

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

**Análise dos efeitos da vegetação na proteção de taludes
rodoviários e proposição de alternativas de revegetação na
BR-386**

Renata Lima Moretto

Porto Alegre

2012

RENATA LIMA MORETTO

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA VEGETAÇÃO NA
PROTEÇÃO DE TALUDES RODOVIÁRIOS E
PROPOSIÇÃO DE ALTERNATIVAS DE REVEGETAÇÃO
NA BR-386**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do
Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2012

RENATA LIMA MORETTO

**ANÁLISE DOS EFEITOS DA VEGETAÇÃO NA
PROTEÇÃO DE TALUDES RODOVIÁRIOS E
PROPOSIÇÃO DE ALTERNATIVAS DE REVEGETAÇÃO
NA BR-386**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 18 de maio de 2012

Prof. Luiz Antônio Bressani
Ph.D. pelo Imperial College, University of London
Orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho
Ph.D. pela University of Leeds

Prof. Rinaldo Jose Barbosa Pinheiro
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Enga. Cristiane Pauletti
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho à minha família (minhas tias Elaine e Lúcia, e meus pais, Solange e Moisés).

AGRADECIMENTOS

Sinto-me feliz e honrada por ter tido esta oportunidade, e esta conquista só foi possível graças ao apoio de diversas pessoas e instituições que merecem aqui ser lembradas.

Primeiramente minha gratidão a Deus, por me dar forças para superar minhas dificuldades e momentos difíceis dessa caminhada.

A minha família, meu pai Moisés, a minha mãe Solange e as minhas tias Elaine e Lúcia, agradeço profundamente pelo amor, pelas incessantes orações, apoio incondicional e pela honestidade e sabedoria. Vocês são meu tudo, e por isso dedico a vocês este trabalho.

Aos todos meus amigos de Mogi Mirim e Campinas pelo voto de confiança, carinho e compreensão que a mim foram depositados nessa jornada rumo ao Mestrado.

Ao corpo docente da UFRGS, que merece meu agradecimento pela dedicação com que compartilharam seu conhecimento. Aos professores Luiz Bressani, Adriano Bica, Fernando Schnaid, Nilo Consoli, Washington Núñez, Karla Heineck, Way Gehling e demais professores do PPGECC, muito obrigado.

Ao meu orientador, mestre e amigo Prof. Luiz Antônio Bressani, expresso minha mais sincera gratidão. Obrigado por sua dedicação e cumplicidade com minha pesquisa, pelo entusiasmo a cada descoberta, por pôr sobre meu trabalho sua visão crítica e ímpar no entendimento do universo geotécnico. A oportunidade de ser sua aluna me fez encontrar um exemplo de Mestre a ser seguido.

Expresso meu agradecimento ao Prof. Sérgio Luiz de Carvalho Leite, brilhante botânico, pela colaboração deste trabalho, pelo entusiasmo em cada conversa e orientação nas questões associadas à botânica.

Aos meus amigos do Mestrado pela acolhida e amizade demonstrada ao longo do Mestrado. Obrigado por tudo que vocês fizeram por mim.

Muito obrigado à coordenação e funcionários do PPGECC por tornarem possível que o sonho de um mestrado se tornasse realidade em um programa de pós-graduação de excelência.

A todos do LageoTEC, principalmente o técnico Jair Silva e o bolsista Marco Antônio G. Conte, que mesmo sendo necessário o pouco uso do laboratório me acolheram e me ajudaram quando foi necessário, estou feliz por ser parte dessa família.

Minha gratidão ao amigo e ex-chefe Paulo Ricardo Brum Pereira, por me apresentar o mundo da geologia e geotecnia e pelo incentivo no sonho de cursar um mestrado.

Faço ainda um agradecimento especial a CAPES e CNPq pelo auxílio financeiro necessário à realização desta pesquisa.

A todos aqueles que das mais diversas formas me apoiaram na conquista deste objetivo e que por ventura não encontraram aqui seus nomes, peço perdão e expresso minha sincera gratidão.

A natureza deve ser considerada como um todo, mas
deve ser estudada em detalhe.

Mário Bunge

RESUMO

MORETTO, R. L. Efeitos da vegetação na proteção de taludes rodoviários. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Esta dissertação discute o emprego de técnicas de estabilização de taludes rodoviários de corte e aterros utilizando drenagem superficial e vegetação. Os conceitos de aplicação de vegetação no aumento da resistência do solo, diminuição da poro-pressão e diminuição da erosão superficial do terreno são revisados. O trabalho discute a importância da interação solo-vegetação, sua influência em taludes, a importância da matéria orgânica nos solos, a sucessão vegetal com vegetação nativa. Estes conceitos foram utilizados na análise de um trecho da BR386, entre a entrada para a via de acesso a Progresso até Canoas, atualmente em processo de duplicação. A partir da inspeção de campo foram identificados os principais problemas de instabilidade e erosão da obra. Foram coletadas seis amostras de solos de quatro taludes da obra para caracterização e para melhor descrição dos problemas de ruptura superficial e controle de erosão nos cortes e aterros analisados. Os materiais amostrados envolveram duas amostras com característica de argila de alta plasticidade, uma argila de baixa plasticidade, uma areia siltosa não plástica, uma areia argilosa e uma areia argilosa não plástica. Foram analisados os problemas encontrados em campo, em função do tipo de materiais, tendo sido propostas soluções adaptadas a cada caso, principalmente focando problemas referentes à drenagem e a busca de soluções ambientais eficazes e com preservação do caráter paisagístico.

Palavras-chave: estabilidade de taludes, revestimento vegetal, erosão superficial.

ABSTRACT

MORETTO, R.L. Effects of vegetation on the road slope protection. Dissertation (Master in Engineering) – Post Graduate Program in Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

This work discusses the use of stabilization techniques for road cuttings and embankments using drainage and vegetation. The concepts of increase soil strength due to vegetation, decrease of the pore pressure and reduction in erosion of the ground surface are reviewed. The work also discusses the importance of soil-vegetation interactions, their influence on slopes, the importance of organic matter in soils and plant succession with native vegetation. These concepts were used in the analysis of a length of the BR386 highway, between the entrance to the access route to Progress up to Canoas, currently in the process of duplication. From the field inspection the main problems of instability and erosion of the works were identified. Six soil samples were collected from four slopes for soil characterization and better description of the superficial instabilities and erosion control in the cuts and embankments analyzed. The materials involved two samples with characteristic of high plasticity clay, low plasticity clay, non plastic silty sand and sand clay not plastic. The problems encountered in the field were analyzed, considering the type of soils involved and proposals of solutions have been made adapted for each case, mainly focusing on drainage and the search for effective environmental solutions which preserve the landscape character.

Keywords: slope stability, coating plant, surface erosion.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	10
LISTA DE FIGURAS	14
LISTA DE TABELAS E QUADRO	14
LISTA DE SIGLAS	19
1. INTRODUÇÃO.....	20
1.1. JUSTIFICATIVA	20
1.2. HIPÓTESES DE PESQUISA	22
1.3. OBJETIVO GERAL	22
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.5. ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1. MECANISMOS DE INSTABILIDADE.....	25
2.1.1. Processos de Transporte de Massa	25
2.1.2. Movimentos Gravitacionais de Massa.....	28
2.1.2.1. Aspectos gerais	28
2.1.2.2. Metodologias de classificação dos movimentos gravitacionais de massa.....	29
2.1.2.3. Causas e condicionantes dos movimentos gravitacionais de massa.....	35
2.1.3. Taludes Infinitos	38
2.1.4. Encostas Naturais com Rupturas Profundas	39
2.2. MODELOS GEOMECÂNICOS DE TALUDES	40
2.2.1. Taludes de Cortes Rodoviários (1:1).....	40
2.2.1.1. Cortes em solos arenosos finos.....	40
2.2.1.2. Cortes em solos residuais de granitoides.....	42

2.2.1.3.	Cortes em solos argilosos plásticos	42
2.2.1.4.	Cortes em perfil de alteração de materiais granulares	43
2.2.1.5.	Cortes em solos saprolíticos com diaclasamento	45
2.2.1.6.	Cortes em solos estratificados	45
2.2.1.7.	Cortes em materiais rochosos	46
2.2.2.	Taludes de Aterros Rodoviários (1:1,5)	47
2.2.2.1.	Aspectos gerais	47
2.2.2.2.	Soluções de implantação de vegetação	48
2.3.	EFEITOS DA VEGETAÇÃO	49
2.3.1.	Efeitos Gerais nos Solos	49
2.3.1.1.	Efeitos hidrológicos	54
2.3.1.2.	Efeitos mecânicos	55
2.3.2.	Efeitos sobre a Erosão	57
2.3.3.	Casos Particulares em Taludes	59
2.3.3.1.	A influência da vegetação	60
2.3.3.2.	Porosidade e sucção	62
2.3.3.3.	Seleção vegetal	63
2.3.3.4.	Efeito das raízes no solo	67
2.3.3.5.	Influência dos fatores externos	72
2.4.	PRINCIPAIS TÉCNICAS DE REVEGETAÇÃO DE TALUDES	77
2.4.1.	Enleivamento (Planca de grama)	79
2.4.2.	Hidrosseadura	81
2.4.3.	Plantio em Covas/Semeadura a Laço	83
2.4.4.	Transposição de Serrapilheira	83
2.4.5.	Paliças de Madeira	84
2.4.6.	Solo Envelopado Verde	85

2.4.7.	Solo Grampeado Verde	86
2.4.8.	Sacos de Aniagem	87
2.4.9.	Geossintéticos (Geotêxteis) e Reforços	88
2.4.10.	Telas e Mantas Biodegradáveis	89
2.4.11.	Outras Práticas	91
2.4.12.	Custos das Técnicas de Revegetação de Taludes	92
2.4.13.	Casos Históricos	94
3.	METODOLOGIA.....	96
3.1.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	97
3.1.1.	Rodovia Governador Leonel de Moura Brizola (BR-386).....	97
3.1.2.	Caracterização Geológica	98
3.1.3.	Aspectos Pedológicos	102
3.1.4.	O Clima	106
3.1.5.	Aspectos Vegetais.....	108
3.2.	PROGRAMA EXPERIMENTAL	112
3.2.1.	Investigação de Campo.....	112
3.2.2.	Coleta de Amostras para Ensaios de Laboratório.....	121
3.2.3.	Caracterização Física	123
3.2.3.1.	Índices físicos	124
3.2.3.2.	Granulometria.....	124
3.2.3.3.	Limites de Atterberg.....	125
4.	RESULTADOS DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO E ANÁLISE DOS PROBLEMAS DE CAMPO DA ÁREA	127
4.1.	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	127
4.2.	DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS EXISTENTES E SUAS POSSÍVEIS CAUSAS	129

4.2.1. Problemas de Erosão	130
4.2.2. Problemas com Escorregamentos	132
5. PROPOSTAS DE ALTERNATIVAS	134
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISA	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	147

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de queda rochosa (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).	31
Figura 2.2. Esquema de tombamento (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).	31
Figura 2.3. Esquema de escorregamento rotacional (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).	32
Figura 2.4. Esquema de escorregamento translacional (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008)	32
Figura 2.5. Esquema de espalhamento lateral. Uma camada passível de liquefação está abaixo da camada superficial (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008)	33
Figura 2.6. Esquema de fluxo de detritos (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).....	33
Figura 2.7. Escala de velocidade de movimentos gravitacionais de massa (modificado de CRUDEN e VARNES, 1996).....	34
Figura 2.8. Talude infinito com três camadas: solo/camada de transição/rocha (Lemes, 2001)	38
Figura 2.9. Ruptura profunda em taludes naturais (Lemes, 2001).	39
Figura 2.10. Corte em solo granular. Vegetação com diferentes comprimentos de raiz (LEMES, 2001)	42
Figura 2.11. Corte em solo argiloso. Vegetação com raízes superficiais associada a poucos exemplares de raízes mais profundas (LEMES, 2001).....	43
Figura 2.12. Cortes em perfil de alteração (LEMES, 2001).....	44
Figura 2.13. Corte em perfil de alteração – Retaludamento (LEMES, 2001).	44
Figura 2.14. Cortes em taludes estratificados – Camada de pequena espessura (LEMES, 2001)	45
Figura 2.15. Corte em solo estratificado – Camada arenosa mais espessa (LEMES, 2001)....	46
Figura 2.16. Influência das raízes de árvores em cortes em materiais rochosos. a) Fraturas horizontais e favoráveis. b) Fraturas desfavoráveis (LEMES, 2001).....	47
Figura 2.17. Aterros rodoviários – Utilização de “ <i>brush layer</i> ” (Lemes, 2001).	48

Figura 2.18. Fluxogramas comparativos do ciclo hidrológico de solo nu e de solo com vegetação (adaptado por LEMES (2001) dos fluxogramas elaborados por GREENWAY, 1989).....	53
Figura 2.19. Contenção e arqueamento (GREENWAY, 1989).....	56
Figura 2.20. Tipos de reforço de talude por raízes (Tsukamoto e Kusakabe (1984), citados por Gray (1995))	61
Figura 2.21. Consorciamento de leguminosas e gramíneas utilizadas na revegetação de taludes (CBCN, 2010).....	64
Figura 2.22. Principais fatores da vegetação que influenciam na análise de vertentes e forças atuantes. Fonte: Fiori & Carmignani (2001)	68
Figura 2.23. Diferentes tipos de raízes existentes. Fonte: Gray e Sotir (1996).....	70
Figura 2.24. Diferentes morfologias do sistema radicular. Fonte: Gray e Sotir (1996)	71
Figura 2.25. Demonstração da aplicação de hidrossemeadura em taludes de corte com leiras de bermalonga. Fonte: CBCN, 2010	81
Figura 2.26. Desenho esquemático do microcoveamento. Fonte: CBCN, 2010	82
Figura 2.27. Vista em planta e corte da construção de paliçadas de madeira. Fonte: CBCN ..	84
Figura 2.28. Método construtivo do solo envelopado. Fonte: CBCN, 2010	85
Figura 2.29. Revitalização da margem do rio utilizando solo envelopado e madeira com estacas vivas – Santa Luzia-MG, Rio das Velhas. Fonte: CBCN, 2010	85
Figura 2.30. Área recuperada com o uso de chumbadores, biomantas antierosivas e malha metálica (solo grampeado). CEMIG – Vespasiano-MG. Fonte: CBCN, 2010	86
Figura 2.31. Etapas do processo construtivo do solo grampeado verde. Fonte: CBCN, 2010.	87
Figura 3.1. Metodologia de desenvolvimento do trabalho	96
Figura 3.2. Mapa das principais rodovias do Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Atlas Socio Econômico do Rio Grande do Sul, 2011	97
Figura 3.3. Domínios geomorfológicos propostos para o estado do Rio Grande do Sul (extraída de CPRM – GEOBANK, 2011)	98
Figura 3.4. Geologia da área estudada (em destaque) (extraída de CPRM – GEOBANK, 2011) .	99

Figura 3.5. Mapa Exploratório de solos do Estado do Rio Grande do Sul (área estudada em destaque) (extraída de CPRM – GEOBANK, 2011).....	103
Figura 3.6. Mapa da temperatura média anual do Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Atlas Socio Econômico do Rio Grande do Sul, 2011	107
Figura 3.7. Mapa da precipitação média anual do Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Atlas Socio Econômico do Rio Grande do Sul, 2011	108
Figura 3.8. Mapa Exploratório de vegetação do Estado do Rio Grande do Sul (área estudada em destaque) (extraída de IBGE, 2011)	109
Figura 3.9. Localização dos cortes e aterros no trecho da BR-386 analisado	113
Figura 3.10. Talude 386-01	116
Figura 3.11. Talude 386-02	116
Figura 3.12. Talude 386-03	116
Figura 3.13. Talude 386-04	117
Figura 3.14. Talude 386-05	117
Figura 3.15. Talude 386-06	117
Figura 3.16. Talude 386-07	118
Figura 3.17. Talude 386-08	118
Figura 3.18. Talude 386-09	118
Figura 3.19. Talude 386-10	119
Figura 3.20. Talude 386-11	119
Figura 3.21. Talude 386-12	119
Figura 3.22. Talude 386-Aterro.....	120
Figura 3.23. Talude 386-13	120
Figura 3.24. Talude 386-14	120
Figura 3.25. Imagem do talude 386-01 onde foram coletadas duas amostras.....	121
Figura 3.26. Imagem do talude 386-04 onde foram coletadas duas amostras.....	122
Figura 3.27. Imagem do talude 386-06 onde foi coletada uma amostra	122

Figura 3.28. Imagem do talude 386-13 onde foi coletada uma amostra	123
Figura 4.1. Curvas granulométricas dos solos coletados.....	128
Figura 4.2. a) Foto do talude com problema de erosão superficial com afluxo em contato. b) Croquis de um problema de erosão superficial com afluxo em contato.....	130
Figura 4.3. a) Foto do talude com problema de deslizamento de pequenos volumes de material. b) Croquis de um exemplo de problema deslizamento de pequenos volumes de material	130
Figura 4.4. Foto do topo de um aterro com erosões importantes e infiltração de água.....	131
Figura 4.5. Vista frontal de um aterro com problemas de ravinamento e sulcos	131
Figura 4.6. Vista geral de um aterro com problemas de ravinamento e sulcos	132
Figura 4.7. Vista geral de um corte com problemas de escorregamentos por estratificação..	133
Figura 5.1. Esquema de um controle de erosão superficial	135
Figura 5.2. Perfil da valeta para coleta da água superficial dos taludes	138
Figura 5.3. Vista frontal da descida de água em degraus para coleta da água superficial dos taludes.....	138
Figura 5.4. Esquema de um dreno para coleta da água sub-superficial dos taludes.....	139
Figura 5.5. Esquema de um talude estratificado para entendimento das prováveis soluções de contenção da erosão.....	141

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1. Glossário para nomenclatura dos movimentos gravitacionais de massa (modificado de CRUDEN e VARNES, 1996)	30
Tabela 2.2. Classificação de movimentos gravitacionais de massa (AUGUSTO FILHO, 1992)..	35
Tabela 2.3. Causas de movimentos gravitacionais de massa (modificado de CRUDEN e VARNES, 1996).....	36
Tabela 2.4. Agentes desestabilizadores de um talude ou encosta (SORWES, 1979).....	37
Tabela 2.5. Redução da erosão em função de diferentes condições de recobrimento em condições temperadas (Adaptado do USDA Soil Conservation Service,1978). (CBCN, 2010).....	50
Tabela 2.6. Efeitos gerais da vegetação sobre o solo (Adaptado por Pinheiro (2000) do elaborado por Greenway (1987))	51
Quadro 2.1. Fator C para diferentes condições de cobertura do solo. Percentagem de redução de perda de solo comparada com solo sem cultivo. (USDA Soil Conservation Service (1978), citado por GRAY, 1995)	59
Quadro 2.2. Resistência à tração das raízes de algumas espécies de vegetação da Europa (Lemes, 2001).....	69
Tabela 2.6. Comparativo das principais técnicas empregadas na proteção de taludes	77
Quadro 2.3. Custos das principais técnicas de revegetação de taludes empregadas no Brasil (DIAS, 2002 <i>apud</i> FERNANDES, 2004).....	92
Quadro 2.4. Comparativo de custos de execução da obra com uso de técnicas de Bioengenharia e métodos tradicionais (PEREIRA, 2001).....	93
Tabela 3.1. Pontos Georreferenciados no GPS	114
Tabela 3.2. Descrição dos taludes do trecho	114
Tabela 4.1. Peso específico (γ_s)	127
Tabela 4.2. Solos amostrados (ASTM D2487)	127
Tabela 4.3. Composição granulométrica dos solos	128
Tabela 4.4. Limites de consistência.....	129

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM – American Society for Testing and Materials
CBCN – Centro Brasileiro para Conservação da Natureza e Desenvolvimento Sustentável
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
CPRM – Serviço Geológico do Brasil
CTC – Capacidade de Troca Catiônica
DER – Departamento de Estradas de Rodagem
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias
IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFCRS – Inventário Florestal Contínuo do Rio Grande do Sul
NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
PERMS – Permanent Erosion Revegetation Materials
TERMS – Temporary Erosion Revegetation Materials
TRs – Terra Rochas
USDA – United States Department of Agriculture
USLE – Universal Soil Loss Equation

1. INTRODUÇÃO

1.1. JUSTIFICATIVA

A ocorrência de erosões superficiais e instabilidades de taludes rodoviários em solos são problemas que ocorrem com certa frequência. Estes problemas são mais acentuados onde a declividade dos cortes e a infiltração de água fazem com que a erodibilidade fique acentuada ou a resistência ao cisalhamento dos solos seja ultrapassada.

Segundo Bianchini (2000), a execução de cortes em taludes rodoviários é baseada em uma prática tradicional, apresentando inclinações típicas de 1:1,5 a 1:1. Essa solução empírica funciona bem para a maioria das situações e é utilizada devido à inviabilidade econômica de se realizar estudos detalhados para cada corte a ser executado na construção de uma rodovia. Existem casos em que esta prática não funciona, tornando-se necessário estudar melhor o problema em questão. O desafio está, portanto, em conhecer adequadamente o maior número possível de fatores que tem influência na estabilidade de um talude.

Infelizmente uma avaliação geotécnica prévia não é usual ou, se é realizada, algumas vezes passa despercebido uma área irregular perante as outras. Muitas vezes são nestes pontos que se encontram as prováveis superfícies de ruptura após a realização do corte. Com vistas a buscar a prevenção de acidentes devem-se aplicar técnicas que minimizem o efeito dos fatores instabilizantes no talude. Algumas dessas técnicas são bem conhecidas e muito empregadas, como estruturas de arrimo, drenagens superficial e profunda, valas drenantes, trincheiras, retaludamento, mudanças geométricas, geomantas, técnicas de bioengenharia, entre outros.

A bioengenharia consiste no uso de elementos biologicamente ativos (ramos, brotos ou raízes da vegetação) junto a elementos inertes (concreto, madeira, ligas metálicas, polímeros naturais e sintéticos) em obras de estabilização de solos e sedimentos. Essa técnica procura utilizar as raízes e os caules como elementos estruturais e mecânicos para contenção e proteção de solos, em diferentes arranjos geométricos. Pode atuar no fortalecimento do solo, na melhoria das condições de drenagem e na retenção das partículas de solo.

Este trabalho estudará principalmente o emprego de técnicas de estabilização que utilizem o conhecimento da estabilidade de taludes focando o emprego de materiais naturais, principalmente a vegetação de pequeno porte (gramíneas), pois essa auxilia no aumento da

resistência do solo, diminuição da poro pressão e conseqüentemente reduzir a erosão superficial do terreno.

Segundo Pinto (2009), esse tipo de processo de estabilização vem se fortalecendo devido à grande conscientização ambiental. Algumas características da engenharia natural são:

- Menor requerimento de maquinário e possibilidade de emprego de mão de obra com menor nível de especialização;
- Utilização de materiais naturais e locais, como madeira, pedras, compostos orgânicos que reduzem os custos de transporte;
- Compatibilidade ambiental, pois geralmente requerem a utilização mínima de equipamentos e da movimentação de terra, ocasionando menor perturbação durante a execução;
- Características de autorreparação devido à habilidade da vegetação de crescimento e regeneração;
- Execução em locais de difícil acesso ou inacessíveis para o maquinário, onde as técnicas de bioengenharia de solos podem ser a única alternativa de projeto viável;
- Diminuição da umidade e das poro pressões, gerando aumento da estabilidade.

É importante destacar que a influência da vegetação na estabilização dos solos tem efeitos tanto benéficos como adversos em taludes. Como efeito positivo da vegetação pode-se 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. Isso acarreta um aumento da resistência ao cisalhamento do solo e o aumento da coesão do conjunto solo-raiz provocado pela resistência do sistema de raízes da vegetação – o que leva a um incremento de resistência ao cisalhamento disponível (WU et al, 1979¹ *apud* LEMES, 2001). O efeito adverso da vegetação é que em alguns casos sua presença pode aumentar a infiltração, bem como as raízes deslocarem blocos de rochas.

Atualmente os esforços das ciências se voltam sobremaneira para a prevenção de acidentes e, a partir dessa preocupação, se organizou este trabalho, o qual tem como objetivo

¹ 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.

salientar a importância da interação solo-vegetação e, de forma particular, sua influência em taludes, através de uma revisão bibliográfica e análises de situações de campo, visando um maior esclarecimento dos fenômenos decorrentes dessa interação, uma vez que é sabido que o revestimento vegetal reduz a erosão superficial e pode melhorar as condições de estabilidade dos taludes.

1.2. HIPÓTESES DE PESQUISA

Esta pesquisa foi inspirada pela busca de soluções para o controle da erosão e estabilização de encostas e taludes através de vegetação de pequeno porte (gramíneas), preferencialmente nativas, por meio da avaliação de taludes rodoviários localizados no trecho da BR-386 no estado do Rio Grande do Sul.

A meta foi proporcionar uma melhor combinação de elementos vivos e inertes na formação de uma cobertura vegetal, visando à proteção do solo contra a erosão superficial hídrica, com consequente participação na manutenção da estabilidade do talude.

As hipóteses lançadas para o trabalho são:

- A discussão do emprego de espécies de gramíneas e leguminosas, principalmente nativas, e métodos de manejo para cobertura de taludes rodoviários, visando sua estabilização;
- A análise das técnicas na influência do processo de estabilização e revegetação;
- O uso de geotêxteis reduz o processo erosivo e cria condições mais favoráveis para a germinação de sementes e estabelecimento de plantas.

1.3. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo geral avaliar o emprego, as vantagens e desvantagens, a fim de entender o controle dos processos erosivos, principalmente superficiais. Além de compreender, a forma que os processos erosivos atuam nas diferentes técnicas, e quais espécies vegetais são mais adequadas para a região estudada.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Foram estabelecidos como objetivos específicos deste trabalho:

- Obter e organizar informações sobre as técnicas existentes de revestimento vegetal;
- Revisar o efeito da vegetação na contenção dos movimentos de massas e as espécies vegetais melhor empregadas;
- Realizar um comparativo entre as técnicas e suas vantagens e desvantagens na contenção de movimento de massas, levando em consideração o emprego de vegetação de pequeno porte, principalmente nativa.

1.5. ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Uma revisão sobre os movimentos gravitacionais de massa e modelos geomecânicos de taludes é apresentada no Capítulo 2, sendo feita uma 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.

Ainda no Capítulo 2 será apresentado um breve histórico, mostrando a importância da utilização da vegetação como agente estabilizador e reparador dos solos, e com base na literatura consultada, faz-se um resumo dos efeitos da vegetação sobre o solo, principalmente sobre os processos erosivos, as influências da vegetação em taludes, com indicações de alguns métodos para a recomposição da cobertura vegetal.

No Capítulo 3 será abordada a metodologia do projeto, sendo citada a área de estudo, com problemas de erodibilidade e instabilidade de taludes no trecho da BR-386 no Estado do Rio Grande do Sul, baseados nos dados de pedologia, geologia, clima e pluviométricos buscados em literatura, e comentados os critérios a serem considerados para uma avaliação e remediação da área como, por exemplo, técnicas a empregar e estudos referentes à sucção e poro pressão.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios de laboratório e as análises sobre as metodologias existentes.

No capítulo 5 será apresentada a discussão das alternativas e as propostas para a área analisada, buscando identificar as melhores técnicas para estabilizar uma área de encosta

instável. À medida que são apresentadas, também se discutirão e compararão entre si as técnicas, com base na informação de outros autores.

As conclusões desta dissertação são apresentadas no Capítulo 6 e as sugestões para futuros estudos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo da Revisão Bibliográfica apresenta-se um breve histórico dos mecanismos de instabilidade e dos modelos geomecânicos, além de mostrar a importância da utilização da vegetação como agente estabilizador e reparador dos solos, e com base na literatura consultada, faz-se um resumo dos efeitos da vegetação sobre o solo, principalmente sobre os processos erosivos, as influências da vegetação em taludes, com indicações de alguns métodos para a recomposição da cobertura vegetal.

2.1. MECANISMOS DE INSTABILIDADE

A ação da água, do vento e as variações de temperatura são os principais agentes erosivos que, somados à ação da gravidade e ao intemperismo são responsáveis pelas alternativas do relevo. Segundo Bianchini (2000), estes processos fazem com que o material deslocado seja transportado para cotas mais baixas em uma permanente tendência à peneplanização, sendo que associado a esta tendência ocorre uma série de deslocamentos de massa nas encostas, muitas vezes causados ou agravados pela ação do homem.

Há vários anos os diferentes tipos de instabilidade de taludes vêm sendo pesquisados e relacionados por diversos autores, os quais propuseram sistemas de classificação para estas instabilidades. Estes autores utilizaram como critério de diferenciação o tipo de material, a velocidade, o mecanismo do movimento, as deformações, a geometria e a quantidade de água envolvida no processo. Alguns dos sistemas existentes são os estudados por Varnes (1958 e 1978), Skempton & Hutchinson (1969), Bromhead (1986), Hutchinson (1988), Sassa (1989) e Cruden & Varnes (1996).

2.1.1. Processos de Transporte de Massa

A erosão retira os nutrientes do solo e prejudica o crescimento das plantas nele cultivados, dessa forma o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), 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 ocasionado por ventos (GRAY, 1995).

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).

De acordo com Nascimento Filho (1963)² *apud* Lemes (2001), 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.

Seguindo essa linha de pensamento podem-se citar três tipos de erosão:

- *Deslocamento de partículas por impactos de gotas de chuva*

A erosão por salpicamento (*splash*) é o estágio inicial do processo erosivo, pois prepara as partículas que compõem o solo a serem transportadas pelo escoamento superficial.

Durante a chuva, o impacto da gota na superfície do solo desaloja as partículas do solo. Essas partículas são levantadas para o ar e transportadas para fora do ponto do impacto da gota (OLIVEIRA, 1999).

O potencial de erosão do solo pela chuva depende da resistência dos agregados assim como da energia cinética da gota de chuva. As partículas mais finas desalojadas de seu arranjo estrutural ocupam os espaços intergranulares, acarretando a compactação da superfície do terreno.

- *Transporte de partículas de solo pelo escoamento superficial difuso*

Erosão laminar – a elevada concentração de água no solo gera uma saturação dos macroporos. Nesse instante, não ocorre mais infiltração de água e toda chuva que está aportando ao solo escoar difusamente pela sua superfície. As rugosidades do terreno geram resistência de atrito ao fluxo superficial. Quando as tensões cisalhantes superam as forças de resistência estática das partículas individuais o transporte de partículas se inicia, resultando na remoção progressiva e relativamente uniforme dos horizontes superficiais do solo, ou seja, começa o processo erosivo (GUERRA, 1994).

² NASCIMENTO FILHO, A. C. do. **Erosão**. In: ENCICLOPÉDIA DL. Rio de Janeiro: Delta, 1963. V. 13, p. 7055-7072.

- *Transporte de partículas por sulcos concentrados*

Após a saturação do solo, a água converge para suas microdepressões devido às irregularidades do terreno, fazendo com que o escoamento superficial se transforme em fluxo concentrado, formando sulcos, ravinas e mesmo voçorocas, definidos a seguir (SALOMÃO, 1999):

Sulcos – incisões erosivas lineares, causadas pelo fluxo da água ao longo de um terreno. Não são profundas, podendo, porém, evoluir por aprofundamento em ravinas.

Ravinas – em geral diferenciada de sulcos pela profundidade da erosão linear em forma de canal, originado pelo escoamento concentrado das águas superficiais. Tratar-se-á de ravinas quando o canal formado não puder ser obliterado por operações normais de preparo do solo (PICHLER, 1953³, citado por FERNANDES, 2004).

Voçoroca – caso a erosão se desenvolva por influência não somente das águas superficiais, mas também dos fluxos de água subsuperficiais, onde se inclui o lençol freático. Configura-se o processo mais conhecido por boçoroca ou voçoroca, com desenvolvimento de *piping* (GALETI, 1987):

“O fenômeno de piping provoca a remoção de partículas do interior do solo formando canais que evoluem em sentido contrário ao do fluxo de água, podendo dar origem a colapsos do terreno, com desabamentos que alargam a boçoroca ou criam novos ramos. Assim, a boçoroca é palco de diversos fenômenos: erosão superficial, erosão interna, solapamentos, desabamentos e escorregamentos, que se conjugam no sentido de dotar essa forma de erosão de elevado poder destrutivo.”

2.1.2. Movimentos Gravitacionais de Massa

2.1.2.1. Aspectos gerais

O termo “escorregamento”, mais do que incluir todo e qualquer movimento coletivo de materiais terrosos e rochosos compreende também o movimento de solo ou rocha, independente da diversidade de processos, causas, velocidades, formas e demais características do movimento analisado (GUIDICINI & NIEBLE, 1984; CUNHA et al.,

³ PICHLER, E. **Boçorocas**. Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia, 2(1), p. 3-16, 1953.

1991). Na literatura internacional é habitual a utilização do termo *landslide* para descrever movimentações de solo e/ou rocha que ocorrem na superfície do planeta.

Landslides podem ser definidos como movimentos de solo ou rocha que envolvem deformações cisalhantes ao longo de uma ou várias superfícies de ruptura, que podem ser visíveis ou podem ser razoavelmente inferidas (VARNES, 1978). Já Bromhead (1995) define *landslides* como sendo movimentos de solos e rochas sob influência da gravidade.

Heidemann (2011), utilizou em sua pesquisa o termo “movimentos gravitacionais de massa” o qual descreve muito bem estes processos, por isso optou-se também por empregá-lo nesse trabalho, uma vez que os movimentos apresentam diversas cinemáticas, não sendo apenas deslizamentos, e não envolvendo apenas solos, mas também rochas e detritos.

Estudos prévios dos possíveis tipos de escorregamento em encosta são muito importantes para saber como e onde atuar na estabilização de taludes, pois a execução de cortes nos maciços pode condicionar movimentos de massa.

De acordo com Schuster (1996), movimentos gravitacionais de massa constituem o maior elemento de movimentação de massa nos continentes. Ao longo do tempo, estes processos contribuem na estabilização de terrenos, formando áreas propícias à prática agrícola e habitação. No entanto, em curto prazo torna-se difícil enxergar os benefícios advindos desses movimentos, sendo os mesmos mais frequentemente tratados como causas de desastres naturais.

No entanto, os movimentos gravitacionais de massa vêm se tornando cada vez mais comuns e de maior magnitude. Segundo Schuster (1996), os fatores causadores desta elevação no número e gravidade destes episódios são:

- Urbanização crescente e necessidade de ocupação de áreas suscetíveis a instabilidades;
- Contínuo desmatamento de áreas propensas a instabilidades;
- Aumento dos volumes precipitados em algumas regiões, em função de mudanças climáticas.

Os prejuízos causados por movimentos gravitacionais de massa podem ser desastrosos e de risco à vida humana. Além dos custos diretos, de reconstrução e reparo dos danos causados Schuster (1996) lista custos indiretos que podem inclusive exceder os custos diretos, mas que muitas vezes não são levados em conta, tais como:

- Perdas de produtividade agrícola e industrial e redução nas atividades turísticas como resultado dos danos às terras e fábricas, ou interrupção dos sistemas de transporte;
- Redução do valor imobiliário das terras ameaçadas por movimentos gravitacionais de massa e perdas nos impostos, por desvalorização das propriedades em áreas de risco;
- Necessidade de adoção de medidas para prevenir ou mitigar danos por outras instabilidades;
- Danos na qualidade da água em córregos e sistemas de irrigação;
- Perda de produtividade humana e animal, por ferimentos, mortes ou traumas psicológicos;
- Ocorrência de desastres naturais decorrentes de movimentos gravitacionais de massa, tais como inundações, por exemplo.

2.1.2.2. Métodos de classificação dos movimentos gravitacionais de massa.

A classificação dos movimentos de massa é importante, primeiramente, para a definição e estruturação deste campo de estudos, e em segundo lugar, no sentido de facilitar o intercâmbio de ideias. Por isso é necessário desenvolver, na medida do possível, uma terminologia clara e consensual (HUTCHINSON, 1988).

Atualmente, dentre as várias classificações desenvolvidas, com aplicabilidade geral ou regional, a metodologia proposta por Cruden e Varnes (1996), baseada em Varnes (1978), se tornou uma das mais difundidas e utilizadas. Segundo estes autores, qualquer movimento de massa pode ser classificado e descrito por dois termos, onde o primeiro indica o material envolvido (solo, rocha, ou detritos) e o segundo o tipo de movimento (queda, tombamento, deslizamento, escoamento, fluxo). Se ocorrerem múltiplos movimentos estes termos são repetidos quantas vezes forem necessárias.

Os autores sugerem ainda uma complementação a esta classificação, que a torna mais elaborada, através da adição de outros termos à descrição do movimento, de forma a ter uma caracterização da atividade do movimento em termos de estado, distribuição e estilo, seguido por descrição do movimento em si, em termos de velocidade e teor de umidade, e aí então

incluir o material envolvido e o tipo do movimento. Esse tipo de descrição pode ser observado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Glossário para nomenclatura dos movimentos gravitacionais de massa (modificado de CRUDEN e VARNES, 1996).

Descrição da atividade			
Estado	Distribuição	Estilo	
Ativo	Em avanço	Complexo	
Reativado	Retrogressivo	Composto	
Suspenso	Com alargamento	Múltiplo	
Inativo	Com ampliação	Sucessivo	
Dormente	Confinado	Simples	
Abandonado	Com diminuição		
Estabilizado	Em movimento		
Reliquiar			
Descrição do movimento			
Velocidade	Teor de umidade	Material	Tipo
Extremamente rápido	Seco	Rocha	Queda
Muito rápido	Úmido	Solo	Tombamento
Rápido	Encharcado	Terra	Deslizamento
Moderado	Muito encharcado	Detritos	Escoamento
Lento			Fluxo/corrida
Muito lento			
Extremamente lento			

O tipo de movimento é um critério fundamental para classificação dos movimentos gravitacionais de massa. As descrições destes tipos, dadas a seguir, baseadas em Cruden e Varnes (1996), são igualmente válidas para outras metodologias de classificação, já que se referem, de forma geral, às mesmas cinemáticas de movimento.

As **quedas** ocorrem quando uma porção de solo ou rocha se desprende do maciço (Figura 2.1). Durante a queda o material viaja pelo ar e o movimento é muito rápido ou extremamente rápido.

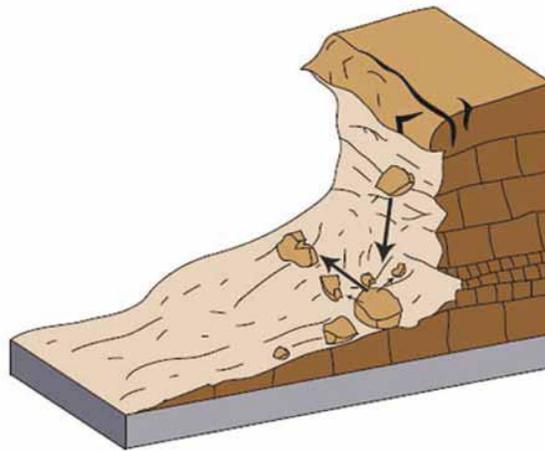


Figura 2.1. Esquema de queda rochosa (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

O **tombamento** caracteriza-se pela rotação de um bloco de solo ou rocha sobre um eixo localizado abaixo de seu ponto de gravidade, atingindo desde velocidades extremamente lentas a extremamente rápidas (Figura 2.2.). O mesmo tende a ser causado pela elevação dos níveis de poro pressão em fraturas e descontinuidades, associado ao peso do material anteriormente localizado acima da massa movimentada.

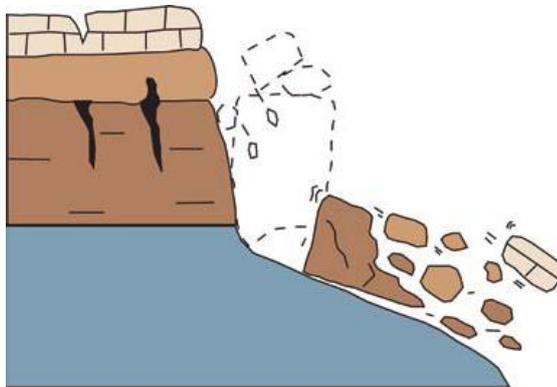


Figura 2.2. Esquema de tombamento (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

Os **deslizamentos** são movimentos descendentes de solo ou rocha, relativamente rápidos, que ocorrem predominantemente em superfícies de ruptura ou em zonas pouco espessas, onde se concentram intensas deformações cisalhantes. Os deslizamentos podem ser basicamente translacionais ou rotacionais.

Os deslizamentos rotacionais ocorrem através de uma superfície de deslizamento curva e côncava, ocorrendo predominantemente em materiais homogêneos (Figura 2.3).

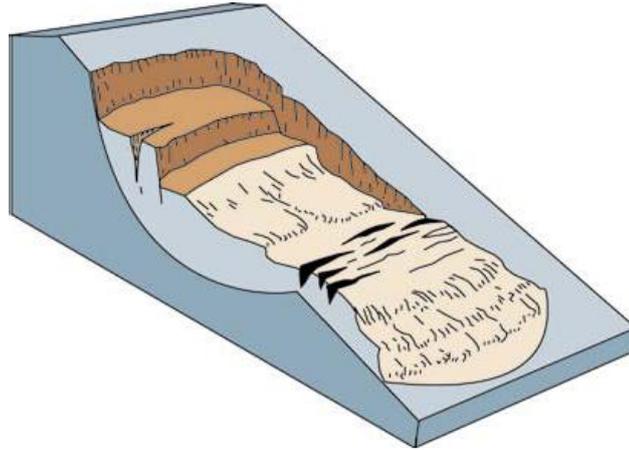


Figura 2.3. Esquema de escorregamento rotacional (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

Nos deslizamentos translacionais (Figura 2.4) o material se desloca por sobre uma superfície de ruptura plana ou ondulada. Isso envolve geralmente movimentos mais rasos que os rotacionais, e a superfície de ruptura normalmente se localiza em descontinuidades do maciço ou na interface entre solo e rocha.

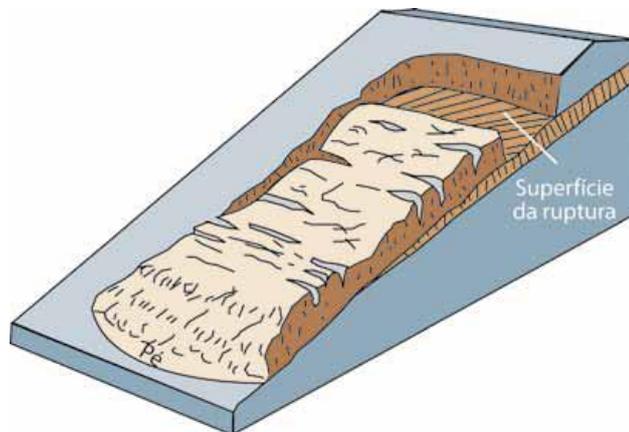


Figura 2.4. Esquema de escorregamento translacional (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

Escoamentos com espalhamento lateral são movimentos complexos, que ocorrem, geralmente, quando uma massa de solo coesivo ou rocha está localizada sobre um material mais frágil, o que a torna bastante fraturada. O solo ou rocha fraturada pode então sofrer movimentos de subsidência, rotação e translação sobre o material menos resistente, até que se desintegre, ao passo que o material subjacente flui de forma ascendente através das fraturas (Figura 2.5). Este é um processo extremamente lento e que pode se desenvolver por muitos quilômetros.

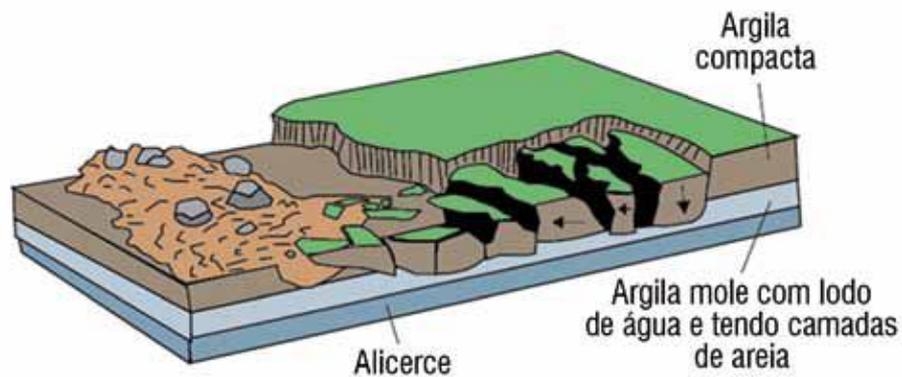


Figura 2.5. Esquema de espalhamento lateral. Uma camada passível de liquefação está abaixo da camada superficial (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

O **fluxo** ou **corrida** é um movimento espacialmente contínuo, sem uma superfície de cisalhamento bem preservada (Figura 2.6). O material se desloca de forma semelhante a um líquido viscoso, estando à velocidade do movimento ligada diretamente à quantidade de água contida na massa. Estes movimentos evoluem para corridas rápidas ou avalanches, podendo ser atingidas velocidades da ordem de 100 m/s em casos extremos.

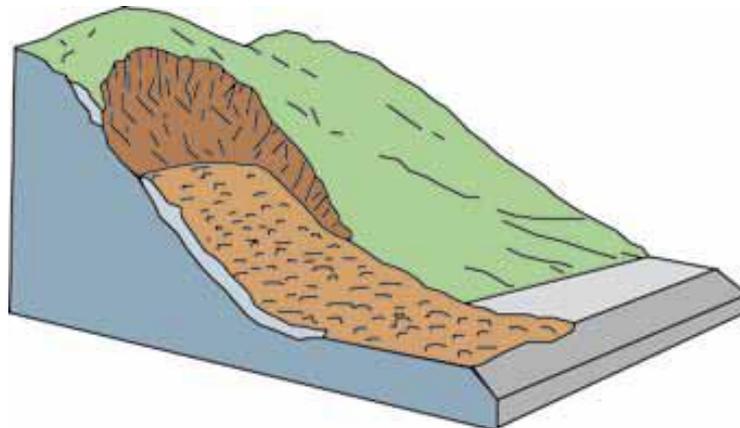


Figura 2.6. Esquema de fluxo de detritos (HIGHLAND e BOBROWSKY, 2008).

O nível de danos causados por movimentos gravitacionais de massa está intimamente ligado à velocidade com que ocorrem. Dessa forma, movimentos envolvendo grandes volumes de solo, mas com baixa velocidade, possibilitam a retirada das pessoas ou até a execução de obras de remediação que permitem o convívio da população com o processo. No entanto, movimentos envolvendo pequenos volumes de massa, mas que ocorrem em alta velocidade podem ser destruidores, uma vez que a elevada energia desenvolvida durante o

movimento faz com que o mesmo ocorra de forma rápida, não dando tempo para a fuga da população ou adoção de qualquer medida emergencial.

Em relação à velocidade do movimento, Cruden e Varnes (1996) apresentam sete classes de velocidade, com base na proposta original de Varnes (1978). A Figura 2.7 apresenta esta divisão feita em função da velocidade dos movimentos e dos danos associadas às classes de velocidade.

Classe	Descrição	Velocidade (mm/s)	Velocidade típica	Prováveis danos associados
7	Extremamente rápido			Catastrófico. Construções destruídas pelo impacto, muitas mortes, mínima possibilidade de fuga.
6	Muito rápido	5×10^3	5 m/s	Algumas mortes. Devido à alta velocidade não é possível a fuga de todas as pessoas
5	Rápido	5×10^1	3 m/min	Evacuação possível; Destruição de estruturas, bens e equipamentos.
4	Moderado	5×10^{-1}	1.8 m/h	Algumas estruturas temporárias podem ser temporariamente mantidas
3	Lento	5×10^{-3}	1.3 m/mês	Obras de remediação podem ser executadas durante o movimento. Estruturas não sensíveis com manutenção frequente.
2	Muito lento	5×10^{-5}	1.6 m/ano	Algumas estruturas permanentes não são danificadas
1	Extremamente lento	5×10^{-7}	16 mm/ano	Imperceptível sem instrumentação. Construções são possíveis se tomadas algumas precauções.

Figura 2.7. Escala de velocidade de movimentos gravitacionais de massa (modificado de CRUDEN e VARNES, 1996).

Augusto Filho (1992) baseado nas ocorrências de movimentos gravitacionais de massa existentes no Brasil propôs uma classificação com aplicabilidade nacional, na qual divide as instabilidades de encostas em quatro grupos fenomenológicos, em função das características do movimento, dos materiais envolvidos e da sua geometria, de acordo com a Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Classificação de movimentos gravitacionais de massa
(AUGUSTO FILHO, 1992).

Processos	Características do movimento/material/geometria
Rastejo (Creep)	<ul style="list-style-type: none"> - vários planos de deslocamento (internos); - velocidades muito baixas a baixas (cm/ano) e decrescentes com a profundidade; - movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; - envolvem solos, depósitos, rochas alterada ou fraturada; - geometria indefinida.
Deslizamentos (Slides)	<ul style="list-style-type: none"> - poucos planos de deslocamento (externos); - velocidade média (m/h) a alta (m/s); - pequenos e grandes volumes de material; - geometria e materiais variáveis. <p>Planares: Solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza.</p> <p>Circulares: Solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas.</p> <p>Em cunha: Solos e rochas com dois planos de fraqueza.</p>
Quedas (Falls)	<ul style="list-style-type: none"> - sem planos de deslocamento; - movimento em queda livre ou em plano inclinado; - velocidades muito altas (vários m/s); - envolve materiais rochosos em pequenos a médios volumes; - geometria variável (lascas, placas, blocos). - muitas superfícies de deslocamento (internas e externas); - movimento semelhante a um líquido viscoso;
Corridas (Flows)	<ul style="list-style-type: none"> - desenvolvimento ao longo das drenagens; - velocidades médias a altas; - envolve solos, rochas, detritos e água em grandes volumes; - extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

2.1.2.3. Causas e condicionantes dos movimentos gravitacionais de massa

Os movimentos gravitacionais de massa são processos complexos que envolvem muitas variáveis, sendo assim, pode-se verificar a dificuldade associada à remediação ou mitigação destes processos, visto que é muito importante identificar a sua causa para a definição de uma solução para o problema.

Cruden e Varnes (1996) apresentam um *checklist* das possíveis causas de movimentos gravitacionais de massa. Estas causas podem ser de origem geológica, morfológica, física ou por ação antrópica, conforme apresentado na Tabela 2.3.

As possíveis causas de movimentos gravitacionais de massa nesse trabalho relacionam-se diretamente a remoção da vegetação (morfológica), a escavação de encostas ou

modificações geométricas complexas (antrópicas) que representam os cortes e aterros criados no trecho estudado e desmatamento (antrópicas).

Tabela 2.3. Causas de movimentos gravitacionais de massa (modificado de CRUDEN e VARNES, 1996).

Geológicas	Morfológicas	Físicas	Antrópicas
Materiais frágeis	Soerguimento tectônico ou vulcânico	Chuvas intensas	Escavação de encostas ou modificações geométricas complexas
Materiais sensíveis	Alívio de tensões por degelo	Rápido descongelamento da neve	Carregamento de encostas ou de sua crista
Materiais intemperizados	Erosão fluvial do pé da encosta	Precipitações excepcionais prolongadas	Esvaziamento rápido de reservatórios
Materiais cisalhados	Erosão do pé da encosta por ação das ondas do mar	Rápido rebaixamento do nível das águas (marés, enchentes)	Desmatamento
Materiais com juntas ou fissuras	Erosão glacial do pé da encosta	Terremotos	Irrigação
Descontinuidade da massa adversamente orientada	Erosão das margens laterais	Erupção vulcânica	Mineração
Descontinuidade estrutural adversamente orientada	Erosão subterrânea (<i>piping</i>)	Degelo	Vibrações artificiais
Contraste em permeabilidade	Carregamento da crista da encosta por deposição	Intemperismo por ciclos de gelo e degelo	Vazamento em redes de abastecimento de água
Contraste em rigidez	Remoção da vegetação	Intemperismo por ciclos de expansão e contração	Infiltração de esgotos

Sob qualquer uma das classificações de fatores causadores de movimentos gravitacionais de massa, verifica-se basicamente que estes processos estão associados diretamente à redução da resistência ao cisalhamento ou a um acréscimo das tensões atuantes no material.

Sorwes (1979), citado por Fernandes (2004), cita 15 agentes de desestabilização de um talude ou encosta, divididos em 2 grandes grupos conforme se pode observar na Tabela 2.4.

Tabela 2.4. Agentes desestabilizadores de um talude ou encosta
(SORWES, 1979).

Agentes de desestabilização	
Aumento de solicitação	Decréscimo de resistência
<ul style="list-style-type: none"> • Cargas externas, tais como edificações, aterros de lixo e água represada. • Aumento do peso devido ao umedecimento. • Maior declividade do talude devido a cortes, escavações ou remoção de bermas. • Solapamento ao pé do talude por erosão hídrica. • Choques causados por explosões, raios, etc. • Trincas de tração. • Pressão da água em trincas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inchamento e amolecimento de argila por absorção de água. • Pressões de água devido à percolação subterrânea. • Desabamento de estruturas complexas em arcos de solos saturados com choque ou vibração. • Microfissuramento devido à alternância de inchamento e retração de tensões. • Ruptura progressiva em solos sensíveis e rochas frágeis. • Deterioração de cimentos naturais dos solos. • Perda de sucção na secagem e inundação. • Intemperismo – deterioração química ou bioquímica.

Segundo Cruden e Varnes (1996), os movimentos gravitacionais de massa podem ter muitas causas, mas somente um deflagrador, que é por definição um estímulo externo, como chuvas intensas, terremotos, erupções vulcânicas, ondas violentas ou fluxos erosivos intensos, que têm como resultado um quase imediato aumento das tensões ou redução da resistência do material envolvido.

Dessa forma, Guidicini e Nieble (1984), ao estruturarem as causas de movimentos gravitacionais de massa, fazem uma distinção entre: agentes predisponentes (que seriam a associação dos fatores motivadores ou preparatórios) e agentes efetivos (que seriam os responsáveis por desencadear o fenômeno).

O comportamento da maioria dos agentes desestabilizadores é bem analisado, o que facilita a compreensão de seu controle. Destes, o mais comum e atuante é, sem dúvida, a água. Segundo Castelo (1986) deve-se atuar neste agente por meio de dois procedimentos básicos: minimizar a infiltrabilidade do terreno (revestimentos rígidos, revestimentos vegetais) e drenar a água no maciço (drenagem superficial e profunda).

Para Castelo (1986), há duas formas básicas de atuação para estabilização de uma encosta: através da minimização dos agentes desestabilizadores, que o autor chama de proteção de encostas, ou por meio da introdução de esforços externos estabilizadores, que são as estruturas de contenção.

Como já discutido no Capítulo 1, o foco do presente trabalho é o estudo da mitigação com uso da vegetação.

A proteção vegetal de encosta pode existir naturalmente, requerendo apenas preservação, ou, em alguns casos, necessita ser introduzida, sob pena de instabilização da encosta. Essa intervenção representa um investimento relativamente pequeno, podendo ser a única solução para estabilizar encostas de grande extensão e volume de terra (CASTELO, 1986).

2.1.3. Taludes com Rupturas Rasas

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 menos que 1,0m (Figura 2.8), a ação das raízes da vegetação é muito importante, desde que elas alcancem aquele substrato. 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.

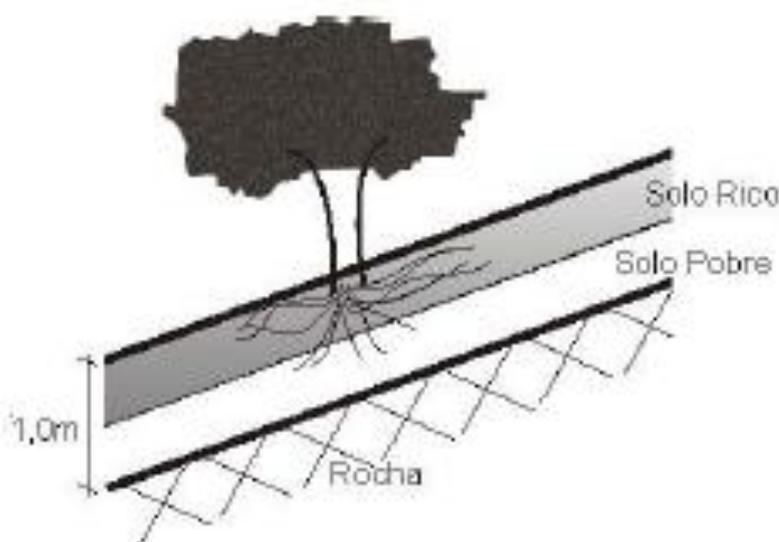


Figura 2.8. Talude infinito com três camadas: solo/camada de transição/rocha (Lemes, 2001).

No caso de solo sobre rocha ocorre problema similar, havendo maior contraste no contato entre as camadas. Lemes (2001) salienta que, se as raízes não atingirem o substrato rochoso, elas não terão influência na ruptura de superfícies mais profundas do que aquela das

raízes.

No caso de taludes íngremes, Subic (1994) 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.

2.1.4. 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 e, exceto para raízes muito profundas, a existência de árvores não precisa ser considerada (Figura 2.9). Entretanto, a vegetação pode ter um profundo impacto nas pressões do talude.

A partir da revisão de literatura, pode-se indicar a necessidade de monitoramento da infiltração/evaporação para as particulares condições de clima, geologia e vegetação do local de interesse (Lemes, 2001).

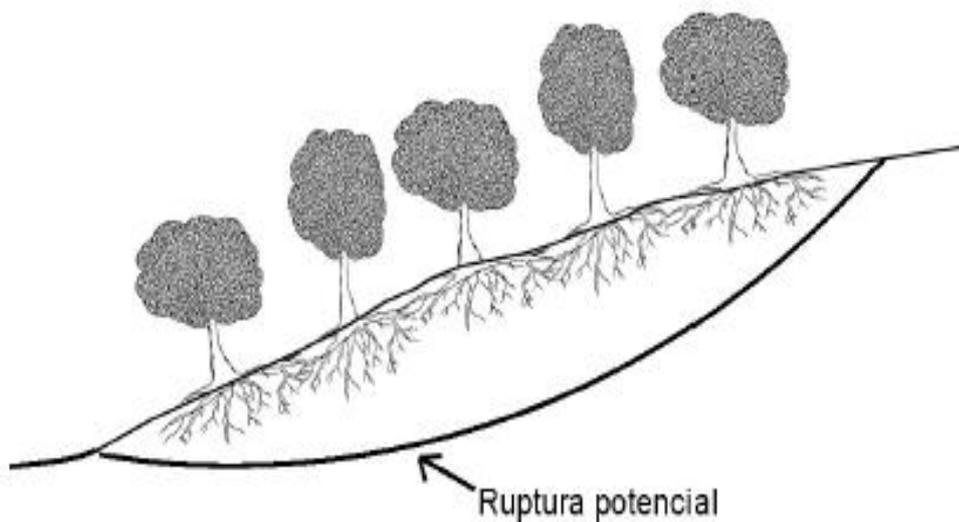


Figura 2.9. Ruptura profunda em taludes naturais (Lemes, 2001).

2.2. MODELOS GEOMECÂNICOS DE TALUDES

É possível perceber certo grau de indistinção e aplicações equivocadas entre os termos talude antrópico e encosta natural, os quais são definidos pela NBR 11682-Estabilidade de Encostas como “Talude: terreno inclinado” e “Encosta: talude de origem natural”.

O dicionário Houaiss da Língua Portuguesa (HOUAISS, 2000) define o vocábulo talude como: “(...) inclinação na superfície lateral de um aterro, de um muro ou de qualquer obra; rampa...”. E, encosta, com: “vertente, (‘declive’)...”. Esta definição dá ao termo talude, um caráter “antrópico”, já que o combina com a palavra “obra”.

Já uma definição mais clara e objetiva destes termos é proposta por CUNHA et al. (1991):

“Taludes naturais são definidos como encostas de maciços terrosos, rochosos, ou mistos de solo e rocha, originados por agentes naturais e de superfície não horizontal, mesmo que tenham sofrido algumas ações antrópicas, tais como cortes, desmatamentos, introdução de cargas etc.

Uma encosta pode ser entendida como toda a superfície natural inclinada (declive) que une duas outras superfícies caracterizadas por diferentes energias potenciais gravitacionais. O termo encosta é mais utilizado em caracterizações regionais, enquanto que talude natural é mais empregado em descrições locais, preferencialmente, por profissionais atuantes em geotecnia.

Talude de corte é definido como um talude natural ou de encosta resultante de algum processo de escavação promovido pelo homem.

O termo talude artificial refere-se aos declives de aterros construídos a partir de vários materiais, tais como argila, silte, areia, cascalho e rejeitos industriais ou de mineração.”

2.2.1. Taludes de Cortes Rodoviários (1:1)

Os taludes de cortes rodoviários no Rio Grande do Sul são geralmente realizados em solos não saturados, laterizados ou residuais, e são cortados com inclinações 1:1 em função da boa experiência de bom comportamento. Mas, em alguns casos, após o término da construção

de uma estrada, observa-se que estes cortes no terreno nem sempre atingem o grau de estabilidade ou de cobertura vegetal requeridos no projeto (Lemes, 2001). É comum problemas como: (a) a vegetação morre pouco depois da brotação; (b) a erosão provocada pela chuva remove a vegetação incipiente; (c) a infiltração de água provoca escorregamentos de terra que danificam a geometria e a drenagem superficial.

Em relação à vegetação, o primeiro passo para o seu estabelecimento refere-se à preparação da superfície do solo. Para que ocorra o desenvolvimento satisfatório da vegetação, 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. Este aspecto de preparação deveria ser levado em conta durante o corte dos taludes, especialmente em relação à rugosidade superficial, o que minimizaria problemas na implantação da vegetação.

2.2.1.1. Cortes em solos arenosos finos

Os solos arenosos finos são altamente suscetíveis à erosão e ravinamento se não houver uma cobertura vegetal adequada. Por isso algumas alternativas que são empregadas são: enleivamento; semeadura e cobertura com palha; e hidrossemeadura.

O enleivamento imediato da área é um dos tratamentos indicados, pois a vegetação rasteira diminui o escoamento superficial da água que corre sobre o solo, reduzindo assim o dano causado pela erosão. As raízes, uma vez estabelecidas, formam uma malha que liga as partículas do solo e, dessa forma, reforça-o.

Essa alternativa é um bom tratamento para a área, porém um dos problemas mais comuns que ocorrem no período imediatamente posterior ao seu emprego é o escorregamento da camada após um período de chuvas. O material satura e 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).

Outro 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 das vantagens econômicas, esse processo possibilita maior rapidez de aplicação e o alcance a

locais pouco acessíveis, além das águas da chuva terem maior dificuldade ou serem impedidas de remover a vegetação em germinação.

Uma vez estabelecido o enraizamento da vegetação, um segundo fenômeno pode ocorrer, ou seja, 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.

2.2.1.2. Cortes em solos residuais de granitoides

Os solos residuais de granitoides geralmente são de baixa fertilidade e alta permeabilidade, embora tenham resistência adequada para estabilidade do corte. Geralmente são solos erodíveis quando não tem proteção, principalmente quando apresentam mica em sua composição, às vezes podem ocorrer escorregamentos muito rasos (<0,5 m) durante chuvas intensas.

Segundo Lemes (2001), o enleivamento e a hidrossemeadura são soluções adequadas, mas a estabilidade pode ser melhorada com a utilização de associação com vegetais de diferentes comprimentos de raízes (Figura 2.10).

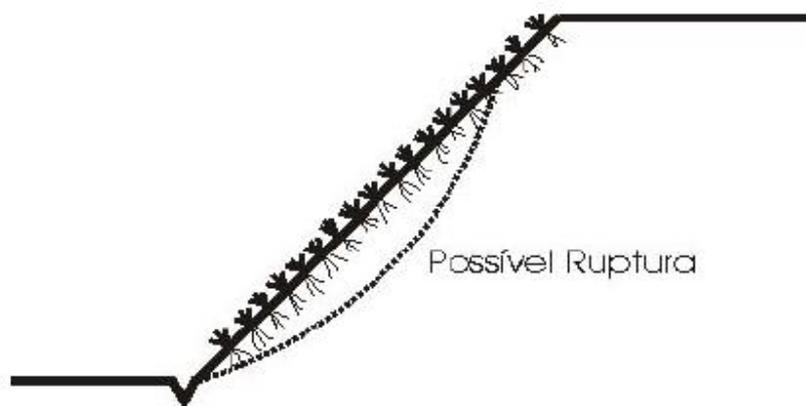


Figura 2.10. Corte em solo granular. Vegetação com diferentes comprimentos de raiz (LEMES, 2001).

2.2.1.3. Cortes em solos argilosos plásticos

Os solos argilosos plásticos geralmente não têm problemas de erosão hídrica, mas sofrem degradação pela variação de umidade, sendo assim, os ciclos de

umedecimento/secagem abrem trincas no solo, que provocam o aumento da infiltração, diminuindo a resistência ao cisalhamento disponível. A aplicação da vegetação também é indicada nesse caso, a fim de evitar os ciclos de umedecimento e secagem na parte mais superficial do solo, porém há um agravante que é o aumento da infiltração, dessa forma dificultando o conhecimento da profundidade em que ocorrerá a ciclagem da umidade.

Segundo Lemes (2001), para resolver esse 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 (Figura 2.11). 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.

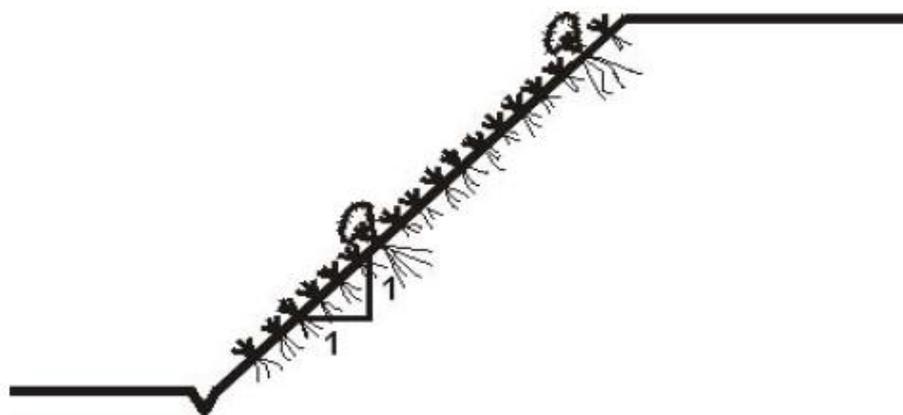


Figura 2.11. Corte em solo argiloso. Vegetação com raízes superficiais associada a poucos exemplares de raízes mais profundas (LEMES, 2001).

2.2.1.4. Cortes em 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, logo abaixo há a presença de uma camada inferior de solo saprolítico, de baixa fertilidade, permeabilidade variável e com problemas com erosão hídrica, principalmente na interface com a camada superior (Figura 2.12).

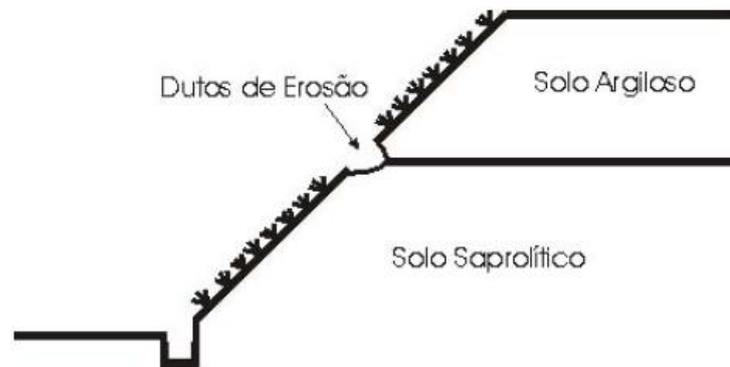


Figura 2.12. Cortes em perfil de alteração (LEMES, 2001).

A seguir apresentam-se algumas propostas sugeridas por Lemes (2001):

- 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;
- Retaludar a camada menos resistente para uma inclinação de 1/1,5, e 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 (Figura 2.13).

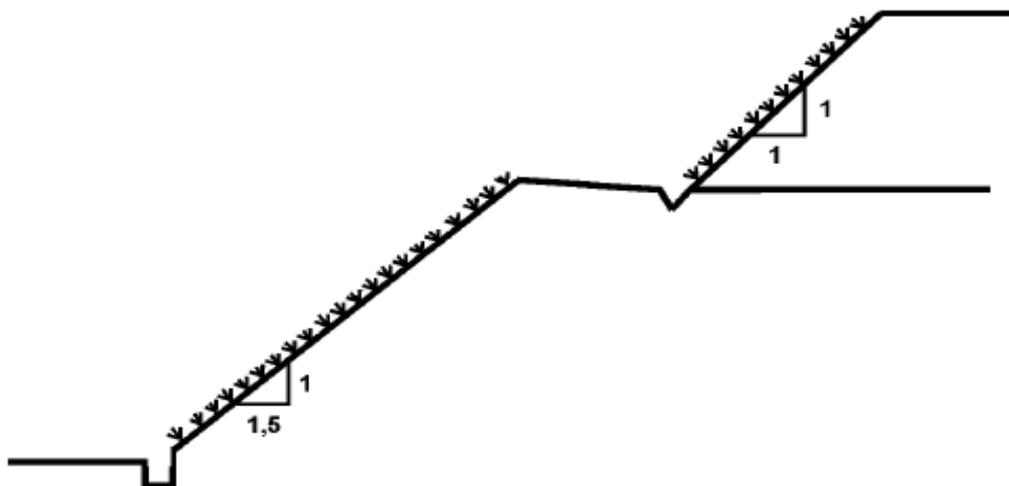


Figura 2.13. Corte em perfil de alteração – Retaludamento (LEMES, 2001).

2.2.1.5. Cortes em solos saprolíticos com diaclasamento

O solo saprolítico com diaclasamento apresenta uma estrutura herdada da rocha mãe, comportando-se muitas vezes como um maciço rochoso descontínuo, o que ocasiona possibilidade de quedas de blocos. Essa característica resulta no crescimento das raízes das árvores, deslocando os blocos, aumentando a possibilidade de quedas, dependendo da geometria das discontinuidades e do corte.

Mesmo que não haja quedas, as árvores causam fissuras e aberturas de juntas, as quais 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 (LEMES, 2001).

2.2.1.6. Cortes em solos estratificados

Os solos estratificados geralmente são formados por camadas alternadas de materiais argilosos e arenosos ou até mesmo siltosos, sendo sua fertilidade variável, porém sua maior característica é a diferença de permeabilidade dos estratos.

Lemes (2001) apresenta duas soluções possíveis para estes materiais, à primeira solução consiste na execução de retaludamento do perfil, com bancadas de pequena largura (2,0 m), com valeta no topo da camada fina (Figura 2.14). A segunda solução consiste em uma drenagem mais profunda na camada arenosa mais espessa (Figura 2.15).

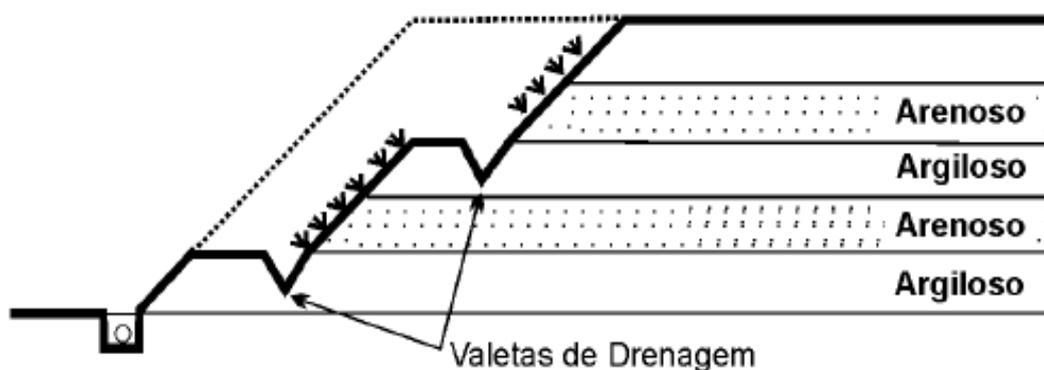


Figura 2.14. Cortes em taludes estratificados – Camada de pequena espessura (LEMES, 2001).

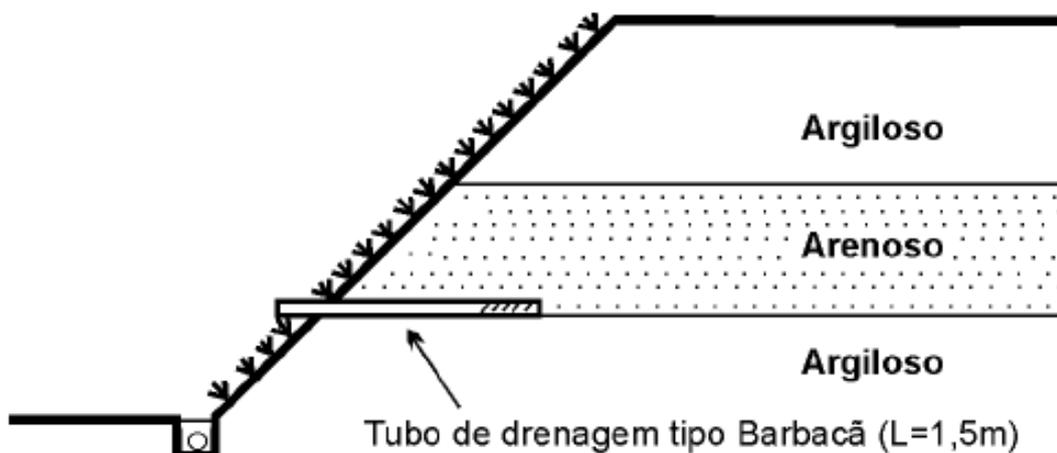


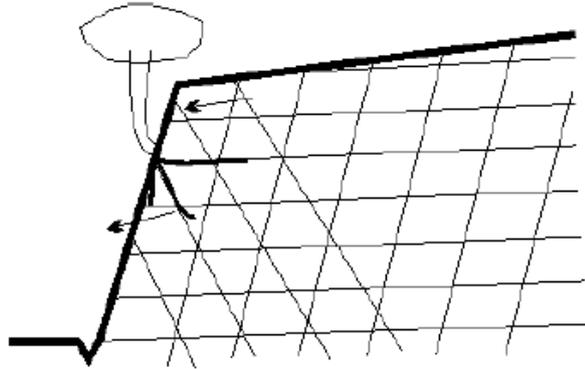
Figura 2.15. Corte em solo estratificado – Camada arenosa mais espessa (LEMES, 2001).

2.2.1.7. Cortes em materiais rochosos

Os cortes em rocha apresentam, tipicamente, uma face verticalizada e estéril após a abertura a fogo, porém, alguns apresentam crescimento espontâneo de vegetação nas fraturas após algum tempo.

Nos casos de crescimento de vegetação, geralmente, ocorre o descalçamento de blocos e mesmo no deslocamento lateral destes, isto se torna mais evidente quando mais desfavorável for à fratura existente (Figura 2.16). Além do efeito do crescimento das raízes, as árvores em dias de vento funcionam como alavancas poderosas, sendo esses efeitos ainda mais pronunciados quando as fraturas apresentam-se alteradas ou quando o maciço apresenta-se como rocha alterada.

a)



b)

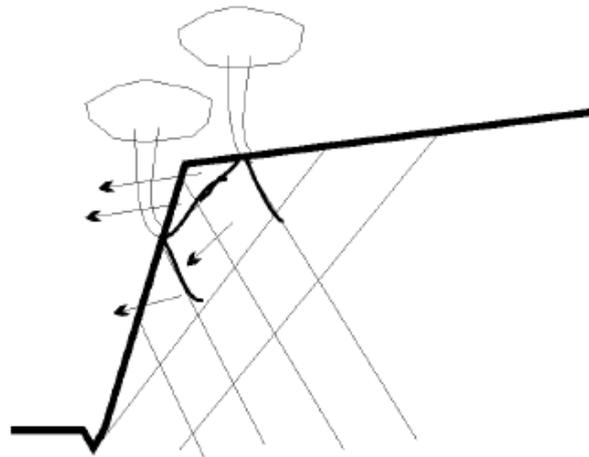


Figura 2.16. Influência das raízes de árvores em cortes em materiais rochosos. a) Fraturas horizontais e favoráveis. b) Fraturas desfavoráveis (LEMES, 2001).

2.2.2. Taludes de Aterros Rodoviários (1:1,5)

2.2.2.1 Aspectos gerais

Muitos dos problemas encontrados em aterros são semelhantes àqueles de cortes, porém algumas diferenças são importantes (Lemes, 2001):

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 ao escorregamento.
2. A compactação é frequentemente deficiente na borda, o que causa a

criação de uma camada superficial de material fofo, mais permeável e com menor resistência.

Nestes casos, a remoção da camada mal compactada seria mais indicada, entretanto isto muitas vezes é considerado difícil ou desnecessário. Assim, a vegetação além de proteger o aterro contra a erosão e excesso de infiltração, deve também estabilizar esta camada.

2.2.2.2 Soluções de implantação de vegetação

As soluções usuais de cobertura vegetal envolvem o uso de hidrossemeadura, o plantio direto de leivas com cerca de 3 a 5 cm de camada solo-raiz e o uso de mantas biodegradáveis com sementes e adubos, reforçadas ou não com telas.

Outra alternativa menos utilizada é o 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 (Figura 2.17) à camada externa e permite um desenvolvimento prematuro de espécies que brotam por estaquia. O sistema de raízes se desenvolve a partir desses galhos enterrados, promovendo uma estabilização da face e auxiliando a drenagem horizontal da borda.

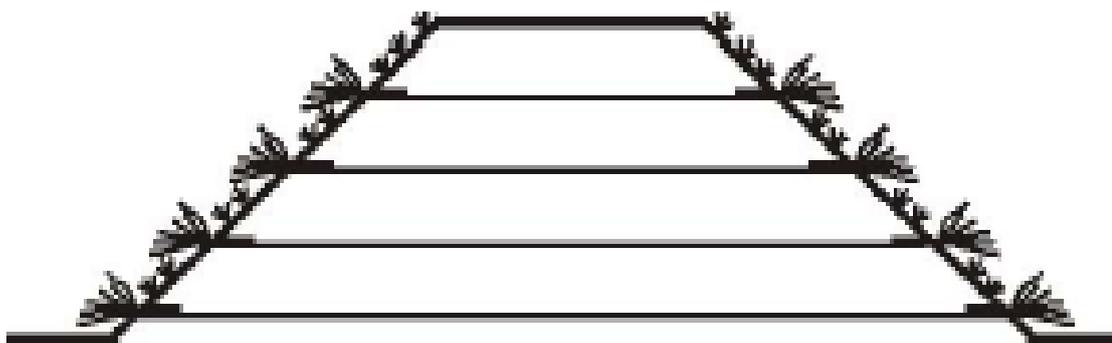


Figura 2.17. Aterros rodoviários – Utilização de “*brush layer*” (Lemes, 2001).

2.3. EFEITOS DA VEGETAÇÃO

2.3.1. Efeitos Gerais nos Solos

A conscientização do importante papel exercido pela cobertura vegetal na proteção do solo e das graves conseqüências resultantes de sua remoção vem crescendo com o passar dos tempos, que é a maior causa de muitas rupturas que acontecem no solo, tanto por fenômenos naturais como pela interferência do homem (Mud slides, 2011).

A escolha adequada das espécies a serem consorciadas e as respectivas quantidades de sementes ou mudas são fatores decisivos no estabelecimento da vegetação, portanto é necessário conhecimento técnico, a fim de eliminar a escolha aleatória das espécies, gerando uma relação custo/benefício positiva para o projeto a ser executado (PEREIRA, 2006).

A importância da vegetação freqüentemente é verificada quando se procede a sua supressão. Após a retirada da cobertura vegetal por colheitas ou desmates ocorre, na maioria das vezes, intenso aumento de processos erosivos e instabilização de taludes. A revegetação, por sua vez, promove a diminuição desses processos.

O recobrimento vegetativo modifica sensivelmente o microclima superficial, reduzindo as variações de umidade e temperatura do solo. Esta ação isolante relaciona-se aos processos de redução da coesão aparente do solo pela quebra de agregados e pelo enfraquecimento da estruturação devido a variações na temperatura, especialmente após serem submetidos a ciclos de oscilações térmicas por períodos de tempo mais longos.

O recobrimento do solo com capim ou vegetação herbácea densa proporciona a melhor proteção contra a erosão laminar e contra a ação do vento. A efetividade do recobrimento vegetativo com diferentes tipos de recobrimento pode ser verificada na Tabela 2.5.

Tabela 2.5. Redução da erosão em função de diferentes condições de recobrimento em condições temperadas (Adaptado do USDA Soil Conservation Service,1978). (CBCN, 2010).

Tipo de Recobrimento	Redução (%)
Controle (sem recobrimento)	0,0
Semeio de espécies herbáceas:	
Centeio (perene)	95
Centeio (anual)	90
Capim-sudão	95
Pastagem nativa de ciclo anual (máximo)	97
Semeio de espécies herbáceas permanentes	99
Mulch	
Feno, índice de aplicação (t/ha)	
2,0	75
4,0	87
6,0	93
8,0	98
Palha de grãos pequenos (diâmetro < 10 mm), 8,0 t/ha	98
Serragem, 24 t/ha	94
Celulose de madeira, 6,0 t/ha	90
Fibra de vidro, 6,0 t/ha	95

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 (Tabela 2.6). Os efeitos mecânicos são consequentes das influências físicas do sistema aéreo ou do sistema de raízes da vegetação com o solo. Os efeitos hidrológicos são consequentes 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.

Tabela 2.6. Efeitos gerais da vegetação sobre o solo (Adaptado por Pinheiro (2000) do elaborado por Greenway (1987)).

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

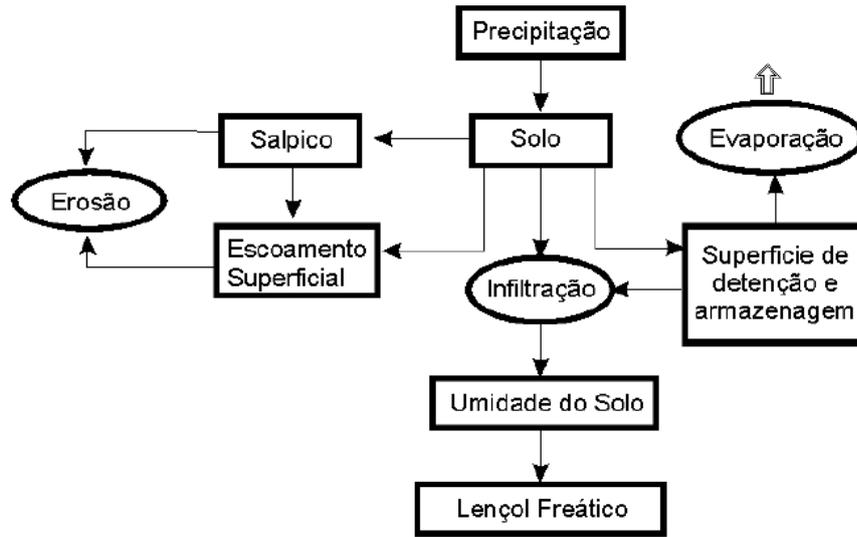
Tabela 2.5. (continuação). Efeitos gerais da vegetação sobre o solo (Adaptado por Pinheiro (2000) do elaborado por Greenway (1987)).

Efeitos Mecânicos	Influência
<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, contraentamento.	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 protegendo contra a erosão.	B

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

Greenway (1989) apresenta dois fluxogramas que comparam o ciclo hidrológico de solo com vegetação e de solo nu (Figura 2.18).

a) Solo nu



b) Solo com vegetação

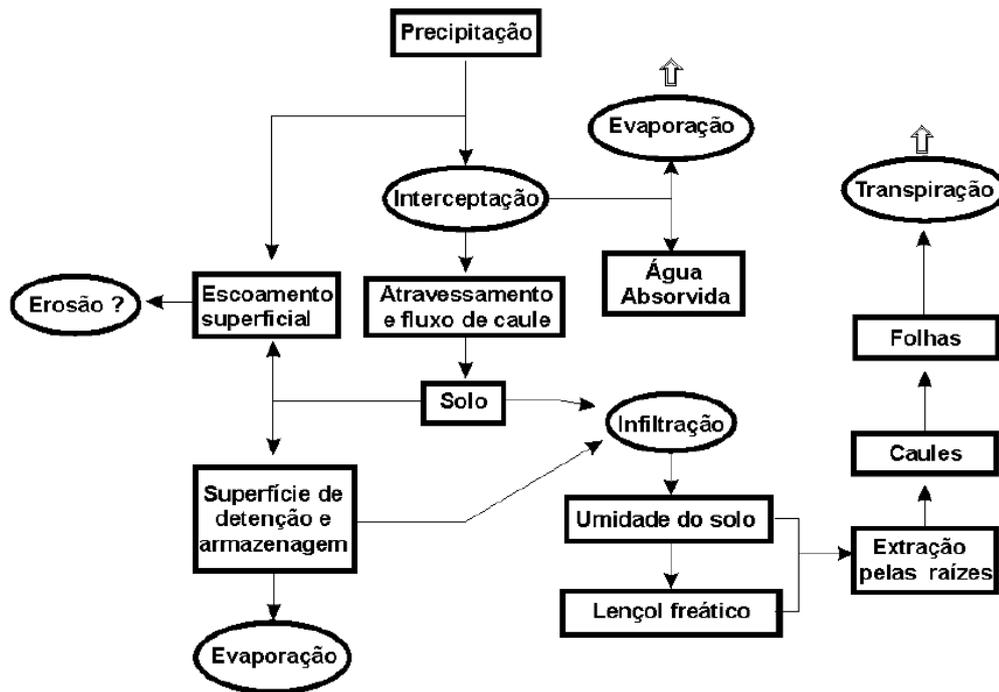


Figura 2.18. Fluxogramas comparativos do ciclo hidrológico de solo nu e de solo com vegetação (adaptado por LEMES (2001) dos fluxogramas elaborados por GREENWAY, 1989).

De acordo com os fluxogramas acima, observa-se que em presença da vegetação o ciclo hidrológico é mais complexo do que em solo nu, no qual a água chega integralmente no solo e

parte escoar superficialmente, outra parte é armazenada na camada superficial – evaporando daí uma parte – e outra parte infiltrando no solo. Já no solo com cobertura vegetal parte da água já é interceptada pela folhagem da vegetação, sendo parte absorvida pela planta, parte evaporada diretamente da superfície dos caules e das folhas para a atmosfera e outra parte chegando ao solo. Da porção de água que atinge o solo, parte escoar superficialmente e outra parte é armazenada na superfície, sendo parte evaporada e parte infiltra no terreno.

2.3.1.1. Efeitos hidrológicos

Greenway (1989) em seus estudos cita alguns efeitos hidrológicos como:

- *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. Greenway considera esse efeito benéfico e que 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.

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).

Segundo Styczen e Morgan (1995) as copas de árvores mais altas que um metro do solo incrementam a erosão, pois, pela drenagem da 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. Este efeito, no entanto pode ser muito reduzido, ou até eliminado, se o solo tiver uma camada de material vegetal e detritos (serrapilheira) que atua como proteção eficaz.

- *Incremento da rugosidade do solo:*

As raízes e caules aumentam a rugosidade macroscópica do solo, aumentando a infiltração, e segundo Greenway esse efeito é adverso.

Gray (1995) e o Manual de conservación del suelo y del agua (1991) consideram o aumento da rugosidade benéfico. Segundo Cassol (1981) os 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. Além disto, os detritos da serrapilheira também estabilizam a temperatura e a umidade dos solos (e a sucção decorrente).

A infiltração da água no solo é benéfica, pois transforma as áreas de bosque em um grande depósito 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 (Manual de conservación del suelo y água, 1991).

- *Retirada da umidade do solo:*

As raízes extraem a água do solo, a qual é lançada na atmosfera pela transpiração, reduzindo a poro pressão e incrementando a sucção matricial (Greenway, 1989).

- *Diminuição da umidade:*

Ao retirar a umidade, por outro lado, a vegetação pode favorecer a abertura de fendas de tração em solos expansivos. Aumenta-se, assim, 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.

2.3.1.2. Efeitos mecânicos

Greenway (1989) em seus estudos cita alguns efeitos mecânicos como:

- *Reforço do solo pelas raízes:*

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, indica que esse efeito se dá pela transferência da tensão de cisalhamento no solo para resistência à tração nas raízes (LEMES, 2001).

- *Ancoragem:*

A ancoragem é um efeito das raízes que 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 (Figura 2.19), ações essas, que se associadas a raízes e caules ou troncos de vegetação lenhosa, são importantes para a estabilização do talude.

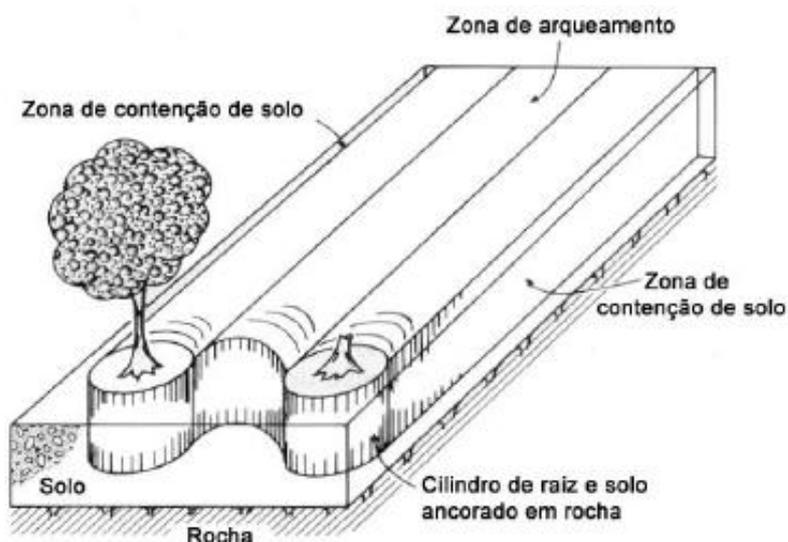


Figura 2.19. Contenção e arqueamento (GREENWAY, 1989).

- *Sobrecarga:*

O peso das árvores sobre o talude acrescenta uma carga extra ao solo, aumentando a componente normal e na direção do talude, que Greenway (1989) cita como benéfico ou adverso dependendo das condições.

Lemes (2001) comenta que, apesar de aumentar a força na direção do talude, aumenta a resistência de atrito do solo, sendo esse efeito geralmente mais importante.

- *Ação do vento:*

O vento agindo sobre a vegetação transmite forças dinâmicas ao talude (Gellatley *et al.*, 1995), efeito que o autor considera como adverso. O Manual de Conservación del Suelo y del Agua (1991) e Marsland (1996) consideram que a presença da vegetação, em relação a esse efeito, torna-se benéfica, na medida em que age como um gancho no fluxo de ar, reduzindo a velocidade do vento e, em consequência, a erosão do solo.

- *Raízes como ligantes de solo:*

As raízes servem como uma ligação entre as partículas do solo na superfície, dessa forma, elas reduzem a erosão ocasionada pelo escoamento superficial.

2.3.2. Efeitos sobre a 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 & STILES, 1995).

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

- *O clima* – tendo importância fundamental à temperatura e o regime pluviométrico, observando-se que se a chuva for em quantidade adequada, leve e mais espaçada, terá uma ação muito menor na erosão do que se for intensa e em um curto espaço de tempo (GUERRA, 1994).
- *O solo* – a resistência à desagregação do solo, sua permeabilidade, a taxa de transmissão de água, composição química, textura e quantidade de matéria orgânica são fatores determinantes para a maior ou menor susceptibilidade à erosão, sendo que estes não são estáticos, pois se modificam com o passar do tempo e com a utilização do solo (GUERRA, 1994).
- *A topografia* – o comprimento da rampa, a declividade e a forma da encosta também interferem na velocidade de escoamento superficial.
- *O manejo do solo* – preparos e cultivos intensos ou inadequados podem perturbar a estrutura do solo, incrementando a desagregação e/ou a compactação. Um exemplo de perturbação é a ocasionada pela agricultura intensificando a densidade aparente do solo, sendo incrementada devido à redução da matéria orgânica e pelo uso de maquinário agrícola (LEMES, 2001).
- *A cobertura vegetal* – considerando que a 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 (LEMES, 2001).

Greenway (1989) observou que, em estudos quantitativos da erosão do solo nos anos 20, foi constatada pouca erosão em áreas com densa cobertura vegetal, a partir desses estudos, houve uma rápida evolução na pesquisa da erosão, pela importância na agricultura. Como consequência desse estudo foi desenvolvida a Equação Universal de Perda de Solo (2.1), proposta em 1965 por Wischmeier e Smith, para prever as perdas de solo em áreas cultivadas, ocasionada pela erosão hídrica.

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 certo estágio de crescimento e densidade, com a quantidade perdida em solo nu.

$$A = R.K.L.S.C.P \text{ (USLE)} \quad (2.1)$$

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 susceptibilidade de desagregação e transporte das partículas pela ação dos agentes erosivos);

L – fator de comprimento de talude (adimensional);

S – fator de declividade (adimensional);

C – fator da 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, no Brasil é mais usual em ton/ha x mm/h).

Gray (1995) relata que o fator climático (R) é obtido a partir de dados pluviométricos (levando em conta a energia cinética e a 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. Para demonstrar essa variação Gray (1995) apresenta o Quadro 2.1, fornecido por USDA (Soil Conservation Service).

Quadro 2.1. Fator C para diferentes condições de cobertura do solo. Percentagem de redução de perda de solo comparada com solo sem cultivo. (USDA Soil Conservation Service (1978), citado por GRAY, 1995).

TIPO DE COBERTURA		FATOR C	EFETIVIDADE (%)
Nenhuma (solo sem cultura)		1,00	0,0
Semeadura temporária	Forrageira (tipo perene)	0,05	95
	Forrageira (anual)	0,10	90
	Small grain ou pequenos grãos (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
	Feno	1,0	0,13
	Feno	2,0	0,02
	Palha de grão pequeno	2,0	0,02
	Lascas de madeira	6,0	0,06
	Madeira de celulose	1,5	0,10
	Fibra de vidro	1,5	0,05

2.3.3. Casos Particulares em Taludes

A proteção vegetal consiste na utilização de espécies vegetais diversas, cuja finalidade é preservar áreas expostas (talude, áreas de empréstimos, descidas d’água, valetas etc.), dando-lhes condições de resistência à erosão e assegurando, por outro lado, sua integração na paisagem natural.

A revegetação ou cobertura vegetal dos solos expostos pela construção rodoviária é o processo natural para se atingir os efeitos desejados na reabilitação ambiental destas áreas afetadas, especialmente, quando a estrutura fértil do solo é quebrada pelas atividades da construção, tornando-se cada vez mais infértil, à medida que se aprofundam as caixas de empréstimo e os taludes dos cortes ou jazidas concentradas de solos, onde os mesmos são bastante ácidos e pouco férteis pela presença do alumínio, ferro e outros metais.

O sistema radicular da vegetação (herbácea, arbustiva e arbórea) quebra a estrutura compacta e densa do solo, funcionando como mecanismos que regeneram a vida no solo estéril, especialmente, pelo constante estado de renovação das raízes, onde a morte de algumas induz a germinação de outras, promovendo a adubação da estrutura do solo. Este ciclo de substituição incorpora ao solo boa quantidade de nutrientes que alimentam as raízes novas, promovendo a fertilidade do solo. As leguminosas têm por finalidade sustentar estas últimas nas necessidades de nitrogênio através de fixação simbiótica.

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 combinada pela vegetação.

De acordo com Cassol (1981), se consegue 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 (realizando uma escarificação ou gradagem leve) com o aproveitamento integral dos restos culturais.

Alguns procedimentos para controle da erosão foram indicados por Mazuchowski (1981) no projeto de recuperação de áreas do Noroeste do Paraná, onde os desmatamentos já haviam eliminado mais de 98% da floresta nativa:

- 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.

2.3.3.1. A influência da vegetação

O autor Gray (1995) afirma que a vegetação é efetiva para controlar erosão superficial ou ruptura de massas rasas, nas quais a água tem uma influência importante, tanto pela infiltração quanto pelo escoamento superficial no solo. A eficiência das raízes ao impedimento dos movimentos de massa, principalmente escorregamentos, ocorre até a profundidade que elas alcançam e o efeito será mais importante se elas penetrarem através da superfície de ruptura.

Uma citação de Gray (1995) é sobre esquemas de classificação como de Tsukamoto e Kusakabe (1984), desenvolvido principalmente para taludes com florestas no Japão, baseado na superfície crítica de escorregamento em relação à zona de raiz. O qual resume a influência do reforço de raiz para taludes em diferentes condições de subsolo (Figura 2.20), chamando a atenção à aplicabilidade desse esquema, pois esta pode não ser considerada para todos os casos, mas pode ser considerada em qualquer estudo que leve em conta o reforço do solo pela raiz.

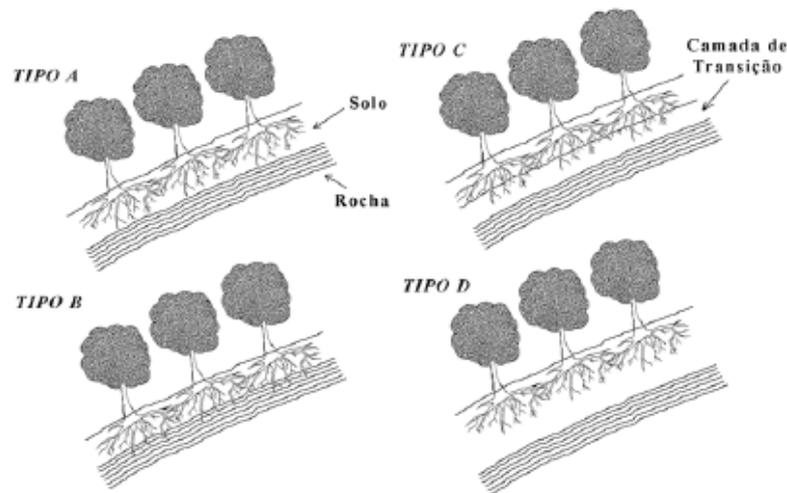


Figura 2.20. Tipos de reforço de talude por raízes (Tsukamoto e Kusakabe (1984), citados por Gray (1995)).

Analisando a Figura 2.20, o esquema do talude tipo A, as raízes reforçam completamente a manta relativamente fina de solo, mas não conseguem penetrar na rocha, criando 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.

Após esses levantamentos feitos por Gray (1995), este 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.

2.3.3.2. Poro pressão e sucção

O Geotechnical manual for slopes (1984) propôs que a água do subsolo pode ser dividida em uma zona de poro pressão positiva e outra negativa. Essas zonas são delimitadas pelo nível de água do solo, a qual serve como uma linha divisória entre as zonas, e a pressão nessa linha é igual à atmosférica. A ocorrência de mudanças na poro pressão dessas zonas (de poro pressão positiva e de poro pressão negativa) afetam a estabilidade de taludes. Caso ocorra um incremento na poro pressão positiva a tensão efetiva do solo sofrerá uma redução e, conseqüentemente, em uma redução da resistência de cisalhamento disponível.

Diversos autores analisam cada vez mais a influência da poro pressão na estabilidade de taludes, e Wu (1995), citado por Lemes (2001) além observar o efeito da poro pressão levou em consideração o efeito das árvores nessa, o que ficou bem claro ao se comparar um mesmo lugar em épocas distintas e em situações distintas.

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. O autor disse que isso acontece, pois a água no solo que estiver acima do nível d'água ficará 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.

Segundo Fredlund e Rahardjo (1993) nesse caso o solo não estará saturado, logo 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. Os autores referem-se ainda ao potencial de velocidade, que é devido ao fluxo de água que ocorre dentro do solo.

Gardner (1960) afirma que, para que a planta possa utilizar a água do solo, o potencial na planta deve ser menor que no solo, concluindo assim que a sucção na planta (ou déficit de pressão difusa) deve ser maior que a sucção do solo, ou seja, quanto maior a taxa de água utilizada, maior será a diferença de potencial.

Santos Neto e Carvalho (1995) e Vanapalli *et al.* (1996), 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.

Para Fredlund e Rahardjo (1993) 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 serem substituídas por variações na sucção matricial e vice-versa.

Lim *et al.* (1996) realizaram ensaios de campo em um talude com diferentes condições de superfície (coberto com lona, com grama e solo nu), a partir desses ensaios foi concluído que a presença de vegetação pode alterar as condições de umidade dentro do solo e aumentar significativamente a sucção matricial. 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, já no solo coberto com lona a alteração na sucção foi insignificante.

2.3.3.3. Seleção vegetal

Dos métodos para ancoramento de sedimentos, o de maior aplicabilidade técnico-econômica e o mais adequado ambientalmente é representado pela estabilização do solo pela revegetação. As espécies selecionadas devem apresentar o sistema radicular profundo e desenvolvido, para maximizar o volume de solo estabilizado pelas raízes das plantas.

Normalmente é utilizado o consorciamento de gramíneas e leguminosas (Figura 2.21), devido à rapidez de crescimento e recobrimento dessas espécies. Com uma composição heterogênea de espécies, a ciclagem de nutrientes é mais intensa, a ocorrência de pragas é menor e a porcentagem de recobrimento do solo é maior.



Figura 2.21. Consorciamento de leguminosas e gramíneas utilizadas na revegetação de taludes (CBCN, 2010).

Coppin e Richards (1990)⁴, citado por DNIT (2009) afirmam que o máximo efeito do recobrimento vegetativo é obtido a partir de um recobrimento efetivo de 70%, e verificaram ainda que tipos variados de vegetação de porte idêntico apresentaram diferenças significativas na intensidade de perda de solo, tendo estas diferenças apresentado valores da ordem de 400 a 500% para parcelas de 1 e 2 m de altura, respectivamente.

A influência do reforçamento radicular na estabilidade dos taludes pode variar em função de fatores como:

- valores de resistência à tensão das raízes;
- propriedades da interface entre as raízes e o solo (rizosfera);
- concentração, características de ramificação e distribuição das raízes no solo - também denominada arquitetura radicular;
- espaçamento, diâmetro e massa de solo explorada pelas raízes;
- espessura e declividade do perfil do solo do talude;
- parâmetros geotécnicos relativos à resistência ao cisalhamento do solo.

A relação entre resistência radicular e diâmetro pode ser expressa pela equação logarítmica dada por:

⁴ COPPIN, N. J.; RICHARDS, I. G. **Use of vegetation in civil engineering**. Sevenoaks, Kent: Butterworths. 1990. 305 p.

$$T_r = nD^m \quad (2.2)$$

Onde:

T_r = resistência radicular à tensão;

D = diâmetro de raízes; e

n e m = constantes empíricas específicas para cada tipo de planta.

Segundo Pereira (2001) a vegetação implantada inadequadamente pode causar instabilidade em áreas estáveis e causar o surgimento de erosões, alguns exemplos seriam:

- Redução da umidade do solo: quando se utilizam espécies que necessitam de grande quantidade de água;
- O peso das árvores: ocasionam aumento das forças atuantes, provocando deslizamentos;
- O vento: produz forças sobre as massas de solo, podendo ativar deslizamentos;
- As raízes: podendo contribuir para danificar estruturas cimentadas superficialmente;
- As raízes e árvores secas: podendo contribuir para a concentração do fluxo de água pluvial e provocar sulcamentos e ravinamentos;
- As raízes superficiais: podendo contribuir para a desagregação do solo, quando muito concentradas, em grande volume e superficiais; exemplo o bambu;
- Plantas de raízes finas e superficiais: podem impedir a infiltração e desagregarem partículas do solo;
- Plantas altas e de folhas largas: podem causar a erosão, pois concentram água nas folhas, em consequência, as gotas d'água oriundas das plantas serão maiores que as gotas da chuva.

Por isso a necessidade de se escolher bem as espécies vegetais e sempre que possível empregar na área a ser reparada vegetações nativas, pois dessa forma tem-se uma garantia maior do melhor desempenho da técnica empregada.

Gramíneas e leguminosas:

Espécies de gramíneas e leguminosas são as mais amplamente empregadas em muitos projetos de recuperação ambiental devido às suas características morfológicas e fisiológicas que permitem uma rápida cobertura do solo e a criação, até certo ponto, de um novo sistema sustentável, como ressaltado por Campello (1996).

As gramíneas em geral possuem uma fotossíntese do tipo C₄, portanto, com crescimento acelerado e elevada produção de matéria seca, dando às gramíneas tropicais vantagem competitiva na utilização da energia solar (KRETSCHMER e PITMAN, 1995).

O sistema radicular das gramíneas é fasciculado com predomínio de ramificações na camada mais superficial do solo, contribuindo para a sua estruturação (GRAY e SORTIR, 1992).

De acordo com Einloft (1996), o volume de raízes desenvolvidas pelas gramíneas é superior ao da parte aérea, o que reforça a indicação deste grupo de plantas como meio de incrementar as condições físicas do solo.

Muitas leguminosas também apresentam crescimento rápido, comportando-se como pioneiras⁵ na cronossequência da sucessão vegetal, sendo de fácil manipulação por semente e tolerando condições ambientais extremamente adversas (CAMPELLO, 1996).

A maioria das leguminosas possui raízes pivotantes, principalmente as herbáceas. Por outro lado, espécies estoloníferas podem desenvolver raízes adventícias próximas aos nós do estolão formando uma estrutura radicular fibrosa (KRETSCHMER e PITMAN, 1995).

Além disso, as leguminosas associam-se com fungos e bactérias fixadoras de nitrogênio atmosférico que utilizam carboidratos, açúcares e aminoácidos da planta para redução do nitrogênio atmosférico e, em contrapartida, uma maior absorção de nutrientes pela planta, além de outros benefícios.

Conforme Souza (1997), as leguminosas apresentam maior contribuição para a produção de matéria seca da parte aérea do que as gramíneas. Elas destinam uma parcela maior da energia para o desenvolvimento de parte aérea e apresentam maior potencial para desenvolverem-se em camadas profundas e compactadas, devido ao seu sistema radicular

⁵ Espécies que se desenvolvem inicialmente no ambiente inóspito são chamadas de pioneiras, esta vegetação permite a preparação de um novo ambiente que, por sua vez, permite o estabelecimento de outras espécies vegetais.

pivotante. Raízes pivotantes das leguminosas são úteis na descompactação de solos, bem como na melhoria de condições de infiltração, ancoramento, e movimentação de nutrientes ao longo do perfil do solo.

2.3.3.4. Efeito das raízes no solo

As raízes das plantas crescem pela divisão celular na região do meristema apical e, subsequentemente, pela expansão dessas células (VEPRASKAS, 1994). A pressão de turgor nas células que se alongam deve ser suficiente para se sobrepor à resistência da parede celular e à resistência mecânica do meio externo (CAMARGO & ALLEONI, 1997).

No entanto, as raízes são órgãos flexíveis que se desenvolvem através do solo, seguindo, aparentemente os caminhos de menor resistência. Além disso, secretam uma mucilagem (ácidos orgânicos e polissacarídeos) que envolve a ponta das raízes, funcionando como lubrificante para facilitar a penetração no solo, além de proteger da dessecação (BENNIE, 1996; VEPRASKAS, 1994).

Para Passioura (1991), a estrutura do solo exerce efeitos claros sobre o alongamento radicular, influenciando a habilidade das raízes em extrair água e nutrientes do solo em quantidades adequadas. Segundo o autor, o alongamento radicular só será possível quando a pressão radicular for maior que a impedância mecânica oferecida pelo meio. No entanto, Zonta et al. (2006) argumentaram que a redução no alongamento das raízes não pode ser considerada uma diminuição do crescimento radicular, e sim uma alteração na distribuição espacial das raízes, já que em condições de limitação do crescimento em profundidade ocorre intensa proliferação de eixos laterais finos, que contribuem para o aumento significativo da superfície específica radicular.

A coesão do solo é acrescida na região do contato solo-raiz, reforçando a resistência ao cisalhamento em um valor equivalente à variável definida como S_r .

Para avaliar a contribuição na resistência ao cisalhamento do solo pelas raízes (Figura 2.22), é necessário considerar a interação solo-raiz que leva a um aumento da resistência contra eventuais escorregamentos nas encostas (WALDRON, 1977⁶ *apud* TABALIPA & FIORI, 2008).

⁶ WALDRON, L.J. **The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil.** Soil Science Society of America Journal, n. 41, p. 843-849, 1977.

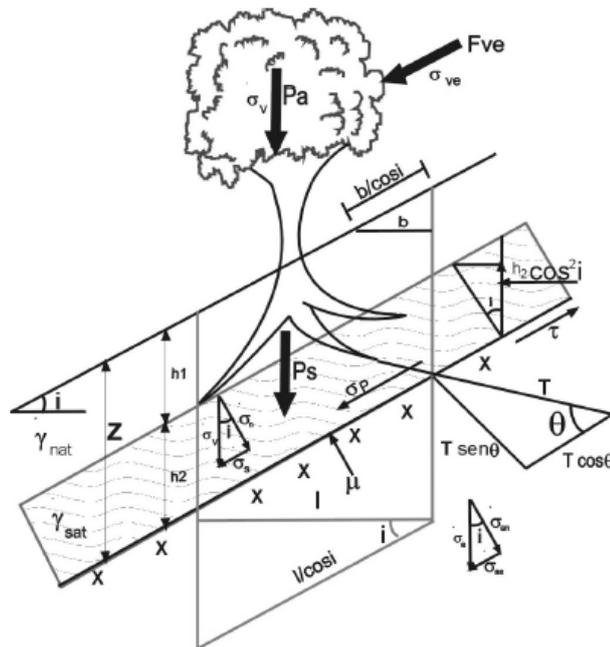


Figura 2.22. Principais fatores da vegetação que influenciam na análise de vertentes e forças atuantes. Fonte: Fiori & Carmignani (2001).

A contribuição das raízes para o aumento da resistência do solo ao cisalhamento (S_r) foi estimada a partir da equação de Coulomb (2.3) descrita em Fiori & Carmignani (2001), dada por:

$$S_r = \tau_r + \sigma_r \cdot \text{tg}\phi \quad (2.3)$$

Segundo Wu et. al (1979) *apud* Lemes (2001), o valor de S_r pode ser estimada em 5,9 kPa nos tipos de florestas e nas áreas de vegetação rupreste e campos, quando estes se apresentavam em solos com profundidade até 1,50m.

A resistência à tração das raízes também tem sido alvo de pesquisas. Greenway (1989) apresenta um quadro (Quadro 2.2) com os resultados em vegetação da Europa, fornecida por Schiechl (1980), salientando que o valor encontrado serve como um indicativo de resistência para a espécie estudada.

Quadro 2.2. Resistência à tração das raízes de algumas espécies de vegetação da Europa (Lemes, 2001).

Espécies	Nome comum		Resistência à tração (MPa)
	Inglês	Português	
<i>Acacia confusa</i>	Acacia	Acácia	11
<i>Alleurites moluccana</i>	Candlenut	Nogueira da Índia	6
<i>Alnus firma</i> v. <i>multinervis</i>	Alder	Amieiro	51
<i>Alnus firma</i> v. <i>yasha</i>	Alder		4-74
<i>Alnus incana</i>	Alder		32
<i>Alnus japonica</i>	Japanese alder		41
<i>Betula pendula</i>	European white birch	Bétula	37
<i>Cytisus scoparius</i>	Scotch broom	Giesta	32
<i>Ficus microcarpa</i>	Chinese banyan		16
<i>Lepedeza bicolor</i>	Shrub lespedeza		69
<i>Meterosideros umbellata</i>	Rata		53
<i>Nothofagus fusca/truncata</i>	Beech	Faia	36
<i>Picea abies</i>	European spruce	Abeto, Espruce	27
<i>Picea sitchensis</i>	Sitka spruce		23
<i>Pinus densiflora</i>	Japanese red pine		32
<i>Pinus radiata</i>	Radiata pine	Pinus	18
<i>Populus nigra</i>	Black poplar	Álamo	5-12
<i>Populus deltoides</i> (USSR)	Poplar		38
<i>Populus deltoides</i> (New Zealand)	Poplar		36
<i>Populus euramericana</i> ('1-78')	American poplar		46
<i>Populus euramericana</i> ('1-488')	American poplar		32
<i>Populus yunnanensis</i>	Yunnan poplar		38
<i>Pseudotsuga menziessi</i> (British Columbia)	Douglas fir	Pinheiro	61
<i>Pseudotsuga menziessi</i> (Oregon)	Douglas fir	Pinheiro	50
<i>Pseudotsuga menziessi</i> (Rocky Mountain)	Douglas fir	Pinheiro	19
<i>Quercus robur</i>	Oak	Carvalho	32
<i>Robinia psuedoacacia</i>	–	Robinia	68
<i>Salix purpurea</i> ('Booth')	Willow	Salgueiro, Chorão	36
<i>Salix matsudana</i>	Willow	Salgueiro, Chorão	36
<i>Salix fragilis</i>	Willow	Salgueiro, Chorão	18
<i>Salix dasyclados</i>	Willow	Salgueiro, Chorão	17
<i>Salix elaeagnos</i>	Willow	Salgueiro, Chorão	15
<i>Salix helvética</i>	Willow	Salgueiro, Chorão	14
<i>Salix hastata</i>	Willow	Salgueiro, Chorão	13
<i>Salix starkeana</i>	Willow	Salgueiro, Chorão	12
<i>Salix cinérea</i>	Willow	Salgueiro, Chorão	11
<i>Salix hegetschweileri</i>	Willow	Salgueiro, Chorão	9
<i>Thuja plicata</i>	Western red cedar	Cedro	56
<i>Tília cordata</i>	Linden	Tília	26
<i>Tsuga heterophylla</i>	Western hemlock		27
<i>Vaccinium</i>	Huckleberry	Mirtilo (EUA)	16

a) Arquitetura de raízes - Classificação da estrutura e terminologia

Numa mesma planta existem diferentes tipos de raízes, sendo cada um deles caracterizado por uma função distinta e localização no sistema radicular. Segundo Gray e Sotir (1996), podem-se distinguir três tipos diferentes de raízes: as *Tap Root*, as *Lateral Root* e ainda as *Sinker Root* (Figura 2.23). A *Tap Root* é a raiz central, localizada diretamente debaixo do tronco da árvore, com função penetrante. As *Lateral Root* são raízes secundárias que crescem da raiz central com direção radial. As *Sinker Root* são as de menor dimensão, que se desenvolvem com uma direção vertical para baixo a partir, tanto da raiz principal vertical como das secundárias laterais. Pela sua dimensão reduzida, estas últimas têm a capacidade de explorar os interstícios do solo, reduzindo a umidade neles existente.

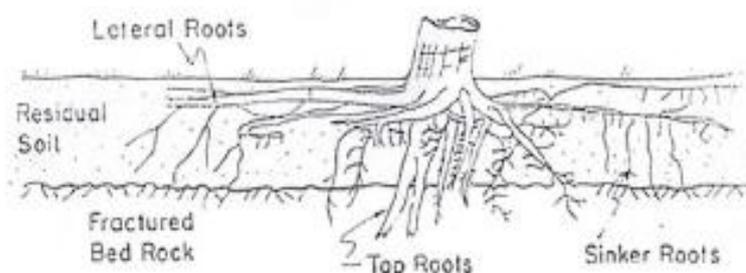


Figura 2.23. Diferentes tipos de raízes existentes. Fonte: Gray e Sotir (1996).

Gray e Sotir (1996) distinguem ainda entre diversos aspectos globais ou morfologias do sistema de raízes, categorizando-os, assim são formados três aspectos distintos: as *Tap Roots*, *Hearth Roots* e *Plate Roots* (Figura 2.24). As *Tap Roots* são caracterizadas pela existência de uma raiz principal alongada, dando à raiz uma forma apumada favorecendo o crescimento em profundidade, a penetração do solo, até estratos mais profundos. As *Hearth Roots*, por omissão de uma raiz principal, desenvolvem notoriamente as suas raízes laterais, sendo visível um crescimento lateral mais efusivo e também em profundidade. Por fim, nas *Plate Roots* há uma ausência quase total do desenvolvimento de raízes em profundidade, apenas desenvolvendo raízes nos estratos superiores do solo em sentido lateral, sendo praticamente nulo o crescimento em profundidade.

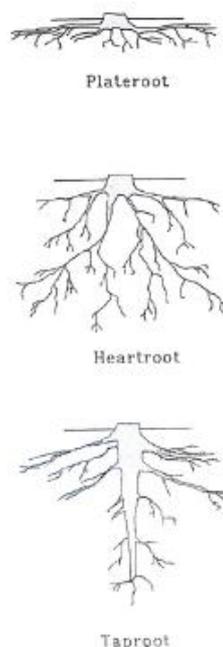


Figura 2.24. Diferentes morfologias do sistema radicular. Fonte: Gray e Sotir (1996).

Geralmente, um sistema de raízes com forte penetração vertical, como Sinker Roots que penetrem potenciais superfícies de deslizamento, é mais efetivo no aumento da estabilidade, para deslizamentos pouco profundos. Uma elevada densidade ou concentração de fibras de raízes, as de menos diâmetro, é mais efetiva que algumas raízes de grande diâmetro, para o aumento da força de corte de uma massa de solo permeável a raízes.

O desenvolvimento e estrutura do sistema radicular são primeiramente afetados pela disposição genética, mas em última análise são essencialmente governados pelo ambiente e pelas condições edáficas (Gray & Sotir, 1996).

b) Arquitetura de raízes -Desenvolvimento do sistema radicular

As *Tap Roots* são raízes que penetram profundamente, já as *Sinker Roots* fornecem a principal contribuição para a estabilidade de taludes, bem como o aumento da resistência a pequenos deslizamentos. A estabilização mais eficiente acontece quando as raízes penetram as camadas de solo através de fraturas ou fissuras da rocha mãe ou onde as raízes penetram um solo residual ou zonas de transição cuja densidade e resistência ao cisalhamento aumentam com a profundidade (RIBEIRO, 2005).

Assim, para um mesmo indivíduo, a distribuição das raízes é fortemente influenciada pelas propriedades físicas do solo, sobretudo pela densidade aparente e estabilidade estrutural (MENEGAZZI & AILLAUD, 2004⁷, *apud* RIBEIRO, 2005).

Segundo Gray e Sotir (1996), o sistema radicular desenvolve-se ampla e profundamente em solos bem drenados. Em condições naturais, os horizontes superficiais são caracterizados por maior porosidade que os subjacentes, o que facilita a infiltração da água e a oxigenação do solo. Os mesmos autores ainda dizem que o reforço mecânico ou influência na estabilização, tanto do solo como das próprias plantas pelas raízes, está provavelmente limitado a uma zona de 1,5m da superfície. Isso ocorre por causa do oxigênio, pois este é um fator limitante, levando assim que uma maior concentração de raízes se encontre à superfície, diminuindo essa concentração conforme aumenta a profundidade.

Durante um período de seca, são os horizontes superficiais que perdem água mais rapidamente, então são as raízes que colonizaram os horizontes mais profundos que assumem um papel preponderante na nutrição da planta.

2.3.3.5. Influência dos fatores externos

A recuperação vegetal está na dependência direta de fatores ambientais muito diversos (haja vista as diferentes regiões que uma rodovia se insere) e, assim, impõe-se conhecimento mais acurado desses agentes.

Estes fatores afetam de modo relevante a adequada seleção das espécies vegetais para a reabilitação ambiental e a proteção do solo almejada, sendo os principais, segundo DNIT (2009), os fatores climáticos, fatores edáficos, fatores devido à fitofisionomia regional e fatores intervenientes na seleção das espécies vegetais.

a) Fatores climáticos

O clima de cada região onde será realizado o trabalho de recuperação vegetal tem influência fundamental na determinação da época do plantio, assim como a tolerância aos períodos de seca, às geadas, déficits hídricos da região, precipitação anual, temperaturas

⁷ MENEGAZZI, G.; AILLAUD, G. **Piano dell'intervento di verifica del contributo di opere di Ingegneria Naturalistica al contrasto de fenomeno della desertificazione.** Projecto DESERTNET, Parco Nazionale del Vesúvio, S. Sebastiano al Vesúvio (NA), Itália, 2004.

médias anuais e umidade relativa na escolha dos processos e das espécies vegetais que serão utilizadas.

Assim é que, dependendo do local onde serão realizados os plantios, estes não poderão, muitas vezes, acompanhar a época ideal de revestimento vegetal, que seria imediatamente após a terraplenagem, a não ser que seja seguido de irrigação criteriosa, o que aumentaria sobremaneira o custo dos serviços.

Por isso, dentre os fatores climáticos a serem observados na elaboração do projeto propriamente dito, deve-se dar importância especial à incidência pluviométrica. Isso porque, se as precipitações pluviais são necessárias à implantação das mais variadas espécies vegetais nas faixas de domínio, o seu conhecimento é indispensável. Portanto, a época das chuvas, sua intensidade, sua duração e o espaçamento entre os períodos de precipitação determinam exatamente os tipos de plantio a adotar, isto é, se exigirão camada protetora (palhagem), se a plantação deve ser manual ou com equipamento especializado, se há necessidade de adesivos ou proteção com leivas e, até mesmo, a quantidade de regas e sua frequência.

b) Fatores edáficos

Estes fatores respondem pela adaptação das espécies às condições locais sendo, portanto, necessário conhecer os solos da região e sua estrutura com as seguintes informações: pH, fertilidade natural, salinidade, toxidez, textura, drenagem natural e matéria orgânica.

A construção rodoviária se inicia com o desmatamento ou supressão da vegetação das suas áreas de uso e de canteiro de obras, atingindo o solo superficial através de raspagens e limpeza, removendo o solo dos cortes para construção dos aterros e deixando exposto o subsolo inerte. Cria-se, assim, a necessidade de recuperação do solo como suporte das espécies vegetais, o que exige, por vezes, cuidados especiais.

A natureza e o estado do solo são responsáveis pelo maior ou menor dano ambiental ocorrente nas áreas de uso da construção rodoviária, apesar de condições climáticas e topográficas adversas atuantes.

A resistência do solo ao dano ambiental depende qualitativamente dos seguintes condicionantes:

- Da granulometria do solo, sendo observadas areias muito finas e também algumas rochas alteradas como muito erodíveis;

- Da compacidade do solo, com influência no aumento de coesão e do ângulo de atrito interno, e a camada superficial de vegetação assume uma função protetora importante, devido à sua alta coesão;
- Da composição química do solo e, também, da água de escoamento (aqui também o revestimento vegetal tem papel preponderante); em meio ácido, os coloides do solo têm tendência a flocular, modificando a estrutura do mesmo;
- Da estrutura física retratada na permeabilidade do solo, que facilitará a ação da água, pois em solos heterogêneos, a água penetrará mais facilmente nas fissuras podendo causar erosão mais rapidamente do que um solo homogêneo de mesma coesão inicial;
- Do estado da superfície, cujas irregularidades aumentam as possibilidades de erosão pela criação de caminhos preferenciais.

c) Fatores devido à fitofisionomia regional

É importante que se faça um levantamento (inventário) das espécies vegetais presentes na área de influência da rodovia, para que essas espécies ou espécies correlatas possam ser aproveitadas em seus projetos ambientais.

Este levantamento visa não só propiciar a seleção de espécies utilizadas na revegetação, como também as possíveis explorações agrícolas da região que possam facilitar a implantação da revegetação.

A função da revegetação na proteção das áreas nuas ou decapadas é essencial, operando na diminuição do coeficiente de escoamento superficial (a folhagem constituindo um verdadeiro reservatório e a matéria orgânica protegendo a superfície do solo contra o impacto das gotículas água, facilitando a sua absorção) e na redução da velocidade (provocada pelos obstáculos). Da mesma forma, há um aumento considerável da resistência do solo criado pela rede de reforço que são as raízes e as ervas.

A topografia tem, também, grande influência sobre a seleção do processo de plantio da revegetação, em função das declividades encontradas, sendo as atividades de construção uma modificação intensa das condições naturais do relevo.

d) Fatores intervenientes na seleção das espécies de plantas

São citados a seguir alguns fatores intervenientes considerados como determinantes na coleção de espécies vegetais:

- Longevidade: A longevidade depende do objetivo temporário ou definitivo da revegetação, podendo-se selecionar as espécies vegetais anuais, bianuais, perenes, de ciclo de vida curto ou longo.
- Produção de biomassa: Este fator dependerá do nível de matéria orgânica desejado no solo, o nível de recobrimento e a profundidade necessária das raízes para a estabilidade das encostas e taludes.
- Efeitos paisagísticos: Este fator retrata a necessidade de se obter alto índice de crescimento das espécies vegetais, em especial na criação de tufos de vegetação e vegetação rasteira.
- Fixação de nitrogênio no solo: É o fator necessário para os solos estéreis que necessitam de melhoria dos níveis de nitrogênio, o qual é obtido no desenvolvimento das leguminosas.
- Palatabilidade da fauna: Como suprimento alimentar da fauna podem ser selecionadas espécies vegetais que fornecem frutos, grãos e pastagem.
- Dormência das sementes: Buscando-se épocas diferentes para a germinação, em particular, a competitividade inicial entre plantas. Podem ser selecionadas sementes com dormência, vigor, resistência a pragas e doenças.
- Biodiversidade: Objetiva-se, através deste fator, o uso de grande variedade de espécies vegetais, que contribui para aumentar a biodiversidade, com a oportunidade atrativa para pássaros e animais silvestres. Pelo plantio de espécies vegetais de porte diferente e a consorciação de gramíneas e leguminosas, busca-se a sustentabilidade da vegetação e o favorecimento da biodiversidade.

e) Efeitos da inclinação topográfica do terreno e a orientação solar no estabelecimento da vegetação

A variabilidade da radiação solar é um fator microclimático preponderante em taludes de corte, parecendo ser o fator topoclimático local mais importante para o sucesso de

recuperação de taludes. A orientação do talude de corte e o grau de inclinação do terreno determinam o ângulo de incidência da radiação solar e, então, o padrão de irradiação (CANO et al., 2002).

As principais razões de insucessos no estabelecimento da vegetação são seca, esterilidade e chuvas pesadas, que causam erosão dos solos de encostas e lavagem das sementes. Encostas muito íngremes tendem a sofrer mais déficit hídrico, porque a infiltração é baixa e o *runoff* é alto (ANH et al., 2002).

Como apontado no trabalho de OLIVEIRA et al. (1995), a variação da exposição solar da encosta atinge diretamente as condições edáficas locais. Além disso, a germinação de sementes e o crescimento de plântulas são muito sensíveis a estresses ambientais.

No estudo de CANO et al. (2002) realizado no norte da Espanha, verificaram-se diferenças marcantes na vegetação resultantes da exposição da encosta. Para encostas com inclinação sudeste, encontram-se valores mais elevados de cobertura, densidade e biomassa de plântulas do que para encostas com inclinação sul. Estes autores concluíram que pequenas variações na exposição local podem afetar significativamente o estabelecimento da cobertura vegetal em curto prazo.

Taludes distanciados a poucas centenas de metros, embora pertencentes à mesma zona climática, podem variar drasticamente suas condições microclimáticas e influenciar a biologia dos organismos em todos os níveis (NEVO, 1997, *apud* AUSLANDER, et al. 2003).

Encostas voltadas para o norte, na latitude do Rio de Janeiro, recebem uma incidência de calor três vezes maior que as voltadas para o sul, segundo ARAGÃO (1961). Como resultado das diferenças de exposição, esperam-se alterações nas seguintes características (OLIVEIRA, et al., 1995):

- Diferença de umidade na serrapilheira;
- Incidência de calor;
- Distribuição de espécies;
- Utilização do solo;
- Temperatura dos solos (diferenças pedogenéticas estruturais);
- Exposição a ventos e massas de ar;
- Susceptibilidade a incêndios;

- Contaminação atmosférica.

Essa interferência implica em susceptibilidade variada aos diferentes fenômenos de superfície bem como à vulnerabilidade a incêndios.

2.4. PRINCIPAIS TÉCNICAS DE REVEGETAÇÃO DE TALUDES

Para a revegetação ou vegetação de taludes, existem hoje no Brasil algumas metodologias que são mais empregadas, cada qual com suas vantagens e desvantagens (Tabela 2.6). Nem sempre as propriedades particulares indicam qual metodologia é a mais apropriada, mas sim o acesso à informação, conhecimento técnico e disponibilidade de recursos por parte dos empreendedores.

Tabela 2.6. Comparativo das principais técnicas empregadas na proteção de taludes.

Técnicas	Vantagem	Desvantagem
Enleivamento	Revestimento imediato do solo. Valor paisagístico.	Custo relativamente elevado. Dificulta a entrada de outras espécies no sistema. Sistema radicular é pouco profundo e geralmente requer manutenção periódica (adubação).
Hidrosseadura	Rapidez e economia para grandes áreas. Eficácia para locais de difícil acesso. Custos relativamente baixos.	Necessidade de existência de fontes de água nas proximidades. Necessidade de repasses para recobrimento de falhas. Dificuldade de estabelecimento de espécies espontânea. Utilização de um número maior de sementes que o semeio manual. Utilização de mão de obra especializada.
Plantio em covas/ semeadura a lanço	Economia para as pequenas áreas. Favorecimento da entrada de novas espécies, conferindo uma maior biodiversidade. Não requer a utilização de mão de obra especializada.	Aporte considerável de recursos para grandes áreas, o que muitas vezes a torna inaplicável. Rendimento em áreas íngremes é baixo. Há ainda os riscos operacionais.

Tabela 2.6. (continuação) Comparativo das principais técnicas empregadas na proteção de taludes.

Transposição de serrapilheira	Diversidade de espécies presentes no banco de sementes. Protege a superfície do solo dos raios solares, conserva umidade e fornece micro e meso fauna ao solo. Ambiente criado facilita a autossustentabilidade do sistema Custo é relativamente baixo e a heterogeneidade de espécies e fauna associada incrementa o aspecto paisagístico.	Dano ecológico causado no local de retirada. Uso restrito a pequenas áreas com declividade reduzida.
Sacos de aniagem	Revestimento imediato. Diversidade biológica e fornecimento de substrato para os primeiros meses. Recomendada para o controle e a recuperação de voçorocas.	Custo relativamente elevado. Baixo rendimento operacional – ergonomicamente problemático e tempo relativamente alto para costura e compartimentalização dos sacos. Dificuldades de fixação dependendo da inclinação e das condições físicas do talude.
Geotêxteis	Rápida aplicação. Controle imediato da erosão. Elevada eficiência, além da utilização em conjunto com outras práticas, como hidrossemeadura e plantio manual.	Custos elevados, geralmente com as despesas com o transporte do material e a carência de informação por parte dos empreendedores.

No Brasil, ainda não há uma padronização técnica quanto ao estabelecimento de vegetação em taludes de corte de estradas. Os objetivos de cada empreendedor é que definem qual metodologia será utilizada. Esses objetivos podem variar desde um simples embelezamento de uma área jardinada, até ao estabelecimento de uma cobertura vegetal rica em espécies capazes de prover as condições necessárias para o desenvolvimento de todo um ecossistema autossustentável (FERNANDES, 2004).

Considerando-se que nos diversos processos de plantio das espécies vegetais que objetivam a proteção do solo afetado pela construção e a reabilitação ambiental das áreas de uso e do canteiro de obras, inclusive a recuperação do passivo ambiental, são adotadas medidas corretivas preparatórias para receber o plantio propriamente dito e que as mesmas se repetem independentemente do próprio processo, julgou-se oportuno apresentar detalhadamente, inicialmente, estas medidas corretivas e depois, na descrição do processo, somente mencioná-las na sequência das atividades do processo.

Para o pleno êxito dos objetivos almejados pela revegetação herbácea, devem ser procedidas as seguintes atividades preliminares, no detalhamento dos projetos ambientais:

- Análise edáfica e pedologia do solo;
- Seleção das espécies vegetais;
- Preparo de canteiros para teste de germinação das sementes e da adubação planejada.

2.4.1. Enleivamento (Placa de grama)

É uma alternativa versátil que fornece bom recobrimento do solo. Sua função restringe-se a proteção da camada superior do solo contra o impacto direto das gotas de chuva e a ação eólica, geralmente a sua estrutura é uma porção de terra medindo cerca de 40 x 40 cm, com gramíneas enraizadas no solo (IBAMA, 1990, *apud* FERNANDES, 2004).

Em taludes mais íngremes, podem-se utilizar telas plásticas, fixadas por grampos ou chumbadores para a colocação da grama em placas. Como principal vantagem, tem-se o revestimento imediato do solo com valor paisagístico e com uma camada de solo orgânico. Como desvantagens, pode-se dizer que o custo é relativamente elevado e dificulta a entrada de outras espécies no sistema, inviabilizando a autossustentabilidade do local. O sistema radicular é pouco profundo e geralmente requer manutenção periódica (adubação).

A aquisição das placas de grama quase sempre se dá por intermédio de “grameiros” (fazendas produtoras de grama), que retiram a cobertura de uma área já existente, ocasionando assim um impacto na área.

Preparo do solo:

Atenção primordial deve ser dada ao preparo do solo, quanto à limpeza e ao nivelamento ou modelagem do terreno, pois estas duas atividades iniciais são responsáveis pelo bom aspecto do tapete verde almejado.

Uma aração superficial até a profundidade de 0,10 a 0,20 m deve ser feita, para quebrar a compactação do solo e proporcionar a oxigenação do subsolo, seguindo-se uma gradeação para destorroar e nivelar a superfície do terreno. Essas operações devem ser realizadas no sentido longitudinal dos taludes ou encostas, facilitando o controle do processo erosivo.

Todas as pequenas irregularidades da superfície, desníveis, erosões ou angulosidades que apresentem aspectos visuais desagradáveis devem ser eliminadas, visando uma seção transversal sem arestas e descontinuidades. Esta modelagem pode ser também nomeada de regularização da área, a qual pode envolver pequenos cortes e aterros na superfície, com altura máxima de 0,15 m.

Na eventualidade de irregularidades na superfície do solo, próxima ou em contato com a pista de rolamento, a mesma deve ser regularizada, adicionando ou retirando terra das margens, de tal modo que a superfície do solo fique, aproximadamente, 0,10 m abaixo do nível da pista.

Preparo das placas:

As placas devem ter o formato retangular (0,40 m x 0,20 m) ou quadrado (em média 0,20m x 0,20m) e 6 cm de espessura, não devendo conter sementes ou material vegetativo de ervas daninhas e tendo sido retiradas no máximo há 2 (dois) dias, em condições adequadas de conservação e transporte.

Recomenda-se que as leivas extraídas sejam imediatamente transplantadas, preferencialmente em dias úmidos. Em caso de seca prolongada, recomenda-se irrigação preliminar abundante por aspersão sobre a superfície das leivas, de no máximo 12 horas de antecedência da retirada das placas.

Plantio da grama em placas:

Na colocação das placas deve-se evitar a coincidência das junções no sentido vertical, independentemente da declividade da superfície, pois a continuidade das juntas neste sentido favorece o processo erosivo nas mesmas, bem como, é indispensável à fixação das placas em terrenos inclinados, para evitar o seu escorregamento.

Objetivando um custo menor neste tipo de revegetação, é usual distribuir as placas no terreno como um tabuleiro de xadrez, um quadrado com grama e outro sem grama, pois dependendo da grama selecionada ser invasora ela completará os quadrados vazios em poucos meses. Dependendo da declividade do terreno os quadrados podem variar no entorno de 1,0 a 1,5 m.

O sistema usual de fixação das placas ou grampeamento em aclives acentuados onde existe a probabilidade de deslizamentos das placas é feito por meio de pequenas estacas de madeira ou bambu, as quais ficam ocultas entre a folhagem da grama depois de algum tempo.

2.4.2. Hidrossemeadura

É a semeadura feita por via aquo-pastosa, com sementes de espécies herbáceas e outros materiais que induzem a fixação e crescimento das sementes e a retenção de umidade (fertilizantes, adesivos e geralmente celulose) como podem ser observados na Figura 2.25. A aplicação é feita com maquinário apropriado, consistindo de tanque com pás agitadoras num eixo horizontal e moto-bomba para a aplicação da mistura (IBAMA, 1990, *apud* FERNANDES, 2004).

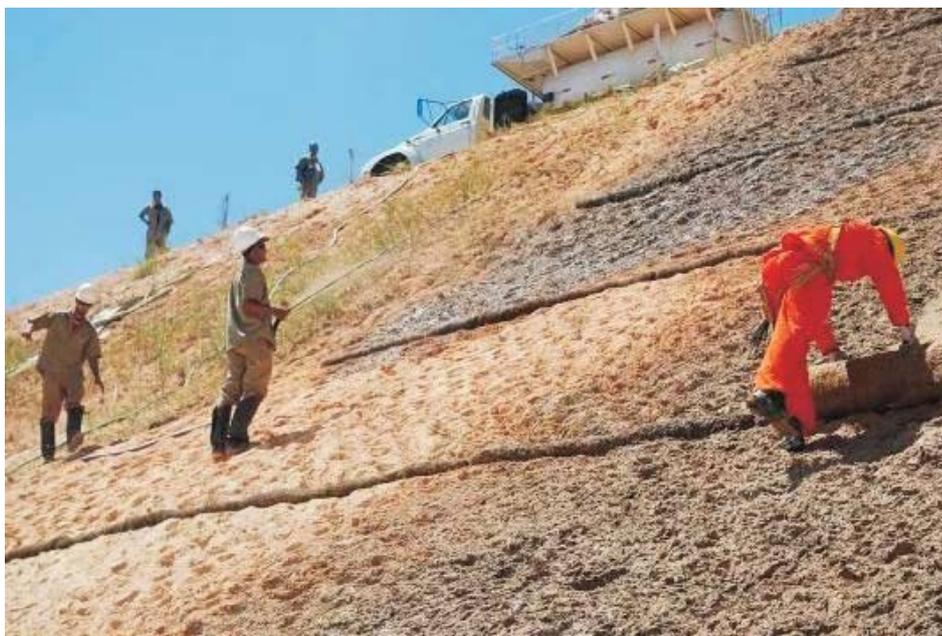


Figura 2.25. Demonstração da aplicação de hidrossemeadura em taludes de corte com leiras de bermalonga. Fonte: CBCN, 2010.

É necessário que a superfície do talude esteja a mais regularizada possível; o acerto e a regularização podem ser feitos manual ou mecanicamente, buscando eliminar os sulcos erosivos, o preenchimento dos espaços vazios e a ancoragem dos sedimentos soltos.

Após a regularização da superfície do talude e o sistema de drenagem estiver construído, inicia-se o preparo do solo, que consiste em efetuar o microcoveamento, ou seja, covas pequenas umas próximas das outras e com profundidade suficiente para reter todos os

insumos a serem aplicados (Figura 2.26). As sementes a serem utilizadas deverão conter referências à porcentagem de pureza e ao poder germinativo.

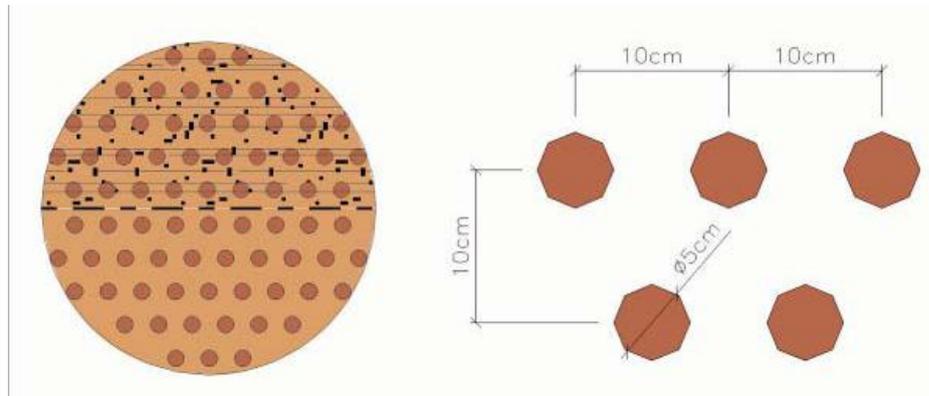


Figura 2.26. Desenho esquemático do microcoveamento. Fonte: CBCN, 2010.

Esta prática é recomendada para encostas de difícil acesso, geralmente compreendendo grandes áreas (CANO et al., 2002).

Taludes íngremes apresentam fortes restrições à incorporação de matéria orgânica, de adubos químicos e à fixação de sementes, por isso, o processo de hidrossemeadura tem sido recomendado para sua revegetação (IBAMA, 1990, *apud* FERNANDES, 2004).

Os maiores fatores que influenciam a hidrossemeadura são os de ordem técnica, como tempo de semeadura, componentes não vivos da mistura, tipo, qualidade e número de sementes e fatores intrínsecos ao local como declividade, orientação, rugosidade e dureza do substrato.

As principais vantagens são a rapidez e a economia para grandes áreas, eficácia para locais de difícil acesso e custos relativamente baixos. Como desvantagens, há a necessidade de existência de fontes de água nas proximidades, necessidade de repasses para recobrimento de falhas, dificuldade de estabelecimento de espécies espontâneas, utilização de um número maior de sementes que o semeio manual e utilização de mão de obra especializada.

Toxicidade de fertilizantes e inibição por estabilizadores são alguns dos fatores bem conhecidos de baixa germinação de sementes e comprometimento do estabelecimento de plantas em talude hidrossemeados. Segundo CANO *et al.* (2002), hidrossemeadura com plantas herbáceas parece não ser o caminho mais favorável para se alcançar uma rápida e densa cobertura vegetal.

2.4.3. Plantio em Covas/Semeadura a Lanço

O preparo do solo para plantio consiste em distribuir as plântulas e/ou semente em covas, linhas ou sulcos. Também há a possibilidade de realizar um recobrimento aleatório de sementes sobre o talude (FERNANDES, 2004).

Como vantagens, ressaltam-se a economia para as pequenas áreas e o favorecimento da entrada de novas espécies, conferindo uma maior biodiversidade – principalmente quando existirem áreas próximas potencialmente fornecedoras de propágulos – garantindo maior autossustentabilidade do sistema. Vale lembrar que esta prática não requer a utilização de mão de obra especializada.

Como desvantagem, destaca-se o aporte considerável de recursos para grandes áreas, o que muitas vezes a torna inaplicável. Observa-se também que o rendimento em áreas íngremes é baixo e que há ainda os riscos operacionais. Para aumentar a probabilidade de sucesso nas fases iniciais, recomenda-se acompanhamento técnico.

2.4.4. Transposição de Serrapilheira

Essa técnica consiste na retirada de serrapilheira do solo de mata ou capoeiras naturais e transporte para o local a ser revegetado/vegetado.

Como vantagem, destaca-se a diversidade de espécies presentes no banco de sementes. Seu uso na revegetação protege a superfície do solo dos raios solares, conserva umidade e fornece micro e meso fauna ao solo (IBAMA, 1990, *apud* FERNANDES, 2004). O ambiente criado facilita a autossustentabilidade do sistema. O custo é relativamente baixo e a heterogeneidade de espécies e fauna associada incrementa o aspecto paisagístico.

Como desvantagem principal, destaca-se o dano ecológico causado no local de retirada, cujo impacto não foi ainda bem compreendido. Também se observa o uso restrito a pequenas áreas com declividade reduzida.

2.4.5. Paliças de Madeira

As paliçadas aplicadas em erosões são anteparos que deverão ser construídos nos estreitamentos dos processos erosivos lineares de pequeno e médio porte, onde não ocorra escoamento superficial concentrado ou afloramento freático intermitente ou permanente, com a finalidade de reter os sedimentos e promover uma geometria mais estável para os taludes adjacentes ao processo erosivo (DNIT, 2009).

A dimensão da paliçada será calculada em função da necessidade do local, podendo ser simples ou dupla. Uma paliçada deve se distanciar da outra o suficiente para que a altura máxima da paliçada a jusante esteja em nível com a base da paliçada a montante, sendo esta diferença de nível preenchida pelos sedimentos.

As paliçadas aplicadas em erosões são anteparos que deverão ser construídos nos estreitamentos dos processos erosivos lineares de pequeno e médio porte, onde não ocorra escoamento superficial concentrado ou afloramento freático intermitente ou permanente, com a finalidade de reter os sedimentos e promover uma geometria mais estável para os taludes adjacentes ao processo erosivo.

A Figura 2.27 mostra, em planta e corte a construção de paliçada de madeira roliça, evidenciando os detalhes construtivos.

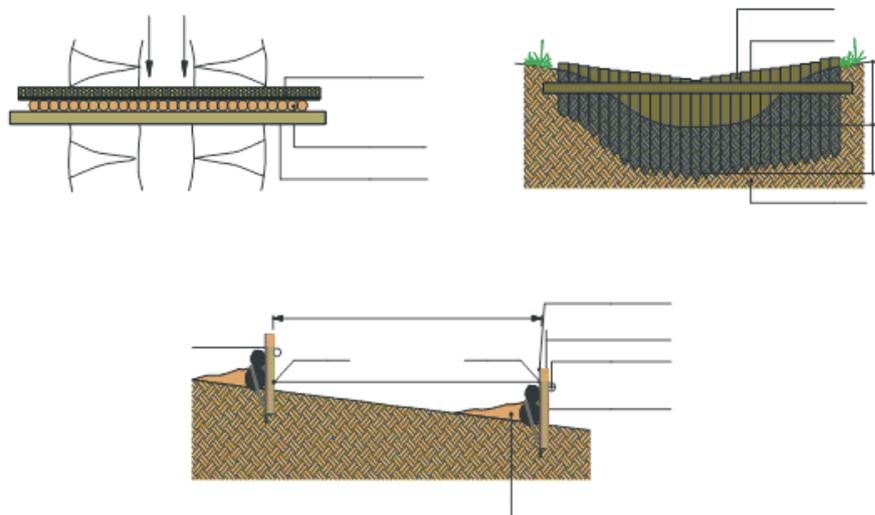


Figura 2.27. Vista em planta e corte da construção de paliçadas de madeira. Fonte: CBCN, 2010.

2.4.6. Solo Envelopado Verde

É uma técnica usada para recompor taludes, erosões e envelopar aterros. Este método é de construção rápida, podendo-se utilizar material do próprio local para construir o aterro compactado, podendo ainda ser utilizadas sementes e estacas vivas para deixar verde a superfície e atirantar o solo com as raízes (DNIT, 2009).

O local deverá ser preparado e a biomanta antierosiva estendida, e na saída colocar bermalunga para evitar a fuga de solo, aplicando solo em uma camada de 50 cm e fazer a compactação. Depois de compactado o solo, a biomanta deverá envolver todo o aterro, formando um envelope, sendo aplicadas estacas vivas de plantas entre uma camada e outra do envelopamento (Figuras 2.28 e 2.29).

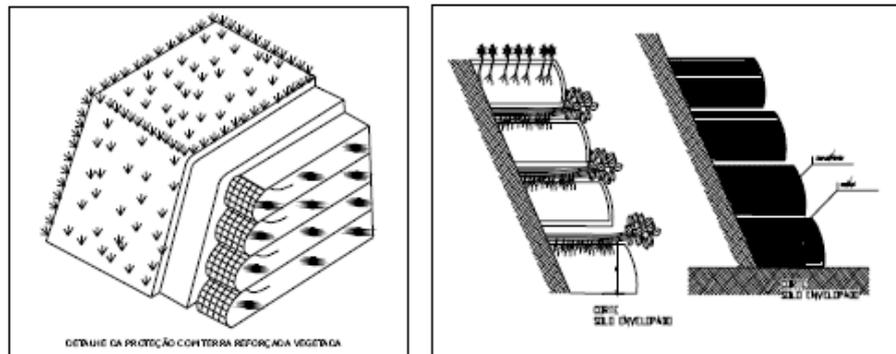


Figura 2.28. Método construtivo do solo envelopado. Fonte: CBCN, 2010.



Figura 2.29. Revitalização da margem do rio utilizando solo envelopado e madeira com estacas vivas – Santa Luzia-MG, Rio das Velhas. Fonte: CBCN, 2010.

2.4.7. Solo Grampeado Verde

Este processo é utilizado para conter instabilidades geotécnicas, sub-superficiais e profundas, e é um sistema muito utilizado na Europa, em substituição a placas de concreto, cortinas e outros sistemas, devido à sua flexibilidade e rapidez na construção (DNIT, 2009).

O processo construtivo do solo grampeado verde (Figuras 2.30 e 2.31) constitui-se de:

- Acerto, regularização e retirada do material solto: a área deverá ser parcialmente regularizada, retirando-se o material solto, e eliminando as negativas. Os locais que apresentam concavidades após a regularização deverão ser preenchidos com solo compactado e retentores de sedimentos, para deixar toda a superfície bem homogênea.

- Perfuração e fixação dos chumbadores: a densidade e a profundidade dos chumbadores são determinadas por um programa de estabilidade do talude, por isso é necessária à sondagem do local onde serão realizados os serviços.

- Preparo do solo e hidrossemeio: após a regularização da superfície do talude e o sistema de drenagem estiver construído, inicia-se o preparo do solo, que consiste em efetuar o microcoveamento, ou seja, covas pequenas umas próximas das outras e de profundidade suficiente, de maneira a reter todos os insumos a serem aplicados, como fertilizantes, corretivos, solo orgânico, adesivos e sementes.

- Aplicação da malha metálica de alta resistência: a malha metálica deve ser resistente à tração, banhada com uma solução galvanizada de Zn/Al, para evitar a corrosão.

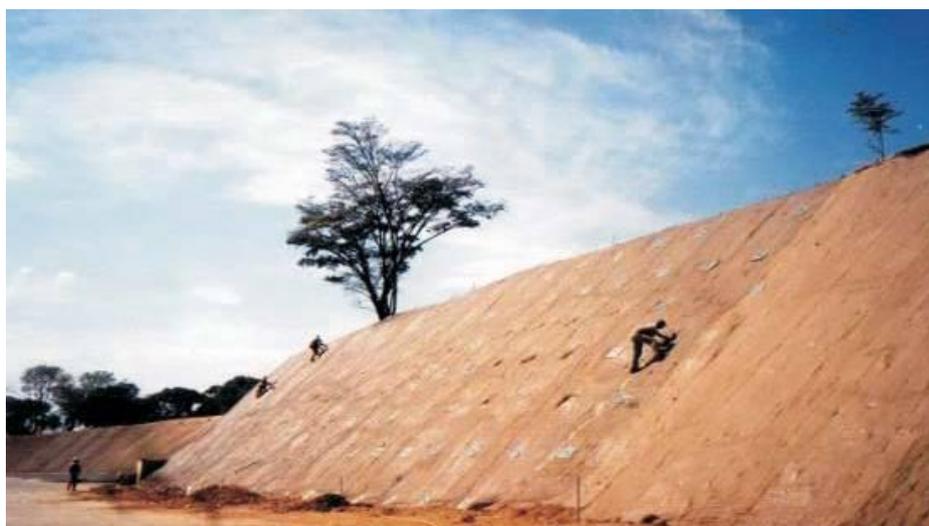


Figura 2.30. Área recuperada com o uso de chumbadores, biomantas antierosivas e malha metálica (solo grampeado). CEMIG – Vespasiano-MG. Fonte: CBCN, 2010.

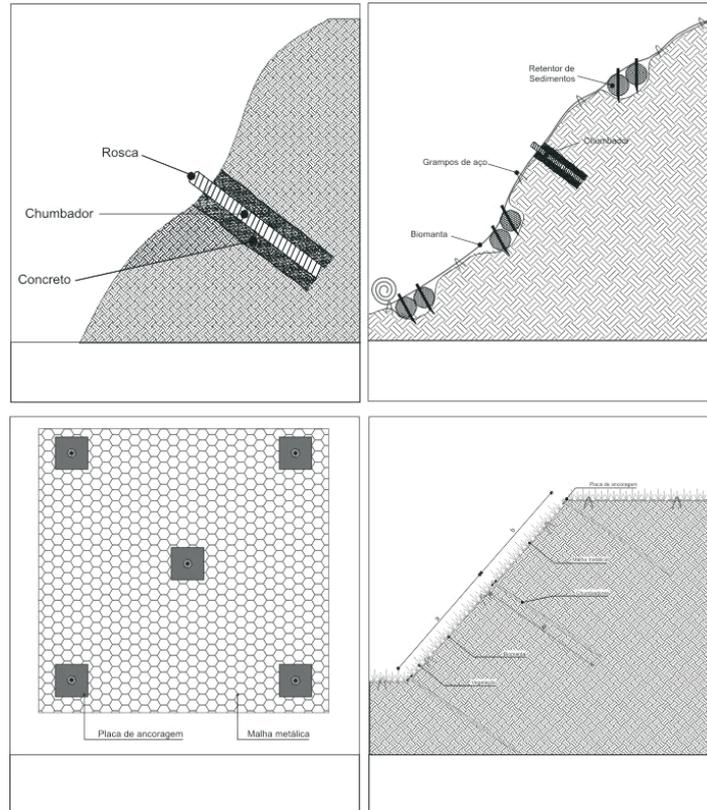


Figura 2.31. Etapas do processo construtivo do solo grampeado verde. Fonte: CBCN, 2010.

2.4.8. Sacos de Aniagem

A técnica consiste em preencher um saco de aniagem (geralmente com dimensões médias de 0,54 m de largura x 0,9 m de comprimento) com um substrato constituído de capim picado, terra, esterco, fertilizantes químicos e sementes. O substrato e a escolha de sementes são variáveis de acordo com os objetivos, criatividade e disponibilidade de recursos por parte do empreendedor.

Uma vez preenchidos, os sacos são costurados na boca (fechados) e no sentido longitudinal e transversal, compartimentalizando-o, pois desta forma, evita-se o deslocamento do substrato para a parte inferior do saco quando os mesmos são fixados no talude (a fixação se dá por meio de estacas de madeira, bambu ou metal) (SILVA, 1993⁸ *apud* FERNANDES, 2004).

Esta técnica tem como vantagens o revestimento imediato, diversidade biológica e

⁸ SILVA, A. L. **Uso de sacos de aniagem para revegetação de taludes na Ferteco Mineração S.A.** Informativo SIF 1, Viçosa: Sociedade de Investigações Florestais, 1993. 8p.

fornecimento de substrato para os primeiros meses após a germinação das sementes, sendo bastante recomendada para o controle e a recuperação de voçorocas.

SOUZA (1997) recomenda o recobrimento do saco em xadrez em virtude do melhor condicionamento ao processo de sucessão vegetal (funcionando como ilhas de vegetação), melhorando o aspecto estético e reduzindo os custos.

Como desvantagem tem-se o custo relativamente elevado, baixo rendimento operacional – ergonomicamente problemático e tempo relativamente alto para costura e compartimentalização dos sacos – e dificuldades de fixação dependendo da inclinação e das condições físicas do talude (COSTA et al., 1997⁹ *apud* FERNANDES, 2004).

2.4.9. Geossintéticos (Geotêxteis) e Reforços

Os geotêxteis incluem uma série de sistemas que possuem diversas funções, tais como: controle da erosão (à qual será dado enfoque), retenção de sedimentos, impermeabilização, reforço do solo, confinamento de material entre outras.

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

Os geotêxteis em sua maioria são projetados para controle superficial, em forma de malha, ou de uma tela em forma de favos, esses conhecidos como geocélulas. Os materiais empregados para sua fabricação são diversos podendo ser naturais, como juta, ou sintéticos, como poliamida (LEMES, 2001).

A maioria dos geotêxteis tem a intenção de proteger temporariamente a superfície do solo contra o salpicamento e erosão laminar até que uma vegetação se estabeleça. Alguns são fotodegradáveis ou biodegradáveis num período de tempo relativamente curto após sua implantação sendo utilizados geralmente em taludes pouco inclinados com velocidades baixas de fluxos. Já outros permanecem no local por um período de tempo considerável podendo trabalhar sem a necessidade de vegetação, ou em conjunto com esta que cresce através do

⁹ COSTA, M. M.; EINLOFT, R.; SOUZA, M. G.; GRIFFITH, J. J. **Revegetação de taludes usando sacos de aniage: metodologia de implantação e análise ergonômica.** In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, III., 1997, Ouro Preto. Anais....Viçosa: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas – SOBRADE, 1997. p. 355-366.

produto fazendo parte do sistema como *mats* (emaranhados), *meshes* (malha, entrelaçado), *blankets* (mantas) e *cells* (células) (WEGGEL e RUSTOM, 1992).

Quando os geotêxteis são de natureza temporária, facilitam o desenvolvimento da vegetação quando degradados, podendo sendo chamados de TERMS (*Temporary Erosion and Revegetation Materials*). Basicamente, os TERMS são constituídos de componentes sintéticos ou naturais que fornecem controle temporário contra a erosão e facilitam o estabelecimento vegetativo (THEISEN, 1992).

Em condições locais que requerem vegetação reforçada ou sistemas de revestimento, pode-se apontar a utilização de PERMs (*Permanent Erosion and Revegetation Materials*), que podem ser subdivididos em *biotechnical composites*, quando a vegetação é reforçada ou *armour systems*, quando materiais inertes não vegetativos são instalados (THEISEN, 1992).

Como vantagens, destaca-se a rápida aplicação, o controle imediato da erosão, a elevada eficiência, além da utilização em conjunto com outras práticas, como hidrossemeadura e plantio manual.

Como desvantagem, observam-se os custos elevados, geralmente com as despesas com o transporte do material e a carência de informação por parte dos empreendedores.

2.4.10. Telas e Mantas Biodegradáveis

Existem diversos geotêxteis compostos de produtos totalmente biodegradáveis com as mais variadas aplicações em trabalhos de recuperação e proteção ambiental, controle de processos erosivos e estabilização de encostas e taludes. Telas são produtos que são entrelaçados por fibras têxteis e apresentam maior translucidez e grande permeabilidade. As mantas são os produtos entrelaçados por adesivos biológicos, sendo menos translúcidas e menos permeáveis (PEREIRA, 2001).

Aplicação:

Proteção imediata contra o efeito dos agentes erosivos, processos de mobilização e carregamento de particulados como: áreas recém terraplanadas, taludes de corte e aterro, dunas não estabilizadas, margens de rios e canais, áreas com recobrimento da vegetação deficiente, proteção de dispositivos de drenagem, áreas de disposição de resíduos industriais,

aterros sanitários e quaisquer superfícies de solo desprotegidas contra a ação dos processos erosivos.

As Telas e Mantas biodegradáveis podem ser aplicadas diretamente sobre a superfície que se deseja proteger ou após o semeio/plantio de vegetação com finalidades estéticas, ambientais e para estabilização de solos.

A composição, degradabilidade, gramatura, resistência e instalação das Telas e Mantas biodegradáveis adéquam-se às necessidades dos projetos de recuperação e proteção ambiental específicos, já que esses destinam-se a diferentes necessidades e situações.

Instalação:

Após o acerto do terreno, preparo do solo e aplicação de fertilizantes, corretivos e sementes, estendem-se a tela ou manta ao longo do talude ou área, fazendo um transpasse, entre uma tela e outra, de 10 cm. Após a aplicação da tela, efetua-se a fixação através de grampos de aço, bambu ou madeira, dependendo do tipo de solo em que será fixado o produto.

O fornecimento da tela vegetal e sua respectiva instalação incluem as seguintes atividades:

- Transporte do produto e insumos até o local da obra;
- Utilização dos equipamentos necessários: pulverizador costal; caminhão tanque pulverizador/hidrossemeador; ferramentas diversas, enxadas enxadões, pás, picaretas, marretas para afixar grampos; cintos/cordas para pessoal; caminhão para distribuição de fertilizantes, esterco; sendo a maioria do serviço manual por se tratar quase sempre de locais de grande inclinação e de difícil acesso;
- Fornecimento de todo material: tela vegetal; grampos de aço, madeira, bambu de tamanho variável; sementes de gramíneas e leguminosas, sendo no mínimo 3 espécies de cada e específicas dos locais onde será executado o serviço; fertilizantes: NPK, 04-14-08, sulfato de amônia, superfosfato simples e esterco orgânico. As quantidades do material deverão ser especificadas por especialista de acordo com o local a ser aplicado o produto.

Manutenção:

Esse produto apresenta a vantagem de requerer baixa manutenção que seria replantio e fertilizações, entretanto pode haver ataque de pragas e seca prolongada antes da germinação ou no estágio inicial de desenvolvimento dos vegetais, necessitando, pois de irrigação e pulverização no local.

A contratada neste caso será responsável até o período em que estiver na área e até o completo estabelecimento da vegetação, após este período a responsabilidade pelas manutenções, se houver, será da contratante.

2.4.11. Outras Práticas

O crescimento das espécies em condições de taludes íngremes pode ser favorecido pela associação com húmus ou composto orgânico. O composto de lixo não se apresenta apenas como fonte de nutrientes e matéria orgânica para o solo, mas possui também propriedades adesivas e capacidade de acondicionamento de umidade, facilitando o desenvolvimento da vegetação e a provável estabilização dessas áreas geralmente degradadas.

Trabalhos vêm sendo realizados para desenvolver e aplicar produtos sintéticos com capacidade de duplicar os efeitos dos polímeros naturais (substâncias como polissacarídeos e poliuronóides que promovem a estabilidade dos agregados ao unirem partículas do solo em seu interior e revestirem as suas superfícies). Onde a agregação ou a estabilidade de agregados é deficiente, os polímeros sintéticos, condicionadores do solo, podem ajudar na estabilização ou formação artificial de agregados (HILLEL, 1998).

Os condicionadores do solo têm como propósito combater a escassez hídrica, diminuindo a competição por este elemento entre plântulas de espécies vegetais mais agressivas. O seu uso gera condições para que a água acumulada no período chuvoso possa ser disponibilizada para as plantas no período de estiagem (TREVISOL et al., 2002¹⁰, *apud* FERNANDES, 2004). Os mecanismos pelos quais as várias formulações poliméricas podem estabilizar agregados incluem reações eletrostáticas ou de troca, pontes de hidrogênio e forças de van der Waals (GREENLAND, 1965 *apud* HILLEL, 1998).

¹⁰ TREVISOL, R. G.; SOUZA, M. H.; SILVA, R. T.; SILVA, R. R. **O uso de condicionadores de solo no reflorestamento de encosta urbana.** In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS – SINRAD V., 2002, Belo Horizonte. Anais...Lavras:UFLA, Departamento de Ciências Florestais, 2002. p. 484-486.

2.4.12. Custos das Técnicas de Revegetação de Taludes

Dentre as técnicas de revegetação de taludes mais empregadas no Brasil, os investimentos para a aplicação variam bastante, dependendo basicamente da mão de obra empregada, matéria-prima e “grau de industrialização” do produto utilizado. Os custos estimados, segundo Dias (2002) *apud* Fernandes (2004), para as técnicas mais empregadas no Brasil podem ser visualizados no Quadro 2.3.

Quadro 2.3. Custos das principais técnicas de revegetação de taludes empregadas no Brasil (DIAS, 2002 *apud* FERNANDES, 2004).

Técnica	Custos (R\$)/m ²
Placa de grama	4,00
Plantio em cova/semeadura a lanço	0,35
Plantio de mudas	0,20
Transposição de serrapilheira	não quantificada
Hidrosemeadura	0,86
Sacos de aniagem	4,00
Geotêxteis	1,60 a 9,00
Outras práticas	não quantificada

Em relação aos custos observa que a técnica com valor mais elevado seria com emprego de Geotêxteis onde pode chegar a sair por até R\$ 9,00 por m², em contra ponto a técnica com custo mais baixo é o plantio de mudas onde sai por cerca de R\$ 0,20 por m².

Segundo Pereira (2001), o emprego das técnicas de Bioengenharia em relação às Tradicionais, em uma obra com problema de erosão possui menor custo de execução (Quadro 2.4). A obra tratada situa-se adjacente a Avenida Marco Túlio Isaac, em Betim, Minas Gerais. É uma área de aproximadamente 11.000 m² (onze mil metros quadrados), totalmente erodida em estágio avançado de degradação carreando sedimentos para a avenida, e conseqüentemente para cursos d’água a jusante.

Quadro 2.4. Comparativo de custos de execução da obra com uso de técnicas de Bioengenharia e métodos tradicionais (PEREIRA, 2001).

Atividade / Serviço	Unid.	Bioengenharia			Engenharia Tradicional		
		Qtd.	Preço (R\$)		Qtd.	Preço (R\$)	
			unit.	total		unit.	total
Construção do sistema de drenagem (canaleta, escada, caixa dissipadora)	m	180	54,00	9.720,00	450	54,00	24.300,00
Terraplanagem, retaludamento da área, transporte de material e bota fora	m ³	-	-	-	7.500	5,00	37.500,00
Acerto parcial do talude e abertura para construção de drenagem	H	18	45,00	810,00	-	-	-
Ancoramento de sedimentos com paliçadas de madeira e bermalonga	m	40	60,00	2.400,00	-	-	-
Acerto manual do terreno e preenchimento de espaços vazios com bermalonga	m ³	15	60,00	900,00	-	-	-
Revestimento vegetal com grama em placas	m ²	-	-	-	11.000	2,80	30.800,00
Revestimento vegetal com telas e mantas biodegradáveis	m ²	11.000	1,70	18.700,00	-	-	-
TOTAL				32.530,00			92.600,00

No caso da obra apresentada por Pereira (2001) a diferença de R\$ 60.070,00 da obra de Engenharia Tradicional para a de Bioengenharia se observa na de necessidade de se fazer Terraplanagem e transporte de material em conjunto com o Revestimento vegetal de placas de grama em Engenharia Tradicional.

Após todos os dados levantados sobre os efeitos da vegetação na estabilização de taludes e as técnicas que geralmente são empregadas, observa-se que o plantio com consorciamento de vegetação de pequeno porte e com maior recobrimento da área do talude possui uma maior vantagem no controle do processo de erosão. Sem contar que a técnica como efeito mais rápido é o emprego de material inerte com vegetação, além de empregar a vegetação nativa, a qual possui uma adaptação melhor à área a ser empregada.

2.4.13. Casos Históricos

Wu (1995) citado por Lemes (2001) descreve que 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 e considerando o talude como infinito por sua uniformidade. 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, afirmando que isto contribui para um fator de segurança maior no talude florestado e recomenda que se façam análises para planejar cortes de florestas.

Técnicas de revestimento e proteção de taludes foram aplicadas na Costa Rica, em *San José*, por uma empresa brasileira (Maccaferri) em 2009. O talude em questão apresentava a formação de processos erosivos, devido a ação do escoamento superficial de águas e impacto direto dos ventos gerados na região, visto que o talude está localizado em uma colina de baixa altura. O talude havia sido coberto pelos moradores com uma manta sintética, que não foi capaz de impedir a ocorrência dos problemas erosivos mencionados. A empresa então apresentou uma solução que utilizava um sistema de proteção superficial contra processos erosivos, através do emprego de um sistema composto pela aplicação de material fertilizado e instalação de biomantas de fibra de coco da empresa, sobre toda a área do talude. Apresentando resultados rápidos e eficazes, solucionando não só os problemas relacionados à processos erosivos, mas também gerando uma melhora no aspecto visual proporcionado pela vegetação estabelecida sobre o talude.

A empresa Deflor recuperou uma área de erosão localizada na região urbana e representa uma situação similar às existentes em quase todas as regiões brasileiras. Por ocasião da construção da rodovia, esta área serviu como caixa de empréstimo, a recuperação exigiu retaludamento, drenagem e gramagem. Após três anos, o local já apresentava sulcos erosivos, que foram avançando, certamente devido à falha no sistema de drenagem e revestimento vegetal, até alcançarem o estágio máximo de degradação, carreando sedimentos para a rodovia e o curso d'água, sendo o aspecto visual seriamente prejudicado, com erosões generalizadas. O projeto especificou drenagem a montante, ancoragem dos sedimentos, preenchimento dos espaços vazios e proteção e revestimento da superfície com uso de biomantas antierosivas. Três anos após o término, não houve formação de focos

erosivos ou carregamento de sedimentos. A vegetação permaneceu em desenvolvimento, atingindo vários extratos no solo, que resultaram em proteções mais profundas. Os ganhos no aspecto visual são visíveis, demonstrando a eficiência do método. Além de eficiente, este método apresentou custos mais reduzidos em comparação com as técnicas tradicionais de engenharia.

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados para a execução deste trabalho, sendo apresentadas as atividades executadas no que tange ao levantamento de dados pré-existentes, produção de novas informações e interpretação destas informações obtidas.

A dissertação desenvolvida foi principalmente descritiva, com pesquisa bibliográfica sobre o assunto a ser tratado e um estudo de caso experimental sobre soluções para os problemas apresentados nos cortes da BR-386 que percorre a distância de 445 km indo de Iraí a Canoas, Estado do Rio Grande do Sul.

Em um primeiro momento somente será realizada pesquisas dizendo respeito ao assunto e ao tema abordados, auxiliando assim na busca de soluções para a problemática apresentada ao longo do trabalho.

Posteriormente montaremos no trabalho apresentando as problemáticas que serão tratadas e algumas propostas baseando-se em práticas empregadas no Brasil e no exterior.

Este trabalho foi realizado conforme fluxograma apresentado na Figura 3.1.

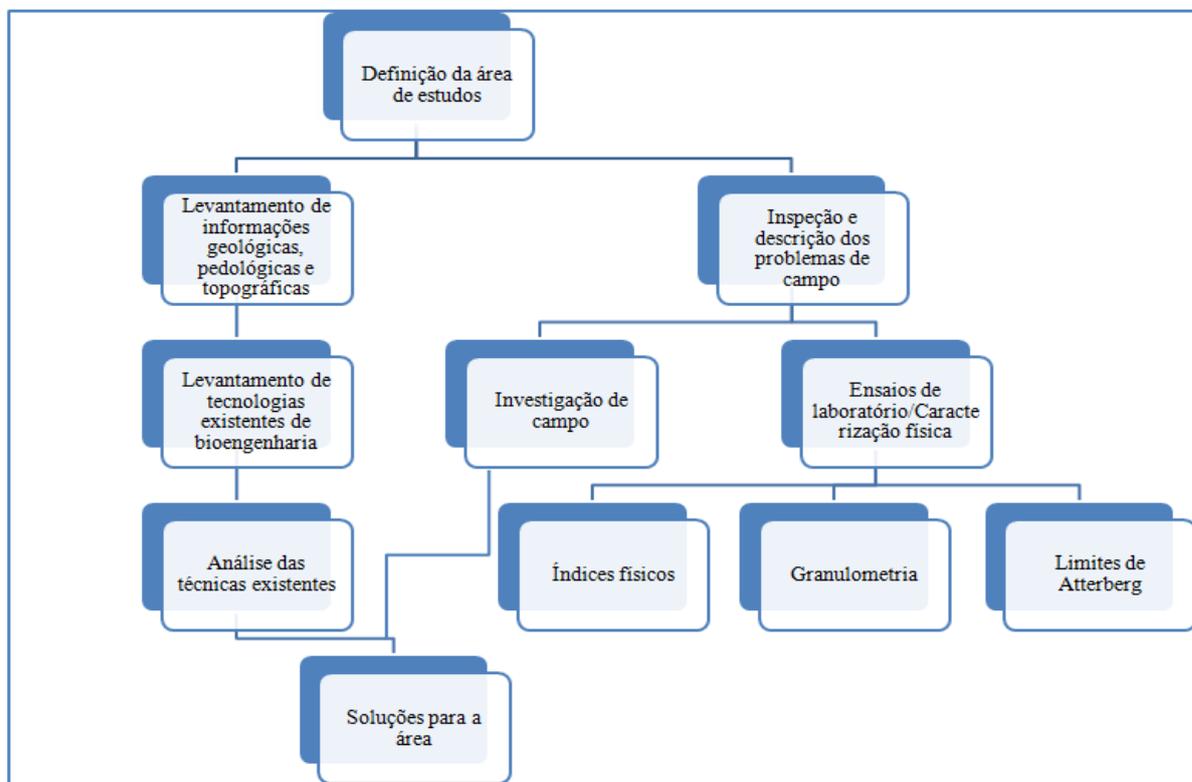


Figura 3.1. Metodologia de desenvolvimento do trabalho.

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1.1. Rodovia Governador Leonel de Moura Brizola (BR-386)

A região analisada constitui-se em um trecho da BR386, de Progresso até intersecção com a BR 116. A BR 386 em seu total inicia em Iraí (a noroeste do estado) Km 0, cidade que é divisa do estado do Rio Grande do Sul com o estado de Santa Catarina, e seu término é em Canoas (região metropolitana de Porto Alegre) Km 445 unindo-se a BR 116.

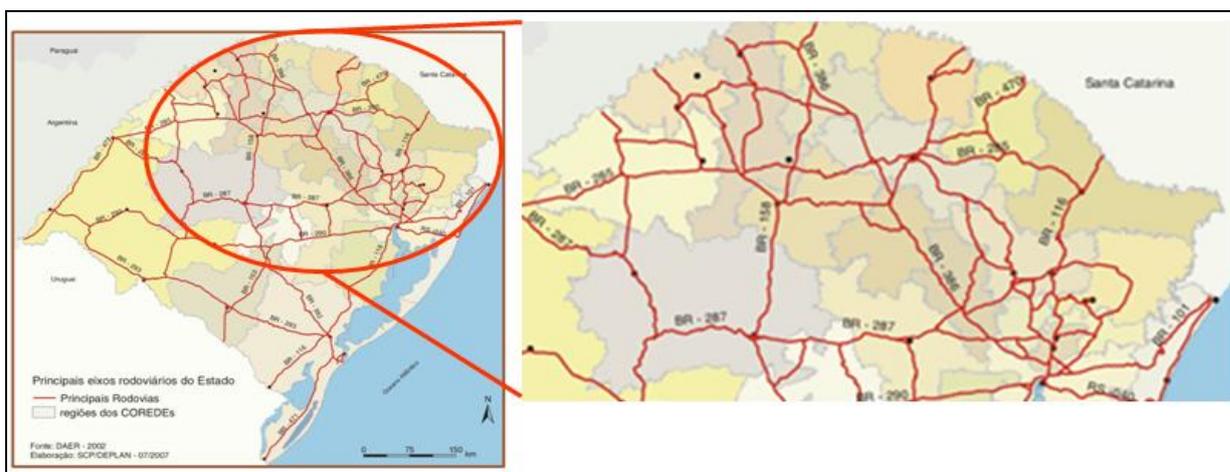


Figura 3.2. Mapa das principais rodovias do Estado do Rio Grande do Sul. Fonte: Atlas Socio Econômico do Rio Grande do Sul, 2011.

Em 19 de dezembro de 2007, através da Lei Nº 11.620, o Presidente Lula denominou esta rodovia, que até então era chamada pelos populares de "Rodovia Tabaré", "Rodovia da Produção", ou ainda de "Rodovia Presidente Kennedy", de "Rodovia Governador Leonel de Moura Brizola".

A rodovia teve trechos repassados do governo federal ao governo estadual na década de 90, sendo então concedida a grupos privados para manutenção e conservação da via e faixa de domínio. As concessionárias que atuam na rodovia são a SULVIAS (Pólo Lajeado) e a COVIPLAN (Pólo Carazinho). Pelo prazo de 15 anos, estas concessionárias deverão recuperar, melhorar e manter os trechos previstos, e demais estruturas integrantes da concessão, mediante a cobrança de pedágios, e a prestação de serviços inerentes, acessórios e complementares à concessão de serviços públicos prevista pela Lei Estadual 10.702 de 12/01/1994, podendo ser prorrogado conforme cláusula incluída no respectivo contrato de concessão.

3.1.2. Caracterização Geológica

A partir de uma breve avaliação sobre a origem e a evolução das paisagens do estado do Rio Grande do Sul, é possível promover uma análise dos compartimentos geomorfológicos existentes. Com base na análise dos produtos de sensoriamento remoto disponíveis, perfis de campo e estudos geomorfológicos regionais anteriores (IBGE, 1995; JUSTUS et al., 1986; ROSS, 1985, 1997), o estado do Rio Grande do Sul foi compartimentado em oito domínios geomorfológicos (Figura 3.3). Sendo que destes oito a rodovia analisada passa por quatro domínios geomorfológicos (Planalto Sul-Rio-Grandense, Depressão Central Gaúcha, Escarpa da Serra Geral e Planalto Dissecado do Rio Uruguai).

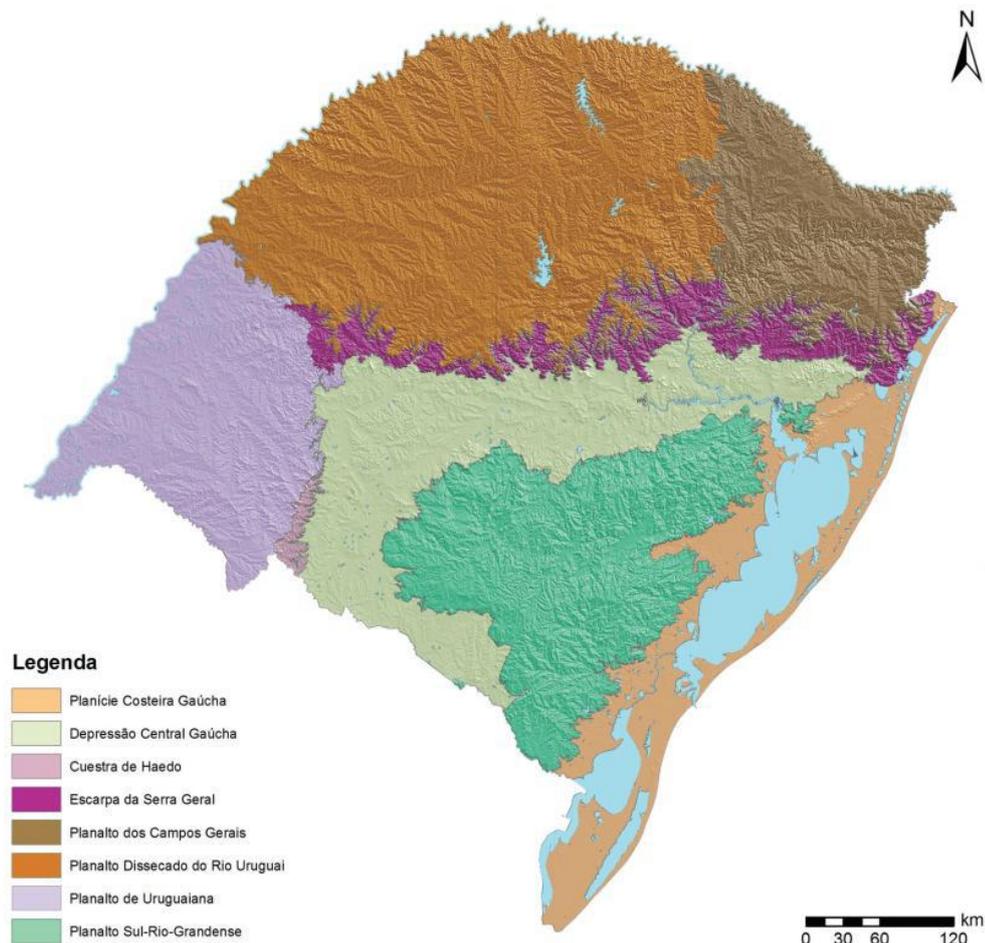


Figura 3.3. Domínios geomorfológicos propostos para o estado do Rio Grande do Sul. (extraída de CPRM – GEOBANK, 2011).

O Serviço Geológico do Brasil (2011) apresenta uma descrição da conformação geológica da área de estudo. A geologia da área é mostrada ainda na Figura 3.4.

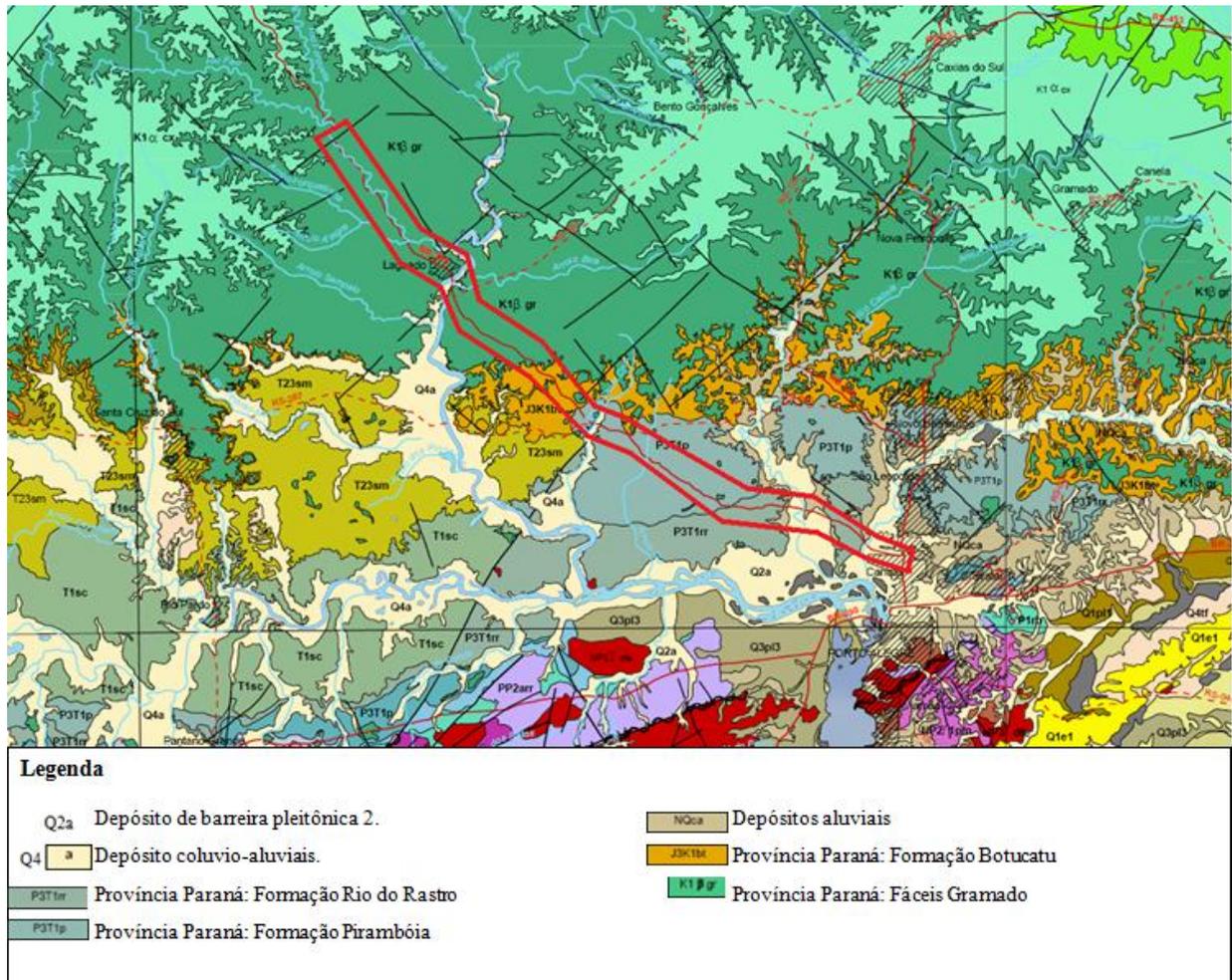


Figura 3.4. Geologia da área estudada (em destaque) (extraída de CPRM – GEOBANK, 2011).

Formação Pirambóia/Sanga do Cabral:

No Rio Grande do Sul, a Formação Pirambóia foi reconhecida a partir do trabalho de Lavina *et al.* (1993). Neste trabalho, os autores sugerem que a parte inferior da Formação Sanga do Cabral seria, na verdade, a continuação da Formação Pirambóia, em particular representada por sedimentos de origem eólica, localmente lacustre e fluvial.

A similaridade de cor, textura e estruturas primárias dificultam sua diferenciação em relação à unidade superior, Formação Botucatu. Um critério utilizado para diferenciação em campo é a presença de fração siltico-argilosa abundante na primeira e o padrão mais resistente ao intemperismo e dimensões mais avantajadas das estratificações cruzadas da segunda.

A Formação Pirambóia é constituída por litologias predominantemente arenosas, friáveis e espessas com uma quantidade reduzida de afloramentos bem preservados. Ocorrem predominantemente, arenitos médios a finos, siltosos, brancos, avermelhados e arroxeados,

com estratificações cruzadas acanaladas de baixo ângulo e sigmoidais (*sets* entre 1 e 3 m), bem como estratificações cruzadas planares e laminações plano-paralelas.

Os afloramentos característicos da Formação Pirambóia são constituídos por arenitos sílticoargilosos, esbranquiçados, amarelados e avermelhados, médios a finos, bem selecionados, grãos polidos, subangulares e subarredondados, com intercalações locais de finas camadas de argilitos e siltitos. Localmente, ocorrem arenitos conglomeráticos com seixos de argila.

Formação Rio do Rastro:

White (1908) utiliza pela primeira vez o termo Rio do Rastro para uma sucessão de camadas vermelhas, expostas nas cabeceiras do rio do Rastro, situado ao longo da estrada Lauro Müller - São Joaquim, em Santa Catarina, como a seção padrão desta formação. Gordon Jr. (1947) elevou o Rio do Rastro à categoria de Formação, dividindo-a em dois membros, o inferior, denominado *Serrinha*, e o superior, *Morro Pelado*, conceito atualmente utilizado pela maioria dos autores.

A deposição da Formação Rio do Rastro é atribuída inicialmente a um ambiente marinho raso (supra a infra-maré) que transiciona para depósitos de planície costeira (Membro *Serrinha*) e passando posteriormente à implantação de uma sedimentação flúvio-deltaica (Membro *Morro Pelado*).

A Formação Rio do Rastro apresenta contato por discordância erosiva com a Formação Botucatu que lhe é sobrejacente.

Formação Botucatu:

Originalmente esta unidade foi descrita como Gres de Botucatu por Gonzaga de Campos (1889) em São Paulo. Posteriormente, como Gres de São Bento por White (1908). Seguiram-se os estudos de Almeida, 1954; Bigarella, 1973; Salamuni & Bigarella (1967 a, b); e no Rio Grande do Sul, estudos mais recentes e detalhados devem-se a Scherer (1998).

A Formação Botucatu juntamente com as rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, passaram a compor o Grupo São Bento a partir dos estudos de White (1908) ao longo da Serra do Rio do Rastro em Santa Catarina.

Os arenitos eólicos da Formação Botucatu ocorrem ao longo de toda a Bacia do Paraná. A Formação Botucatu abrange uma ampla área de deposição eólica, recobrando cerca de 1.300.000 km², compreendendo áreas do Brasil, Uruguai, Paraguai e África.

Posicionada no intervalo Jurássico-Cretácico, a definição da idade da Formação Botucatu é dificultada pela ausência de registros fósseis. No entanto, considerando as relações de contato com a Formação Serra Geral, intercalações de arenitos da Formação Botucatu com derrames basálticos da Formação Serra Geral, a coexistência do sistema deposicional Botucatu com as manifestações vulcânicas iniciais posicionam a Formação Botucatu no Eocretáceo, conforme Faccini (2000).

Em relação à Formação Pirambóia/Sanga do Cabral, durante a época de deposição da Formação Botucatu dominava o clima árido, com restrita influência do lençol freático, o que disponibilizava aporte de grandes quantidades de sedimentos que através, principalmente, da deflação eólica, eram transportados e depositados gerando espessas dunas eólicas e *draas* (IFCRS/UFSM, 2011).

O contato com os basaltos da Formação Serra Geral em sua porção superior é discordante. As melhores exposições desta unidade ocorrem em pedreiras ativas ou desativadas, onde é extraído e explorado como material para a construção civil, e em cortes ao longo das estradas.

Fáceis Gramado:

As rochas vulcânicas das Fáceis Gramado ocorrem na base da Formação Serra Geral, normalmente entre as cotas topográficas 150 e 650 metros. Os primeiros derrames estão normalmente sobrepostos diretamente acima das rochas sedimentares da Formação Botucatu, embora apenas localmente possa ser evidenciado o contato.

Rochas de natureza intermediária são raras e, embora ocorram em diferentes posições intercaladas com as mais básicas, parecem predominar na porção acima de 400 metros de altitude (IFCRS/UFSM, 2011).

As lavas basálticas afloram precariamente, em particular os derrames de nível stratigráfico inferior. Normalmente as lavas estão bastante alteradas e, em muitos locais tendem a formar campos de matações de dimensões reduzidas. Em cortes de estrada, pode-se evidenciar que se tratam de derrames de espessura variável, normalmente entre 2 e 3 metros,

mas localmente podem ser bem mais espessos. Geralmente apresentam um horizonte maciço seguido de um horizonte vesicular bem desenvolvido no topo. Alguns derrames são majoritariamente formados por lava vesiculada. Mais raramente, apresentam nível com disjunções colunares bem desenvolvido. A textura da lava varia de afanítica a porfírica fina, com microfenocristais de plagioclásio, piroxênio e, subordinadamente óxidos de Fe-Ti.

A lava caracteriza-se por uma textura fanerítica fina a porfírica com piroxênio, olivina e plagioclásio. Apresenta coloração avermelhada quando alterado, níveis de vesículas bem marcados e bandas de calcedônia.

Depósitos de aluvião:

Depósitos de aluvião aparecem ao longo das planícies fluviais, que acompanham a rede hidrográfica. Os sedimentos são representados por cascalhos, nas proximidades da zona serrana, e por areia, nas planícies da Depressão Periférica.

Esses depósitos de aluvião, devido a sua reduzida espessura, são inexpressivos para a captação de água subterrânea através de poços tubulares, sendo explorados localmente por meio de poços rasos, escavados (SARTORI, 2009).

3.1.3. Aspectos Pedológicos

Segundo VIERO (2010), as variações na combinação dos fatores ambientais que influem na formação do solo explicam a grande diversidade dos tipos de solos identificados no Rio Grande do Sul (Figura 3.5). Esses fatores, também conhecidos como “fatores de formação do solo”, compreendem:

- O material de origem, representado pela rocha sã ou alterada ou sedimento, fonte do material mineral que compõe o solo.
- O clima, através da temperatura e, principalmente, a quantidade de chuvas, atua nas reações de dissolução e remoção de materiais minerais e orgânicos.
- O relevo, que consiste na forma da paisagem ou na conformação da superfície do terreno, condiciona o acúmulo e/ou escoamento das águas que chegam ao solo.

- Os organismos vivos, por meio da ação da flora e fauna, atuam na adição e transformação de materiais orgânicos e minerais no solo.
- O tempo de atuação de todos os fatores citados acima.

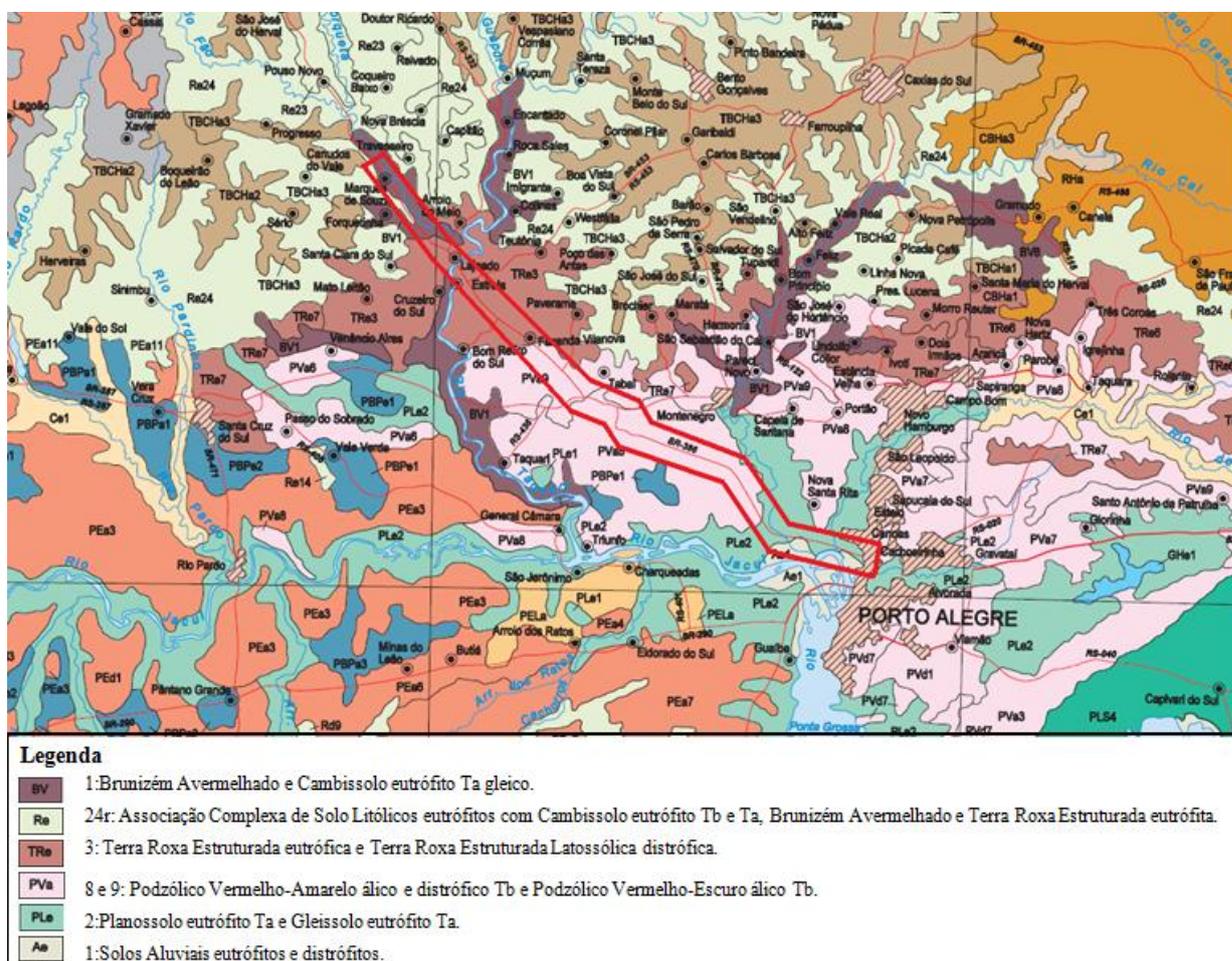


Figura 3.5. Mapa Exploratório de solos do Estado do Rio Grande do Sul (área estudada em destaque) (extraída de CPRM – GEOBANK, 2011).

Brunizém Avermelhado:

Segundo a IFCRS/UFSM (2011), compreende solos minerais, não hidromórficos, sempre com A chernozêmico e horizonte B textural com argila de atividade alta e eutrófico ao longo do perfil. São constituídos geralmente por perfis pouco profundos (50-100 cm) apresentando pedras à superfície e/ou misturadas à massa de solo.

O horizonte A normalmente apresenta uma espessura de 25-40 cm, e o horizonte B, de coloração avermelhada, varia de 30-60 cm, sendo solos de fertilidade natural muito elevada, com altos valores de pH e nulos ou muito baixos teores de alumínio trocável.

Desenvolvem-se quase sempre de rochas básicas, ígneas ou não, ricas em cálcio e magnésio, ou de rochas sedimentares que apresentam lentes ou intercalações de calcário.

Apesar da ótima fertilidade natural que possuem estes solos comumente apresentam sérias restrições para uso agrícola, devido ao fato de quase sempre ocorrerem em relevo forte ondulado, serem muito pedregosos e apresentarem perfis com pouca profundidade. Estas características constituem fatores de restrição ou mesmo de impedimento ao uso de maquinaria agrícola e, além disso, tornam os solos muito susceptíveis à erosão hídrica, quando cultivados.

Ocorrem nas Unidades de Relevo Planalto das Araucárias e Patamares da Bacia do Paraná e estão sob vegetação primária de Floresta Ombrófila Mista e Floresta Estacional Decidual.

Planossolos:

Segundo a IFCRS/UFSM (2011), são solos típicos de áreas baixas, onde o relevo permite excesso de água permanente ou temporário, ocasionando fenômenos de redução que resultam no desenvolvimento de perfis com cores cinzentas indicativas de gleização. Uma característica marcante destes solos é a presença de horizonte superficial aluvial de textura arenosa ou média, que contrasta abruptamente com o horizonte subjacente B, de elevada concentração de argila.

Em geral, são solos mal ou imperfeitamente drenados, com sequencia de horizonte A, Bt e C. O horizonte A é do tipo moderado, quase sempre apresentando A2. O horizonte B usualmente tem argila de atividade alta.

São derivados de sedimentos aluvionares referentes ao período Quaternário, principalmente provenientes de arenitos e siltitos e situam-se na Unidade de Relevo Planície dos Rios Jacuí-Ibicuí.

Como variação, foram constatados perfis com horizontes A muito espesso e com saturação em bases na superfície, sendo usualmente distróficos. No horizonte B esses valores são muito elevados, com a saturação em bases chegando, por vezes, a atingir 100%.

A principal limitação ao uso agrícola destes solos diz respeito a sua má drenagem, dificultando o manejo pelo excesso de umidade. Vêm sendo adequadamente utilizados com

arroz irrigado, com pastagens, observando-se, igualmente, cultivos de soja em áreas de melhor drenagem. Estão sob vegetação de Floresta Estacional Decidual e Savana.

Podzólicos:

Segundo a EMBRAPA (2011), são solos minerais, não-hidromórficos, com horizonte A ou E (horizonte de perda de argila, ferro ou matéria orgânica, de coloração clara) seguido de horizonte B textural, com nítida diferença entre os horizontes. Apresentam horizonte B de cor avermelhada até amarelada e teores de óxidos de ferro inferiores a 15%. Podem ser eutróficos, distróficos ou álicos. Têm profundidades variadas e ampla variabilidade de classes texturais.

Na Região do Cerrado, as classes mais comuns de Podzólicos são o Podzólico Vermelho-Amarelo (PV) e Podzólico Vermelho-Escuro (PE). Esse último distingue-se pela coloração avermelhada mais escura e teor de óxidos de ferro mais elevado. Alguns podzólicos podem mostrar características intermediárias com outras classes de solos, como pouco desenvolvimento de estrutura e cerosidade, próprios de latossolos ou cambissolos.

Solos Aluviais:

Segundo a IFCRS/UFSM (2011), são solos minerais, não hidromórficos, pouco desenvolvidos e originados de sedimentos aluviais não consolidados.

Apresentam sequência de horizontes A e C, sendo que o horizonte A está assentado sobre camadas estratificadas sem relação pedogenética e com granulometria, composição química e mineralógica muito variada. Apenas o horizonte A possui características morfológicas definidas e próprias, que podem caracterizá-lo como horizonte pedogenético.

Geralmente estes solos apresentam cores claras, embora possam ocorrer cores escuras intercaladas entre as camadas. Possuem argila de atividade baixa e textura argilosa, siltosa ou franca.

A ausência de horizonte Glei, dentro dos 60 cm de superfície, constitui a principal diferenciação entre esta classe e a dos solos Glei Húmico e Pouco Húmico.

Localizam-se em áreas planas, nas planícies de inundação dos rios, sob vegetação Pioneira de Influência Fluvial e Estepe. As condições de má drenagem e as frequentes

inundações limitam a utilização agrícola destes solos. Eventualmente são usados com pastagem extensiva e cultivo de milho.

Terra Roxa Estruturada:

Segundo a EMBRAPA (2011), são solos minerais, não-hidromórficos, apresentando cor vermelho-escura tendendo à arroxeadada. São derivados do intemperismo de rochas básicas e ultrabásicas, ricas em minerais ferromagnesianos. Na sua maioria, são eutróficos com ocorrência menos frequentes de distróficos e raramente álicos. Quando comparados aos latossolos, as TRs apresentam maior potencial de resposta às adubações, consequência de sua CTC mais elevada.

Apresentam horizonte B textural, caracterizado mais pela presença de estrutura em blocos e cerosidade do que por grandes diferenças de textura entre os horizontes A e B. A textura varia de argilosa a muito argilosa e são bastante porosos (normalmente a porosidade total é superior a 50%). Uma característica peculiar é que esses solos, como os Latossolos Roxos, apresentam materiais que são atraídos pelo ímã. Seus teores de ferro (Fe_2O_3) são elevados (superiores a 15%).

3.1.4. O Clima

O clima do Rio Grande do Sul é temperado do tipo subtropical, classificado como mesotérmico úmido. Devido à sua posição geográfica, entre os paralelos $27^{\circ}03'42''$ e $33^{\circ}45'09''$ latitude sul, e $49^{\circ}42'41''$ e $57^{\circ}40'57''$ longitude oeste, apresenta grandes diferenças em relação ao Brasil. A latitude reforça as influências das massas de ar oriundas da região polar e da área tropical continental e Atlântica. A movimentação e os encontros destas massas definem muitas de nossas características climáticas.

As temperaturas apresentam grande variação sazonal, com verões quentes e invernos bastante rigorosos, com a ocorrência de geada e precipitação eventual de neve. As temperaturas médias variam entre 15 e 18°C , com mínimas de até -10°C e máximas de 40°C .

A BR-386 trata-se de uma região de morros (com altitude média de 400 metros), situada nas unidades geomorfológicas Patamares da Serra e Serra Geral. Atravessada pelo rio Taquari, a área de estudo pertence à bacia hidrográfica Taquari/Antas. O clima da região se caracteriza por ocorrências de chuvas distribuídas ao longo do ano, com precipitações médias

anuais de 1.540 mm. As temperaturas médias variam entre 13,5°C no inverno e 23,8°C no verão, apresentando uma diferença média de 3°C entre as áreas baixas e altas do vale (SOUZA *et al.*, 2001) (Figura 3.6).

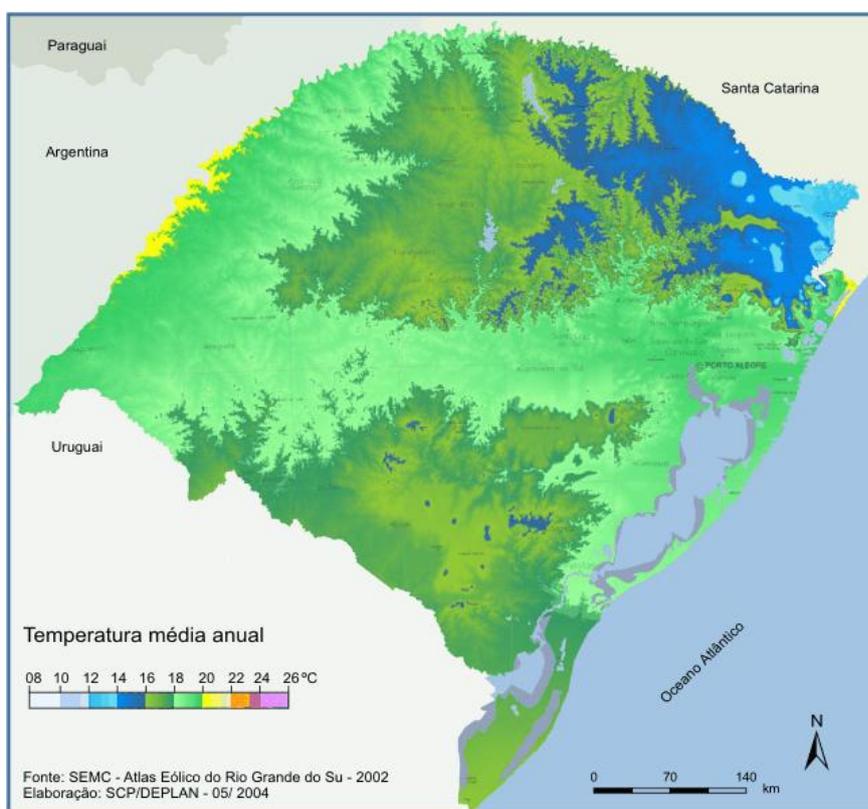


Figura 3.6. Mapa da temperatura média anual do Estado do Rio Grande do Sul.

Fonte: Atlas Socio Econômico do Rio Grande do Sul, 2011.

Com relação às precipitações, o Estado apresenta uma distribuição relativamente equilibrada das chuvas ao longo de todo o ano, em decorrência das massas de ar oceânicas que penetram no Estado.

O volume de chuvas, no entanto é diferenciado. Ao sul a precipitação média situa-se entre 1.299 e 1.500mm e, ao norte a média está entre 1.500 e 1.800mm, com intensidade maior de chuvas a nordeste do Estado, especialmente na encosta do planalto, local com maior precipitação no Estado (Figura 3.7).

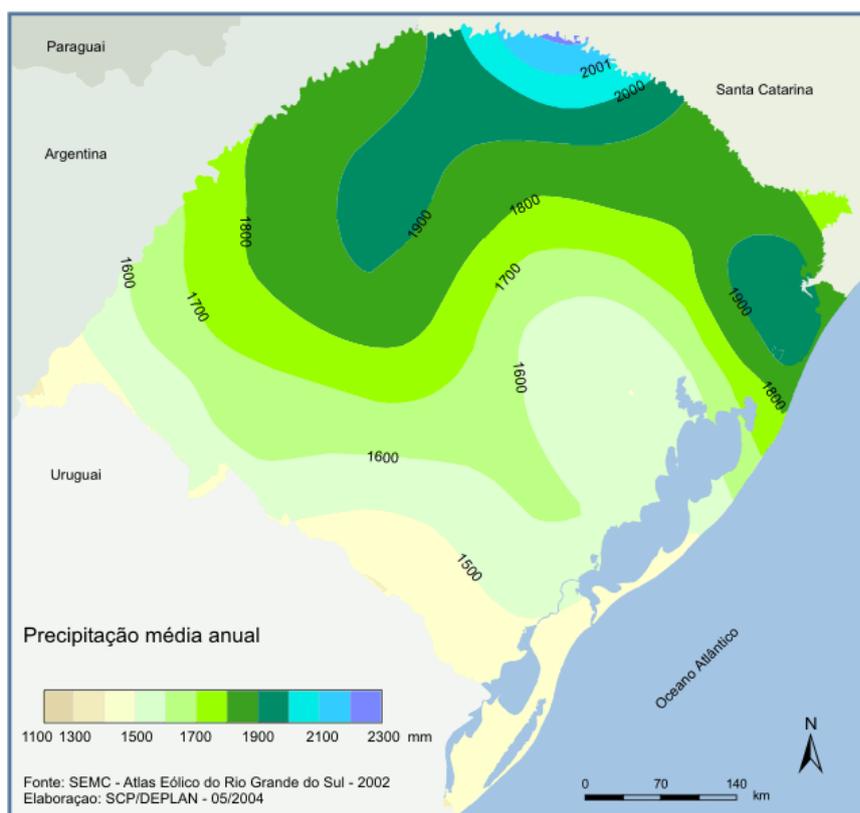


Figura 3.7. Mapa da precipitação média anual do Estado do Rio Grande do Sul.

Fonte: Atlas Socio Econômico do Rio Grande do Sul, 2011.

Os mapas foram extraídos do Atlas Socio Econômico do Rio Grande do Sul (2011), estes foram elaborados a partir de banco de dados da série climatológico do Legates e Wilmott (1990) que possuem dados de temperatura e precipitação médias globais recolhidas entre 1961-1990.

3.1.5. Aspectos Vegetais

Segundo o IBGE (2011), antiga classificação do Projeto RADAMBRASIL, a vegetação do Rio Grande do Sul (Figura 3.8) é classificada em florestal e não florestal. Considera-se vegetação florestal aquela, ombrófila ou estacional, cujas formações são constituídas por comunidades arbóreas mais ou menos estáveis e compatíveis com o clima atual. São consideradas vegetação não florestal todos os demais tipos de formações, que por diversas causas não alcançaram os níveis de desenvolvimento e organização tidos como em

equilíbrio com o clima. Trata-se de vegetação xeromorfa e xerofítica e das formações pioneiras.

Segundo a IFCRS/UFMSM (2011), RAMBO (1956) divide o Estado do Rio Grande do Sul em duas formações vegetais, a do campo e a da floresta. Da área total do Estado, cerca de 131.896 km² (46,26%) eram campos, 98,327 km² (34,47%) matas e o restante, atribuído à vegetação litorânea, banhados inundáveis e outras formações. Portanto, dois terços da área do Estado foram originalmente ocupados pela formação campestre, uma paisagem de estepe, isto é, formação semi-xerofítica, porém num ambiente de clima característico por umidade alta.

Para o mesmo autor, as variações climáticas das diversas partes do Estado não são suficientes para explicar a presença dessas duas formações, uma vez que a formação climática conveniente no Estado do Rio Grande do Sul é a da Floresta Alta Subtropical. Os campos são formações climáticas e edáficas na sua origem e relitos históricos ou manchas no tempo atual.

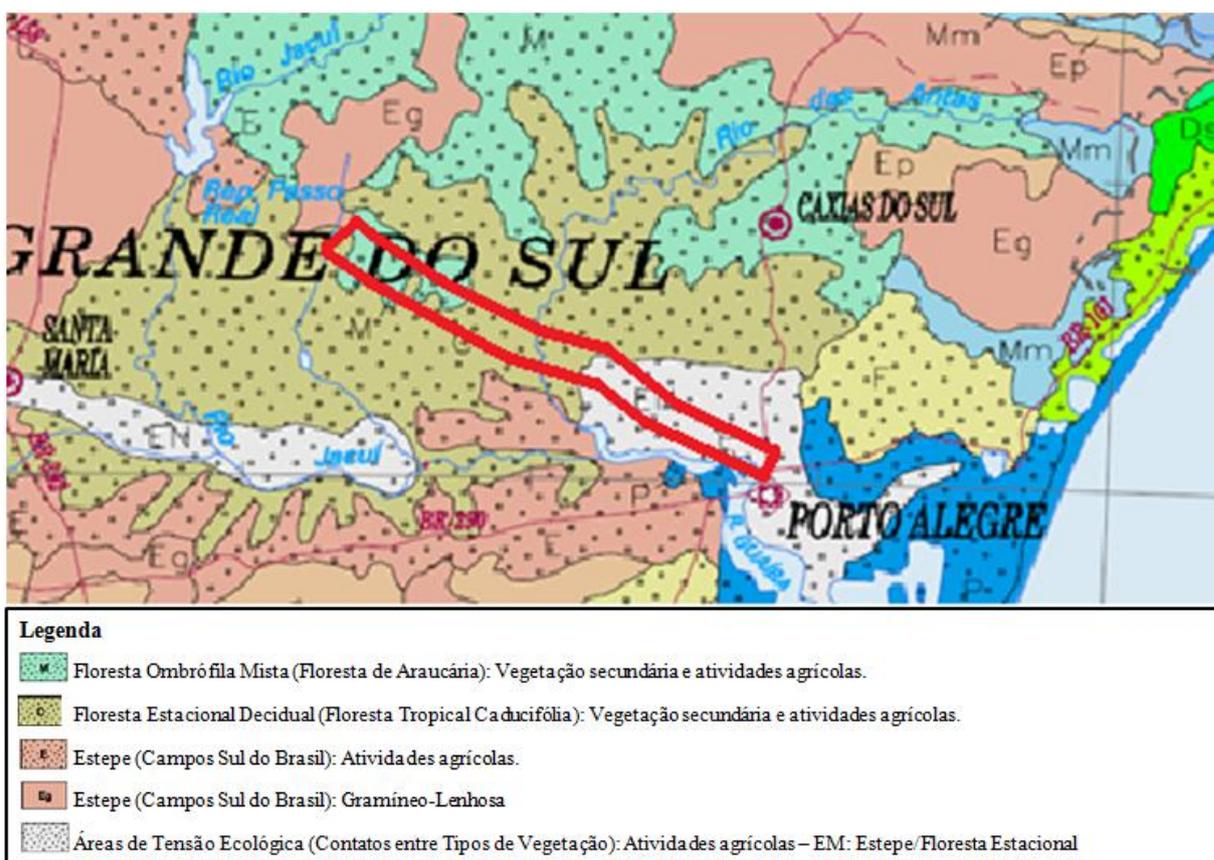


Figura 3.8. Mapa Exploratório de vegetação do Estado do Rio Grande do Sul (área estudada em destaque) (extraída de IBGE, 2011).

O conhecimento da vegetação nativa é de suma importância em um levantamento de área de estudo, principalmente quando se deseja tratar os problemas desta com revegetação. A seguir são descritas as cinco regiões vegetais encontradas ao longo da BR-386:

Região Floresta Ombrófila Mista:

Segundo LEITE & KLEIN, 1990, *apud* IFCRS/UFMS, 2011, a concepção de Floresta Ombrófila Mista procede da ocorrência da mistura de floras de diferentes origens, definindo padrões fitofisionômicos típicos em zona climática pluvial. A área onde a coexistência de representantes da flora tropical (afro-brasileira) e temperada (austro-brasileira) com marcada relevância fisionômica de elementos Coniferales e Laurales é denominado Planalto Meridional Brasileiro, área de dispersão natural do pinheiro-brasileiro ou do pinheiro-do-paraná, a *Araucaria angustifolia* ou "curiirama" dos indígenas, espécie gregária de alto valor econômico e paisagístico.

Segundo RAMBO (1956), o pinheiro ocorre em toda a borda superior livre do planalto, a começar do norte de Santa Maria até o extremo nordeste; nos vales superiores e nas cabeceiras dos Rios Caí, Taquari, das Antas, Jacuí e Pelotas; em grupos isolados ou densos sociedades, nos capões disseminados por todo o planalto; em indivíduos solitários em pleno campo como se observa a leste de Cruz Alta; em mistura com a floresta virgem do Alto Uruguai, ao norte de Passo Fundo e Lagoa Vermelha.

Região de Estepe:

Segundo LEITE & KLEIN, 1990, *apud* IFCRS/UFMS, 2011, a região da Estepe no sul do Brasil não apresenta déficit pluviométrico. Chove normalmente durante o ano inteiro. Os índices térmicos são elevados no verão e baixos no inverno, quando as médias, inferiores a 15°C, perduram por mais de 3 meses, com frequentes penetrações de frentes polares, com geadas e ventos frios de velocidade moderada (minuano).

Na sua imensa maioria, a Estepe compreende uma formação Gramíneo-Lenhosa típica, destituída de aglomerados arbustivo-arbóreo significativos. Estes, quando ocorrem, estão associados aos acidentes mais pronunciados do terreno e/ou aos microambientes mais bem dotados e/ou mais protegidos dos ventos.

Dentre as espécies mais frequentes das estepes podem ser mencionados: A capim-caninha (*Andropogon lateralis e Andropogon sellowianus*), o capim-touceira (*Sporobolus indicus*) e *Eragrostis baiensis*, além de inúmeras espécies dos gêneros *Stipa*, *Aristida*, *Panicum*, *Erianthus*, *Piptochaetium*, etc (LEITE & KLEIN, 1990, *apud* IFCRS/UFMS, 2011).

Lindman *apud* RAMBO (1956), diz que as sociedades vegetativas da Campanha riograndense estão adaptadas às seguintes condições de vida: crescimento em local desabrigado, terreno quente e pobre em água, pouca precipitação. Por conseguinte, a vegetação deve ser considerada como xerófita.

Campo propriamente dito, formação principal da Campanha não é, de maneira nenhuma, uma sociedade uniforme. Constituído essencialmente pelas famílias das gramíneas, compostas e leguminosas, que ocasionam grande variabilidade de formações, sendo de difícil descrição pormenorizada. Só a grandes traços é possível delinear os seus aspectos mais importantes. No topo plano dos tabuleiros a vegetação é paupérrima em espécies; no dorso das coxilhas é uniforme e denso; nas planícies é alto, muito fechado, entremeado de arbustos e árvores, com transição para a mata palustre. As paisagens mais típicas estão no município de Quaraí, Alegrete e Uruguaiana (RAMBO, 1956).

Áreas de Tensão Ecológica:

Segundo LEITE & KLEIN, 1990, *apud* IFCRS/UFMS, 2011, as diversas regiões fitogeográficas nem sempre apresentam nítida individualização. De modo geral, há uma gradual mudança fitofisionômica e florística evidenciada pelos diversos tipos de encraves e ecótonos (misturas), que caracterizam as faixas de contato inter-regionais.

No Rio Grande do Sul, foram mapeados os seguintes tipos de contatos: Savana/Floresta Estacional, Savana/Estepe e Savana/Savana Estépica (LEITE & KLEIN, 1990, *apud* IFCRS/UFMS, 2011).

As informações dessas regiões de vegetação são gerais para o conhecimento da área e das prováveis espécies que podem vir a ser utilizadas, porém deve-se focar principalmente na área afetada e analisar “*in loco*” a vegetação existente. Observando tanto as pioneiras, de maior importância em um primeiro momento para revegetar uma área degradada, quanto às secundárias.

A partir das informações coletada as principais espécies vegetais que tem grande potencial a ser empregadas são as de característica Gramíneo-lenhoso, da região de Estepe, pois a maior abrangência do trecho estudado encontra-se entre as Áreas de Tensão Ecológica, Região de Estepe e Região de Estepe alterada antropicamente.

3.2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.2.1. Investigação de Campo

O levantamento da área foi realizado com inspeções de campo para analisar os cortes rodoviários ao longo da BR-386, examinando os problemas de erodibilidade e instabilidades e a possibilidade de tratamento por revestimento vegetal.

A saída de campo foi realizada no dia 12/11/2011 sendo coletados dados das coordenadas e fotografias dos pontos onde era possível realizar uma parada segura, uma vez que é uma rodovia em que alguns trechos são desprovidos de acostamento e possui muitas curvas, principalmente em seu trecho de serra.

Nessa primeira saída os 445 quilômetros da BR-386 foram percorridos catalogando os cortes e aterros com problemas de erosão e escorregamentos. No dia 06/01/2012 uma segunda visita foi realizada para escolha do trecho a ser estudado e coletar as amostras para os ensaios de laboratório. O trecho escolhido representa cerca de 125 quilômetros, porém a maioria dos cortes e aterros com problemas de estabilidade encontram-se nos primeiros 80 quilômetros (Figura 3.9).

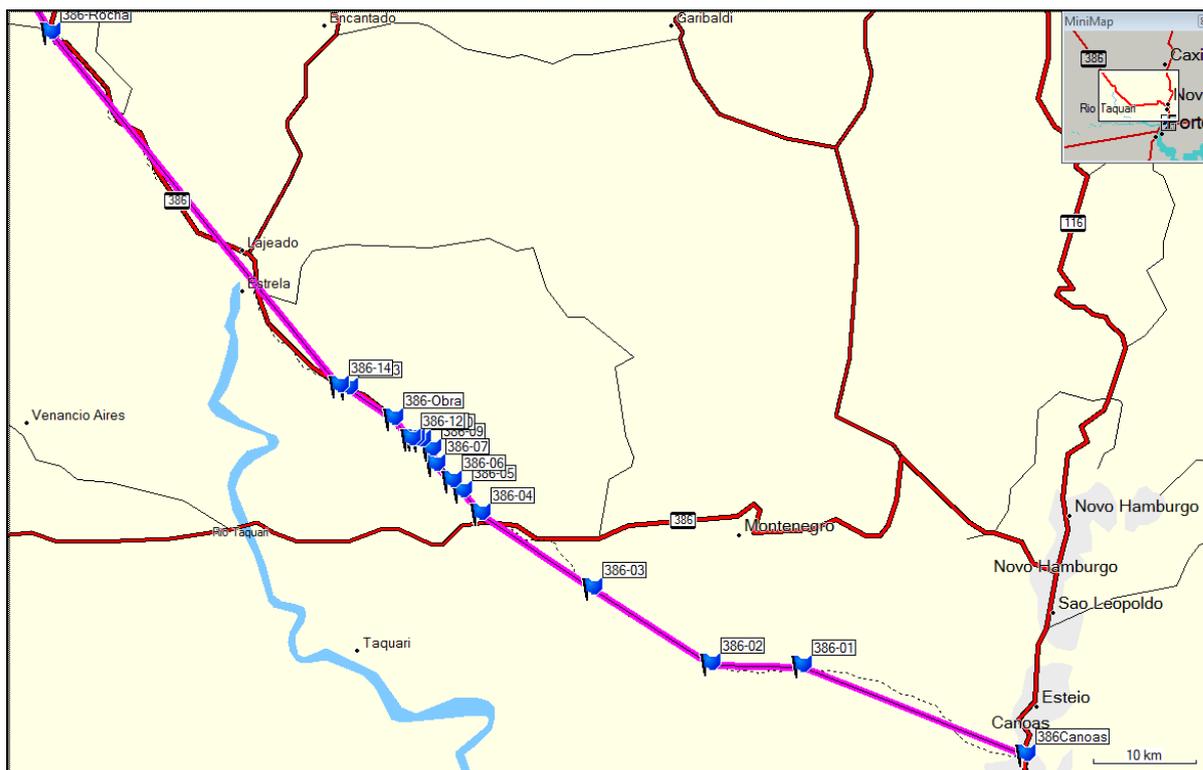


Figura 3.9. Localização dos cortes e aterros no trecho da BR-386 analisado.

A direção percorrida do trecho foi da Capital para o Interior, ou seja, do final da rodovia (km 445) indo para o último ponto do trecho (talude 386-14) ponto de ligação com a estrada para Progresso. Lembrando-se que no período da manhã o Sol incide na face dos taludes a esquerda do sentido seguido e após o meio-dia, o mesmo ilumina a face dos taludes a direita do sentido seguido.

A seguir encontra-se a Tabela 3.1 com os pontos georreferenciados no GPS e baseados neles, descreveremos a situação da BR 386, sendo 386-01 o primeiro talude analisado e 386-14 o último do trecho analisado.

Tabela 3.1. Pontos Georreferenciados no GPS.

	Direção/Nome	Distância	Comp. do trecho	Curso	Posição	Elevação
1.	386Canoas	0 m			S29 53.569 W51 10.615	14 m
2.	386-01	23.4 km	23.4 km	292° true	S29 48.898 W51 24.130	32 m
3.	386-02	32.3 km	8.9 km	271° true	S29 48.791 W51 29.672	79 m
4.	386-03	46.0 km	13.7 km	303° true	S29 44.805 W51 36.819	34 m
5.	386-04	59.1 km	13.1 km	304° true	S29 40.851 W51 43.528	58 m
6.	386-05	61.9 km	2.8 km	320° true	S29 39.689 W51 44.642	79 m
7.	386-06	63.3 km	1.4 km	314° true	S29 39.170 W51 45.261	105 m
8.	386-07	65.6 km	2.3 km	315° true	S29 38.277 W51 46.294	75 m
9.	386-09	67.2 km	1.6 km	347° true	S29 37.457 W51 46.518	86 m
10.	386-10	68.5 km	1.3 km	311° true	S29 37.014 W51 47.113	80 m
11.	386-11	69.1 km	695 m	283° true	S29 36.932 W51 47.533	87 m
12.	386-12	69.5 km	386 m	271° true	S29 36.928 W51 47.772	80 m
13.	386-Aterro	72.1 km	2.6 km	319° true	S29 35.877 W51 48.810	132 m
14.	386-13	77.5 km	5.4 km	304° true	S29 34.239 W51 51.552	93 m
15.	386-14	78.4 km	945 m	284° true	S29 34.117 W51 52.121	80 m

Os taludes analisados no trecho entre Progresso e Canoas estão divididos entre cortes e aterros, a seguir encontra-se a Tabela 3.2 que consta um breve histórico dos pontos, sua altura, comprimento e um resumo das condições dos taludes em campo.

Tabela 3.2. Descrição dos taludes do trecho.

Nome	Orientação	Extensão	Altura	Inclinação	Característica	Figura
386-01	Capital-Interior	200m	3,0-4,0m	~45° na parte superior e ~90° na inferior	Aparentemente o solo é argiloso; Vegetação rala; Solo ("pobre") com problemas de erosão com sulcos bem demarcados.	3.10
386-02	Interior-Capital	100m	4,0-5,0m	~70°	Aparentemente o solo é argiloso; Vegetação rala em sua maioria; Solo exposto em uma parte bem demarcada.	3.11
386-03	Capital-Interior	400m	7,0-15,0m	~45°	Aparentemente o solo é arenoso; Vegetação rala de gramíneas e no topo árvores (sendo cortadas); Solo com floração da rocha no pé, aparentemente areno-siltoso, perceptível a existência de água no solo e não há uma drenagem feita ao pé do talude.	3.12

Tabela 3.2. (continuação) Descrição dos taludes do trecho.

386-04	Interior-Capital	400m	4,0-5,0m	~45°	<p>Aparentemente o solo é arenoso; Vegetação de árvores no topo; Solo com mudança de camada bem definida, aparentemente areno-siltoso, perceptível a existência de água no solo e está sendo feita uma canalização no pé do talude.</p>	3.13
386-05	Interior-Capital	200m	10,0-20,0m	~45°	<p>Aparentemente o solo é arenoso; Vegetação de árvores no topo; Solo aparentemente areno-siltoso, perceptível a existência de água no solo e já iniciaram obras de contenção, mas ainda não tem uma drenagem definida.</p>	3.14
386-06	Interior-Capital	500m	10,0-15,0m	~45°	<p>Aparentemente o solo é arenoso; Vegetação rala de gramíneas e no topo árvores.</p>	3.15
386-07	Capital-Interior	100m	4,0-5,0m	~45°	<p>Aparentemente o solo é arenoso; Vegetação inexistente; Solo com floração da rocha no pé e não há uma drenagem feita ao pé do talude.</p>	3.16
386-08	Interior-Capital	50-100m	4,0-5,0m	~45°	<p>Vegetação de gramíneas; Parte do solo está exposto, aparentemente areno-siltoso.</p>	3.17
386-09	Interior-Capital	400m	10,0-15,0m	~45°	<p>Aparentemente o solo é arenoso; Vegetação rala de gramíneas no topo.</p>	3.18
386-10	Interior-Capital	200m	10,0m	~45°	<p>Aparentemente o solo é arenoso; Vegetação rala de gramíneas no topo árvores.</p>	3.19
386-11	Capital-Interior	100m	10,0m	~60°	<p>Aparentemente o solo é argiloso; Vegetação rala de gramíneas no topo árvores; Solo estérreo, e não tem sistema de drenagem.</p>	3.20
386-12	Interior-Capital	100m	10,0m	~45°	<p>Aparentemente o solo é arenoso e em alguns pontos argiloso. Vegetação rala de gramíneas no topo árvores; Solo estérreo, e não tem sistema de drenagem.</p>	3.21
386-Aterro	Interior-Capital	200m	10,0-15,0m	~30°	<p>Retirada do solo no sentido Capital-Interior para aterrar o sentido contrário, construindo a faixa adicional da pista; Aparentemente o solo é argiloso; Vegetação inexistente.</p>	3.22
386-13	Capital-Interior Interior-Capital	100m 50m	3,0m 10,0m	~45° ~30°	<p>Obra da rodovia solo argilo-siltoso (aparentemente); Árvore no topo do talude.</p>	3.23
386-14	Capital-Interior	500m	5,0-10,0m	~45°	<p>Talude com retaludamento; Sem vegetação</p>	3.24



Figura 3.10. Talude 386-01.



Figura 3.11. Talude 386-02.



Figura 3.12. Talude 386-03.



Figura 3.13. Talude 386-04.



Figura 3.14. Talude 386-05.



Figura 3.15. Talude 386-06.



Figura 3.16. Talude 386-07.



Figura 3.17. Talude 386-08.



Figura 3.18. Talude 386-09.



Figura 3.19. Talude 386-10.



Figura 3.20. Talude 386-11.



Figura 3.21. Talude 386-12.



Figura 3.22. Talude 386-Aterro.



Figura 3.23. Talude 386-13.



Figura 3.24. Talude 386-14.

3.2.2. Coleta de Amostras para Ensaios de Laboratório

As amostras de solo utilizadas na execução dos ensaios de laboratório foram coletadas de forma deformada, seguindo as recomendações da norma ABNT NBR 9604/1986 (amostras deformadas). Os pontos de coleta situam-se na BR-386 entre o trecho via de Progresso até o quilômetro 445 em Canoas, totalizando 6 pontos (4 taludes distintos e destes 2 taludes com 2 camadas distintas) com características distintas. As Figuras 3.25, 3.26, 3.27 e 3.28 apresentam os locais das coletas das amostras.

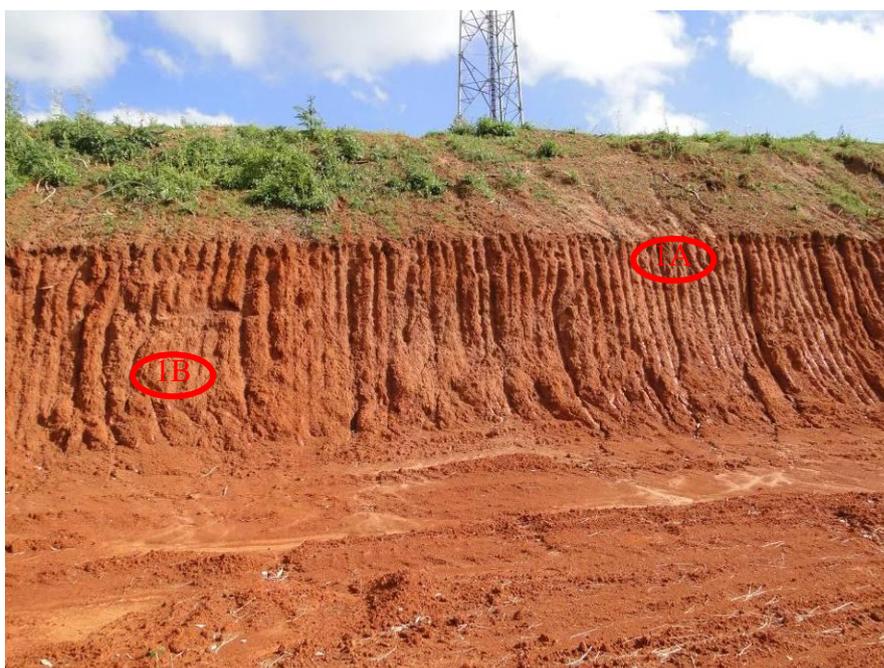


Figura 3.25. Imagem do talude 386-01 onde foram coletadas duas amostras.



Figura 3.26. Imagem do talude 386-04 onde foram coletadas duas amostras.



Figura 3.27. Imagem do talude 386-06 onde foi coletada uma amostra.



Figura 3.28. Imagem do talude 386-13 onde foi coletada uma amostra.

As amostras deformadas conservam todos os constituintes minerais do solo, inclusive, se possível, sua umidade natural, mas não conservam sua estrutura original que é alterada pelo processo de extração. Em uma amostragem superficial as coletas foram feitas com auxílio de pás e escavadeiras manuais e as amostras são transportadas para o laboratório em sacos plásticos. As amostras foram coletadas sem definição de uma orientação, por serem deformadas.

3.2.3. Caracterização Física

Engenharia Geotécnica é uma arte que se aprimora pela experiência, pela observação e análise do comportamento das obras, para o que é imprescindível atentar para as peculiaridades dos solos com base no entendimento dos mecanismos de comportamento, que constituem a essência da Mecânica dos Solos.

A caracterização geotécnica do solo estudado consistiu na determinação dos índices físicos, da composição granulométrica e dos limites de Atterberg. Estes dados, índices ou propriedades, são fundamentais na análise de qualquer solo, uma vez que por si só podem indicar diversos aspectos do comportamento destes materiais, como a condutividade hidráulica, propensão à erosão e comportamento mecânico, por exemplo.

3.2.3.1. Índices físicos

O comportamento de um solo depende da quantidade relativa de cada uma das três fases (sólido, água e ar). Diversas relações são empregadas para expressar as proporções entre elas. Os índices físicos de um solo são relações entre peso e volume de suas fases (sólida líquida e gasosa). Os diversos índices podem ser determinados a partir do peso de uma amostra de solo de volume conhecido, teor de umidade do material e peso específico real das partículas (γ_s). A determinação do teor de umidade natural do solo foi realizada através da secagem do material em estufa, conforme estabelecido na norma ABNT NBR 6457/1986.

O peso específico real das partículas (γ_s) foi determinado através do procedimento descrito na norma ABNT NBR 6508/1984, em amostras preparadas de acordo com a norma ABNT NBR 6457/1986.

3.2.3.2. Granulometria

Todos os solos, em sua fase sólida, contêm partículas de diferentes tamanhos em proporções as mais variadas. A determinação do tamanho das partículas e suas respectivas porcentagens de ocorrência permitem obter a função distribuição de partículas do solo e que é denominada distribuição granulométrica.

A distribuição granulométrica dos materiais granulares, areias e pedregulhos, foi obtida através do processo de peneiramento de uma amostra seca em estufa, enquanto que, para siltes e argilas se utiliza à sedimentação dos sólidos no meio líquido (análise granulométrica conjunta).

As partículas de um solo, grosso ou fino, não são esféricas, mas se usará sempre a expressão diâmetro equivalente da partícula ou apenas diâmetro equivalente, quando se faz referência ao seu tamanho. Para os materiais granulares ou fração grossa do solo, o diâmetro

equivalente será igual ao diâmetro da menor esfera que circunscreve a partícula, enquanto que para a fração fina este diâmetro é o calculado através da lei de Stokes.

A pesar de suas limitações, as curvas granulométricas, em especial as de areias e siltes, tem realmente valor prático. O conhecimento da composição granulométrica de um solo permite inferir uma série de aspectos acerca de seu comportamento, a permeabilidade e a capilaridade de um solo podem relacionar-se com certo diâmetro efetivo das partículas (LAMBE e WHITMAN, 1979). Assim, estas informações são fundamentais no estudo do comportamento geotécnico dos solos.

O processo de determinação da composição granulométrica apresenta algumas limitações práticas e teóricas, sendo que a acurácia das curvas granulométricas é mais questionável para solos finos que para solos granulares (LAMBE e WHITMAN, 1979).

A determinação da composição granulométrica do solo estudado foi feita conforme a norma ABNT NBR 7181/1984. A porção do solo com diâmetro mínimo superior a 0,075 mm foi analisada por meio de peneiramento, enquanto que a parcela com diâmetro mínimo equivalente inferior a 0,075 mm foi ensaiada pelo processo de sedimentação. As amostras foram preparadas conforme a norma ABNT NBR 6457/1986. Em todo o procedimento procedeu-se à lavagem do solo com baixa pressão de água, sem manuseio do solo pelo operador.

3.2.3.3. Limites de Atterberg

Estes limites são determinados através de ensaios padronizados e são utilizados nos diversos sistemas de classificação do solo e refletem uma série de propriedades dos solos finos, como tipo do argilo-mineral, sua atividade, estrutura, superfície específica, entre outros.

Os limites de consistência são definidos como o teor de umidade no qual há mudança de estado físico do solo. Os limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) são conhecidos como limites de Atterberg, e a diferença entre eles é denominada índice de plasticidade ($IP = LL - LP$).

É procedimento comum a tentativa de se correlacionar o limite de liquidez e o índice de plasticidade com outros parâmetros de comportamento dos solos, como compressibilidade e resistência ao cisalhamento. Neste sentido citam-se aqui os recentes trabalhos de Tiwari e Marui (2005) e Stark et al. (2005).

Neste trabalho, os limites de Atterberg foram determinados conforme procedimentos descritos nas normas ABNT NBR 6459/1984 e ABNT NBR 7180/1984, sendo o solo preparado de duas maneiras distintas e ensaiado por via seca.

O ensaio foi executado em uma amostra seca ao ar, conforme procedimento de preparo descrito na norma ABNT NBR 6457/1986.

Segundo LAMBE e WHITMAN (1979), o conceito de um solo como material que pode ser observado em vários estados, segundo a umidade contida nele, é muito útil. Quanto maior for à quantidade de água contida em um solo, menor será a interação entre as partículas adjacentes e mais se aproximará o comportamento do solo ao de um líquido.

4. RESULTADOS DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO E ANÁLISE DOS PROBLEMAS DE CAMPO DA ÁREA

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do programa experimental e demais dados oriundos de simulações computacionais realizadas. Objetiva-se aqui o entendimento da relação entre as propriedades do solo estudado e a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa e erosão.

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Os solos estudados consistem basicamente em solos argilosos e arenosos, sendo três de cada característica (ver Tabela 4.1 e Tabela 4.2 Sistema Unificado de Classificação de Solos - ASTM D2487-2000). A Figura 4.1 apresenta as curvas granulométricas obtidas com defloculante e a Tabela 4.3 apresenta os percentuais de cada fração (ABNT NBR 6502, 1995).

Tabela 4.1. Peso específico (γ_s).

Amostras	γ_s (kN/m ³)	γ_s (g/cm ³)
1A	26,70	2,723
1B	26,93	2,747
13	25,28	25,79
4A	23,33	2,379
4B	23,55	2,402
6	26,67	27,20

Tabela 4.2. Solos amostrados (ASTM D2487).

Amostras	Símbolo do grupo	Nome do grupo	Classificação Pedológica
1A	CL	Argila de baixa plasticidade	PVa8
1B	CH	Argila de alta plasticidade	PVa8
13	CH	Argila de alta plasticidade	TRe3
4A	SM	Areia siltosa não plástica	PVa8
4B	SC	Areia argilosa	PVa8
6	SC	Areia argilosa não plástica	PVa9

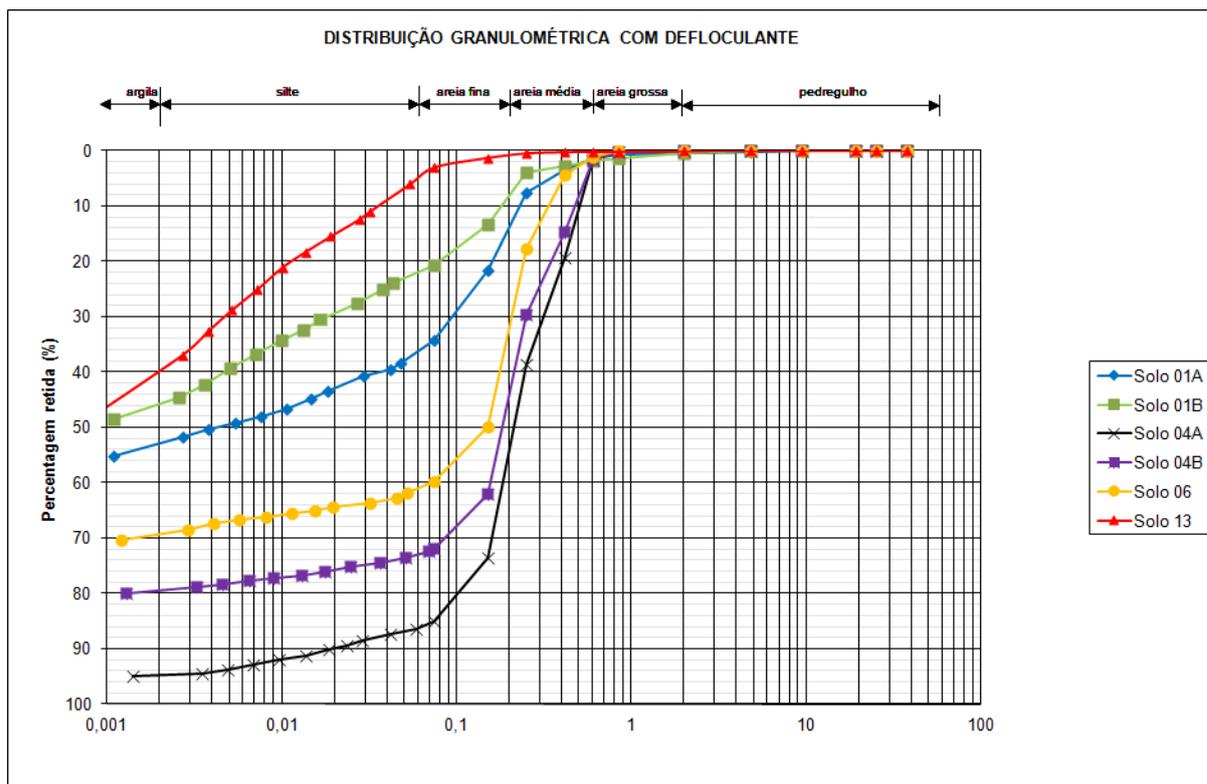


Figura 4.1. Curvas granulométricas dos solos coletados.

Tabela 4.3. Composição granulométrica dos solos.

	1A	1B	13	4A	4B	6
Pedregulho	0,5	0,5	0	0	0	0
Areia grossa	1,0	1,5	0	0,5	0,5	1,0
Areia média	11,5	6,0	1,0	54,5	43,5	31,0
Areia fina	23,5	14,0	6,0	31,5	29,0	30,0
Silte	16,5	24,5	32,5	8,5	7,0	8,5
Argila	47,0	53,5	60,5	5,0	20,0	29,5

A determinação dos limites de Atterberg foi realizada para o solo seco ao ar, por via seca. (Tabela 4.4). Os resultados mostram bem a grande variabilidade dos solos coletados no trecho, o que explica bem os comportamentos diferenciados no campo.

Tabela 4.4. Limites de consistência.

	1A	1B	13	4A	4B	6
LL	37,9	68,1	101,8	18,7	28,6	30,7
LP	26,5	32,6	49,0	NP	16,2	NP
IP	11,4	35,5	51,8	NP	12,3	NP

Os resultados obtidos em laboratório assemelham-se a classificação do Mapa Exploratório de solos do Estado do Rio Grande do Sul (extraída de CPRM – GEOBANK, 2011).

Os solos 1, 4 e 6 encontram-se na região classificada como PVa, Podzólicos Vermelho-Amarelo álico, também conhecidos como Argissolos Vermelho-Amarelos, os quais possuem características de textura arenosa/média e média/argilosa. Os solos 1 e 4 (PVa8) localizam-se em área de relevo suave ondulado e ondulado e o 6 (PVa9) em área de relevo ondulado e forte ondulado.

Por sua vez o solo 13 encontra-se na região classificada como TRe, Terra Roxa Estruturada eutrófica, também conhecido como Nitossolos Vermelhos, o qual possui característica de textura muito argilosa. Este solo é um TRe3 localizado em área de relevo suave ondulado e ondulado.

4.2. DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS EXISTENTES E SUAS POSSÍVEIS CAUSAS

O trecho estudado atravessa diversas Formações geológicas: derrames basálticos granulares finos, arenitos finos, derrames basálticos granulares finos a médios, derrames de composição intermediária a ácida, riolitos a riolitos, arenito fino a grosso (Botucatu), arenito médio a fino (Rio do Rastro), além dos “Depósitos Aluviais”, “Depósitos Colúvio-Aluviais” e “Depósitos de Barreira Pleistocênica 2”.

Nos cortes analisados encontraram-se algumas erosões superficiais, problemas com drenagem superficial e reduzida quantidade de material orgânico, com dificuldades de estabelecimento de vegetação. Em alguns pontos ocorreram escorregamentos de maior

volume de solo, ligados à estratificação do material de origem. Os cortes do trecho variam de 3 metros a 20 metros de altura com extensões entre 100 e 500 metros.

4.2.1. Problemas de Erosão

Em diversos cortes a camada superficial de solo é visivelmente mais permeável e nestes casos há uma percolação concentrada nesta interface e afluxo de água na face do corte neste contato, em alguns casos com retro-erosão localizada. A Figura 4.2 mostra um croqui dos problemas de erosão localizados que, com o tempo, tem evoluído para erosão da face do talude e ravinamento (Figura 4.3).

a)



b)

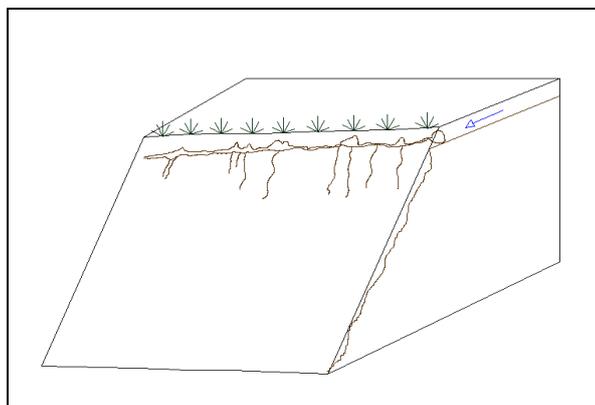


Figura 4.2. a) Foto do talude com problema de erosão superficial com afluxo em contato. b) Croquis de um problema de erosão superficial com afluxo em contato.

a)



b)

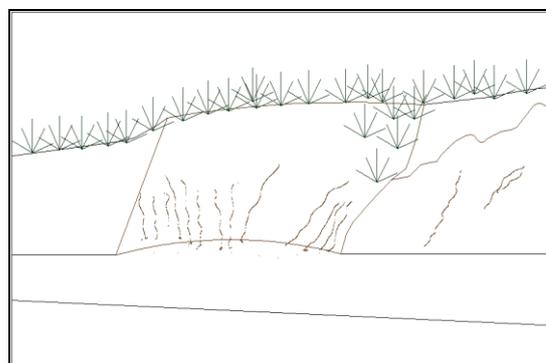


Figura 4.3. a) Foto do talude com problema de deslizamento de pequenos volumes de material. b) Croquis de um exemplo de problema deslizamento de pequenos volumes de material.

A maioria dos problemas identificados ocorreu em cortes mais recentes, os quais ainda não estavam recobertos pela vegetação. Porém alguns casos observados são em taludes que já possuíam uma cobertura vegetal, mesmo que escassa.

Ao longo do trecho observam-se também algumas erosões superficiais em aterros construídos recentemente devido a problemas com a drenagem superficial incompleta. Em alguns pontos específicos ocorreram escorregamentos de maior volume de solo (Figuras 4.4, 4.5 e 4.6).



Figura 4.4. Foto do topo de um aterro com erosões importantes e infiltração de água.



Figura 4.5. Vista frontal de um aterro com problemas de ravinamento e sulcos.



Figura 4.6. Vista geral de um aterro com problemas de ravinamento e sulcos.

Estes movimentos caracterizam-se pela má drenagem dos taludes, ocasionando assim o escoamento da água ao longo destes, o qual inicia um processo de erosão superficial e em alguns casos, pelo excesso de fluxo de água, deslizamento de pequenos volumes de solo.

A erosão superficial encontrada tanto nos cortes quanto nos aterros, são ocasionados pela concentração de água superficial em sulcos e ravinas. Com chuvas intensas não há uma completa infiltração de água e parte da chuva escoam difusamente pela sua superfície. As rugosidades do terreno geram resistência de atrito ao fluxo superficial e as forças cisalhantes podem provocar o transporte de partículas, resultando na remoção progressiva e relativamente uniforme dos horizontes superficiais do solo, erosão laminar.

A água converge para pequenas depressões ligadas às irregularidades do terreno, fazendo com que o escoamento superficial se transforme em fluxo concentrado, formando sulcos e ravinas.

4.2.2. Problemas com Escorregamentos

Os escorregamentos ligados à estratificação da rocha-mãe são movimentos translacionais, às vezes rápidos, ao longo de superfícies de ruptura bem definidas. Na área de estudo foi encontrado um escorregamento em cunha, associado à saprólitos e maciços rochosos de arenitos. Neste caso ocorriam duas estruturas planares, desfavoráveis à

estabilidade do corte executado, condicionando o deslocamento de um prisma ao longo do eixo de intersecção destes planos (Figura 4.7).



Figura 4.7. Vista geral de um corte com problemas de escorregamentos por estratificação.

5. PROPOSTAS DE ALTERNATIVAS

Os problemas principais encontrados nos cortes referem-se a: (a) escorregamentos ligados à estratificação da rocha-mãe; (b) alta erosão dos solos arenosos; (c) fluxo de água sub-superficial devido a contatos pedológicos; (d) baixo teor de matéria orgânica. Nos aterros os problemas estavam ligados a (a) camada não compactada superficial e (b) falta de controle da água superficial durante esta fase final da obra.

Tendo em vista as inclinações dos taludes de corte e os problemas relatados, o tratamento ideal deverá ser uma combinação de técnicas. Para os casos exemplificados na descrição dos problemas no Capítulo 5.2, recomenda-se o estudo da utilização de um sistema composto de material vegetal (eventualmente reforçado com tela) e instalação de sistemas drenantes para a coleta das águas sub-superficiais que erodem as camadas de contato dos horizontes.

As técnicas sugeridas a seguir para cada problema foram escolhidas através da comparação das principais técnicas existentes, principalmente em relação às vantagens e custos. Por isso que o emprego de material inerte em conjunto com a vegetação foi escolhido, mesmo tendo um custo variável dependendo do material a ser empregado o controle dos processos erosivos e de instabilidade são rapidamente controlados. Além disso, sugere-se o emprego de vegetação natural, pois essa se adapta facilmente na topografia e clima local, sendo que muitas vezes vegetações sugeridas comercialmente tem um rápido desenvolvimento, mas com o passar do tempo e as condições locais, as quais não estão adaptadas, elas podem vir a morrer necessitando de reposição e até mesmo impedindo a sucessão vegetal.

a) Erosão superficial

Uma vez identificado o problema, avalia-se uma proposta de se utilizar um sistema de proteção superficial contra processos erosivos, através da utilização de um sistema composto pela aplicação de material fertilizado e instalação de biomantas, ou materiais inertes com função parecida, sobre toda a área do talude, e quando necessário recomposição da erosão (Figura 5.1).

Basicamente a obra pode ser descrita da seguinte maneira:

- Limpeza e regularização da área erodida;
- Conformação da vala de ancoragem do talude;
- Aplicação do material fertilizado em dose adequada de adubo, fertilizante e semente, para restituir a camada de matéria orgânica desaparecida;
- Aplicação de plantas já desenvolvidas para incrementar a revegetação do talude;
- Por último, a colocação dos rolos de biomanta ou material inerte, ancorada devidamente com pedaços de “taquara” (material fácil de ser encontrado na região e de baixo custo), tanto na parte superior do talude, como ao longo de toda a superfície, para se evitar o desprendimento da mesma.

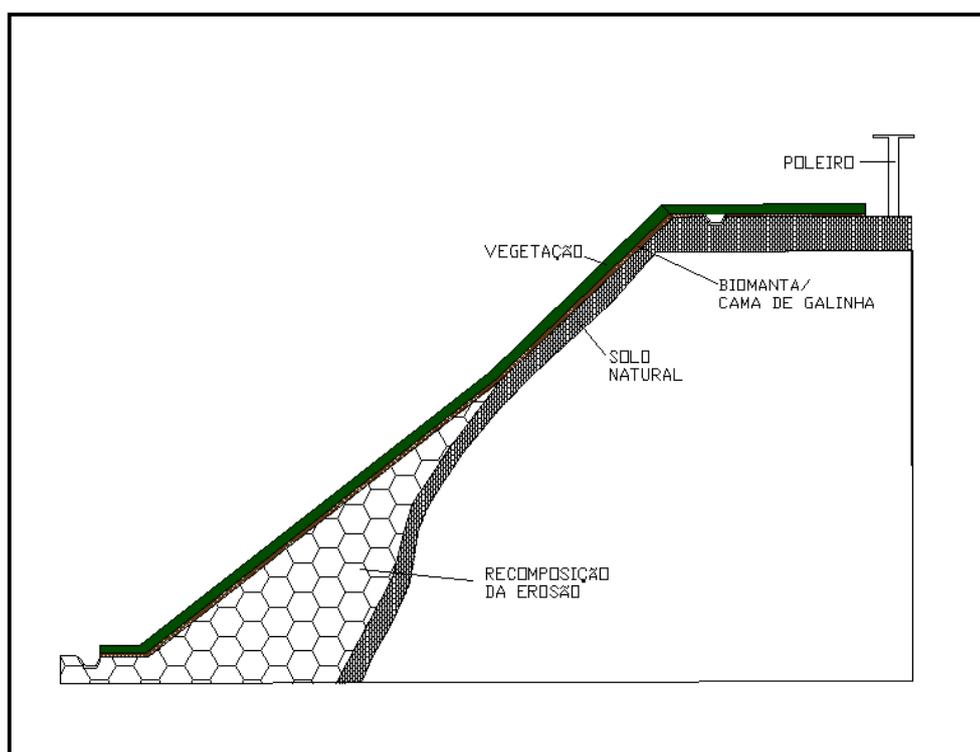


Figura 5.1. Esquema de um controle de erosão superficial.

A estabilidade da obra em curto prazo será assegurada exclusivamente pelo material inerte (tela de galinha, biomantas ou geomantas). A estrutura das diversas técnicas implementadas irá garantir a estabilidade do terreno nos primeiros meses após a realização das obras. Posteriormente, a médio e em longo prazo, a tarefa de assegurar a estabilidade é desempenhada prioritária ou exclusivamente pela parte vegetal viva. As plantas são muito eficazes, pois permite um duplo efeito funcional, o aumento da resistência mecânica da obra,

através do seu sistema radicular e um gradual efeito estético-ecológico, graças à função biológica que expõem, partindo dos estados vegetacionais mais baixos.

Através das suas características biotécnicas, as plantas irão satisfazer os requisitos requeridos, aumentando, por exemplo: a capacidade de resistência ao arranque ou ao corte por parte das raízes, a capacidade de resistir a elevadas solicitações mecânicas, e a capacidade de consolidar o terreno permeabilizando-o com as raízes. Desta forma, é de esperar no talude alvo de intervenção, um aumento não só da resistência à erosão, como também um maior controle dos movimentos de terras superficiais, consequentes do desenvolvimento da vegetação ao longo do tempo.

Para acelerar o processo de colonização, pode ser feita a construção de poleiros artificiais¹¹ para aves dispersoras de sementes no topo dos taludes, ou empregar espécies vegetais pioneiras como “Vassoura-vermelha”, “Capororoca”. O emprego destas técnicas foi utilizado com sucesso no exterior.

A região estudada encontra-se em sua maioria na Região de Estepe, dessa forma as espécies mais frequentes encontradas e que podem ser utilizadas para revegetar são: capim-caninha (*Andropogon lateralis e Andropogon sellowianus*), o capim-touceira (*Sporobolus indicus*) e *Eragrostis baiensis*, além de inúmeras espécies dos gêneros *Stipa*, *Aristida*, *Panicum*, *Erianthus*, *Piptochaetium*, etc, como analisadas por Leite & Klein (1990, *apud* IFCRS/UFMS, 2011).

O uso de espécies arbóreo-arbustivas em restritos locais é uma alternativa, principalmente, para a proteção do pé do talude e como barreira para diminuição da velocidade de veículos em acidentes. As espécies a serem empregadas nessa área podem, dentre as espécies arbóreas mais comuns, ser citados: o algarrobo (*Prosopis Algarobilla*),

¹¹ McDonnell e Stiles (1983 *apud* Reis et al., 2007) instalaram poleiros artificiais em campos abandonados e registraram que eles funcionavam como foco de recrutamento de vegetação devido ao incremento na deposição de sementes por aves nestes locais. Esses mesmos autores verificaram que, em área altamente fragmentada, os poleiros para avifauna (árvores mortas em pé) aceleraram a sucessão inicial, aumentando a diversidade de espécies e a quantidade de sementes em 150 vezes, principalmente de espécies pioneiras. Também recomendam que os poleiros devam ser associados a outras técnicas de revegetação, como o plantio de espécies raras.

espinilho (*Acacia caven*), quebracho-branco (*Aspidosperma quebracho-branco*) e sombra de touro (*Acanthosyris spinescens*) em geral decíduas e espinhosas.

b) Erosão por descontrole da água superficial

A drenagem superficial se faz pelas linhas naturais do curso d'água e pelo sistema formal construído, que deve estar harmonizado com as feições do relevo para permitir o efetivo escoamento das águas. Todo sistema deve ser dimensionado em função da vazão e do potencial hidráulico, definido pela declividade.

As canaletas verdes são uma alternativa à utilização de materiais inertes como o concreto; estas são escavadas no solo local em dimensões variáveis, são compactadas e, posteriormente, cobertas com biomantas antierosivas (Figura 5.2). A experiência local é que vai indicar se estas construções são viáveis, já que as valetas podem reter água e mesmo promover sua infiltração excessiva.

Sob as biomantas deverá ser semeada uma mistura de sementes de espécies de herbáceas de sistema radicular denso e profundo, e de baixa rugosidade superficial. Para a fixação vegetal nos taludes uma opção de baixo custo e viável seria a colocação de um material biodegradável (biomanta de fibra de coco ou “cama de galinha”) sobre a face do talude, reforçada ou não com tela.

É preciso também construir dispositivos que possibilitem o escoamento das águas que se concentram em talvegues interceptados pela terraplanagem e que vertem sobre os taludes de corte e aterros. Nessas condições, para evitar os danos de erosão, torna-se necessária a sua canalização e condução através de dispositivos do tipo escadas hidráulicas, adequadamente projetados e construídos, de forma a promover a dissipação das velocidades e, com isto, desenvolver o escoamento em condições favoráveis até os pontos de deságue, previamente escolhidos (Figura 5.3).

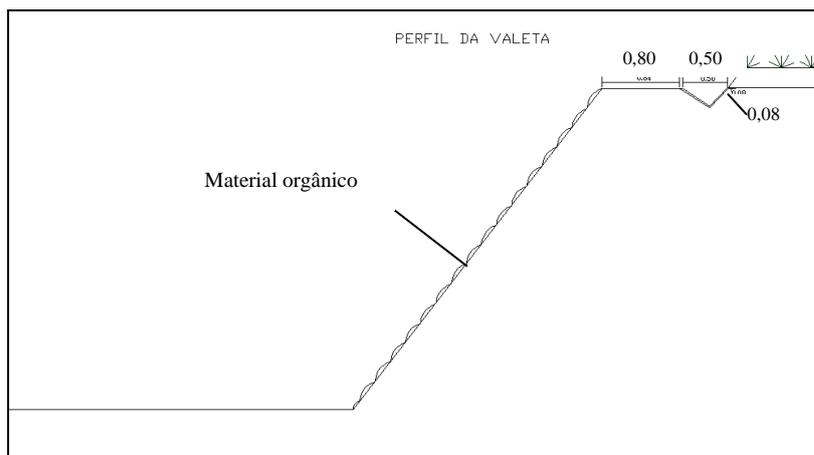


Figura 5.2. Perfil da valeta para coleta da água superficial dos taludes.

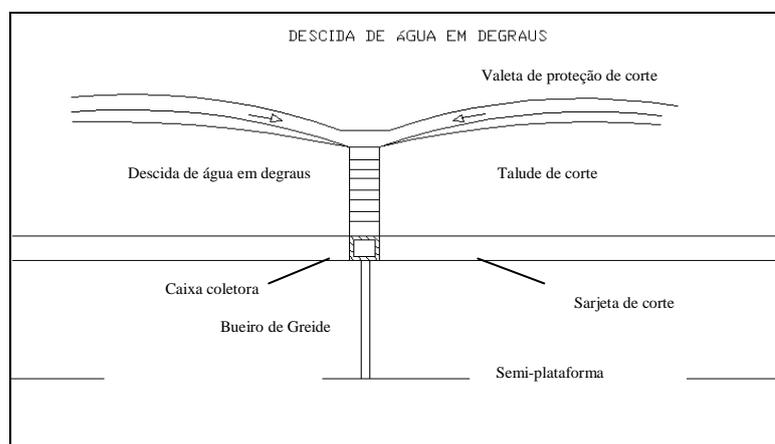


Figura 5.3. Vista frontal da descida de água em degraus para coleta da água superficial dos taludes.

A drenagem de pé deve ser feita através de valetas de drenagem e caixas coletoras de água, sendo indicado o plantio de espécies arbustivas no pé do talude, tais como caliandras (topete de cardial e quebra-foice), com os objetivos de melhoria da estética do local, estabilização do pé dos aterros e redutor de velocidade no caso de acidentes automobilísticos.

c) Controle de água subsuperficial

De acordo com Coelho e Brito Galvão (1998) *apud* CBCN (2010), as rochas intemperizadas e a maior parte dos solos apresentam problemas de drenagem, porque as superfícies não protegidas desses materiais podem ser erodidas por força da água que escapa,

permitindo assim que o processo de erosão se inicie, podendo levar ao entupimento de filtros e drenos e, em casos extremos, ao *piping failure*. Por isto, as superfícies de drenagem devem ser cobertas por camadas de proteção de filtros que permitam o escape livre de água, mas que ao mesmo tempo retenham as partículas de solos no lugar da origem.

Os drenos são dispositivos instalados em camadas subsuperficiais de modo a permitir a captação, a condução e o deságue das águas que se infiltram no solo ou estão contidas no próprio maciço, comprometendo a estabilidade do local. Quanto à forma construtiva, os drenos poderão ser cegos ou com tubos e, devido à pequena profundidade, podem ser também designados como drenos rasos; recebem, ainda, designações particulares como dreno transversal ou dreno longitudinal de base. A parte do dispositivo que exerce a função de captação em um sistema de drenagem subterrânea pode ser constituída por drenos cegos ou drenos tubulares, neste último caso utilizando tubos dreno em polietileno de alta densidade corrugados e perfurados ou tubos dreno em concreto perfurado ou poroso.

O conjunto de captação em um dreno é constituído basicamente pelos seguintes componentes: material filtrante, material drenante e condutor tubular.

Outra solução recomendada são os drenos horizontais curtos (Figura 5.4) para a retirada da água sub-superficial (freático temporário) que em certos casos, por exemplo em Argissolos, afloram nos taludes de corte (utilização depende de inspeção local).

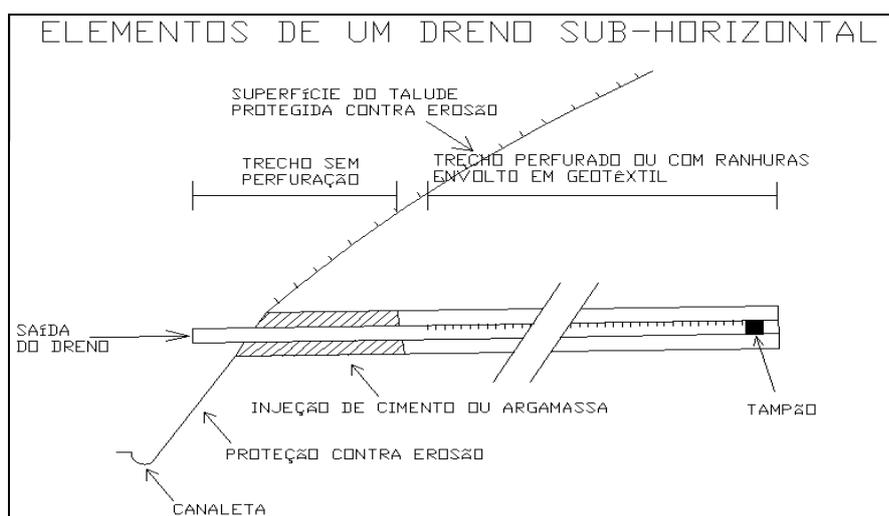


Figura 5.4. Esquema de um dreno para coleta da água sub-superficial dos taludes.

Ao termino da instalação do dreno sub-superficial recobriremos a superfície com a técnica de controle da erosão superficial sugerida no item “a” desse capítulo.

d) Ruptura em solos/rochas estratificados

A aplicação da vegetação nem sempre poderá ser empregada sozinha, principalmente em relação à ruptura com estratificação em maciços instáveis (Figura 5.5). Observa-se geralmente o uso de retaludamento para estabilização de cortes com ruptura em solos/rochas estratificados, mas no nosso caso o local onde o talude sofre a estratificação está com aproximadamente 5 metros de altura. Por isso para a estabilização é necessária à aplicação conjunta de técnicas de contenção, como por exemplo, com uso de muros ou solo grampeado ou injeções, mas utilizando vegetação para recobrir e gerar um efeito paisagístico e de estabilização em longo prazo.

Uma alternativa que já foi empregada na Europa e funcionou para taludes em terrenos íngremes e sujeitos a fenômenos de erosão acelerada é o revestimento vegetal com rede metálica grampeada e fibra de coco antierosiva tridimensional.

Este tipo de intervenção é uma técnica de revestimento, que promove a cobertura de taludes e escarpas sujeitos a erosão, mediante o uso combinado de uma fibra de coco antierosiva tridimensional, sobreposta por uma rede metálica de dupla torção. A fibra de coco é particularmente eficaz, pois é composta por microesponjas que absorvem e retém a água, permitindo dessa maneira a hidratação e arejamento das plantas (VENTI *et al.*, 2003 *apud* FREITAS, 2006). A vegetação será posta na estrutura através de técnicas de hidrossemeadura sobre toda a superfície de intervenção.

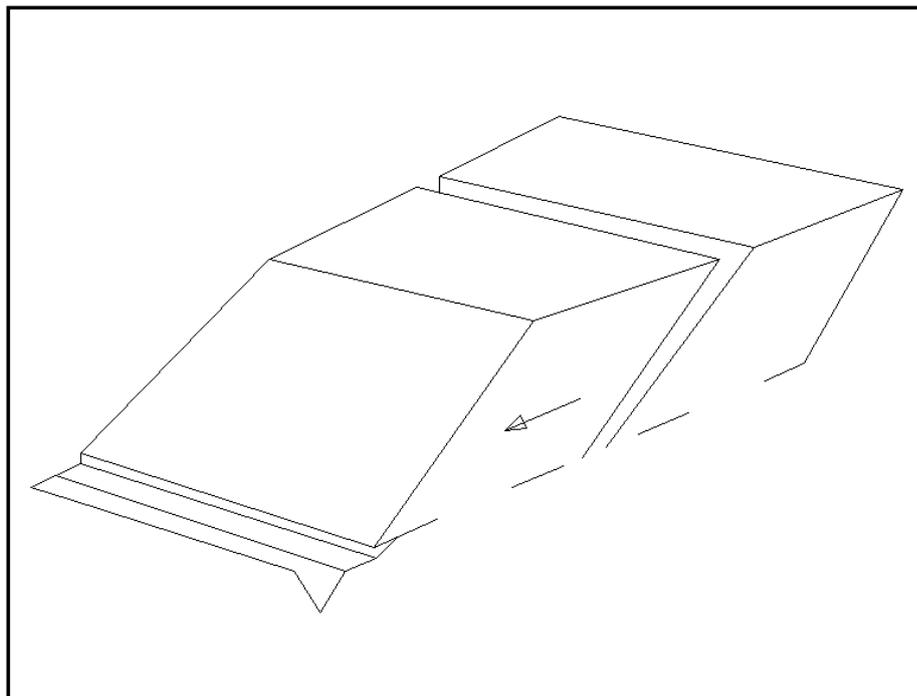


Figura 5.5. Esquema de um talude estratificado para entendimento das prováveis soluções de contenção da erosão.

Sua execução deve seguir alguns passos para funcionar perfeitamente.

- Antes de se iniciarem os trabalhos de colocação das mantas, deve-se efetuar uma regularização do talude com afastamento de raízes, maciços rochosos instáveis, etc.
- Em seguida, estender-se-á sobre o talude a manta de fibra de coco que será ancorada a montante através das barras metálicas, enquanto as telas serão estendidas verticalmente uma ao lado da outra com uma sobreposição de cerca de 5-10 cm de modo a evitar a erosão entre as faixas.
- Sucessivamente será colocada sobre o terreno a rede metálica, sobrepondo a manta de fibra de coco. A rede e a fibra de coco são fixadas ao terreno mediante o uso de barras metálicas em forma de T, ancoradas ao talude na razão de 1-2 barras metálicas por m^2 , segundo a regularidade da superfície do terreno. No caso de taludes muito íngremes e na presença de rochas particularmente friáveis, serão operadas também ligações em cordas de aço entre as barras metálicas ao longo da superfície, melhorando a aderência da rede ao substrato.

- Este revestimento é geralmente acompanhado por uma hidrossementeira.

e) Aspectos de orientação solar na influência da vegetação

As técnicas descritas são bastante utilizadas e geralmente funcionam, mas deve-se salientar que quando se trata da aplicação de vegetação é necessário levar em conta a espécie ideal ao clima, relevo e solo da área a ser tratada e, também importante, é a insolação do local.

Na região estudada taludes com faces voltadas ao nordeste sofrem influência da insolação matutina, ou seja, a variação de temperatura sofrida neles não é grande, dessa forma a espécies escolhidas não necessitam ter uma alta resistência à variação de temperatura.

Por sua vez taludes com face sudoeste sofrerão influência da insolação vespertina, ou seja, a variação de temperatura será maior e existirá a necessidade de espécies vegetais com maior resistência à variação de temperatura e insolação.

Essa observação também deve ser levada em conta em relação ao tipo de solo nos taludes, pois se possuírem característica expansiva o taludes de face sudoeste apresentarão maiores problemas de erosão do que os da face nordeste.

Por isso o aconselhamento do emprego de espécies nativas, pois facilmente consegue-se fazer levantamento e observar *in loco* o desenvolvimento e comportamento das espécies em cada face de taludes com características semelhantes, utilizando as que melhor se adaptam as condições.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISA

Esse capítulo é dividido em dois, o qual na primeira parte será apresentado à conclusão que se obteve com esse trabalho e a segunda conterá sugestões de pesquisa futuras.

6.1. CONCLUSÕES

Em geral, existe uma concordância em toda a literatura consultada quanto aos efeitos benéficos da vegetação na estabilização de rupturas rasas e erosão superficial de solos em taludes, pois sua influência atinge uma profundidade de aproximadamente 1,5 m. Isto implica que, para movimentos ou rupturas em profundidades maiores, são necessárias técnicas conjuntas de contenção e vegetação.

A influência da vegetação na estabilização dos solos pode ser caracterizada (a) pela diminuição da quantidade de água que alcança o solo, provocada pela interceptação da chuva por parte da folhagem, (b) pela remoção da umidade do solo pela evaporação e pela transpiração das plantas – o que acarreta um aumento da resistência ao cisalhamento do solo, e (c) pelo aumento da coesão do conjunto solo-raiz provocado pela resistência do sistema de raízes da vegetação – que leva a um incremento de resistência ao cisalhamento disponível.

Estas influências podem ser observadas em taludes mais antigos da BR 386. Porém, para cortes rodoviários recentes (a) é necessário à incorporação de matéria orgânica ao corte para que ocorra o desenvolvimento e a sucessão vegetal e (b) a implantação de drenagem superficial e sub-superficial necessita observar detalhes topográficos para seu sucesso, especialmente em solos finos arenosos altamente erosivos.

Foram observados neste trecho de estrada os seguintes aspectos:

- Em grande parte dos taludes os problemas de erosão superficial se restringem a sulcos e pequenas ravinas (em geral em solos mais argilosos);
- Estes problemas seriam facilmente controlados pela implantação de vegetação, mas observa-se que há necessidade de incorporação de matéria orgânica;
- Pequenas obras de drenagem superficial seriam de grande importância para limitar o afluxo de água na face destes taludes;

- Há problemas mais sérios de erosão nos taludes de material mais arenoso (exemplo do talude 4) os quais precisam cuidados especiais desde o início da escavação, já que os processos erosivos se instalam muito rapidamente. As mesmas soluções gerais acima são indicadas; detalhes de drenagem de interface podem ser importantes;
- Tipicamente os aterros apresentam os mesmos problemas: camada superficial não compactada e mau controle do escoamento superficial durante esta fase da obra, o que gera erosões pronunciadas;
- Foi encontrado apenas um tipo de escorregamento mais geral associado à estratificação do arenito: soluções de reforço ou estrutura de contenção associado a recobrimento vegetal.

O controle das condições de fluxo de água superficial é um fator muito importante e desta forma deve-se criar uma rede de drenagem superficial, o que irá permitir o escoamento superficial sem que haja acumulação excessiva das águas sobre o talude, fator que em muito contribui para a ocorrência de deslizamentos de terra. De fato, a drenagem é uma das intervenções mais importantes para a estabilização de um talude, sendo indissociável das obras de proteção superficial e de contenção, pois garante a redução dos esforços a serem suportados pela estrutura, devido à ação da água.

Analisando os efeitos que se poderá esperar com a realização de uma obra de Bioengenharia em cortes novos, concluiu-se que em curto prazo, a estabilidade da obra será assegurada exclusivamente pelo material inerte (tela de galinha ou geomantas). A estrutura das diversas técnicas implementadas irá garantir a estabilidade do terreno nos primeiros meses após a realização das obras. Posteriormente, a médio e em longo prazo, a tarefa de assegurar a estabilidade é cumprida prioritariamente ou exclusivamente pela parte vegetal viva.

As plantas são eficazes aumentando a resistência mecânica do solo e um efeito estético-ecológico, graças à função biológica que expõem. Através das suas atitudes biotécnicas, as plantas irão satisfazer os requisitos requeridos, aumentando, por exemplo: a capacidade de resistir a elevadas solicitações mecânicas, e a capacidade de consolidar o terreno permeabilizando-o com as raízes. Desta forma, é de esperar no talude alvo de intervenção, um aumento não só da resistência à erosão, como também um maior controle dos

movimentos de terras superficiais, consequentes do desenvolvimento da vegetação ao longo do tempo.

Por fim, um ponto em comum a todos é que a vegetação nativa é a mais indicada para a 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.

6.2. SUGESTÕES DE PESQUISA

Como sugestão para dar continuidade a essa pesquisa, propõe-se:

- 1- A realização de ensaios de campo para medir permeabilidade 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.
- 2- 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.
- 3- A realização de ensaios de campo para medir a sucção do solo com e sem raízes, coletando assim amostras para ensaios em laboratório para determinação da resistência ao cisalhamento.
- 4- A quantificação da área de influência das raízes de tipos de vegetações no secamento do solo, para se obter uma maior certeza na escolha correta do tipo de vegetação para a necessidade de cada tipo de solo, clima e conformação de talude.

Para futuros experimentos com controle de erosão em taludes de corte de estradas, recomenda-se:

- 1- Criar alguma forma efetiva de isolamento entre a crista e a face para garantir maior homogeneidade nas condições em que se encontrarão as unidades experimentais.
- 2- Proceder a análises com indicadores biológicos de qualidade do solo ao longo do tempo, de forma a estabelecer parâmetros da qualidade ambiental da área sob os

produtos utilizados, uma vez que fenômenos de ciclagem de nutrientes, bem como estruturação do solo, dependem sobremaneira da ação dos microrganismos.

- 3- Proceder a análises físicas do solo, de forma a determinar diferenças em estrutura, densidade total e condutividade hidráulica em pontos com diferentes cotas, a fim de determinar como e onde se dá o processo erosivo ao longo do comprimento (rampa) do talude.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), **Classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System): D2487**. USA, 2000. 11p.

ANH, T. B.; CHO, S. D.; YANG, S. C. **Stabilization of soil slope using geosynthetic mulching mat**. Geotextiles and Geomembranes, n. 20, p. 135- 146, 2002

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **Abertura de poços e trincheiras de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas: NBR 9604**. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: NBR 6457**. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica: NBR 6508**. Rio de Janeiro, 1984. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **Solo – Análise granulométrica: NBR 7181**. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **Solo - Determinação do limite de liquidez: NBR 6459**. Rio de Janeiro, 1984. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), **Solo - Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180**. Rio de Janeiro, 1984. 3p.

AUGUSTO FILHO, O., **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica**, In: Anais. 1ª Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro, 1992, pp 721-733

AUSLANDER, M.; NEVO, E.; INBAR, M. **The effects of slope orientation on growth, developmental instability and susceptibility to herbivores**. Journal of Arid Environments, n. 55, p. 405-416, 2003.

BENNIE, A.T.P. **Growth and mechanical impedance**. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. *Plants Roots: the hidden half*. 2. ed. New York: MARCEL DEKKER, 1996. p. 453-470.

BIANCHINI, M. R. **Estudo da instabilidade de um talude rodoviário em São Jerônimo/RS** (Dissertação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 125p., dezembro de 2000.

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

BRASIL. **Atlas Socio Econômico do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <<http://www.scp.rs.gov.br/atlas/atlas.asp?menu=591>>. Acessado em novembro de 2011.

BRASIL. Centro Brasileiro para Conservação da Natureza e Desenvolvimento Sustentável (CBCN). **Técnicas de bioengenharia para revegetação de taludes no Brasil**. Boletim Técnico N° 001. Viçosa – MG, 2010.

BRASIL. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado de São Paulo (DER/SP ET-DE-G00/013). **Grama Armada**. São Paulo-SP, 2006.

BRASIL. Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Paraná (DER/PR ES-OC 15/05). **Obras complementares: Proteção Vegetal**. Paraná-PR, 2005.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). **Implantação e Recuperação de Revestimentos Vegetais Rodoviários. Manual de vegetação rodoviária**. Rio de Janeiro, 2009.

BRASIL. **Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias (EMBRAPA)**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia16/AG01/arvore/AG01_96_10112005101956.html>. Acessado em novembro de 2011.

BRASIL. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE)**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geografia/atlas.shtm?c=5>>. Acessado em novembro de 2011.

BRASIL. Prefeitura Municipal de Bom Sucesso. **Projeto de estruturas de contenção em taludes em área erodida**. Bom Sucesso – MG, janeiro de 2007.

BRASIL. Região Metropolitana do Recife. **Morros: Manual de ocupação**. Recife-PE, 2000?.

BRIGHETTI, G. & MARTINS, J. R. S. **Estabilização e Proteção de Margens**. Universidade de São Paulo. São Paulo, abril de 2001.

BROMHEAD, E.N., **The stability of slopes**, Chapman e Hall, London, 1986, 411p.

CAMARGO, D.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Piracicaba : USP/ESALQ, 1997. 132p.

CAMPELLO, E. F.C. **O papel de leguminosas arbóreas noduladas e micorrizadas na recuperação de áreas degradadas (parte 1)**. In: III CURSO DE ATUALIZAÇÃO – RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, Curitiba. Anais... Curitiba: UFPR, 1996. p. 9-16

CANO, A.; NAVIA, R.; AMEZAGA, I.; MONTALVO, J. **Local topoclimate effect on short-term cutslope reclamation success**. Ecological Engineering, n. 18, p. 489-498, 2002.

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.

CASTELO, R. R. **As encostas urbanas: análise e proposta de metodologia para enfrentar o problema em Vitória**. Vitória: Fundação Ceciliano Abel de Almeida, 1986. 84 p.

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.

CORSINI, C. A. & ZANÓBIA, D. **Conservação de áreas com cobertura vegetal e limpeza em rodovias**. I SIGRA – Simpósio Sobre Gramados – “Produção, Implantação e Manutenção”. Botucatu-SP, 29 e 30 de agosto de 2003.

CPRM – GEOBANK, **Levantamento geológico**. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br>>. Acessado em novembro de 2011.

CRUDEN, D.M. e VARNES, D.J., **Landslide types and processes**, In. Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation (A.K. Turner e R.L. Schuster, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C. 1996, pp 36-75.

CUNHA, M. A.; FARAH, F.; CERRI, L. E. S.; GOMES, L. A.; GALVÊS, M. L.; BITTAR, O. Y.; FILHO, O. A.; SILVA, W. S. **Ocupação de encostas**. São Paulo: IPT, 1991. 216 p.

de ALENCAR, F. M. A. **Plantas úteis para revestimento do solo: II- Gramíneas de porte médio e grande.** *Bragantia*, vol. 12, nº 10-12, out.-dez. de 1952.

de SOUZA, C. R. & SEIXAS, F. **Avaliação de diferentes coberturas do solo no controle da erosão em taludes de estradas florestais.** *Scientia Forestalis*, nº 60, p. 45-51, dezembro de 2001.

DEFLOR Bioengenharia. **Estudos de casos.** Disponível em: <http://www.deflor.com.br/estudo_erosoes.html>. Acessado em maio de 2012.

EINLOFT, R.; SOUZA, M. G.; COSTA, M. M.; GRIFFITH, J. J. **Seleção de gramíneas e leguminosas utilizadas para revegetação de taludes em sacos de aniagem e plantio em covas.** In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, III., 1997, Ouro Preto. Anais... Viçosa: Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas - SOBRADE, 1997. p. 329-338.

FERNANDES, L. S. **Avaliação de mantas comerciais na vegetação de talude em corte de estrada** (Dissertação). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 96p., 2004.

FIORI, A.P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes.** Curitiba: Editora da UFPR, 550p., 2001.

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

FREITAS, A. R. M. **Proposta de requalificação Biofísica e Paisagística de um talude num percurso do Parque Nacional do Vesúvio com técnicas de Engenharia Biofísica** (Trabalho de Diplomação). Universidade de Évora, Évora, 95p., outubro de 2006.

GALETI, P. A. **Prática de controle à erosão.** Campinas: Instituto Campineiro

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.

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.

GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. **Biotechnical 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, M. D. R. **Vegetation and slope stability**. In: ANDERSON, M. G.; RICHARDS, K. S. (Ed). Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology. Chichester: John Wiley, 1987. Cap. 6, p. 187-230.

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

GUIDICINI, G. e NIEBLE, C.M., **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. Edgard Blücher, São Paulo, 1984, 194p.

HEIDEMANN, M. **Caracterização geotécnica de um solo residual de granulito envolvido em uma ruptura de talude em Gaspar-SC** (Dissertação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. p. 178.

HIGHLAND, L.M. e BOBROWSKY, P., **O Manual de Deslizamento — Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos**. U.S. Geological Survey Circular 1325, Reston, Virginia, 2008, 176 p.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 2003. 494 p.

HOUAISS, A.; VILLAR, M. S.; MELLO FRANCO, F. M. **Dicionário Houaiss da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Objetiva, 2000. 2992 p.

HUTCHINSON, J. N. O., **Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology**. In: Proc. 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 1988, pp.3-36.

INVENTÁRIO FLORESTAL CONTÍNUO DO RIO GRANDE DO SUL (IFCRS/UFSM). Disponível em: < <http://w3.ufsm.br/ifcrs/frame.htm>>. Acessado em novembro de 2011.

KRETSCHMER JR., A. E.; PITAN, W. D. **Tropical and subtropical forages**. In: BARNES, R. F.; MILLER, D. A.; NELSON, C. J. (Ed.). An introduction to grassland agriculture. 5. ed., v. 1. Iowa: Iowa University Press, 1995. p. 283-304.

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.

LEMES, M. R. T. **Revisão dos efeitos da vegetação em taludes** (Dissertação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 140p., 2001.

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.

MACCAFERRI. **Cases técnicos**. Disponível em: <http://www.maccaferri.com.br/case_por.php?PHPSESSID=93qdeivqe83vkv54k5dba3s240>. Acessado em maio de 2012.

MANUAL de **Conservación del Suelo y del Agua**. 3 ed. Chapingo, México: Colegio de Postgraduados, 1991.

MARSLAND, F. **Vegetation and embankment movements** (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.

MONGUILHOTT, M. **Estudos de áreas suscetíveis à movimentos de massa na rodovia RS/486 – Rota do Sol** (Dissertação), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, agosto de 2008. p. 115.

MUD slides. Disponível em: <<http://www.zetatalc.com/info/tinfo16g.htm>>. Acessado em julho de 2011.

NEVES, P. F.; e SOUZA, M. R.; OLIVEIRA, J. **Influência da cobertura vegetal na resistência ao escorrimento de taludes**. CEGEO, 2000?.

OLIVEIRA, M.A.T. **Processos erosivos e preservação de áreas de risco a erosão por voçorocas**. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (Ed.). Erosão e conservação dos solos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 57-94.

OLIVEIRA, R. R., ZAÚ, A. S., LIMA, D. F.; SILVA, M. B. R., VIANNA, M. C.; SODRÉ, D. O.; SAMPAIO, F. D. **Significado ecológico da orientação de encostas no maciço da Tijuca, Rio de Janeiro.** Oecologia Brasiliensis, v. 1, n. 1, p. 523-541, 1995.

PASSIOURA, J.B. **Soil structure and plant growth.** Australian Journal of Soil Research, v. 29, p. 717-728, 1991.

PEREIRA, A. R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e Controle de erosão.** Minas Gerais, 2006.

PEREIRA, A. R. **Controle e recuperação de processo erosivos com técnicas de Bioengenharia.** In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 1., 2001, Goiânia. Anais... p. 1-11.

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

PINTO, G. M. **Bioengenharia de solos na estabilidade de taludes: Comparação com uma solução tradicional** (Trabalho de Diplomação). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 78p., dezembro de 2009.

RAMBO, B. **A fisionomia do Rio Grande do Sul: ensaio de monografia natural.** Porto Alegre: Selbach, 1956. 456p.

REIS, A; TRES, D. R.; SCARIOT, E. C. **Restauração na Floresta Ombrófila Mista através da sucessão natural.** Pesq. Flor. bras., Colombo, n.55, p. 67-73, jul./dez. 2007. Disponível em: <http://www.cnpf.embrapa.br/publica/pfb-revista-antiga/pfb_55/PFB_55_p_67-74.pdf>. Acessado em dezembro de 2012.

RIBEIRO, A. M. L. **Breves Considerações Sobre Técnicas de Engenharia Biofísica. Caso do Muro de Vegetação** (Trabalho de Diplomação). Universidade de Évora, Évora, 99p., outubro de 2005.

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.

SALOMÃO, F. X. T. **Controle e prevenção dos processos erosivos.** In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Ed.). Erosão e conservação dos solos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 229-265.

- 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. Anuais... Porto Alegre: UFRGS, 1995. p. 143-158.
- SANTOS, C. J. F.; FONTES, A. M.; SOUZA, M. H. **Projeto mutirão: Uma alternativa para reflorestamento em áreas de risco em regiões de baixa renda**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1., 1992, Curitiba. Anais... Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Curso de Engenharia Florestal, Departamento de Silvicultura e Manejo/ FUPEF, 1992. p. 345-353.
- SARTORI, P. L. P. **Geologia e Geomorfologia de Santa Maria**. Santa Maria, UFSM, Ciência & Ambiente, História Natural de Santa Maria, v.1, n.38, jan./jun. 2009, p 19-42.
- SCHUSTER, R. L., **Socioeconomic significance of landslides**. In. Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation (A.K. Turner e R.L. Schuster, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C. 1996, pp, 12-35.
- SOUZA, M. G. **Revegetação de taludes com geotêxtil em área minerada**. 1997. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- SOUZA, M. G. **Revegetação de taludes com geotêxtil em área minerada**. 1997. 47 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- 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.
- 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.
- TABALIPA, N. L; FIORI, A. P. **Influência da vegetação na estabilidade de taludes na Bacia do Rio Ligeiro (PR)**. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 27, n. 3, p. 387-399, 2008.
- THEISEN, M. S. **The role of geosynthetics in erosion and sediment control: An overview**. Geotextiles and Geomembrans, n. 44, p. 535-550, 1992.
- 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.

VARNES, D. J., **Slope movement types and processes**. In. Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (R.L. Schuster e R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C.1978, pp. 11-33.

VEPRASKAS, M.J. **Plant response mechanisms to soil compaction**. In: WILKINSON, R. (Ed.). Plant environment interactions. New York : M. Dekker, 1994. p.263-287.

VIERO, A. C. **Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul**. Organização VIERO, A. C. & da SILVA, D. R. A. Porto Alegre: CPRM, 2010. 250p.

WEGGEL, J. R.; RUSTON, R. **Soil erosion by rainfall and runoff – State of the art. Geotextiles and Geomembranes**, n. 11, p. 523-534, 1992.

ZONTA, E.; BRASIL, F. da; GOI, S.R.; ROSA, M.M.T. da. **O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico**. In: FERNANDES, M.S. (Ed.). Nutrição mineral de plantas. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 7-52.