

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Gabriela Martins Pinto

**BIOENGENHARIA DE SOLOS NA ESTABILIDADE DE
TALUDES: COMPARAÇÃO COM UMA SOLUÇÃO
TRADICIONAL**

Porto Alegre
dezembro 2009

GABRIELA MARTINS PINTO

**BIOENGENHARIA DE SOLOS NA ESTABILIDADE DE
TALUDES: COMPARAÇÃO COM UMA SOLUÇÃO
TRADICIONAL**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientadora: Karla Salvagni Heineck
Coorientador: Marcos Strauss

Porto Alegre
dezembro 2009

GABRIELA MARTINS PINTO

**BIOENGENHARIA DE SOLOS NA ESTABILIDADE DE
TALUDES: COMPARAÇÃO COM UMA SOLUÇÃO
TRADICIONAL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelos Orientadores e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2009

Profa Karla Salvagni Heineck
Dra. pela UFRGS
Orientadora

Marcos Strauss
Me. pela UFRGS
Coorientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Karla Salvagni Heineck (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Marcos Strauss (Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda.)
Me. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Luiz Antonio Bressani (UFRGS)
PhD pela University of London

Prof. Fernando Schnaid (UFRGS)
PhD pela University of Oxford

Dedico este trabalho a meus pais, Ivete e Marino, e a
minha irmã Mônica que sempre me apoiaram e
especialmente durante o período do meu Curso de
Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Profa. Karla Heineck, orientadora deste trabalho pelo tempo dedicado e pelo aprendizado que sua orientação me proporcionou.

Agradeço ao meu coorientador, o Engenheiro Marcos Strauss e por todo aprendizado proporcionado e pelo apoio tanto neste trabalho como ao longo do meu estágio na empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda.

Agradeço aos Engenheiros Eduardo Azambuja, Marco Aurélio Azambuja, Alexandre Nichel e Cleber Floriano da empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, os quais estavam sempre dispostos a me ajudar tanto em trabalhos da universidade como da empresa.

Agradeço à professora Carin Schmitt pela dedicação e paciência durante esses dois semestres.

Agradeço à minha família pelo apoio incondicional.

O começo da sabedoria é encontrado na dúvida,
duvidando começamos a questionar, e procurando
podemos achar a verdade.

Pierre Abelard

RESUMO

PINTO, G. M. **Bioengenharia de Solos na Estabilidade de Taludes:** comparação com uma solução tradicional. 2009. 74 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar conceitos de bioengenharia de solos para aplicação na estabilidade de taludes e comparar o custo da aplicação destes conceitos com aqueles aplicados em soluções tradicionais. Por definição bioengenharia de solos é a combinação de elementos vivos e inertes utilizados na estabilização de solos e sedimentos. Neste estudo pretende-se aplicar esta concepção a um talude que rompeu no km 108+800 da BR-116/SC. Em um primeiro momento foram pesquisados na literatura quais seriam os efeitos da vegetação no solo, e como isso poderia ser aplicado na situação existente. O próximo passo foi analisar as condições geomorfológicas da região. O trecho em estudo se encontra na região da Serra do Espigão, a qual compreende basicamente três unidades geológicas distintas, a Formação Serra Geral (constituída por basaltos), a Formação Pirambóia (constituída por arenitos de granulação fina a média) e a Formação Rio do Rastro do Grupo Passa Dois (constituída por arenitos finos e argilitos). Através de sondagens e observações de campo foi obtido o perfil geológico-geotécnico, que permitiu a obtenção dos parâmetros de projeto das camadas de solo existentes. As próximas etapas foram o dimensionamento da solução tradicional e de bioengenharia, para que fosse possível a comparação dos custos estimados para execução de cada solução. Os resultados obtidos mostraram que as duas soluções são válidas, sendo a solução de bioengenharia uma alternativa muito interessante para o caso de rupturas superficiais e controle de erosão, pois a profundidade de influência das raízes é limitada.

Palavras-chave: bioengenharia de solos; estabilidade de taludes; vegetação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: representação esquemática do delineamento de pesquisa.....	16
Figura 2: trabalhadores chineses no início do século 20 utilizando vegetação para solução de bioengenharia de solos.....	17
Figura 3: influência do reforço de fibra na resistência ao cisalhamento de areias densas	26
Figura 4: tipos de reforços de taludes por raízes.....	26
Figura 5: fluxograma do ciclo hidrológico de um solo nu.....	28
Figura 6: fluxograma do ciclo hidrológico de um solo com vegetação.....	29
Figura 7: interações vegetação-solo-água.....	29
Figura 8: trecho em estudo para aplicação de Parede Krainer.....	31
Figura 9: desenho esquemático de uma Parede Krainer.....	31
Figura 10: construção da parede vegetada complementada por feixes vivos.....	32
Figura 11: aplicação de um muro de solo reforçado <i>Terramesh® System</i>	35
Figura 12: após a construção do muro de solo reforçado <i>Terramesh® System</i>	36
Figura 13: elemento <i>Terramesh® System</i>	36
Figura 14: vista geral da ruptura, de jusante para montante.....	40
Figura 15: vista da ruptura, da rodovia (montante) para jusante.....	40
Figura 16: unidades geológicas presentes na região da Serra do Espigão.....	41
Figura 17: perfil geológico-geotécnico do terreno.....	42
Figura 18: retro análise da ruptura do km 108+900.....	44
Figura 19: planta baixa da área em estudo.....	46
Figura 20: seção tipo da solução tradicional adotada.....	47
Figura 21: análise de estabilidade do km 108+800: $FS=1,485$	50
Figura 22: análise de estabilidade com sobrecarga no caminho de serviço. Superfície crítica do caminho de serviço: $FS_{tridimensional}=1.24$ e superfície crítica da rodovia: $FS_{tridimensional}=1.36$	52
Figura 23: análise de estabilidade durante evento pluviométrico. Superfície crítica do caminho de serviço: $FS_{tridimensional}=1.23$ e superfície crítica da rodovia: $FS_{tridimensional}=1.32$	53
Figura 24: análise de estabilidade do talude com inclinação 1:1,40 e muro com $h=2$ m..	56
Figura 25: análise de estabilidade do talude com inclinação 1:1,50 e muro com $h=3$ m..	56
Figura 26: análise de estabilidade do talude com inclinação 1:1,60 e muro com $h=5$ m..	57
Figura 27: incremento da tensão cisalhante x tensão normal.....	60
Figura 28: seção tipo da solução de bioengenharia de solos.....	63

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: variáveis básicas para a seleção de mistura de espécies para controle de erosão e áreas degradadas.....	22
Quadro 2: fatores de segurança a serem utilizados em função da variável e respectiva situação da área.....	23
Quadro 3: influência dos efeitos hidrológicos da vegetação no solo.....	27
Quadro 4: parâmetros de resistência ao cisalhamento.....	45
Quadro 5: parâmetros geotécnicos no material utilizado nas análises das figuras 24 a 26.....	55
Quadro 6: densidade das raízes em função da biomassa das raízes e da profundidade de solo influenciada por elas.....	58
Quadro 7: incremento de coesão em função da biomassa das raízes e da profundidade de solo influenciada por elas.....	58
Quadro 8: fatores de segurança relacionando a profundidade da ação das raízes e a biomassa de cada espécie para a inclinação 1:1,40.....	58
Quadro 9: fatores de segurança relacionando a profundidade da ação das raízes e a biomassa de cada espécie para a inclinação 1:1,50.....	58
Quadro 10: fatores de segurança relacionando a profundidade da ação das raízes e a biomassa de cada espécie para a inclinação 1:1,60.....	59
Quadro 11: tensão normal em função da profundidade da camada de cobertura vegetal.....	61
Quadro 12: coesão em função da biomassa das raízes e da profundidade de solo influenciada por elas.....	62
Quadro 13: fatores de segurança relacionando o incremento de coesão e a espécie vegetal para taludes com inclinação 1:1,4.....	62
Quadro 14: fatores de segurança relacionando o incremento de coesão e a espécie vegetal para taludes com inclinação 1:1,5.....	62
Quadro 15: fatores de segurança relacionando o incremento de coesão e a espécie vegetal para taludes com inclinação 1:1,6.....	62
Quadro 16: planilha de quantidades dos serviços que se repetem nas duas soluções.....	66
Quadro 17: custos e quantidade do serviço de terraplenagem para solução tradicional...	68
Quadro 18: custos e quantidade do serviço de terraplenagem para solução de bioengenharia.....	70

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 MÉTODO DE PESQUISA	13
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	13
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	13
2.2.1 Objetivo Principal	13
2.2.2 Objetivos Secundários	13
2.3 PRESSUPOSTOS.....	14
2.4 PREMISSAS.....	14
2.5 DELIMITAÇÕES.....	14
2.6 LIMITAÇÕES.....	14
2.7 DELINEAMENTO.....	15
3 BIOENGENHARIA DE SOLOS	17
3.1 SELEÇÃO DA VEGETAÇÃO.....	20
3.1.1 Escolha das Sementes	21
3.1.2 Efeito das Raízes	24
3.1.3 Efeito Hidrológico	27
3.2 TÉCNICAS DE BIOENGENHARIA.....	30
3.2.1 Parede Krainer	30
3.2.2 Esteira Viva	33
4 MURO DE SOLO REFORÇADO	35
5 LOCAL DE ESTUDO	39
5.1 HISTÓRICO DO TERRENO.....	39
5.2 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROJETO.....	43
6 SOLUÇÃO TRADICIONAL	46
6.1 CONCEPÇÃO DA SOLUÇÃO.....	46
6.2 MEMÓRIA DE CÁLCULO.....	49
6.2.1 Dimensionamento da solução de estabilização	49
6.2.2 Análise da estabilidade da fase crítica da sequência construtiva	51
7 SOLUÇÃO DE BIOENGENHARIA DE SOLOS	54
7.1 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE UTILIZADOS.....	54
7.1.1 Análise pelo método de Styczen e Morgan (1995)	54
7.1.2 Análise pelo método de Prandini et al. (1976)	59
7.2 CONCEPÇÃO DA SOLUÇÃO.....	63

8 COMPARAÇÃO DOS CUSTOS.....	65
9 CONCLUSÕES.....	72
REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

A bioengenharia de solos, ou engenharia natural, consiste no uso de elementos biologicamente ativos junto a elementos inertes em obras de estabilização de solos e sedimentos. Como elementos vivos, pode-se citar a vegetação, e os elementos inertes podem ser representados por concretos, madeiras, ligas metálicas, polímeros naturais e sintéticos. Esta técnica de estabilização utiliza as raízes e os caules como elementos estruturais e mecânicos para contenção e proteção de solos, em diferentes arranjos geométricos. Atua, assim, no fortalecimento do solo, na melhoria das condições de drenagem e na retenção das movimentações de terra.

Este tipo de processo de estabilização não foi desenvolvido recentemente, mas vem se fortalecendo devido à grande conscientização ambiental, que tem acontecido nas últimas décadas, em relação aos efeitos nocivos da degradação ambiental na sobrevivência do ser humano. Algumas características da engenharia natural são:

- a) menor requerimento de maquinário e mais mão de obra com qualificação inferior;
- b) utilização de materiais naturais e locais, como madeira, pedras, compostos orgânicos que reduzem os custos de transporte, além de gerarem benefícios locais;
- c) compatibilidade ambiental, pois geralmente requerem a utilização mínima de equipamentos e da movimentação de terra, ocasionando menor perturbação durante a execução;
- d) características de auto-reparação devido à habilidade da vegetação de crescimento e regeneração;
- e) 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;
- f) diminuição da umidade e das poro-pressões geram aumento da estabilidade.

Tendo disponível este tipo de técnica torna-se essencial o seu uso nos dias de hoje, visto que, a intervenção do homem no meio ambiente vem gerando danos irreparáveis ao ecossistema, provocando poluição e tragédias ecológicas. A bioengenharia de solos tem como objetivo diminuir os conflitos entre desenvolvimento e proteção da natureza, permitindo, por exemplo,

a construção de uma rodovia sem causar tantos impactos ao longo dos cortes e aterros necessários para execução da mesma. Com o objetivo de identificar a viabilidade de uma solução de bioengenharia de solos, neste trabalho é apresentada uma comparação dessa solução com outra tradicional para estabilização de um talude rompido no km 108+800 da BR116/SC.

Além desta introdução o trabalho apresenta os capítulos a seguir descritos. No capítulo 2 é apresentada a metodologia que permeou o desenvolvimento deste trabalho. No capítulo 3 é apresentada uma pesquisa bibliográfica sobre bioengenharia de solos, na qual é discutida como deve ser feita a seleção da vegetação em relação à escolha das sementes e ao efeito apresentado pelas raízes, assim como as conseqüências do efeito hidrológico. Ainda no terceiro capítulo são apresentados exemplos existentes de técnicas de engenharia natural de solos. O quarto capítulo trata sobre muros de solo reforçado, apresentando os princípios da técnica tradicional utilizada para comparação. O capítulo 5 aborda o local em estudo, dando um breve histórico do terreno e indicando como foram obtidos os parâmetros de projeto. Os capítulos 6 e 7 descrevem o desenvolvimento das soluções tradicional e de bioengenharia, respectivamente. No oitavo capítulo é feita a comparação dos custos de cada solução, e por fim no capítulo 9 são apresentadas as conclusões que surgiram com o desenvolvimento deste trabalho.

2 MÉTODO DE PESQUISA

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa deste trabalho é: ao comparar uma solução tradicional de estabilidade de taludes e outra com base nos princípios de bioengenharia de solos, quais são as diferenças de custo e métodos construtivos entre as duas soluções?

2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundários e são apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é a comparação de custos e métodos construtivos entre uma solução tradicional de estabilidade de taludes e outra que utiliza os princípios de bioengenharia de solos.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários deste trabalho são:

- a) descrição do uso da bioengenharia de solos;
- b) descrição da solução tradicional de estabilidade de taludes.

2.3 PRESSUPOSTO

É pressuposto do trabalho que a camada superior menos resistente do caso estudado tem cinco metros de espessura.

2.4 PREMISSAS

Este trabalho tem como princípio a preservação ambiental. Técnicas de bioengenharia têm como objetivo reduzir os danos de uma construção ao meio ambiente. A construção de estradas é inevitável, assim como a execução de cortes e aterros no terreno ao longo destas obras, com soluções de engenharia natural é possível diminuir os impactos ambientais e até mesmo recuperar áreas degradadas.

2.5 DELIMITAÇÕES

O presente trabalho está delimitado a um talude rompido no km 108+800 da BR 116/SC e as soluções estudadas serão de bioengenharia de solos e *Terramesh® System* e retaludamento.

2.6 LIMITAÇÕES

Como limitações deste trabalho têm-se:

- a) a forma de obtenção da topografia e das sondagens, as quais foram realizadas por empresas terceirizadas, logo não foi possível acompanhar a realização dos mesmos;
- b) a retroanálise foi feita em apenas um *software*, no Slope/W;
- c) a análise de estabilidade do muro foi obtida somente pelo programa Slope/W;
- d) o custo para realização das soluções estudadas foi estimado, pois nenhuma das opções teve o acompanhamento da execução para ser possível fazer este tipo de constatação;
- e) as espécies analisadas foram apenas gramíneas;

- f) as variáveis analisadas para o estudo da viabilidade técnica das soluções foram sua vulnerabilidade em função do clima, o espaço necessário para concepção da solução e limitações da ação das raízes em função da profundidade.

2.7 DELINEAMENTO

O delineamento do trabalho abrangeu as seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) obtenção dos dados do terreno;
- c) retroanálise;
- d) análise das soluções,
 - solução tradicional;
 - solução de bioengenharia;
- e) elaboração dos projetos,
 - solução tradicional;
 - solução de bioengenharia;
- f) estimativa de custo de ambas as soluções;
- g) análise dos resultados;
- h) conclusões.

Para realização deste trabalho, o primeiro passo é a obtenção dos dados da topografia do terreno do trecho em estudo. Este levantamento topográfico foi realizado por uma empresa terceirizada, pois a empresa responsável pelo projeto não possui equipamentos necessários.

Com base nos parâmetros obtidos na retroanálise foram feitas as análises da solução utilizando *Terramesh® System* e retaludamento com material mais resistente. Foram analisadas diversas situações até se chegar naquela que apresentou melhores condições técnicas e econômicas. Realizou-se então, com o conceito obtido nesta análise, a etapa de elaboração do projeto da solução tradicional.

As próximas etapas foram de análise de soluções de bioengenharia de solos disponíveis e estudo de diversas soluções até se chegar a uma solução de estabilidade satisfatória. Com a definição do recurso de bioengenharia a ser utilizado foi concluído esta parte do trabalho.

O custo total estimado desta solução, incluindo material e mão de obra, foi comparado com o custo total, também estimado, da alternativa tradicional. Com todos estes dados puderam ser traçadas as conclusões do trabalho.

Na figura 1 é apresentada uma representação esquemática do delineamento deste trabalho.

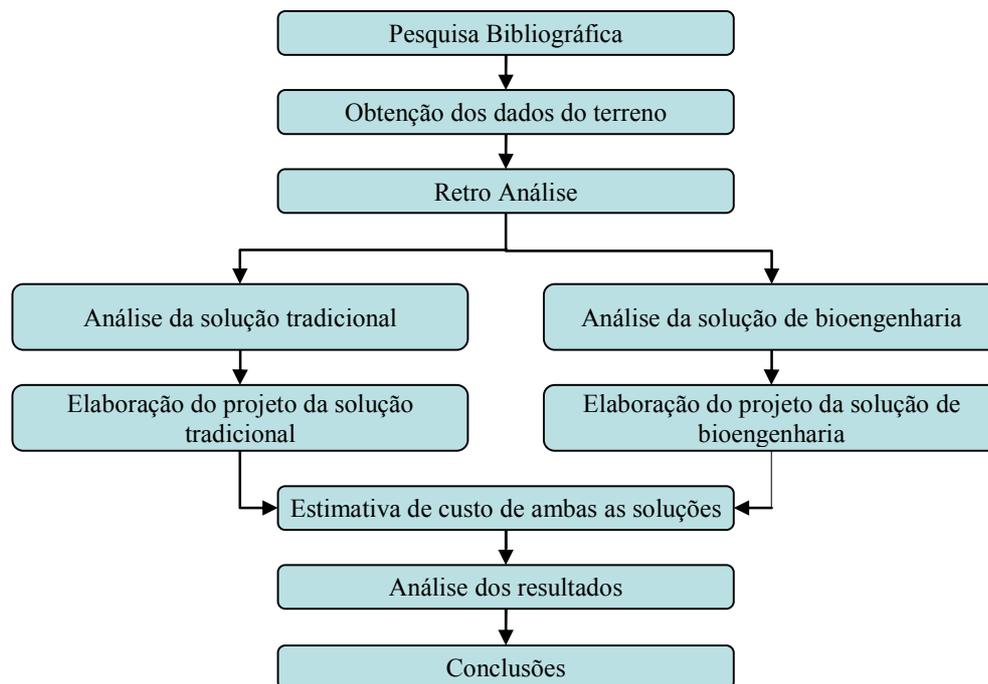


Figura 1: representação esquemática do delineamento da pesquisa

3. BIOENGENHARIA DE SOLOS

Há muito tempo o homem percebeu o potencial da vegetação para o controle de erosão em superfícies. Arbustos e gramíneas ajudam a combater a erosão em taludes, servindo como uma cobertura contra vento e água da chuva. A bioengenharia de solos é uma excelente ferramenta para estabilização de áreas que se apresentam instáveis. No entanto estes métodos não deveriam ser vistos como uma solução única para a maioria dos problemas de erosão (LEWIS, 2000, p. 1).

Um dos relatos mais antigos citando o uso de bioengenharia de solos foi publicado por Woltmann em 1792, indicando o uso de estacas vivas para vegetação e estabilização de margem de rios (em inglês, *streambanks*) (LEWIS, 2000, p. 2).

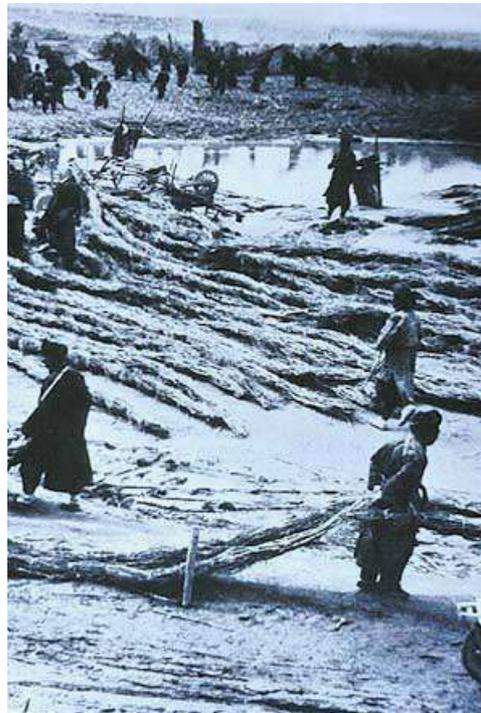


Figura 2: trabalhadores chineses no início do século 20 utilizando vegetação para solução de contenção por meio de técnicas de bioengenharia de solos (FINNEY¹,1993 apud LEWIS, 2000).

¹ FINNEY, K. **Landscape Architect**. 1993. Eleventh Annual California Salmonid Restoration Federation Conference in Eureka, California

O maior incentivo para o desenvolvimento de novas técnicas de bioengenharia de solos na Europa aconteceu durante o desenvolvimento político no século XX. Restrições financeiras de pré-guerra, que aconteceram durante anos na Alemanha e na Áustria, favoreceram o uso de técnicas de custo moderado, de materiais locais e métodos construtivos tradicionais para projetos públicos (LEWIS, 2000, p. 3).

A engenharia natural tem como principal agente a vegetação, ela gera efeitos positivos e negativos sobre os taludes. A seguir estão citados alguns efeitos positivos da vegetação em taludes (WU² et al., 1979 apud LEMES, 2001, p. 1):

Como efeito positivo da vegetação podemos citar a diminuição da quantidade de água que alcança o solo, provocada pela interceptação da chuva por parte da folhagem: a remoção da umidade do solo pela evaporação e pela transpiração das plantas, tendo como consequência, a diminuição da poro-pressão positiva ou a elevação da sucção, o que acarreta um aumento da resistência ao cisalhamento do solo; o aumento da coesão do conjunto solo-raiz provocado pela resistência do sistema de raízes da vegetação, que aumenta substancialmente o coeficiente de segurança do talude e leva a um incremento de resistência ao cisalhamento disponível.

Outros efeitos positivos são listados por Pereira ([2006], p. 9), tais como redução no transporte de sedimentos, aumento da taxa de infiltração do solo e controle de erosão.

Como citado anteriormente, ao mesmo tempo em que a vegetação auxilia na estabilidade de taludes e no controle de erosão gera efeitos negativos, Lemes³ (2001, p. 2) cita efeitos adversos tais como aumento da rugosidade pelas raízes, o que pode elevar o nível de infiltração e um conseqüente aumento da permeabilidade superficial devido à abertura de trincas. Pereira ([2006], p. 8) apresenta como efeitos negativos a redução da umidade do solo, o peso das árvores, ação do vento nas árvores, danos causados aos sistemas de drenagem e concentração do fluxo de água pluvial pelas raízes e erosão causada por plantas altas.

² 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.

³ São citados os seguintes autores no trabalho indicado:

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

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

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

Processos de erosão começam geralmente em áreas pequenas e expandem de tal modo que se torna necessário o uso de soluções de Engenharia para conter este mecanismo. Aplicar técnicas de bioengenharia de solos enquanto o problema ainda se encontra em uma pequena área representaria uma economia significativa além de minimizar o impacto no local e nas áreas adjacentes (ERB, 1985).

Projetos de bioengenharia de solos geralmente exigem o uso de menos equipamentos pesados de escavação, o que resulta em menor custo da solução e impacto menos agressivo ao meio. Isto também facilita o trabalho em terrenos onde existe difícil acesso a equipamentos pesados. A possibilidade do uso de plantas nativas é outro fator que diminuiria os custos, os quais seriam limitados ao trabalho de colheita, manuseio e transporte para a área do projeto, além das espécies já estarem adaptadas ao clima do local e as condições do solo (ERB, 1985).

Anos de monitoramento demonstraram que sistemas de bioengenharia de solos apresentam alto desempenho inicial e sua capacidade de suporte aumenta com o tempo e conforme a vegetação se estabiliza. Mesmo que plantas morram, raízes e superfícies orgânicas continuam tendo um papel importante durante o restabelecimento de outras plantas (LEWIS, 2000, p. 2). Uma vez que as plantas estão estabelecidas, o sistema de raízes reforça o manto do solo e remove o excesso de umidade do solo, e isso colabora para estabilidade da solução.

Segundo Lewis (2000, p. 2), bioengenharia de solos é o uso de plantas vivas e técnicas flexíveis de Engenharia para aliviar problemas ambientais tais como instabilidade e erosão de taludes. Diferente de outras tecnologias, nas quais plantas são um componente estético do projeto, nos sistemas de bioengenharia de solos, plantas são um importante componente estrutural.

Projetos geotécnicos exigem mais do que avaliação e medição do local. O projetista deve considerar a história natural e evolução, assim como o uso social e cultural da área ao redor do projeto. Lewis (2000, p. 6) diz que alguns fatores básicos devem ser levados em consideração para a elaboração de um projeto de bioengenharia de solos, os quais são:

- a) condições climáticas,
 - tipos de precipitação, níveis e duração;
 - temperaturas, incluindo dados extremos;
- b) topografia: declividade dos taludes, formato do terreno, elevação da área de projeto e direção solar. O clima em torno do terreno pode variar

consideravelmente em pequenos trechos. Isto pode influenciar nos níveis de erosão e no desenvolvimento da vegetação.

c) tipo de solo,

- substrato subjacente;
- permeabilidade das raízes e da água, capacidade de exploração da umidade e nutrientes disponíveis;

d) água,

- se for o caso, córregos e espécies de peixes que poderiam ser afetados pela erosão;
- locação de canais naturais de drenagem e áreas de escoamento superficial do pavimento;
- identificação de áreas de água potável;
- existência de valas e bueiros na área de projeto;

e) vegetação,

- tipos de plantas e a quantidade que cresce na área e projeto e nas áreas adjacentes. Isto serve especialmente para identificar as espécies colonizadoras;
- locação e preparação para futuras áreas de plantio e colheita;

f) processos de erosão,

- tipo de massa ou superfície gerada pela erosão;
- origem do processo de erosão: aterro, corte, etc.;
- tendência do terreno natural em recuperar-se naturalmente, permanecer uniforme ou piorar.

3.1 SELEÇÃO DA VEGETAÇÃO

Como já foi citado anteriormente, a escolha correta da vegetação que será utilizada na solução tem papel importante para garantir o sucesso do projeto geotécnico. Segundo Lemes (2001, p. 3), “As superfícies de solo expostas ao intemperismo, formadas por trabalhos de terraplenagem, estão sujeitas a processos erosivos com consequências danosas, tanto para a obra em si, como para toda a região onde ela se localiza.”. Nesse sentido Pereira ([2006], p. 5) afirma que “É necessário estabelecer a vegetação que permite maior infiltração, menor escoamento superficial e proteção contra erosão laminar.”. Durante a escolha da vegetação é necessário que se tenha atenção especial à escolha das sementes, efeito das raízes e o efeito hidrológico da vegetação. Esses processos serão mais detalhados a seguir.

3.1.1 Escolha das sementes

Pereira ([2006], p. 6) lista diversos fatores que influenciam na escolha de espécies para proteção e recuperação ambiental. Os principais são:

- a) edáficos: adaptação das espécies às condições do local onde será realizada a recuperação ambiental;
- b) climáticos: apresenta grande importância, visto que condições climáticas não podem ser reproduzidas artificialmente;
- c) ambientais: são apontados em função da velocidade e segurança da recuperação ambiental,
 - longevidade: solução geotécnica temporária ou permanente;
 - produção de biomassa: nível de matéria orgânica no solo da camada superficial e das camadas subjacentes, conforme a profundidade necessária das raízes para estabilidade do talude;
 - crescimento e efeitos paisagísticos: conforme solicitação do tipo de vegetação a ser obtida e a necessidade de manutenção da mesma;
 - fixação do nitrogênio: é preciso utilizar leguminosas, pois grande parte das áreas degradadas apresenta solos inférteis, se fazendo necessário melhoria nos níveis de fertilidade do solo;
 - palatabilidade da fauna: conforme a região poderão ser selecionadas espécies que produzam frutos, grãos e pastagem as quais favorecerão a fauna;
 - biodiversidade: quanto maior o número de espécies maior será a diversidade de pássaros e animais silvestres. Desta forma manter-se-á a biodiversidade e a sustentabilidade da vegetação.

A qualidade das sementes é fundamental para o sucesso do plantio, para tal é necessário que se observe o poder germinativo, o grau de pureza e o vigor inicial das sementes. Segundo Pereira ([2006], p. 12-13), “As taxas mínimas de semeio devem ser aquelas suficientes para que, em condições ideais de plantio, apresentem taxa de recobrimento do solo em um determinado período de tempo.”. O autor apresenta a equação 1 para o cálculo do valor cultural (VC) das sementes, quanto maior for este índice menor será a quantidade de sementes a ser aplicada no plantio:

$$VC(\%) = (\% \text{ de Pureza} \times \% \text{ de Germinação}) / 100 \quad (\text{equação 1})$$

No quadro 1 Pereira ([2006], p. 75) apresenta as variáveis que devem ser levadas em consideração ao selecionar os tipos de espécies que poderão ser plantadas misturadas garantindo a recuperação do solo, proteção contra erosão e melhoria da estabilidade do talude.

ITENS	VARIÁVEIS	NÍVEIS		
		A	B	C
1	Objetivo	Segurança	Revegetar	Estético
2	Longevidade	Anual	Bianual	Perene
3	Proteção Requerida	Pequena	Parcial	Total
4	Tipo do Impacto	Desnuda	Degradada	Erodida
5	Tipo de área	Alagada	Estável	Instável
6	Topografia	Plana	Inclinada	Muito Inclinada
7	Fertilidade Natural	Baixa	Média	Estéril
8	Produção de Biomassa	Baixa	Média	Alta
9	Biodiversidade do Local	Não há	Baixa	Alta
10	Formação (tempo)	Curto	Médio	Longo Prazo
11	Tolerância ao Clima	Seca	Fogo	Alagamento
12	Tolerância Edáfica	Acidez	Salinidade	Sombra
13	Toxidez do Solo	Baixa	Média	Alta
14	Porte da Planta	Rasteiro	Médio	Alto
15	Raízes (profundidade)	Rasa	Média	Profunda

Quadro 1: variáveis básicas para a seleção de mistura de espécies para controle de erosão e áreas degradadas (PEREIRA, [2006], p. 75)

Pereira ([2006], p. 77) apresenta também o quadro 2, o qual indica o fator de segurança a ser utilizado na quantidade de sementes levando em conta condições adversas no local. O fator de segurança final é a multiplicação dos fatores de segurança para cada situação existente na área de plantio. Este índice é acrescido na quantidade de sementes que serão plantadas, simulando as condições normais em campo, onde nem todas as sementes terão o desempenho esperado.

ITEM	VARIÁVEL	FATOR DE SEGURANÇA (FS)				
		1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
1	Inclinação da Área	Plana	Até 30°	30° - 45°	45° - 60°	>60°
2	Tipo de Material	Solo	Areno/siltoso	Estéril	Pedregoso	Material Solto
3	Preparo do Solo	Excelente	Razoável	Curva de nível/bermas	Irregular	Sem preparo
4	Técnica de Proteção	Biomantas Reforçadas	Biomantas Simples	Hidro/mulching	Hidrossemeio	Semeio Manual
5	Altura do Talude (m)	Até 5,00	5 - 8	8 - 15	15 - 30	>30
6	Drenagem	Sistema OK	Crista e bermas	Crista	Bermas	Inexistente
7	Época do Plantio	out-nov-dez	jan- fev- mar	abr-mai-jun	jun-jul-ago	mai-jun-jul

Quadro 2: fatores de segurança a serem utilizados em função da variável e respectiva situação da área (PEREIRA, [2006], p. 77)

A fim de garantir um melhor desempenho das espécies plantadas pode-se empregar geossintéticos, os quais consistem em uma família de produtos sintéticos utilizados para resolver problemas em geotecnia. No caso específico da bioengenharia eles auxiliam no controle de erosão sobre taludes, margens de rios, lagos, podem ser utilizados sob enrocamentos e até mesmo como barreira de contenção de sedimentos (MARQUES, 2004, p. 322).

Como barreira de proteção superficial, os geossintéticos são colocados sobre terrenos e materiais passíveis de erosão, formando uma cobertura nas áreas desprotegidas dos processos erosivos, os quais poderiam ser (MARQUES, 2004):

- a) destacamento de partículas do solo pelas gotas de chuva;
- b) fluxo superficial;
- c) transporte de sedimentos pelo fluxo das águas.

Para assegurar corretamente as funções de controle de erosão os geossintéticos devem atender a dois requisitos mínimos (MARQUES, 2004):

- a) reter os finos dos solos subjacentes ou dos materiais erodíveis transportados;
- b) resistir às velocidades de escoamento e aos esforços tangenciais provocados pelo fluxo de águas superficiais.

Outros aspectos deverão ser considerados conforme as condições do local onde se pretende instalar o material, tais como resistência à tração, permissividade, perfuração e impacto (MARQUES, 2004, p. 322).

Os geossintéticos podem ser classificados em permanentes ou temporários. Os temporários são aqueles parcial ou totalmente degradáveis, que além de controlar a erosão facilitam o desenvolvimento da vegetação. Eles irão se degradar enquanto a vegetação cresce de maneira suficiente pra apenas ela proteger o talude. E os permanentes, segundo Marques (2004, p. 324), “[...] são utilizados em locais onde se necessita de imediata e elevada proteção contra erosão.”.

3.1.2 Efeito das raízes

As raízes são responsáveis pela fixação do vegetal ao solo além de absorver e servir de reservatório de nutrientes importantes para o desenvolvimento da vegetação. A quantidade de nutrientes absorvidos e reservados depende de propriedades das raízes, tais como o diâmetro e profundidade em que se encontra (ATKINSON⁴, 1985 apud LEMES, 2001, p. 14).

Em períodos de seca é criado, pelo enraizamento profundo, um sistema auxiliar de raízes de absorção, o qual fica no solo até que a chuva molhe a superfície. Quando o grau de seca se apresenta em um nível mais elevado as raízes intermediárias também poderão produzir um sistema auxiliar de raízes (IMPERIAL COLLEGE⁵, 1997 apud LEMES, 2001, p. 14). Quatro funções principais para as raízes são citadas por Marshland⁶ (1996 apud LEMES, 2001, p. 14):

⁴ ATKINSON, D. Spatial and temporal aspects of root distribution as indicated by the use of a root observation laboratory. In: BRITISH ECOLOGICAL SOCIETY. **Ecological interactions in soil: plants, microbes and animals**. Oxford: A. H. Fitter, 1985, p. 43-65.

⁵ IMPERIAL COLLEGE. Civil Engineering. Soil Mechanics Group. Pore pressure and vegetation. London, 1997.

⁶ MARSLAND. F. **Vegetation and embankment movements**. 1996. Msc Thesis - University of Imperial College, London.

- a) ancoragem e base de estabilidade;
- b) armazenamento de água e de minerais dissolvidos;
- c) absorção de água e de minerais dissolvidos;
- d) condução da água e de minerais dissolvidos para os brotos e deles para baixo novamente.

Gray⁷ (1995 apud LEMES, 2001, p. 19-20) cita estudos pioneiros com a realização de ensaios de campo de resistência ao cisalhamento em solos permeados por raízes. Estes estudos concluíram que a principal contribuição de fibras (raízes) no solo, no que diz respeito à resistência, é o incremento de uma medida de coesão aparente, o que auxilia na estabilidade com relação a rupturas rasas em solos arenoso com pouca ou sem coesão intrínseca. Este aumento de resistência é ratificado pela afirmação: “[...] o reforço do solo [raízes] contribui com o incremento da resistência ao cisalhamento e, com isso, aumenta a estabilidade de taludes com solos rasos.”. Na figura 3 está ilustrado um gráfico onde foi concluído que o reforço de fibras tende a aumentar a resistência ao cisalhamento última e limitar as reduções na resistência pós-pico, na resistência ao cisalhamento das areias densas (GRAY; OHASHI⁸, 1983 apud LEMES, 2001, p. 20).

Devido ao fato da quantidade de raízes diminuir com a profundidade do subsolo a influência das raízes no talude está limitada a uma região a aproximadamente 1,50 m da superfície, a maiores profundidades o efeito de coesão diminui (GRAY⁹, 1995 apud LEMES, 2001, p. 69). O comportamento das raízes será satisfatório no controle de escorregamentos quando penetrarem através da superfície de ruptura. O esquema apresentado na figura 4 mostra a influência do reforço de raiz para taludes em diferentes condições de subsolo, podendo ser considerado em estudos que levem em conta o reforço do solo pela raiz (GRAY¹⁰, 1995 apud LEMES, 2001, p. 68).

⁷ 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.

⁸ GRAY, D. H.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, New York, v. 109, n. 3, p. 335-353, march. 1983.

⁹ op. cit.

¹⁰ op. cit.

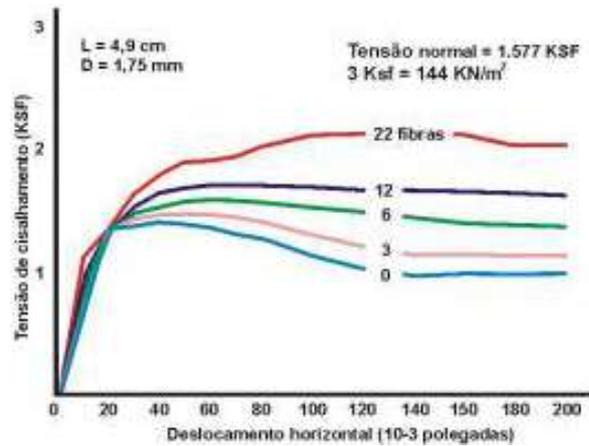


Figura 3: influência do reforço de fibra na resistência ao cisalhamento de areias densas (GRAY e OHASHI¹¹, 1983 apud LEMES, 2001, p. 20)

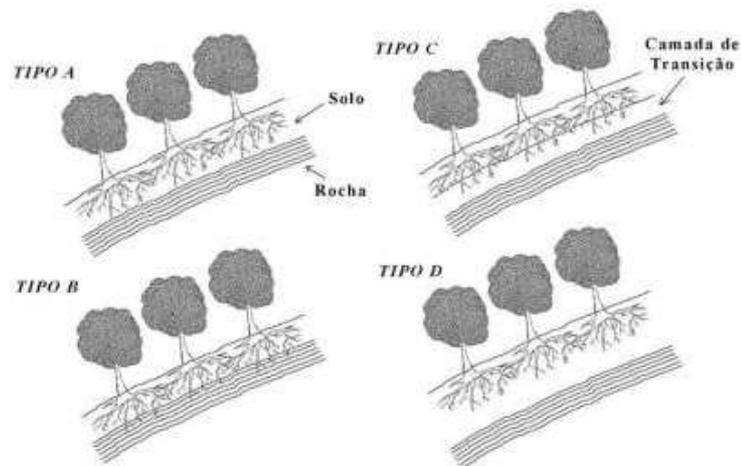


Figura 4: tipos de reforços de taludes por raízes (GRAY¹², 1995 apud LEMES, 2001, p. 68)

Lemes (2001, p. 68-69) explicando a figura 4, indica que no esquema do tipo A as raízes reforçam completamente a manta de solo, mas não penetra na rocha, criando uma superfície de fragilidade. No caso B, as raízes penetram nas fraturas da rocha ancorando a fatia de solo. O reforço também será importante no caso C, onde as raízes penetram em uma camada de transição, onde a densidade e resistência ao cisalhamento aumentam com a profundidade. No caso D as possibilidades de movimento estão abaixo da espessa camada de solo, onde as raízes estão **flutuando** e o reforço mecânico para estabilidade do talude não é suficiente.

¹¹ GRAY, D. H.; OHASHI, H. Mechanics of fiber reinforcement in sand. Journal of Geotechnical Engineering, New York, v. 109, n. 3, p. 335-353, 1983.

3.1.3 Efeito hidrológico

A vegetação provoca diversos efeitos no comportamento do solo, entre eles o efeito hidrológico, o qual é consequência da modificação da forma como a água chega ao solo, como ela entra e como é retirada do solo. As influências deste mecanismo podem ser benéficas ou adversas (GREENWAY¹³, 1989 apud LEMES, 2001, p. 32-33). Estão citados no quadro 3 os efeitos hidrológicos que acontecem e sua consequência ao entrar em contato com o solo.

EFEITO HIDROLÓGICO	INFLUÊNCIA
Interceptação das chuvas pelas folhas, resulta em	
Absorção e evaporação reduzindo a água disponível para a infiltração	Benéfico
Redução da energia das gotas de chuva e consequentemente da erosão	Benéfico
Aumento no tamanho das gotas que caem, aumentando assim a chuva localizada	Adverso
Caules e folhas interagindo com o fluxo de superfície, resultam em	
Maior armazenamento e maior volume de água armazenada	Adverso/Benéfico
Grande irregularidade no fluxo de água, reduzindo a sua velocidade	Benéfico
Raízes provocam no solo	
Aberturas na superfície permitindo a infiltração	Adverso
Retirada da umidade, a qual é perdida na atmosfera por transpiração	Benéfico
Redução da poro-pressão e aumento da sucção e consequentemente da resistência do solo	Benéfico
Aumento da quantidade de canalículos no solo, resultando em aumento da permeabilidade	Adverso

Quadro 3: influência dos efeitos hidrológicos da vegetação no solo
(LEMES, 2001, p. 33)

12 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.

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

Em um solo com presença de vegetação o ciclo hidrológico se torna muito mais complexo, uma vez que no solo nu a água chega integralmente ao solo, uma parte infiltra e a outra escorre superficialmente. Já em um solo com vegetação, parte da água é interceptada pelas plantas antes de chegar ao solo, esta parcela de água divide-se em três, a que é absorvida pela planta, a que é evaporada diretamente da superfície dos caules e das folhas e por fim a parcela que chega ao solo. A porção que atinge o solo é subdividida em mais três partes, aquela que escoar superficialmente, a que evapora e a que infiltra no terreno. Nas figuras 5 e 6 estão ilustrados os ciclos hidrológicos de um solo nu e de um solo com vegetação, respectivamente (GREENWAY¹⁴, 1989 apud LEMES, 2001, p. 35).

A figura 7 apresenta um resumo dos efeitos hidrológicos e mecânicos das interações da vegetação com o solo (GREENWAY¹⁵, 1989 apud LEMES, 2001, p. 35).

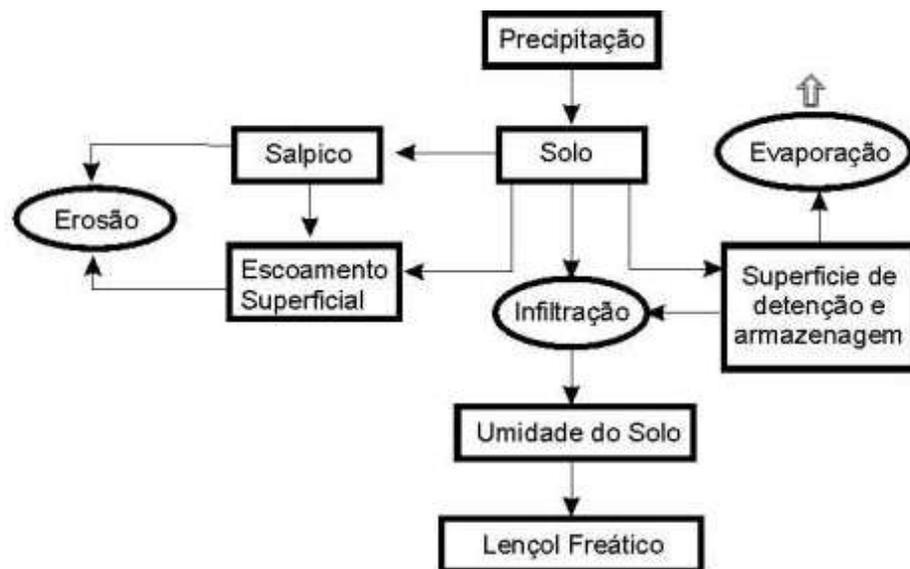


Figura 5: fluxograma do ciclo hidrológico de um solo nu (GREENWAY¹⁶, 1989 apud LEMES, 2001, p. 35)

¹⁴ GREENWAY, D. R. Vegetation and slopes stability. In: ANDERSON, M. G.; RICHARDS, K. S. (Ed.). **Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology**. Chichester: John Wiley, 1989. cap. 6, p. 187-230.

¹⁵ op. cit.

¹⁶ op. cit.

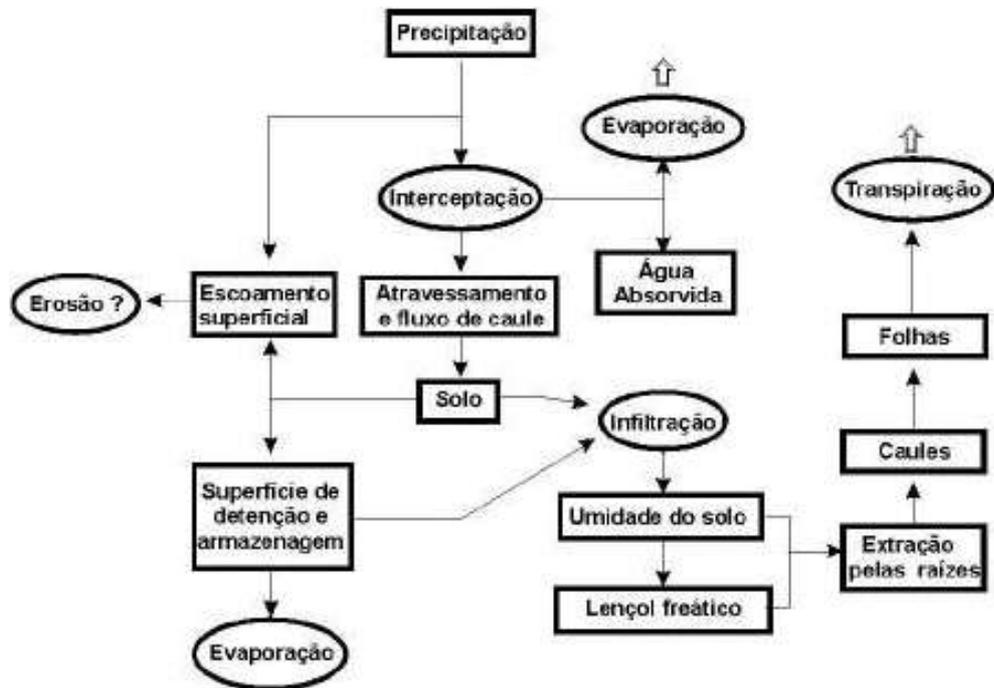


Figura 6: fluxograma do ciclo hidrológico de um solo com vegetação (GREENWAY¹⁷, 1989 apud LEMES, 2001, p. 35)

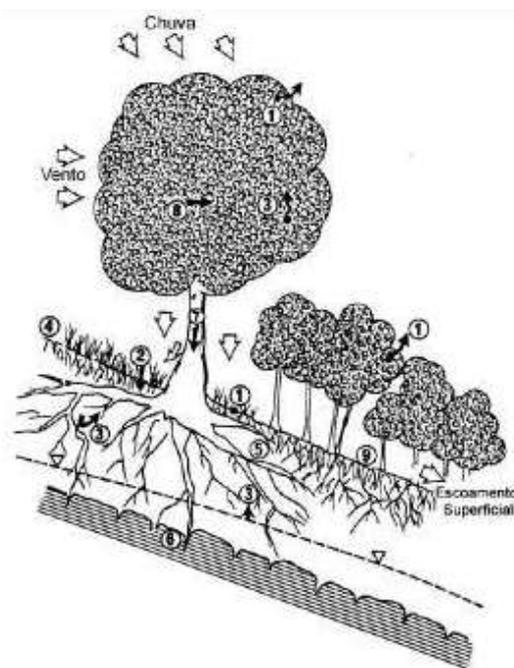


Figura 7: interações vegetação- água-solo (GREENWAY¹⁸, 1989 apud LEMES, 2001, p. 35)

¹⁷ GREENWAY, D. R. Vegetation and slopes stability. In: ANDERSON, M. G.; RICHARDS, K. S. (Ed.). **Slope stability**: geotechnical engineering and geomorphology. Chichester: John Wiley, 1989. cap. 6, p. 187-230.

¹⁸ op. cit.

Os efeitos hidrológicos apresentados na figura 7 representam as interações entre vegetação, água e solo e são descritos a seguir:

- a) interceptação da água da chuva pelas folhas e galho (1);
- b) ilustra a infiltração da água da chuva no solo (2);
- c) retirada de umidade do solo pelas raízes (3);
- d) diminuição da umidade por fendas de tração (4).

3.2 TÉCNICAS DE BIOENGENHARIA

Durlo e Sutili (2005, p. 171) apresentam dois métodos concretos e objetivos de bioengenharia de solos, que foram testados, experimentalmente, para a estabilidade de taludes fluviais no Arroio Guarda-Mor, localizado no estado do Rio Grande do Sul. Os trechos escolhidos apresentavam problemas evidentes e intervenções, com o uso de material local e o consentimento dos proprietários, se justificavam econômica e tecnicamente. Os métodos escolhidos pelos autores e que serão detalhados a seguir são Parede Krainer e Esteira Viva.

3.2.1 Parede Krainer

O primeiro método aplicado foi uma parede vegetada de madeira (Parede Krainer) em “[...] um trecho suavemente curvo, com raio externo formado por um talude instável.” (DURLO; SUTILI, 2005, p. 172). O solo local é caracterizado por um barranco estratificado, de origem flúvica, mas com predominância franco-arenosa. A geometria do problema consiste em uma altura média de 4 metros, estendendo-se por 40 metros ao longo da margem direita (DURLO; SUTILI, 2005, p. 172). A figura 8 apresenta as condições da área antes da construção da Parede Krainer.



Figura 8: trecho em estudo para aplicação da Parede Krainer (SUTILI, 2007)

Paredes vegetadas de madeira consistem na cravação de estacas de madeira no talude intercaladas por troncos no sentido longitudinal do talude e entre estacas são colocados feixes vivos para que depois da degradação da madeira a vegetação assuma a proteção física da solução (DURLO; SUTILI, 2005, p. 174-177).

A figura 9 mostra o esquema de uma Parede Krainer e a figura 10 mostra a fase de construção da solução às margens do Arroio Guarda-Mor.

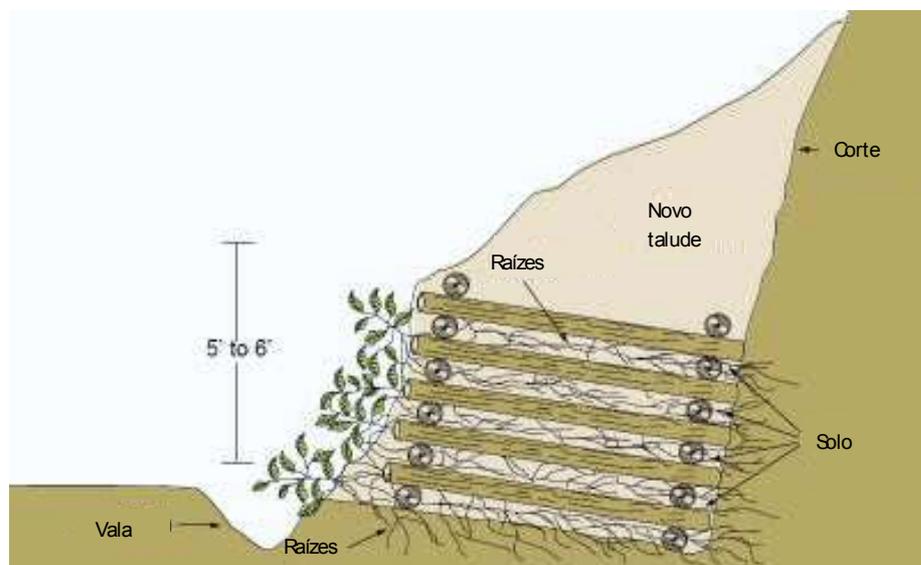


Figura 9: desenho esquemático de uma Parede Krainer (LEWIS, 2000, p. 22)



Figura 10: construção da parede vegetada complementada por feixes vivos (SUTILI, 2007)

Segundo Durlo e Sutili (2005, p. 173) a instabilidade deste trecho se deu pela ação da água e da sobrecarga devido ao peso touceiras de taquaras que haviam sido plantadas sobre o talude. Os autores ainda afirmam que “O talude é claramente mais alto do que a profundidade média das raízes, e a linha de ruptura se forma distante da ação das raízes.”, deste modo as taquaras causavam apenas instabilidade no talude, além de, após o deslizamento, obstruírem o curso de água, diminuindo a velocidade do mesmo e forçando o depósito de materiais, alterando assim a geometria do canal e do leito.

A solução proposta por Durlo e Sutili (2005, p. 173) apresentou uma intervenção física e um tratamento vegetativo. A intervenção física teve como objetivo modificar o leito no curso d’água readequando sua caixa, margem e barranca, a fim de estabilizar o talude e modificar a distribuição da velocidade da água. Este processo versa na retirada do material sedimentar e das touceiras de taquara que obstruem o centro do canal, criando desta forma um gradiente adequado para a margem erodida. O tratamento vegetativo, conforme os preceitos de bioengenharia de solos, deve ser feito junto aos ajustes físicos, pois o desenvolvimento da vegetação acontece em um primeiro momento com o auxílio das proteções físicas, até o momento em que sua ação de proteção se consolide e seja suficiente para manter a estabilidade do talude.

A parede vegetada de madeira foi construída utilizando troncos de eucalipto, árvore encontrada em abundancia na região. O comprimento das varas era o maior possível e com diâmetro de 15 cm na ponta fina. O primeiro passo foi construir a estrutura de madeira e

preenche-la com o material retirado do raio interno da curva e do centro do canal e a revegetação foi feita com estacas vivas. O trabalho foi realizado por duas pessoas em seis dias, sendo dois dias no transporte de materiais e ferramentas para o local da obra, duas horas para limpeza do leito e remodelagem do talude e um dia para a revegetação (DURLO; SUTILI, 2005, p. 174-177).

Os autores afirmam que a engenharia natural apresentada se mostrou executável e “[...] capaz de resolver problemas com grau de dificuldade razoável, mantendo o talude estável em um ângulo bastante alto (50 a 55°) e suportando eventos torrenciais de proporções catastróficas.” (DURLO; SUTILI, 2005, p. 181).

3.2.2 Esteira Viva

Esteira viva consiste na colocação de uma grade de madeira, formada por pilotos de madeira, sobre o talude com ramos inteiros enterrados no solo entre essa grade. A esteira viva é um tratamento vegetativo satisfatório especialmente no raio externo das curvas dos cursos de água, onde o impacto da água é frontal (DURLO; SUTILI, 2005, p. 134-135).

De maneira semelhante a solução da Parede Krainer nesta também são combinadas intervenções físicas e medidas vegetativas. As intervenções físicas foram feitas a fim de consolidar uma das margens do rio, em uma extensão de 20 m, antecedendo uma barragem. Nesta solução foi utilizada uma grande quantidade de material vegetal, e sua disposição especial sobre o terreno proporcionam um efeito físico de proteção, o qual vai sendo reforçado pelo crescimento da vegetação (DURLO; SUTILI, 2005, p. 182-183).

Na primeira parte da execução foi feita a remodelagem do talude, chanfrando e coroando a margem com pedras. Como foi utilizada grande quantidade de material vegetal os autores optaram por coletá-lo em uma região próxima sendo necessário o uso de caminhão. Para realização da coleta, do transporte e da fixação do material na margem do rio já remodelada foi necessário o trabalho de três pessoas em um dia de trabalho. O próximo passo foi montar a grade fixando os pilotos de madeira a cada 2 m, formando fileiras intercaladas. No dia seguinte foi feita manualmente a colocação das pedras sobre a base dos ramos e, com auxílio

de uma retro-escavadeira foi feito o recobrimento da esteira viva com uma camada de solo (DURLO; SUTILI, 2005, p. 184-185).

Em alguns pontos a camada de solo colocada sobre os ramos prejudicou o crescimento da vegetação. Este tipo de falha é considerada grave, podendo comprometer o trabalho. No caso em estudo o efeito de estabilização não foi prejudicado, apenas retardou o desenvolvimento inicial da vegetação (DURLO; SUTILI, 2005, p. 185). Mesmo depois de uma instabilidade apresentada durante um período de chuvas torrenciais os autores afirmam que ficou evidente que esta instabilidade não foi devido ao clima, mas também devido a alterações antrópicas realizadas no local que acabaram por agravar os problemas deste trecho.

4 MURO DE SOLO REFORÇADO

A solução tradicional adotada foi contenção em solo reforçado com retaludamento. O solo reforçado será desenvolvido utilizando *Terramesh® System*, o qual “[...] é formado por um paramento externo de um metro de espessura, em forma de gabião caixa, preenchido com pedras e utiliza, em sua interface com o solo, um geotêxtil cuja função é impedir a fuga dos finos do aterro estrutural.” Sua aparência final é a de um muro de gabiões, o qual é drenante, conferindo esta característica ao paramento frontal do muro, além de pode permitir o desenvolvimento de vegetação na face externa do mesmo (MACCAFERRI AMÉRICA LATINA, 2008a, p. 8). As figuras 11 e 12 apresentam a etapa de construção e o muro de contenção pronto no Colégio Etapa em São Paulo.



Figura 11: aplicação de um muro de solo reforçado *Terramesh® System* (MACCAFERRI AMÉRICA LATINA, 2009a)



Figura 12: após a construção do muro de solo reforçado *Terramesh® System* (MACCAFERRI AMÉRICA LATINA, 2009a)

Este sistema apresentado pela empresa Maccaferri América Latina se aplica muito bem em defesas longitudinais, onde é necessária a contenção de margem, como acontece na situação em estudo. O *Terramesh® System* é composto por um único painel de tela hexagonal de dupla torção com arames revestidos e recobrimento do material plástico (MACCAFERRI AMÉRICA LATINA, 2008b, p. 12). A figura 13 mostra o elemento *Terramesh® System*.

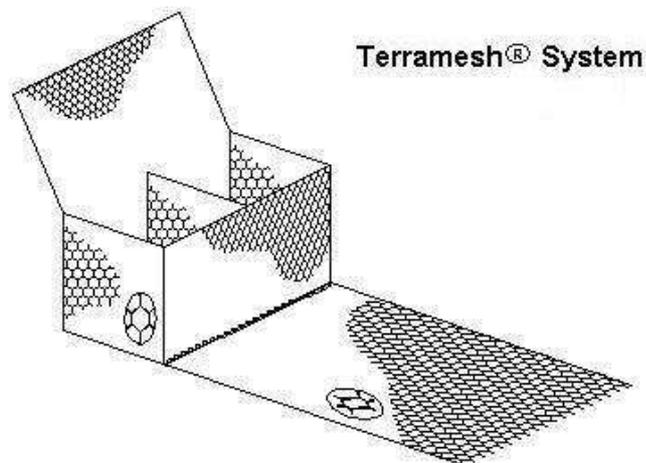


Figura 13: elemento *Terramesh® System* (MACCAFERRI AMÉRICA LATINA, 2009b)

Muros de solo reforçado passaram a ser utilizados em grande escala nos últimos 20 anos e se caracterizam por serem estruturas de contenção com colocação de elementos de reforço no

interior da massa de solo adjacente e são capazes de mobilizar tensões de tração, com isso a massa de solo adjacente é melhorada. Como peculiaridades deste tipo de estrutura podem ser citadas (trabalho não publicado¹⁹):

- a) sistema solo-reforço é essencialmente auto-portante;
- b) faceamento vertical é praticamente livre de empuxos laterais de solo além de servir como proteção contra erosão.

As principais vantagens de solos reforçados quando comparados a outros tipos de estruturas de contenção são (trabalho não publicado²⁰):

- a) baixo custo;
- b) rapidez e simplicidade de execução;
- c) maior tolerância tanto a recalques na fundação como a deslocamentos horizontais do sistema solo/reforço;
- d) apresentam vantagens estéticas e ambientais;
- e) são tecnicamente viáveis para grandes alturas ($H > 25\text{m}$).

Mas ao mesmo tempo esses muros apresentam algumas desvantagens:

- a) o sistema solo/reforço requer a disponibilidade de espaço para a construção atrás do faceamento;
- b) utiliza-se preferencialmente solo granular para compactação;
- c) reforços metálicos estão sujeitos à corrosão e reforços poliméricos estão sujeitos à degradação pela luz ultra-violeta, quando expostos, ou ao ataque químico, quando localizados no interior do solo;
- d) podem apresentar deslocamentos horizontais maiores.

O mecanismo de reforço destes muros consiste na mobilização contínua de tensões de tração ao longo do comprimento de cada reforço devido a ação do peso da massa de solo reforçado junto a eventuais sobrecargas presentes na superfície do terreno. O valor da tensão de tração aumenta desde o faceamento do muro até um ponto intermediário onde esta tensão é máxima,

19 Material de aula cedido pelo professor Adriano Virgílio Damiani Bica na disciplina de Estruturas de Contenção no curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

20 Idem.

seguindo-se uma redução da tensão até a extremidade interna do reforço (trabalho não publicado²¹).

O material usado no aterro dos muros de solo reforçado deve ser de boa qualidade visando sua durabilidade, boa drenagem, facilidade de construção além de adequada interação entre solo e reforço. Após a compactação o material do aterro apresenta atrito elevado e alta resistência ao carregamento lateral direto, como consequência, quanto melhor for a qualidade do aterro mais econômica será a solução, uma vez que a quantidade de material para reforço necessário para satisfazer as condições de projeto será menor (trabalho não publicado²²). Sayão et al. diz que “Os geossintéticos utilizados para reforço de solo devem restringir as deformações e aumentar resistência do maciço.”. O autor ainda afirma que a função do reforço é garantir ao solo uma resistência a tração que o mesmo não possui.

Para analisar a estabilidade de muros de solo reforçado, é necessário estabelecer condições de equilíbrio para qualquer superfície de ruptura por cisalhamento potencial, passando tanto pelo exterior como pelo interior da massa de solo reforçado. A análise de estabilidade deste tipo de muro é realizada em duas etapas, estabilidade interna e externa (trabalho não publicado²³). Segundo Sayão et al. (2004, p. 87), na verificação da estabilidade externa deve ser considerado um comportamento similar a um muro de gravidade, verificando-se a segurança ao tombamento, ao deslizamento ao longo da base do muro, contra tensões verticais excessivas no solo de fundação e à ruptura generalizada do maciço do solo adjacente ao muro.

A estabilidade interna se dá por meio da verificação da segurança contra a ruptura à tração dos reforços e ao arrancamento dos reforços no interior da zona resistente (trabalho não publicado²⁴). A ruptura interna é caracterizada por um processo progressivo, em que os esforços do reforço rompido são transferidos aos adjacentes, desencadeando sucessivos colapsos (SAYÃO et al., 2004, p. 91).

²¹ Material de aula cedido pelo professor Adriano Virgílio Damiani Bica na disciplina de Estruturas de Contenção no curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

²² Idem.

²³ Idem.

²⁴ Idem.

5 LOCAL DE ESTUDO

5.1 HISTÓRICO DO TERRENO

A área em estudo é um aterro viário situado entre o km 108+785 e 108+813 da BR-116/SC. Os dados de campo para descrição e diagnóstico da situação deste trecho foram obtidos através de inspeção de campo, levantamento topográfico e sondagens. Neste trecho a rodovia encontra-se na Serra do Espigão e possui drenagem superficial em sarjeta do lado esquerdo e não possui dispositivos de drenagem do lado direito, onde ocorreu a ruptura. A terraplanagem da rodovia consiste de um trecho em meia-encosta, com corte no lado esquerdo e aterro no lado direito. O corte do lado esquerdo é exclusivamente em solo com matacões, não havendo afloramento de maciço rochoso. O aterro do lado direito é bastante íngreme, com declividade aproximada vertical:horizontal 1:1,5, chegando a desníveis de 25 m sem bancadas no trecho em questão. Ao pé do aterro, constitui-se um talvegue, onde se desenvolve um curso d'água de pequeno porte (trabalho não publicado²⁵).

A ruptura atingiu uma extensão aproximada de 28 m (km108+785 ao km108+813), com comprimento transversal superior a 30 m, desde a rodovia até o talvegue, implicando uma área aproximada de 700 m². A espessura da ruptura é estimada em menos de 2,5 m. O acidente ocorreu dia 19/01/2009, após um período de 9 dias dos quais apenas dois dias não houve ocorrência de chuva. Dois dias antes da ruptura houve uma precipitação de 78 mm em um dia. A figura 14 apresenta a ruptura vista do talvegue em direção à rodovia (de jusante para montante) e a figura 15 apresenta a ruptura numa vista da rodovia para jusante. A cobertura vegetal no local da ruptura praticamente inexistente. O lado direito (sentido Lages) é constituído de vegetação primária de pequeno porte, com espécies de médio porte esparsas. No lado esquerdo (sentido Curitiba) a vegetação é um pouco mais densa, embora também

²⁵ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

claramente de pequeno a médio porte e relativamente jovem, até porque se originou sobre o talude do aterro da estrada, logo, após sua implantação (trabalho não publicado²⁶).



Figura 14: vista geral da ruptura, de jusante para montante (trabalho não publicado²⁷)



Figura 15: vista da ruptura, da rodovia (montante) para jusante (trabalho não publicado²⁸)

²⁶ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

²⁷ Idem

²⁸ Idem

A região da Serra do Espigão, onde se encontra o trecho em estudo, compreende basicamente três unidades geológicas distintas, a Formação Serra Geral, constituída por basaltos, a Formação Pirambóia, constituída por arenitos de granulação fina a média, e a Formação Rio do Rastro do Grupo Passa Dois, composta por arenitos finos e argilitos. Nas condições geomorfológicas da região da Serra os estratos sedimentares acompanham a estruturação do Arco de Ponta Grossa, compondo escarpas íngremes contínuas, sustentadas por derrames básicos da Formação Serra Geral. As unidades geológicas da região estão apresentadas na figura 16 (trabalho não publicado²⁹).

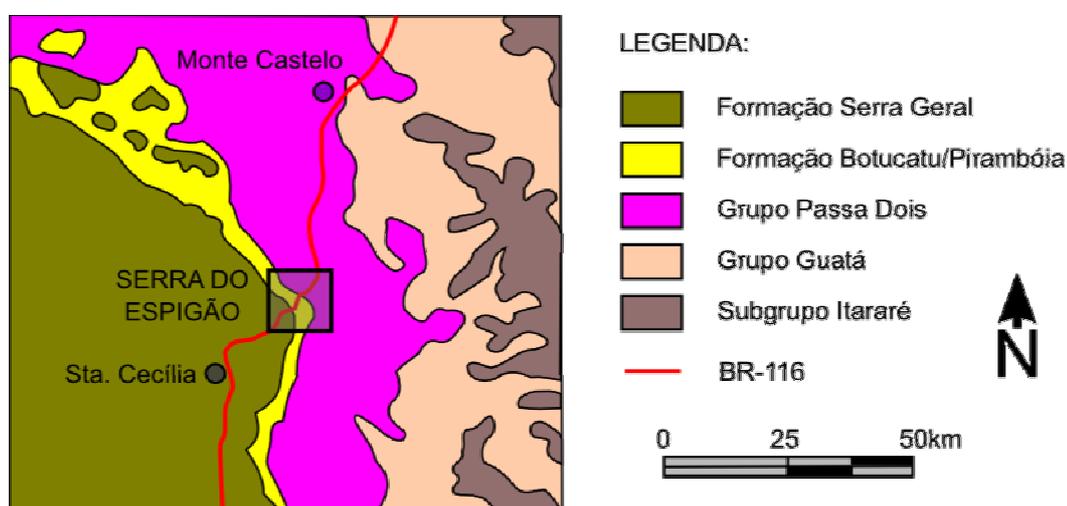


Figura16: unidades geológicas presentes na região da Serra do Espigão (trabalho não publicado³⁰)

A fim de melhor caracterizar geologicamente a área da ruptura, foram realizados três furos de sondagem mista. As sondagens indicaram claramente que o aterro viário possui grande espessura, embora envolvendo camadas com diferentes materiais. As sondagens foram paralisadas antes de atingir o maciço rochoso, tendo se desenvolvido tão somente até o necessário para o diagnóstico da ruptura e para o projeto de estabilização do talude. O perfil

²⁹ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

³⁰ Idem

geológico-geotécnico obtido das sondagens e das observações de campo é apresentado na figura 17 (trabalho não publicado³¹).

³¹ Idem

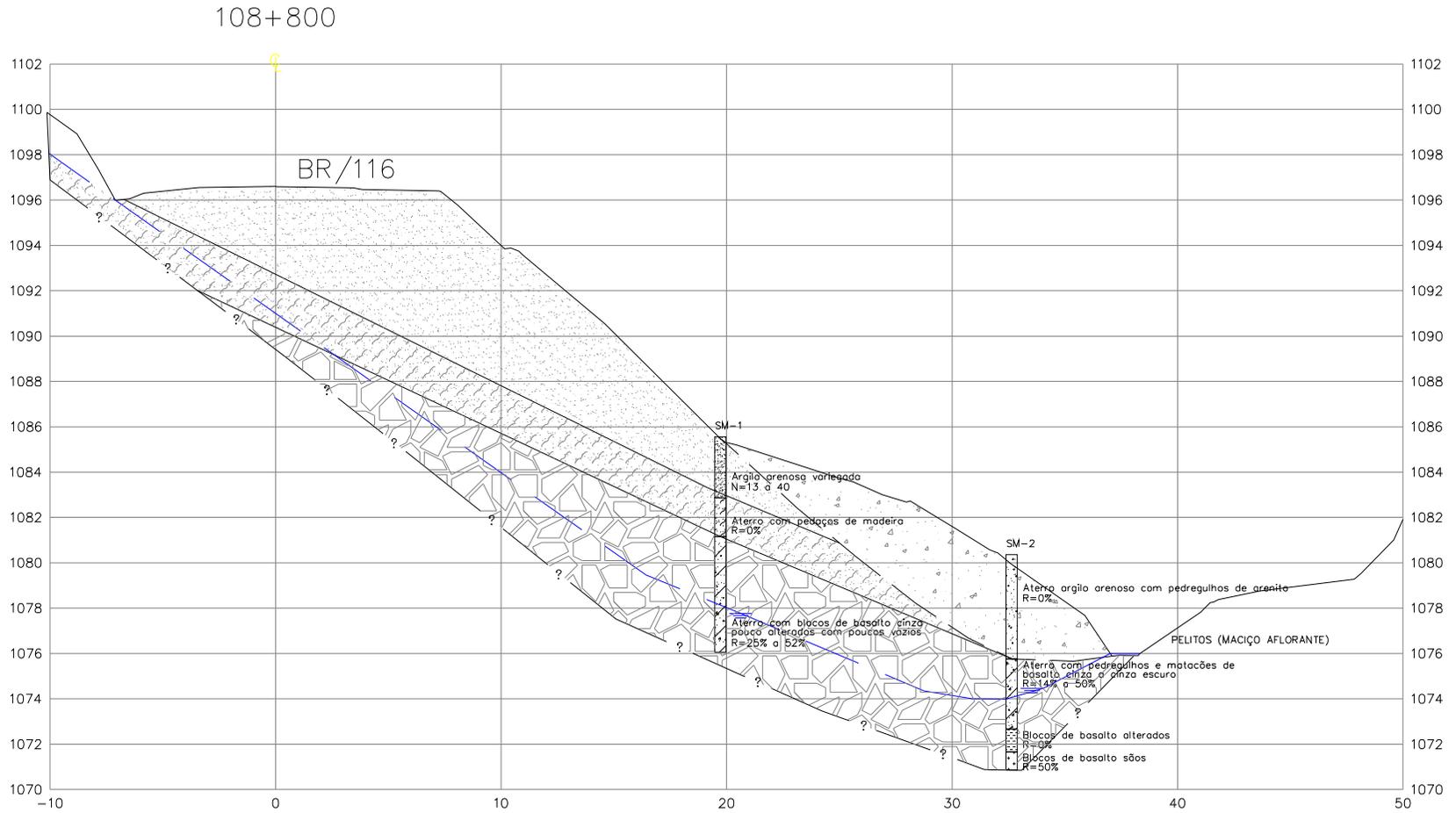


Figura 17: perfil geológico-geotécnico do terreno (trabalho não publicado³²)

32 Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

A instabilidade ocorrida pode ser caracterizada como uma ruptura rasa em aterro. A origem desta ruptura está claramente associada a pluviosidades intensas e problemas associados à drenagem superficial. O efeito de erosão de pé provocado pelo fluxo intenso de água na base do aterro é evidente, mas pode ser confirmado pelo despreendimento de blocos do maciço rochoso no leito do arroio aproximadamente no km 108+790. Outro fato que implicou em um fluxo d'água superficial intenso sobre o talude foi a ruptura do talude de corte aproximadamente no km 108+860, que acabou bloqueando a sarjeta e fazendo com que a água conduzida por esta invadisse a pista, vindo a galgá-la por completo aproximadamente no km 108+810, o qual coincide com o início da ruptura em estudo (trabalho não publicado³³).

A chuva em si também contribuiu com o umedecimento do corpo do aterro, reduzindo a resistência dos seus materiais. Há que se ressaltar que a instabilidade acabou por depositar material rompido junto à base do aterro, ou seja, atualmente (após a ruptura) a parte superior do talude é composta por material original do aterro viário e a parte inferior é composta por material depositado pela própria ruptura, inconsolidado e com alto potencial erosivo e alto risco para novas rupturas (trabalho não publicado³⁴).

5.2 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROJETO

Os parâmetros de projeto do terreno em estudo foram obtidos através de retro análise de estabilidade, com base na seção transversal do km 108+900. O perfil geotécnico da seção foi obtido através de sondagens, conforme descrito anteriormente. A conformação geométrica foi estabelecida por reconstituição do talude original tendo como base as declividades dos taludes adjacentes à área da ruptura (trabalho não publicado³⁵).

Para análise quanto à presença d'água, foi considerado o coeficiente de poro-pressão (r_u), o qual corresponde à taxa de poro-pressão sobre a tensão vertical no solo. Foi estimado um $r_u=0,2$ nos três metros superficiais do talude onde ocorreu uma infiltração maior e um $r_u=0,1$ nos materiais inferiores. No pé do aterro considerou-se um nível d'água condizente com a

³³ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

³⁴ Idem

³⁵ Idem

presença do curso d'água. Foi utilizado o programa Slope/W e o método de equilíbrio limite último de Spencer. O resultado gráfico da retroanálise, com os parâmetros obtidos para cada material envolvido é apresentado na figura 18 (trabalho não publicado³⁶).

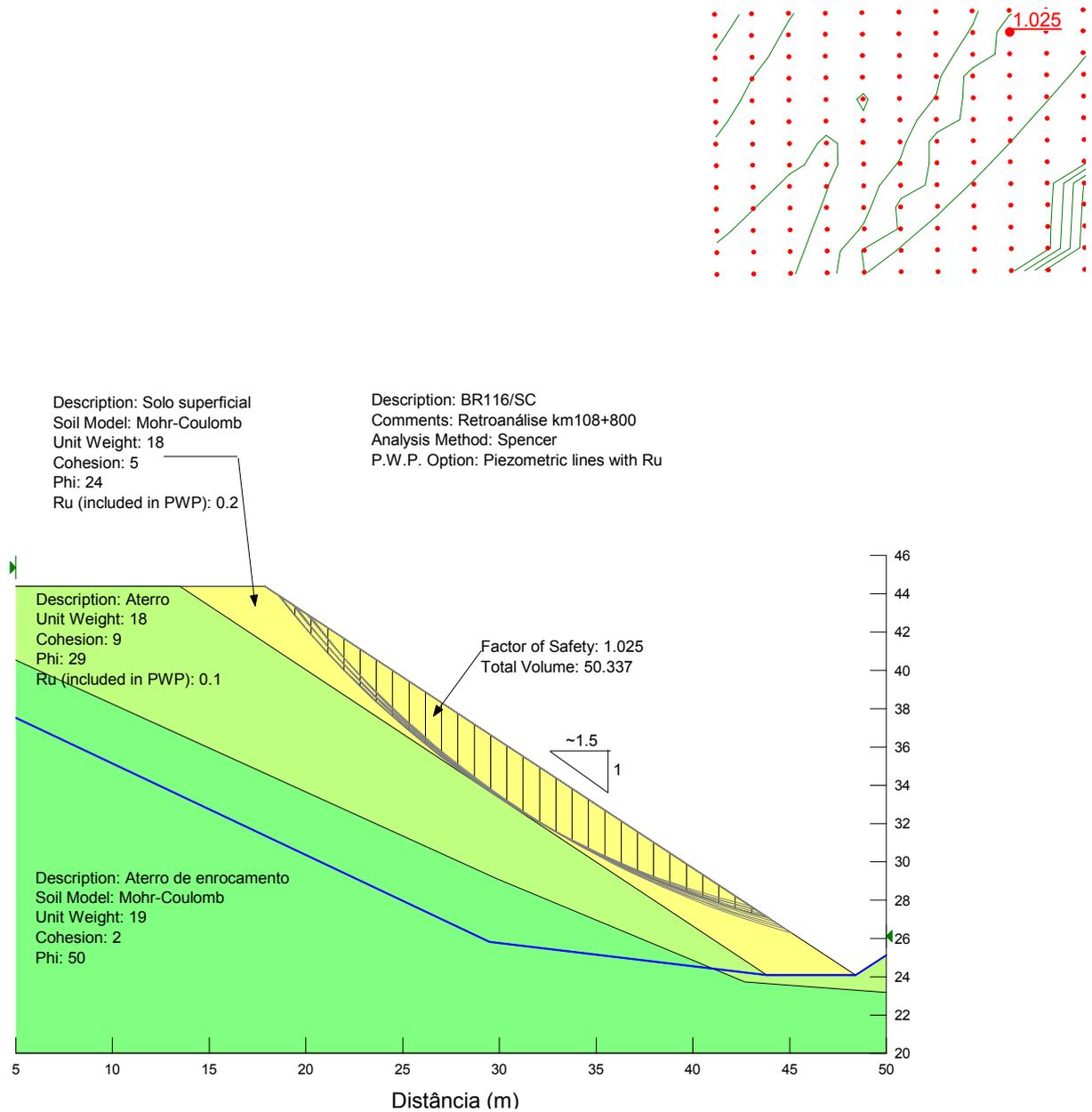


Figura 18: retro análise da ruptura do km108+900 (trabalho não publicado³⁷)

³⁶ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

³⁷ Idem

Os parâmetros geotécnicos do aterro de enrocamento foram adotados a partir de valores típicos para tal material, já os parâmetros dos solos de aterro foram obtidos pela retroanálise, ou seja, variando-os até que se atingisse um fator de segurança (FS) igual à 1,0, o que significa que as forças estabilizantes são iguais às forças instabilizantes. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos são apresentados no quadro 4 (trabalho não publicado³⁸).

Material	γ_{nat} (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)
Solo superficial	18	5	24
Aterro (solo)	18	9	29
Aterro (enrocamento)	19	2	50

Quadro 4: parâmetros de resistência ao cisalhamento (trabalho não publicado³⁹)

³⁸ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

³⁹ Idem

6 SOLUÇÃO TRADICIONAL

6.1 CONCEPÇÃO DA SOLUÇÃO

Para concepção da solução de estabilidade de taludes foram analisadas diversas situações até se obter um $FS \geq 1,30$, valor sugerido pela NBR 11682 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009). Na situação em estudo, foi necessária atenção especial ao material que seria colocado no pé do aterro, o qual sofre constante processo erosivo devido ao curso de água de um córrego que passa por ali (trabalho não publicado⁴⁰).

Uma grande dificuldade para o desenvolvimento da solução foi o grande desnível do talude do aterro, que em determinados pontos chegava a 25 m de altura, e o afastamento da pista até o córrego era de no máximo 30 m. A figura 19 mostra a topografia do terreno (trabalho não publicado⁴¹).

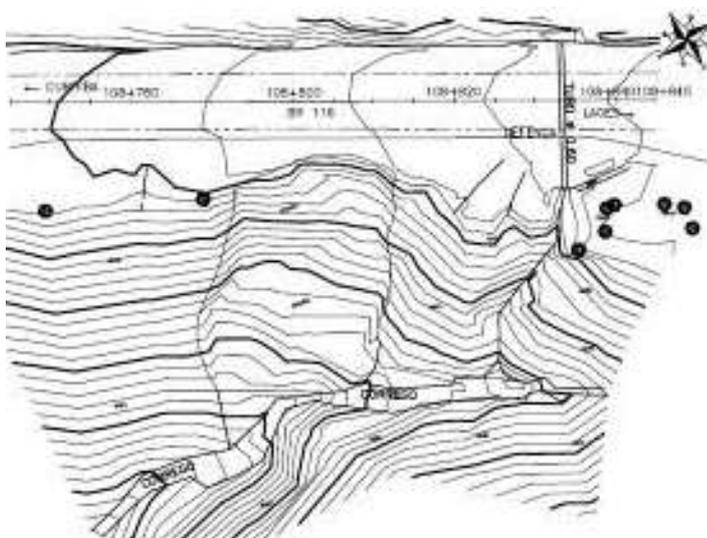


Figura 19: planta baixa da área em estudo (trabalho não publicado⁴²)

⁴⁰ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

⁴¹ Idem

⁴² Idem

Devido a este desnível o fator de segurança para estabilidade do talude conforme exigido em norma ($FS \geq 1,3$) foi obtido apenas com um aterro de enrocamento com inclinação 1:1,6 (vertical:horizontal). Esta situação exigiu a verticalização do pé do aterro a fim de garantir a geometria atual do curso de água. A preservação do curso de água assim como a proteção do pé do talude aos processos erosivos se deu através de um muro Terramesh® System, o qual consiste em um sistema de solo reforçado com tela metálica e faceamento em gabiões (trabalho não publicado⁴³).

Soluções em enrocamento de grandes dimensões foram ponderadas, mas descartadas por exigirem talude menos íngremes, dificultando a verticalização do aterro, e pela dificuldade do transporte dos blocos até a base do aterro. Ainda foi prevista a substituição do material atrás do Terramesh® System por enrocamento e complementação do reforço na base do muro com geogrelha T=150kN/m, tais soluções foram adotadas a fim de atingir os níveis de segurança exigidos sem aumentar o comprimento dos reforços. A seguir a figura 20 apresenta uma seção tipo da solução tradicional adotada (trabalho não publicado⁴⁴).

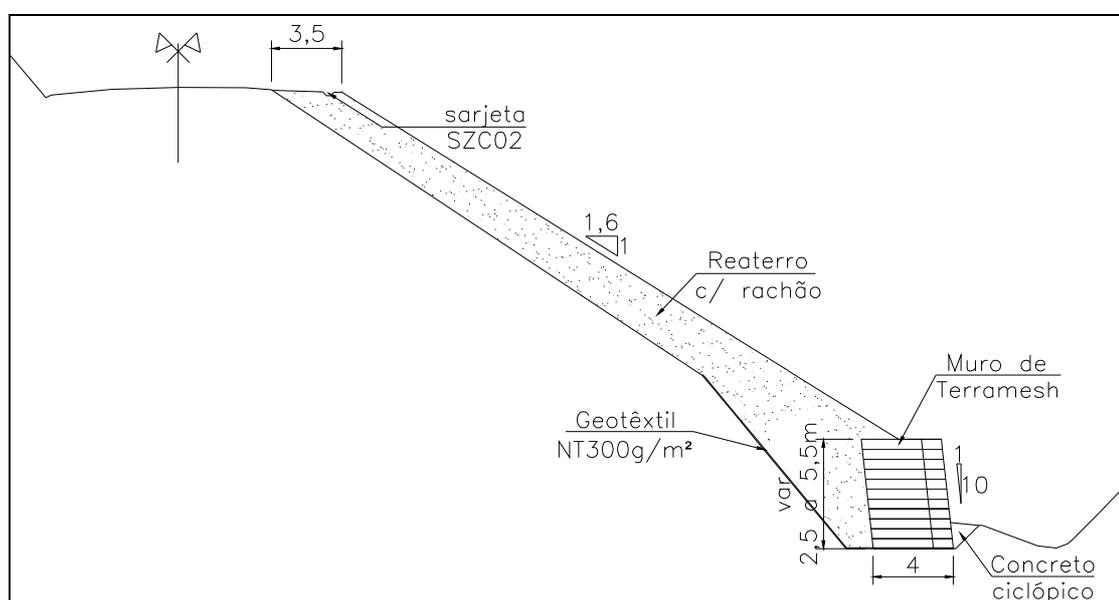


Figura 20 seção tipo da solução tradicional adotada (trabalho não publicado⁴⁵)

⁴³ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

⁴⁴ Idem.

⁴⁵ Idem.

As condições de acesso à base do talude levaram à necessidade de execução de um caminho de serviço para que acontecesse a aproximação de caminhões para a retirada de material escavado e para descarregar material para o reaterro. No entanto, a fim de minimizar a subtração de vegetação nos taludes adjacentes e respeitando uma rampa vertical máxima de 17%, o acesso não atingiu a cota desejada, ficando 18,5m acima da cota da base da solução. Para solucionar esta diferença de cota foi necessário prever dois tombos com escavadeiras hidráulicas de braço estendido em pontos a partir do ponto mais baixo do acesso (trabalho não publicado⁴⁶).

Um problema enfrentado no projeto desta solução foi o fluxo de água constante. Mas o volume e a velocidade do rio não são tão grandes a ponto de impedir a permanência de operários no local. Como os materiais de enchimento e reaterro são pétreos foi possível projetar considerando a presença de água, uma vez que esta não levaria o material embora. Ainda assim foram previstos tubos de PVC para canalizar a água, minimizando assim a interferência da mesma durante a execução (trabalho não publicado⁴⁷).

Foram previstas duas etapas para a construção da base do muro a fim de evitar o desconfinamento de grandes áreas do talude e permitir um aumento nos fatores de segurança durante a execução da obra. A primeira etapa consiste na escavação e construção do muro de contenção dos primeiros 15 metros lineares e a etapa seguinte consiste na escavação do restante da base da contenção assim como a execução do restante muro. Devido às condições adversas de declividade do terreno alguns cuidados importantes devem ser tomados durante a construção da estrutura de contenção, tais como realização da escavação da base do muro somente em condições climáticas secas, sem presença de água e controle da sobrecarga provocada pelo maquinário no caminho de acesso (trabalho não publicado⁴⁸).

O reaterro foi todo previsto em enrocamento para viabilizar sua rápida compactação com passagem das escavadeiras auxiliada por um rolo liso de pequeno porte. Deve-se apenas ter cuidado especial na compactação do reaterro no metro mais próximo ao faceamento do solo reforçado, o qual deve ser executado com equipamentos manuais, para evitar danos e deformações do faceamento. Ainda ressalta-se que o enchimento na frente do muro de solo

⁴⁶ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

⁴⁷ Idem

⁴⁸ Idem

reforçado é previsto em concreto ciclópico, uma vez que um reaterro exclusivamente em material pétreo seria facilmente levado pela correnteza do curso d'água, a menos que contemplasse blocos métricos, o que é executivamente inviável neste caso. As etapas construtivas são (trabalho não publicado⁴⁹):

- a) sinalização;
- b) limpeza, desmatamento e destocamento de vegetação;
- c) execução do caminho de serviço;
- d) escavação para primeira etapa de construção do muro;
- e) execução de 15 m de extensão do muro tipo Terramesh® System;
- f) escavação para a segunda etapa de construção do muro;
- g) execução do restante do muro;
- h) execução do aterro de enrocamento;
- i) execução da drenagem superficial.

6.2 MEMÓRIA DE CÁLCULO

O dimensionamento desta solução se deu em duas etapas (trabalho não publicado⁵⁰):

- b) dimensionamento da solução de estabilização;
- c) análise de estabilidade da fase crítica da sequência executiva.

6.2.1 Dimensionamento da solução de estabilização

O dimensionamento da solução tradicional foi realizado com auxílio do *software* Slope/W utilizando o método de Morgenstern-Price. Os parâmetros geotécnicos dos materiais do aterro local adotados foram aqueles obtidos na retroanálise e os parâmetros do material de preenchimento do Terramesh, bem como do reaterro de enrocamento foram baseados em valores típicos para aterro rochoso de basalto. Quanto à presença de água foi considerado um

⁴⁹ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

⁵⁰ Idem

$r_u=0,1$ no aterro e nos demais solos sob influência de um nível d'água condicionado pela presença do curso de água na base do aterro (trabalho não publicado⁵¹).

O dimensionamento da solução tradicional consistiu na variação da altura e da base do muro, da espessura do reaterro atrás do solo reforçado e da inclinação do reaterro de enrocamento acima do muro de solo reforçado. Os resultados são apresentados abaixo, seguidos da representação gráfica do mesmo através da figura 21.

- a) altura do solo reforçado: $h_{m\acute{a}x}=5,5m$;
- b) base do solo reforçado: $b=4m$;
- c) espessura do reaterro: $e_{m\acute{a}x}=2m$;
- d) inclinação do reaterro: 1:1,6 (V:H).

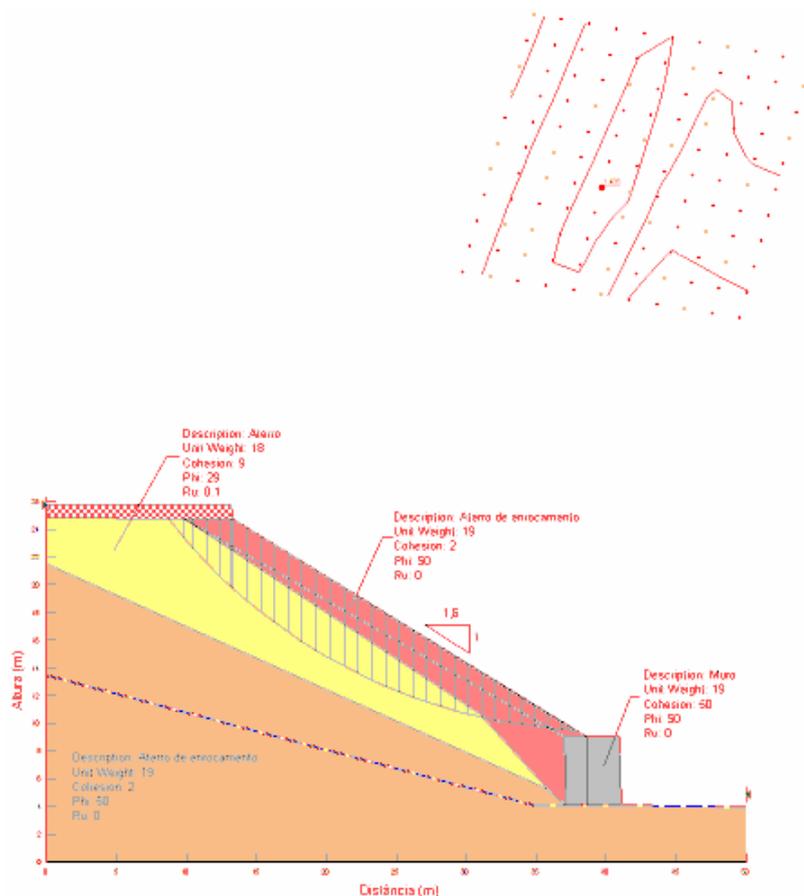


Figura 21: análise da estabilidade do km 108+800: FS=1,485 (trabalho não publicado⁵²)

⁵¹ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

⁵² Idem

6.2.2 Análise de estabilidade da fase crítica da sequência executiva

A análise de estabilidade foi realizada tendo como base a seção transversal do km108+800, a qual representa a seção mais desfavorável. A fase crítica da sequência executiva da obra é a escavação da base do muro de contenção, devido ao desconfinamento do pé do talude. Foram analisadas duas situações: durante períodos chuvosos, com a obra interditada e durante períodos secos, sem chuva e sem água nos taludes, considerando sobrecargas de maquinários no caminho de acesso. O perfil geotécnico da seção foi obtido através de sondagens e a geometria foi obtida através das seções transversais topográficas. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento empregados são iguais aos da retroanálise (trabalho não publicado⁵³).

As análises foram feitas utilizando o *software* Slope/W e o método de equilíbrio limite último de Spencer. O fator de segurança mínimo utilizado nas análises da sequência executiva da obra foram de 1,15, conforme exigência da NBR 11682 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) para o caso de canteiros de obras e taludes rodoviários com planos executivos bem definidos. Na análise para períodos com chuva, com a obra obrigatoriamente interditada, foi considerada presença d'água através de um coeficiente $r_u=0,1$ nos três metros superficiais do talude e um $r_u=0,05$ nos materiais inferiores. Estes valores são inferiores aos empregados na retroanálise, já que estes últimos representam uma condição excepcional de saturação do talude, devido à grande pluviosidade quando da ocorrência da ruptura. A probabilidade de recorrência desta intensa pluviosidade, durante a execução da obra, é remota, justificando a adoção de coeficientes r_u menores. Também foi aplicada uma carga distribuída na parte superior do talude, que representa a sobrecarga de um trem tipo de 30tf na pista da rodovia (trabalho não publicado⁵⁴).

Conforme especificado no item 6.1, a escavação da base do muro será executada em duas etapas, evitando o descofinamento lateral da massa de solo. Por este motivo, a ação do confinamento foi considerada através de uma análise tridimensional já que as análises realizadas no *software* Slope/W representam condições bidimensionais. O resultado gráfico da análise bidimensional é apresentado na figura 22, com o respectivo $FS_{\text{tridimensional}}$ (trabalho não publicado⁵⁵).

⁵³ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

⁵⁴ Idem

⁵⁵ Idem

Nas análises para períodos sem chuva não foi considerada a presença de nível d'água. No caminho de acesso foi considerada uma sobrecarga de 12kN/m², que representa a pressão exercida por um caminhão basculante carregado, com PBT=22tf (peso bruto total de 22tf distribuído numa área de 18m²). O resultado gráfico da análise é apresentado na figura 23 (trabalho não publicado⁵⁶).

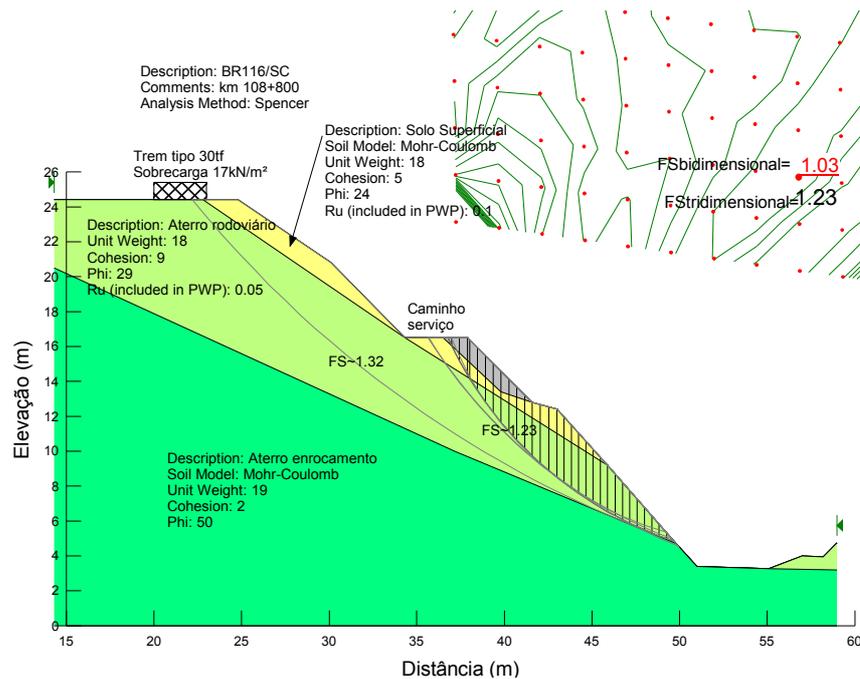


Figura 22: análise de estabilidade durante evento pluviométrico. Superfície crítica do caminho de serviço: $FS_{\text{tridimensional}}=1.23$ e superfície crítica da rodovia: $FS_{\text{tridimensional}}=1.32$ (trabalho não publicado⁵⁷)

⁵⁶ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

⁵⁷ Idem

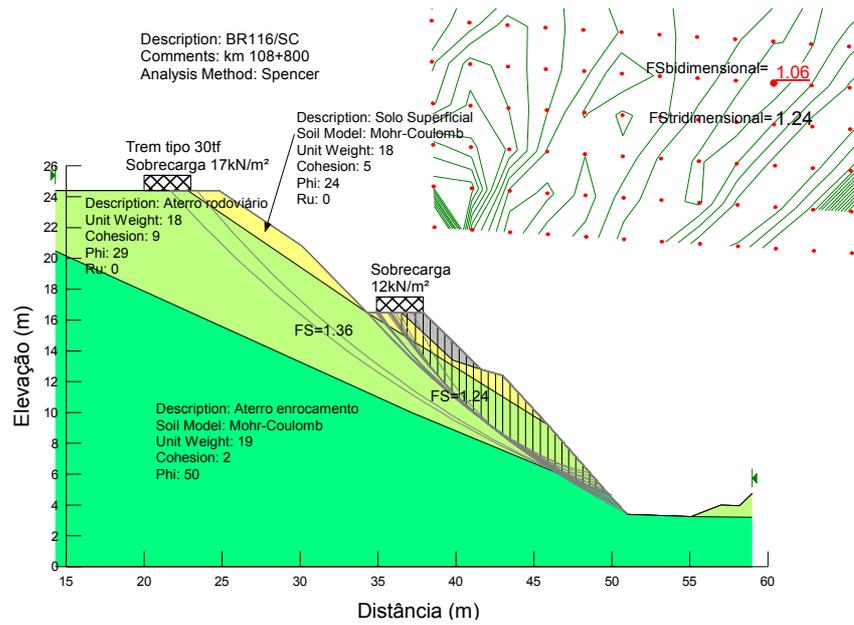


Figura 23: análise de estabilidade com sobrecarga no caminho de serviço. Superfície crítica do caminho de serviço: $FS_{\text{tridimensional}}=1.24$ e superfície crítica da rodovia: $FS_{\text{tridimensional}}=1.36$ (trabalho não publicado⁵⁸)

⁵⁸ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

7 SOLUÇÃO DE BIOENGENHARIA DE SOLOS

7.1 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE ANÁLISE UTILIZADOS

Para concepção da solução de bioengenharia de solos o objetivo foi tornar o talude mais íngreme, devido à presença de raízes e possibilitando assim diminuição do muro na base deste talude. Foi necessário então determinar como as raízes influenciariam no solo. Foram utilizadas duas teorias para análise da influência da cobertura vegetal no talude, segundo Styczen e Morgan (1995) e Prandini et al. (1976). O muro de contenção será mantido em Terramesh® System devido à força do curso d'água, sendo apenas a sua altura alterada sob influencia da declividade do talude.

Os parâmetros dos solos presentes nas análises das soluções de bioengenharia, assim como os cuidados a serem tomados no terreno devido a presença do nível d'água, a inclinação acentuada e o processo executivo são os mesmos adotados na concepção da solução tradicional.

7.1.1 Análise pelo método de Styczen e Morgan (1995)

As raízes reagem com o solo produzindo um material compósito e agindo como fibras com uma resistência a tração relativamente alta e uma aderência incorporada a uma parcela de resistência a tração mais baixa. Estudos indicam que as raízes mais finas, com diâmetro entre 1 e 20 mm são as que mais contribuem para reforçar o solo. Gramíneas, leguminosas e pequenos arbustos podem ter efeito bem significativo a profundidades entre 0,75 e 1,50 m. Árvores podem ter efeitos mais profundos, melhorando a resistência do solo a 3 m de profundidade ou mais dependendo da morfologia das espécies (STYCZEN; MORGAN, 1995, p.35). Os autores ainda afirmam que o aumento da resistência ao cisalhamento do solo leva ao aumento na coesão devido a ação de ligação do material compósito fibra/solo em consequência da adesão das partículas de solo nas raízes.

É comum adotar que as raízes não influenciam no ângulo de atrito do solo, não existe um padrão para relação entre as raízes e a coesão do solo. Tengbeh (1989, p. 120-121) através de experimentos com a gramínea da espécie *Lolium perenne* chegou a conclusão de que a coesão do solo era em função da densidade das raízes, o que resultou em uma equação exponencial para solos arenosos e outra para solos argilosos, as equações são apresentadas abaixo.

Para solos arenosos:

$$c = 10,54 + 8,63 \cdot \log RD \quad (\text{equação 2})$$

Para solos argilosos:

$$c = 11,14 + 9,9 \cdot \log RD \quad (\text{equação 3})$$

Onde:

c é a coesão do solo devido a influência das raízes (kPa);

RD é a densidade das raízes (Mg/m^3).

O solo em estudo é um solo arenoso, logo foi utilizada a equação 2. O primeiro passo foi analisar o talude sem o acréscimo de coesão, para três diferentes declividades (1:1,40, 1:1,50 e 1:1,60), a fim de determinar um fator de segurança inicial. Os materiais utilizados nesta análise foram aqueles encontrados nas sondagens e os parâmetros destes materiais estão descritos no quadro 5. As análises apresentadas através das figuras 24 a 26 foram realizadas no *software* Slope/W utilizando o método Morgenstern-Price, o qual admite o equilíbrio dos momentos e das forças horizontais e verticais.

Material	γ_{nat} (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)
Aterro (solo)	18	9	29
Aterro (enrocamento)	19	2	50

Quadro 5: parâmetros geotécnicos no material utilizado nas análises das figuras 24 a

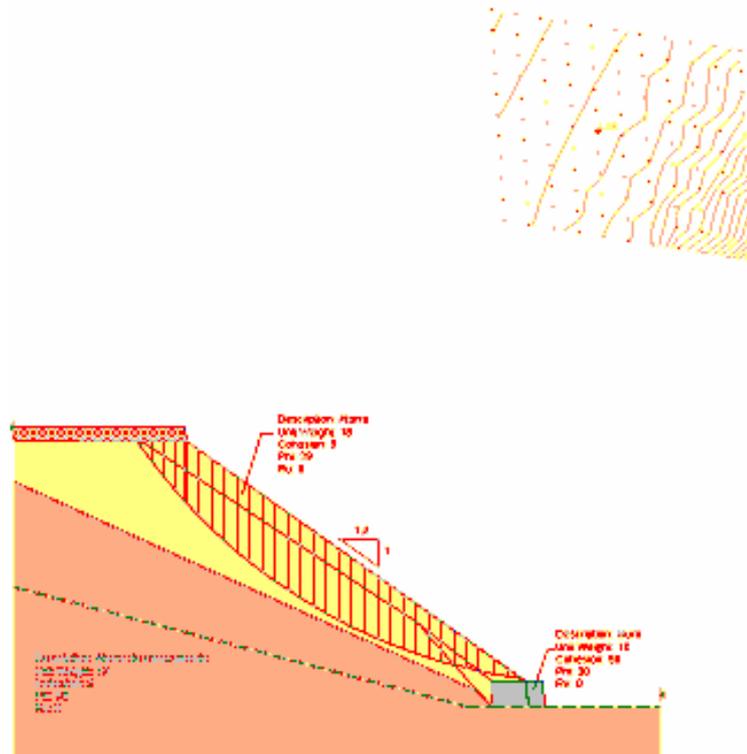


Figura 24: análise de estabilidade do talude com inclinação 1:1,40 e muro com $h=2$ m, sendo $FS=1,180$

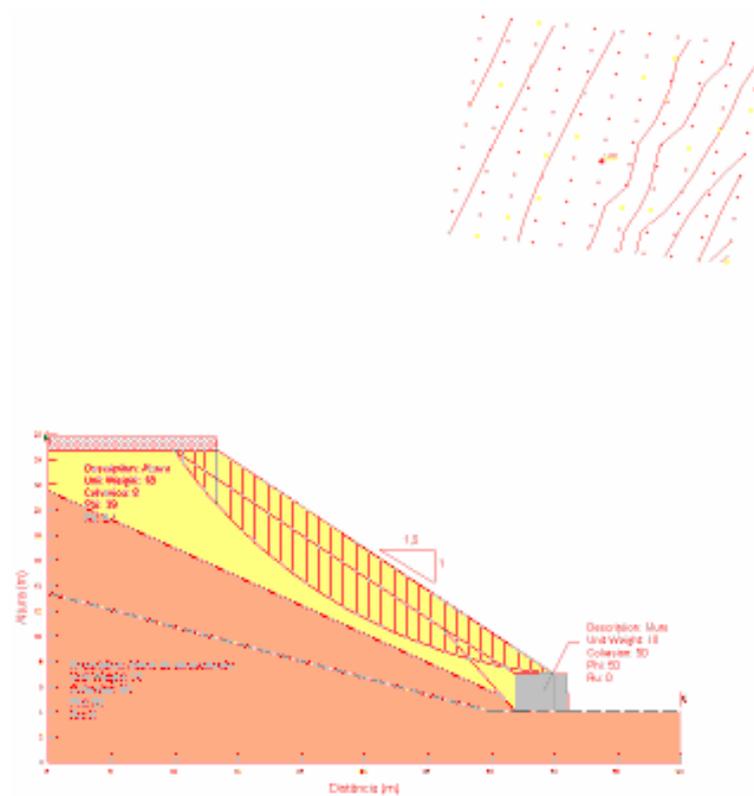


Figura 25: análise de estabilidade do talude com inclinação 1:1,50 e muro com $h=3$ m, sendo $FS=1,252$

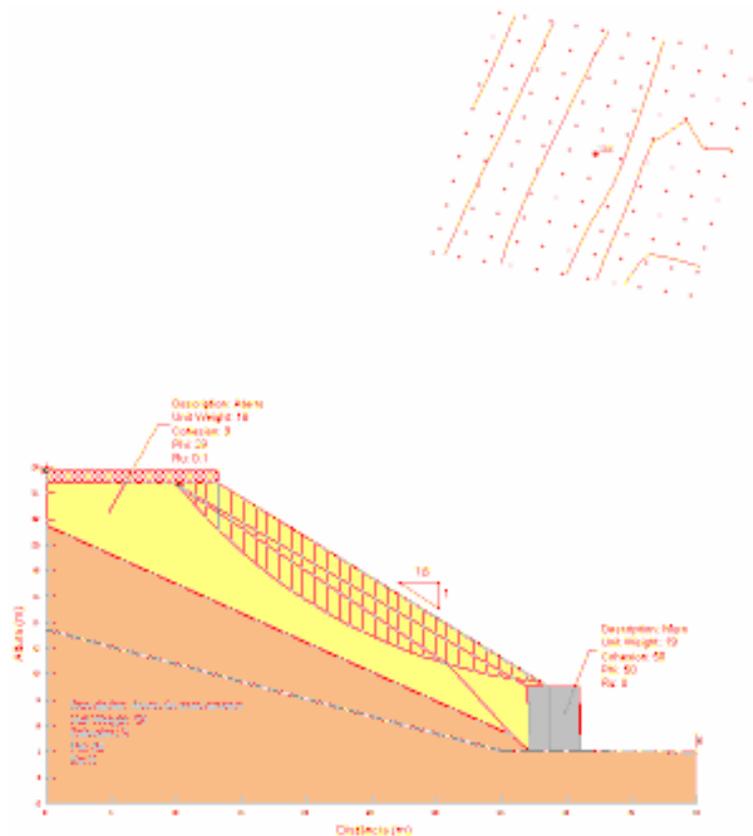


Figura 26: análise de estabilidade do talude com inclinação 1:1,60 e muro com $h=5$ m, sendo $FS=1,356$

O próximo passo foi selecionar três espécies vegetais para análise de estabilidade, as espécies selecionadas foram *Vetiveria zizanoides* (Vetiver) cuja biomassa é 40 t/ha, *Panicum maximum* (Capim Vencedor) com biomassa de 50t/ha e *Sorghum bicolor* (Sorgo Forrageiro) a qual possui biomassa igual a 80t/ha. Cada espécie foi analisada nos taludes com inclinações 1:1,60, 1:1,50 e 1:1,40, sendo utilizadas três profundidades para influência da camada vegetal, 0,50 m, 1,0 m e 1,50 m, sendo esta última profundidade a indicada como máxima para consideração ação das raízes, conforme citado no item 3.1.2.

O solo utilizado na camada de recobrimento vegetal foi o material do aterro escavado para construção do muro, possuindo coesão inicial de 9 kPa. Os resultados de acréscimo de coesão, assim como os fatores de segurança resultantes do incremento de coesão nas três diferentes declividades de talude estão apresentados nos quadros 7 a 10. A densidade das raízes se deu em função da biomassa da espécie e da profundidade das raízes, e estão apresentadas no quadro 6.

Biomassa (t/ha) \ Z _R (m)	0,5	1,0	1,50
40	8	4	2,67
50	10	5	3,33
80	16	8	5,33

Quadro 6: densidade das raízes (t/m³) em função da biomassa das raízes e da profundidade de solo influenciada por elas.

Biomassa (t/ha) \ Z _R (m)	0,5	1,0	1,50
40	18,33	15,74	14,22
50	19,17	16,57	15,05
80	20,93	18,33	16,81

Quadro 7: incremento de coesão (kPa) em função da biomassa das raízes e da profundidade de solo influenciada por elas.

Biomassa (t/ha) \ Z _R (m)	0,5	1,0	1,50
40	1,200	1,212	1,224
50	1,201	1,214	1,219
80	1,203	1,219	1,232

Quadro 8: fatores de segurança relacionando a profundidade da ação das raízes e a biomassa de cada espécie para a inclinação 1:1,40.

Biomassa (t/ha) \ Z _R (m)	0,5	1,0	1,50
40	1,283	1,289	1,306
50	1,281	1,294	1,309
80	1,281	1,295	1,312

Quadro 9: fatores de segurança relacionando a profundidade da ação das raízes e a biomassa de cada espécie para a inclinação 1:1,50.

Z _R (m) Biomassa (t/ha)	0,5	1,0	1,50
40	1,370	1,390	1,405
50	1,380	1,387	1,410
80	1,381	1,392	1,414

Quadro 10: fatores de segurança relacionando a profundidade da ação das raízes e a biomassa de cada espécie para a inclinação 1:1,60.

7.1.2 Análise pelo método de Prandini et al. (1976)

Prandini et al. (1976, p. 8) afirmam que eventos de escorregamento estariam relacionados com o desmatamento e a queima da vegetação, o que gera a destruição do sistema radicular das matas das encostas, desagregando blocos de rocha de solos superficiais que estavam unidos devido a ação das raízes. Os autores assemelham o sistema de raízes com uma malha de tecido lenhoso, que não só amarra os blocos como estrutura solos coluvionais, retardando o processo de infiltração devido precipitações e preenchendo os vazios entre os blocos de rocha.

Endo e Tsuruta⁵⁹ (1969, apud PRANDINI et al., 1976, p. 9) através de ensaios de cisalhamento in situ com blocos moldados em solo contendo raízes vivas determinaram o efeito das raízes no solo. Estes ensaios mostraram um incremento de resistência relacionado com a densidade das raízes existentes, segundo os autores “O aumento de resistência é atribuído a um aumento de coesão aparente do solo. O ângulo de atrito interno não resultou sensivelmente afetado nos ensaios realizados.”. O resultado obtido pelos autores está apresentado na figura 27.

⁵⁹ Endo, T.; Tsuruta T. The effect of tree roots upon the shearing strength of soil. Annual report of the Hokkaido Branch, Tokyo Forest Experiment Station, v. 18. 1969.

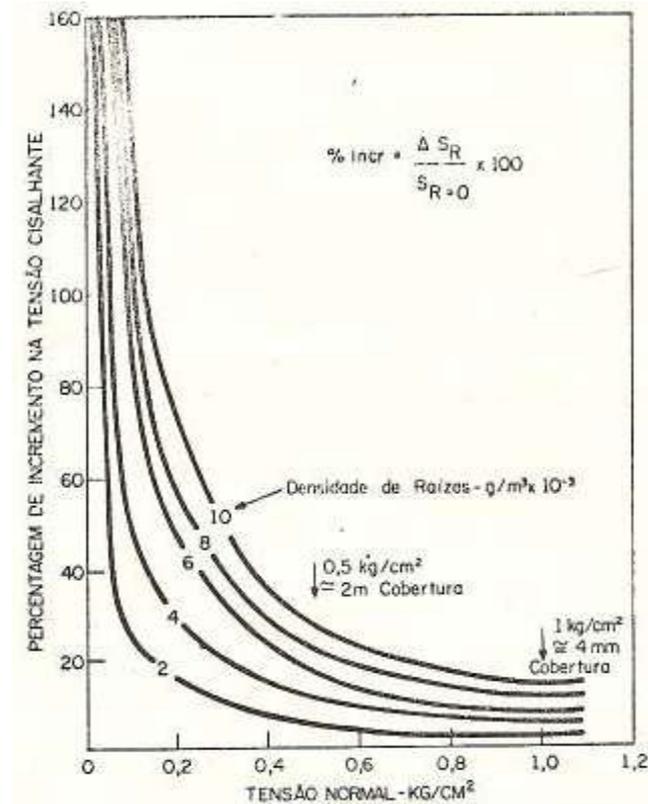


Figura 27: incremento da tensão cisalhante x tensão normal (ENDO; TSURUTA⁶⁰, 1969 apud PRANDINI et al., 1976, p. 9)

São observados elevados aumentos percentuais de resistência ao cisalhamento para baixos valores de tensão normal. Para análise desta solução, segundo as orientações do autor, de que o acréscimo de tensão cisalhante se dá devido ao aumento de coesão do solo, este incremento de tensão foi calculado em termos de coesão e então foram analisados os novos fatores de segurança. As equações 4 e 5 definem a tensão cisalhante e a tensão normal.

$$\sigma = \gamma \cdot z_R \quad (\text{equação 4})$$

Onde:

σ é a tensão normal (kN/m^2);

γ é o peso específico do solo (kN/m^3);

z_R é a profundidade das raízes (m).

⁶⁰ Endo, T.; Tsuruta T. The effect of tree roots upon the shearing strength of soil. Annual report of the Hokkaido Branch, Tokyo Forest Experiment Station, v. 18. 1969.

$$s = c + \sigma \cdot \tan \phi \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

s é a tensão cisalhante (kN/m²);

c é a coesão do solo (kN/m²);

σ é a tensão normal (kN/m²);

ϕ é o ângulo da atrito interno.

As tensões normais em função da espessura da camada da cobertura vegetal, para profundidades de 0,5, 1,0 e 1,5m e $\gamma=18\text{kN/m}^3$ são apresentadas no quadro 11.

z (m)	σ (kgf/cm ²)
0,5	0,09
1,0	0,18
1,5	0,27

Quadro 11: tensão normal em função da profundidade da camada de cobertura vegetal.

Para cada nível de tensão normal buscou-se no gráfico o incremento da tensão cisalhante correspondente para cada espécie e este valor foi transformado em coesão através da equação 5, as espécies analisadas foram as mesmas apresentadas no item 7.1. Os resultados dos acréscimos de tensão cisalhante, assim como os fatores de segurança obtidos nas três inclinações de talude propostas na análise do item anterior estão apresentados nos quadros 12 a 15. A uma profundidade de 0,5 m para o Sorgo Forrageiro a densidade é maior do que aquelas estudadas por Prandini et al. (1995), não sendo possível analisar esta combinação de vegetação e profundidade por este método.

Biomassa (t/ha) \ Z _R (m)	0,5	1,0	1,50
40	22	15,64	12,83
50	25,08	16,59	13,79
80	-	20,38	16,67

Quadro 12: coesão (kPa) em função da biomassa das raízes e da profundidade de solo influenciada por elas.

Biomassa (t/ha) \ Z _R (m)	0,5	1,0	1,50
40	1,193	1,192	1,190
50	1,198	1,197	1,193
80	-	1,205	1,206

Quadro 13: fatores de segurança relacionando o incremento de coesão e a espécie vegetal para taludes com inclinação 1:1,4.

Biomassa (t/ha) \ Z _R (m)	0,5	1,0	1,50
40	1,277	1,271	1,270
50	1,278	1,273	1,273
80	-	1,280	1,279

Quadro 14: fatores de segurança relacionando o incremento de coesão e a espécie vegetal para taludes com inclinação 1:1,5.

Biomassa (t/ha) \ Z _R (m)	0,5	1,0	1,50
40	1,368	1,369	1,364
50	1,376	1,367	1,368
80	-	1,377	1,380

Quadro 15: fatores de segurança relacionando o incremento de coesão e a espécie vegetal para taludes com inclinação 1:1,6.

7.2 CONCEPÇÃO DA SOLUÇÃO

Com base nos resultados obtidos nas análises de acréscimo no fator de segurança devido ao ganho de coesão do solo em consequência da camada de cobertura vegetal se pode afirmar que a influência das raízes foi insuficiente para alterar a declividade do talude, pois para inclinações menores o fator de segurança foi menor que 1,3, indo, desta maneira, contra a NBR 11682 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) que indica $FS \geq 1,3$. Como não houve alteração na declividade do muro a altura permaneceu a mesma do projeto da solução tradicional.

Nos resultados apresentados pela solução de Styczen e Morgan (1995), na inclinação para 1:1,50 com comprimento de raízes de 1,50 m o fator de segurança foi maior que 1,3, mas até que as raízes atinjam este comprimento seria necessário um período de tempo no qual o a segurança do talude estaria comprometida, o que torna esta solução inviável. A solução de bioengenharia de solos tecnicamente viável, atendendo às exigências da NBR 11682 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) foi aquela apresentada na figura 28, a qual mantém a inclinação 1:1,60 e coloca-se apenas uma camada superficial de 0,5 m de solo com cobertura vegetal, sendo que as outras profundidades analisadas indicam o desenvolvimento da vegetação, aumentando a estabilidade do talude com o tempo.

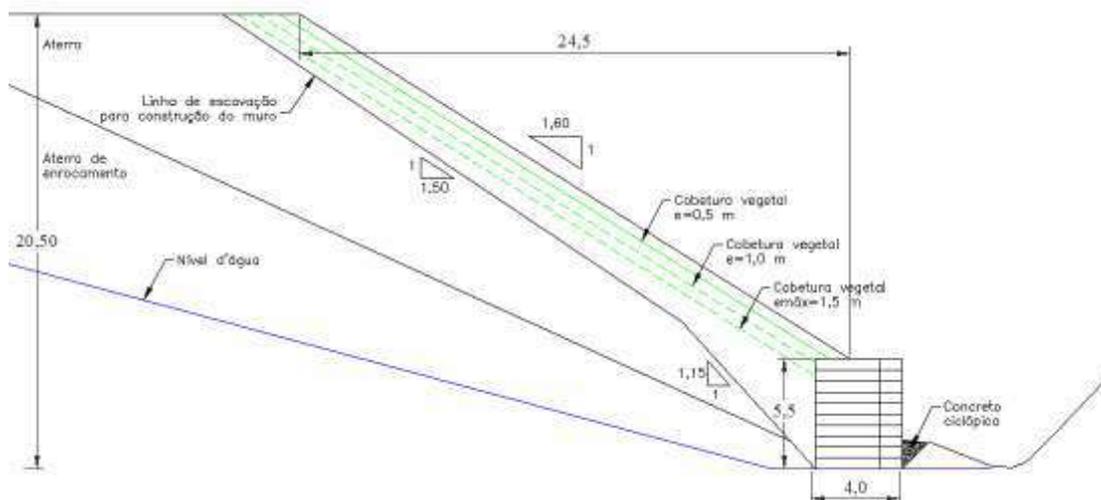


Figura 28: seção tipo da solução de bioengenharia de solos.

Nesta solução o material escavado para construção do muro é reutilizado tanto para construção do talude 1:1,60 acima do mesmo como para a camada de cobertura vegetal sendo

necessário reservar uma área em campo para armazenar este material, desta maneira será reduzido o volume de bota-fora. O reaterro com material local deverá ser compactado, sendo necessário cuidado especial próximo ao faceamento do muro a fim de evitar deformações no mesmo e a frente do muro de solo reforçado, assim como na solução tradicional, deverá ser preenchida com concreto ciclópico a fim de evitar o carreamento do material pela correnteza do fluxo d'água. A profundidade de plantio depende da espécie vegetal utilizada, sendo necessário entre 5 e 10 cm para o Vetiver, 0,5 a 1 cm para o Sorgo Forrageiro e para o Capim Vencedor e tempo de desenvolvimento destas plantas é em torno de 90 dias. As etapas construtivas são:

- a) sinalização;
- b) limpeza, desmatamento e destocamento de vegetação;
- c) execução do caminho de serviço;
- d) escavação para primeira etapa de construção do muro;
- e) execução de 15 m de extensão do muro tipo Terramesh® System;
- f) escavação para a segunda etapa de construção do muro;
- g) execução do restante do muro;
- h) execução do reaterro;
- g) plantio das sementes;
- i) execução da drenagem superficial.

Como a geometria da solução permaneceu a mesma da solução tradicional a fase crítica da sequência construtiva continua sendo o desconfinamento do pé do talude, sendo válidas para esta solução as análises apresentadas tanto em períodos chuvosos, sem movimentação na obra como em períodos secos, considerando a movimentação de maquinários.

8 COMPARAÇÃO DOS CUSTOS

Ao comparar as quantidades da solução tradicional com a de bioengenharia de solos os únicos valores alterados são aqueles relativos ao serviço de terraplenagem e a obras complementares, as quantidades de serviços preliminares, obras de contenção, drenagem pluvial e obras de arte correntes permaneceram os mesmo e são apresentados no quadro 17. Os valores utilizados como base para realizar os orçamentos estimados das soluções foram obtidos através do SICRO 2 – Sistema de Custos Rodoviários elaborado pelo DNIT⁶¹ (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes). Em soluções como as apresentadas neste trabalho, onde a contenção foi feita grande parte ou por mudança de geometria com alteração ou reuso de materiais serviços de terraplenagem representam uma parcela significativa do custo total. Na solução tradicional assim como na de bioengenharia os serviços relacionados a terraplenagem representaram em torno de 70% do valor global da obra. Nos quadros 18 e 19 estão apresentados os valores de terraplenagem das soluções tradicional e de bioengenharia respectivamente.

A solução de bioengenharia representou uma economia maior no valor global da obra, diminuindo em torno de 20% o valor da obra, mas na situação atual do terreno o acesso para a compactação do material de reaterro da solução de bioengenharia seria muito difícil, uma vez que o material do aterro exige um cuidado maior na compactação do que o rachão. Outra dificuldade na solução de bioengenharia seria a necessidade de um espaço para armazenamento do material escavado até o momento da construção do reaterro.

⁶¹ Disponível em: <<http://www1.dnit.gov.br/rodovias/sicro/rs.htm>>. Acesso em: 16 nov. 2009.

CÓDIGO		DESCRIÇÃO	ESPEC. SERVIÇO	DMT (km)	UD.	QUANT.	PREÇO UNIT.	PREÇO TOTAL
PROJETO	SICRO II							
1.0		SERVIÇOS PRELIMINARES						
1.1	*****	Placa padrão de obra			m ²	12.00	85.00	1,020.00
1.2	2 S 01 000 00	Desm. dest. e limp. áreas c/ arv. diam. até 0,15m	DNER-ES-278		m ²	1,400.00	0.29	406.00
1.3	*****	Tube de PVC D=100 mm (desvio curso d'água)			m	120.00	13.87	1,664.40
Custo total de Serviços Preliminares								3,090.40
2		OBRAS DE CONTENÇÃO						
2.1	*****	Solo reforçado com malha hexagonal de dupla torção - h=0,5m, L=4m			m ²	140.00	455.99	63,838.60
2.2	*****	Forn. e aplicação de Geogrelha 150kN/30kN			m ²	324.00	37.68	12,208.32
2.3	*****	Forn. e aplicação de Geotêxtil NT 300 g/m ²			m ²	504.00	4.80	2,419.20
2.4	3 S 03 310 50	Concreto ciclópico AC/BC/PC - incluso transporte		27	m ³	68.00	312.35	21,239.80
Custo total de obras de contenção								99,705.92
3		DRENAGEM PLUVIAL E OBRAS DE ARTE CORRENTES						
3.1	2 S 04 400 02	Valeta prot.cortes c/revest. vegetal - VPC 01	DNIT 018/2004-ES		m	10.00	61.82	618.20
3.2	2 S 04 901 32	Sarjeta trapezoidal de grama - SZG 02	DNIT 018/2004-ES		m	118.00	16.42	1,937.56
3.3	2 S 04 901 02	Sarjeta trapezoidal de concreto - SZC 02	DNIT 018/2004-ES		m	57.20	25.10	1,435.72
3.4	2 S 04 941 32	Descida d'água aterros em degraus - arm - DCD 02	DNIT 021/2004-ES		m	7.00	155.87	1,091.09
3.5	2 S 04 930 02	Caixa coletora de sarjeta - CCS 02	DNIT 026/2004-ES		un.	1.00	1,299.79	1,299.79
3.6	2 S 04 100 52	Corpo BSTC D=0,80 m AC/BC/PC (sob acesso)	DNIT 023/2006-ES		m	4.00	513.72	2,054.88
3.7	2 S 04 101 02	Boca BSTC D=0,80m normal	DNIT 023/2006-ES		un.	1.00	1,140.20	1,140.20
3.8	2 S 04 100 51	Corpo BSTC D=0,60 m AC/BC/PC (sob acesso)	DNIT 023/2006-ES		m	4.00	363.79	1,455.16
3.9	2 S 04 101 01	Boca BSTC D=0,60 m normal	DNIT 023/2006-ES		un.	1.00	698.01	698.01

continua

continuação

CÓDIGO		DESCRIÇÃO	ESPEC. SERVIÇO	DMT (km)	UD.	QUANT.	PREÇO UNIT.	PREÇO TOTAL
PROJETO	SICRO II							
3.10	2 S 04 930 01	Caixa coletora de sarjeta - CCS 01	DNIT 026/2004-ES		un.	2.00	1,325.86	2,651.72
3.11	2 S 04 991 01	Tampa concr. p/caixa colet. (4 nervuras) - TCC 01	DNIT 026/2004-ES		un.	2.00	159.40	318.80
3.12	2 S 03 371 01	Forma de placa compensada resinada	DNER-ES-333		m ²	22.00	45.22	994.84
3.13	2 S 03 328 00	Conc.estr.fck=25 MPa-contr.raz.uso ger.conf.e	DNER-ES-330		m ³	3.10	301.15	933.56
3.14	2 S 03 580 02	Forn., preparo e colocação formas aço CA 50	DNER-ES-331		kg	135.00	9.49	1,281.15
Custo total de drenagem pluvial e obras de arte correntes								17,910.68
VALOR TOTAL								134,422.50

Quadro 16: planilha de quantidades dos serviços que se repetem nas duas soluções (trabalho não publicado⁶²)

⁶² Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

CÓDIGO		DESCRIÇÃO	ESPEC. SERVIÇO	DMT (km)	UD.	QUANT.	PREÇO UNIT.	PREÇO TOTAL
PROJETO	SICRO II							
4		TERRAPLENAGEM						
		Escavação de Material e Acesso						
4.1	2 S 04 001 00	Escavação mecânica de vala em mat. 1ª cat. (1º tombo) (produtividade 50%)			m³	1,046.00	10.30	10,773.80
4.2	2 S 04 020 00	Escavação em vala material de 3ª categoria (1º tombo)			m³	1,046.00	59.53	62,268.38
4.3	2 S 01 100 22	Esc. carga transp. mat 1ª cat DMT 50 a 200m c/e (produtividade 50%)	DNER-ES-280 e DNER-ES-281		m³	2,627.00	9.74	25,586.98
4.4	2 S 01 102 01	Esc. carga transp. mat 3ª cat DMT até 50m (produtividade 50%)	DNER-ES-280 e DNER-ES-281		m³	1,723.00	35.72	61,545.56
4.5	2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal (aterros acesso)	DNER-ES-282		m³	196.00	2.31	452.76
4.6	2 S 01 513 01	Compactação de material de "bota-fora"	DNER-ES-282		m³	4,350.00	1.80	7,830.00
4.7	2 S 09 002 91	Transporte comercial c/ basc. 10m³ rod. pav. (bota-fora)		3	tkm	23,490.00	0.35	8,221.50
4.8	2 S 02 200 01	Base solo estabilizado granul. s/ mistura (revest. acesso)	DNER-ES-303		m³	117.00	11.01	1,288.17
4.9	2 S 09 002 91	Transporte comercial c/ basc. 10m³ rod. pav. (saibro para acesso)		14	tkm	2,948.40	0.35	1,031.94

continua

continuação

CÓDIGO		DESCRIÇÃO	ESPEC. SERVIÇO	DMT (km)	UD.	QUANT.	PREÇO UNIT.	PREÇO TOTAL
PROJETO	SICRO II							
		Reaterro						
5.10	2 S 01 512 02	Compactação de camada final de aterro de rocha -	DNER-ES-282		m ³	1,842.00	52.62	96,926.04
5.11	*****	Compactação manual de brita em área confinada - incluso fornecimento pedra britada (1m junto ao faceamento)			m ³	140.00	63.13	8,838.20
5.12	2 S 09 002 91	Transporte comercial c/ basc. 10m3 rod. pav.		27	tkm	96,325.20	0.35	33,713.82
Custo total de terraplenagem								318,477.15
6		OBRAS COMPLEMENTARES						
6.1	*****	Forn. e apl. de Manta Biotêxtil 300 g/m ² - Unidim.	DNIT 072/2006-ES		m ²	207.00	9.50	1,966.50
6.2	*****	Sinalização provisória de obra	DNER-ES-340		m.mês	100.00	117.49	11,749.00
Custo total de obras complementares								13,715.50
VALOR TOTAL								332,192.65

Quadro 17: custos e quantidade do serviço de terraplenagem para solução tradicional (trabalho não publicado⁶³)

⁶³ Relatório de Projeto Final de Engenharia do km 108+900 da BR-116/SC elaborado pela empresa Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, 2009.

CÓDIGO		DESCRIÇÃO	ESPEC. SERVIÇO	DMT (km)	UD.	QUANT.	PREÇO UNIT.	PREÇO TOTAL
PROJETO	SICRO II							
5		TERRAPLENAGEM						
		Escavação de Material e Acesso						
5.1	2 S 04 001 00	Escavação mecânica de vala em mat. 1ª cat. (1º tombo) (produtividade 50%)			m³	1,046.00	10.30	10,773.80
5.2	2 S 04 020 00	Escavação em vala material de 3ª categoria (1º tombo)			m³	1,046.00	59.53	62,268.38
5.3	2 S 01 100 22	Esc. carga transp. mat 1ª cat DMT 50 a 200m c/e (produtividade 50%)	DNER-ES-280 e DNER-ES-281		m³	2,627.00	9.74	25,586.98
5.4	2 S 01 102 01	Esc. carga transp. mat 3ª cat DMT até 50m (produtividade 50%)	DNER-ES-280 e DNER-ES-281		m³	1,723.00	35.72	61,545.56
5.5	2 S 01 510 00	Compactação de aterros a 95% proctor normal (aterros acesso)	DNER-ES-282		m³	3,150.00	2.31	7,276.50
5.6	2 S 02 200 01	Base solo estabilizado granul. s/ mistura (revest. acesso)	DNER-ES-303		m³	117.00	11.01	1,288.17
5.7	2 S 09 002 91	Transporte comercial c/ base. 10m³ rod. pav. (saibro para acesso)		14	tkm	2,948.40	0.35	1,031.94

continua

continuação

CÓDIGO		DESCRIÇÃO	ESPEC. SERVIÇO	DMT (km)	UD.	QUANT.	PREÇO UNIT.	PREÇO TOTAL
PROJETO	SICRO II							
		Reaterro						
5.8	3 S 05 101 01	Revestimento vegetal com mudas			m ²	850.00	6.84	5,814.00
5.9	*****	Compactação manual de brita em área confinada - incluso fornecimento pedra britada (1m junto ao faceamento)			m ³	992.00	63.13	62,624.96
5.10	2 S 09 002 91	Transporte comercial c/ base. 10m3 rod. pav.		27	tkm	48,211.20	0.35	16,873.92
Custo total de terraplenagem								255,084.21
6		OBRAS COMPLEMENTARES						
6.1	*****	Forn. e apl. de Manta Biotêxtil 300 g/m ² - Unidim.	DNIT 072/2006-ES		m ²	207.00	9.50	1,966.50
6.2	*****	Plantio de mudas			un.	3,315.00	2.50	8,287.50
6.3	*****	Sinalização provisória de obra	DNER-ES-341		m.mês	100.00	117.49	11,749.00
Custo total de obras complementares								22,003.00
VALOR TOTAL								277,087.21

Quadro 18: custos e quantidade do serviço de terraplenagem para solução de bioengenharia.

9 CONCLUSÕES

Conforme proposto no objetivo principal deste trabalho foram comparados os custos de uma solução tradicional e outra de bioengenharia para uma ruptura ocorrida no km 108+800 da BR-116/SC. Através das concepções das duas soluções e da análise de custos concluiu-se que as duas soluções são válidas. A solução de bioengenharia mostrou-se uma alternativa muito interessante para o caso de rupturas superficiais e controle de erosão, pois a profundidade de influência das raízes é limitada. Outro porém em relação a solução de bioengenharia é a consideração do acréscimo de coesão no solo devido a presença de raízes, a vegetação e suscetível à intempéries e à ação do homem e quando a planta morrer mudará as propriedades do solo, podendo desta forma gerar instabilidade no talude onde atuava. A fim de tornar este tipo de solução mais consistente seria necessária a realização de pesquisas para determinar as melhores espécies a serem utilizadas na região para cada época do ano.

Segundo os métodos utilizados para análise, a solução tradicional mostrou-se mais eficiente no processo construtivo, pois na solução de bioengenharia existe a necessidade de uma compactação mais cuidadosa no reaterro, por ser um material menos granular e mais coesivo, além da necessidade da abertura de espaço no canteiro da obra para deixar o material escavado, que é de grande volume, até o momento da construção do reaterro. Por ser uma área de mata fechada a necessidade de espaço para armazenamento deste material iria afetar a vegetação nativa, o que iria contra a premissa deste trabalho que é a preservação ambiental. Este fator também geraria uma movimentação maior durante o processo construtivo, o que não seria aconselhável devido ao desconfinamento do pé do talude durante a sequência construtiva.

Têm-se, contudo, a necessidade da realização de mais pesquisas na área, pois utilização da vegetação na estabilidade de taludes é um assunto multidisciplinar e ainda pouco estudado. Para que se tenham dados mais consistentes seria necessária a dedicação de profissionais de diversas áreas além de engenharia, tais como botânica, meteorologia, geologia, agronomia e hidrogeologia, para desta forma nos levar a um conhecimento satisfatório sobre materiais e métodos relacionados a esta problemática.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: estabilidade de taludes. São Paulo, 2009.

DURLO, M. A.; SUTILI, F. J. **Bioengenharia**: manejo biotécnico de cursos de água. Porto Alegre: EST, 2005.

ERB, R. T. **The effect of roots on the shearing strength of soil**. 1985. 94 f. Thesis (Degree of Master of Science). Department of Civil Engineering. The Ohio State University, Ohio.

LEMES, M. R. T. **Revisão dos efeitos da vegetação em taludes**. 2001. 140 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

LEWIS, L. **Soil Bioengineering an Alternative for Roadside Management**: a practical guide. San Dimas, California: United States Department of Agriculture, 2000.

MACCAFERRI AMÉRICA LATINA. **Reforço e estabilização de solos**: necessidades e soluções. Jundiaí, ago. 2008a.

_____. **Defesas de margens e obras transversais**: necessidades e soluções. Jundiaí, ago. 2008b.

_____. Colégio Etapa. 2006. Disponível em:
<http://www.maccaferri.com.br/imagens/fotos/case_etapa.pdf?PHPSESSID=lc4hcbnk6l5sdlgi9an3e37oh5>. Acesso em: 09 jul. 2009a.

_____. *Terramesh® System*. Disponível em:
<<http://www.maccaferri.com.br/pagina.php?pagina=94&idioma=0&PHPSESSID=t0hanrqljr4a4ajg21pbu450c0>>. Acesso em: 09 jul. 2009b.

MARQUES, A. C. M. Aplicações em Controle de Erosão Superficial. In: VERTEMATTI, J. C. (Org.) **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

PEREIRA, A. R. **Como Selecionar Plantas Para Áreas Degradadas e Controle de Erosão**. [Belo Horizonte: s. n, 2006].

PRANDINI, F. L.; GUIDICINI, G.; BOTTURA, J. A.; PONÇANO, W. L.; SANTOS, A. R. Atuação da cobertura vegetal na estabilidade de encostas: uma resenha crítica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FLORESTAS TROPICAIS, n. II, 1976, Mossoró, RN. **Resumos...** São Paulo: IPT, 1976.

SAYÃO, A.; AZAMBUJA, E.; EHRLICH, M.; GOMES, R. C. Muros e Taludes Reforçados. In: VERTEMATTI, J. C. (Org.) **Manual Brasileiro de Geossintéticos**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

STYCZEN, M. E.; MORGAN, E. P. C. Engineering Properties of vegetation. In: MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. (Org.) **Slope Stabilization and Erosion Control: A**

Bioengineering Approach. 1 ed. Silsoe College, Cranfield University, UK: Chapman & Hall. 1995

SUTILI, F. J. Bioengenharia de Solos. Disponível em:
<<http://bioengenhariadesolos.blogspot.com/>>. Acesso em: 17 nov. 2009.

TENGBEH, G. T. **The effect of Grass cover on bank erosion.** 1989. 223 f. Thesis (Degree of Doctor of Philosophy). Cranfield Institute of Technology, Silsoe College, UK.