superficiais e, com o tempo, progressivamente das camadas mais profundas do solo (Gardner, 1960; Styczen e Morgan, 1995).

A poda da árvore pode ser executada com o objetivo de reduzir a área efetiva de folhagem, a fim de reduzir a transpiração, o que não garante a redução da sucção de equilíbrio do solo, embora afete a velocidade de variação dessa sucção (Imperial College, 1997?). Ward (1953) afirma que, à medida que a disponibilidade de água vai sendo reduzida, a transpiração e o crescimento da planta também reduzem.

Greenway (1989) e Suarez (1997) referem que a transpiração da vegetação é um efetivo rebaixador de nível d'água e quando a vegetação é removida, a transpiração cessa, podendo ser observada uma elevação do lençol freático. Brown e Sheu (1975) também concluíram que a queda na evapotranspiração ocasionada pelo corte das árvores em um talude faz elevar o nível d'água, aumenta a taxa de rastejo (*creep*), que se caracteriza por movimento lento e contínuo de camadas superficiais de solo sobre camadas mais profundas (da ordem de 30 cm por dez anos), e diminui a estabilidade. Vários pesquisadores têm observado esse comportamento em áreas onde as florestas foram cortadas [(Hostener-Jorgensen, 1967; Bethlahmy, 1962; Gray, 1977), citados por Greenway, 1989].

Suarez (1997), referindo-se ao efeito rebaixador de nível d'água da vegetação, afirma que ele pode produzir recalques em solos argilosos moles e aberturas de trincas por dessecação. O mesmo afirma Greenway (1989), com o comentário que uma combinação particular de solo, vegetação e fatores climáticos é necessária para produzir tais trincas. Anderson *et al.* (1982) e Anderson e Kneale (1984), citados por Greenway (1989), descrevem as condições de solo que conduzem à formação de trincas em um aterro de argila compactada na Inglaterra, aonde as fendas chegam a uma profundidade de 20cm. Com as estações úmidas seguintes, as fendas fecham, mas a permeabilidade da argila sofreu um aumento de duas vezes (segundo Nogami e Villibor, 1995, a permeabilidade é uma propriedade de solos saturados e a infiltrabilidade de solos não saturados).

À medida que a evapotranspiração ocorre, há uma redução da quantidade de água no solo e um aumento da sucção (Imperial College, 1997?). O processo é auto regulado. A quantidade de água que uma árvore pode extrair do solo não é ilimitada e experimentos demonstram que em alguns casos, à medida que a sucção cresce, a taxa de evapotranspiração cai (Croney e Coleman, 1960). Estes autores mostraram que a evapotranspiração pode chegar até quase zero quando a sucção está em torno de 15 atmosferas. Neste ponto a planta irá murchar, pela falta de água disponível.

No caso da árvore, todo o fluxo ocorre acima do nível d'água do solo e, portanto, os potenciais hidráulicos devem ser negativos em qualquer lugar (Imperial College, 1997?). Nesse trabalho são fornecidos valores de sucções equivalentes típicas para árvores pequenas em solo úmido

$$\psi_{\text{solo}} - 50 \text{ kPa}$$

$$\psi_{\text{raiz}} - 200 \text{ kPa}$$

$$\psi_{\text{caule}} - 500 \text{ kPa}$$

$$\psi_{\text{folha}} - 1500 \text{ kPa}$$

$$\psi_{\text{atmosfera}} - 100000 \text{ kPa (a } 22^\circ \text{ e } 50\% \text{ de umidade relativa do ar)}$$

O autor afirma que, com esta sucção equivalente, a água se movimenta a uma velocidade de 0,75 m/s do solo para as folhas e que só há absorção de água pelas raízes, quando sua sucção equivalente é maior que a sucção do solo. A sucção do solo aumenta, à

medida que o solo seca e, se ultrapassar a sucção da raiz, a água irá se mover da raiz para o solo, o que provoca o murchamento da planta. O mesmo fenômeno acontece quando há presença de sal no solo, que também faz decrescer o potencial hídrico no solo (Marsland, 1996).

Segundo Imperial College [1997?] se a evaporação e/ou evapotranspiração excede a chuva, a quantidade de água dentro do solo irá cair abaixo da capacidade de campo que é a máxima quantidade de água que o solo pode reter por suas próprias forças, não sendo necessariamente igual à umidade saturada.

A redução cumulativa da quantidade de água no solo abaixo da capacidade de campo é conhecida como déficit de umidade no solo. Essa redução é função da evapotranspiração potencial, da evapotranspiração real e da chuva efetiva. A evapotranspiração potencial é máxima quantidade de água que pode ser perdida pela superfície, supondo-se que exista ilimitada quantidade de água disponível e a chuva efetiva é a precipitação cumulativa que alcança o solo e está disponível para a evapotranspiração. A evapotranspiração real decresce abaixo da evapotranspiração potencial à medida que aumenta o déficit de umidade (Imperial College, 1997?).

4 RAÍZES

A produção de raízes é importante para as plantas, pois são elas que fixam o vegetal ao solo, absorvem e servem de reservatório de nutrientes como carbono, fontes minerais e água e são importantes também para a fauna e microflora do solo. A concentração de nutrientes varia com a profundidade e com o diâmetro da raiz. Em geral, concentrações de nitrogênio, fósforo e cálcio diminuem com a profundidade e com o decréscimo do diâmetro das raízes, ao passo que potássio aumenta com a profundidade. A maior parte dos nutrientes armazenados no sistema de raízes está nas de diâmetro maiores de 5 mm e nos 45 cm superficiais de solo (Atkinson, 1985).

Para enfrentar os períodos de seca, o enraizamento profundo reage produzindo um sistema auxiliar de raízes de absorção. Este sistema fica no solo até que a chuva molhe novamente a superfície. As raízes intermediárias também podem produzir um sistema auxiliar de raízes, mas observações feitas sugerem que precisam de um grau maior de seca para iniciar o crescimento (Imperial College, 1997?).

Segundo Moore (1995), citado por Marsland (1996), as raízes têm principalmente quatro funções:

- 1 - ancoragem e base de estabilidade
- 2 - armazenamento de água e de minerais dissolvidos
- 3 - absorção de água e de minerais dissolvidos
- 4 - condução da água e de minerais dissolvidos para os brotos e deles para baixo novamente.

4.1 Morfologia das Raízes

O crescimento primário das raízes se dá pela divisão e alongamento rápido das células próximas à ponta da raiz. Nesse local, o crescimento do diâmetro é limitado. Essas raízes são, em geral, muito ramificadas e, em muitas plantas herbáceas e algumas árvores, formam a maior parte do sistema radicular (MacLeod e Cram, 1996). A coifa situa-se na parte mais extrema da raiz, cuja função principal é proteger a raiz em crescimento contra o atrito com as partículas do solo. A uma certa distância, a partir da coifa, encontram-se os pelos absorventes,

cuja função é a absorção de água e sais minerais necessários à planta. À medida que as raízes envelhecem, os pelos morrem e são substituídos por ramificações das raízes, formando as raízes secundárias e terciárias. Entre esta região de ramificação e a coifa existe a zona chamada desnuda, onde se verifica o maior crescimento, por distensão (Ferri,1985).

As raízes das plantas, com exceção das primeiras formadas na germinação, que sofrem o fenômeno do tropismo, crescem para onde as condições ambientais são favoráveis, onde encontram água, oxigênio, nutrientes, suporte e calor. Muitos fatores influenciam o desenvolvimento e penetração das raízes. Apesar da disponibilidade de nutrientes favorecer a proliferação de seu sistema, as raízes podem penetrar em zonas com poucos nutrientes, mas não penetram em solo seco e a taxa de crescimento diminui com o aumento na tensão da água do solo. O desenvolvimento das raízes é inibido com o frio e com a luz e, durante a floração e frutificação, o crescimento é lento (Marsland, 1996). O desenvolvimento do sistema de raízes é também influenciado pela compactação relativa da camada de solo. Veihmeyer e Hendrickson (1948), citados por Baver et al. (1972), sugerem que a impossibilidade da raiz penetrar em solo compactado pode ser devida mais ao tamanho do poro do que pela falta de oxigênio, pela posição do nível d'água, pela umidade do solo, pela disponibilidade de ar e nutrientes e pela presença de elementos tóxicos (Baver et al., 1972; Greenway, 1989; Dobson, 1995). Vanicek (1973) e Gray (1978), citados por Greenway (1989), indicam que as plantas respondem a essas condições produzindo raízes adventícias e por essa razão existe uma grande variedade de hábitos de enraizamento. Quando as raízes são submetidas a um impedimento mecânico ao seu crescimento, a taxa de alongamento da raiz decresce, mas, ao mesmo tempo, há um acréscimo na taxa de espessamento da raiz próximo à ponta (MacLeod e Cram, 1996).

As raízes têm dificuldade de penetração em:

- 1 - Solos com alta quantidade de argila
- 2 - Solos com resistência maior que 2-2,5 MPa.
- 3 - Solos com massa específica acima de 14 kN.m^{-3} para solos argilosos e 17 kN.m^{-3} para solos arenosos (Marsland, 1996).

O crescimento das raízes permanentes e temporárias é devido à divisão de células na ponta e pode crescer até 20 mm/dia, dependendo das exigências de água da árvore. A coifa

protege, percebe luz e pressão, lubrifica o solo e ainda absorve água e sais minerais (Nicholson, 1977, citado por Marsland, 1996).

A maioria das árvores e arbustos das Dicotiledôneas (plantas cujos embriões têm, geralmente, dois cotilédones, que são os primeiros elementos desenvolvidos pelo embrião para nutrir a planta, enquanto esta não produz fotossíntese suficiente para sustentá-la) possui uma raiz principal, que apresenta geotropismo positivo, de onde partem ramificações de menor desenvolvimento, formando o sistema chamado radicular pivotante. O sistema radicular mais freqüente nas Monocotiledôneas (plantas cujos embriões têm, geralmente, apenas um cotilédone) é formado por raízes adventícias que se originam do caule. Essas raízes e as laterais originam um sistema radicular fasciculado, no qual não se distingue uma raiz principal, nem pela posição, nem pelo desenvolvimento. Os sistemas radiculares pivotantes geralmente são mais profundos que os fasciculados (Raven et al., 1996).

Wu *et al.* (1995) afirmam que durante os primeiros dois anos, o modo do plantio afeta a geometria das raízes; após este período as raízes seguem um modelo normal de crescimento.

A arquitetura e morfologia do sistema de raízes variam consideravelmente entre espécies, dentro da mesma espécie e dentro do próprio sistema (Fitter, 1985). Ele é modificado pelas condições locais do solo, é influenciado pela capacidade genética das raízes de tolerar as dificuldades das condições do solo (MacLeod e Cram, 1996) e varia, principalmente, na profundidade e na distribuição das raízes (Coppin e Stiles, 1995).

Dobson (1995) afirma que o sistema de raízes se estende radialmente em muitas direções e a distâncias muito maiores do que a altura da planta. Afirma, ainda, que 90% ou mais se situam nos 60 cm próximos à superfície do solo (Helliwell, 1995). Coile (1937), citado por Perry (1982), e Greenway (1989) afirmam que grande parte das raízes está comumente dentro da camada superficial do solo (1 metro), justificando que o número de poros do solo e o oxigênio disponível decrescem com a profundidade e a resistência à penetração aumenta à medida que a raiz aprofunda no solo; os nutrientes que a vegetação necessita estão sempre nos níveis mais superficiais e por essas razões, a maioria das raízes está localizada aí. Wu (1996) indica que a profundidade do sistema radicular é fortemente influenciada pela umidade e pelo perfil do solo.

Segundo Ravina (1983), a maior parte das raízes de absorção fica nos 30 cm superficiais. Raven *et al.* (1996) indicam que essas raízes ficam nos 15 cm de solo, onde

existe maior concentração de matéria orgânica. A distribuição espacial das raízes de absorção pode mudar com o tempo, embora seja mais ou menos constante o volume ocupado por um sistema maduro de raízes. Ravina (1983) sugere que a extensão lateral das raízes depende da concorrência entre as árvores, ficando, geralmente, sob a projeção da copa. Por outro lado, Greenway (1989) indica que a extensão lateral das raízes pode ser expressa em múltiplos da altura da árvore ou do raio da folhagem, mas que é dependente do tipo de solo. Cita, como exemplo, que a extensão lateral das raízes de árvores frutíferas que, em argila chega a 1,5 vez o raio da folhagem, em solo fértil chega a 2 vezes e em areia a 3 vezes o raio da copa.

Existem grandes diferenças na capacidade de crescimento das raízes (Kozlowski, 1971, citado por Greenway, 1989). Algumas plantas produzem um sistema de raiz extenso, com raízes que chegam a considerável profundidade e distribuição, outras produzem um forte sistema de raízes curtas e finas. O sistema de raiz extenso compreende as raízes laterais, que crescem no sentido radial a partir da árvore, e a raiz principal (tap root), que em muitas espécies é centralizada (Greenway, 1989). Raízes que ramificam da parte de baixo das raízes laterais são conhecidas como “*sinker roots*”, tem de 1-2 cm de diâmetro, crescem para baixo e na extremidade dividem-se em raízes finas e não lenhosas (Dobson, 1995).

Greenway (1989) relata que as raízes de algumas árvores podem alcançar até 30m de profundidade, mas comenta que Kozlowski (1971) observou que a profundidade média das raízes é de 1m a 3m. O autor considera que esta profundidade em muitos taludes vegetados pode ser considerada típica de árvores e arbustos.

Em geral, a profundidade das raízes de grandes árvores não ultrapassa 5 m, de arbustos 2m e de grama 30 cm, sendo geralmente ultrapassada pela extensão lateral do sistema de raízes, alcançando, em alguns casos, distâncias maiores de 50m (Suarez, 1997).

Perry (1982) chama a atenção que a área de raiz dentro do solo pode ser muito maior que a área de folhas. Referindo-se aos trabalhos de Bray (1963), de White *et al.* (1971) e de Meyer e Gottsche (1971), quantifica a proporção entre raízes, caules, ramos e folhas em um mesmo tipo de planta e compara entre diferentes tipos de vegetação. Por exemplo, sugere que a proporção relativa em peso entre erva e árvore maduras está na mesma ordem de grandeza que é de 5% de raízes finas (são as que retiram o alimento do solo), 15% de raízes mais volumosas ou raízes de transporte, 60% de tronco ou caule principal, e 5% de folhas.

As raízes trocam sua aparência e sua função à medida que se desenvolvem (Imperial College, 1997?). O crescimento primário e secundário é controlado pela pressão gerada dentro da célula da raiz, ocasionada pela entrada da água (osmose), que provoca o inchamento da célula. Esse alongamento da parede da célula provoca o aparecimento de uma pressão de reação, chamada como na folha, pressão de turgor (MacLeod e Cram, 1996). Pritchard (1994), citado por MacLeod e Cram (1996), quantifica a pressão de turgor dentro da célula da raiz na ordem de 800 kPa. Durante os primeiros dois ou três anos a raiz se alonga mais rapidamente, decrescendo a taxa com a idade e a profundidade. As raízes que crescem horizontalmente são as principais responsáveis pelo suporte da árvore. A raiz pivotante das árvores, em geral, não chega a desenvolver todo o seu potencial, devido à ação da fauna do solo, que afeta a ponta da raiz quando nova e também pelo rompimento durante o transplante ou ao penetrar em camadas compactadas de solo (Dobson, 1995). Perto do tronco as raízes são grossas e permanentes e afinam rapidamente até aproximadamente 25 mm, alcançando de 0,5 a 1m de profundidade (Imperial College, 1997?; Dobson, 1995).

As raízes finas (< 2mm de diâmetro) são as “alimentadoras” e de absorção, às quais fungos (*Micorrizas*) se associam para absorção de nutrientes, especialmente o fósforo, e muitas árvores não conseguem sobreviver sem eles. As raízes finas, juntamente com os fungos, são responsáveis pela entrada de umidade e nutrientes. A vida das raízes finas vai de poucos dias até vários anos, com uma média de 1-2 anos (Dobson, 1995).

Referindo-se a Perry (1982), que afirma que as raízes temporárias são oportunistas, crescem e proliferam onde encontram condições favoráveis, Imperial College (1997?) informa que elas ramificam de raízes permanentes e que são sujeitas a ciclos anuais de decadência e renovação e podem simplesmente secar se não são necessárias. Informa ainda que embora as raízes temporárias possam absorver água ao longo de seu comprimento total, a principal parte para absorção de água é justamente na ponta da raiz. Nessa zona há muitas raízes finas que aumentam grandemente a área do sistema de raiz e em consequência o volume de água que é absorvido.

A direção do sistema de raízes é geralmente horizontal e radial, mas, para um tipo de solo específico e condições específicas, o sistema de raízes pode variar de uma tendência geral (Imperial College, 1997?). Por exemplo, as raízes grossas permanentes podem crescer obliquamente para cima do talude, funcionando como âncoras. As raízes seguem um caminho tortuoso de menor resistência e se uma raiz encontra uma boa fonte de água, o sistema irá proliferar naquela localidade.

O autor cita intervalos de valores para estimar a distribuição das raízes:

1 - 0,4 a 2,1 vezes a altura da árvore

2 - 2 a 7 vezes o comprimento dos ramos

3 - 1/10 do volume aéreo ocupado pela folhagem → provável profundidade da raiz.

Informa que nem o item 1, nem o 2 são estimativas satisfatórias porque a distribuição final da raiz depende dos vários fatores discutidos anteriormente. Provavelmente o item 3 é o mais preciso na medida em que permite multiplicação de fatores, levando em conta por exemplo, exposição ao sol, fertilidade do solo, umidade disponível e déficit da umidade do solo.

Helliwell (1983) comenta que as raízes da vegetação podem morrer quando, após chuvas muito intensas, o solo ficar saturado por mais tempo que as raízes possam suportar submersas. O espaço abaixo do nível d'água rapidamente se torna anaeróbico e segundo Helliwell (1995), a maioria das raízes não sobrevivem sem ar, elas param de crescer, seu tecido quitiniza, tornando-se impermeável e, em consequência elas morrem. O autor indica, também, que o nível d'água varia de estação para estação e de ano para ano; então para que as raízes possam se beneficiar do lençol freático, qualquer flutuação deste deve ser limitado e só em circunstâncias muito especiais, como em solos férteis e em areias perto de rios, o nível d'água fornece umidade para as árvores.

Helliwell (1983; 1995) sugere que a vegetação pode utilizar a água que sobe por capilaridade, onde pode se desenvolver um ambiente favorável ao crescimento das raízes, mas a altura que a água pode atingir é limitada e depende do tipo de solo. Em areia grossa, no máximo uns 40 cm; em solos médios, até um metro e em solos argilosos até mais de 2 m. O resultado dessas condições é limitado, tendo em vista o lento movimento da água no solo e a água presente ser insuficiente para restabelecer a quantidade utilizada pela raízes. Afirma também que, em condições ideais, a altura máxima em que a ação da capilaridade pode ser eficiente é de 1m e que para que as raízes das árvores possam utilizar esta umidade, o nível d'água não pode estar muito abaixo da profundidade das raízes.

4.2 Resistência ao Cisalhamento do Sistema Solo-Raiz

De acordo com Gray (1995), vários pesquisadores, entre os quais Endo e Tsuruta (1969), que desenvolveram os primeiros estudos executando ensaios de campo de resistência

ao cisalhamento em solos permeados por raízes, concluíram que, em relação à resistência, o efeito principal de fibras (raízes) no solo é fornecer uma medida de coesão aparente, a qual pode fazer uma diferença significativa na estabilidade com relação a rupturas rasas em solos arenosos com pequena ou sem coesão intrínseca.

Gray e Ohashi (1983) também indicam que o reforço do solo contribui com o incremento da resistência ao cisalhamento e, com isso, aumenta a estabilidade de taludes com solos rasos. Para esse reforço só eram utilizados materiais com altos módulos, como metais, mas atualmente já se pensa em materiais com módulos relativamente baixos, como fibras sintéticas e naturais, como raízes de plantas. Com ensaios de cisalhamento direto, foram analisadas areias sem reforço e reforçadas com fibras naturais, fibras sintéticas e de cobre. Observaram que a relação tensão-deformação é afetada pela razão de área de fibra (A_R/A), onde A_R é a área total da seção transversal de todas as fibras em uma dada seção transversal de solo e A é seção transversal de solo considerada. Verificaram que aumentando o número de fibras de junco de 3 para 22, correspondendo a uma razão de área de 0,25% e 1,67%, respectivamente, ocorreu um progressivo incremento na resistência ao cisalhamento de pico com redução cada vez menor na resistência pós-pico a altos deslocamentos. Concluíram então que, em geral, o reforço de fibras tende a aumentar a resistência ao cisalhamento última e limitar as reduções na resistência pós-pico, na resistência ao cisalhamento de areias densas (Fig.1).

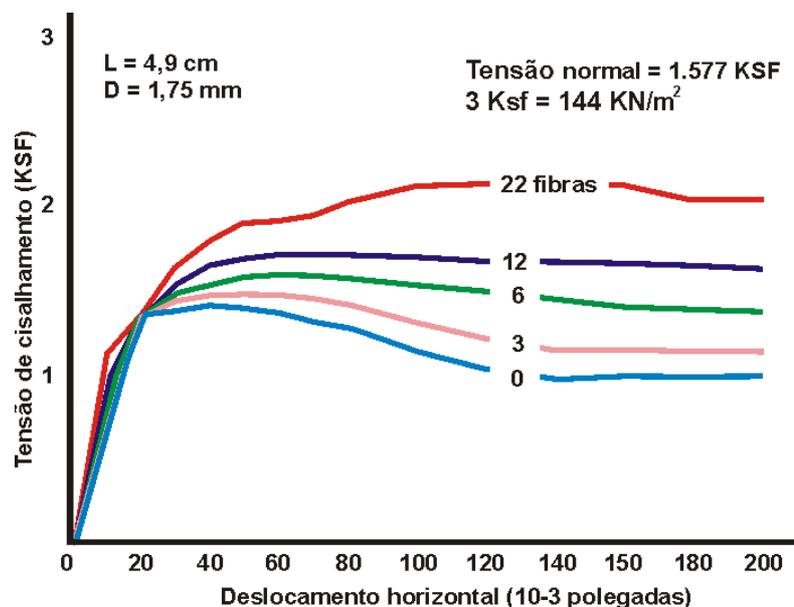


FIGURA 1 – Influência do reforço de fibra na resistência ao cisalhamento de areias densas.

Fonte: Gray e Ohashi (1983).

Gray e Ohashi (1983) concluíram, também, que a razão de área de raiz é diretamente proporcional ao incremento da resistência ao cisalhamento. Provavelmente é 1,7% o máximo para a concentração de fibras através do plano potencial de cisalhamento em um solo permeado de raízes. A orientação das raízes a um ângulo de 60° com a superfície de cisalhamento é a posição ótima das raízes para a contribuição na resistência ao cisalhamento do solo, pois é equivalente à direção da tensão principal de tração no ensaio de cisalhamento direto. Os autores indicam que o reforço das raízes se processa através da resistência gerada pela tração nas raízes. Os incrementos de resistência ao cisalhamento foram aproximadamente os mesmos para areias fofas e densas, mas no caso de areias fofas foram requeridas grandes deformações para alcançar a resistência ao cisalhamento de pico. A envoltória da resistência ao cisalhamento para areia reforçada com fibras mostrou a existência de uma tensão de cisalhamento limite, abaixo da qual as fibras tendem a escorregar ou serem arrancadas. Concluíram, também, que as fibras não afetam o ângulo de atrito interno da areia e que é limitado o incremento à resistência ao cisalhamento do composto fibra-areia, devido ao comprimento das fibras. Observaram que, comparando fibras de baixo módulo como de junco com arames de cobre, mais duros e mais resistentes e com a mesma razão de área inicial, obtém-se o mesmo ou até maior aumento na resistência ao cisalhamento com um pequeno acréscimo no número de fibras de raiz ou na razão de área de raiz.

Wu *et al.* (1988a) relatam que foram executados ensaios de arrancamento e de compressão em raízes, complementando ensaios de laboratório e de campo. Indicam que o maior problema para a comparação dos resultados é o desconhecimento da posição inicial das raízes.

O efeito das raízes na estabilidade de taludes tem sido estudado por muitos autores, que determinaram a resistência do solo com raízes e compararam com solos sem raízes e afirmam que, em geral, a resistência ao cisalhamento aumenta com o acréscimo do número de raízes. Gray (1970); (Kassif e Lopelovitz, 1968; Kaul, 1965; Manbeian, 1973; Bishop e Stevens, 1964; Swanston, 1970) citados por Wu *et al.* (1979).

A resistência à tração das raízes também tem sido alvo de pesquisas. Greenway (1989) apresenta um quadro (Quadro 1) com os resultados em vegetação da Europa, fornecida por Schiechtl (1980), salientando que o valor encontrado serve como um indicativo de resistência para a espécie estudada.

QUADRO 1- Resistência à tração das raízes de algumas espécies de vegetação da Europa			
Espécies	nome comum		resist. à tração (MPa)
	Inglês	Português	
<i>Acacia confusa</i>	<i>acacia</i>	acácia	11
<i>Alleurites moluccana</i>	<i>candlenut</i>	nogueira da índia	6
<i>Alnus firma v. muitinervis</i>	<i>alder</i>	amieiro	51
<i>Alnus firma v. yasha</i>	<i>alder</i>		4-74
<i>Alnus incana</i>	<i>alder</i>		32
<i>Alnus japonica</i>	<i>japanese alder</i>		41
<i>Betula pendula</i>	<i>european white hirsch</i>	bétula	37
<i>Cytisus scoparius</i>	<i>scotch broom</i>	giesta	32
<i>Ficus microcarpa</i>	<i>chinese banyan</i>		16
<i>Lespedeza bicolor</i>	<i>shrub lespedeza</i>		69
<i>Meterosideros umbellata</i>	<i>rata</i>		53
<i>Nothofagus fusca/truncata</i>	<i>beech</i>	faia	36
<i>Picea abies (conífera)</i>	<i>european spruce</i>	abeto, espruce	27
<i>Picea sitchensis</i>	<i>sitka spruce</i>		23
<i>Pinus densiflora</i>	<i>japanese red pine</i>		32
<i>Pinus radiata</i>	<i>radiata pine</i>	pinus	18
<i>Populus nigra</i>	<i>black poplar</i>	álamo ou choupo da Itália	5-12
<i>Populus deltoides (USSR)</i>	<i>poplar</i>		38
<i>Populus deltoides (Nova Zelândia)</i>	<i>poplar</i>		36
<i>Populus euramericana</i>	<i>american poplar</i>		46
<i>Populus euramericana</i>	<i>american poplar</i>		32
<i>Populus yunnanensis</i>	<i>yunnan poplar</i>		38
<i>Pseudotsuga menziesii (British Columbia)</i>	<i>douglas fir</i>	pinheiro	61
<i>Pseudotsuga meenziesii (Oregon)</i>	<i>douglas fir</i>	pinheiro	50
<i>Pseudotsuga meenziesii (Rovky Mountain)</i>	<i>douglas fir</i>	pinheiro	19
<i>Quercus robur</i>	<i>oak</i>	carvalho	32
<i>Robinia pseudoacacia</i>	-	robinia	68
<i>Salix purpurea</i>	<i>willow</i>	salgueiro, chorão	36
<i>Salix matsudana</i>	<i>willow</i>	"	36
<i>Salix fragilis</i>	<i>willow</i>	"	18
<i>Salix dasyclados</i>	<i>willow</i>	"	17
<i>Salix elaeagnos</i>	<i>willow</i>	"	15
<i>Salix helvetica</i>	<i>willow</i>	"	14
<i>Salix hastata</i>	<i>willow</i>	"	13
<i>Salix starkeana</i>	<i>willow</i>	"	12
<i>Salix cinerea</i>	<i>willow</i>	"	11
<i>Salix hegetschweileri</i>	<i>willow</i>	"	9
<i>Thuja plicata</i>	<i>western red cedar</i>	cedro	56
<i>Tilia cordata</i>	<i>linden</i>	tilia	26
<i>Tsuga heterophylla (conífera)</i>	<i>western hemlock</i>		27
<i>Vaccinium</i>	<i>huckleberry</i>	mirtilo (comum EUA)	16

O mesmo autor observa que a resistência de algumas raízes chega a ¼ da resistência à tração do aço doce ($\pm 70\text{MPa}$) e que a resistência varia com as vizinhanças, estação, orientação, espécie e diâmetro da raiz. Burroughs e Thomas (1977), citados por Greenway (1989), ao ensaiarem raízes de um mesmo tipo de árvore em locais diferentes, concluíram que a diferença na resistência alcançou 2,5 vezes. Além disso, encontraram em muitas espécies de árvores que crescem em taludes, maior resistência nas raízes que se estendem para cima do

que nas que se estendem para baixo. Isso é devido, conforme sugestão dos autores, a diferenças na estrutura do tecido da raiz (Schiechtl, 1980, citado por Greenway, 1989).

Suarez (1997) indica que na literatura existem muitas contradições em relação ao efeito das raízes na resistência ao cisalhamento dos solos. O autor justifica, referindo-se a Gray (1974), o qual observou incrementos na resistência ao cisalhamento de 3 a 4 vezes pelo aumento da coesão aparente do solo devido às raízes e a Yagi *et al.* (1994) que concluíram não existir praticamente nenhuma variação no ângulo de atrito interno e na coesão pela presença de raízes. Ainda segundo Suarez (1997), as raízes de árvores e arbustos possuem um baixo módulo de elasticidade à tração e, segundo Gray e Osahi (1983), não se rompem durante o cisalhamento do solo. Suarez (1997) afirma que a deformação na ruptura por tração diminui ao aumentar o diâmetro na maioria das espécies ensaiadas (fato mostrado na Fig. 2, em vegetação nativa da zona da América tropical). A Fig. 3 mostra que as raízes de maior diâmetro, em geral, dão menores valores de tensão na ruptura por tração.

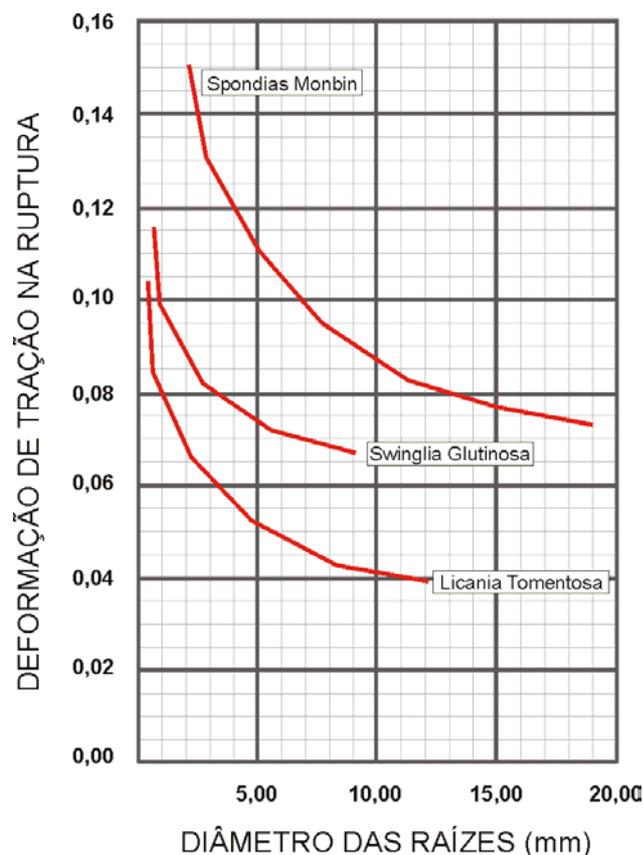


FIGURA 2 – Influência do diâmetro na deformação por tração.
Fonte: Suarez (1997)

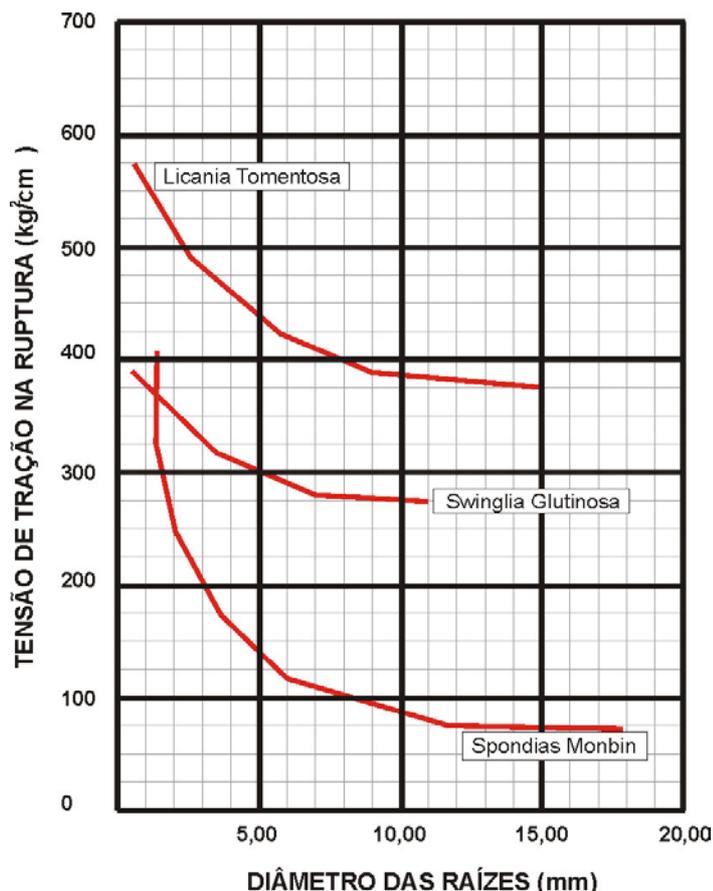


FIGURA 3 – Influência do diâmetro das raízes na tensão de tração na ruptura.

Fonte: Suarez (1997)

Wu (1996) e Suarez (1997) indicam que, de uma árvore para outra, os resultados de resistência à tração podem variar muito dentro do mesmo tipo ou variedade, o que dificulta a adoção de uma resistência específica para elaborar um modelo matemático e que a resistência à tração das raízes é função da idade da árvore e suas condições ambientais (clima, umidade, solo). Esse mesmo autor cita o trabalho de Suyama (1992) que afirma terem as raízes individuais sua resistência aumentada à medida que elas crescem e, em ensaios de resistência à tração, as fibras exteriores tendem a se deformar e as amarras que prendem as raízes tendem a se soltar, dificultando os ensaios.

Em rupturas onde as raízes foram arrancadas pela força do vento, na maioria dos casos, observa-se que a ruptura das raízes ocorre onde a densidade de raízes é menor e o solo é arrancado junto com a maior parte do sistema radicular. As raízes profundas só em raras ocasiões são arrancadas. Em ensaios de arrancamento em campo, a ruptura da raiz ocorre antes dela ser arrancada (Suarez, 1997; Wu *et al.*, 1979).

Yagi *et al.* (1994), citados por Suarez (1997), investigaram rupturas rasas ocorridas no Japão. Fazendo a análise da área levando em conta uma densa vegetação, o fator de segurança aumentou de 10% a 13,5% . Geralmente se obtém aumentos de até 30% para casos de densa vegetação e superfícies de rupturas em até 2m de profundidade. O efeito é menor no caso de superfícies de rupturas profundas e é muito pequeno para rupturas a mais de 5 m de profundidade, pois em taludes de alta declividade, as raízes de árvores geralmente não alcançam este nível (Suarez, 1997).

Foram executados por Manbeian (1973), citado por Wu *et al.* (1979), ensaios de cisalhamento direto em solos sem raízes (sem cultivo) e solos com raízes de várias culturas agrícolas. A Fig. 4 mostra os resultados desses ensaios. A diferença entre a resistência ao cisalhamento do solo sem cultivo e do solo com raízes de culturas de plantas herbáceas [cevada, alfafa e girassol (Manbeian, 1973, citado por Gray, 1974)] fornece a contribuição das raízes. Nessa figura a diferença na resistência ao cisalhamento é de 4,9 kPa ($0,05\text{kg}^f/\text{cm}^2$) e a resistência média das raízes à tração é 6,9 kPa. De acordo com os autores, Manbeian não executou ensaios de arrancamento com as raízes, mas foi obtido um valor de θ (ângulo de distorção, ver Fig. 5) de 45° , levando-se em consideração a deformação à tração das raízes na zona de cisalhamento.

Esse seria o valor mais baixo de θ . Se porções de raízes acima e abaixo da zona de cisalhamento são puxadas para fora, θ seria consideravelmente maior. Cálculos mostram que s_r (resistência ao cisalhamento devido às raízes) ficaria entre 5,0-3,9 kPa para valores de θ entre 45° e 90° . Esse resultado é próximo do valor de 5 kPa obtido pelos ensaios de cisalhamento direto. Os autores confirmaram que a ordem de grandeza de seus cálculos estava correta com um outro ensaio, em raízes de cevada, cujo valor obtido foi de $S_r=3,6$ kPa.

Os autores concluem que a contribuição das raízes das árvores na resistência ao cisalhamento pode ser tratada como uma coesão (alguns autores sugerem ser coesão aparente). Utilizaram em análises de estabilidade a contribuição das raízes à estabilidade de taludes estáveis e florestados e obtiveram fatores de segurança maiores que 1. Concluem então que os resultados indicam que a resistência de contribuição das raízes é importante para a estabilidade dos taludes íngremes e que perdas de resistência de raízes que seguem aos desmatamentos podem afetar seriamente a estabilidade do talude.

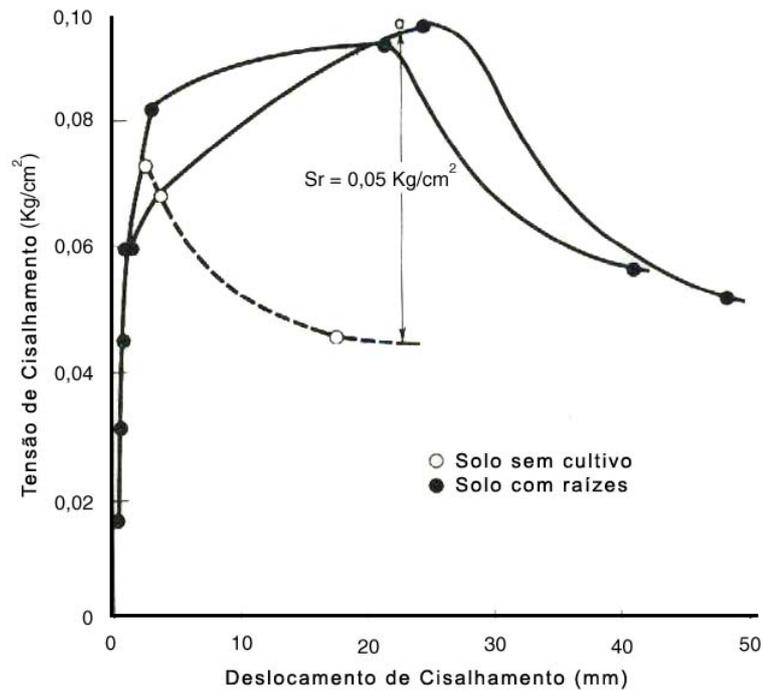


FIGURA 4 – Contribuição de raízes na resistência ao cisalhamento.
 Fonte: Manbeian (1973), citado por Wu *et al.*(1979).

Sidle e Swanstson (1982) estudaram escorregamentos ocorridos em outubro de 1980 na costa do Alasca, onde o terreno tem alta declividade, o solo é de pouca espessura sobre a rocha ou depósito glacial e relativamente sem coesão. Através de ensaio triaxial de múltiplos estágios no solo adjacente à ruptura, obtiveram um ϕ de 43° , para as condições de ruptura (Fator de segurança = 1). Baseado na poro-pressão na ruptura (2,17 kPa), o fator de segurança para $C_a = 1$ (coesão aparente) e 5,0 kPa ficou de 0,75 e 1,73, respectivamente. Estes pesquisadores supõem que a relação entre C_a e FS (fator de segurança) para solos pouco espessos indica que pequenos valores para resistência de raízes e coesão real de solo podem ser críticos na determinação da estabilidade desses taludes íngremes. Por outro lado, consideram que a precisão dos ensaios no solo e análises da resistência de raízes não é suficiente para fornecer dados confiáveis para o cálculo do FS.

Wu *et al.* (1988a) também estudaram a resistência ao cisalhamento de solo reforçado por raízes, considerando a força de tração exercida sobre elas. Há a referência de que, em análises de estabilidade de encostas, as raízes agem como um reforço do solo. Em análises de estabilidade de taludes por equilíbrio limite, consideram-se a estabilidade da cunha limitada pela superfície potencial de escorregamento e, que para que ocorra a ruptura dessa superfície,

que a raiz precisa romper por tração ou por arrancamento. Observações de raízes escavadas concluem que só romperam por tração raízes com diâmetro igual ou menor que 0,7mm. Estes autores citam que foram executados diversos ensaios de cisalhamento direto em laboratório e em campo por vários pesquisadores. A maioria dos resultados mostrou um acréscimo na resistência ao cisalhamento com o acréscimo do volume de raiz e que os fatores mais importantes para essa contribuição de reforço são a rigidez e a orientação da raiz. Embora os resultados em geral tenham sido satisfatórios, os autores concluem que não é possível uma comparação mais detalhada devido à falta de informações da posição inicial da raiz antes dos ensaios. Por outro lado, Gray e Ohashi (1983) mostraram através de ensaios de laboratório, que a orientação do reforço de fibras perpendicular à superfície de ruptura fornece resultados similares ao reforço de fibras orientadas aleatoriamente, que é a situação ocorrente com as raízes no solo.

Wu *et al.* (1988b) indicam que muitos ensaios de campo e laboratório estão sendo executados e concluem que as raízes de vegetações são eficientes como reforço e como uma contribuição para a estabilidade dos taludes. Os autores consideram que, apesar de muitos dos resultados mostrem um incremento na resistência ao cisalhamento com o aumento da massa de raiz, é necessário entender a natureza da interação solo-raiz nos ensaios antes dos resultados serem usados nas análises de estabilidade. Sugerem a execução de ensaios de arrancamento, que são mais fáceis de serem executados, e os resultados utilizados em cálculos analíticos para obter a resistência ao cisalhamento. Recomendam o uso do método para estimativa da resistência ao cisalhamento em projetos preliminares quando não há disponibilidade de dados de campo. Wu (1996) comenta que os resultados disponíveis da contribuição das raízes à resistência do solo são limitados ao local onde os ensaios foram executados, pois suas propriedades são dependentes do solo e das condições climáticas existentes nas vizinhanças e a utilização desses em outras situações, em muitos casos, seriam possíveis para cálculos aproximados.

4.2.1 Modelo de reforço do solo por raízes, desenvolvido por Wu (1976)

Wu (1976), citado por Greenway (1989), desenvolveu um modelo teórico, no qual determina o incremento da resistência ao cisalhamento devido à presença de raízes no solo. Greenway informa que um modelo similar foi desenvolvido independentemente por Gray e Leiser (1982). Esse modelo é muito semelhante ao utilizado por diversos autores que

investigaram o comportamento de solos reforçados em caixas de cisalhamento direto, tanto para reforços poliméricos como reforços metálicos, principalmente na década de 80.

Este modelo supõe que uma raiz elástica e flexível, ancorada em ambos os lados da zona de cisalhamento por atrito ou adesão, de maneira que ela não possa ser arrancada, atravessa essa zona como mostra a Fig. 5. A distorção da raiz dentro da zona de cisalhamento ocasiona tensões de tração nessa raiz e a componente na direção do cisalhamento é quem diretamente se opõe a esse movimento, enquanto a componente perpendicular ao movimento aumenta a tensão de confinamento no plano de cisalhamento.

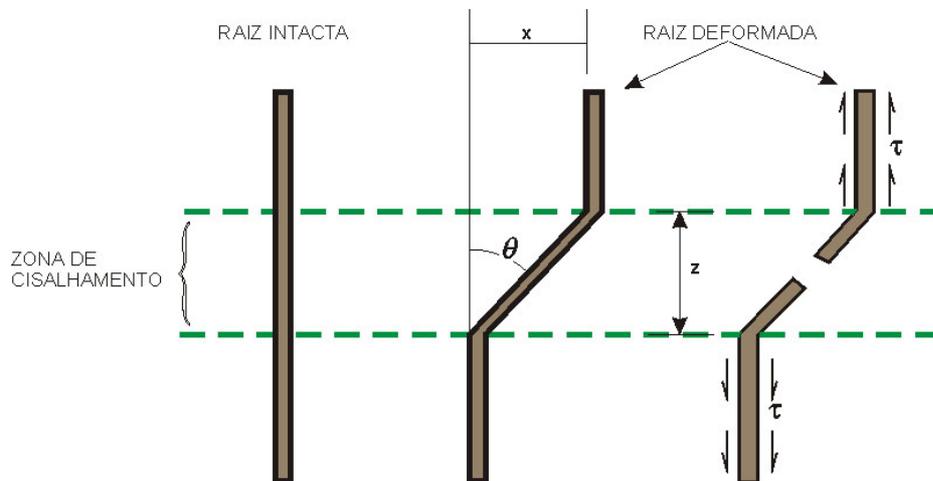


FIGURA 5 – Modelo de reforço de raiz.
Fonte: Greenway (1989).

Inicialmente é suposto que as raízes são perpendiculares ao plano de cisalhamento; que é mobilizada a resistência total à tração de todas as raízes e que o ângulo de atrito interno do solo não é modificado pelas raízes. O modelo de Gray e Leiser (1982), referido por Greenway (1989), demonstra que a orientação perpendicular das raízes não é a situação ótima, mas os resultados são comparáveis a um reforço de fibras orientadas aleatoriamente, o que conduz à utilização deste modelo simplificado para casos práticos. É recomendado que se utilize um valor conservativo para a resistência à tração média quando este modelo for utilizado em análises de estabilidade, pois a mobilização total da resistência à tração das fibras efetivamente não ocorre nas situações de campo. Greenway (1989) fornece uma fórmula para o cálculo do comprimento mínimo da raiz, de maneira que as raízes estejam ancoradas em ambas as extremidades:

$$L_{\min} = T_R d / 4 \tau_b \quad (1)$$

onde: $T_R \rightarrow$ é a resistência à tração da raiz

$d \rightarrow$ é o diâmetro da raiz

$\tau_b \rightarrow$ é a tensão limite de atrito entre o solo e a raiz.

Greenway afirma que as raízes em geral excedem o comprimento mínimo e são mais freqüentemente rompidas por tração do que arrancadas.

O modelo prevê o incremento de resistência ao cisalhamento Δs :

$$\Delta s = t_R (\sin\theta + \cos\theta \tan\phi) \quad (2)$$

onde:

$t_R \rightarrow$ é a média da resistência à tração das raízes por unidade área de solo

$\phi \rightarrow$ é o ângulo de atrito interno do solo

$\theta \rightarrow$ é o ângulo de distorção na zona de cisalhamento.

O ângulo θ é dado por:

$$\theta = \tan^{-1}(x/z) \quad (3)$$

onde:

$x \rightarrow$ é o deslocamento de cisalhamento

$z \rightarrow$ é a espessura da zona de cisalhamento.

A média da resistência à tração das raízes por unidade de área de solo (t_R) pode ser determinada pela resistência à tração média das raízes (T_R) multiplicada pela fração da seção transversal do solo ocupada pelas raízes (A_R/A):

$$t_R = T_R (A_R/A) \quad (4)$$

onde:

$A_R \rightarrow$ é a área total da seção transversal de todas as raízes em uma dada seção transversal de solo

$A \rightarrow$ é seção transversal de solo considerada

A fração da seção transversal de solo ocupada pelas raízes (razão de área de raiz), pode ser determinada pela contagem de raízes por classe de tamanho dentro de uma dada área de solo:

$$\text{Razão de área de raiz} = A_R/A = \sum n_i a_i / A \quad (5)$$

onde:

$n_i \rightarrow$ é o número de raízes na classe i

$a_i \rightarrow$ é a área média da seção transversal das raízes na classe i

A tensão à tração média das raízes T_R pode ser determinada por:

$$T_R = \sum T_i n_i a_i / \sum n_i a_i \quad (6)$$

onde:

$T_i \rightarrow$ é a resistência das raízes na classe de tamanho i .

Então:

$$\Delta s = T_R (A_R/A) (\text{sen}\theta + \text{cos}\theta \tan\phi) \quad (7)$$

Esta equação mostra que o aumento da resistência ao cisalhamento devido às raízes pode ser previsto pela média da resistência à tração das raízes, pela razão de área da raiz, de um fator dependente do ângulo de distorção e do ângulo de atrito interno do solo.

Observações de campo e laboratório indicam que θ normalmente situa-se entre 40° e 70° (Gray e Leiser, 1982, citados por Greenway, 1989). A oscilação do termo $(\text{sen}\theta + \text{cos}\theta \tan\phi)$ é mostrada na Fig. 6, em um intervalo de ϕ entre 25° e 40° e θ entre 40° e 90° e é relativamente insensível a variações em θ e ϕ . Wu *et al.* (1976), citados por Greenway (1989), sugerem um valor médio de 1,2 para este termo.

A equação fica então;

$$\Delta s = 1,2 \cdot T_R (A_R/A) \quad (8)$$

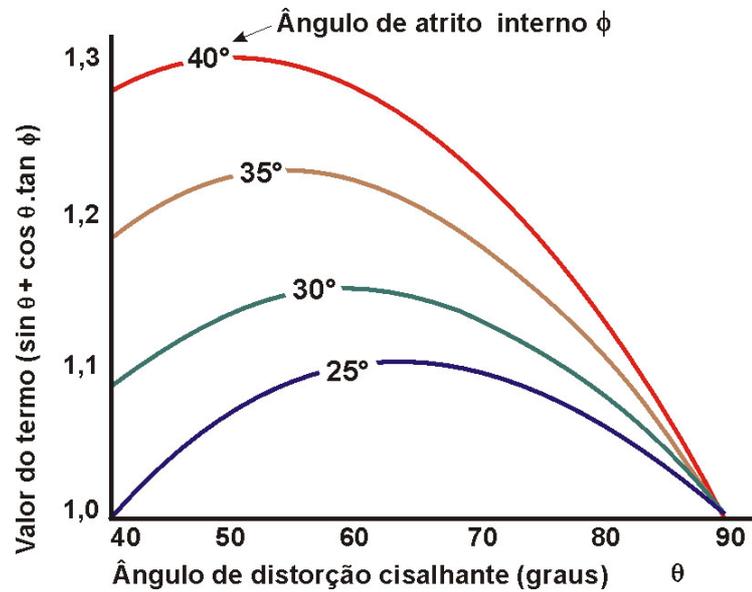


FIGURA 6 – Oscilação do termo $(\sin \theta + \cos \theta \cdot \tan \phi)$.
Fonte: Greenway (1989).

A análise da equação (8) indica que o efeito das raízes na resistência ao cisalhamento disponível em uma superfície de ruptura plana pode ser considerado como o produto de dois fatores. O primeiro $[T_R (A_R/A)]$ indica a resistência média das raízes na área considerada (tração média) e o segundo representa o efeito geométrico da inclinação das raízes, o qual é considerado igual a 1,2 (varia entre 1,0 e 1,3).

5 EFEITOS DA VEGETAÇÃO SOBRE O SOLO

É crescente a conscientização do importante papel exercido pela cobertura vegetal na proteção do solo e das graves conseqüências resultantes de sua remoção, que é a maior causa de muitas rupturas que acontecem no solo, tanto por fenômenos naturais como pela interferência do homem (Mud slides, 1997).

A vegetação absorve a umidade do solo, ameniza os efeitos do calor e frio, modifica a energia da chuva que alcança o solo e a velocidade do fluxo d'água na superfície, controlando a água de escoamento superficial, protegendo-o contra a erosão (Wu *et al.*, 1979; Sidle e Swanston, 1982; Wolle, 1986; Styczen e Morgan, 1995; Abramson, 1996). O processo natural de sucessão desenvolve uma camada que protege o solo, primeiramente com grama, depois com arbustos e após com árvores. Esse processo natural é lento e muitas vezes o homem interfere, auxiliando ou prejudicando a natureza (Moran, 1948).

Morgan e Rickson (1995) sugerem uma análise profunda sobre as condições climáticas locais para que se consiga um máximo dos efeitos da vegetação para as funções desejadas, que são: reforçar e retirar a umidade do solo, proteger contra o trânsito de homens e animais, proteger contra erosão e reforçar margens de rios e canais. Para ser apta a exercer essas funções, a vegetação deve fornecer uma cobertura densa e uniforme próxima da superfície (no mínimo 70%), ter um denso sistema de raízes distribuído lateralmente (80% do sistema a 15 cm da superfície), ser de rápido crescimento, ter condições de fornecer o efeito desejado para a estação de alta precipitação, resistência mecânica ao trânsito e capacidade de produção de húmus. Na escolha da vegetação é fundamental que se leve em conta o aspecto ecológico, além das características para a estabilidade do solo e sobrevivência da planta (Wu, 1995), pois a cobertura vegetal além de regular a natureza física do solo, interfere também na variedade de espécies de insetos que nele vivem (Wallwork, 1970).

Muitos pesquisadores estão procurando entender os efeitos da vegetação sobre o comportamento de engenharia do solo. Greenway (1989) faz uma análise desses efeitos e os classifica como hidrológicos e mecânicos (Quadro 2). Os efeitos mecânicos são conseqüentes das influências físicas do sistema aéreo ou do sistema de raízes da vegetação com o solo. Os efeitos hidrológicos são conseqüentes da modificação da forma como a água chega ao solo,

como ela entra e como é retirada do solo. Nos dois mecanismos há influências benéficas e adversas.

QUADRO 2 – Efeitos gerais da vegetação sobre o solo	
Efeito Hidrológico	Influência
<i>Interceptação das chuvas pelas folhas, resulta em:</i>	
- absorção e evaporação reduzindo a água disponível para a infiltração;	B
- redução da energia das gotas de chuva e conseqüentemente da erosão;	B
- aumento no tamanho das gotas que caem, aumentando assim a chuva localizada.	A
<i>Caules e folhas interagindo com o fluxo de superfície, resultam em:</i>	
- maior armazenamento e maior volume de água armazenada;	A/B
- grande irregularidade no fluxo de água, reduzindo a sua velocidade.	B
<i>Raízes provocam no solo:</i>	
- aberturas na superfície permitindo a infiltração;	A
- retirada de umidade, a qual é perdida na atmosfera por transpiração;	B
- redução da poro pressão e aumento da sucção e conseqüentemente da resistência do solo;	B
- aumento da quantidade de canalículos no solo, resultando em aumento da permeabilidade.	A
Efeitos Mecânicos	
<i>Raízes agregam as partículas de solos, resultando em:</i>	
- restrição de movimento de solo, reduzindo a erodibilidade;	B
- aumento da resistência ao cisalhamento através da formação de uma matriz de raízes.	B
<i>Raízes que penetram em grandes profundidades, provocam:</i>	
- ancoragem em um estrato firme;	B
- suporte da camada de solo acima das árvores no talude, por arqueamento e, contraventamento.	B
<i>Crescimento de árvores altas, de maneira que:</i>	
- o peso pode tornar-se uma sobrecarga no talude e aumentar a força normal e a força de instabilização do talude;	A/B
- quando expostas ao vento, forças dinâmicas são transmitidas ao solo.	A
<i>Caules e folhas cobrem a superfície do solo, então:</i>	
- o impacto do trânsito é absorvido, protegendo a superfície contra danos;	B
- as folhas caem no solo, cobrindo-o e protegendo contra a erosão.	B

A = efeito adverso da vegetação; B = efeito benéfico da vegetação.

Fonte: Adaptado por Pinheiro (2000) do elaborado por Greenway (1987).

Greenway apresenta dois fluxogramas que comparam o ciclo hidrológico de solo com vegetação e de solo nu (Fig.7).

a) Solo nu

b) Solo com vegetação

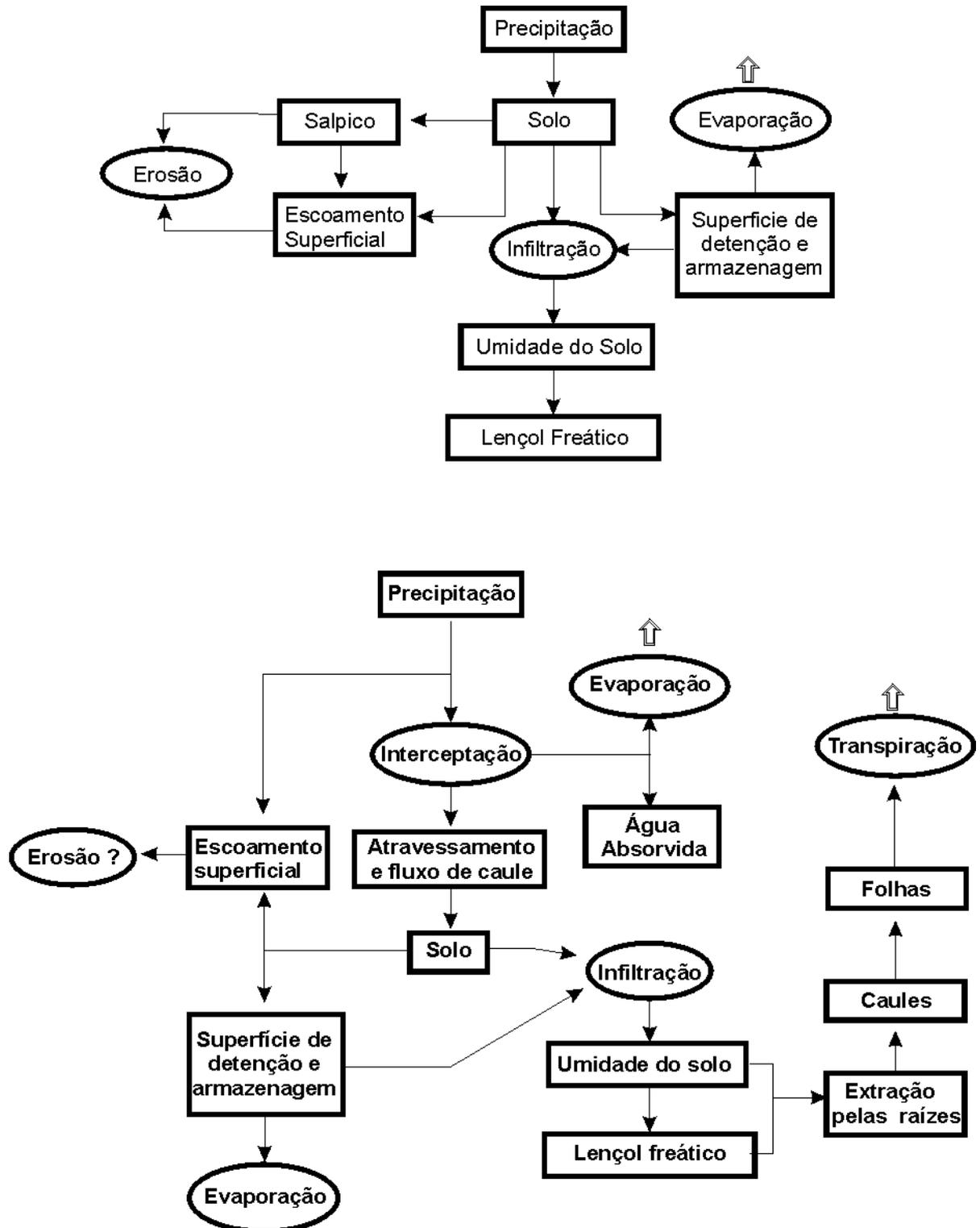


FIGURA 7 – Fluxogramas comparativos do ciclo hidrológico de solo nu e de solo com vegetação.

Fonte: adaptado dos fluxogramas elaborados por Greenway (1989).

Observa-se nessa figura que o ciclo hidrológico, em presença de vegetação, é muito mais complexo. Em solo nu, a água chega integralmente ao solo, uma parte corre por cima da superfície, chamada de deflúvio ou escoamento superficial, outra parte é armazenada na camada superficial do terreno, evaporando daí uma parte e outra infiltrando no solo. Em solo vegetado, parte já é interceptada pela folhagem da vegetação, subdividindo-se em parte absorvida pela planta, parte evaporada diretamente da superfície dos caules e das folhas para a atmosfera e outra parte chegando ao solo. Dessa porção que atinge o solo, parte escoar pelo deflúvio superficial e outra parte é armazenada na superfície, também subdividindo em parte que evapora e parte que infiltra no terreno. Não se pode esquecer que, ao atingir o terreno desprotegido, as gotas de chuva desagregam as partículas do solo por salpico, causando erosão e, ao mesmo tempo, disponibilizando mais quantidade de solo para ser transportada pelo escoamento superficial. Ao serem quebrados os agregados do solo, cria-se uma crosta na superfície pelas pequenas partículas liberadas, tornando o solo praticamente impermeável, aumentando o escoamento superficial e, conseqüentemente, a erosão.

O mesmo autor resume as interações da vegetação com o solo na Figura 8.

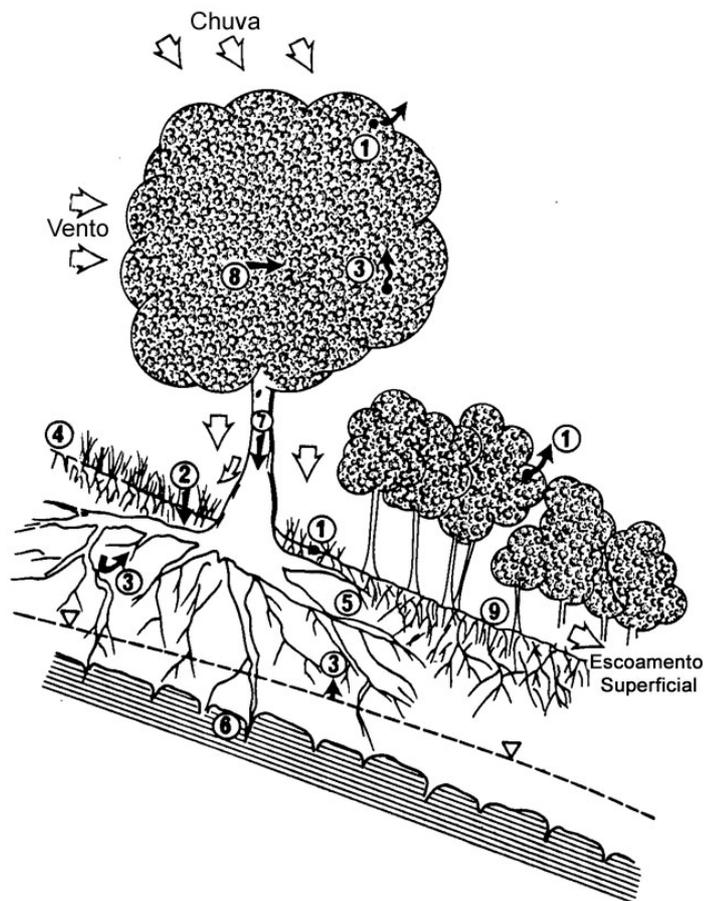


FIGURA 8 – Interações da água da chuva-vegetação-solo.
Fonte: Greenway (1989)

5.1 Efeitos gerais da vegetação

5.1.1 Efeitos hidrológicos citados por Greenway:

Ⓣ - interceptação – as folhas e galhos interceptam a chuva causando perdas por absorção e evaporação, o que faz com que diminua a quantidade de água que chega ao solo (Brady, 1983; Styczen e Morgan, 1995; Imperial College, 1997?). Greenway considera esse efeito benéfico e que ele é controlado pelo tipo e espécie da vegetação presente, pela proporção da área vegetada no talude, pela intensidade e duração da chuva, pelas condições de umidade antecedente e por fatores climáticos e sazonais. Walker e Mohen (1987) consideram que as perdas por interceptação só são significativas durante chuva leve.

Gray (1995), Prandini *et al.* (1976), Ponçano *et al.* (1976), Santoro e Cunha (1976), Wolle (1986), Mendonça *et al.* (1998), Fonseca (1981), Cassol (1981), Pontes (1981), Nogami e Villibor (1995), Pinheiro (2000), entre outros, consideram nesse efeito que os resíduos de folha e plantas absorvem a energia da chuva e previnem o desagregamento das partículas do solo pelo choque dos pingos. Ponçano *et al.* (1976) referem ao efeito do retardo no período da precipitação, no qual os pingos de chuva retidos na folhagem, caules e ramos são liberados aos poucos, prolongando o período da chuva por várias horas após o término da precipitação e com isto, dissipando a energia da chuva, reduzindo sua intensidade.

Outra abordagem do efeito da interceptação pela folhagem é a retenção de considerável volume de água. A copa de uma árvore intercepta de 10% a 20% da precipitação, chegando a 100% em períodos de chuva leve, de pequena duração, (Sternberg, 1948, citado por Prandini *et al.*, 1976).

A vegetação modifica a intensidade da chuva, a distribuição e tamanho dos pingos e a massa de água que alcança o solo, pois os pingos de chuva podem ser divididos em pequenas gotículas quando encontram a vegetação e em grandes gotas formadas pela união das gotas da chuva que ficam temporariamente estocadas nas superfícies das folhas e caules (Guerra, 1994; Styczen e Morgan, 1995; Pinheiro, 2000). Styczen e Morgan (1995) indicam que copas de árvores mais altas que um metro solo incrementam a erosão, pois, pela drenagem de folha, os pingos da chuva se tornam maiores e mais pesados e, com maior energia cinética de queda, incrementam a taxa de desagregação das partículas do solo. Morgan e Rickson (1995) apresentam um gráfico onde mostram a razão de perda de solo, com relação à desagregação das partículas do terreno, pelo impacto dos pingos de chuva (Fig. 9). Os autores afirmam que

a cobertura se torna menos efetiva, à medida que a altura da cobertura aumenta, pela energia de queda de pingos maiores que se formaram na superfície das folhas.

② - incremento da rugosidade do solo – infiltração – as raízes e caules aumentam a rugosidade macroscópica do solo, aumentando a infiltração – o autor considera esse efeito adverso. Fonseca (1981); Pontes (1981); Walker e Mohen (1987) e Morgan e Rickson (1995) também consideram que a vegetação incrementa a infiltração e esses últimos explicam que o crescimento do sistema de raízes e a presença da fauna do solo aumentam o sistema de poros, mas, ao mesmo tempo, a vegetação conduz a uma umidade antecedente mais baixa pela evapotranspiração e pela interceptação da chuva pela folhagem.

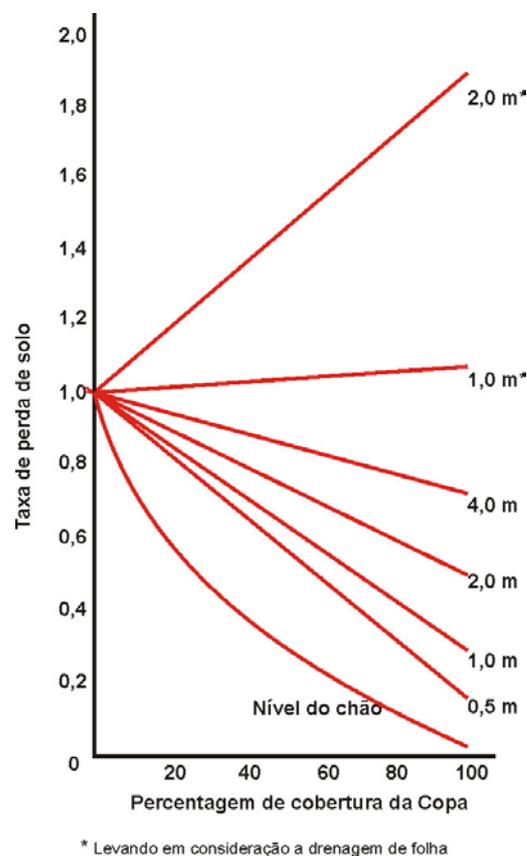


FIGURA 9 – Razão de perda de solo devido à desagregação dos pingos de chuva.
Fonte: Morgan e Rickson (1995).

Gray (1995) e o Manual de conservación del suelo y del agua (1991) consideram o aumento da rugosidade benéfico. Galhos e folhas incrementam a aspereza da superfície, causando restrições ao fluxo, diminuindo as distâncias de transporte das partículas do solo (Morgan e Rickson, 1995) e a velocidade de escoamento da água na superfície. Resíduos de

plantas, a presença de raízes e os canais de raízes vazios auxiliam na manutenção da porosidade e permeabilidade do solo, evitando a formação de uma película seladora pela obstrução dos poros através das partículas finas desagregadas (Cassol, 1981). Manual de conservación del suelo y del agua (1991) considera que a infiltração da água no solo é benéfica, pois transforma as áreas de bosque em um grande armazém de água, onde se originam os arroios, rios e lagos, onde se formam e recarregam águas subterrâneas e o ambiente se mantém úmido e fresco. Ponçano *et al.* (1976) indicam o efeito retardador da infiltração da água da chuva, prevenindo uma elevação muito rápida da poro-pressão.

Nassif e Wilson (1975), citados por Greenway (1989), relatam que têm sido observados experimentalmente incrementos na infiltração em taludes gramados. Greenway (1989) refere-se a Strahler (1969), que fornece dados similares para plantas de uso agrícola.

Wolle (1980) e Prandini *et al.* (1976) não concordam que a vegetação aumenta a infiltração. Esses últimos afirmam que é inverídica esta idéia, referindo-se ao trabalho de Castany (1967) e às observações de Soares *et al.* (1975) nas quais foi constatada muito maior infiltração em solo nu do que em solo vegetado. Os autores supõem que esta crença de que a vegetação facilita a infiltração ocorre porque onde existe floresta, na encosta praticamente não se observa escoamento superficial, o que não acontece em encosta de solo nu e, também, porque a floresta mantém a vazão das fontes, garantindo o equilíbrio dos cursos d'água. Os autores justificam que a parcela da água que atinge o solo já é reduzida pela interceptação da chuva pela folhagem, que, em terreno sem vegetação, chegaria integralmente ao solo. Da água que atinge o terreno, uma parcela é retida na camada superficial de restos de vegetais e solo com matéria orgânica (serrapilheira), que, segundo Sternberg (1949), citado por Prandini *et al.* (1976), pode reter até 300% do peso seco dos detritos. Outra parcela escoia sub superficialmente pelo escoamento hipodérmico, favorecido pela malha de raízes e a serrapilheira. Para os autores, esse fato explicaria, em parte, mesmo com a redução do escoamento superficial, as vazões atingidas pelos cursos d'água após pouco tempo de precipitação.

③ - retirada da umidade do solo.– as raízes extraem a água do solo, a qual é lançada na atmosfera pela transpiração, reduzindo a poro-pressão (Greenway, 1989; Abramson, 1996; Wu, 1995; Imperial College, 1997?; Gellatley *et al.*, 1995), incrementando a sucção matricial (Walker e Mohen, 1987).

④– diminuição da umidade – fendas de tração. Ao retirar a umidade, por outro lado, a vegetação pode favorecer a abertura de fendas de tração em solos expansivos. Isto aumenta a capacidade de infiltração na chuva seguinte, com conseqüente aumento na poro-pressão, e pode criar um efeito de empuxo hidrostático nas trincas, com decréscimo na estabilidade do talude (Imperial College, 1997?). No clima da Inglaterra, no período de grande crescimento da planta, a evaporação quase sempre excede a precipitação. Em conseqüência, nos períodos de seca, há uma extração de umidade de maior volume de solo, o que ocasiona contração e trincas, que podem danificar as fundações de edificações que se situam nas proximidades (Ravina, 1983; Lawson e O’Callaghan, 1995).

5.1.2 Efeitos mecânicos

Como efeitos mecânicos, Greenway (1989) cita:

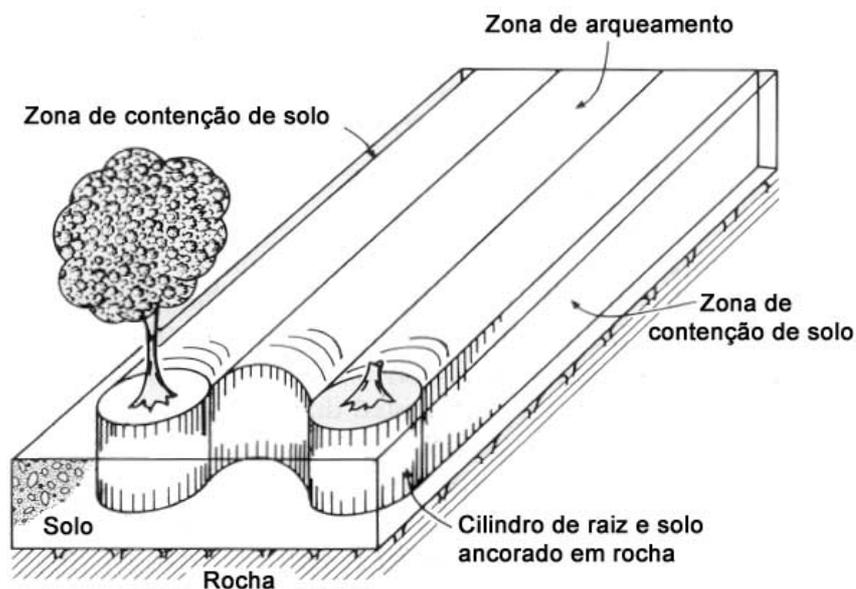
⑤- o reforço do solo pelas raízes, através da resistência à tração e propriedades de atrito ou de adesão, conseqüentemente aumentando a resistência do conjunto solo-raiz [Gray (1970); Wu *et al.* (1979); Sidle e Swanston (1982); Wolle (1986); Walker e Mohen (1987); Andrade *et al.* (1992); Styczen e Morgan (1995); Morgan e Rickson (1995); Wu (1995); Abramson (1996); Pinheiro (2000)]. Gray (1995) indica que esse efeito se dá pela transferência da tensão de cisalhamento no solo para resistência à tração nas raízes. Santoro e Cunha (1976); Ponçano *et al.* (1976); Wu (1995); Marsland (1996); Wolle (1997); Mendonça *et al.* (1998); Imperial College (1997) também concordam que as raízes das plantas tendem a aumentar a resistência do conjunto solo-raízes.

O’Loughlin (1984), citado por Styczen e Morgan (1995), através de estudos de campo em taludes florestados, concluíram que são as raízes finas (1-20 mm de diâmetro) que fornecem a maior parte do reforço; que grama, pequenos arbustos e leguminosas reforçam de 0,75 a 1,5 m e árvores reforçam a profundidades de 3 m ou mais.

Suarez (1997) indica que a presença de raízes aprofunda a superfície crítica de ruptura para profundidades abaixo da densa malha de raízes. Esse efeito muitas vezes é importante em perfis de solo de grandes espessuras, pois pode ter um profundo impacto nas poro-pressões do talude.

⑥ - ancoragem - esse efeito das raízes se dá pela mobilização de sua resistência à tração, quando conseguem penetrar e firmar em camadas mais resistentes. As raízes da vegetação de maior porte, ancoradas nas discontinuidades da rocha, formam um cilindro de solo, fornecendo suporte de contenção para a porção de solo acima da árvore e, produzindo também, um arqueamento no solo (Fig. 10), ações essas que, associadas a raízes e caules ou troncos de vegetação lenhosa, são importantes para a estabilização do talude (Walker e Mohen, 1987; Gray, 1995). Em taludes onde a rocha é relativamente rasa, o efeito da ancoragem é dependente da frequência e natureza das discontinuidades da rocha, pois esses fatores influem na penetração das raízes na camada rochosa. Referindo-se a estudos de campo realizados por Riestenberg (1983), Gray (1995) relata que esses mostraram “ilhas” de colúvios permeadas de raiz e firmemente ancoradas em rocha, agindo como escora de contenção em um talude instável.

FIGURA 10 – Contenção e arqueamento



Fonte: Greenway (1989).

Suarez informa que esse efeito é muito importante em solos residuais de pouca espessura, nos quais as raízes se ancoram em rocha ou em solos menos intemperizados. As raízes com diâmetro superior a 1 mm representam uma ancoragem real, que pode ser levada em conta nas análises de estabilidade de um talude.

As características físicas das raízes, que dependem da espécie vegetal, idade, profundidade do perfil do solo e do meio ambiente, determinam esse efeito de reforço pela ancoragem. É um efeito muito positivo sobre o solo, considerado benéfico pelo autor e também por Ponçano *et al.* (1976); Walker e Mohen (1987); Styczen e Morgan (1995); Abramson (1996); Morgan e Rickson (1995); Gray (1995); Marsland (1996) e outros. Moran (1948) refere-se aos efeitos de ancoragem e de absorção de água como as principais ações das raízes das árvores.

⑦- sobrecarga - o peso das árvores sobre o talude acrescenta uma carga extra ao solo, aumentando as componentes normal e na direção do talude, que o autor cita como benéfico ou adverso, dependendo das condições. Alguns autores (Gray, 1970; Gray, 1974; Prandini *et al.*, 1976; Walker e Mohen, 1987; Styczen e Morgan, 1995 e Gray, 1995) comentam que, apesar de aumentar a força na direção do talude, aumenta a resistência de atrito do solo, sendo esse efeito geralmente mais importante.

Gray (1974) relata que, apesar de à primeira vista parecer um contra-senso dizer que sobrecarga incrementa a estabilidade, esse efeito é em geral benéfico, principalmente em condições saturadas críticas desenvolvidas nos taludes. Em relação a esta posição, Styczen e Morgan (1995) indicam que a sobrecarga se torna crítica em períodos muito úmidos, quando a chuva é intensa e cai em curto espaço de tempo. Em tais ocasiões, afirmam os autores, a evapotranspiração e interceptação praticamente inexistem e o solo não tem capacidade de secar ou drenar. Prandini *et al.* (1976) consideram esse efeito reduzido e afirmam que só se torna importante quando a inclinação do talude é superior ao ângulo de atrito interno do material.

Gray (1995) chama a atenção para a localização de árvores em barragens, que precisa ser considerada em toda análise de estabilidade para avaliar a extensão do efeito do peso no balanço de forças.

⑧ - o vento agindo sobre a vegetação transmite forças dinâmicas ao talude (Walker e Mohen, 1987; Gellatley *et al.*, 1995), efeito considerado pelos autores como adverso. Walker e Mohen (1987); Manual de Conservación del Suelo y del Agua (1991); Marsland (1996) e Imperial College [1997?] consideram que a presença da vegetação, em relação a esse efeito, torna-se benéfico, na medida em que age como um gancho no fluxo de ar, reduzindo a velocidade do vento e, em consequência, a erosão do solo.

Gray (1970) afirma que a queda de árvores devido ao esforço do vento é uma ocorrência comum em florestas, mas normalmente só afeta árvores antigas e doentes. Wolle (1980) comenta que o efeito do vento sobre as árvores não é, em geral, um fator importante, mas que pode se tornar significativo durante tempestades intensas e ventos muito fortes.

Brown e Sheu (1975) executaram uma análise matemática de estabilidade de taludes e concluíram que, pela remoção da vegetação, a carga do vento cai a zero, aumentando a estabilidade. Essa influência positiva da remoção da vegetação age a curto prazo, mas a longo prazo ela é adversa, pois com o tempo as raízes mortas se decompõem, perdendo a função de reforço do solo, ao mesmo tempo que incrementa a permeabilidade do material, com conseqüente aumento na poro-pressão após a precipitação da chuva, diminuindo a estabilidade.

Ⓣ - as raízes servem como ligação das partículas do solo na superfície, reduzindo a erosão ocasionada pelo fluxo de água que corre sobre o solo [Bellinazzi Junior (1981); Fonseca (1981); Greenway (1989); Gray (1995); Gellatley *et al.* (1995); Marsland (1996); Suarez (1997); Mendonça *et al.* (1998)].

Ainda como efeitos da vegetação foram citados na literatura:

1 - Efeito de cunha - em taludes de rocha as raízes das árvores podem servir de cunha e soltar blocos de pedra (Walker e Mohen , 1987; Greenway, 1989; Styczen e Morgan, 1995; Gellatley *et al.*, 1995). Por outro lado, as árvores podem servir de barreira para pequenas avalanches e matacões que caem (Mendonça *et al.*, 1998; Wu *et al.*, 1979). Prandini *et al.* (1976) ressaltam esse efeito da floresta de barrar avalanches e matacões, no qual ele limita a área afetada pelos escorregamentos, retendo o material escorregado e dissipando a energia desse material. Os autores consideram o efeito de cunha das raízes sem fundamento para florestas pluviais em encostas, pois argumentam que o sistema de raízes dessas florestas é nitidamente superficial e paralelo à superfície do terreno.

2 - Efeito de proteção da superfície, pelo qual, taludes de estrada e obras de terraplanagem são protegidos dos extremos do tempo, absorvendo diretamente o impacto do trânsito de pessoas, animais e veículos (Walker e Mohen, 1987; Styczen e Morgan, 1995; Imperial College, 1997; Gellatley *et al.*, 1995) e com isso, reduzindo a erosão pelo escoamento superficial e degradação pela ação de congelamento (Abramson, 1996)

3 - Atenuação do barulho e cortina visual do caminho. Marsland (1996), Styczen e Morgan (1995), Imperial College (1997), Gellatley *et al.* (1995) e Sharma (1996) indicam que a vegetação além de auxiliar no controle da erosão, contribui com a qualidade da paisagem e do ambiente, atenuando os ruídos ocasionados pelo tráfego.

4 - Benefícios ecológicos e ambientais. A vegetação favorece a manutenção de uma diversidade de espécies de plantas (Manual de conservación del suelo y del agua, 1991; Marsland, 1996; Styczen e Morgan, 1995; Gellatley *et al.*, 1995) e do ecossistema através da disponibilidade de condições para o desenvolvimento e suporte para várias formas de vida (Wallwork, 1970; Fairley, 1985; Gellatley *et al.*, 1995).

Keller e Brookes (1984), citados por Gray (1995), utilizaram uma mistura de plantas (junco, gramas e árvores) junto com enrocamento de pedra e outros sistemas para controlar a erosão. Shields (1991), citado por Gray (1995), indica que a frequência de rupturas em estruturas de proteção de pedra foi muito reduzida com o crescimento de vegetação lenhosa no enrocamento, além de fornecer um visual mais agradável ao lugar.

Gellatley *et al.* (1995) indicam, como efeito negativo da vegetação, a tendência das raízes, em tempos de seca, crescerem para dentro dos canais de drenagem, pois ali encontram umidade, podendo comprometer a eficiência dos drenos.

Gray (1995) relata que existe controvérsia sobre permitir o crescimento de vegetação lenhosa em diques, pois pode prejudicar a capacidade de transporte com o aumento da rugosidade, dificultar a inspeção, impedindo operações de combate a enchentes. Além disso, pode ocorrer a penetração das raízes, criando “dutos” por onde a água pode escoar, provocando erosão interna (“piping”). Por outro lado, estudos de Shields e Gray (1993), citados por Gray (1995), concluíram que a vegetação não teve efeito adverso na integridade estrutural de um canal de abastecimento adjacente ao rio Sacramento, Califórnia e que sua presença no solo aumentou a resistência dos níveis superficiais.

Estudos de laboratório realizados por Gray e Ohashi (1983) em reforço em areia por fibras levaram à conclusão que pequena quantidade de fibras pode fornecer um importante incremento na resistência ao cisalhamento. Gray (1995) informa que esses ensaios confirmam ensaios de campo em solos permeados por raízes realizados por Endo e Tsuruta (1969), por Ziemer (1981), por Riestenberg (1983) e por Nilaweera (1994).

Moran (1948) sugere que, após o uso de grama para fornecer cobertura, sejam utilizados arbustos e árvores para reforçar o solo e para retirar umidade de maiores profundidades. Ele recomenda o uso da falsa acácia (*robinia pseudacácia*) e desaconselha o uso do elmo, pois suas raízes se estendem lateralmente a grandes distâncias (até 19 m) e podem causar danos às vizinhanças.

Gray (1995) aconselha a utilização da poda das árvores para abrandar os efeitos negativos da vegetação e sugere que esse procedimento conduziria à formação de novas árvores a partir dos velhos troncos, conservando intacto o sistema de raízes. Esse procedimento abrandaria dois efeitos negativos que seriam a sobrecarga e o efeito do vento. A mesma recomendação é feita por Biddle (1979) para o controle da demanda de água. Com esse procedimento é possível controlar a taxa de crescimento da vegetação, que está relacionada à área de raiz, pois a transpiração e a absorção de água pelas raízes seriam reduzidas. Por outro lado, Pery (1982) afirma que a poda repetida de árvores ocasiona a morte de algumas raízes e esta, por sua vez, pode provocar a morte de porção correspondente de folhas e ramos.

Wolle (1986) afirma, em seu trabalho, que já havia previsto com 5 anos de antecedência os escorregamentos ocorridos em 1985 na Serra do Mar, os quais foram devidos à violenta agressão da poluição atmosférica sofrida pela vegetação, ocasionada pelas indústrias de Cubatão. Essas indústrias soltavam centenas de toneladas de material poluente, desde fuligem, pó de rocha fosfática e gases diversos sem tratamento nenhum, diretamente no ar.

5.1 Erosão

O potencial de erosão que os solos estão sujeitos e a capacidade de crescimento da vegetação são profundamente influenciados pelo clima e pelo tipo de solo, fatores que determinam a natureza da vegetação e esta fornece a proteção do solo contra os efeitos das condições climáticas. (Coppin e Stiles, 1995).

A erosão retira os nutrientes do solo e prejudica o crescimento das plantas nele cultivadas. A matéria orgânica, os fertilizantes utilizados, os resíduos de pesticidas são removidos pela erosão e transportados até rios, fontes d'água e lagos, causando a poluição da água que o homem utiliza (Cassol, 1981).

O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), citado por Gray (1995), indica uma cobertura do solo com grama e vegetação herbácea para proteção contra a perda de solo por erosão superficial ocasionada tanto pela chuva como por deslocamento ocasionados por ventos. De acordo com Abramson (1996), Morgan (1995), Marsland (1996), a vegetação atenua a erosão eólica.

A erosão é um processo geológico que desloca e transporta as partículas e a matéria orgânica do solo por ação de agentes mecânicos naturais, ocorrendo um conjunto de fenômenos que modificam a paisagem e acontecendo em todo o tipo de solo (Rosa *et al.*, 1981). Os processos da erosão e da sedimentação fazem parte do mesmo ciclo e sempre ocorrerá quando a força de deslocamento, exercida por qualquer agente sobre as partículas e agregados do solo, for maior que a força de resistência à remoção (Morgan e Rickson, 1995). Esse processo de escoamento que carrega grânulos de solo, eliminando a camada superficial, diminuindo sua quantidade de nutrientes e, em consequência, sua fertilidade, é chamado de erosão. É impossível detê-la, mas é possível tomar medidas para diminuir, em grande parte, sua velocidade (Pereira, 1968).

De acordo com a velocidade e intensidade com que se manifesta o desgaste do solo, a erosão é classificada: como erosão geológica ou natural, observada após processos lentos de modificações da crosta terrestre; e como erosão acelerada ou erosão provocada, visíveis em poucos anos ou até poucos dias de exploração do solo pelo homem (Nascimento Filho, 1963). Na erosão natural, os fatores desencadeantes são: as rupturas de taludes, a erosão hídrica, os rastejos, as subsidências e podem aparecer como resultado dos processos de erosão acelerada.

Ainda de acordo com Nascimento Filho (1963), a erosão pode ser classificada em função dos fatores mecânicos naturais desencadeantes, como a erosão hídrica, provocada pelo impacto dos pingos da água da chuva, chamada de erosão por impacto, ou provocada pelo deslocamento das partículas do solo pela água da chuva que corre sobre a superfície do solo, chamada erosão por arrastamento e como erosão eólica, causada pelo vento.

O mesmo autor ainda classifica a erosão de acordo com o aspecto apresentado pelos vestígios deixados no solo: a erosão laminar, que se caracteriza pela distribuição do desgaste em camadas de solo, de profundidade relativamente uniforme e de superfície extensa, muitas vezes imperceptível no início e por isso, em geral, a que ocasiona maiores danos ao solo; a erosão em sulcos, que é o resultado da concentração do desgaste em faixas estreitas orientadas ao longo do maior declive do terreno e a erosão em voçorocas (ou boçorocas) que se

manifesta pelo deslocamento de grandes massas de solo, formando cavidades de grande extensão e profundidade.

Esse autor ainda se refere à erosão por escorregamento, também chamada de corrida de terra, ocasionada por cortes feitos na base de morros com alta declividade ou por águas de infiltração que encontram camadas de rocha impermeável, caracterizada pelo deslocamento súbito de grandes massas de terra. Em geotecnia, esse tipo de movimento de massa é considerado uma instabilidade de talude, ocasionada pela formação de uma superfície de ruptura por cisalhamento.

Florineth (1995) refere-se a perdas de solo pela erosão de 1,2 a 1,3 g.m⁻² de solo em ravinas íngremes de áreas alpinas geologicamente instáveis, devida à retirada da vegetação, seguida de excessiva pastagem. Nesse mesmo local, a perda de solo chegou a 5,0 g/m² por dia, durante um excepcional evento climático. As autoridades locais preocuparam-se em desenvolver um programa de revegetação da área para prevenir o risco de erosão, que só poderia ser atingida usando-se mistura de sementes nativas e sementes localmente adaptadas.

Os trabalhos de terraplanagem deixam o solo exposto à erosão, interferindo em toda a região em que a obra se localiza (Rosa *et al.*, 1981). Silveira (1981) também considerou que o problema da erosão em taludes estudados em uma rodovia federal deveu-se principalmente ao fato de não haver um revestimento vegetal, o que provoca a erosão por ravinamento. A intensidade do processo erosivo em taludes depende do grau de coesão do material exposto ao intemperismo. Solos argilosos são menos suscetíveis à erosão que os solos arenosos (Fonseca, 1981; Bastos, 1999).

O desmatamento provocado pelo homem reduz a proteção do solo contra o efeito da energia hídrica. Os nutrientes são levados por percolação para profundidades que o sistema de raízes não alcança. Eles são também carregados junto com as partículas do solo pelo escoamento superficial em um processo de erosão laminar, com conseqüente perda de fertilidade, dificultando o estabelecimento de cobertura vegetal que protege o solo (Pontes, 1981; Morgan e Rickson, 1995, Rodarte *et al.*, 1998).

Conforme Bellinazzi Junior (1981), a erosão se processa em três fases: a desagregação, o transporte e a deposição. No estágio inicial, tem-se a desagregação das partículas do solo devida à combinação do efeito da energia de impacto das gotas de chuva e a turbulência do deflúvio superficial. Depois de desagregadas, as partículas são transportadas

pelo escoamento da água que corre na superfície, pelos córregos e rios e, junto com o solo, são arrastadas significativas quantidades de nutrientes químicos, matéria orgânica, sementes e defensivos agrícolas, que além dos prejuízos à produção agropecuária, mais tarde serão depositadas em áreas mais baixas, poluindo as águas que serão utilizadas pelo homem. A erosão provoca o empobrecimento de nutrientes dos solos e reduz o crescimento das plantas nele cultivadas.

Segundo Bellinazzi Junior (1981), estão correlacionados cinco fatores que governam a taxa de erosão. A interação entre esses fatores influi sobremaneira na quantidade de solo erodido.

1 - **O clima** – tendo importância fundamental a temperatura e o regime pluviométrico. Se a chuva for em quantidade adequada, leve e mais espaçada, terá uma ação muito menor na erosão do que se a chuva for intensa e cair em curto espaço de tempo. A partir do momento que ocorre o encharcamento do solo, o escoamento superficial é influenciado pela intensidade da chuva (Guerra, 1994).

Verifica-se que a erosão hídrica é mais acentuada quando o preparo do solo coincide com períodos de maior precipitação pluviométrica, pois a água em abundância carrega com mais facilidade o solo desestruturado e desprotegido.

2 - **O solo** - a resistência à desagregação do solo, sua permeabilidade, a taxa de transmissão de água, composição química, textura e quantidade de matéria orgânica, que é o agente que fornece uma melhor estabilidade aos agregados do solo, são fatores determinantes para a maior ou menor suscetibilidade à erosão. Esses fatores não são estáticos, pois são modificados com o passar do tempo e com a utilização do solo, devendo, então, ser relacionados a um período de tempo (Guerra, 1994).

Conforme Cassol (1981), praticamente existem três regiões no Rio Grande do Sul onde se concentram os maiores problemas de conservação dos solos (Em anexo os solos do Rio Grande do Sul):

- região de agricultura intensiva com culturas anuais em sucessão e lavoura mecanizada
- regiões de encostas basálticas e outras áreas com declividade mais acentuada
- região de solos originados de arenito.

3 - **A topografia** - o comprimento da rampa, a declividade e a forma da encosta também interferem na velocidade de escoamento da água superficial.

Segundo Fonseca (1981), nas superfícies de baixa declividade, o arraste ou carreamento se intensifica a partir do momento em que se dá a saturação do solo.

4 - **O manejo do solo** - preparos e cultivos intensos ou inadequados podem perturbar a estrutura do solo, incrementando a desagregação e/ou a compactação. A agricultura afeta intensamente a densidade aparente do solo, sendo, esta, incrementada devido à redução da matéria orgânica e pelo uso de maquinaria agrícola. As culturas desenvolvidas, a conservação dos restos de cultura, as práticas de conservação empregadas, as adubações e correções são fundamentais no controle das taxas de erosão.

5 - **A cobertura vegetal** – considerando que vegetação reduz a desagregação das partículas do solo, pois seu efeito é de uma manta protetora, que reduz o impacto das gotas da chuva, reduz a velocidade do escoamento superficial e a ação dos raios solares sobre o solo, e atua de forma fundamental na produção de matéria orgânica, sua presença é de importância fundamental. Concordando com esta visão da vegetação, têm-se, entre outros: Santoro e Cunha (1976), Ponçano *et al.* (1976), Bellinazzi Junior (1981), Fonseca (1981), Pontes (1981), Cassol (1981), Novais (1981), Silveira (1981), Greenway (1989), Manual de conservación del suelo y del agua (1991), Gray (1995), Coppin e Stiles (1995), Morgan e Rickson (1995), Abramson (1996), Marsland (1996) e Mendonça *et al.* (1998).

Bellinazzi (1981) afirma que uma boa cobertura vegetal, como por exemplo, uma floresta, mesmo com topografia desfavorável e chuvas intensas, pode praticamente eliminar o problema da erosão. Gray (1995) e Abramson (1996) referem-se a uma densa cobertura de grama ou vegetação herbácea como uma das melhores proteções do solo contra a erosão do vento e da água da chuva.

Segundo Cassol (1981), a vegetação nativa é um dos fatores responsáveis pelo equilíbrio entre o solo e o ambiente no qual o solo se formou. No Rio Grande do Sul, o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (1991) desenvolveu uma especificação de serviço para cobertura vegetal nas áreas expostas do corpo estradal e áreas de ocorrência de materiais explorados, associando-se vegetais diversos, com o objetivo de proteger o solo dos processos erosivos e atenuação da agressão ao meio ambiente.

Morgan e Rickson (1995), citando os trabalhos de Thornes (1988 e 1990), também concordam que uma boa cobertura vegetal pode controlar a erosão da água e afirmam que, por outro lado, uma erosão severa pode impedir o desenvolvimento da vegetação ou afetar sua composição ou estrutura. Com a erosão, diminui a camada superficial e a capacidade de infiltração do solo, que em geral diminui com a profundidade. A disponibilidade de nutrientes também é reduzida. Esses mesmos autores afirmam que, em solo nu, a erosão e o deflúvio superficial são muito maiores que sob solo florestado.

Pereira (1968) cita que a perda de solo em áreas desprotegidas é muito maior que em áreas protegidas por capim e áreas florestada e salienta o efeito altamente favorável da cobertura de vegetação contra a erosão. Afirma, ainda, que determinada intensidade e duração poderiam remover de um solo desprotegido de vegetação uma camada de 21 cm em 11 anos; que esta mesma área protegida por capim, para que a mesma chuva retirasse a mesma quantidade de solo seriam necessários 4000 anos e num solo florestado, seriam necessários mais de 200.000 anos.

Gray (1995) refere-se a observações feitas pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos Soil Conservation Service (USDA), onde foi concluído que manter uma cobertura densa de grama e vegetação herbácea pode fazer decrescer cem vezes a perda de solo pela erosão superficial. O autor afirma ainda que raízes profundas de vegetação lenhosa são mais efetivas para o abrandamento ou prevenção de rupturas rasas. Cassol (1981) também afirma que, quando o solo está protegido por vegetação, dificilmente ocorre erosão hídrica, pois esta cobertura vegetal intercepta as gotas de chuva, dissipando a energia cinética de queda, evitando o impacto direto sobre a superfície do solo, diminuindo a separação dos agregados, que é a fase inicial do processo da erosão.

Gomes (1981) afirma que, por observações feitas, é a energia do impacto das gotas de chuva que provoca a maior desagregação dos grãos do solo, ocasionando o carregamento desses grãos pela água que escoia sobre a superfície, provocando a erosão. Ele chegou à conclusão que a grama ou vegetação rasteira fornece boa proteção para esse problema e ainda oferece uma resistência efetiva à força cisalhante da água que escoia na superfície. Pereira *et al.* (1981) afirmam que solos sem vegetação apresentam sérios problemas de erosão e que o principal responsável por esse processo é o homem.

Greenway (1989) observa que, em estudos quantitativos da erosão do solo nos anos 20, foi constatada muito pouca erosão em áreas com densa cobertura de vegetação. A partir

daí, pela importância na agricultura, a pesquisa da erosão rapidamente evoluiu e uma consequência desse estudo foi o desenvolvimento da Equação Universal de Perda de Solo (9), proposta em 1965 por Wischmeier e Smith, para prever as perdas de solo em áreas cultivadas, ocasionada pela erosão hídrica. Segundo Pastore *et al.* (1985), a perda média anual de solo é dependente de 6 fatores, os quais compõem a fórmula que prevê as perdas de solo. Greenway (1989) informa que nesta equação foi atribuído um coeficiente “C” à vegetação, que relaciona a perda de solo quando a vegetação está presente, em um certo estágio de crescimento e densidade, com a quantidade perdida em solo nu. Esse fator foi determinado empiricamente para o local experimentado e não deve ser usado aleatoriamente (Styczen e Morgan, 1995).

De acordo com Gray (1995), a Equação Universal de Perda de Solo (USLE) fornece um método de estimativa de perdas de solo e informa a variabilidade de cada parâmetro, como esses afetam a erosão, e como podem ser manipulados para limitar as perdas de solo.

$$A = R.K.LS.C.P \quad (USLE) \quad (9)$$

A- perda de solo para um dado intervalo de tempo, por unidade de área (taxa de erosão, que geralmente é expressa em ton/ha/ano)

K- valor de erodibilidade do solo [caracteriza a suscetibilidade de desagregação e transporte das partículas pela ação dos agentes erosivos (Bastos, 1999). É expresso em perda de solo por unidade do fator R (Nogami e Villibor, 1995)].

L- fator de comprimento de talude (adimensional)

S- fator de declividade (adimensional)

C- fator de vegetação (adimensional)

P- fator usual de controle de erosão (práticas de cultivo e manejo - adimensional)

R- fator climático [fator erosividade da chuva – expresso em energia x mm de precipitação, muito usado no Brasil em ton/ha x mm/h (Bertoni e Lombardi, 1985, citados por Nogami e Villibor, 1995)]

Gray (1995) relata que o fator climático (R), que segundo Pastore *et al.* (1985) e Nogami e Villibor (1995) é obtido a partir de dados pluviométricos (levando-se em conta a energia cinética e intensidade máxima observada em 30 minutos de uma chuva), o fator topográfico (LS) e o fator de erodibilidade (K) só variam dentro de uma ordem de magnitude

e que o fator de vegetação ou de cobertura (C) pode variar sob muitas ordens de magnitude. Gray (1995) apresenta o Quadro 3, fornecido por USDA (Soil Conservation Service), para mostrar essa variação. Abramson (1996) informa que o fator K é afetado pelas texturas do solo e pelo comprimento e gradiente do talude, variando entre 0,02 e 0,69.

O gradiente e o comprimento do talude influenciam no transporte das partículas do solo que são desalojadas pelo impacto dos pingos da chuva ou pelo deflúvio superficial. O fator LS indica o efeito combinado do comprimento e do gradiente do talude (Abramson, 1996).

QUADRO 3 - Fator C para diferentes condições de cobertura do solo

TIPO DE COBERTURA		Fator C	Efetividade -(%)
Nenhuma (solo sem cultura)		1,00	0,0
Semeadura temporária	Forageira (tipo perene)	0,05	95
	Forageira(anual)	0,10	90
	Small grain (centeio anual)	0,05	95
	Milheto ou sudan grass	0,05	95
	Field bromegrass	0,03	97
Semeadura permanente		0,01	99
Leiva		0,01	99
Mulch (proteção com cobertura morta)		Taxa aplic. Ton/acre	
	Feno	0,5	0,25 75
	Feno	1,0	0,13 87
	Feno	2,0	0,02 98
	Small grain straw	2,0	0,02 98
	Wood chips (maravalha)	6,0	0,06 94
	Wood cellulose	1,5	0,10 90
	Fiberglas	1,5	0,05 95

Percentagem de redução de perda de solo comparada com solo sem cultivo.
 Fonte: USDA Soil Conservation Service (1978), citado por Gray (1995).

Gray (1995) afirma que, diferentemente dos outros fatores, o fator C pode ser radicalmente decrescido pela seleção, método de instalação e manutenção da cobertura e que tende a mudar com o tempo, dependendo do tipo de tratamentos de superfície que é dado, tais como proteção com palha, semeadura e transplante. Cita, por exemplo, que o valor do fator C para grama pode decrescer de 1,0 (para solo nu) até em torno de 0,001 entre o tempo inicial de semeadura e o completo estabelecimento de densa cobertura de grama.

Foi proposta por Renard *et al.* (1991) uma revisão da Equação Universal de Perda de Solo, a RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), onde os autores analisaram a USLE e fizeram modificações nos dados de erosividade e erodibilidade, nos fatores de comprimento e inclinação do talude e também de manejo e cobertura, levando em conta situações não consideradas na USLE, como por exemplo, a sazonalidade do fator K, a presença de fragmentos de rocha no solo, o fato que a perda de solo é menos sensível ao comprimento do talude do que qualquer outro fator da USLE e a quantidade de biomassa acumulada no solo provenientes de resíduos de raízes e da vegetação.

Segundo Cassol (1981), um dos principais prejuízos sociais da erosão é o assoreamento do leito dos rios, que diminui a capacidade de escoamento dos cursos d'água, diminui a vida útil de barragens e permite o aumento da frequência e intensidade das enchentes. Outro grande prejuízo é a concentração de grandes quantidades de sólidos em suspensão, que pode afetar a fauna e a flora aquática.

Em áreas erodidas aparecem as voçorocas, que em áreas agrícolas dificultam o trânsito de máquinas e implementos, aumentam o tempo das operações e o consumo de combustível, podendo provocar danos mecânicos. Além disso, a infra-estrutura da propriedade também pode ser atingida, danificando estradas, cercas, benfeitorias e até linhas de transmissão (Cassol, 1981; Novais *et al.*, 1981). Outras graves conseqüências de voçorocas são a interrupção do trânsito das estradas, a ameaça à segurança do usuário e os gastos necessários para manutenção e reconstrução da estrada (Novais *et al.*, 1981).

Gomes (1981) lembra que, quando a erosão é controlada, haverá também o controle do assoreamento dos rios, açudes e canais. O autor considera o assoreamento uma poluição mecânica, que provoca o empobrecimento dos mananciais e a destruição da fauna ictiológica. O autor alerta que a falta de proteção vegetal e de um bom sistema de drenagem superficial provoca o ravinamento, a erosão, chegando à voçoroca; transforma terras férteis e produtivas em desertos ou em solos áridos e estéreis.

Suarez (1997) considera que, onde há árvores altas, a erosão é menor do que onde há arbustos; que ervas geralmente protegem melhor que pastos e, referindo-se a Nordin (1994), que a melhor proteção contra a erosão e os deslizamentos se obtém estabelecendo concomitantemente todos os sistemas de vegetação.

Cassol (1981) observou que a utilização agrícola provoca alterações nas características físicas do solo, podendo causar a degradação da estrutura do solo, facilitando o processo da erosão. Na Fig. 11 o autor mostra a influência da utilização do solo e tipo de vegetação na infiltração da água da chuva.

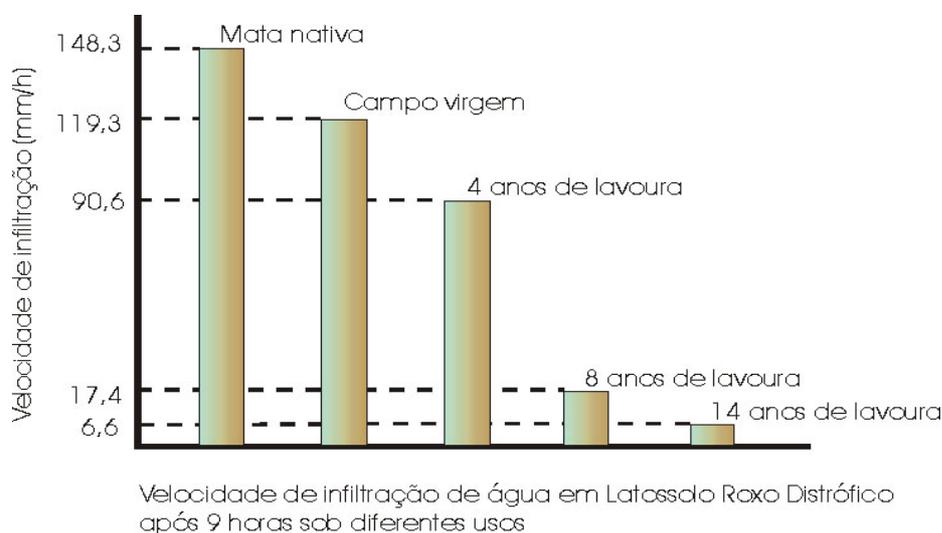


FIGURA 11 – Influência da utilização do solo e tipo de vegetação na infiltração.
Fonte: Cassol (1981).

Para Mazuchowsky (1981), a cobertura vegetal, em função de sua natureza, desenvolve uma influência importante no processo da erosão. Segundo esse autor, a cobertura com floresta fornece uma proteção praticamente absoluta ao solo e a cultura de algodão (ou soja/trigo) permite perdas significativas de solo. Quando são deixados os resíduos das culturas de soja ou trigo na superfície do terreno, as perdas de solo são reduzidas para menos de 5% em relação ao sistema convencional de preparo do solo.

5.2 Medidas de Controle

É consenso entre os autores (Moran, 1948; Ponçano *et al.*, 1976; Santoro e Cunha, 1976; Frazão *et al.*, 1976; Carlstron Filho e Salomão, 1976; Brady, 1983; Pontes, 1981; Bellinazzi Junior, 1981; Cassol, 1981; Fonseca, 1981; Novais, 1981; Silveira, 1981; Mazuchowski, 1981; Manual de conservación del suelo y del agua, 1991; Gray, 1995; Mendonça *et al.*, 1998 e outros) que a vegetação é um dos agentes naturais mais eficazes para proteger o solo contra a erosão. Styczen e Morgan (1995) indicam que é necessário entender o processo da erosão, considerar como cada fenômeno pode ser afetado pela vegetação, determinar as propriedades importantes da vegetação que mais afetam esse processo e tentar

quantificar o efeito combinado da vegetação em diferentes situações, para que se entenda como a erosão é combatida pela vegetação.

Segundo Brady (1983), a manutenção de elevada produtividade e grande fertilidade do solo é um dos processos mais importantes para controlar a erosão, pois a cultura além de proporcionar uma cobertura vegetal para o terreno, fornece também matéria orgânica para o solo. Mas, de acordo com Cassol (1981), a utilização agrícola provoca alterações nas características físicas do solo e, quando essas alterações causam a degradação da estrutura do solo, predispõe-no à erosão. Segundo esse mesmo autor, consegue-se resultados excelentes no controle da erosão hídrica quando, na utilização do solo com culturas anuais, o manejo é associado a uma mínima mobilização do solo (através de uma escarificação ou gradagem leve) com o aproveitamento integral dos restos culturais (picados e distribuídos sobre a superfície do solo).

Mazuchowski (1981) cita alguns procedimentos para controle da erosão, que foram indicados no projeto de recuperação de áreas do Noroeste do Paraná, onde os desmatamentos já haviam eliminado mais de 98% da floresta nativa, com graves conseqüências, principalmente para a área rural:

- A manutenção e/ou regeneração das matas nativas.
- A proibição e fiscalização, coibindo a prática das queimadas.
- O acréscimo de matéria orgânica ao solo de forma sistemática.
- A análise do solo e aplicação dos fertilizantes necessários.
- A incorporação dos resíduos agropecuários ao solo.
- A execução da rotação de culturas e pastagens.
- A utilização racional dos solos.
- A utilização do piqueteamento e da rotação do pastoreio.

Como métodos mecânicos de controle, Brady (1983) cita o cultivo em contorno ou em curva de nível, que é o cultivo no sentido transversal da encosta. Nas encostas longas, pode-se alternar faixas transversais de culturas diferentes, método chamado de cultura em faixa. Quando esses procedimentos ainda não forem suficientes, o autor indica a construção de

terraceamentos no sentido transversal à declividade, o que ocasiona a redução da velocidade da água. Ainda segundo Brady (1983), outro procedimento utilizado é a construção de obstáculos para a água, chamados de barragens, que pode ser de palha, madeiras, terra, concreto ou pedra.

Abaixo, é apresentado o Quadro 4, presente no trabalho de Cassol (1981), em um latossolo roxo distrófico (Santo Ângelo), onde fornece algumas características físicas dos solos analisados, com diferentes utilizações:

QUADRO 4 - Características físicas dos solos em diferente formas de uso

Tipo de uso	Profundidade (cm)	Matéria orgânica (%)	Densidade (g/cm ³)		Porosidade (%)		
			Solo	Partícula	Macro	Micro	Total
Mata	0 – 15	4,4	1,20	2,79	20,4	36,3	56,7
	15 – 30	2,8	1,25	2,82	23,3	32,4	55,7
Campo	0 – 15	3,4	1,24	2,79	14,4	41,2	55,6
	15 – 30	3,0	1,22	2,71	15,7	39,3	55,0
Lavoura Convencional	0 – 15	1,5	1,35	2,67	6,9	42,5	49,4
	15 – 30	0,7	1,27	2,70	8,4	44,6	53,0

Fonte: Machado e Brum, 1978, citados por Cassol (1981).

Cassol (1981) chama a atenção para esse quadro, que o solo com mata natural e o solo com campo virgem apresentam condições físicas semelhantes. Na lavoura convencional, o solo foi utilizado durante 6 anos com lavoura de trigo e soja, recebendo arações e gradagens, com queima dos restos do trigo. Observa-se na tabela que esse solo cultivado apresentou sensíveis alterações nas características físicas.

Esse autor afirma que a degradação das características físicas provoca a desestruturação do solo pela desagregação superficial e pela compactação do solo, causando a redução da capacidade de infiltração da água, como mostra o Quadro 5, fornecido por Cintra (1980) (dados de Espumoso) e Silva (1980) (dados de Ibirubá).

QUADRO 5- Influência do tipo de utilização do solo na infiltração

Tipo de uso	Local	Velocidade de Infiltração (cm/h)	Infiltração acumulada (cm)
Mata	Espumoso (1)	31,4	309,0
Lavoura convencional		0,6	2,4
Mata	Ibirubá (2)	112,5	271,6
Lavoura convencional		0,2	0,4

Fonte: (1) Cintra (1980); (2) Silva (1980), citados por Cassol (1981).

Ainda no seu trabalho, Cassol apresenta dados sobre a perda de solo e água por erosão (Quadro 6) sob chuva natural durante 5 anos em diferentes tipos de uso de solo laterítico bruno avermelhado distrófico (São Jerônimo), com 12% de declive, obtido de Eltz *et al.* (1981).

QUADRO 6- Influência do tipo de utilização do solo na perda de solo e de água

Tipo de uso	Perdas de solo		Perdas de água Em % de chuva
	(t/ha)	(%)	
Campo nativo (5 anos)	1,19	0,1	2,8
Pastagem de trevo (4 anos)	35,12	3,1	2,0
Trigo/milho contínuo(4 anos)	92,58	8,4	6,4
Trigo/soja contínuo (5 anos)	129,83	11,3	6,2
Solo descoberto (5 anos)	1149,75	100,0	17,8

Fonte: Eltz *et al.* (1981), citados por Cassol (1981).

Observa-se nesse quadro que a menor perda de solo ocorre quando é preservada a vegetação nativa, indicando que a melhor forma de proteger o solo é com esse tipo de vegetação. A maior perda acontece quando o solo permanece sem proteção nenhuma, mostrando claramente o efeito altamente positivo da vegetação, mesmo nos casos das culturas agrícolas, que, conforme visto acima, apesar de protegerem o terreno de forma parcial, com maior ou menor perda, dependendo do tipo de raiz e da folhagem que apresenta a cultura, ainda, assim, é uma forma de proteção.

Com a preocupação da utilização do solo para a agricultura, foram estabelecidos limites máximos toleráveis de perda de solo para alguns tipos de solo (Quadro 7), apresentados no trabalho de Pontes (1981):

QUADRO 7- Limites máximos de perda de solo

Grupo	Tipo de solo	ton/ha/ano
Horizonte textural B	Terra roxa	12-14
	Podzólico vermelho amarelo	5-8
Horizonte latossólico B	Latossolo roxo	10-13
	Latossolo vermelho amarelo	13-15
	Latossolo vermelho escuro	11-13

Fonte: Bertoni, citado por Pontes (1981).

5.3 Poro-pressão e Sucção

Conforme Geotechnical manual for slopes (1984), a água do subsolo pode ser dividida em uma zona de poro-pressão positiva e outra de poro-pressão negativa. O nível de água do solo é a linha divisória entre essas duas zonas e a pressão nessa linha é igual à atmosférica. As mudanças na poro-pressão nessas duas zonas de solo (de poro-pressão positiva e de pressão negativa) afetam a estabilidade de taludes. Um incremento na poro-pressão positiva resultará na redução da tensão efetiva do solo e, conseqüentemente, numa redução na resistência ao cisalhamento disponível.

Brugger *et al.* (1997) monitoraram, durante dois anos, dois taludes de espesso depósito de talus/colúvios com topografia e perfil de subsolo muito similares, com 15° a 20° de inclinação, localizados na Serra do Mar, Rio de Janeiro. Um dos taludes permaneceu estável enquanto no outro foram medidos significativos movimentos. Nesse estudo, os autores observaram uma clara correspondência entre movimentos, nível piezométrico e precipitação pluviométrica. Os autores concluíram que o nível do lençol freático foi a causa do comportamento diferenciado dos dois taludes.

Wu (1995) considera que o efeito de árvores na poro-pressão fica bem claro quando se compara um mesmo lugar em épocas diferentes e em situações diferentes. O autor relata que em 1965 uma encosta íngreme em Maybeso Valley, Alasca, onde o solo é de pouca espessura, foi instrumentada para medir a poro-pressão, quatro anos após o desmatamento da floresta. Em 1974, quando a floresta já havia crescido novamente, houve nova medição. Apesar de em 1974 ter havido precipitação muito maior, as medições nas duas épocas foram praticamente iguais. Wu argumenta que cálculos mostram que o acréscimo na evapotranspiração e na capacidade de armazenagem podem explicar a diferença.

À medida que aumenta a distância acima do nível d'água (lençol freático), aumentam os vazios de ar e a zona se torna não saturada. A água no solo, ficando acima do nível d'água, é presa dentro do solo por uma combinação de forças intermoleculares e efeitos de absorção superficial (tensões de capilaridade), que mantêm a água nesse local e são chamadas de poro-pressão negativa ou sucção (Lee, 1996). Nesse caso, o solo não estará saturado. Haverá uma zona de capilaridade, cuja interface ar-água resulta em um aumento de compressão na estrutura do solo, resultando em um acréscimo na sua resistência ao cisalhamento (Fredlund e Rahardjo, 1993). Lee (1996) considera que a água afeta a estabilidade do talude pela alteração das condições de tensões efetivas, essas associadas às variações das poro-pressões positiva e

negativa, pela mudança no peso específico dos materiais do talude e pelo desenvolvimento de erosões interna e externa.

Segundo Aitchison (1960), a sucção pode ser considerada como sendo o resultado da adsorção (fixação de moléculas de uma substância na superfície de outra substância) real ou potencial ou embebição (penetração de um líquido em um sólido poroso) de água pelo solo.

Segundo Blight (1997), a sucção do solo representa a energia necessária para retirar uma unidade de volume de água do solo e tem um equivalente potencial hidráulico negativo. A água fluirá do ponto de mais alto potencial hidráulico a um de menor potencial hidráulico. Entretanto, a água sobe em direção à superfície sob a influência do gradiente potencial hidráulico: a água flui de um ponto de menor sucção para um de maior sucção (Imperial College, 1997?). Blight (1997) compara a energia para criar uma sucção da ordem de 1500 kPa e a energia necessária para extrair do solo uma unidade de massa de água afirmando que aquela é da ordem de 1700 vezes menor que a necessária para evaporar a mesma quantidade de água (1,5 kJ/kg comparado com 2500 kJ/kg). O autor conclui que, se há energia para evaporar a água da superfície, há energia suficiente para tirá-la do solo, porém, à medida que a sucção aumenta, a permeabilidade do solo diminui, e isto pode ser a causa da inibição de perdas de água do solo.

Gardner (1960) indica que o potencial total da água do solo pode ser expresso como a soma do potencial gravitacional, que é relacionado à elevação da água do solo em relação a algum referencial, do potencial osmótico, que é relacionado à concentração de íons dissolvidos na água do solo e do potencial de capilaridade, que diminui com o acréscimo da umidade do solo. Fredlund e Rahardjo (1993) referem-se ainda ao potencial de pressão, devido à pressão existente no ponto considerado, e ao potencial de velocidade, que é devido ao fluxo de água que ocorre dentro do solo. Gardner (1960) afirma ainda que, para que a planta possa utilizar a água do solo, o potencial na planta deve ser menor que no solo. Conclui então que a sucção na planta (ou déficit de pressão difusa, DPD) deve ser maior que a sucção do solo. Quanto maior a taxa de água utilizada, maior será a diferença de potencial. À medida que o solo seca aumenta a sucção no solo e na planta, mas essa sucção é limitada pela pressão osmótica das células das folhas, em torno de 20-100 atm. Quando a sucção da planta alcança esta pressão osmótica, a taxa de transpiração reduz e a planta murcha.

Croney e Coleman (1960) diferenciam sucção de poro-pressão negativa, considerando aquela como uma deficiência de pressão (abaixo da pressão atmosférica), medida numa

amostra de solo livre de tensão externa, e a poro-pressão negativa como qualquer deficiência de pressão (abaixo da pressão atmosférica), medida em campo ou em laboratório.

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993), a sucção total do solo é formada por duas componentes, que são:

1 - A sucção matricial, também conhecida como pressão de capilaridade, que é tanto maior quanto mais fino for o solo (Peltier, 1960; Brady, 1983; Fredlund e Xing, 1994; Santos Neto e Carvalho, 1995, os quais, além da capilaridade, também referem os fenômenos da adsorção como aspectos da sucção), varia com o tempo, devido a mudanças no meio ambiente. Em estações secas ela aumenta e, em estações úmidas, ela diminui.

2 - A sucção osmótica é relacionada à quantidade de sal na água dos poros e está presente tanto em solo saturado como em não saturado e varia com o teor de água presente no solo, o qual modifica a concentração de sal.

Em sucções acima de 1500 kPa, a sucção matricial e a sucção total são equivalentes (Fredlund e Xing, 1994). Para Fredlund *et al.* (1996) elas são essencialmente a mesma para valores de sucção maiores que 3000 kPa. Krahn e Fredlund (1972), citados por Vanapalli *et al.* (1996), baseados em dados de laboratório, consideram que, quando a umidade do solo é menor que a residual (grau de saturação residual é definido como o grau de saturação no qual um acréscimo na sucção matricial não altera significativamente o grau de saturação), as mudanças na sucção total são equivalentes a mudanças na sucção matricial.

Fredlund e Rahardjo (1993) afirmam que mudanças na sucção osmótica têm efeito no comportamento mecânico do solo. Se a quantidade de sal no solo muda, haverá uma mudança no volume e na resistência ao cisalhamento do solo. Os autores salientam que, no caso onde a quantidade de sal no solo é alterada por contaminação química, então a sucção osmótica deve ser considerada como parte do estado de tensões, tanto em solos não saturados como em solos saturados, pois o efeito da mudança na sucção osmótica no comportamento do solo pode ser significativo. Os autores comentam que a sucção osmótica está relacionada à dupla camada difusa ao redor das partículas de argila e a sucção matricial está associada principalmente à interface ar-água.

Os autores afirmam, ainda, que a maioria dos problemas de engenharia, que envolvem solos não saturados, é normalmente o resultado de mudanças no meio ambiente, o que confere à sucção matricial o governo do comportamento mecânico desses solos, em função da

variação da umidade (Santos Neto e Carvalho, 1995; Vanapalli *et al.*, 1996). O excesso de chuva pode colocar em risco a estabilidade de taludes em solos não saturados, pois reduz a sucção do solo. Essas trocas afetam primeiramente a componente sucção matricial. Os autores consideram que as mudanças na sucção osmótica são, geralmente, pouco significativas. Santos Neto e Carvalho (1995) indicam que a sucção osmótica é função das condições térmicas e químicas. Portanto, a variação na sucção total é basicamente equivalente à variação na sucção matricial, podendo, na maioria dos problemas geotécnicos que envolvem solos não saturados, as variações na sucção total ser substituídas por variações na sucção matricial e vice-versa (Fredlund e Rahardjo, 1993). Segundo Mortari e Carvalho (1994), citados por Bastos (1999), a variação na sucção matricial gerada por eventos pluviométricos altera as propriedades de resistência ao cisalhamento do solo e é a principal causa de escorregamentos de taludes de voçorocas.

Gehling e Dias (1986) e Lim *et al.* (1996) afirmam que, para solos parcialmente saturados, a sucção matricial pode ser considerada como uma contribuição de coesão do solo na equação de resistência ao cisalhamento. Bastos (1999) refere-se ao modelo apresentado por Nearing *et al.* (1988b), onde esses autores também fazem a mesma afirmativa. Walle e Hachich (1989), citados por Vanapalli *et al.* (1996), afirmam que, em algumas situações, a manutenção da estabilidade de um talude pode ser garantida por sucções de baixo valor. Pôde ser estabelecido através de ensaios triaxiais de sucção controlada (Abramento, 1988), citado por Wolle (1990), e através de medições em campo da sucção, que o limite mínimo de sucção suficiente para manter estável um talude da Serra do Mar (SP), com delgada cobertura de solo e inclinação média de 40°, seria de apenas 1 a 2 kPa, valor que só não ocorre quando há grandes infiltrações de água da chuva. Wolle (1990) ainda comenta que a resistência de borda da massa de solo (que é a resistência ao cisalhamento do solo a romper somada ao efeito da malha de raízes da vegetação lenhosa) impede a instabilização quando houver encharcamento em pequenas áreas, apenas ocorrendo o deslizamento quando a saturação atingir massas de solo maiores, as quais são capazes de se separar.

Fourie *et al.* (1999) discutiram a importância da sucção do solo na estabilidade de taludes de rejeitos de cinza. Concluíram que o talude, cuja inclinação é maior que o ângulo de atrito interno do material, só permanecia estável devido à sucção matricial desenvolvida no solo não saturado.

Brenner (1973), citado por Greenway (1989), relata estudos feitos em taludes com vegetação e em taludes onde a vegetação foi removida. Foi simulada uma tempestade e a

sucção foi medida nos dois taludes. Nos taludes vegetados, antes da tempestade simulada, foi constatada uma sucção muito maior, que cai a valores relativamente baixos pouco tempo após a tempestade. Conforme Gray (1973), citado por Wolle (1986), que estudou o efeito da vegetação sobre a sucção ocorrente na água intersticial dos solos, a recuperação da sucção após a precipitação é muito rápida em áreas florestadas, além de esses taludes serem muito menos suscetíveis a escorregamentos por ocasião de chuvas intensas.

Vanapalli *et al.* (1996) afirmam que, após o solo ultrapassar as condições de sucção residual, ao ser retirada mais água do solo, não se tem previsão para o efeito na resistência ao cisalhamento de solos não saturados, pois ela pode aumentar, diminuir ou permanecer relativamente constante. Em solos arenosos ou siltosos, que perdem água relativamente rápido, a quantidade de água nos poros é muito baixa nas condições de sucção residual e a transmissão da sucção para as partículas ou para os pontos de contato dos agregados pode ser interrompida. Concluem então que, mesmo que a sucção aumente muito, a resistência ao cisalhamento não terá incremento significativo. Complementam que, em solos argilosos, a quantidade de água retida dentro dos poros na forma de água adsorvida pode ser alta, mesmo com altos valores de sucção, o que pode significar que existe disponibilidade de transmissão da sucção às partículas ou aos contatos dos agregados, incrementando a resistência ao cisalhamento do solo.

Fredlund *et al.* (1996) baseados em resultados de ensaios executados por Donald (1956), realizados em areias e por Gan e Fredlund (1996), que ensaiaram dois solos saprolíticos em Hong Kong, onde um deles, um solo “ash tuff” decomposto de grãos finos a médios e o outro, um granito completamente decomposto, concluem que a resistência ao cisalhamento pode aumentar, mas logo começa a cair com o incremento da sucção, quando as tensões confinantes são baixas. Quando essas tensões são altas, a resistência ao cisalhamento continua aumentando com o acréscimo da sucção. Fredlund *et al.* (1996) salientam a importância da utilização apropriada das tensões confinantes para a medição da curva característica solo-água (umidade versus sucção).

O coeficiente de permeabilidade é fortemente afetado pela modificação do grau de saturação do solo. Mudanças no grau de saturação são afetadas por variações na sucção matricial do solo; portanto, o grau de saturação é função da sucção matricial e a relação entre ambas define a curva sucção matricial versus grau de saturação. Existe uma relação entre a curva característica solo-água e as propriedades de solos não saturados. Essa curva pode ser

usada como a base para prever parâmetros desses solos, tais como permeabilidade e resistência ao cisalhamento (Fredlund e Rahardjo, 1993).

Lim *et al.* (1996) realizaram ensaios de campo em um talude com diferentes condições de superfície (coberto com lona, com grama e solo nu). Concluíram que a presença de vegetação pode alterar as condições de umidade dentro do solo e aumentar significativamente a sucção matricial. Consideram que a máxima alteração na sucção se dá nos primeiros 50 cm de profundidade do solo, havendo, em geral, menor alteração com a profundidade. Pelas suas observações, ao longo do tempo, houve mudanças mais significativas na sucção em solo nu do que em solo coberto com grama. No solo com essa cobertura, só foi significativa a alteração próxima à superfície (50 cm). Os autores justificam que a presença da vegetação aumenta a retirada da umidade de dentro do solo e previne o avanço da frente de saturação, o que não acontece com o solo nu, no qual a água só evapora da superfície e a frente de saturação continua a avançar após cada evento pluviométrico. No solo coberto com lona, a alteração na sucção foi insignificante.

5.4 Efeitos em Argilas

Os movimentos de recalque e expansão dos solos argilosos devidos a influências climáticas e sazonais são acentuados pela presença da vegetação (Imperial College, 1997?). O mesmo autor também refere à correlação entre acréscimo de déficit de umidade, instabilidade e recalque; entre decréscimo de déficit de umidade e expansão do solo.

Ravina (1983) indica que solos vegetados secam muito mais rápido que solos nus, incrementando assim o desenvolvimento de fendas de contração em solos expansivos. Essas fendas são de comprimento médio de 5,1 cm em solos sob grama e a profundidades de 16-45 cm (mais que 60 % do volume de fendas), ao passo que sob árvores, o comprimento médio é de 4,8 cm e 75% das fendas estão a uma profundidade de 26-55 cm.

Driscoll *et al.* (1996) afirmam que uma das principais causas de danos em fundações de edificações de pequena altura no Reino Unido é devida ao efeito da vegetação na argila. Os autores fizeram medições em áreas com cobertura de grama próximas e afastadas de árvores tipo *Lombardy Poplar*, de 20 a 25m de altura, de 1988 até 1990. As árvores foram, então, cortadas para serem investigados os efeitos da expansão do solo em diversos tipos de fundações. Pelos dados obtidos, chegaram à conclusão que movimentos sazonais sob

cobertura de grama ficam restritos a um metro de solo; que perto de árvores, os movimentos são consideravelmente maiores e se aprofundam mais; que comparações de deformações no solo com mudanças no teor de água no solo mostram que o fator de contração varia sensivelmente tanto com a sazonalidade como com a remoção das árvores, conhecimento que conduz a melhores estimativas de movimentos verticais do solo; que em termos de movimentos de fundações e secagem do solo, é muito mais severo o efeito de dois verões secos consecutivos do que cada um individualmente.

Ward (1953) afirma que a transpiração das plantas é a causa de quase todo o déficit de umidade no verão na Inglaterra e salienta que as grandes árvores causam a maior parte dos danos, referindo-se a seu trabalho anterior, de 1948. Relata que gramíneas causam problemas em vias e drenos rasos, e quando não há vegetação nas vizinhanças, esses problemas não ocorrem. Refere-se à altura da árvore como um grosseiro guia para a distribuição de suas raízes e a extensão de possível dano. Afirma, também, que o movimento do solo é uma indicação de déficit de umidade, mas o ressecamento de um lugar não pode ser comparado ao de outro porque a relação entre a contração do solo e o déficit de umidade varia de lugar para lugar.

Cheney (1988) refere-se a problemas causados em uma fundação de uma residência no Reino Unido, cuja construção foi iniciada em 1951, sobre argila de Londres. Após dois anos a construção já apresentava rachaduras, mas até 25 a 30 anos após a construção havia problemas de expansão do solo, causando fendas nas paredes, piso e fundações, tanto exteriormente como interiormente. Após estudos chegaram à conclusão que a causa dos movimentos foi o corte de dois elmos, com 21 m de altura, uns 6 meses antes da construção ser iniciada. Os elmos estavam localizados muito próximos ou exatamente no local da construção. O autor supõe que a expansão da argila após as árvores terem sido removidas produziu grande levantamento do solo e o efeito pode se estender por muitos anos. O processo foi explicado pelo autor da seguinte maneira: para normalizar a umidade da argila após a remoção da árvore e a conseqüente sucção da argila ressecada, há entrada de água no solo, especialmente durante os meses de inverno. As primeiras chuvas molham a superfície do solo que incha, fechando as fissuras e fendas. As fendas mais profundas, ocasionadas pela secagem do verão e pelas árvores da proximidade, inicialmente não conseguem água devido à obstrução das fendas e fissuras do solo acima. Mais tarde essas fendas receberão água, inchando e obstruindo novamente a passagem de água para solo dessecado a maiores profundidades. O autor ressalta que esse é um processo cumulativo, progressivo, de

profundidades crescentes de argila quase impermeável, que impede o acesso da água da superfície para solos ressecados mais profundos. Esse processo pode se estender por 10, 15, 20 anos ou mais, como no caso da argila, até que o solo profundo, ressecado pelas raízes das árvores, consiga água suficiente e complete seu inchamento potencial.

Pryke (1975) também discute esse problema. Em situações de seca, as raízes se estendem na direção da umidade presente no solo, e seu desenvolvimento depende de muitos fatores, como tipo de árvore, natureza e estrutura do subsolo, competição entre árvores adjacentes, nível de água, fonte de água e nutrientes. Segundo o autor, com base em experiências anteriores, há um risco de danificação em solos de argila expansiva, quando as estruturas de obras civis estão mais próximas que 1,5 vez a altura da árvore. O autor comenta que, onde árvores foram removidas, o solo abaixo delas tem sua umidade reduzida a profundidades até 6 metros e é preciso anos para a umidade de equilíbrio ser restabelecida. O déficit de umidade até 1,5 m em pouco tempo é estabilizado, mas se houver secagem mais profunda, a instabilidade da superfície se prolongará por muitos anos, como explicou Cheney (1988). Nesse trabalho, Pryke (1975) conclui que o efeito da expansão provavelmente não afetará uma construção antiga, a menos que uma grande árvore nas proximidades tenha sido cortada recentemente e houver evidência que a árvore perturbava a fundação durante épocas de seca.

No trabalho de Biddle (1979), há a indicação que fendas que mostram aberturas e fechamentos sazonais são provavelmente causadas por contração do solo envolvendo atividade de raiz, enquanto que fendas causadas por recalque nas fundações seriam fendas permanentemente abertas. Refere-se também que, na categoria de responsabilidade parcial de danos devidos a árvores, só são incluídas situações onde danos ocorreriam mesmo na ausência das árvores, mas provavelmente elas aumentam esse dano. O autor informa que foram analisados os resultados de 200 casos investigados, onde geralmente envolviam alegações que árvores causaram danos, ou eram responsáveis pelo dano. Os resultados sugerem que a responsabilidade das árvores poderia ser dividida com outras causas, como capacidade de carga inadequada, mudança no tipo de solo abaixo da fundação, rastejo na argila do talude e outras causas com menor influência nos danos. Nesse trabalho o autor afirma que, pelos resultados estudados, somente em 50% dos casos as árvores são responsáveis sozinhas pelos danos causados às construções.

Driscoll (1983) refere que, durante o mês de setembro, no sudeste da Inglaterra, o solo normalmente alcança um déficit de umidade máximo, que se reduz a zero até o fim de

dezembro. Durante o inverno o solo permanece na capacidade de campo, exceto nas proximidades de grandes árvores. O déficit de umidade é observado, no verão, até 1,5 m abaixo da superfície de solo com vegetação leve (gramas e arbustos). Historicamente os danos causados em construções de alvenaria na Inglaterra eram por contração da argila afetada por raízes de árvores, mas o dano causado pela expansão da argila está se tornando mais freqüente à medida que cresce o número de cortes de grandes árvores para que obras sejam executadas. No período de 1971 a 1980, o custo com reparos de danos causados nas residências cresceu violentamente e estima-se que em 34% dos casos os danos foram devidos a movimentos do solo causados pelas árvores (Driscoll, 1983).

O mesmo autor afirma que, entre as conseqüências desses problemas, além do alto custo com reparos de fundações, está a exigência do corte indiscriminado de árvores das vizinhanças pelos profissionais que executam os reforços nas fundações, a fim de darem a garantia do serviço executado. Samuels e Cheney (1975) aconselham retardar a construção por vários anos, com o objetivo de esperar que se processe a maior parte da elevação do solo. Esse procedimento pode estar postergando o problema para o futuro, pois podem ocorrer problemas de elevação do solo muitos anos mais tarde, como o ocorrido no caso descrito por Cheney (1988).

Driscoll (1983) relata três casos históricos. No primeiro caso, foram constatadas, nos anos 70, fissuras nas paredes internas, no chão e no teto de uma construção de quatro pavimentos, executada no fim do século XIX. As fissuras tornavam-se maiores do chão para o topo do assoalho e havia indicação de rotação na parte frontal da construção. Foram instalados medidores de fendas e foi observado movimento sazonal; as fendas tornavam-se mais largas no verão e mais estreitas no inverno. Nesse caso, a origem do problema era a presença de quatro plátanos de 15 m de altura, afastados da casa em torno de 6 m. As raízes das árvores com 15 mm de diâmetro desapareciam em baixo da fundação. A tendência do aumento das fendas com o tempo foi atribuída ao aumento da demanda de umidade pelo crescimento das árvores. Foram propostas:

- 1 - a remoção de algumas ou todas as árvores;
- 2 - reduzir sua influência pela poda da copa ou
- 3 - instalar barreiras para cortar o sistema de raízes abaixo da construção.

No segundo caso, Driscoll (1983) relata o caso de uma habitação de dois pavimentos construído em 1977. Já em 1979, começaram a aparecer fendas nas paredes internas, na parte de trás. Foi constatada a expansão do solo no canto sudeste da habitação. Ela foi atribuída à remoção de um grupo de árvores, que crescia, na época da construção, na posição próxima ao oitão, fato constatado por uma foto. A danificação causada, além da elevação do oitão posterior, foi uma severa distorção na parte de trás da habitação, o que ocasionou grandes fendas nas janelas e portas, e uma rotação do pilar de tijolos (20 mm fora da vertical no topo), com conseqüente ruptura na sua base.

No terceiro caso foram encontrados problemas em duas construções adjacentes a fileiras de álamos e chorões com 20 m de altura, cujos danos foram atribuídos ser causados pelo corte de árvores. A conclusão do autor é que, sem a influência das árvores, o clima suave e úmido da Inglaterra garantiria que o déficit de umidade do solo no verão estaria limitado até a profundidade de 1 a 1,5 m e a capacidade de campo seria restabelecida a cada inverno.

O autor ainda comenta que o déficit de umidade profundo e permanente pode ser criado por grandes árvores e que há muitas incertezas acerca do tamanho e extensão desse déficit. Comenta, também, que há evidências para sugerir que 75% dos casos de danos causados por árvores podem ser eliminados, distanciando as árvores das construções em torno da metade da altura potencial da árvore. O autor indica que a principal dificuldade em investigar e diagnosticar os efeitos negativos da presença ou remoção de árvores em solos argilosos junto às edificações está na determinação dos valores da sucção, pois até o momento de seu trabalho, existem muito poucos dados disponíveis das características de sucção na argila de Londres.

Driscoll (1983) recomenda ainda, atenção na interpretação dos valores de expansão indicados nos ensaios oedométricos, pois, explica, a expansão de uma amostra de argila de pequena profundidade e pré-adensada pode ser resultante também da tensão de confinamento aliviada na amostragem.

Cheney e Burford (1975) relatam problemas causados a uma construção de um prédio de 3 andares em Garston, Hertfordshire. Antes da construção havia 8 carvalhos que foram cortados para a obra ser executada. Logo no primeiro ano já apareceram fendas de até 2,5 mm em paredes do andar térreo e no segundo pavimento. Nesse trabalho os autores não concluem se o problema foi causado pelas árvores. Eles consideram que muitos fatores estão envolvidos

e que o principal deles deve provavelmente ser inerente à não homogeneidade do solo, devido à retirada da vegetação e de certas complicações estruturais.

Pryke (1975) discute a presença de fendas em paredes de alvenaria em construções domésticas em argila de Londres, no Sudeste da Inglaterra. Ele indica que são muitas as causas da retração do solo, mas deve-se dar uma atenção especial para o crescimento e o efeito das raízes das árvores, chamando a atenção para as pequenas raízes, pois essas absorvem umidade do subsolo e causam a contração nas estações secas. Afirma, ainda, que a maioria dos casos de retração do solo é devida à instabilidade nos 3 metros abaixo da superfície.

Lew e Soares (1998) relatam o caso de uma residência composta de dois pavimentos, construída em 1988, localizada na região de Cuiabá, cujas paredes de alvenaria apresentaram rachaduras logo após o primeiro período de chuvas. Em 1990, os proprietários fizeram um trabalho de reforço estrutural, introduzindo fundações adicionais, mas, mesmo após esse serviço, a residência sofreu novas rachaduras ao longo das paredes, com maior intensidade na parte central, atingindo a parte posterior. Foram realizados ensaios convencionais de laboratório, ensaios de expansibilidade, pressão de expansão e também ensaios de microscopia eletrônica e difratometria computadorizada. A conclusão dos autores foi que ocorreram as rachaduras devido ao tipo de solo sobre o qual a obra foi executada. Esse solo apresenta expansibilidade de média para alta, com presença de minerais argílicos expansivos do tipo Vermiculita e Montmorilonita, minerais muito expansivos. Não há menção para o fato de que poderia haver um déficit hídrico prévio.

6 VEGETAÇÃO EM TALUDES

6.1 A Influência da Vegetação

Gray (1995) afirma que a vegetação é efetiva para controlar erosão superficial ou ruptura de massas rasas, as quais a água tem uma influência importante, tanto pela infiltração como pelo fluxo sobre o solo. A eficiência das raízes à restrição do escorregamento ocorre até a profundidade que elas alcançam e o efeito será mais importante se elas penetrarem através da superfície de ruptura.

Gray (1995) cita o esquema de classificação de Tsukamoto e Kusakabe (1984), desenvolvido para taludes com florestas no Japão, baseado na superfície crítica de escorregamento em relação à zona de raiz. Esse esquema resume a influência do reforço de raiz para taludes em diferentes condições de subsolo (Fig. 12). O autor chama a atenção que esse esquema pode não ser aplicável a todos os casos, mas pode ser considerado em qualquer estudo que leve em conta o reforço do solo pela raiz.

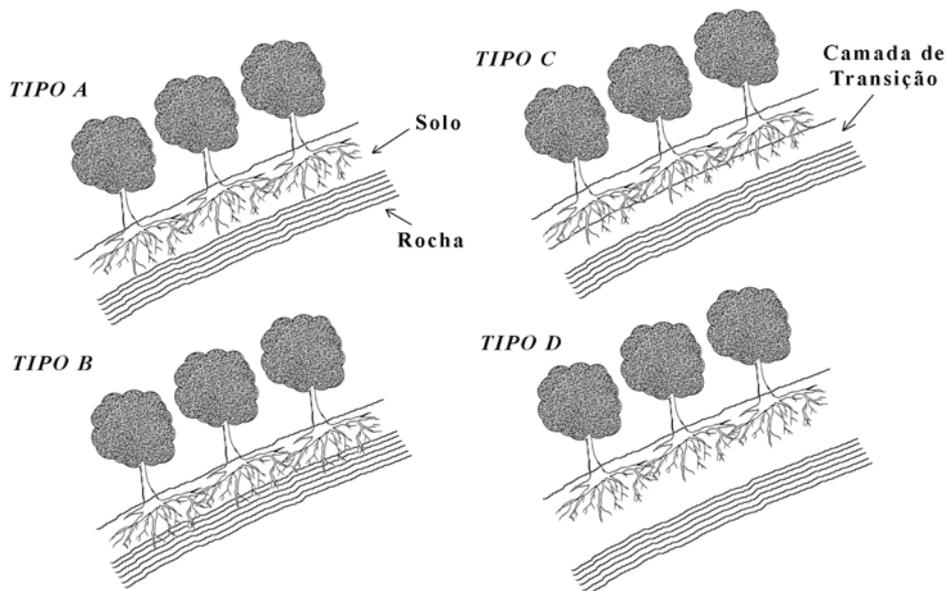


FIGURA 12 – Tipos de reforço de talude por raízes.

Fonte: Tsukamoto e Kusakabe (1984), citados por Gray (1995).

No esquema do talude tipo A, as raízes reforçam completamente a manta relativamente fina de solo, mas não conseguem penetrar na rocha, criando aí uma superfície de fragilidade.

Para que haja um efetivo reforço, as raízes precisam penetrar nas fraturas ou fissuras da rocha, ancorando a manta de solo (caso B). No caso C, o reforço também será importante, pois as raízes penetram em solo residual, ou zona de transição, cuja densidade e resistência ao cisalhamento aumentam com a profundidade. No talude tipo (D), o potencial para movimento está abaixo da espessa camada de solo, onde as raízes estão “flutuando” e pode ser pouca a influência do reforço mecânico para a estabilidade.

Gray (1995) conclui que a influência das raízes no talude é limitada a uma zona em torno de 1,5 m da superfície, e, a maiores profundidades, o efeito de coesão diminui. Isto acontece porque há menor quantidade de raízes em subsolo mais profundo, conseqüentemente, a contribuição de coesão à resistência total de cisalhamento decresce com o incremento da profundidade.

No sudeste do Alasca, escorregamentos rasos de solos são uma importante forma de modificação da massa de solo em encostas com alta declividade. O escorregamento inicia como um deslizamento rotacional localizado na parte superior do talude, geralmente em uma pequena depressão de drenagem. A profundidade da superfície de deslizamento é na ordem de 1 a 1,5 m, a mesma profundidade do solo intemperizado. À medida que ocorre o deslizamento, o solo é perturbado e provoca outras rupturas. Nesse local do Alasca, em taludes onde a floresta foi removida, a freqüência dos escorregamentos foi muito maior e ocorreram durante a estação das chuvas de outono. Andrade *et al.* (1992) comentam que esse tipo de ruptura acontece, em geral, devido à redução da resistência ao cisalhamento do solo, pela queda no valor da sucção, ocasionada pela infiltração de águas pluviais. Foi constatado por ensaios de campo um significativo decréscimo na resistência das raízes após o corte das árvores (Wu *et al.*, 1979). Ponçano *et al.* (1976) afirmam que o desmatamento da vegetação natural foi o fator determinante para os escorregamentos catastróficos que ocorreram na região vizinha à Maranguape, em 1974.

A vegetação aumenta a resistência de taludes contra a erosão superficial (Fonseca, 1981; Gellatley *et al.*, 1995) pelo desenvolvimento de uma camada protetora, formada pela malha de finas raízes próxima à superfície (Fonseca, 1981; Coppin e Stiles, 1995; Morgan e Rickson, 1995; Sharma, 1996), através do incremento da coesão do sistema solo-raiz (Wu *et al.*, 1979; Sidle e Swanston, 1982; Wolle, 1986; Abramson, 1996; Styczen e Morgan, 1995), e a associação das raízes com os caules pode exercer a função de escoras do solo do talude (Gray, 1995).

Morgan e Rickson (1995) referem-se às pesquisas de Odemerho (1986), realizadas em taludes de corte de estrada na Nigéria, nas quais observou que a erosão pela água é máxima quando a inclinação do talude é de 15 a 20% (8,5° a 11,5°) (Fig. 13). Nogami e Villibor (1995) indicam que, em cortes de estradas no Estado de São Paulo, essa erosão ocorre em inclinações entre 30 ° e 45°. Helliwell (1995) mostra que, em taludes com inclinações acima de 60°, a quantidade de água recebida pela superfície do solo é muito pequena.

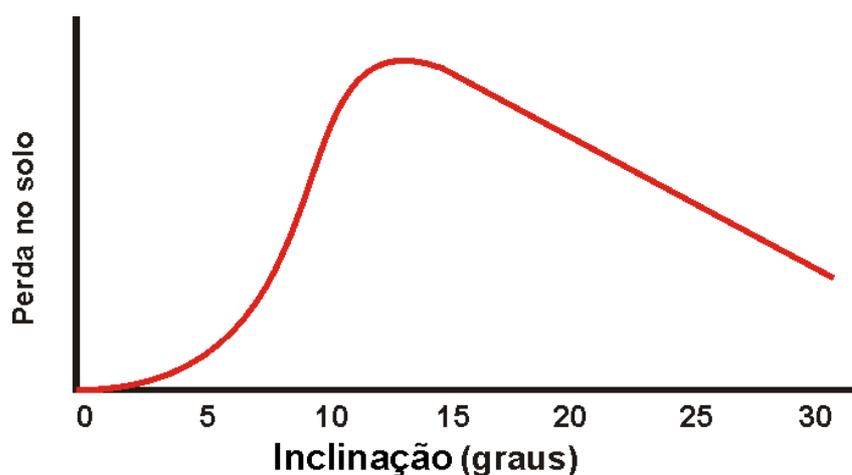


FIGURA 13 – Erosão versus Inclinação dos taludes

Fonte: Odemerho (1986), citado por Morgan e Rickson (1995).

Terrenos com inclinações maiores de 20% apresentaram taxas de erosão decrescentes. Isso, segundo Morgan e Rickson (1995), deve-se a mudanças no processo de infiltração. Dunn (1975), citado por Morgan e Rickson (1995), sugere que, com o aumento da inclinação do talude, a capacidade de transporte das partículas do solo aumenta, mas a capacidade de desagregação do solo pelos pingos da chuva diminui devido ao impacto sobre uma área maior de solo (superfície inclinada). Nogami e Villibor (1995) não concordam com esse ponto de vista e afirmam que, com a diminuição da inclinação, a capacidade de deslocamento das partículas pelo salpicamento é menor. Segundo Morgan e Rickson (1995), a erosão é limitada pela menor taxa de desagregação do terreno. No trabalho de Nogami e Villibor (1995) há referência da erosão por fluxo superficial ser praticamente nula quando a superfície é horizontal, pois não há fluxo de água e também o mesmo ocorre quando a face do talude é vertical, pois a precipitação sobre esta é praticamente nula. Os mesmos autores comentam, ainda, que não haverá erosão se a infiltrabilidade (capacidade do solo de absorver água) for maior que a precipitação, independentemente de sua resistência. Heusch (1970), citado por Morgan e Rickson (1995), estudando montanhas do Marrocos, observou que, para uma

inclinação do terreno em torno de 63%, a vazão da água que corre na superfície do solo diminui, e a vazão sub superficial aumenta.

Wu *et al.* (1979) observaram, nos taludes de inclinação em torno de 40° ou mais de solos rasos estudados no Alasca, a ocorrência de pequenos escorregamentos em áreas sem árvores. Em áreas com árvores, houve deslizamentos onde o solo estava solapado pela erosão e, ao contrário do que aconteceu em taludes desmatados, as grandes árvores interceptaram a massa deslizante, limitando a distância dos movimentos naqueles escorregamentos.

Gray (1975), citado por Wolle (1986), procura sintetizar a atuação de florestas sobre taludes, definindo quatro principais tipos de ações:

1 - Através do reforço do solo pela presença das raízes.

O autor comenta que foram feitos ensaios de campo por Endo e Tsuruta (1969) que permitiram concluir que a resistência ao cisalhamento aumenta com o incremento da quantidade de raízes (Fig. 14) e verificaram que a parcela de atrito permanecia constante, ocorrendo aumento apenas no parâmetro da coesão.

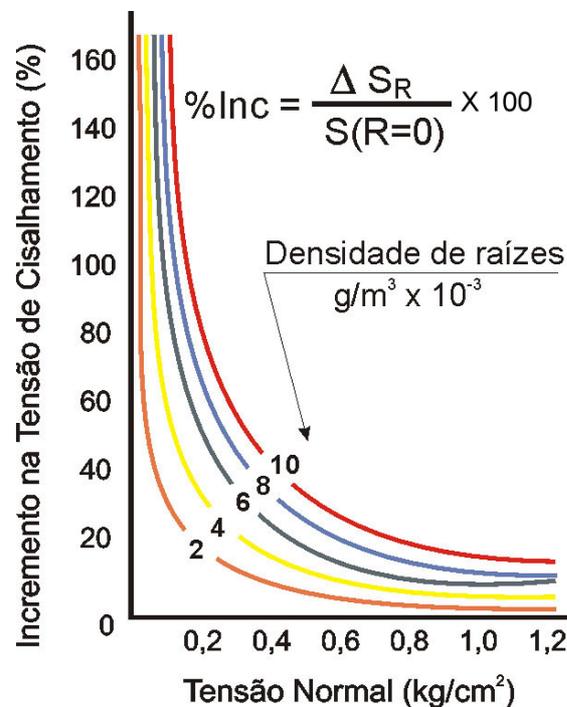


FIGURA 14 – Influência da densidade de raiz e da tensão normal na resistência ao cisalhamento do solo.
Fonte: Endo e Tsuruta (1969), citados por Wolle (1986).

2 - Através da influência da vegetação sobre as águas superficiais e subsuperficiais.

Wolle (1986) cita o trabalho de Prandini *et al.* (1976) onde é feita uma análise do destino da água que atinge o sistema flora-maciço. Afirma que, em taludes sem vegetação ou somente recobertos de grama, praticamente 100% da precipitação atinge o solo. Esta afirmativa sugere que a cobertura do solo por grama não é uma proteção eficiente, o que contraria a maioria dos autores revisados, como Gray (1995) e Abramson (1996) que consideram que uma das melhores proteções contra a erosão do solo é fornecida por uma densa cobertura de grama.

3 - Sobrecarga ocasionada nos taludes pela vegetação existente.

Wolle (1986) afirma que, a não ser nos horizontes mais superficiais do talude, a sobrecarga ocasionada pela vegetação não tem um valor significativo comparado com as tensões ocasionadas pelo peso próprio do talude. Cita os trabalhos de Gray (1973) e de Brown e Shen (1975), os quais indicam para essa carga valores em torno de 0,2 a 0,5 t/m² (≈ 2 a 5 kPa), baseados em estudos experimentais de Bishop e Stevens (1969).

Quanto à ação do vento, Wolle (1986) indica que provoca momentos e esforços horizontais ou sub horizontais. Wu *et al.* (1979) sugerem ser de 1 kPa a força de um vento de 90 km/h sobre as árvores. Concluem que é um valor muito pequeno e que provavelmente não terá grande influência na estabilidade. Segundo Styczen e Morgan (1995) esse efeito só se torna importante para árvores com ventos acima de 11m/s (≈ 40 km/h).

Wolle (1986) recomenda que não seja negligenciado esse efeito, pois quedas de árvores durante tempestades podem iniciar processos instabilizadores no talude pela perda do reforço devido à ruptura do sistema de raízes, pelo aumento da infiltração devido à exposição das raízes e pelo impacto da queda de árvores sobre o solo possivelmente saturado.

4 - Ação de cunha das raízes.

Wolle (1986), referindo-se a Gray (1973), indica que o efeito de cunha das raízes pode fendilhar o solo, incrementando a sua condutividade hidráulica, que pode ser um efeito benéfico pelo aumento da drenagem, se os horizontes inferiores forem mais permeáveis; afastar blocos, o que ocasiona uma queda na resistência ao longo desse contato; envolver blocos (Ponçano *et al.*, 1976), que produziria um efeito local benéfico; obstruir caminhos da

água, o que ocasionaria uma elevação na poro-pressão, com conseqüente decréscimo na resistência ao cisalhamento do solo.

Embora o maior efeito adverso da remoção da vegetação esteja na instabilidade rasa de taludes, Gellatley *et al.* (1995) afirmam que, observando rupturas de aterros do sistema de metrô londrino, a vegetação também tem contribuição importante na estabilidade de taludes contra rupturas rotacionais profundas. Os autores não justificam esta afirmativa, mas ela deve estar relacionada ao efeito indicado por Gray (1970) e por Greenway (1989) que a presença de raízes modifica o regime hidrológico, alterando a distribuição da umidade na zona onde se localizam as raízes, podendo alterar, também, bem além dessa zona.

Greenway (1989) deixa claro que o efeito de todos os fatores varia de talude para talude, sendo necessário quantificar cada um para cada caso. A influência da vegetação em taludes de estradas e obras de terraplanagem, em geral, é uma combinação de efeitos benéficos e adversos. Qualquer que seja o balanço de efeitos em cada localidade particular, tal balanço será um fenômeno dinâmico e sazonal (Gellatley *et al.*, 1995; Imperial College, 1997).

6.2 Métodos de Reposição da Cobertura Vegetal

Coppin e Stiles (1995) indicam que cada tipo de problema de erosão e de instabilidade de solo precisa ter a escolha adequada da espécie vegetal. Frequentemente arboricultores se deparam com problemas de seleção imprópria de árvores, o que acarreta custos que seriam evitados com um estudo prévio das condições locais e necessidades das plantas (Hodge e White, 1990).

Coppin e Stiles (1995) indicam que a velocidade do estabelecimento natural da vegetação depende das condições do local e da superfície do solo e que a preparação do solo é a primeira etapa para o estabelecimento da vegetação. Para a maioria dos taludes, durante sua formação seria a melhor época para preparar o solo. Desta forma, reforçam os autores, problemas que surgem decorrentes de trabalhos de engenharia seriam evitados, como, por exemplo, a compactação. Segundo os autores, o clima e o solo são os principais fatores responsáveis pelo desenvolvimento da vegetação. Existem muitas formas de modificar o microclima da superfície para o estabelecimento da vegetação e reduzir a agressividade do

meio, mas nem sempre é possível preparar adequadamente a superfície do solo em um talude. (Coppin e Stiles, 1995).

As vegetações mais apropriadas para servir de proteção para taludes são as gramíneas, as leguminosas e os arbustos de pequeno porte. Com essa finalidade, foram desenvolvidas muitas técnicas. A técnica utilizada é função das características das espécies selecionadas, do clima e das propriedades do solo:

1 - A semeadura pode ser feita com maquinaria específica ou, na impossibilidade de acesso com máquina, a semeadura pode ser feita à mão, quando a área a ser semeada permitir. Quando a superfície do solo não é suficientemente rugosa para fixar as sementes no solo, pode ser utilizada uma cobertura de palha seca na superfície, espalhada manualmente ou por maquinaria. Na impossibilidade da semeadura manual, pela extensão da área e semeadura por máquina, pelas condições da topografia e condições do solo, a semeadura pode ser feita utilizando-se helicóptero.

2- Um método muito utilizado é a hidrossemeadura, pela sua facilidade, rapidez e baixo custo. Consiste no lançamento por alta pressão de uma massa pastosa, composta por uma mistura de sementes adaptáveis às condições locais, fertilizantes, palha, adesivos, matéria orgânica e microorganismos que ajudam na decomposição e fixação do nitrogênio do ar. Fonseca (1981) recomenda a utilização desse procedimento para a revegetação de áreas com problemas de erosão por ser ideal onde não se tenha condição de irrigação e por proteger os taludes até que surjam condições mais favoráveis de germinação, especialmente áreas cujas faces estão voltadas para o sol e sujeitas à incidência de raios infravermelhos. Conforme o autor, é um método que está sendo usado com real vantagem em vários países, principalmente nos de clima tropical ou temperado.

3 - Outro método apresentado por Fonseca (1981) é o Colchacreto tipo I, tecnologia desenvolvida pela firma Control de Erosion S.A., da cidade do México, que é utilizado em caso de instabilidade de taludes onde as características sejam muito críticas e que sejam necessárias soluções com coeficientes de segurança muito altos. Consiste em um modelo preenchido parcialmente por argamassa, apresentando um aspecto parecido com uma malha. Os vazios da malha podem ser vazados, de modo a permitir o plantio da vegetação. É uma solução que satisfaz amplamente os requisitos ambientais obrigatórios e estéticos estabelecidos para certas áreas próximas de loteamentos ou áreas de lazer.

4 - Fonseca (1981) ainda recomenda as paliçadas, que consistem na utilização de troncos de árvores sacrificadas pelos escorregamentos ou pela passagem de alguma obra, que poderão constituir obstáculos aos carreamentos de solo pelas enxurradas e minimizar os efeitos da energia cinética das águas, em casos de estabilização de encostas de terrenos montanhosos ou de topografia razoavelmente acidentada. Deverão ser completados com solo preferencialmente argiloso bem plástico e em seguida cobertos pela sementeira hidráulica. O autor não menciona, mas essas estruturas necessitam ser construídas de maneira estável geotecnicaamente.

5 - Bolsas vegetativas têm apresentado ótimos resultados na consolidação de taludes. São preenchidas de argila ou terra vegetal e colocadas sobrepostas umas às outras, para promover uma amarração natural entre os elementos. A superfície do conjunto de bolsas é semeada hidraulicamente (Fonseca, 1981). O autor salienta que o conjunto de bolsas vegetativas não oferece nenhuma melhoria no aspecto visual. Por apresentar baixíssimo custo, essas estruturas são recomendadas para reabilitar as superfícies danificadas por erosão.

6. Guerra (1994) e Rickson (1995) indicam que a utilização de geotéxteis é uma outra opção para o controle da erosão do solo, pois esse material imita propriedades importantes da vegetação, como modificação das propriedades do fluxo da água, interferindo em sua capacidade de desagregação e transporte das partículas do solo; simula o efeito de caules e raízes no aumento da rugosidade da superfície.

Para o estabelecimento da vegetação, ao controlar a erosão superficial, a utilização de geotéxteis cria condições da semente de desenvolver sem o risco de ser levada pela água da chuva ou, quando em germinação, danificada pelas partículas de solo desagregadas.

A maioria dos geotéxteis é projetada para o controle da erosão superficial, em forma de malha, ou de uma tela em forma de favos, esses conhecidos como geocélulas. São feitos de material natural, como juta, ou sintéticos, como náilon. Os naturais têm proteção temporária. Porém, à medida que se decompõem, a vegetação se estabelece, fornecendo a proteção superficial perdida pelo geotêxtil. Muitos materiais naturais são ensaiados para ser verificada sua durabilidade e o material que mais tempo resistiu à degradação foi a fibra de coco (pelo menos 15 vezes o tempo do algodão e 7 vezes do tempo da juta, especialmente em ambientes úmidos, com solos muito férteis).

O método consiste na cobertura do solo, já semeado, com rolos do geotêxtil, presos com pinos. Quando é usado geotêxtil sintético, a malha é desenrolada sobre o solo, fixada com as estacas, preenchido com solo mais fértil e depois, colocadas as sementes. As desvantagens dos geotêxteis sintéticos estão na impossibilidade de ser usada maquinaria para o corte e demais serviços de manutenção da vegetação e no efeito para o habitat de animais silvestres.

6.3 Experiências de Obras

Frazão *et al.* (1976) indicam como solução para estabilização dos taludes íngremes de pequenas e médias alturas, em arenitos argilosos, siltitos, argilitos e folhelhos entre os Estados de Santa Catarina e Paraná, além do retaludamento dos cortes para um ângulo máximo de 45° a 50°, a utilização de uma cobertura vegetal para proteção do talude. A mesma indicação foi feita por Carlstron Filho e Salomão (1976) para a estabilização de taludes em trechos de ferrovia no Rio Grande do Sul, em geologia semelhante.

Massad *et al.* (1998) relatam que em obras de controle de movimentos de massa, chamadas de “*sabo works*” pelos japoneses, que têm experiência de mais de 100 anos, são executadas barragens, canais, trabalhos de estabilização de encostas e de reflorestamento, para proteger a superfície. A mesma solução foi relatada por Rocha *et al.* (1998) para a estabilização de encosta, no Estado do Rio de Janeiro, onde as chuvas de 1997 reativaram um escorregamento de grandes proporções. Foi desenvolvido um trabalho de reflorestamento nas áreas degradadas, com o plantio de grama e espécies nativas da Mata Atlântica.

O uso de galhos vivos (brush-layer) alternados com solo compactado foi utilizado como alternativa para uma proteção de talude integrando a vegetação e componentes estruturais (Gray e Sotir, 1992). Os autores afirmam que, além dos galhos e caules reforçarem o aterro da mesma maneira que telas de polímeros ou outro reforço fabricado, ainda agem como drenos horizontais no talude, e que também há uma estabilização secundária pelas raízes adventícias que se desenvolvem nos caules enterrados.

Blunt e Dorken (1995) desenvolveram pesquisas em taludes de regiões montanhosas, com o objetivo de viabilizar o estabelecimento de uma cobertura vegetal sustentável. Concluíram que:

1 - Em taludes de estradas, para evitar o solapamento da vegetação, deve ser executada uma transição arredondada entre o talude original e o corte.

2 - Erosões ativas podem ser controladas por retaludamento e estabelecimento de vegetação.

3 - Uma cobertura inicial rápida, suficiente para proteger contra a erosão, sendo necessária, em alguns casos, a utilização de geotêxtil.

4 - Vegetação rala o suficiente para permitir a sucessão vegetal.

5 - Uma planta com vigor só suficiente para permitir o estabelecimento permanente de gramíneas e leguminosas.

6 - A retirada de animais até que a vegetação nativa esteja bem estabelecida e o controle do pastejo para prevenir a destruição da vegetação.

Segundo Gray (1995), a vegetação de maior porte é mais forte e possui raízes mais profundas, por isso fornece um melhor reforço mecânico e maior escoramento do talude. Como gramas e vegetação herbácea crescem junto à superfície, fornecem uma densa cobertura para o solo e tendem a ser melhores para prevenir erosão superficial. Afirma, ainda, que arbustos não têm raízes tão profundas nem fornecem o efeito de escoramento do talude como as árvores, mas são mais flexíveis, têm menos biomassa acima do solo, exercendo menor sobrecarga no talude. O autor conclui que eles são preferidos em estabilização das margens de rios onde esses atributos são mais vantajosos.

Grimshaw (1995) estudou um tipo de capim (Vetiver Grass - *Vetiveria Zizanioides*), perene, denso e que se desenvolve em tufos. Suas raízes têm um estoque muito grande de ramificações, resistentes e profundas [em sete meses podem atingir 3,6 m (Yoon, 1995)]. Na maioria das circunstâncias, prendem os horizontes A e B ao horizonte intemperizado C. Seus caules são eretos, alcançando alturas de 0,5m a 1,5 m. Esse capim é um C₄ (planta cujo primeiro produto da fixação de CO₂ é a molécula de 4 carbonos do oxaloacetato), podendo crescer em qualquer lugar, sendo tolerante à seca, ao fogo, a altos níveis de toxicidade do solo causados por manganês, alumínio e outros metais. Cresce em solos com ph menor que 3 até em torno de 11. Não é invasivo, tem potencial para revestir taludes e canais pela sua grande resistência e capacidade de absorver e dissipar a energia hidráulica, podendo opor-se à alta velocidade do fluxo de água e sobreviver meses submerso em água. De acordo com

fazendeiros da região, repele ratos e cobras e há forte evidência que barreiras de Vetiver eliminam ervas daninhas. O autor concluiu que esta planta é de baixo custo de estabelecimento e manutenção e constitui-se num sistema efetivo para estabilizar taludes e estruturas de terra em climas tropicais e subtropicais.

6.4 Casos Históricos

Wu (1995) descreve três casos onde o corte de florestas foi determinante nas rupturas dos taludes. O primeiro relatado ocorreu no Alasca, em *Maybeso Valley*, onde o solo é de pouca espessura e o escorregamento se deu alguns anos após a floresta ter sido cortada. O caso foi analisado como talude infinito, pela uniformidade do talude. Os ensaios realizados nas raízes mortas indicaram que, após quatro anos, a resistência era em torno de 1/6 da resistência das raízes vivas. Os cálculos executados mostraram que o reforço fornecido pelas raízes era o responsável pela estabilidade do talude florestado. Além disso, foi medido o nível da água e foi constatado que no talude florestado era mais baixo que no talude sem a vegetação. Wu afirma que isto contribui para um fator de segurança maior no talude florestado e recomenda que se faça análises para planejar cortes de florestas.

O segundo caso discutido por Wu (1995) é o da contribuição de árvores na estabilidade de taludes de solos colúviais em Cincinatti. A resistência ao cisalhamento residual do solo, c' , foi estimada ser igual a zero e o ângulo de atrito interno igual a 12° . Cálculos mostram que solos saturados com percolação da água paralela ao talude, com ângulos iguais ou maiores que 10° , são instáveis se o solo é saturado por infiltração paralela à superfície. O autor afirma que as encostas nessa área comumente têm taludes de 15° a 35° . Efetuados cálculos utilizando a resistência das raízes, foi encontrado que um talude com inclinação de 33° poderia ser estável. Wu (1995) conclui, então, que o corte da vegetação nos taludes com inclinação maior de 10° deveria ser evitado, pois provavelmente os taludes romperiam.

O outro caso relatado por Wu (1995) foi o anteriormente discutido por Greenway (1989) sobre um talude de 9 m de altura e um ângulo de 34° em Hong Kong, construído em 1958, revestido com “*chunam*” (uma argamassa de solo-cimento com 5 cm de espessura). Nesse talude havia três árvores que, em 1984, tinham 25-54 cm de diâmetro e espaçadas de 5 a 10m. Foram analisadas superfícies potenciais de ruptura. Levando em conta a resistência das

raízes, utilizando o método de Janbu (1973) o fator de segurança cresceu de 1,2 para 1,4 a 2,0, dependendo da razão de área de raiz usada. Pelo método da superfície de escorregamento tridimensional, o fator de segurança sem raízes ficou em 2,4 e levando em conta o reforço das raízes, ficou em 3,3. Apesar do talude ser estável, o efeito das raízes incrementou visivelmente o fator de segurança.

A remoção da vegetação pode ser a responsável por altas frequências de rupturas de taludes e incrementos na erosão (Ponçano *et al.*, 1976; Greenway, 1989; Gray, 1995). Taludes de material depositado por geleiras no Alasca, que sofreram corte de árvores, mostraram um significativo aumento na frequência dos escorregamentos na área total afetada, fenômeno que iniciou vários anos após o corte. Esse fenômeno foi suposto ser devido à deterioração gradual do sistema de raízes devida à morte das árvores (Bishop e Stevens, 1964, citados por Gray, 1974). Soares, Guidicini e Limaverde (1975), citados por Prandini *et al.* (1976) e Ponçano, Prandini e Stein (1976), também observaram fatos semelhantes nas encostas da serra de Maranguape no Ceará, onde ocorreram escorregamentos catastróficos em maio de 1974. A morte do sistema de raízes altera a resistência do solo, aumenta a taxa de rastejo e faz decrescer a estabilidade do talude (Brown e Sheu, 1975).

Estudos desenvolvidos para investigar o efeito dos desmatamentos nas taxas de erosão no Pacífico Noroeste, em diferentes áreas com altos índices pluviométricos, concluíram que em áreas perturbadas pela construção de uma estrada, a média dos escorregamentos foi 100 vezes maior que em taludes naturais não perturbados. Em áreas desmatadas, as taxas de erosão foram 5 vezes maiores que em partes vegetadas (Ziemer *et al.*, 1985, citados por Gray, 1995).

7 MODELOS GEOMECÂNICOS DE TALUDES

Este capítulo fará uma avaliação de uma série de situações geotécnicas ligadas principalmente à área rodoviária. Serão considerados alguns tipos de materiais geotécnicos e as intervenções usuais ou possíveis, além da influência da vegetação. Em todos os casos considera-se que não há nível de água permanente nem camadas de baixa resistência presentes no corte. Se este for o caso, um projeto de estabilização específica deve ser executado.

7.1 Taludes de cortes rodoviários (1:1)

Os taludes de corte rodoviários em solos não saturados, laterizados ou residuais, geralmente são cortados com inclinações 1:1. Após o término da construção de uma estrada, observa-se que os taludes laterais formados por estes cortes no terreno nem sempre atingem o grau de estabilidade e de cobertura vegetal desejados no projeto. Muitas vezes isto acontece por utilização de procedimentos inadequados .

Nestes casos é preciso estudar as condições locais de insolação, umidade e tipo de solo. Em geral, se um solo pouco fértil fica exposto à insolação, acaba tornando-se um problema para o estabelecimento da vegetação, devido às dificuldades de germinação. Como decorrência, ocorre erosão superficial, ravinamento e, em alguns casos, rupturas mais profundas.

O primeiro passo para o estabelecimento da vegetação é a preparação da superfície do solo. Este aspecto deveria ser levado em conta durante o corte dos taludes, o que minimizaria problemas na implantação da vegetação.

Para que a vegetação se desenvolva, é necessário que o solo apresente condições adequadas de nutrientes e ph. Para isso pode ser preciso o acréscimo de matéria orgânica, adubo químico e/ou calcário.

7.1.1 Cortes em solos arenosos finos

Esse tipo de solo é altamente suscetível à erosão e ravinamento se não houver uma cobertura vegetal adequada.

As alternativas podem ser: (1) enleivamento; (2) semeadura e cobertura com palha; (3) hidrossemeadura.

O enleivamento imediato da área é um dos tratamentos indicados. A vegetação rasteira diminui o fluxo superficial da água que corre sobre a superfície do solo, reduzindo o dano causado pela erosão. Uma vez estabelecidas, as raízes formam uma malha, ligando as partículas do solo e reforçando-o. O tipo de grama das leivas deve ser o mais próximo do nativo da região, pois este é o que mais facilmente se desenvolverá nas condições locais de clima.

Um dos problemas mais comuns que ocorrem no período imediatamente posterior à colocação das leivas é o escorregamento da camada após um período de chuvas. O material satura, as raízes ainda não fornecem uma ancoragem adequada e a resistência por atrito da interface nesta situação não é suficiente. Normalmente é preciso fornecer uma ancoragem mecânica por cravação de hastes (em geral, pedaços de taquara ou estacas de madeira).

O segundo procedimento recomendado para a proteção da superfície do corte é a hidrossemeadura, utilizando-se uma associação de sementes de gramíneas e leguminosas que se adaptem bem às condições locais de clima e solo e que leve à sucessão vegetal. Além de vantagens econômicas, esse processo possibilita maior rapidez de aplicação e o alcance a locais pouco acessíveis. Pelo procedimento utilizado na hidrossemeadura, as águas da chuva têm muita dificuldade ou nem conseguem remover a vegetação em germinação.

Uma vez estabelecido o enraizamento da vegetação, um segundo fenômeno pode ocorrer. A erosão é eliminada em grande parte devido a um aumento da infiltração, o que pode aumentar excessivamente a poro-pressão positiva dentro do talude. Em alguns casos, rupturas profundas podem ocorrer.

Algumas propostas:

1 - Retaludamento do perfil, com a preocupação de não aumentar excessivamente a área de infiltração. Isto é possível com um maior número de banquetas. Em cada encontro destas com a superfície do solo, executar valetas de drenagem, para que a água seja recolhida e desviada para o sistema de drenagem do talude (Fig.15). Nesta figura o perfil (1) representa o caso em que o talude é estável. O perfil (2) representa em retaludamento que diminui a infiltração. A estabilidade do perfil (1) é função da resistência do solo, da altura do corte (H) e da infiltração de água no solo.

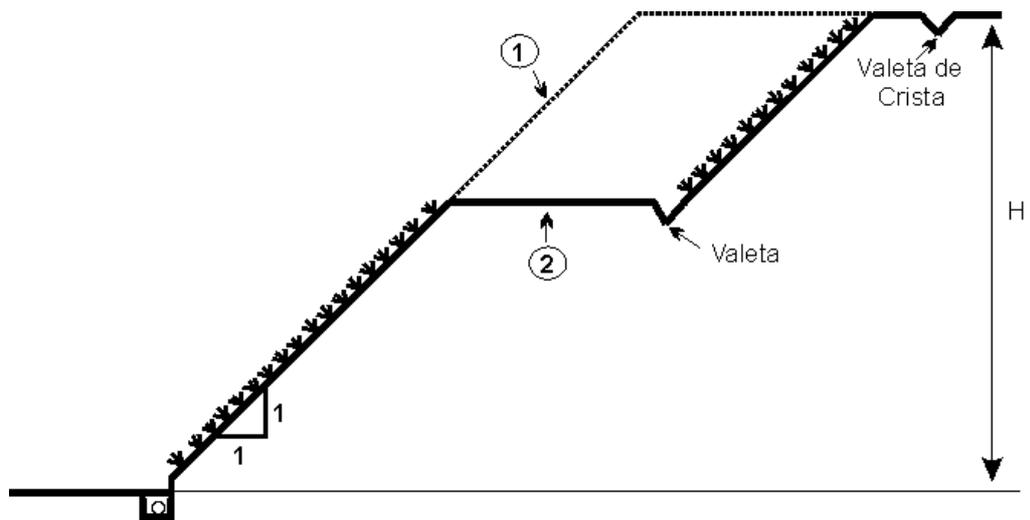


FIGURA 15 – Corte em solo arenoso fino - Retaludamento e vegetação rasteira.

2 - Execução de uma drenagem inferior no pé do corte a fim de melhorar as condições gerais do talude, para evitar uma ruptura mais profunda (Fig. 16).

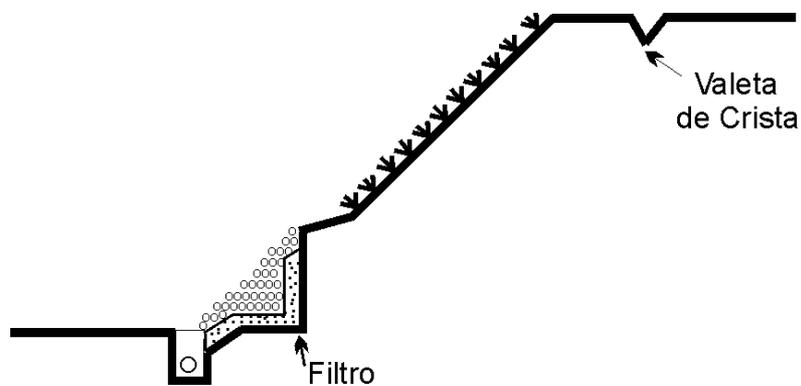


FIGURA 16 – Utilização da drenagem de pé para melhorar condições do talude.

3 - Execução de uma “drenagem de face” para evitar rupturas rasas, que consistiria em valas incorporadas a bancadas inclinadas ($i=3-8\%$) que coletariam águas que infiltram no talude (Fig. 17).

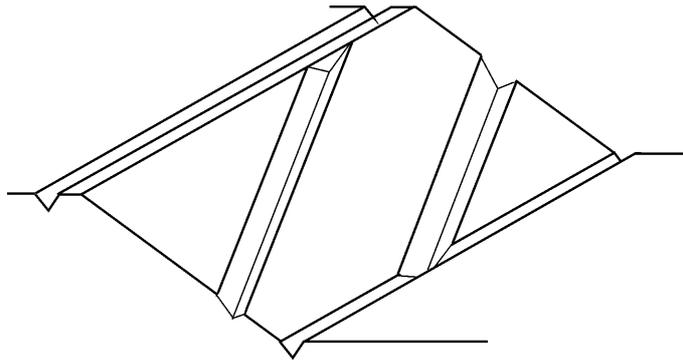


FIGURA 17 – Drenagem de face em cortes rodoviários

Tanto o enleivamento como a hidrossemeadura criam uma camada superficial que induz a uma maior permeabilidade, diminuindo a resistência a rupturas rasas no nível do limite inferior das raízes já estabelecidas. Isso pode conduzir a pequenos deslizamentos, erosões, ravinas e conseqüente comprometimento da drenagem superficial pela obstrução de valetas e provocando o acúmulo da água na pista. Para evitar esse problema, pode ser feita a associação de plantas como:

- 1 - Arbustos que possuam raízes mais profundas.
- 2 - Gramíneas que também possuam raízes mais profundas, como é o caso do capim Vetiver Grass.
- 3 - Bambu

A utilização associada de gramíneas e arbustos com diferentes comprimentos de raízes é recomendável. Enquanto as raízes das gramíneas formam a malha que protege a camada superficial do solo, as raízes de arbustos, que são um pouco mais profundas, prendem esta camada superficial a outras menos intemperizadas (Fig. 18).

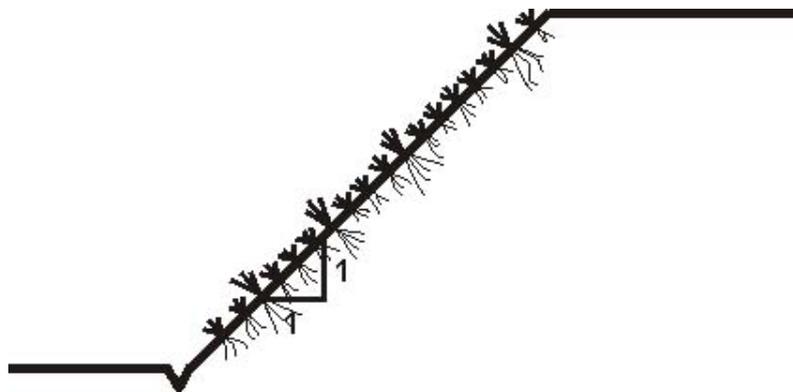


FIGURA 18 – Corte em solo arenoso fino -Vegetação rasteira associada a arbustos.

7.1.2 Cortes em solos residuais de granitóides.

Esses materiais geralmente são solos de baixa fertilidade e alta permeabilidade e embora tenham resistência adequada para estabilidade do corte, são erodíveis quando não tem proteção, principalmente quando apresentam mica em sua composição. Às vezes ocorrem escorregamentos muito rasos (< 0,5 m) durante chuvas intensas.

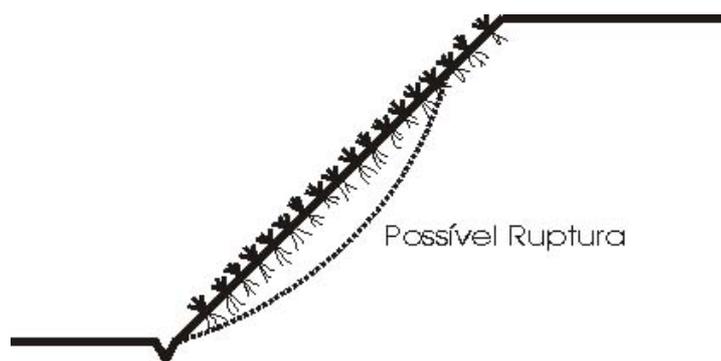


FIGURA 19 – Corte em solo granular. Vegetação com diferentes comprimentos de raiz.

O enleivamento e hidrossemeadura são soluções adequadas, mas a estabilização pode ser melhorada com a utilização de associação com vegetais de diferentes comprimentos de raízes (Fig. 19).

7.1.3 Cortes em solos argilosos plásticos.

Esses solos geralmente não têm problemas de erosão hídrica, mas sofrem degradação pela variação de umidade. Os ciclos de umedecimento/secagem abrem trincas no solo, que provocam o aumento da infiltração, diminuindo a resistência ao cisalhamento disponível.

O estabelecimento da vegetação também é indicado nesse caso, a fim de evitar os ciclos de umedecimento e secagem na parte mais superficial do solo. Mas como a vegetação geralmente aumenta a infiltração, o problema que surge é saber em que profundidade ocorrerá a ciclagem da umidade. Para resolver este problema, novamente é indicada a associação de espécies com raízes curtas e alguns poucos exemplares com raízes mais profundas para ancorar as gramíneas mais rasas (Fig.20). Esses exemplares arbustivos e mesmo arbóreos

devem ser escolhidos de forma tal que ancorem nas camadas mais profundas mas não provoquem um excessivo secamento do talude em épocas de estiagem. Assim, devem ser poucos exemplares (controle por corte) e de baixa demanda hídrica, mas com capacidade de penetração das raízes.

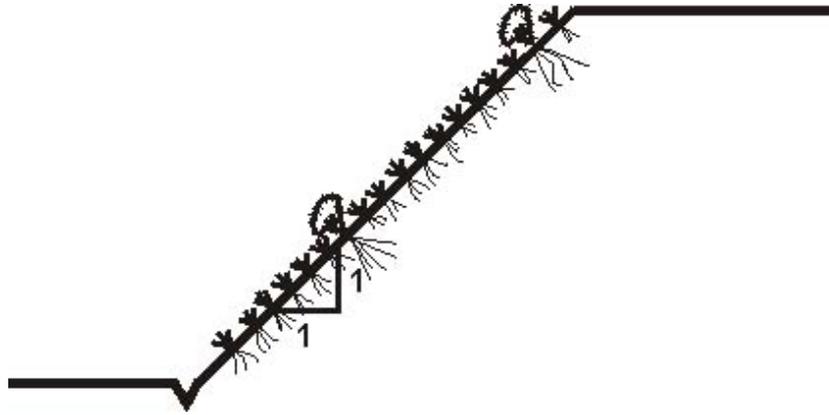


FIGURA 20 – Corte em solo argiloso. Vegetação com raízes superficiais associada a poucos exemplares de raízes mais profundas.

7.1.4 Corte em um perfil de alteração de materiais granulares

Este tipo de perfil é composto de uma camada de solo superior argiloso (horizonte B), mais fértil, mais resistente, com média a alta permeabilidade e que não tem problemas de erosão hídrica. Segue-se uma camada inferior de solo saprolítico, de baixa fertilidade, permeabilidade variável e com problemas com a erosão hídrica, principalmente na interface com a camada superior (Fig. 21).

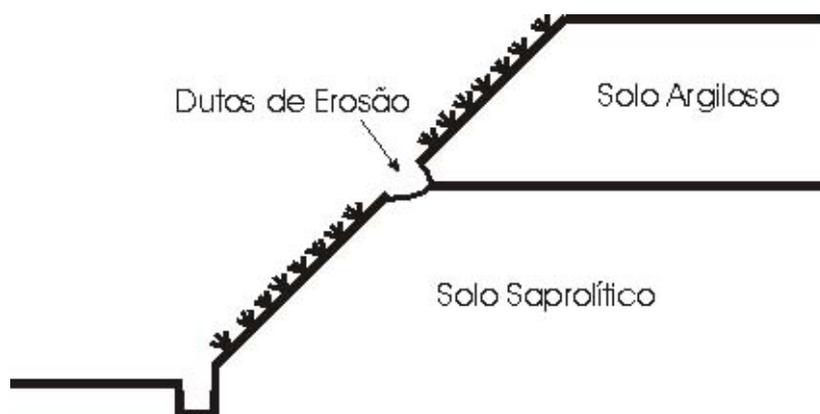


FIGURA 21 – Cortes em perfil de alteração.

Algumas propostas são:

1-Além de recobrir as duas camadas com vegetação pelos métodos convencionais, deve-se proceder ao plantio de vegetação especial na interface entre as duas camadas, que é a posição de erosão crítica.

2-Retaludar a camada menos resistente para uma inclinação de 1/1,5. No topo dessa camada executar uma banqueteta com uma vala de drenagem no pé da camada superior para coletar a água que chega na banqueteta e recobrir com vegetação pelos métodos convencionais (Fig. 22).

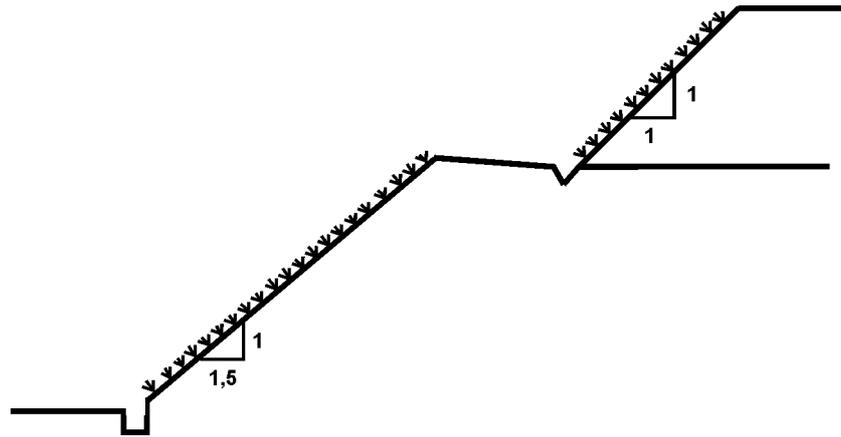


FIGURA 22 – Corte em perfil de alteração – Retaludamento.

7.1.5 Corte em solo saprolítico com diaclasamento

É um solo que apresenta uma estruturação herdada da rocha mãe, comportando-se muitas vezes como um maciço rochoso descontínuo, o que ocasiona possibilidade de quedas de blocos. Essa característica do solo faz com que, muitas vezes, com o crescimento das raízes das árvores, os blocos sejam deslocados, aumentando a possibilidade de quedas, dependendo da geometria das discontinuidades e do corte. Mesmo não havendo quedas, as árvores causam fissuras e aberturas de juntas. Esse fissuramento e as juntas criadas implicam em aumento da condutividade hidráulica do solo, que só será benéfico à estabilidade do talude se as camadas inferiores forem mais permeáveis, ocasionando um incremento na drenagem.

Os efeitos das raízes de árvores em um talude diaclasado têm aspectos positivos e negativos, tais como:

1 - A diminuição da resistência ao longo das superfícies de contato entre blocos, o que é sempre adverso à estabilidade.

2 - O envolvimento e entrelaçamento dos blocos pelas raízes, que dependendo do tamanho dos blocos e das condições geométricas, pode ser tanto benéfico, quanto adverso.

3 - Colmatação das fissuras ou pela retenção de resíduos vegetais ou por partículas de solo ou pelas próprias raízes. Dependendo das condições, isso pode ser um efeito benéfico, não dependendo das condições de drenagem.

Tendo em vista essas observações, recomenda-se que, na falta de experiência local contrária, retire-se as árvores de taludes de corte nesses solos. Somente espécies arbustivas e gramíneas devem ser mantidas.

7.1.6 Taludes em solos estratificados

Estes solos geralmente são formados por camadas alternadas de materiais argilosos e arenosos ou siltosos. Embora sua fertilidade seja variável, é na diferença de permeabilidade dos estratos que está sua maior característica.

A Figura 23 apresenta duas soluções possíveis para estes materiais.

A primeira solução consiste na execução de retaludamento do perfil, com bancadas de pequena largura (2,0 m), com valeta no topo da camada fina (Fig. 23a).

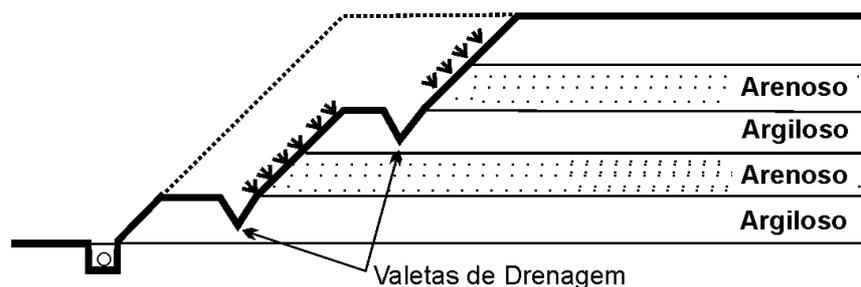


FIGURA 23 (a) – Cortes em taludes estratificados – Camada de pequena espessura

A Segunda solução consiste numa drenagem mais profunda na camada arenosa mais espessa (Fig. 23b).

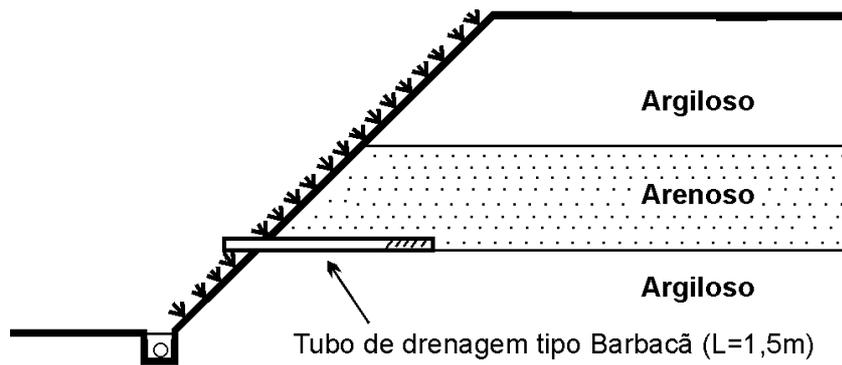
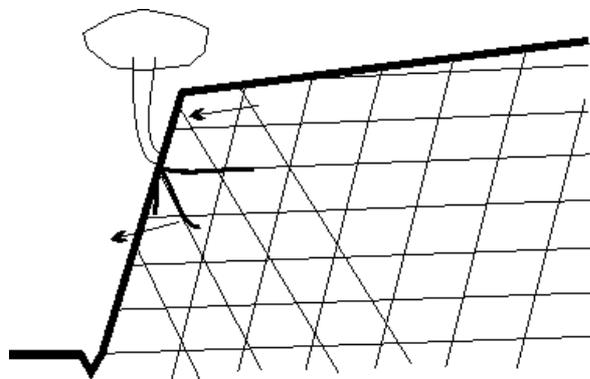


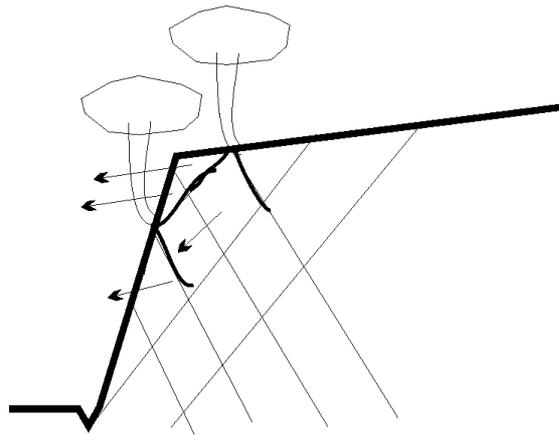
FIGURA 23 (b) – Corte em solo estratificado.
Camada arenosa mais espessa.

7.1.7 Cortes em materiais rochosos.

Tipicamente, os cortes em rocha apresentam uma face verticalizada e estéril após a abertura a fogo. Entretanto, muitos cortes apresentam crescimento espontâneo de vegetação nas fraturas após algum tempo. Nesses casos, árvores geralmente são bastante importantes no descaçamento de blocos e mesmo no deslocamento lateral dos mesmos. Isto é tão mais evidente quanto mais desfavoráveis forem as fraturas (Fig. 24). Embora a experiência local seja determinante, árvores com raízes pivotantes não devem ser mantidas. Além do efeito do crescimento das raízes, as árvores em dias de vento funcionam como alavancas poderosas. Esses efeitos são ainda mais pronunciados quando as fraturas apresentam-se alteradas ou quando o maciço apresenta-se como rocha alterada.



(a)



(b)

FIGURA 24 – Influência das raízes de árvores em cortes em materiais rochosos. a) Fraturas horizontais e favoráveis.
b) Fraturas desfavoráveis.

7.2 Aterros rodoviários (1:1.5)

Muitos dos problemas encontrados em aterros são semelhantes àqueles de cortes, porém algumas diferenças são importantes:

1 - A menor inclinação dos aterros ocasiona uma maior penetração da água de chuvas dentro do solo, com conseqüente acréscimo da poro-pressão e diminuição da estabilidade.

2 - A compactação é freqüentemente deficiente na borda, o que causa a criação de uma camada superficial de material fofo, mais permeável e com menor resistência.

Uma das melhores soluções seria a remoção pura e simples desta camada mal compactada. Entretanto, isto é muitas vezes difícil ou considerado desnecessário. Assim, a vegetação além de proteger o aterro contra a erosão e excesso de infiltração, deve estabilizar esta camada. Novamente, o uso de fixação das leivas de grama por estacas de madeira é necessário. No caso de hidrossemeadura, as raízes precisam ancorar no solo compactado.

O plantio do capim Vetiver (*Vetiveria Zizaniodes*), que é uma espécie perene, com raízes ramificadas, profundas e resistentes é bastante adequado. Estudos concluíram ser este capim muito propício para a estabilização, tanto de cortes como de aterros, devido às suas características (Grimshaw, 1995; Yoon, 1995).

Outra alternativa é a utilização do sistema “*brush-layer*”, que consiste em ir colocando galhos vivos de plantas na borda das camadas compactadas do aterro, o que fornece um reforço imediato (Fig. 25). Utilizando-se plantas que brotam por estaquia, à medida que

o sistema de raízes se desenvolve a partir desses galhos enterrados, ocorre uma estabilização adicional. Somando-se a isso, a vegetação serve também como um elemento de drenagem horizontal de borda.

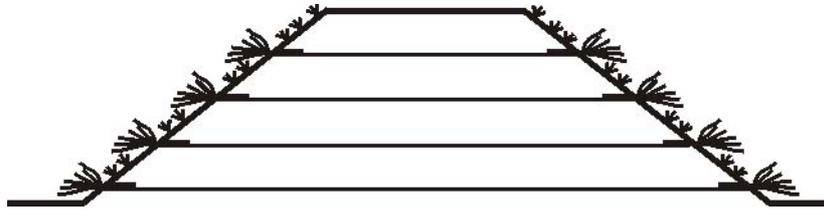


FIGURA 25 – Aterros rodoviários – Utilização de “brush layer”.

7.3 Taludes Infinitos

Taludes infinitos são definidos em Geotecnia como aqueles em que a relação de comprimento/espessura (L/D) da camada rompida é muito grande, maior do que 50, por exemplo.

Quando a espessura do solo acima do substrato menos intemperizado é menor que 1,0m (Fig.26), a ação das raízes da vegetação é muito importante, desde que elas alcancem aquele substrato. Com isso, ancoram a camada superficial à camada mais resistente. A vegetação, neste caso, deve ter raízes mais profundas de modo a atingir essa camada mais resistente. Muitas vezes as raízes ficam contidas, em grande parte, na camada superficial do solo, mais fértil. Este solo terá um incremento da coesão devido às raízes (seção 4.2) que pode ser suficiente para evitar a ruptura quando se leve em conta as laterais da ruptura.

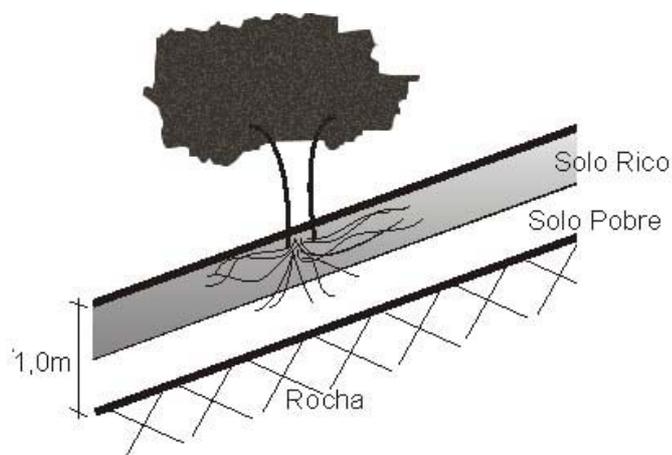


FIGURA 26 – Talude infinito com três camadas: solo/camada de transição/rocha.

No caso de solo sobre rocha ocorre problema similar (Fig. 27), havendo maior contraste no contato entre as camadas. A ancoragem das raízes só será efetiva se elas conseguirem entrar pelas fissuras da rocha e ancorar a camada superficial.

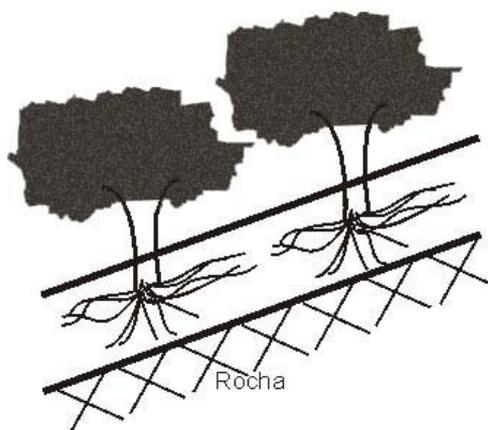


FIGURA 27 – Talude infinito com solo sobre rocha.

No caso das raízes não atingirem o substrato rochoso, elas não terão influência na ruptura de superfícies mais profundas do que aquela das raízes. Vale o mesmo comentário da resistência das bordas, se a geometria o permitir.

No caso de taludes íngremes, Subic (1995) aconselha a utilização concomitante de vegetação e estruturas de engenharia de maneira que esses elementos técnicos forneçam condições favoráveis para o desenvolvimento da vegetação e esta possa, com o tempo, exercer a função protetora e estabilizadora do solo.

7.4 Encostas Naturais com Rupturas Profundas.

No caso de encostas naturais íngremes com rupturas profundas, a vegetação tem um papel regulador de infiltração/evaporação e proteção contra a erosão. A sobrecarga não parece importante (cap. 5) e, exceto para raízes muito profundas, a existência de árvores não precisa ser considerada (Fig. 28). Entretanto, a vegetação pode ter um profundo impacto nas poropressões do talude. A partir da revisão de literatura pode-se apenas indicar a necessidade de monitoramento destas variáveis para as particulares condições de clima, geologia e vegetação do local de interesse.

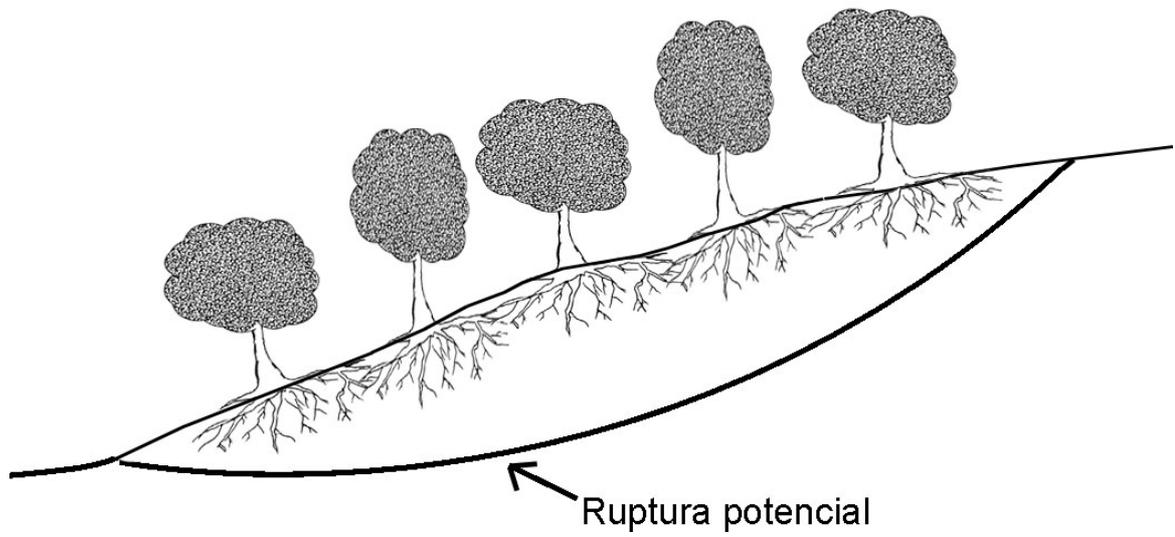


FIGURA 28 – Ruptura profunda em taludes naturais

8 CONCLUSÕES

Em geral, existe uma concordância em toda a literatura consultada quanto aos efeitos benéficos da vegetação na estabilização de rupturas rasas de solos em taludes. Contudo, foram observadas algumas controvérsias. A primeira refere-se ao efeito positivo da interceptação da chuva pela copa das árvores. A maioria dos autores considera muito importante este efeito, pois, além de diminuir a quantidade de água que alcança o solo, previne a desagregação de suas partículas. No entanto, alguns autores indicam que o efeito de desagregação é incrementado com o aumento da altura da árvore, em virtude de que as folhas da copa servem também como aglutinadoras das gotas de chuva, que, ao serem liberados pela ação da gravidade, têm sua energia cinética aumentada, incrementando a separação das partículas do solo.

O segundo ponto diz respeito à maior infiltração da água no solo, entendida como a quantidade que efetivamente infiltra no terreno em relação à quantidade precipitada. Para todos os trabalhos consultados, essa infiltração tem um efeito benéfico, enquanto diminui a água de escoamento superficial, reduzindo as distâncias do arraste das partículas. Entretanto, essa infiltração torna-se adversa na medida em que influi no acréscimo da poro-pressão, fenômeno que pode desestabilizar o talude. Por outro lado, nem todos os autores concordam que a vegetação aumenta a infiltração da água no solo, pois uma parte da água da chuva é interceptada pelas folhas, aí permanecendo por um certo período, não tendo como destino final somente a infiltração no solo. Parte dessa água é evaporada diretamente para a atmosfera, parte fica retida na camada superficial composta de folhas e restos de vegetais para, depois, ser evaporada e, ainda, outra parcela flui sub superficialmente pelo escoamento hipodérmico, não causando erosão e, ao mesmo tempo, alimentando os cursos d'água. O efeito positivo da presença da vegetação pode ser verificado quando se compara o ciclo hidrológico em solo nu ao ciclo hidrológico em solo vegetado, conforme Figura 7 no capítulo 5, onde no primeiro caso, o solo recebe integralmente a água da chuva, uma parte é evaporada diretamente da superfície, outra infiltra e a última escorre sobre o terreno, carregando junto as partículas de solo com seus nutrientes e matéria orgânica. Observa-se que os fluxogramas permitem distinguir as nítidas diferenças entre os dois ciclos, mas que permanecem questões a serem investigadas como, por exemplo, quanto ao que está sendo medido como infiltração, levando-se em conta os fatores que interferem e influenciam nesse fenômeno, como clima, tipo de solo, de vegetação e conformação do talude.

Ao mesmo tempo em que a vegetação influi na quantidade de água que alcança e penetra no solo, influi sobremaneira na quantidade de água que é retirada do solo. As raízes extraem umidade do terreno para promoverem seu crescimento e fornecerem a água essencial ao desenvolvimento da planta. Com isso, reduzem a quantidade de água das camadas superficiais do solo, fazendo decrescer a poro-pressão, efeito favorável à estabilização do talude. Por outro lado, em solos argilosos, as mudanças na umidade resultam em mudanças no volume do solo, podendo provocar fendas de dessecação, ocorrendo sérias conseqüências para obras nas vizinhanças e permitindo aberturas de fissuras no solo, que favorecem uma mais rápida entrada de água em chuvas subseqüentes.

Outro ponto controvertido a ser considerado é em relação à sobrecarga exercida pela vegetação. Muitos pesquisadores consideram que o peso da vegetação no talude age desfavoravelmente, incrementando a componente desestabilizadora. Alguns argumentam que este efeito só se torna importante quando a inclinação do talude excede o ângulo de atrito interno do solo, esquecendo-se de considerar as tensões efetivas, e outros consideram que a possibilidade da sobrecarga se tornar negativa só deve ser levada em conta em condições muito especiais, quando a chuva é muito intensa e acontece em curto período de tempo. Contrariando esta posição, Gray (1974) considera que justamente nessas condições o efeito da sobrecarga é benéfico, baseado em observações de Ter-Stepanian (1963) onde este encontrou serem menores as taxas de rastejos em taludes saturados quando sobrecarregados do que no mesmo talude sem a sobrecarga. Gray não explica em que condições Ter-Stepanian encontrou esses resultados. Informou que o talude era o mesmo, mas não se referiu se as observações foram feitas com vegetação, e após, com o corte dessa vegetação. Dependendo das condições, existem outras interferências envolvidas, não sendo só a ausência da sobrecarga a responsável pela desestabilização.

A influência do vento agindo sobre a vegetação em taludes suscita também divergências. Ao mesmo tempo em que transmite cargas dinâmicas ao talude, podendo iniciar processos de rupturas, a vegetação reduz a velocidade do vento, protegendo o solo da erosão. Alguns pesquisadores consideram o efeito negativo do vento importante somente durante tempestades intensas e ventos muito fortes. Tais condições ocorrem durante tempestades tropicais e isso deve ser investigado.

O efeito de cunha das raízes em taludes íngremes é geralmente desfavorável em função do possível deslocamento de pedras e matacões. Pode, entretanto, ser favorável em taludes onde as camadas inferiores são mais permeáveis, pela melhoria das condições de

drenagem. Em taludes de menor inclinação, o efeito de ancoragem e de contenção do solo que é fornecido pelas raízes da vegetação de maior porte é importante. Ancoradas em descontinuidades da rocha, formam um “cilindro” de solo e raízes que suporta a faixa de solo situado acima da árvore no talude. Além desses efeitos positivos, soma-se o de arqueamento desenvolvido entre as árvores, quando o espaçamento entre elas não é muito grande, o que freqüentemente ocorre em taludes vegetados.

Apesar de Suarez (1997) indicar que existem muitas contradições na literatura sobre a influência das raízes na resistência ao cisalhamento dos solos, referindo-se ao trabalho de Yagi *et al.* (1994), que concluíram não existir praticamente nenhuma variação no ângulo de atrito interno e na coesão do solo pela presença das raízes, não foi observada na bibliografia referida no presente trabalho nenhuma contradição sobre este efeito positivo das raízes. Realmente, todos os autores consultados concordam que não há influência no ângulo de atrito interno nem na coesão do solo. O que ocorre é uma contribuição à resistência ao cisalhamento na forma de coesão aparente e o reforço à resistência do solo é fornecido pela tensão à tração das raízes. No próprio trabalho de Suarez aparecem dados encontrados por Yagi *et al.* (1994) que há um acréscimo de 10 a 13,5%, podendo chegar a 30%, no fator de segurança quando feita análise levando em conta uma densa vegetação.

Concluindo, observa-se do que foi revisado, que a vegetação nativa do local é a mais indicada para proteção do ambiente e contra a erosão do solo, pois é a que conserva as condições ecológicas de origem, protegendo todo o ecossistema. Não se pode esquecer que esta vegetação faz parte do processo de evolução das encostas nas condições ambientais particulares (solo, clima, geologia, topografia). No caso da recomposição ou estabelecimento de nova vegetação deverá ser feito um detalhado estudo das condições locais (solo, clima e conformação do talude), levando em conta todos os efeitos benéficos e adversos, pois o resultado final será o balanço total entre eles.

9 SUGESTÕES DE PESQUISA

Como sugestão à continuidade dessa pesquisa, propõe-se:

1 - A quantificação da área de influência das raízes de tipos de árvores no secamento do solo, para se obter uma maior certeza na escolha correta do tipo de árvore para as necessidades de cada tipo de solo, clima e conformação de talude.

2 - A realização de ensaios de campo para medir permeabilidades da camada superficial do solo com e sem raízes, de forma a obter resultados para condições locais com vegetação nativa ou vegetação adaptada ao nosso clima.

3 - A medição da quantidade de água que é interceptada e absorvida pelas diferentes espécies de vegetação de nossa região, com seus diferentes tipos de raízes e as parcelas de escoamento superficial.

4 - A instrumentação de alguns taludes típicos em termos de solo, inclinação, vegetação e clima para se obter dados sobre seu comportamento em relação à infiltração e deslocamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMSON, L. W. Slope stabilization methods. In: ABRAMSON, L. W. (Ed.) et al. **Slope stability and stabilization methods**. New York: John Wiley & Sons, 1996. cap. 7, p. 441-582.

AITCHISON, G. D. Relationships of moisture stress and effective stress functions in unsaturated soils. In: CONFERENCE ON PORE PRESSURE AND SUCTION IN SOILS, 2., 1960, London. **Proceedings ...** London: Butterworks, [1960]. p. 47-52.

ALMEIDA, M. J. C. P.; ZADRA, A. E. Combate à erosão urbana no estado de São Paulo: uma solução definitiva. In: SIMPÓSIO SOBRE O CONTROLE DA EROSÃO, 2., 1981, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v. 1, p. 101-114.

ÁLVARES, L. O paisagismo muito além dos jardins: o desafio de reequilibrar o ambiente. **Construção São Paulo**, São Paulo, n. 1893, p. 7-12, 1984.

ANDRADE, M. H. de N.; CAMPOS, T. M. P. de; VARGAS, E. do A. Retroanálise do escorregamento da encosta do Cactáreo. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1., 1992, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: COBRAE, 1992. p. 161-172.

ATKINSON, D. Spatial and temporal aspects of root distribution as indicated by the use of a root observation laboratory. In: BRITISH ECOLOGICAL SOCIETY. **Ecological interactions in soil: plants, microbes and animals**. Oxford: A.H. Fitter, 1985. p. 43-65.

BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Porto Alegre, 1999. 269 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil Physics**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 1972. 498 p.

BELLINAZZI JUNIOR, R.; BERTOLINI, D.; LOMBARDI NETO, F. A ocorrência de erosão urbana no estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO SOBRE O CONTROLE DA EROSÃO, 2., 1981, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v. 1, p. 117-137.

BIDDLE, P. G. Tree root damage to buildings; an arboriculturist's experience. **Arboriculture Journal**, n. 3, p. 397-412, 1979.

BLIGHT, G. E. Interactions between the atmosphere and the earth. **Géotechnique**, London, v. 47, n. 4, p. 715-767, 1997.

BLUNT, S. M.; DORKEN, T. C. Erosion of highway slopes in upland Wales: problems and solutions. In: INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS. **Vegetation and slopes: stabilisation, protection and ecology**. London: D.H. Barker, 1995. p. 95-107.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983. 647 p.

BRASIL. Ministério do Interior. **Vegetação atual da Região Sul**. Porto Alegre, 1978. 115 p. (Série Planejamento e estudos regionais, 2).

BROWN, C. B.; SHEU, M. S. Effects of deforestation on slopes. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York, v. 101, n. 2, p. 147-166, Feb. 1975.

BRUGGER, P. J., EHRLICH, M.; LACERDA, W. A. Movements, piezometric level and rainfall at two natural soil slopes. In: PAN-AMERICAN SYMPOSIUM LANDSLIDES, 2., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1997. v. 1, p. 13-19.

CARLSTRON FILHO, C.; SALOMÃO, F. X. de T. Experiência acumulada em estudos geológico-geotécnicos de estabilidade de taludes em dois trechos ferroviários no Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1., 1976. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABGE. 1976. v. 1, p. 293-303.

CASSOL, E. A. A experiência gaúcha no controle da erosão rural. In: SIMPÓSIO SOBRE O CONTROLE DE EROSÃO, 2., 1981, São Paulo, **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v. 1, p. 149-181.

CHENEY, J. E.; BURFORD, D. Damaging uplift to a three-storey office block constructed on a clay soil following the removal of trees. In: CONFERENCE OF SETTLEMENT OF STRUCTURES, 1974, Cambridge. **Proceedings...** London: Pentech, 1975. p. 337-343.

CHENEY, J. E. 25 years heave of a building constructed on clay, after tree removal. **Ground Engineering**, v. 21, n. 5, p. 13-27, July 1988.

COPPIN, N.; STILES, R. Ecological principles for vegetation establishment and maintenance. In: MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. (Ed.). **Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach**. London: E & FN Spon, 1995. p. 59-87.

CRONEY, D.; COLEMAN, J. D. Pore pressure e suction in soil. In: CONFERENCE ON PORE PRESSURE AND SUCTION IN SOILS, 2., 1960, London. **Proceedings...** London: Butterworks, [1960]. p. 31-37.

DIAS, A. C. **Reabilitação de áreas mineradas de bauxita**. In: CONGRESSO NACIONAL SOBRE ESSÊNCIAS NATIVAS, Campos do Jordão, 1982.

DOBSON, M. The root systems. **Arboricultural Research and Information Note**. 1995. 130/95/ARB.

DRISCOLL, R. The influence of vegetation on the swelling and shrinking of clay soils in Britain. **Géotechnique**, London, v. 33, n. 2, p. 93-105, 1983.

DRISCOLL, R. M. C.; CRILLY, M. S.; BUTCHER, A. P. Foundations for low-rise buildings. **The Structural Engineer**, v. 74, n. 11/4, June 1996.

Duplica a área de florestas no Estado. **Zero Hora**, Porto Alegre. 03/11/2000. p. 30.

EKANAYAKE, J. C.; PHILLIPS, C. J. A method for stability analysis of vegetated hillslopes: an energy approach. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 36, n. 6, p. 1172-1184, 1999.

EROSÃO. In: ENCICLOPÉDIA MIRADOR INTERNACIONAL. São Paulo: Encyclopaedia Britannica do Brasil, 1979. v. 8, p. 3997-4001.

FAIRLEY, R. I. Grass root production in restored soil following opencast mining. In: BRITISH ECOLOGICAL SOCIETY. **Ecological interactions in soil: plants, microbes and animals**. Oxford: A.H Fitter, 1985. p. 81-85.

FERREIRA, C. S. de M. Erosão – Investigações de campo e de laboratório desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Rodoviárias. In: SIMPÓSIO SOBRE O CONTROLE DA EROSÃO, 2., 1981, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v. 1, p. 203-215.

FERRI, M. G. **Botânica: morfologia externa das plantas (organografia)**. 15. ed. São Paulo: Nobel, 1985.

FITTER, H. A. Functional significance of root morphology and root system architecture. In: BRITISH ECOLOGICAL SOCIETY. **Ecological interactions in soil: plants, microbes and animals**. Oxford: A. H Fitter, 1985. p. 87-106.

FLORINETH, F. Erosion control above the timberline in South Tyrol, Italy. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE INTERACTION OF VEGETATION WITH NATURAL AND FORMED SLOPES, 1974, Oxford. **Proceedings...** London: Thomas Telford, 1995. p. 85-94.

FONSECA, R. P. Hidrossemeadura: um processo de prevenção e controle de erosão em áreas terraplenadas. In: SIMPÓSIO SOBRE O CONTROLE DA EROSÃO, 2., 1981, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v. 2, p. 235-239.

FOURIE, A. B.; ROWE, D.; BLIGHT, G. E. The effect of infiltration on the stability of the slopes of a dry ash dump. **Geotechnique**, London, v. 49, n. 1, p. 1-13, 1999.

FRAZÃO, E. B.; MIOTO, J. A.; SANTOS, A. R. Fenômeno de desagregação superficial em rochas argilosas – sua implicação na estabilidade de taludes viários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1., 1976, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABGE, 1976. v. 1, p. 211-228.

FREDLUND, D. G.; RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley & Sons, 1993.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 521-532, 1994.

FREDLUND, D. G.; XING, A.; HUANG, S. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p. 533-546, 1994.

FREDLUND, D. G. et al. The relationship of the unsaturated soil shear strength to the soil-water characteristic curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, n. 3, p. 440-448, 1996.

GAN, J. K. M.; FREDLUND, D. G. Shear strength characteristics of two saprolitic soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, n. 4, p. 595-609, 1996.

GARDNER, W. R. Soil suction and water movement. In: CONFERENCE ON PORE PRESSURE AND SUCTION IN SOILS, 2., 1960, London. **Proceedings...** London: Butterworks [1960]. p. 137-140.

GEHLING, W. Y. Y.; DIAS, R. D. Influência da sucção na resistência ao cisalhamento dos solos tropicais do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 8., Porto Alegre, 1986. **Anais...** Porto Alegre: ABMS, 1986. v. 2, p. 193-197.

GELLATLEY, M. J. et al. Interaction of vegetation with the LUL surface railway system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE INTERACTION OF VEGETATION WITH NATURAL AND FORMED SLOPES, 1974, Oxford. **Proceedings...** London: Thomas Telford, 1995. p. 60-71.

GEOTECHNICAL manual for slopes. 2. ed. Hong Kong: Geotechnical Control Office, Engineering Development Department, 1984. 295 p.

GOMES, C. R. Comentários sobre alguns métodos de controle de erosão e travamento superficial de taludes. In: SIMPÓSIO SOBRE O CONTROLE DA EROSÃO, 2., 1981, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v. 2, p. 227-233.

GRAY, D. H. Effects of forest clear - cutting on the stability of natural slopes. **Bulletin of the Association of Engineering Geologists**, v. 7, n. 1/2, p. 45-66, 1970.

GRAY, D. H. Reinforcement and stabilisation of soil by vegetation. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York, v. 100, n. 6, p. 695-699, 1974.

GRAY, D. H.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v. 109, n. 3, p. 335-353, 1983.

GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. Biothechnical stabilization of highway cut slope. **Journal of Geotechnical Engineering**, New York, v. 118, n. 9, p. 1395-1409, 1992.

GRAY, D. Influence of vegetation on the stability of slopes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE INTERACTION OF VEGETATION WITH NATURAL AND FORMED SLOPES, 1994, Oxford. **Proceedings...** London: Thomas Telford, 1995. p. 2-25.

GREENWAY, D. R. Vegetation and slopes stability. In: ANDERSON, M. G.; RICHARDS, K. S. (Ed.). **Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology**. Chichester: John Wiley, 1989. cap. 6, p. 187-230.

GRIMSHAW, R. G. Vetiver grass - its use for slope and structure stabilization under tropical and semi tropical conditions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE INTERACTION OF VEGETATION WITH NATURAL AND FORMED SLOPES, 1974, Oxford. **Proceedings...** London: Thomas Telford, 1995. p. 26-35.

GUERRA, A. J. T. Processos erosivos nas encostas. In: BERTRAND BRASIL S.A. **Geomeofologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: 1994. Cap. 4, p. 149-209.

HELLIWELL, D. R. Tree growth and changes in soil moisture - 1. Effects of changing water levels in the soil. **Arboricultural Journal**, v. 7, p. 93-95, 1983.

HELLIWELL, D. R. Rooting habits and moisture requirements of trees and other vegetation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE INTERACTION OF VEGETATION WITH NATURAL AND FORMED SLOPES, 1994, Oxford. **Proceedings...** London: Thomas Telford, 1995. p. 260-263.

HODGE, S. J.; WHITE, J. E. J. **The ultimate size and spread of trees commonly grown in towns**. Survey: The Arboricultural Advisory and Information Service, 1990. (Arboriculture research note, 84).

IMPERIAL COLLEGE. Civil Engineering. Soil Mechanics Group. **Pore pressure and vegetation**. London, [1997?]. (Contract E3 report).

IMPERIAL COLLEGE. Civil Engineering. Soil Mechanics Group. **Soil moisture deficit and ground movement**. London, 1997.

INSTITUTO DE BOTÂNICA DE SÃO PAULO. **Recomposição da vegetação da Serra do Mar em Cubatão**. São Paulo: IMESP, 1989. 68 p. (Série pesquisa).

LAWSON, M.; O'CALLAGHAN, D. A critical analysis of the role of trees in damage to low rise buildings. **Journal of Arboriculture**, v. 21, n. 2, p. 90- 97, 1995.

LEE, T. S. Ground water conditions. In: ABRAMSON, L. W. (Ed.) et al. **Slope stability and stabilization methods**. New York: John Wiley, 1996.cap. 3, p. 107-167.

- LEW, B.; SOARES, M. M. Um caso típico de trincas em residência devido a solo expansivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: ABMS/ABGE, 1998. v. 1, p. 15-19.
- LIM, T. T. et al. Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, n. 4, p. 618-628, 1996.
- MACLEOD, R. D.; CRAM, W. J. **Forces exerted by tree roots**. Survey: The Arboricultural Advisory and Deformation Service, 1996. (Arboriculture research and information note, 134).
- MANUAL de Conservación del Suelo y del Agua. 3. ed. Chapingo, México: Colegio de Postgraduados, 1991.
- MANUAL de Conservação do Solo e Água. 3. Ed. .Porto Alegre, Rio Grande do Sul/ Secretaria da Agricultura, 1985.
- MARINHO, F. A. M. Cavitação e a medição direta de sucção. In: ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 1995, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 1995. p. 126-142.
- MASSAD, F. *et al.* “*Debris flows*” em Cubatão, São Paulo: obras de controle e impactos ambientais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: ABMS/ABGE, 1998. v. 2, p. 1265-1272.
- MARSLAND, F. **Vegetation and embankment movements**. London, 1996. MSc Thesis University of Imperial College, London, 1996.
- MAZUCHOWSKY, J. Z. A experiência brasileira no combate à erosão - Programa de controle da erosão no noroeste do Paraná. In: SIMPÓSIO SOBRE CONTROLE DE EROSÃO, 2., 1981, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v. 1, p. 183-200.
- MENDONÇA, M. B. de; POMPEI, M.; SARAMAGO, R. P. A preservação das encostas por meio da urbanização de favelas no município do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: ABMS/ABGE, 1998. v. 1, p. 457-463.

MORAN, B. J. J. The use of vegetation in stabilizing artificial slopes. In: CONFERENCE ON BIOLOGY AND CIVIL ENGINEERING, 1948, London. **Proceedings...** London, 1948. p. 113-126.

MORGAN, R. P. C. Wind erosion control. In: MORGAN, R.P.C.; RICKSON, R. J. (Ed.). **Slope stabilization and erosion control; a bioengineering approach.** London: E & FN Spon, 1995. p. 191-203.

MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. Water erosion control. In: MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. (Ed.) **Slope stabilization and erosion control; a bioengineering approach.** London: E & FN Spon, 1995, p. 133-190.

MUD slides. Disponível em:<<http://www.zetatalc.com/info/tinfo16g.htm>>. Acesso em mar. 1997.

NASCIMENTO FILHO, A. C. do. Erosão. In: ENCICLOPÉDIA DL. Rio de Janeiro: Delta, 1963. v. 13, p. 7055-7072.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo: Villibor, 1995. 240 p.

NOGUEIRA, J. C. B. Reflorestamento heterogêneo com essências indígenas. **Boletim Técnico do Instituto Florestal**, São Paulo, v. 24, p. 1-77, mar. 1977.

NOVAIS, F. de L. et al. O problema de erosão nos taludes de estradas de Minas Gerais. In: SIMPÓSIO SOBRE O CONTROLE DE EROSIÃO, 2., 1981, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v. 1, p. 235-247.

PELTIER, R. Les recherches sur la succion des sols. In: CONFERENCE ON PORE PRESSURE AND SUCTION IN SOILS, 2., 1960, London. **Proceedings...** London: Butterworks, [1960]. p. 19-20.

PEREIRA, F. M. de B. **Reflorestamento da encosta a montante da Rua Tabatinguera.** Rio de Janeiro, 1968. 16 p.

PEREIRA, V. de P.; SOUZA, A. O.; BONADIO, J. D. B. Alguns aspectos de erosão em áreas urbanas. In: SIMPÓSIO SOBRE O CONTROLE DE EROSIÃO, 2., 1981, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v. 2, p. 163-171.

PERRY, T. O. The ecology of tree roots and the practical significance thereof. **Journal of ARBOR**, v. 8, n. 8, p. 197-211, 1982.

PINHEIRO, R. J. B. **Estudo de alguns casos de instabilidade da encosta da Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, 2000. 318 p. Tese (Doutorado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

PONÇANO, W. L.; PRANDINI, F. L.; STEIN, D. P. Condicionamentos geológicos e de ocupação territorial nos escorregamentos de Maranguape, Estado do Ceará, em 1974. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1., 1976, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CBGE, 1976. v. 2, p. 323-339.

PONTES, A. B. Controle da erosão na Bacia do Paranapanema. In SIMPÓSIO SOBRE O CONTROLE DE EROSÃO, 2., 1981, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v. 1, p. 13-50.

PRANDINI, F. L. et al. **Atuação da cobertura vegetal na estabilidade das encostas:** uma resenha crítica. São Paulo: IPT, 1976. 22p. (Publicação IPT, 1074).

PRYKE, J. F. S. Differential foundation movement of domestic buildings in South-East England; distribution, investigation, causes and remedies. In: CONFERENCE OF SETTLEMENT OF STRUCTURES, 1974, London. **Proceedings...** London: Pentech, 1975. p. 403-419.

RAVINA, I. The influence of vegetation on moisture and volume changes. **Géotechnique**, London, v. 33, n. 2, p. 151-157, 1983.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; EICHHORN, S. E. **Biologia vegetal.** 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1996. 728 p.

RENARD, K. G. et al. Revised universal soil loss equation. In: **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 46, n. 1, p. 30-33, 1991.

RICKSON, R. J. Simulated vegetation and geotextiles. In: MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. (Ed.). **Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach.** London: E & FN Spon, 1995. p. 95-125.

RIDLEY, A. R.; BURLAND, J. B. A new instrument for the measurement of soil moisture suction. **Géotechnique**, London, v. 43, n. 2, p. 321-324, 1993.

RIO GRANDE DO SUL (Estado). Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. **ES-OC 04: Proteção vegetal - Especificação de serviço**. Porto Alegre, 1991.

RIO GRANDE DO SUL. Governo do Estado. **Projeto Biodiversidade**. Porto Alegre, 1998.

ROCHA, L. P. C. da; DE SOUZA, R. C.; BOGOSSIAN, F. Curva da Ferradura – soluções de estabilização de encosta na serra de Friburgo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., 1998, Brasília. **Anais...** Brasília: ABMS/ABGE, 1998. v. 2, p. 1315-1322.

RODARTE, L. H. O.; FERNANDES, G. W.; OLIVEIRA, J. A. de. **Características físico-químicas de solos naturais e em áreas degradadas por atividades de construção rodoviária em Campo Rupestre**. Trabalho apresentado no 3º Encontro Ibero-Americano de Unidades Ambientais do Setor de Transportes, 1998.

ROSA, F. S. et al. A erosão na região metropolitana da Grande São Paulo. In: SIMPÓSIO SOBRE O CONTROLE DE EROSÃO, 2., 1981, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v. 1, p. 75-100.

RS Apresenta Inventário Florestal. **Correio do Povo**, Porto Alegre. 05/06/2001. p. 7.

SAMUELS, S. G.; CHENEY, J. E. Long-term heave of a building on clay due to tree removal. In: CONFERENCE OF SETTLEMENT OF STRUCTURES. 1974, London. **Proceedings...** London: Pentech, 1975. p. 212-220.

SANTORO, E.; CUNHA, M. A. Estudos geológicos-geotécnicos para consolidação de uma ferrovia localizada na Serra de Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1., 1976, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CBGE, 1976. v. 1, p. 371-383.

SANTOS NETO, P. M.; CARVALHO, J. C. de. Métodos para medir a sucção em solos não saturados. In: ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 1995, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 1995. p. 143-158.

SCHOFIELD, R. K.; PENMAN, H. L. The principles governing transpiration by vegetation. In: CONFERENCE OF BIOLOGY AND CIVIL ENGINEERING, 1948, London. **Proceedings...** London, 1948. p. 75-85.

SHARMA, S. Slope Stability Concepts. In: ABRAMSON, L. W. (Ed.) et al. **Slope stability and stabilization methods**. New York: John Wiley & Sons, 1996. cap. 6, p.337-440.

SIDLE, R. C.; SWANSTON, D. N. Analysis of small debris slide in coastal Alaska. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 19, n. 2, p. 167-174, May 1982.

SILVA, R. F. da (Coord.). Peculiarities of *in situ* behavior of tropical lateritic and saprolitic soils in their natural conditions: erosion. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, 1., 1985, Brasília. **Proceedings...** [São Paulo: ABMS, 1985]. v. 3,

SILVEIRA, J. Incidência da erosão em taludes em trecho de rodovia. In: SIMPÓSIO SOBRE O CONTROLE DE EROSÃO, 2., 1981. São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v. 1, p. 249-256.

STYCZEN, M. E.; MORGAN, R. P. C. Engineering Properties of Vegetation. In: MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. (Ed.). **Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach**. London: E & FN Spon, 1995. p. 5-47.

SUAREZ D. J. La vegetación en la estabilización de deslizamientos. In: PAN-AMERICAN SYMPOSIUM OF LANDSLIDES, 2., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS, 1997. v. 2, p. 739-746.

SUBIC, M. Bioengineering of steep slopes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE INTERACTION OF VEGETATION WITH NATURAL AND FORMED SLOPES, 1994, Oxford. **Proceedings...** London: Thomas Telford, 1995. p. 276-279.

VANAPALLI, S. K. et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, n. 3, p. 379-392, June 1996.

WALKER, B. F.; MOHEN, F. J. Groundwater prediction and control, and negative pore water pressure effects. In: AN EXTENSION COURSE ON SOIL SLOPE INSTABILITY AND STABILISATION, 1987, Sydney. **Proceedings...** Sidney: A.A. Balkema, 1987. p. 121-181.

WALLWORK, J. A. **Ecology of soil animals**. London: McGraw-Hill, 1970. 283 p.

WARD, W. H. Soil movement and weather. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3., 1953, Zurich. **Proceedings...** Zurich, 1953. v. 4, p. 477-482.

WOLLE, C. M. **Taludes naturais - mecanismos de instabilização e critérios de segurança**. São Paulo, 1980. 345 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1980.

WOLLE, C. M. (Coord.). Peculiarities of *in situ* behavior of tropical lateritic and saprolitic soils in their natural conditions: slope stability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL LATERITIC AND SAPROLITIC SOILS, 1., 1985, Brasília. **Proceedings...** [São Paulo: ABMS, 1985]. v. 3,

WOLLE, C. M. Poluição e escorregamentos – causa e efeito na Serra do Mar, em Cubatão – SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 8., 1986, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABMS, v. 7, p. 178-190.

WOLLE, C. M. Efeito tridimensional nos escorregamentos translacionais da Serra do Mar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E FUNDAÇÕES, 6., 1990, Salvador. **Anais...** Salvador: ABGE/ABMS, 1990. v. 1, p. 403-410.

WOLLE, C. M. Uma proposta metodológica para estudo da influência de sistemas radiculares da espécie vegetal *Eucalyptus Grandis* na resistência ao cisalhamento do solo. In: PAN-AMERICAN SYMPOSIUM OF LANDSLIDES, 2., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS, 1997. v. 2, p. 683-691.

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

WU, T. H. et al. A study of soil root interaction. **Journal Geotechnical Engineering**, New York, v. 114, n. 12, p. 135-175, Dec. 1988a.

WU, T. H., BEAL, P. E.; LAN, C. *In situ* shear tests of soil root systems. **Journal Geotechnical Engineering**, New York, v. 114, n. 12, p. 176-194, Dec. 1988b.

WU, T. H.; RIESTENBERG, M. M.; FLEGE, A. Root properties for design of slope stabilization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE INTERACTION OF VEGETATION WITH NATURAL AND FORMED SLOPES, 1994, Oxford. **Proceedings...** London: Thomas Telford, 1995. p 52-59.

WU, T. H. Slope stabilization. In: MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. (Ed.) **Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach.** London: E & FN Spon, 1995. cap.7, p. 221-248.

YOON, P. K. Unique characteristics and case studies of use of Vetiver Grass Hedgerows (VGHR). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE INTERACTION OF VEGETATION WITH NATURAL AND FORMED SLOPES, 1994, Oxford. **Proceedings...** London: Thomas Telford, 1995. p. 291-296.

ANEXO A - VEGETAÇÃO NATIVA DA REGIÃO SUL

Conforme Brasil (1973), citado por Cassol (1981), a vegetação natural do Rio Grande do Sul pode ser enquadrada em dois grandes grupos: a mata e o campo.

No início da colonização a mata nativa cobria cerca de 40% da superfície do Rio Grande do Sul, e a superfície restante eram campos, rios, lagos e fontes de água. Cerca de 35% dessa mata foi derrubada para o uso dos solos com agricultura, pecuária e utilização da madeira (Rio Grande do Sul. Governo do Estado, 1998).

Conforme Cassol (1981) a formação da vegetação do RGS pode ser classificada como:

1 - Formações florestais- conforme as variações do clima e do solo da região onde ocorrem, distinguem-se quatro tipos:

1.1 - Mata subtropical alta – região do Alto Uruguai, áreas das Encostas Inferior e Superior do Noroeste, borda sul do Planalto Médio e parte leste do Planalto Médio.

1.2 - Mata de araucárias – Campos de Cima da Serra (área de maior altitude), parte leste do Planalto Médio e pequenas áreas da Encosta Superior do Nordeste e do Alto Uruguai.

1.3 - Mata subtropical alta mista com araucárias- parte central do Planalto Médio

1.4 - Mata subtropical com ocorrência na maior parte da Serra do Sudeste e em pequenas áreas da Depressão Central, em geral associada aos campos.

2 - Formações campestres -

2.1 - Campos de Altitude – região dos Campos de Cima da Serra.

2.2 - Campos Finos ocupam quase toda a região da campanha.

2.3 - Campos Mistos- quase toda a região das Missões e parte da Depressão Central.

2.4- campos Grossos ocorrem nas áreas da Campanha com solos derivados do arenito, em pequenas áreas das Missões e extensas áreas do Planalto Médio e da Depressão Central.

3 - Formações litorâneas apresentam vegetação rasteira, flora lacustre e campos de qualidade regular.

4 - Formações especiais são pouco freqüentes, destacando-se as Matas de Galeria, Parque de Espininhos, Parque de Cina-Cina, Capões de Timbó e Vegetação Higrófila.

Ainda conforme Cassol, resta pouca vegetação nativa no Estado.

A seguir o Quadro 8 fornecido pelo Ministério do Interior (1978) com espécies da vegetação nativa da Região Sul.

QUADRO 8 - Nome científico e vulgar de espécies de plantas da região sul

NOME CIENTÍFICO	NOME VULGAR
<i>Acácia decurrens</i>	acácia negra
<i>Acácia banariensis</i>	unha-de-gato
<i>Acicarpa stathulata</i>	picão da praia
<i>Actinostemon concolor</i>	laranjeira do mato
<i>Acrocomia siderocarpa</i>	palmeiras de macaúba
<i>Acrostichum aureum</i>	samambaia
<i>Alchornea triplinervea</i>	tanheiro, tapiá-guaçu
<i>Andropogon lateralis</i>	gramíneas típicas de banhado
<i>Andropogon virgatus</i>	gramíneas típicas de banhado
<i>Annona glabra</i>	cortiça
<i>Arecastrum romanzoffianum</i>	jerivá
<i>Araucária angustifolia</i>	araucária
<i>Aspidosperma olivaceum</i>	peroba
<i>Apuleia leiocarpa</i>	grápia
<i>Avicennia schaueriana</i>	mangue siriúva
<i>Avicennia tomentosa</i>	mangue siriúba
<i>Cabralea glaberrima</i>	canjerana
<i>Calyptranthes strigipes</i>	guamirim, chorão
<i>Campamanésia spp</i>	guabiroba
<i>Cassia multijuga</i>	canafistula
<i>Cedrela fissilis</i>	cedro
<i>Cesearia decandra</i>	guaçatunga
<i>Cordia trichotoma</i>	louro
<i>Cryptocarya aschersoniana</i>	canela fogo
<i>Cryptocarya moschata</i>	canela cega, noz moscada do Brasil
<i>Daphnopsis racemosa</i>	embira
<i>Dicksonia selloniana</i>	xaxim
<i>Drimys brasiliensis</i>	casca d'anta
<i>Enterolobium contortisilisquum</i>	timbaúva
<i>Eucalyptus spp</i>	eucalipto
<i>Eugenia rostrifolia</i>	batinga
<i>Eugenia pyriforme</i>	uvaia
<i>Eugenia uniflora</i>	pitangueira
<i>Euplassa cantareirae</i>	carvalho brasileiro
<i>Euterpe edulis</i>	palmito
<i>Fagara rhoifolia</i>	mamica de cadela
<i>Ficus organensis</i>	figueira branca
<i>Geonoma elegans</i>	guariyana, juricana
<i>Geonoma gamiova</i>	palmeira gemiova, ouricana
<i>Gochnatia polymorpha</i>	cambará
<i>Guadua spinosissima</i>	taquaraçu

NOME CIENTÍFICO	NOME VULGAR
<i>Hemitelia setosa</i>	xaxim
<i>Hibiscus tiliaceus</i>	urica
<i>Holocalyx balancea</i>	alecrim
<i>Ilex dumosa</i>	caúna
<i>Ilex spp</i>	erva-mate, caúva
<i>Ipomoea pes-caprae</i>	salsa da praia
<i>Iresine portucaloides</i>	família amarantácea
<i>Laguncularia racemosa</i>	mangue branco
<i>Lythraea brasiliensis</i>	aroeira
<i>Luehea divaricata</i>	açoita cavalo
<i>Luehea paniculata</i>	açoita cavalo
<i>Machaerium stipitatum</i>	marmeleiro do mato, farinha seca
<i>Matayba spp</i>	camboatá
<i>Mirocarpus frondosus</i>	cabriúva
<i>Mirtaceas sp</i>	araçás
<i>Myrcia bombycina</i>	guamirim do campo
<i>Myrcia multiflora</i>	camboim
<i>Myrcianthes gigantea</i>	guabiju
<i>Myrciaria trunciflora</i>	jabuticaba
<i>Myrceugenia myrcioides</i>	guamirim do campo
<i>Myrceugenia spp</i>	cambuí
<i>Nectandra lanceolata</i>	canela amarela
<i>Nectandra spp</i>	canela
<i>Ocotea catharinensis</i>	canela preta
<i>Ocotea porosa</i>	imbuia
<i>Ocotea pretiosa</i>	canela sassafraz
<i>Ocotea puberula</i>	canela sebo
<i>Ocotea pulchella</i>	canela lajeana
<i>Ocotea spp</i>	canela
<i>Parapiptadenia rigida</i>	angico amarelo
<i>Patagonula americana</i>	guajuvira
<i>Pltophorum dubium</i>	canafistula
<i>Pinus spp</i>	pinus
<i>Piptadenia falcata</i>	sapuva do campo
<i>Prumus sellowii</i>	pessegueiro brabo
<i>Rhizophora mangle</i>	mangue vermelho
<i>Roupala spp</i>	carvalho brasileiro
<i>Salix chilensis</i>	salgueiro
<i>Sebastiana klotzschiana</i>	branquilha
<i>Schizolobium parahyba</i>	guapuruvu
<i>Sloanea guianensis</i>	laranjeira do mato
<i>Solanum erianthum</i>	fumo brabo
<i>Sorocea bonplandii</i>	caucho, carapicica
<i>Spartina montevidensis</i>	praturá
<i>Stryplinodendron</i>	barbatimão
<i>Tabebuia chrysotricha</i>	ipê amarelo
<i>Tabebuia avellanadae</i>	ipê roxo
<i>Torrubia olfersiana</i>	maria mole
<i>Vigna luteola</i>	feijão da praia

ANEXO B - A VEGETAÇÃO NA CONSERVAÇÃO DO SOLO – SUGESTÕES DE VEGETAÇÃO A SER UTILIZADA.

O Manual de conservação do solo e água foi elaborado por técnicos do Departamento de Recursos Renováveis da Secretaria da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul, com o objetivo de possibilitar aos agricultores da região, a utilização das práticas conservacionistas mais adequadas à agricultura do Estado.

Esse manual ratifica a importância da cobertura vegetal para a proteção do solo, principalmente em regiões de clima tropical, e faz sugestões de espécies vegetais para cada finalidade específica. Cita, ainda, os atributos desejáveis da vegetação para serem eficientes contra a erosão, que são:

- 1 – Rapidez de crescimento.
- 2 – Formação apropriada da copa.
- 3 – Grande volume foliar e formação de ramos bem distribuída.
- 4 – Tamanho e tipo do sistema radicular.
- 5 – Valor fertilizante do vegetal.
- 6 – Resistência às oscilações bruscas do clima.
- 7 – Resistência às deficiências nutritivas e edáficas.

“Sugestões de vegetais a utilizar”.

Entre as árvores "pioneiras indiferentes", definidas como aquelas que apresentam bom desenvolvimento em diversas regiões do Estado, nas mais variadas condições topográficas e sem preferência marcante por solos úmidos ou secos, citam-se as seguintes espécies nativas:

Pinheiro brasileiro (*Araucaria angustifolia*)

Louro (*Cordia trichotoma*)

Cabreúva (*Myrcarpus frondosus*)

Guatambu (*Balfourodendron riedelianum*)

Ipê-roxo (*Tabebuia ipe*)

Angico-vermelho (*Parapiptadenia rigida*)

Grápia (*Apuleia leiocarpa*)

Entre as espécies consideradas “pioneiras higrófitas”, encontradas em solos úmidos de várzeas e planícies. ao longo dos rios e lagoas, fundo de vales e ao pé das encostas, citam-se:

Cedro (*Cedrela fissilis*)
Caroba (*Jacaranda micrantha*)
Guajuvira (*Patagonula americana*)
Raba-de-bugio (*Lonchocarpus neuroscapha*)
Pau-jacará (*Piptadenia communis*)

Na relação das espécies consideradas como “pioneiras xerófitas”, encontradas em solos rasos, secos, de drenagem interna muito rápida. citam-se:

Açoita-cavalo (*Luehea divaricata*)
Alecrim (*Holocalix balansae*)
Araçá-do-mato (*Psidium cattleyanun*)
Batinga (*Eugenia rostrifolia*)
Camboatá (*Cuapania vernalis*)
Capororocão (*Rapanea umbellata*)
Caixeta (*Didymopanas morototonii*)
Cerejeira (*Eugenia involucrata*)
Goiabeira-da-serra (*Feiioa sellowiana*)
Grumixama (*Eugenia brasiliensis*)
Guabiju (*Eugenia pungens*)
Guabiroba (*Campomanesia xanthocarpa*)
Guaraperê (*Bellangeria speciosa*)
Ingá-feijão (*Inga marginata*)
Ipê-amarelo (*Tabebuia pulcherrina*)
Ipê-da-serra (*Tabebuia alba*)
Ipê-da-várzea (*Tabebuia umbellata*)
Jaboticaba (*Myrciaria trunciflora*)
Louro-branco (*Cordia Trichotoma*)
Pau-jacaré (*Piptadenia communis*) *P. guazumaefolia*
Pitanga (*Eugenia uniflora*)
Salseiro (*Salix humboldtiana*)
Sete-capotes (*Britoa sellowiana*)
Aguai (*Pouteria gardneriana*)

Angico-vermelho (*Parapiptadenia rigida*)
Cabreúva (*Myrocarpus frondosus*)
Canafistula (*Peltophorum dubium*)
Canela-amarela (*Nectandra rigida*)
Canela-guaica (*Ocotea pulchella*)
Canela-lajeana (*Cryptocarya mandiocana*)
Cangerana (*Cabrarea glaberrima*)
Caroba (*Jacaranda micrantha*)
Cedro (*Cedrela fissilis*)
Erva-mate (*Ilex paraguariensis*)
Grápia (*Apuleia leiocarpa*)
Guajuvira (*Patagonula americana*)
Imbuia (*Ocotea porosa*)
Ipê-roxo (*Tabebuia ipe*)
Louro (*Cordia trichotoma*)
Palmito (*Euterpe edulis*)
Guatambu (*Balfourodendron riedelianum*)
Pinheiro Brasileiro (*Araucaria angustifolia*)
Timbaúva (*Enterolobium contortisliquum*)

Quanto às essências exóticas, cuja aplicação doméstica e como alternativa energética cresce cada vez mais, merecem atenção especial:

Eucaliptos de diversas espécies
Pinus de diversas espécies
Cinamomo
Acácia-negra
Uva-do-japão.

Pela importância econômica que tem o eucalipto no Estado e no País, é oportuno relacionar aqui algumas espécies de larga utilização, em função de sua capacidade em suportar as adversidades climáticas e as mais diversas condições de solo.

Espécies resistentes à geada

Eucaliptus viminalis

Eucaliptus camaldulensis

Eucaliptus longifolia

Eucaliptus tereticornis

Eucaliptus trautviti

Espécies indicadas para solos secos

Eucaliptus botryoides

Eucaliptus grandis

Eucaliptus punctata

Eucaliptus tereticornis

Eucaliptus trautviti

Eucaliptus siderophloia

Espécies indicadas para solos úmidos (mas ainda drenados)

Eucaliptus alba

Eucaliptus botryoides

Eucaliptus globulus

Eucaliptus maculata

Eucaliptus tereticornis

Eucaliptus viminalis

Espécies indicadas para solos alagadiços

Eucaliptus botryoides

Eucaliptus camaldulensis

Eucaliptus robusta

Espécies indicadas para solos arenosos, secos e pobres

Eucaliptus alba

Eucaliptus botryoides

Eucaliptus tereticornis

Eucaliptus viminalis

Espécies indicadas para solos salinos

Eucaliptus robusta

Eucaliptus tereticornis

Eucaliptus camaldulensis

Espécies indicadas para a produção de mourões

Eucaliptus botryoides

Eucaliptus camaldulensis

Eucaliptus citriodora

Eucaliptus longifolia

Eucaliptus maculata

Eucaliptus paniculata

Eucaliptus punctata

Eucaliptus tereticornis

Eucaliptus siderophloia

Espécies indicadas para carrocerias

Eucaliptus maculata

Eucaliptus robusta

Eucaliptus rostrata

Eucaliptus tereticornis

Espécies indicadas para carvão

Eucaliptus longifolia

Eucaliptus rostrata

Eucaliptus tereticornis

Eucaliptus viminalis

Eucaliptus camaldulensis

Eucaliptus alba

Eucaliptus saligna

Espécies indicadas para dormentes

Eucalyptus camaldulensis

Eucalyptus citriodora

Eucalyptus longifolia

Eucalyptus maculata

Eucalyptus paniculata

Eucalyptus tericornis

Eucalyptus viminalis

Espécies indicadas para estacas

Eucalyptus botryoides

Eucalyptus camaldulensis

Eucalyptus paniculata

Eucalyptus resinifera

Eucalyptus tereticornis

Espécies indicadas para construções

Eucalyptus alba

Eucalyptus camaldulensis

Eucalyptus citriodora

Eucalyptus robusta

Eucalyptus tericornis

Espécies indicadas para móveis

Eucalyptus camadulensis

Eucalyptus citriodora

Eucalyptus globulus

Eucalyptus resinifera

Eucalyptus tericornis

Espécie indicada para assoalho

Eucalyptus saligna

Espécies indicadas para lenha

Eucaliptus alba

Eucaliptus camaldulensis

Eucaliptus grandis

Eucaliptus saligna

Eucaliptus tereticornis

Espécies indicadas para parquet

Eucaliptus camaldulensis

Eucaliptus globulus

Eucaliptus saligna

Espécies indicadas para postes

Eucaliptus longifolia

Eucaliptus resinifera

Eucaliptus rostrata

Eucaliptus tere ticornis

Pinus -Pinus spp

O plantio de pinus de diversas espécies é mais uma alternativa para a produção de matéria-prima florestal, utilizada na indústria de papel e celulose, aglomerado, caixas, cepas de tamancos, móveis, construção civil, produção de carvão e resinagem. Esse manual refere-se a Correa (1980), que considera o *Pinus elliottii*, *Pinus taeda*, *Pinus patula* e *Pinus caribea*, especialmente os dois primeiros, como os mais aconselháveis para plantio no Estado.

O *pinus elliotti* apresenta tronco reto e fácil desrama quando obedecido espaçamento adequado (2X2m). A madeira encontra grande utilização em construções, na forma de tábuas, caibros e revestimento interno.

Nos últimos anos tem sido submetida à produção de resina, com resultado satisfatório.

O *Pinus taede* é uma espécie que prefere o clima frio. Tem o tronco reto, mas com os ramos mais persistentes.

Pinus patula prefere regiões de chuvas abundantes e cerração. Na idade adulta as árvores podem atingir a altura de 30 metros.

Pinus caribea é uma espécie com ótimo crescimento, atingindo a altura de 20 metros e tem o tronco ereto.

Acácia-negra (*Acacia mollissima*)

A acácia-negra é utilizada para a produção de lenha, tanino, celulose, madeira, aglomerado e carvão. É uma espécie que apresenta grande resistência à seca e ao frio, desde que a umidade não seja excessiva. Bom desempenho mesmo em solos pobres, e seu aproveitamento racional entre o 7º e 10º ano, em corte raso, produz por hectare de 170 a 200 estéreos (medida de volume de lenha, equivalente a um metro cúbico) de madeira e 10 a 12 mil quilos de casca seca, e a incorporação de 225 quilos de nitrogênio.

Em comparação com outras espécies florestais, tem a vantagem de permitir a remoção dos tocos com facilidade e a utilização da área para cultivos. Essa condição permite que a acácia-negra seja uma alternativa na rotação de lavoura, pastagem e floresta.

Uva-do-Japão (*Hovenia dulcis*)

A Uva-do-japão ainda não tem o plantio realizado em grandes áreas, pois geralmente era utilizada mais para sombra e abrigo.

Apresenta rápido crescimento. e a sua madeira é bem aceita pela indústria moveleira.

As folhas e os frutos são apreciados pelos animais, condição que poderá ter maior aplicação em quebra-ventos e abrigos.

Cinamomo (*Melia azedarach*)

O cinamomo é uma espécie de grande distribuição no Estado onde era utilizada até recentemente para sombra.

Nos últimos anos passou a ser plantada com objetivo de produzir madeira para a indústria moveleira.

Apresenta rápido crescimento, fato que tem possibilitado utilizá-la para quebra-vento.

Em espaçamento reduzido, proporciona tronco reto e cilíndrico, com boa cicatrização dos ramos quando eliminados com pouca idade.

Vegetação na conservação do solo

Entre as atividades desenvolvidas com o fim específico de promover a conservação e/ou recuperação do solo, merece especial atenção o uso de espécies vegetais de porte e estrutura adequados à finalidade proposta.

Os resultados de observações em condições naturais de ocorrência de vegetação permitem a indicação de diversas espécies vegetais, atendendo às finalidades propostas.

Espécies indicadas para a estabilização de voçorocas

Eucalipto (*Eucaliptus* spp)
Bracatinga (*Mimosa scabrella*)
Taruma-de-espinha (*Vitex montevidensis*)
Cocão (*Erythroxylum pelleterianum*)
Capororoca (*Rapanea umebellata*)
Mamoeiro (*Carica papaya*)
Fumo-bravo (*Solanum erianthum*)
Açoita-cavalo (*Luehea divaricata*)
Grandiuva (*Trema micrantha*)
Laranjeira-do mato (*Actinostemon concolor*)
Chá-de-brugre (*Casearia silvestris*)
Uva-do-japão (*Hovenia dulcis*)
Sete-sangrias (*Simplocos parviflora*)
Maricá (*Mimosa bimucronata*)
Aroeira Salso (*schinus molle*)
Bananeira (*Musa* sp)
Capim-santa-fé (*Panicum prionitis*)
Acácia trinervis (*Acacia longifolia*)
Vassoura-vermelha (*Dodonea viscosa*)
Banana-do mato (*Bromelia antiacantha*)
Pata-de-vaca (*Bauhinia candicans*)
Taquareira (*Bambusa arundinacea*)
Álamo (*Populus* spp)
Plátamo (*Platanus* spp)
Timbó (*Ateleia glazioviana*)

Embaúba (*Cecropia adenopus*)
Ingá (*Inga marginata*)
Angico (*Parapiptadenia rigida*)
Camboatá (*Cupania vernalis*)
Goiabeira (*Psidium guayava*)
Canela-de-veado (*Helietta longifoliata*)
Leiteiro (*Echites peltata*)
Acácia-negra (*Acacia mollissima*)
Aroeira-do-campo (*Schinus terebinthifolius*)
Cambará (*Moquinia molissima*)
Vassoura-branca (*Mimosa incana*)
Branquilha (*Sebastiana Klotschiana*)
Tarumã (*Vitex megapotamica*)
Guamirim (*Myceugenia enosma*)
Chal-chal (*Allophylus edulis*)
Batinga (*Eugenia rostrifolia*)
Carqueja (*Baccharis* spp)
Camara (*Lantana camara*)
Canela-guaicá (*Nectandra tweediei*)
Louro (*Cordia trichotoma*)
Unha-de gato (*Acacia banariensis*)
Molho (*Schinus dependens*)
Cangerana (*Cabralea glaberrima*)
Pixirica (*Leandra atropurpurea*)
Biri (*Cana indica*)
Canela-do brejo (*Machaerium stipitatum*)
Quebra-foice (*Caliandra tweediei*)
Mamica-de-cadela (*Fagara rhoifolia*)
Caroba (*Jacaranda micrantha*)
Aperta-cu (*Eugenia hiemalis*)
Assa-peixe (Maria mole) (*Trixis praestans*)
Cina-Cina (*Parkinsonia aculeata*)
Coração-negro (*Maytenus cassineformis*)
Gaioleira (*Aegiphila sellowiana*)

Pata-de-vaca (*Bauhinia candicans*)
Araçá (*Psidium* sp)
Capim-dos-pampas (*Cortaderia selloana*)
Caeté (*Calathea zebrina*)
Mamona (*Ricinus communis*)
Capim-estrela-africana (*Cynodon aeothiopicus*)
Roseira-silvestre (*Rubus rosiifolius*)
Amoreira-silvestre (*Rubus erythrodadus*)
Corticeira-do-banhado (*Erythrina crista-galli*)
Cardamão (*Alpinia speciosa*)
Tipuana (*Tipuana tipu*)
Amoreira (*Morus alba*)
Paineira (*Chorisia speciosa*)
Salseiro (*Salix humboldtiana*)
Fedegoso (*Cassia corymbosa*)
Vime (*Salix viminalis*)
Nespereira (*Eriobotrya japonica*)
Maracujá (*Passiflora* spp)
Cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*)
Capim-elefante (*Pennisetum purpureum*)
Espinilho (*Acacia caven*)
Cinamomo (*Melia azedarach*)
Canafistula (*Peltophorum dubium*)
Taimbaúva (*Enterolobium contortisiliquum*)
Pinho-brabo (*Podocarpus lambertii*)

Especies indicadas para a fixação de taludes

Gramma bermuda (*Cynodon dactylon*)
Gramma forquilha (*Paspalum notatum*)
Gramma missioneira (*Axonopus compressus*)
Capim kikino (*Pennisetum clandestium*)
Capim pangola (*Digitaria decumbens*)
Capim de Rhodes (*Chloris gayana*)
Erva-cidreira (*Lippia asperifolia*)

Maracujá (*Passiflora* spp)
Quebra-foice (*Calliandra Tweediei*)
Pata-de-vaca (*Bauhinia candicans*)
Yuca (*Yucca* spp)
Erva-grossa (*Elephantopus scaber*)
Guaco (*Mikania cordifolia*)
Cipó-São-João (*Pirostegia venusta*)
Madressilva (*Lonicera caprifolium*)
Glicinia (*Wisteria sinensis*)
Chagas (*Tropaeolum maius*)
Chá-de-brugre (*Casaria silvestris*)
Biri (*Cana indica*)
Hera (*Hedera helix*)
Gramofone (*Ipomea* sp)
Pega-pega (*Desmodium canum*)
Camara (*Lantana camara*)
Vedelia (*Vegelia oblonga*)
Capim-elefante (*Pennisetum purpureum*)
Capim-dos-pampas (*Cortadeira selloana*)
Carqueja (*Baccharis* spp)
Macella (*Matricaria chomomilla*)
Capim-gordura (*Melinis minutiflora*)
Cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*)
Taquareira (*Bambusa arundinacea*)
Caeté (*Calathea zebrina*)
Capim-estrela-africana (*Cynodon aeothiopicus*)
Capim-chorão (*Eragrostis curvula*)
Timbó (*Ateleia glazioviana*)
Capim-barba-de-bode (*Aristida palens*)
Ananás (*Ananas bracteatus*)
Capim mimoso (*Agrostis montevidensis*)
Cardamão (*Alpinia speciosa*)
Cocão (*Erythroxylum pelleterianum*)
Grama-folha-larga (*Stenotaphrum secundatum*)

Capim-cidro (*Andropogon citratus*)”.

ANEXO C - TIPOS DE SOLO NO RIO GRANDE DO SUL

Formação, natureza e propriedades do solo gaúcho, fornecidas por Cassol (1981):

“O Planalto Rio-grandense constitui a grande região gaúcha ocupada pelo derrame basáltico, onde predominam os solos com horizonte B latossólico. Nas regiões das Missões, Planalto Médio e na maior parte dos Campos de Cima da Serra, os solos são classificados como latossolo bruno, latossolo húmico, latossolo roxo e latossolo vermelho escuro. Na parte mais a leste dos Campos de Cima da Serra aparecem alguns solos com horizonte B incipiente, classificado como cambissolo húmico e cambissolo hístico. Na parte mais a oeste das Missões e na parte sul do Planalto Médio aparecem solos com horizonte B textural, classificados como laterítico bruno avermelhado e podzólico vermelho amarelo. Nas regiões do Alto Uruguai e das Encostas Inferior e Superior do Nordeste, predominam os solos pouco desenvolvidos, classificados como solos litólicos. São solos de alta fertilidade natural (principalmente Alto Uruguai e na Encosta Inferior e Superior do Nordeste), mas devido à excessiva declividade, pequena profundidade e pedras na superfície, apresentam sérias limitações para a utilização agrícola.

Ainda conforme Cassol, os latossolos do Rio Grande do Sul são argilosos, com predominância de caulinita e óxidos de ferro na fração mineralógica, bastante profundos, bem drenados, apresentando cores avermelhadas e boas características físicas que facilitam o manejo agrícola.

A região da Depressão Central apresenta predominância de solos originados de sedimentos gondwânicos constituídos por arenitos, siltitos, argilitos e folhelhos de diferentes formações geológicas. A região central do Rio Grande do Sul apresenta solos originados de granito, com altitudes de 40m a 200 m. O relevo caracteriza-se por apresentar amplas planícies aluviais e coxilhas sedimentares, onduladas, com declives em dezenas de metros. Pela grande variação no material de origem, os solos agrícolas da Depressão Central são bastante variáveis, além de ocorrerem em número elevado. Nesta região encontram-se solos com horizonte B textural, classificados como podzólico vermelho amarelo, laterítico bruno avermelhado, brunizem avermelhado, planossolos, brunizem hidromórfico e alguns solos pouco desenvolvidos, como os solos litólicos. Os solos derivados do arenito apresentam alta suscetibilidade à erosão.

A Serra do Sudeste apresenta uma composição litológica bastante variada, com predominância das rochas cristalinas ácidas, principalmente o granito. A região tem altitudes de 100 a 400 m.

A região da Campanha, localizada a sudoeste do Estado, com altitudes de 100 a 300m, apresenta uma parte constituída de solos originados do basalto, com relevo plano a suavemente ondulado e outra parte constituída por solos originados de arenito, siltitos, argilitos e folhelhos, de relevo ondulado. Os solos originados do basalto, devido a influências climáticas, são solos escuros, com elevados teores de argilas montmoriloníticas, ricos em cálcio e magnésio. São solos férteis. Grandes áreas da campanha têm solos derivados do arenito Botucatu, que apresentam acentuada tendência à erosão hídrica e eólica. Nessa região da Campanha ocorrem solos com horizonte B textural (podzólico vermelho amarelo, laterítico bruno avermelhado, planossolo, planossolo vértico, brunizem hidromórfico, solos brunos gleizados) e solos pouco desenvolvidos (litólicos e vertissolo).

A região litorânea apresenta relevo plano, com desenvolvimento de dunas em longas planícies, com altitudes não ultrapassando a 40m. Em geral, os solos litorâneos são derivados de areias quartzosas, com poucos solos orgânicos em áreas mais distantes do mar”.

ANEXO D - MÉTODOS DE MEDIDA DIRETA DE SUCCÃO

Ridley e Burland (1993) indicam que instrumentos que medem a poro-pressão negativa (sucção) diretamente eram restritos a medidas muito baixas de sucção (p.ex. tensiômetro hidráulico). Para medir uma sucção alta no solo era necessário aumentar a pressão do ar em equipamentos tipo placa de pressão. Existem aparelhos que medem sucção alta sob pressão atmosférica por meios indiretos, pois são calibrados por alguma propriedade física, como umidade (psicrômetro), absorção (papel filtro), resistência elétrica (gypsum) ou bloco termal, relacionados à sucção do solo. A maioria dos métodos disponíveis de medida de sucção demora na melhor das hipóteses, algumas horas e freqüentemente semanas ou até meses para atingir o equilíbrio de sucção e muitos deles são imprecisos, particularmente num intervalo de sucção de 100-1000 kPa. O Quadro 9, fornecido por Ridley e Burland (1993), resume as técnicas mais comuns de medida de sucção do solo.

Quadro 9 : Técnicas mais comuns de medida de sucção do solo

	Valor da sucção	Principal Uso	Direto Indireto	Intervalo KPa	Tempo de Equilíbrio
Dessecador de vácuo	Total	Laboratório	Indireto	10^3 - 10^6	Meses
Psicrômetro	Total	Campo	Indireto	300-7000	Meses
Papel filtro	Total	Campo	Indireto	1000-30000	Semanas
	Matricial	Laboratório	Indireto	30-30000	1 semana
Bloco poroso	Matricial	Campo	Indireto	30-3000	Semanas
Bloco Termal	Matricial	Campo	Indireto	0-175	Dias
Placa de sucção	Matricial	Laboratório	Direto	0-90	Horas
Tensiômetro	Matricial	Campo	Direto	0-90	Horas
Placa de pressão	Matricial	Laboratório	Direto	0-5000	Horas
Mini tensiômetro	Matricial	Campo	Direto	0-1500	Dias

Fonte: Ridley e Burland (1993).

Os instrumentos (tensiômetros) que medem sucção de maneira direta agem pela troca de água entre o instrumento e o solo. A força que causa a troca é a poro pressão negativa. Eles abrangem um disco poroso e um aparelho de medida (usualmente um manômetro ou um transdutor de pressão) separados por um reservatório de fluido. O fluxo de água é do ponto de menor sucção d'água para o ponto de maior sucção, até ambos os pontos estarem a igual sucção, que deverá ficar entre as sucções originais. A limitação destes instrumentos é 60-90 kPa de sucção, dependendo da pureza da água. A sucções mais altas, a água cavita (expansão abrupta de uma bolha de ar devida à redução de pressão) e pode ocorrer algum fluxo de água com a presença de vazios de ar e o aparelho perde precisão.

Santos Neto e Carvalho (1995) descrevem os métodos a seguir para medidas diretas de sucção:

a - Placa de sucção: o método consiste no contato de uma amostra de solo em contato com uma pedra porosa saturada, tendendo a alcançar o equilíbrio hidráulico: se a sucção na amostra for maior que na pedra, a água fluirá para a pedra e se a sucção for maior na pedra, a água fluirá da pedra para a amostra. A pedra porosa não pode permitir a passagem de ar por ela. É utilizada uma pedra porosa que, quando saturada, até determinada pressão (pressão de borbulhamento) só permite a passagem de água. A pedra porosa é mantida saturada para que qualquer redução que ocorrer na pressão do ar no interior do frasco, produza uma redução de sucção igual na pedra porosa.

Após a amostra ser colocada em perfeito contato com a pedra porosa, é aplicada uma sucção no manômetro de mercúrio e espera-se até o equilíbrio ser atingido. A amostra é retirada e é medida sua umidade. A curva característica é obtida sendo plotados os valores da umidade encontrada e os valores da sucção na placa. Esse processo apresenta a dificuldade de determinação de pressões negativas na água, pois em pressões de aproximadamente -1 atm a água tende a cavitatar no sistema de medidas.

Sua principal utilização no laboratório é a determinação da curva característica.

b - Placa de pressão: o princípio é o mesmo do método da placa de sucção, mas em vez de ser aplicada sucção para retirar a água da amostra, é aplicada pressão de ar no interior da câmara onde se encontra a amostra. Isso melhora muito o processo, permitindo ampliar o intervalo de sucção medido através do conceito de translação de eixos.

No processo é utilizada uma pedra porosa com alta pressão de borbulhamento, através da qual é medida a pressão na água. Para contornar o problema da cavitação da água, a pressão do ar é aumentada até que a pressão na água atinja níveis que possam ser medidos diretamente. A pressão inicial na água é a diferença entre a pressão final no ar e na água. O fator limitante nesse processo é a pressão de borbulhamento da pedra porosa, acima da qual ocorreria a passagem do ar e os resultados estariam comprometidos. Os autores comentam que, aparentemente, o raio de curvatura do menisco na água não muda significativamente quando a pressão no ar é aumentada. Esse método é conhecido como “translação de eixo”.

c - Membrana de pressão: Nesse método, a pedra porosa é substituída por uma membrana de celulose, que permite elevadas pressões no aparelho sem que o ar passe através

dela. Segundo os autores, esse aparelho é um dos mais utilizados em laboratório, devido à relativa facilidade de utilização e níveis de pressão alcançados.

d - Tensiômetro: Os valores de sucção medidos por tensiômetros geralmente não excedem 1 atm devido à cavitação (Marinho, 1995). Esse autor afirma que o fenômeno da cavitação está associado a fenômenos de superfície, no caso dos tensiômetros, não sendo somente ocasionado por falta de resistência à tração da água. O autor justifica afirmando que a água pode suportar tensões de tração de centenas de Megapascais, referindo-se ao trabalho de Knapp *et al.* (1970). Esses autores afirmam que a tensão necessária para rupturas em líquidos é dada pela resistência à tração e não pela pressão de vapor. Fisher (1948) e Plesset (1969), citados por Marinho (1995), afirmam que valores teóricos de resistência à tração da água são da ordem de milhares de atmosferas.

O tensiômetro é um aparelho para ser utilizado em campo. Funciona praticamente como a placa de sucção. Os componentes básicos são: um elemento poroso, um sensor de pressão e água. o sensor de pressão pode ser: manômetro de mercúrio, manômetro de vácuo ou transdutor elétrico de pressão (Marinho, 1995).

Esse aparelho contém na extremidade inferior, uma ponta porosa saturada, de alta pressão de borbulhamento. É instalado dentro do terreno, ficando a extremidade inferior em contato direto com o solo. Há um fluxo de água da ponta porosa para o solo, que após atingido o equilíbrio, permite a leitura no sensor de pressão.

O aparelho deve ser calibrado previamente, devido ao efeito de capilaridade produzido pelo reduzido diâmetro dos tubos dos tensiômetros (0,5-1,0 mm). As primeiras leituras devem ser descartadas pois, para atingir o equilíbrio de sucção solo-ponta, forma-se uma concentração momentânea de água em volta da ponta, alterando a umidade e a própria medida da sucção.

e - O mini tensiômetro foi desenvolvido por Ridley & Burland (1993) para medir diretamente uma sucção até 1200 kPa, com o tempo de resposta de poucos minutos. Isso foi conseguido pelo uso de transdutor de pressão miniatura, minimizando o volume de água entre a face ativa do transdutor e a pedra porosa e utilizando a técnica de pré-condicionamento do transdutor a pressões bastante altas. Este aparelho tem sido muito divulgado ultimamente na literatura e foi utilizado por alunos do PPGEC em dissertações de mestrado.