



Instituto Federal da Bahia – IFBA Campus Vitória da Conquista
Diretório Acadêmico de Engenharia Civil – DAEC

SUELLEN FERNANDES RODRIGUES

**ANÁLISE DA EFICÁCIA DE TÉCNICAS DE BIOENGENHARIA NA
ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES UTILIZADAS NO BRASIL**

Vitória da Conquista – BA

2024

SUELLEN FERNANDES RODRIGUES

**ANÁLISE DA EFICÁCIA DE TÉCNICAS DE BIOENGENHARIA NA
ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES UTILIZADAS NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Campus de Vitória da Conquista como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Joaz de Souza Batista

Vitória da Conquista – BA

2024

R696 Rodrigues, Suellen Fernandes

Análise da eficácia de técnicas de Bioengenharia na estabilização de taludes utilizadas no Brasil: / Suellen Fernandes Rodrigues; orientador Joaz de Souza Batista -- Vitória da Conquista: IFBA, 2024.

89 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) Engenharia Civil - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia- *Campus* Vitória da Conquista-BA, 2024.

1. Eficácia das técnicas de bioengenharia. 2. Estabilidade de taludes. 3. riscos geotécnicos. 4. sustentabilidade. I. de Souza Batista, Joaz, orient. II. TÍTULO.

CDD:624

Ativar c

SUELLEN FERNANDES RODRIGUES

**ANÁLISE DA EFICÁCIA DE TÉCNICAS DE BIOENGENHARIA NA
ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES UTILIZADAS NO BRASIL**

A presente monografia, apresentada em sessão pública realizada 26 de fevereiro de 2024, foi avaliada como adequada para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, julgada e aprovada em sua forma final pela Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, *Campus Vitória da Conquista*.

Data da Aprovação: 26 de fevereiro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Joaz de Souza Batista (Presidente)
IFBA Campus Vitória da Conquista

Prof. Dr^a. Joseane Oliveira da Silva (Examinadora)
IFBA Campus Vitória da Conquista

Prof. Dr. Katielle Brito (Examinadora)
IFBA Campus Vitória da Conquista



Documento assinado eletronicamente por **JOAZ DE SOUZA BATISTA, Membro da Unidade**, em 05/03/2024, às 12:04, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **JOSEANE OLIVEIRA DA SILVA, Professor Efetivo**, em 05/03/2024, às 16:48, conforme decreto nº 8.539/2015.



Documento assinado eletronicamente por **Katielle Silva Brito Kateivas, Coordenador(a) do Curso de Engenharia Ambiental**, em 05/03/2024, às 16:52, conforme decreto nº 8.539/2015.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site http://sei.ifba.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&acao_origem=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **3423414** e o código CRC **B0403634**.

“O sucesso não é como um lugar ao qual você chega, nem como uma estrada pela qual você passa. O sucesso assemelha-se mais a uma caminhada, a uma construção, ou mesmo ao plantio: é preciso seguir um passo após o outro, dia após dia, tijolo por tijolo. Não existe vitória sem labuta”.
Augusto Branco

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pela vida, força e perseverança que me fizeram chegar até o final desta dissertação. E mostrar gratidão às pessoas que sempre estiveram ao meu lado ao longo da minha caminhada, são elas:

Minha família, meu pai José, minha mãe, Suely, meu irmão Rodrigo, minha vó Rosália, meu primo Júnior e minha cunhada Andressa.

Meus amigos da universidade Nelson, Mariana, Patrícia, Flávia, Gabriel, Gabriele, Roberto e Isabela.

Ao meu orientador, Prof. Me. Joaz de Souza Batista.

Por fim, quero agradecer a todos que direta e indiretamente fizeram parte desta fase da minha jornada, aqueles que compartilharam palavras de encorajamento, ofereceram orientação e apoio nos momentos de dúvidas.

RESUMO

Os taludes enfrentam frequentemente problemas de instabilidade e técnicas de bioengenharia têm sido reconhecidas como alternativas para estabilizá-los. Este trabalho, propõe investigar a eficácia das técnicas de bioengenharia na estabilidade de taludes no contexto geotécnico e ambiental do Brasil. Para isso, analisou-se os casos no Brasil onde as técnicas foram empregadas, e realizou-se uma análise crítica, baseada em uma revisão bibliográfica, com foco dado a um livro “Slope Stabilization and Erosion Control. A Bioengineering Approach” dos autores Styczen e Morgan (1995) e de outras fontes de pesquisas relevantes complementares. Os resultados mostraram a eficácia das técnicas de bioengenharia na estabilização de taludes no Brasil, evidenciando sua contribuição para a redução dos riscos geotécnicos e promoção da sustentabilidade. As análises ainda ressaltaram a importância de considerar as especificidades do ambiente e as limitações das técnicas. Como também a importância de estratégias condizentes com o contexto brasileiro para uma aplicação segura das técnicas em projetos de engenharia civil no Brasil.

Palavras-chave: Eficácia das técnicas de bioengenharia; Estabilidade de taludes; riscos geotécnicos; sustentabilidade.

ABSTRACT

The slopes often face instability issues, and bioengineering techniques have been recognized as alternatives to stabilize them. This work proposes to investigate the effectiveness of bioengineering techniques in slope stability within the geotechnical and environmental context of Brazil. To do so, cases in Brazil where these techniques were employed were analyzed, and a critical analysis was conducted, based on a bibliographic review, with a focus on the book "Slope Stabilization and Erosion Control: A Bioengineering Approach" by authors Styczen and Morgan (1995), and other relevant complementary research sources. The results showed the effectiveness of bioengineering techniques in slope stabilization in Brazil, highlighting their contribution to reducing geotechnical risks and promoting sustainability. The analyses also emphasized the importance of considering the specificities of the environment and the limitations of the techniques, as well as the importance of strategies suitable for the Brazilian context for a safe application of the techniques in civil engineering projects in Brazil.

Keywords: Efficacy of bioengineering techniques; Slope stability; geotechnical risks; sustainability.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivo geral	15
1.3 Objetivos específicos	15
1.4 Questão norteadora	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Estabilidade de taludes	17
2.1.1 Tipos de talude e movimento de massa	17
2.1.2 Projeto de estabilidade	19
2.1.3 Análise de estabilidade considerando o efeito da vegetação	24
2.2 Efeitos da vegetação	26
2.2.1 Efeitos hidrológicos	28
2.2.2 Efeitos Mecânicos	30
2.3 Técnicas de Bioengenharia	37
2.3.1 Eficiência das técnicas de bioengenharia	41
2.4 Vegetação simulada	42
2.5 Retentores de sedimentos	42
2.6 Drenagem dos taludes	43
2.7 Estabelecimento e manutenção da vegetação	43
2.7.1 Vegetação natural: Potencial e Influência do clima	43
2.7.2 Fatores que afetam a seleção das espécies	44
2.7.3 Processo de estabelecimento da vegetação	44
2.7.4 Gestão	45
3. METODOLOGIA	47
4. ESTUDOS DE CASO	49
4.1 Caso 1	49
4.2 Caso 2	51
4.3 Caso 3	53

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1 Resultados do caso 1.....	58
5.1.1 Análise do desempenho do caso 1.....	67
5.2 Resultados do caso 2.....	59
5.2.1 Análise do desempenho do caso 2.....	62
5.3 Resultados do caso 3.....	64
5.3.1 Análise do desempenho do caso 3.....	65
5.4 Análise comparativa dos resultados.....	66
5.5 Considerações sobre a viabilidade e limitações	67
5.6 Sugestões de estudos.....	72
6. CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Composição de um talude	17
Figura 2- Impacto de uma gota de água sobre uma superfície erodível,	18
Figura 3- Efeito da vegetação na estabilidade de talude	25
Figura 4- Efeitos Hidrológicos (a) e mecânicos (b)	27
Figura 5- Componentes do sistema radicular	32
Figura 6- Modelo de Wu.....	35
Figura 7- Comparação entre a eficiência das intervenções da Bioengenharia e as Tradicionais na Engenharia Civil	41
Figura 8- Caracterização do Sítio do Caso 1.....	50
Figura 9- Caracterização do Sítio do Caso 2.....	51
Figura 10- Caracterização do Sítio do Caso 3.....	54
Figura 11- Parcelas antes do trabalho de revegetação	55
Figura 12- Parcelas 1 e 2 após revegetação	56
Figura 13- Perfil de solo com raízes pintadas e com quadrícula	56
Figura 14- Evolução temporal das seções 1,2 e 3, sem aplicação das técnicas de bioengenharia	60
Figura 15- Evolução temporal das seções 1,2 e 3, com aplicação das técnicas de bioengenharia	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Nível de segurança recomendado pela NBR 11682:2009 de acordo com os critérios de danos materiais (Associação Brasileira de Normas Técnicas,2009)	23
Quadro 2- Nível de segurança recomendado pela NBR 11682:2009 de acordo com os critérios de perdas de vidas humanas (Associação Brasileira de Normas Técnicas,2009)	23
Quadro 3- Estratégias para quantificação dos efeitos físicos da vegetação na estabilidade de talude	26
Quadro 4- Arquitetura radicular	33
Quadro 5- Resumo das principais técnicas de Bioengenharia	38

Quadro 6- Resumo das principais influências das técnicas de bioengenharia no Caso 1.....	68
Quadro 7- Resumo das principais influências das técnicas de bioengenharia no Caso 2.....	69
Quadro 8- Resumo das principais influências das técnicas de bioengenharia no Caso 3.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- FS mínimo considerado pela NBR 11682:2009 para escorregamentos (Associação Brasileira de Normas Técnicas,2009)	22
Tabela 2- Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo sem e com plantio do capim vetiver	58
Tabela 3- Quantidade de matéria orgânica (MO) das Amostras de solo	58
Tabela 4- Coeficientes de segurança do talude	59
Tabela 5- Área radicular (%) de <i>Acacia auriculiformis</i>	65

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1- Fator de segurança com relação a resistência	19
Equação 2- Resistência ao cisalhamento do solo	19
Equação 3- Tensão média de cisalhamento	19
Equação 4- Fator de segurança pelo método do talude infinito	21
Equação 5-Método de Fellenius	21
Equação 6- Fator de segurança pelo método do talude infinito considerando os efeitos da vegetação	24
Equação 7- Método de Fellenius considerando os efeitos da vegetação	24
Equação 8- Contribuição das raízes resistência ao cisalhamento	36
Equação 9- Resistência média das raízes por unidade de área do solo	36
Equação 10- Área transversal do solo ocupado por raízes (A_R)	36

1. INTRODUÇÃO

Uma das maiores preocupações em obras de infraestrutura e construções urbanas é a estabilização de taludes, dada a sua exposição contínua às forças geodinâmicas e a ação humana. Este desafio é especialmente crítico no Brasil, onde os deslizamentos de terra resultantes da instabilidade de taludes representam uma ameaça à vida humana e causam consideráveis prejuízos econômicos.

Tradicionalmente, a engenharia tem utilizado técnicas para minimizar esses riscos, como cortinas atirantadas e muros de concreto, soluções essas que requerem altas despesas iniciais e uma aplicação de concreto consideráveis. No entanto, existe uma crescente conscientização ambiental que estimula a engenharia a buscar soluções mais sustentáveis, com qualidades estéticas e de baixo custo, como a adoção de técnicas de bioengenharia.

As técnicas de bioengenharia começaram a ser estudadas e descritas na Europa a partir do século XVII (BRASIL, 2003). No século XX, muitos trabalhos foram encontrados na China, Alemanha e Estados Unidos (DURLO; SUTILI, 2005), mas após a Segunda Guerra Mundial, caíram em desuso, devido ao surgimento das técnicas estruturais.

Contudo, na atualidade, estão sendo reconhecidas nos trabalhos de construção, por representar uma alternativa de grande potencial para estabilizar áreas de tratamento, nas quais utilizam plantas ou parte delas como elemento vivo de construção, que podem estar sozinhas ou combinadas com materiais inertes (SCHIECHTL, 1980).

Na natureza, é notório o papel da vegetação na proteção da paisagem e no equilíbrio das forças destrutivas e forças construtivas da estabilidade. Apesar disso, a sua contribuição na estabilidade de taludes apresenta uma abordagem simplista relacionada ao controle da erosão e seu uso inadequado para esse fim são frequentes, o que gera incertezas na engenharia sobre o seu potencial.

1.1 Justificativa

Diante disso, este trabalho justifica-se pelo entendimento de que, ao considerar a realização das análises de estabilidade de taludes, as quais tornam perceptíveis a

eficiência das técnicas de bioengenharia, bem como os notáveis benefícios estéticos e ecológicos obtidos nos locais que receberam as intervenções, torna-se justificável o estabelecimento dessas práticas como uma opção não apenas viável na engenharia, mas confiável, impactando nas tomadas de decisões dos engenheiros e dos órgãos reguladores.

Neste sentido, este trabalho realizou uma revisão bibliográfica sobre os efeitos da vegetação na estabilidade de taludes para avaliar as técnicas de bioengenharia empregadas no Brasil. As análises trazem a compreensão das possibilidades oferecidas por essas abordagens, com a capacidade de resolver os problemas de estabilidade. Os resultados deste estudo visam contribuir para o avanço do conhecimento científico no campo da bioengenharia aplicada na estabilização de taludes, o que motivará a adoção dessas práticas na construção civil.

1.2 Objetivo geral

Analisar a eficácia das técnicas de bioengenharia utilizadas para estabilizar taludes no Brasil, a fim de avaliar a sua contribuição para reduzir os processos erosivos e aumentar o fator de segurança.

1.3 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a eficácia das técnicas de bioengenharia em contextos geotécnicos diferentes, identificando as condições que influenciam no seu desempenho.
- Identificar as limitações associadas a essas técnicas de bioengenharia na estabilização de taludes.
- Propor recomendações de estudos para utilizar as técnicas de bioengenharia na estabilização de taludes com maior desempenho.
- Contribuir para o desenvolvimento do conhecimento científico e tecnológico da bioengenharia.
- Promover o incentivo do uso responsável das técnicas de bioengenharia como uma alternativa viável para estabilizar taludes.

1.4 Questão norteadora

Qual é a contribuição das técnicas de bioengenharia na estabilização de taludes, considerando os fatores que influenciam sua eficácia em contextos ambientais e geotécnicos diferentes, e de que maneira essas abordagens podem ser refinadas para otimizar seu desempenho?

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estabilidade de taludes

2.1.1 Tipos de talude e movimento de massa

Segundo Gerscovich (2016), o talude é a denominação dada a qualquer superfície de um maciço de solo ou rocha que tenha inclinação. Quando é formado pelos processos naturais é denominado encosta, caso seja concebido pela ação humana, resultado de cortes em encostas, escavações ou lançamento de aterros é considerado um talude construído. De maneira geral, o talude é composto por crista, corpo, ângulo de inclinação, terreno de fundação, altura e pé conforme a Figura 1.

Figura 1- Composição de um talude



Fonte: Caputo (2008).

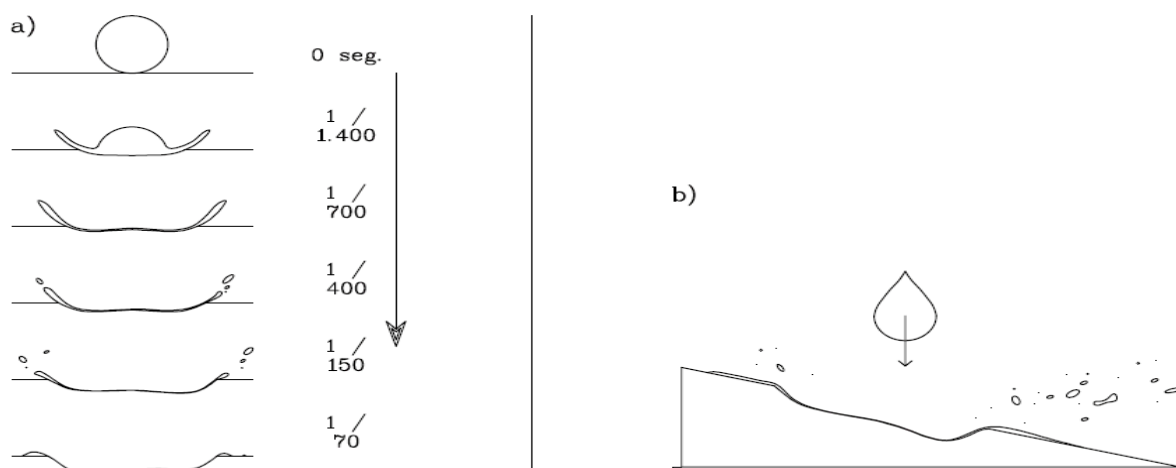
Os taludes, sejam eles naturais ou construídos, podem sofrer deslocamento de solo ou rocha, conhecidos como movimentos de massa, provocados pela própria dinâmica da natureza (QUEIROZ, 2016). Tradicionalmente, a literatura associa esses deslocamentos de solo aos problemas de instabilidade que ocasionam o rompimento dos taludes de diferentes maneiras. Segundo, Das e Sobhan (2014) às rupturas podem ser classificadas, como quedas, tombamentos, escorregamentos, espalhamento e escoamentos. Para Gerscovich (2016, p.11).

A ruptura em si caracteriza-se pela formação de uma superfície de cisalhamento contínua na massa de solo. Portanto, existe uma camada de solo em torno da superfície de cisalhamento que perde suas características durante o processo de ruptura, formando assim a zona cisalhada.

A deflagração desses eventos pode ser vinculada ao aumento da solicitação do talude, desencadeado pela remoção de massa, sobrecarga e solicitações ou pela redução da resistência ao cisalhamento, causada pela característica do solo, intemperismo e variações de poropressão (VARNES, 1978). Adicionalmente, tem-se a erosão gerada por agentes naturais e pelas alterações humanas (GERSCOVICH, 2016).

A água representa um dos principais agentes erosivos, quando uma gota cai em um solo exposto plano ou inclinado, as partículas do solo são dispersas e a formação de uma cratera, que à medida que a precipitação ocorre, cresce consideravelmente, causando enfraquecimento da superfície, selamento superficial, aumento do escoamento superficial e do processo erosivo, conforme a Figura 2 (DURLO; SUTILI, 2005).

Figura 2- Impacto de uma gota de água sobre uma superfície erodível, plana (a) e inclinada(b)



Fonte: Durlo e Sutili (2005), adaptada de Hillel (1998).

A compreensão desses processos que geram a movimentação do solo e consequentemente, a instabilidade dos taludes, possibilita aferir o quão eficazes são as intervenções criadas para estabilizar taludes em controlar e interromper esses processos, e justificar seu uso, sob a perspectiva da viabilidade técnica, econômica e segurança (TABALIPA; FIORI, 2008).

2.1.2 Projeto de estabilidade

A quantificação da probabilidade de acontecer uma movimentação de massa ou da estabilidade de um talude, é baseada no fator de segurança (FS). A definição do fator de segurança é dada pela equação 1, segundo Das e Sobhan (2014).

Equação 1- Fator de segurança com relação a resistência

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (I)$$

Sendo:

τ_f =resistência média ao cisalhamento do solo;

τ_d =tensão média de cisalhamento desenvolvidas ao longo da superfície potencial de ruptura;

Segundo os autores, a resistência ao cisalhamento de um solo é dada pela coesão e pelo ângulo de atrito, descrita pela seguinte fórmula.

Equação 2- Resistência ao cisalhamento do solo

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2)$$

Onde:

c' =coesão;

σ' = tensão normal na superfície potencial de ruptura;

ϕ' =ângulo de atrito;

Já a tensão média de cisalhamento é dada por:

Equação 3- Tensão média de cisalhamento

$$\tau_d = c_d' + \sigma' \tan \phi_d' \quad (3)$$

Onde:

c_d' =coesão desenvolvida ao longo da superfície potencial de ruptura;

ϕ_d' = ângulo de atrito desenvolvido ao longo da superfície potencial de ruptura;

Quando as tensões que atuam no solo são maiores que os parâmetros de possibilitam o aumento da resistência do solo (ângulo de atrito e coesão), é desencadeado o desprendimento de massa de solo (XIA *et al.*, 2008). Ao depender do tipo de solo e de sua origem esses parâmetros sofrem variações (PINTO, 2002).

Em solos majoritariamente arenosos, a resistência cisalhamento é atribuída praticamente pelo atrito ou fricção entre as partículas, já em solos argilosos, o atrito não é tão relevante, nesses solos, a coesão é o principal contribuinte na resistência (SILVA; CARVALHO, 2007).

A diferença entre esses solos está na sua desagregação, ao fragmentar um solo argiloso, há preservação da sua forma original, já nas areias puras e pedregulhos, há uma desestruturação da sua forma, apresentando somente uma coesão aparente, quando esses solos estão parcialmente saturados, resultado da capilaridade da água (VARGAS, 1977), coesão essa, que difere da real, produto das forças eletroquímicas de atração entre as partículas de argila (CAPUTO, 2003).

Os fatores de segurança também podem ser encontrados pelo método do equilíbrio limite e da análise de tensões. Dentre essas duas abordagens, a mais usual é o equilíbrio limite. De acordo Gerscovich (2016, p 87).

O método consiste na determinação do equilíbrio de uma massa ativa de solo, a qual pode ser delimitada por uma superfície de ruptura circular, poligonal ou de outra geometria qualquer. O método assume que a ruptura se dá ao longo de uma superfície e que todos os elementos ao longo desta superfície e que todos os elementos ao longo dessa superfície atingem simultaneamente a mesma condição de $FS=1$.

No caso de uma superfície de ruptura paralela ao talude original, chamada de ruptura translacional (talude infinito), a análise de estabilidade examina uma parte do solo ou fatia (GUIDICINI; NIEBLE, 1983). Quando ocorrem rupturas com profundidades diferentes, apresentando uma ruptura circular, o estudo é realizado, considerando várias fatias de solo que são avaliadas separadamente (método das fatias) (FIORI; CARMIGNANI, 2009). Essas fatias estão sujeitas às forças devido ao peso dos materiais, ao escoamento da água e ao cisalhamento do solo. (FIORI; CARMIGNANI, 2009)

Na década de 1920, uma comissão geotécnica sueca após investigar rupturas de taludes, passou a recomendar a hipótese de que a superfície de ruptura real de deslizamento seja aproximada por uma superfície cilíndrica circular, deste então, a maioria das análises consideram que a curva de escorregamento potencial é um arco

de círculo. No entanto, em alguns casos como barragens zoneadas e fundações sobre estratos fracos, é mais adequado assumir a ruptura de escorregamento plana e a homogeneidade do solo, de acordo com o método do talude infinito (DAS; SOBHAN, 2014).

No método do talude infinito, o fator de segurança é dado por (STYCZEN; MORGAN, 1995):

Equação 4- Fator de segurança pelo método do talude infinito

$$FS = \frac{c' + (\gamma \cdot z - \gamma_w \cdot h_w) \cdot \cos^2 \beta \cdot \tan \phi'}{\gamma \cdot z \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad (4)$$

Onde:

γ = peso específico do solo (kN/m³);

h_w = Altura da superfície(m);

ϕ' = ângulo de atrito interno do solo (°);

z = altura do solo acima da superfície de ruptura(m);

β = ângulo do talude (°);

γ_w = peso específico da água (KN/ m²);

De acordo Das e Sobhan (2014), o método das fatias é uma abordagem que não apresenta restrições em relação à não homogeneidade dos solos e possibilita incluir a poro-pressão. No método de fatias de Fellenius (1936), os valores de FS tendem a ser menores, sendo considerado um método conservativo (GERSCOVICH, 2012). Esse método foi simplificado por Greenwood (1983), que considerou a superfície de ruptura horizontal para cada fatia, e dessa forma, obteve a seguinte equação:

Equação 5-Método de Fellenius

$$FS = \frac{\sum c' \cdot b \cdot \sin \alpha + (W - u \cdot f) \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi'}{\sum W \cdot \sin \alpha} \quad (5)$$

Onde,

f = largura da fatia;

W = Peso total da fatia de solo(kPa);

u =poro-pressão(kPa);

α =Ângulo de inclinação da base da fatia com a horizontal (°);

ϕ' =ângulo de atrito interno do solo (°);

Existem outros métodos como o de Bishop simplificado que normalmente entrega resultados satisfatórios quando associado a programas computacionais (DAS; SOBHAN, 2014). Há também métodos como o Jambu e Morgenstern e Price para superfícies de ruptura não circular, sendo o de Morgenstern e Price o mais preciso que o de Jambu, utilizado para estudos ou análises detalhadas. (GERSCOVICH, 2012).

Segundo Gerscovich (2012), às abordagens que consideram o equilíbrio limite, não representam a realidade, uma vez que a ruptura não ocorre ao mesmo tempo em todos os pontos da superfície potencial, visto que não há uma distribuição uniforme das tensões e deformações no interior do talude.

No cenário em que o fator de segurança for igual a 1, o talude se encontra no limiar da ruptura, conhecido como equilíbrio limite. Em projetos, busca-se valores maiores que esse, sendo aceitável em níveis de segurança um valor igual a 1,5 (DAS; SOBHAN, 2014). A NBR 11682 (ABNT;2009) recomenda que esse valor considere os níveis de segurança contra perda de vida humanas (Tabela 1).

Tabela 1- FS mínimo considerado pela NBR 11682:2009 para escorregamentos (Associação Brasileira de Normas Técnicas,2009)

FS _{adm}		Nível de segurança contra perda de vida humanas		
		Alto	Médio	Baixo
Nível de Segurança contra danos ambientais e materiais	Alto	1,5	1,5	1,4
	Média	1,5	1,4	1,3
	Baixo	1,4	1,4	1,2

Fonte: NBR 11682 (ABNT;2009)

Além disso, classifica o projeto em função da natureza da obra e durabilidade, influenciado também, pelos desfechos de uma possível ruptura em termos de danos materiais (Quadro 1) e perdas humanas (Quadro 2), relacionados ao nível de segurança (GERSCOVICH, 2012).

Quadro 1- Nível de segurança recomendado pela NBR 11682:2009 de acordo com os critérios de danos materiais (Associação Brasileira de Normas Técnicas,2009)

Nível de Segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais. Danos ambientais: locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos
Médio	Danos materiais: locais próximos a propriedades de valor moderado. Danos ambientais: locais sujeitos a acidentes ambientais moderados
Baixo	Danos materiais: locais próximos a propriedades de valor reduzido. Danos ambientais: locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos

Fonte: NBR 11682 (ABNT;2009)

De acordo com NBR 11682 (ABNT; 2009), o nível de segurança aumenta à medida que se aproxima de ambientes com maior movimentação de pessoas, edificações e em áreas que envolvem serviços essenciais.

Quadro 2- Nível de segurança recomendado pela NBR 11682:2009 de acordo com os critérios de perdas de vidas humanas (Associação Brasileira de Normas Técnicas,2009)

Nível de Segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais urbanos, ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego moderado
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido

Fonte: NBR 11682 (ABNT; 2009)

Alguns projetistas sugerem que os valores da tabela 1 devam ser majorados em 10% ou tratados com enfoque probabilístico, em virtude das incertezas resultantes do número limitado de amostras e da diversidade de parâmetros geotécnicos determinados nos ensaios de campo e laboratório (GERSCOVICH, 2016).

2.1.3 Análise de estabilidade considerando o efeito da vegetação

A contribuição da vegetação na estabilidade varia conforme a estação do ano e o ciclo de vida da vegetação. (ALBERNETHY; RUTHERFURD, 2000). Segundo Coppin e Richards (2007), sua consideração na estabilidade, resulta na inclusão de novos parâmetros no cálculo do fator de segurança pelo método do talude infinito e método das fatias de Fellenius, de acordo com a equação (6) e (7):

Equação 6- Fator de segurança pelo método do talude infinito considerando os efeitos da vegetação

$$FS = \frac{c' + c'_R + \{[(Y.z - Y_w.h_w) + S_w].\cos^2\beta.T.\sin\theta\}\tan\phi' + T.\cos\theta}{[(Y.z. + S_w)\sin\beta + D].\cos\beta} \quad (6)$$

Onde:

c'_R =Coesão efetiva do solo (kPa);

S_w =Sobrecarga em razão do peso da vegetação (kPa);

h_w =Altura vertical do lençol freático acima do plano de deslizamento (m);

T =Força de tração (kN/m);

θ =ângulo formado entre as raízes e o plano de ruptura (°);

D =Interferência do vento (kN/m);

ϕ' =ângulo de atrito interno do solo (°);

Equação 7- Método de Fellenius considerando os efeitos da vegetação

$$FS = \frac{\sum (c' + c'_R)b.\sin\alpha + [(W + S_w) - (u - u_v).b).\cos\alpha - D\sin(\alpha - \beta) + T\sin\theta]\tan\phi' + T.\cos\theta}{\sum [(W + S_w). \sin\alpha + D\cos(\alpha - \beta)]} \quad (7)$$

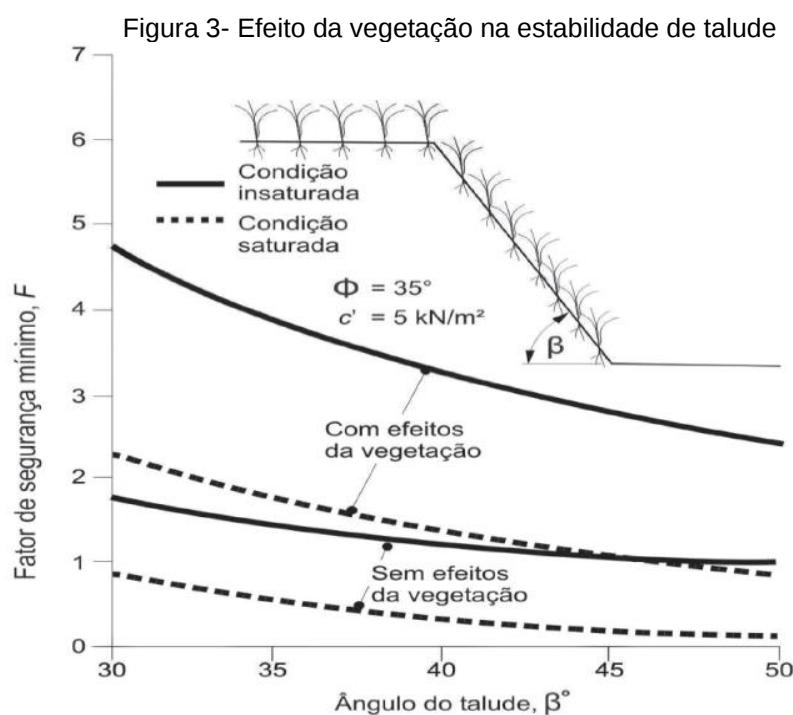
Onde:

u_v =redução da poropressão causada pela transpiração das plantas(kPa).

De acordo os autores, a vegetação aumentam a coesão efetiva do solo (c'_R), a coesão efetiva do solo resultante da sucção causada pela transpiração (c'_S), a

sobrecarga em razão do seu peso (S_w), a interferência do vento (D) e a tração (T), dada a inclinação das raízes de grande diâmetro, assim como reduz a poro pressão da água (u). Ademais, os autores apontam que a sobrecarga (S_w), interferência do vento (D) e a força tração (T) são relevantes para árvores de grande porte, mas são desconsiderados quando se trata de arbustos, ervas e gramíneas.

Para Coelho e Pereira (2006), a incorporação desses parâmetros favorece o aumento do fator de segurança de um talude, tanto na condição saturada como insaturada, quando comparado a um talude sem vegetação, com o mesmo ângulo de atrito e coesão, conforme ilustrado na Figura 3.



Fonte: Coelho e Pereira (2006)

Ainda que haja aumento perceptível do fator de segurança, o sucesso da vegetação empregada para estabilização de taludes exige conhecimento prévio dos efeitos da vegetação, tendo em vista que os mesmos podem ser positivos ou negativos na estabilização (PEREIRA, 1999).

2.2 Efeitos da vegetação

Styczen e Morgan (1995) ressaltam que os efeitos da vegetação são compreendidos na maioria das situações de maneira qualitativa. Segundo Coelho e Pereira (2006), há um esforço em quantificar as incertezas advindas da influência da vegetação e estratégias podem ser delineadas para quantificar os efeitos físicos, conforme o Quadro 3.

Quadro 3- Estratégias para quantificação dos efeitos físicos da vegetação na estabilidade de talude

Efeito	Característica físicas	Método
Reforçamento radicular	Índice de área radicular, distribuição e morfologia Forças de tensão radiculares	Pesagem da massa de raízes em determinada massa de solo, contagem da densidade radicular em intervalos verticais em parcelas amostrais no talude Testes de tensão no campo e em bancada
Atiramento radicular	Espaçamento, diâmetro e idade de árvores, espessura e inclinação do perfil do solo Propriedades geotécnicas do solo	Observações de campo Testes de tensão no campo e em bancada
Sobrecarga	Peso médio da vegetação	Estimativas de campo ou informações na literatura de relação peso/ biomassa de árvores (Cannel, 1982)
Ventos	Regime de ventos para determinado tempo de recorrência, altura média de árvores dominantes para povoamentos de árvores	Norma técnica BS CP3:V:2:1972, ou predição pro danos ao vento (Miller, 1985)
Umidade do solo	Teor de umidade do solo, profundidade do lençol freático, poro pressão/sucção	Testes de campo e em bancada, piezômetros e tensiômetros
Interceptação	Precipitação líquida sobre o talude	Pluviógrafos, coleta de escoamento superficial, densidade de recobrimento foliar
Infiltração	Variações no teor de umidade do solo com	Testes de tensão no campo e em bancada para determinação de

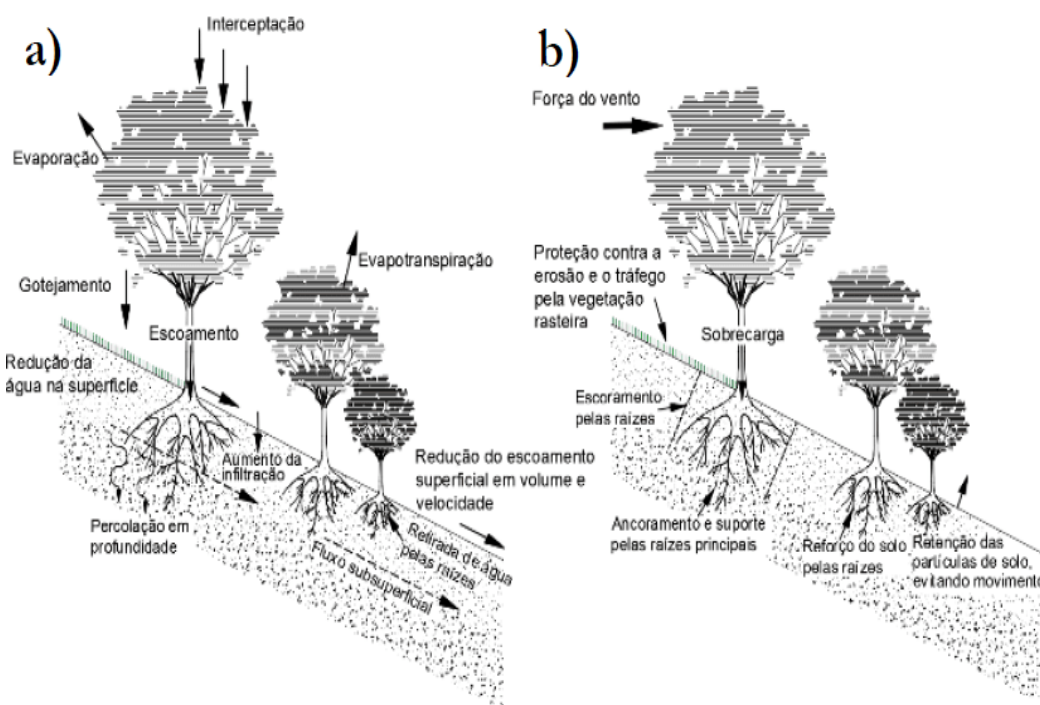
	a profundidade	permeabilidade do solo
--	----------------	------------------------

Fonte: Adaptado Coelho e Pereira (2006).

Segundo Fiori e Carmignani (2001), apesar da dificuldade em se mensurar a contribuição precisa da vegetação na estabilidade de taludes, pode-se afirmar que a sua ausência, por desmatamentos, deixa o solo exposto e mais susceptível aos processos erosivos e a movimentação de massa.

No geral, a vegetação consegue proteger o solo dos efeitos climáticos e aumentar a resistência do solo por causa do sistema solo/raiz (GERSCOVICH, 2012). De acordo com Coppin e Richards (2007), os mecanismos de influência da vegetação de taludes são divididos em dois grupos. O primeiro, considera os aspectos hidrológicos associados à vegetação no ciclo hidrológico e o segundo, abrange os aspectos mecânicos associados a interações físicas entre o sistema radicular, folhagem e o talude, conforme a Figura 4.

Figura 4- Efeitos Hidrológicos (a) e mecânicos (b)



Fonte: Adaptado Coppin e Richards (2007).

Neste capítulo, serão abordados esses dois grupos para melhor entendimento dos efeitos da vegetação na estabilização de taludes.

2.2.1 Efeitos hidrológicos

Apresentam-se, a seguir, as considerações sobre os efeitos hidrológicos da vegetação de acordo com Styczen e Morgan (1995).

- *Infiltração*

Sob a cobertura vegetal, a água da chuva tende a se infiltrar mais facilmente pela matéria orgânica, devido ao crescimento e decomposição das raízes e pela atividade do solo, que mantém a porosidade e permeabilidade do solo, resultando em uma maior condutividade hidráulica. Isso permite que a vegetação diminua o escoamento superficial e o tempo que leva para esse escoamento ocorrer. Logo, necessitaria de uma tempestade mais intensa para produzir uma quantidade crítica de escoamento.

- *Evapotranspiração*

A água da chuva também é removida pelo processo de evapotranspiração, o que provoca a redução da pressão capilar no solo no início da chuva e o aumento do tempo de saturação. Em contrapartida, em solos expansivos, a retirada da umidade do solo por esse processo, ocasiona o surgimento de fendas de tração.

Nesses solos, a variação de umidade, pode ocasionar variações volumétricas no solo (KULANTHAIVEL *et al.*, 2020), que muda ao depender da época do ano, apresentando enrijecido na estiagem e expansivo com vazios maiores entre as partículas em períodos chuvosos, como também está associado à presença de argilominerais no solo (AYALA, 1986).

E isso, por sua vez, aumentará a capacidade de infiltração do solo durante as chuvas subsequentes, o que provocará um aumento na poropressão e possíveis efeitos de empuxo hidrostático nas rachaduras, resultando em uma menor estabilidade do solo (GREENWAY, 1989).

- *Interceptação da chuva*

As gotas de chuva, antes de tocarem no solo, são interceptadas e poderão se fragmentar em pequenas gotas ou se tornar grandes gotas pela coalescência das gotas nas superfícies das folhas e caules, esse processo é chamado de drenagem

foliar. Outra parte interceptada, é devolvida para atmosfera por evaporação, reduzindo a quantidade de chuva que chega à superfície do solo.

Quando as gotas de chuva escoam pelo caule de uma árvore, tendem a acumular e a criarem um caminho preferencial que concentra a infiltração (GUIDICINI; NIEBLE, 1983). Esse efeito poderá superar as taxas de infiltração na área e consequentemente, resultará em escoamento superficial (DE PLOEY, 1982).

Em copas mais altas que um metro, as gotas formadas pela drenagem foliar são mais pesadas e apresentam uma energia cinética de queda maior, resultando em uma maior taxa de desprendimento do solo. Porém, se o solo estiver protegido com material vegetal e detritos, este efeito é atenuado.

Nessas copas, a precipitação é aglomerada, e pode superar a capacidade de absorção do solo e produzir o escoamento superficial, sendo mais indicadas as plantas herbáceas e arbustivas que apresentam um padrão uniforme, com copas densas e ramificadas que possibilitem um padrão uniforme de distribuição da precipitação (SOUSA; SUTILI, 2017).

- *Redução do Desprendimento do solo*

A água, ao passar por uma superfície de solo exposta, consegue arrastar e transportar partículas de solo que já foram previamente desprendidas. A energia da chuva disponível para o desprendimento do solo debaixo de uma cobertura vegetal depende das proporções relativas de chuva e da drenagem foliar. Essa energia pode superar a energia de uma chuva equivalente em um terreno aberto, tanto para árvores quanto para culturas agrícolas de menor crescimento.

A quantidade de desprendimento, para uma quantidade de escoamento superficial, dependerá da rugosidade da cobertura vegetal, descrita como o coeficiente de atrito. O seu nível é em função da morfologia e do padrão de crescimento da planta.

Tanto a infiltração como a rugosidade possuem impactos na geração do escoamento superficial e afetam o processo de respingo, uma vez que a infiltração reduz a quantidade de água disponível para esse processo, e, por outro lado, a rugosidade afeta como as gotas de chuva interagem com solo, devido sua aspereza.

Quanto maior a rugosidade, menor será o efeito da gota de chuva, e consequentemente, a energia do respingo é menor. No entanto, se a superfície do

solo estiver completamente coberta de água em uma profundidade, não haverá respingos.

- *Velocidade do escoamento*

Em coberturas densas e uniformes, o fluxo de água é desacelerado pela presença da rugosidade da superfície, que contribui para a retenção de sedimentos transportados e a redução dos processos erosivos. Já em coberturas tortuosas e aglomeradas, a velocidade do fluxo é maior, especialmente entre os aglomerados de vegetação, acarretando uma maior taxa de erosão.

2.2.2 Efeitos Mecânicos

- *Ação do vento*

A vegetação pode reduzir a velocidade do vento ao exercer a força de resistência ao fluxo do ar, chamada de arrasto. Ela age como um amortecedor diminuindo a força do vento ao transferir a energia do ar para ela. Além disso, aumenta o comprimento de rugosidade, quanto mais rugosa a superfície da vegetação, maior será seu coeficiente de arrasto que dependerá do comprimento de contato a favor do vento entre as superfícies das folhas e do ar (MORGAN; FINNEY, 1987).

Em algumas situações, a força do vento pode gerar uma tensão adicional e desestabilizar uma encosta (GUIDICINI; NIEBLLE, 1983). De acordo com Fiori e Borchardt (1997), a força do vento só é favorável para o movimento, quando o vento sopra na direção do declive da encosta a partir de uma velocidade de 40 km/h. Caso uma árvore caia em decorrência da alta velocidade do vento, haverá um aumento da infiltração e do peso do talude (PEREIRA, 1999).

- *Impacto mecânico*

A cobertura vegetal atua como uma camada de proteção, absorvendo o impacto mecânico, como as passadas de animais. Liddle (1973) mostrou em seu estudo, que as gramíneas são resistentes e podem suportar entre 1000 e 2000 passadas de caminhantes antes que a sua densidade da cobertura caia abaixo de 50%, já as plantas alpinas, o valor de suporte cai para 60 passagens e para comunidades de tundra ártica, apenas 8 passagens.

Gonçalves e Girardi-Deiro (1986) estudaram o efeito de três cargas animais sobre a vegetação de um campo natural (tipo misto) e verificaram que pressões de pastejo leves provocaram a formação de gramíneas de baixa qualidade e plantas indesejáveis, o que resultou em diminuição da capacidade de suporte da área. Em pressões moderadas e altas a composição botânica foi favorável. Para Styczen e Morgan (1995, p 50).

O pastoreio contínuo e intenso geralmente leva a perda da cobertura vegetal. As plantas não têm folhas suficientes para a fotossíntese e morrem, enquanto os danos aos pontos de crescimento impedem sua regeneração.

O pisoteio animal provoca a compactação do solo e diminui a taxa de infiltração e o crescimento radicular das plantas, mas isso dependerá da classe de solo, do teor de umidade e da taxa de lotação animal (MARCHÃO *et al.*, 2007). Quando as plantas perdem suas folhas no solo, renovam seus sistemas radiculares e há deposição de dejetos animais sobre o solo, o efeito do pisoteio é atenuado (TRUJILLO *et al.*, 2006).

A compactação do solo exerce um papel no crescimento das plantas, uma vez que influencia nos processos metabólicos e nas funções vitais da planta (LEÃO *et al.*, 2006). Ela é avaliada, frequentemente, por meio da resistência do solo à penetração, que deve ter valores que possibilitem o alongamento e a exploração das raízes no solo, para que elas possam absorver nutrientes e água como também permitir um espaço poroso suficiente para a movimentação de gases e água. (LETEY, 1985; SILVA *et al.*, 1994; IMHOFF *et al.*, 2000).

- *Matéria orgânica*

As plantas ao retornarem ao solo como matéria orgânica possuem uma função vital na agregação das partículas do solo. A matéria orgânica aumenta a resistência do solo à compressão, tornando-o mais coeso, menos denso e flexível (BRAIDA *et al.*, 2010). Durante a degradação dos materiais orgânicos do solo pela atividade microbiana e faunística do solo são formados os compostos estabilizadores. Logo, o nível de atividade biológica ou a velocidade de degradação do material orgânico indicam a estabilidade relativa dos agregados do solo (STYCZEN; MORGAN, 1995).

- *Sobrecarga*

Segundo Styczen e Morgan (1995), o peso das árvores pode oferecer sobrecarga em um talude, diferentemente das gramíneas e ervas não tem contribuições significativas. Esse fator, aumenta as forças descendentes em uma encosta, diminuindo a resistência da massa de solo ao deslizamento, embora aumente a resistência ao atrito do solo.

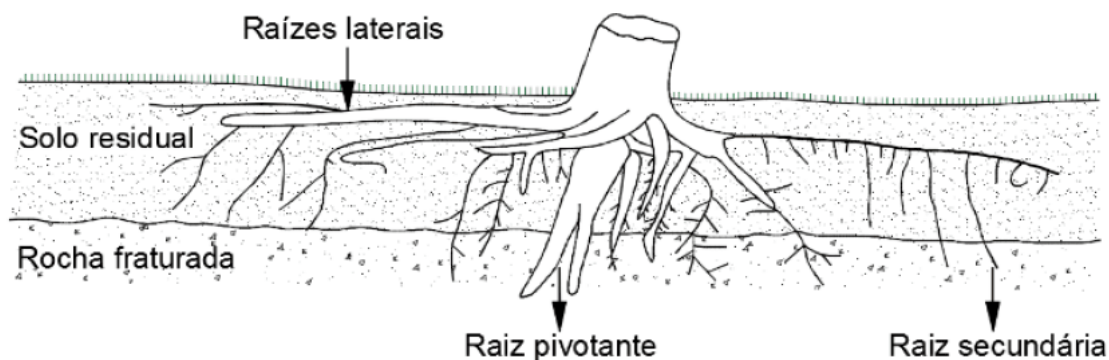
No topo de uma encosta, a sobrecarga pode diminuir a estabilidade global, já na parte inferior, contribui para a estabilidade. Para Gray e Leiser (1982), a sobrecarga é benéfica, quando o talude é relativamente suave, os valores de coesão são baixos, o ângulo de atrito e nível piezométrico são altos.

- *Coesão e estabilidade do solo*

Os sistemas radiculares das plantas interagem com o solo e provocam um aumento na resistência do solo devido ao aumento de coesão provocada pela união do composto fibra-solo e pela adesão das partículas do solo às raízes (STY CZEN; MORGAN, 1995).

Os acréscimos de coesão variam de 1 a 25 kPa (NORRIS *et al.*, 2008). Além disso, atuam como fibras de grande resistência à tração (GRAY; LEISER, 1982; WU, 1995). Sotir e Gray (1997) alegam que as fibras deste sistema impactam na resistência a deslizamentos superficiais ou movimentações por cisalhamento em solos arenosos com pouca, ou nenhuma coesão intrínseca.

Figura 5- Componentes do sistema radicular



Fonte: Adaptado de Gray e Sotir (1996).

Já em relação ao ângulo de atrito interno, Tengbeh (1989), descobriu que as raízes em um solo arenoso, provocaram aumento neste fator, mas em solos franco-argiloso-arenoso, esse efeito não foi significativo. Os incrementos na resistência ao

cisalhamento dos solos, quando utilizada a vegetação, é mais intenso nas camadas superficiais do solo, onde existe uma maior densidade de raízes. (ABERNETHY; RUTHERFORD, 2001). No entanto, à medida que se aprofunda no perfil de solo, a contribuição na resistência decresce (GRAY, 1995).

Segundo Coelho e Pereira (2006), o reforçamento radicular não é constante em todas situações, pois depende de uma série de fatores, como os valores de resistência à tensão das raízes, propriedades da interface entre raízes e o solo, da arquitetura radicular (Quadro 4), espaçamento, diâmetro e massa de solo explorada pelas raízes, espessura e declividade do perfil do solo do talude e parâmetros geotécnicos relacionados à resistência ao cisalhamento do solo.

Quadro 4- Arquitetura radicular

Tipo	Características	Função
	Tipo H: mais de 80% das raízes se desenvolvem até uma profundidade de cerca de 60 cm; Muitas se estendem horizontalmente	Indicadas para a estabilização do talude
	Tipo V-H: o desenvolvimento máximo se dá a profundidades maiores, mas a maioria situa-se até 60 cm de profundidade; a raiz central é forte e as laterais crescem horizontalmente, com comprimentos longos.	
	Tipo R: o desenvolvimento máximo atinge grandes profundidades e somente 20% situam-se nos 60 cm iniciais; muitas raízes se estendem obliquamente e sua abrangência lateral é extensa.	

	Tipo V: semelhante ao tipo V-H, mas as raízes horizontais são curtas.	Benéfica para resistir ao vento
	Tipo M: mais de 80% das raízes ocorrem na faixa dos 30 cm de profundidade, com extensão lateral pequena.	Aumento de resistência superficial do talude

Fonte: Fiori e Carmignani (2009).

Quanto mais as raízes conseguem se aprofundar e alcançar a camada de rocha subjacente ou penetrar em zonas de transição, onde a resistência do solo aumenta com a profundidade, maior será a transferência de forças das áreas de menor resistência para as áreas de maior resistência (GREEHWAY, 1987). Além disso, a estabilidade do talude é melhorada quando as raízes são bem distribuídas no solo, todavia, em um talude é provável que as raízes se distribuam de maneira assimétrica ao redor da planta (NICOLL *et al.*, 2006).

Os sistemas radiculares mais densos são mais eficazes no aumento do cisalhamento do solo (GRAY; SOTIR, 1996). Segundo Coelho e Pereira (1996), as raízes mais finas possuem uma alta superfície específica em relação a raízes de maiores diâmetros e por isso apresentam uma maior resistência ao arranquio.

Para os autores, essas raízes em altas concentrações são mais eficazes no aumento da resistência ao cisalhamento do que poucas raízes de maiores diâmetro, embora sejam mais suscetíveis ao desaparecimento e definhamento, em caso de lesões ou debilidade fisiológica, o que reduziria a estabilidade dos solos, dado que a resistência a tensão das raízes reduziria nestes casos. O decréscimo na resistência a tensão atingiria um valor mínimo que voltaria a crescer caso a vegetação fisiologicamente ativa emita novas radículas (GRAY; SOTIR, 1996).

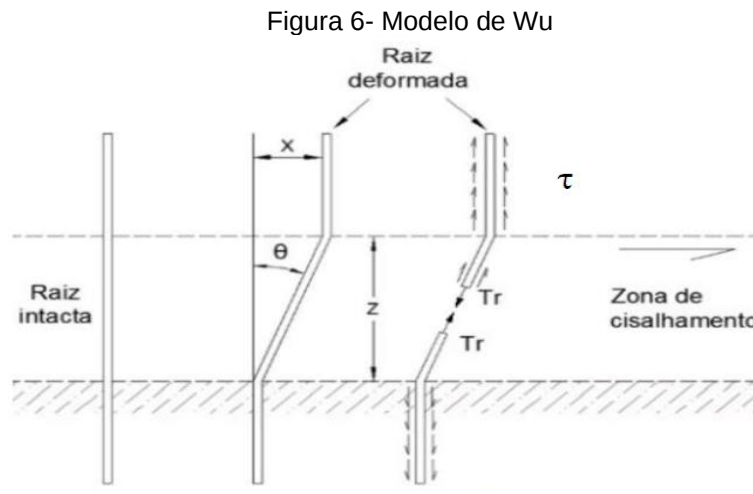
As raízes, em algumas situações desfavoráveis, encontram dificuldades para se estenderem e crescerem. Esse processo é potencialmente desestabilizador, e algumas fissuras e juntas nas rochas podem ser abertas pelo seu avanço ao longo perfil do solo. Quando a vegetação se instala em encostas íngremes com planos

articulares ou fissuras muito inclinadas, a cunha das raízes das plantas pode desestabilizar e mover blocos de rocha, já em encostas de terra (solo) essa probabilidade é menor (STYCZEN; RICKSON, 1995).

Em casos de pouca penetração das raízes ao longo do perfil do solo, elas tendem a se concentrar nas camadas superficiais em razão das exigências de oxigenação das suas células, mas ainda assim, conseguem aumentar a resistência dessas camadas a processos erosivos (COELHO; PEREIRA, 2006).

2.2.2.1 Quantificação do reforço das raízes

As abordagens empregadas para quantificar a vegetação devem considerar o alcance do sistema radicular no perfil do solo, dado que cada planta tem raízes que atuam em diferentes profundidades (STYCZEN; MORGAN, 1995). A estimativa mais utilizada para encontrar a contribuição das raízes na resistência do solo ao cisalhamento, é baseado no modelo perpendicular de reforço radicular (Figura 6) de Wu (1976).



Fonte: Wu (1976).

Onde:

Z = Espessura da zona de cisalhamento;

X = Deflexão horizontal da raiz;

θ = ângulo de distorção cisalhante;

T_R = tensão de tração nas raízes;

t_r =resistência média nas raízes por unidade de área de solo (kPa);

A contribuição das raízes para o aumento da resistência ao cisalhamento do solo (ΔS), e dada por (GRAY; LEISER, 1982):

Equação 8- Contribuição das raízes resistência ao cisalhamento

$$\Delta S = t_r + (\cos\theta \operatorname{tg}\phi + \operatorname{sen}\theta) \quad (8)$$

Onde:

t_r =resistência média nas raízes por unidade de área de solo (kPa);

ϕ =ângulo de atrito interno do solo (°);

ΔS = Aumento de resistência ao cisalhamento (kPa);

θ =ângulo de distorção cisalhante (°);

Gray e Leiser (1982), definiu a resistência média das raízes por unidade de área do solo (t_r) como:

Equação 9- Resistência média das raízes por unidade de área do solo

$$t_r = T_R \frac{A_r}{A} \quad (9)$$

Onde:

T_R = resistência média à tração das raízes (kPa ou mPa);

(A_r/A) = Razão da área radicular pela área da seção transversal do solo ocupada por raízes (adimensional), também chamada de RAR ou *root área ratio*;

A área transversal do solo ocupada por raízes (A_r), é determinada por:

Equação 10- Área transversal do solo ocupado por raízes (A_r)

$$A_r = \sum n_i \cdot a_i \quad (10)$$

Onde:

n_i =número de raízes de uma determinada classe de tamanho de diâmetro i ;

a_i =área da seção transversal das raízes da classe de diâmetro i (m²);

A principal restrição dessa abordagem é a indeterminação do ângulo de cisalhamento (θ), alguns estudos apontam que ele varia de 40 ° a 90° (WALDRON, 1977; WU; MCKINNELL; SWANSTON, 1979). Além disso, este modelo considera a ruptura das raízes por tração, porém, essa hipótese só é aceitável caso a força de ligação entre o solo supere a resistência à tração das raízes (COPPIN; RICHARDS, 2007). No entanto, outros modelos desenvolvidos por Waldron (1977), Brenner e James (1977), *Fiber Bundle Model* (FBM-POLLEN; SIMON, 2005) e o *Root Bundle Model* (RBM-SCHWARZ, et al., 2010).

De acordo Styczen e Morgan (1995), a contribuição das raízes na resistência, é apenas um aspecto da vegetação na estabilidade de taludes, no entanto, há interações que não conseguem ser quantificadas, como por exemplo, o efeito da sucção do solo nas avaliações do fator de segurança. Além disso, os autores sugerem uma melhor investigação em relação ao efeito da infiltração ao longo do tempo.

2.3 Técnicas de Bioengenharia

As técnicas de bioengenharia, ou também chamada de engenharia natural, envolvem a utilização de elementos vivos ou inertes, associados à materiais de apoio natural ou sintético (LEWIS, 2000) que proporcionam um acréscimo na capacidade de resistência do solo em diferentes cenários de inclinação e granulometria (DURLO; SUTILI, 2005). Aplicadas em obras de estabilização de solos e sedimentos (SUTILI, DURLO, BRESSAN, 2004), obras de restabelecimento da vegetação (USDA-NRCS, 2007) como também podem otimizar outros métodos de engenharia (ARAÚJO, 2012).

A adoção das técnicas de bioengenharia requer a compreensão de conhecimentos de engenharia, geotecnia e hidrologia, assim como aspectos do meio biótico (DIAS, SANTOS, GOMES, 2011). Suas vantagens são vistas ao longo prazo devido à capacidade de crescimento e renovação da vegetação (COPPIN; STILES, 1995).

De acordo Couto (2010), essas técnicas necessitam menos de maquinário, utilizam mão de obra braçal de menor qualificação, emprega matérias naturais locais como madeira, pedras, compostos orgânicos, oferece uma boa relação custo e benefício positiva, possui compatibilidade ambiental e pode ser executada em lugares

de difícil acesso. Durlo e Sutili (2005) definiu as principais técnicas de bioengenharia descritas no Quadro 5.

Quadro 5- Resumo das principais técnicas de Bioengenharia

Técnicas	Breve descrição	Característica principal(função)
Métodos vegetativos		
1.Estacas	Estacas simples, com cerca de 40 cm, que são cravadas no talude.	Fácil implementação, preparo e transporte do material vegetal. Resultados menos imediatos. As estacas podem ser facilmente levadas pela força da água.
2.Feixes (brushlayering)	Ramos longos, amarrados, formando feixes. São usados parcialmente enterrados e fixados com pilotos e pedras, dispostos ao longo da margem.	Além do efeito normal esperado pelo desenvolvimento da vegetação, produzem imediatamente uma proteção física. É a forma ideal para ser usada entre os vãos das estruturas de madeira.
3.Banquetas	Degraus transversais à inclinação do talude são preenchidos com estacas, que são, por vezes, presas com madeira e/ou pedras e, ao final, cobertas com solo.	Ideais para taludes artificiais, como os que resultam da construção de estradas, e onde se queira criar um efeito de retenção dos sedimentos que descem da encosta.
4. Esteiras	Ramos no seu máximo comprimento são dispostos acompanhando a inclinação do talude e com as suas bases dentro da água, firmemente presas por pedras e/ou troncos. Pilotos de madeira com varas de bambu ou arame são usados para fixar os ramos contra o talude, sendo tudo coberto por uma fina camada de solo.	Restringem-se a taludes fluviais e requerem uma grande quantidade de material vegetal. Quando possíveis de serem implantadas, produzem os efeitos protetivos mais rápidos. Muito eficientes em taludes nos quais a força da água é de impacto frontal. Logo após a implantação, já suportam tensões muito altas.
5.Tranças	Ramos longos têm suas bases encravadas no solo e são trançados entre pilotos (vivos ou inertes).	Produzem ótimos efeitos quando usadas para proteger a linha da água em pequenos cursos e para reter sedimentos em taludes que não

		sofram impacto frontal da água.
6.Leivas	Leivas, normalmente de gramíneas, são transplantadas para a área, que é completamente recoberta ou o plantio pode ser feito em faixas ou quadrículas.	Podem produzir um efeito estético e de proteção quase imediato. São caras e não muito importantes para taludes fluviais de grande instabilidade.
7.Solo envelopado verde	Esta é uma técnica de solo que consiste em aplicar uma camada de solo e compactá-lo. Após isto, a biomanta será aplicada a modo de envolver todo o aterro, formando um envelope, e então, aplica-se estacas vivas entre uma camada e outra. Deve-se proceder o semeio de espécies vegetais	Recomposição de taludes, contenção de erosões e envelopamento de aterros
Retentores de sedimentos		
1.Bermalongas	Cilindros de fibras vegetais, prensadas e envolvidas por uma rede resistente de polipropileno	Retentores de sedimentos
2.Paladiças	São anteparos que deverão ser construídos nos estreitamentos dos processos erosivos lineares de pequeno e médio porte, onde não ocorra escoamento superficial concentrado ou afloramento freático intermitente ou permanente	Retenêr os sedimentos e promover uma geometria mais estável para os taludes adjacentes ao processo erosivo
Métodos germinativos		
1.Sementes	Sementes são lançadas manualmente sobre o talude, previamente modelado.	Suficientes para locais com pequena inclinação. Em taludes fluviais, são normalmente uma medida complementar.
2. Geotêxteis	Malhas construídas com restos culturais ou fibras vegetais degradáveis são impregnadas de sementes e adubos e fixadas, com estacas contra o talude.	Uma das alternativas mais caras, mas produz estabilização rápida. Pode ser usada em taludes muito íngremes e bastante degradados.

3. Hidrossemeadura	Sementes são misturadas à água, cola e adubo e lançadas mecanicamente sobre o talude.	Método dispendioso. Rápido e fácil de ser implantado quando se dispõe dos recursos e acesso para máquinas.
4. Mudas	Mudas são produzidas em viveiros e, quando adquirem o tamanho ideal, são plantadas no talude.	É importante para as espécies que não se reproduzem bem, vegetativamente.

Fonte: Durlo e Sutili (2005), adaptado

Em cenários em que a vegetação não consegue proteger seguramente as faces dos taludes, especialmente, os mais íngremes, emprega-se elementos inertes para conter a erosão (COELHO, 1998; SOUZA; SEIXAS, 2001). Esses elementos podem ser de alvenaria, fibras sintéticas, madeira “in natura” ou serrada, resíduos agrícolas, grandes pedras ou seixos que são conectados uns aos outros com arames, tela ou madeira (DURLO; SUTILI, 2005).

A cobertura vegetal utilizada nas técnicas de bioengenharia precisa apresentar um desenvolvimento rápido, durabilidade, inúmeras espécies, adaptação e facilidade de aquisição, dessa forma, deve considerar o tipo de solo, a inclinação do talude e as condições climáticas (CARVALHO, 1991).

Em algumas situações, gramíneas e leguminosas são combinadas para desenvolverem um amplo sistema radicular e auxiliarem na produção de matéria orgânica. Além disso, a junção dessas plantas diminui a incidência solar sobre o solo e o impacto das gotas da chuva (CARVALHO *et al.*, 1993).

As plantas empregadas para estabilizar os canais devem suportar graus diferentes de submersão. Na área sazonalmente inundada a cobertura vegetal deve fornecer rugosidade ao fluxo, na zona seca, poderá ter gramíneas, arbustos e árvores, no entanto, não devem ter um crescimento denso para não obstruir o fluxo de água. Em canais de fluxos rápidos ou sujeitos ao impacto das ondas, normalmente, é necessário estruturas e geotêxteis ao longo da vegetação (STYCZEN; RICKSON, 1995).

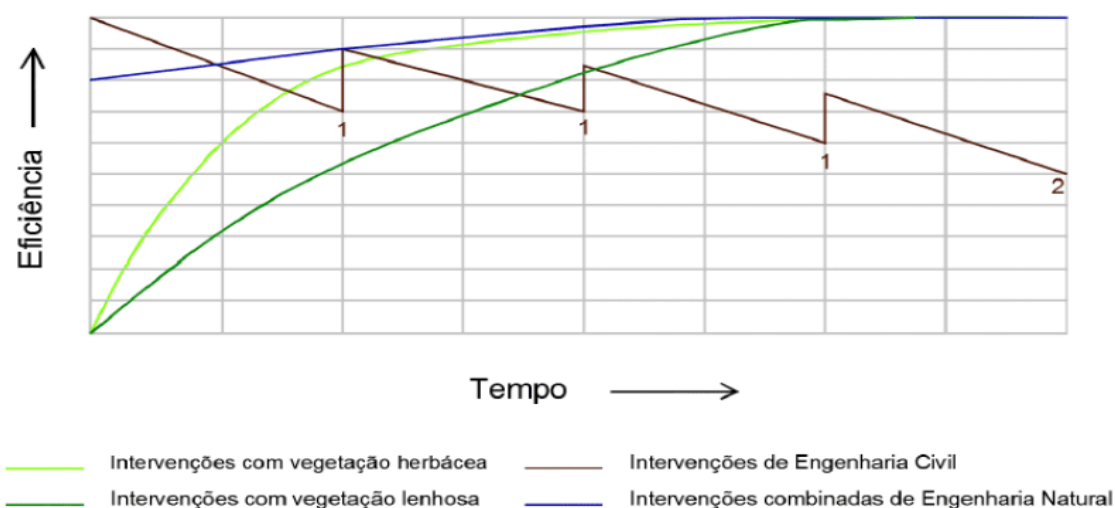
No Brasil, o emprego das espécies vegetais nativas é restrito, não há estudos suficientes para indicar as espécies nativas e as exóticas que podem ser utilizadas com maior desempenho em obras de engenharia civil (BARBOSA, 2012). A falta de estudos para determinar a resistência ao cisalhamento do solo e as suas relações

com as características do solo tem comprometido a visibilidade das técnicas de bioengenharia (ROCHA *et al.*, 2002).

2.3.1 Eficiência das técnicas de bioengenharia

Segundo Mariano (2015), às estruturas tradicionais da engenharia civil possuem vantagens imediatas na estabilização de taludes, uma vez que sua eficiência é garantida logo após a sua finalização, conforme a Figura 7, contudo, a sua eficiência pode ser reduzida ao longo do tempo, visto que a obra poderá ser degradada e exigirá manutenções futuras e, em alguns casos, será precisará ser reconstruída.

Figura 7- Comparação entre a eficiência das intervenções da Bioengenharia e as Tradicionais na Engenharia Civil



Fonte: Adaptado de Rauch (2014) in Sousa (2015).

Para Mariano (2015), a combinação das técnicas de bioengenharia com as estruturas tradicionais, possuem uma eficiência equilibrada após a sua implantação e alcançam um valor máximo no transcorrer do tempo. Em oposição, o autor destaca que as obras que envolvem as técnicas de bioengenharia, que empregam somente a vegetação, apresentam resultados nulos inicialmente, mas no decorrer do seu desenvolvimento, se tornam mais eficientes, especialmente a vegetação herbácea, graças ao seu rápido desenvolvimento (SOUZA, 2015).

2.4 Vegetação simulada

Styczen e Morgan (1995) salientam que a vegetação simulada seja ela na forma de cobertura morta ou de geotêxtil trazem benefícios imediatos no controle da erosão e estabilidade encostas, visto que elas imitam as propriedades da vegetação natural como os efeitos da copa, do caule e da raiz. Em algumas situações, elas podem modificar as condições microclimáticas, o solo local e afetar a taxa de estabelecimento da vegetação.

Para os autores, a escolha da cobertura morta deve ser criteriosa, coberturas que apresentam proporções menores de carbono/nitrogênio(C:N) tendem a se decompor mais rápido, como por exemplo as leguminosas, enquanto as palhas e os talos de milho têm maior durabilidade.

Em taludes com inclinações menores e velocidades de fluxo baixas, usualmente, utilizam-se os geotêxteis biodegradáveis, para proteger temporariamente a superfície do solo (MORETTO, 2012). Já para uma proteção permanente, podem ser usados geotêxteis sintéticos que normalmente não biodegradáveis (STYCZEN; MORGAN, 1995)

Segundo Styczen e Morgan (1995), os materiais naturais dos geotêxteis temporários, são degradados com o tempo devido a luz solar, e à medida que se decompõem, a vegetação se desenvolve de maneira suficiente para controlar os processos erosivos.

2.5 Retentores de sedimentos

Após a aplicação das técnicas de bioengenharia para estabilização, deve ser realizado o ancoramento dos sedimentos para evitar que as primeiras chuvas comprometam sua eficácia. Essa ancoragem é realizada por retentores de sedimentos que são ferramentas essenciais para controlar a erosão em leito de canais e voçorocas (COUTO, 2010). Segundo os autores, à medida que os sedimentos são depositados, a declividade do processo erosivo linear diminui, acarretando em uma maior estabilidade do talude que melhora a sua geometria, podendo se tornar suavizada e aumentar o fator de segurança.

Em margens de rios sujeitos a erosões, assoreamentos, solapamentos e deslizamentos, normalmente, utilizam-se esses retentores de sedimentos para a estabilização das margens e preservação das áreas ciliares que normalmente, encontram-se destacadas. Dentre os métodos adotados para esse fim, incluem o uso de bermalongas e paladiças de madeira, bem como estacas vivas, com o solo compactado para promover o enraizamento e estabilidade das margens (COUTO, 2010).

2.6 Drenagem dos taludes

As condições de drenagem do corpo do talude devem ser consideradas para uma maior eficácia das técnicas de bioengenharia (CARVALHO et al., 2006). Segundo Rosa e Gaiofatto (2018), a percolação da água no talude pode reduzir a sua resistência, propiciar o desenvolvimento das pressões neutras, aumentar o peso do talude e a ação erosiva interna (piping) e externa. Dessa forma, os autores sugerem sistemas de drenagem subterrâneos ou superficiais, para reduzirem a carga da pressão hidrostática e neutra sobre os taludes.

Nos sistemas de drenagem superficiais, são empregados métodos como terraços, canaletas verdes ou de concreto, dissipadores de energia, bacias de sedimentação e caixas dissipadores. Já nos sistemas de drenagem subterrânea, podem ser empregados cilindros drenantes (COUTO, 2010).

2.7 Estabelecimento e manutenção da vegetação

A vegetação deve obedecer a requisitos funcionais para estabilizar taludes. Todavia, as condições locais podem ser difíceis e impor limites no seu processo de estabelecimento. Diante disso, Styczen e Morgan (1995), estabeleceram princípios para contornar esses limites, discutidos a seguir.

2.7.1 Vegetação natural: Potencial e Influência do clima

Em cada ambiente particular, existem condições específicas, vistas como uma pressão evolutiva que impacta nos tipos de espécies de plantas e comunidades de

plantas que evoluem e se adaptam àquele local. Inicialmente, o solo descoberto é colonizado por espécies móveis de rápido estabelecimento, geralmente gramíneas e à medida que vão crescendo, provocam modificações no meio e ao longo do tempo, a comunidade se torna mais competitiva e progressiva por espécies maiores, como arbustos e árvores, resultando, eventualmente, em matagais, florestas até chegar no clímax climático, processo esse, denominado de sucessão natural.

Um dos fatores que mais influência neste processo, é o clima. Cada zona climática que circunda a Terra, representa os lugares com as condições climáticas, tipos de solo e vegetação similares, o que facilita na escolha das técnicas de bioengenharia, uma vez que viabiliza a seleção de espécies adaptadas.

2.7.2 Fatores que afetam a seleção das espécies

As encostas são consideradas ambientes de alta tensão, logo, as plantas cultivadas devem ser tolerantes e ser compatíveis com esse ambiente. O sol e os ventos devem ser considerados na seleção da vegetação, uma vez que poderá influenciar na dinâmica e sucessão das comunidades. Outro fator crucial, é o fogo, encostas voltadas para o sol tendem a secar muito mais e a se queimarem.

A combinação das propriedades geotécnicas das espécies em uma situação, deve considerar o padrão de crescimento anual. O crescimento das plantas é sazonal e algumas espécies possuem um período de dormência fora da estação de crescimento, no qual geralmente, perde parte do sistema radicular. Dessa forma, a espécie selecionada deve ser capaz de fornecer a função que lhe é exigida na estação em que é mais necessária.

2.7.3 Processo de estabelecimento da vegetação

O estabelecimento da cobertura vegetal envolve técnicas de semeadura e plantio, além de cuidados posteriores a fim que a vegetação esteja totalmente estabelecida. Sua capacidade de estabelecimento dependerá do acesso da sua superfície. Em declives de até cerca de 30%, as máquinas agrícolas podem cultivar e preparar o solo, algumas máquinas especializadas podem trabalhar em até 50%, mas em situações mais íngremes, é necessário o trabalho manual.

Os fatores físicos como a textura e a densidade do solo determinarão a natureza do meio de enraizamento. Esses fatores são cruciais em solos modificados e encostas formadas, visto que a construção do perfil do solo impactará nas suas propriedades.

O desenvolvimento das plantas depende também de fatores químicos como a fertilidade e pH do solo. A fertilidade pode ser facilmente manipulada usando cal e fertilizantes, contudo, a aplicação intensiva ou regular desses materiais não é apropriada.

O ideal é aumentar a fertilidade de uma maneira que permita a ciclagem natural de nutrientes, com reserva de nitrogênio, provindas, normalmente da matéria orgânica e da atividade microbiana, a fim de sustentar o crescimento saudável da vegetação, os melhores materiais para esse fim, são os fertilizantes orgânicos ou adubos. Além disso, podem ser cultivadas espécies que apresentam uma relação simbiótica com as bactérias fixadoras de nitrogênio, como as leguminosas.

2.7.4 Gestão

Inspeções regulares devem ser feitas para monitorar a condição da vegetação, as informações sobre seu estado devem estar em calendários e devem estar ligados a monitorização das operações de gestão e vinculadas aos ciclos de crescimento e dormência da vegetação, caso exista.

Qualquer dano à integridade, pode ser uma ameaça à estabilidade, sejam eles naturais ou provocados pelo homem. Os espaços vazios na vegetação, são vistos como áreas de fragilidade e devem ser evitados pela gestão que deverá garantir um grau mínimo de uniformidade na cobertura vegetal, isso incluirá a reposição de mudas e a manipulação da fertilização do solo.

A gestão encorajar a sucessão no sentido que ela avance em direção a diversidade de espécies, com objetivo de maximizar a estabilidade, uma vez que parte das espécies podem sofrer danos, mas as espécies resistentes podem responder às perdas, expandindo-se para o espaço ocupado pelas afetadas e substituindo-as no seu papel protetor.

A gestão poderá buscar duas estratégias:

- A primeira é procurar estabelecer a vegetação ideal ao longo prazo o mais rápido possível, introduzindo espécies de sub clímax ou clímax, mas exigiria incentivos para alcançar o fim desejado em curto tempo como também para manter diante as mudanças sucessivas.
- A segunda abordagem consiste no estabelecimento de uma comunidade pioneira que possua as propriedades biotécnicas e se desenvolva num clímax ou subclímax adequado por sucessão natural, o que necessitaria de menos gestão, na qual garantiria apenas, a sucessão na direção necessária.

Ao longo prazo, precisará verificar a resposta da vegetação às pressões externas, como ataques de pragas ou doenças. A instabilidade interna pode tornar comunidades ou monoculturas pobres em espécies, por exemplo, a fase de envelhecimento na vida espécie dominante é atingida pela maioria dos indivíduos ao mesmo tempo, resultando em grandes lacunas na cobertura vegetal. Como também, deverá controlar o desenvolvimento das diversas espécies e o seu tamanho.

De maneira geral, a gestão precisa preparar o terreno para que a vegetação se estabeleça. Devido à dificuldade inicial de estabelecimento, ela precisará monitorar e programar a aplicação de fertilizantes, cobertura morta, controlar as ervas daninhas ou combater as deficiências que deverão ser corrigidas por uma nova sementeira ou plantação. Esse processo poderá durar cerca de dois a três anos e os custos nesta fase inicial são elevados, todavia, são compensados pelos custos mais baixos de manutenção e monitorização ao longo do tempo.

3. METODOLOGIA

O propósito do estudo é analisar e avaliar estudos de caso nos quais foram empregues as técnicas de bioengenharia para estabilizar taludes no Brasil. A pesquisa empregou uma abordagem abrangente por meio de uma revisão bibliográfica, no qual foram incluídos livros, artigos acadêmicos e relatórios técnicos que continham explicações detalhadas sobre a temática em questão como um recurso para embasar as análises. Essa pesquisa, de acordo com Demo (2000) tem como objetivo reconstruir ideias e teorias, buscando aprimorar fundamentos teóricos e práticas.

A análise concentrou-se nos mecanismos fundamentais da vegetação para a estabilidade de taludes e na eficiência das técnicas de bioengenharia utilizadas. A obra “Slope Stabilization and Erosion Control. A Bioengineering Approach” dos autores Styczen e Morgan (1995) desempenhou um papel crucial nesta pesquisa, destacando-se pela sua ampla cobertura sobre o tema e pelas contribuições valiosas de pesquisadores renomados do campo de bioengenharia.

As palavras-chave selecionadas para encontrar os artigos que apresentavam os estudos de caso foram “Eficácia das técnicas de bioengenharia”, “Estabilidade de taludes”, “Riscos geotécnicos” e “Sustentabilidade”. Com base em uma extensa pesquisa no Google Acadêmico, apareceram 6520 resultados, em sua maioria, sugerindo o uso das técnicas de bioengenharia em situações diversas, artigos que descreviam as técnicas e ou que ofereciam contribuição irrelevante para a pesquisa.

Os artigos que pareciam relevantes foram lidos na totalidade, mas foi selecionado os artigos que avaliaram as técnicas de bioengenharia de maneira quantitativa e qualitativa nos locais onde foram empregadas. Segundo Teixeira (2005), a pesquisa qualitativa o pesquisador compreende os fenômenos pela sua descrição e interpretação. Já a pesquisa quantitativa, o pesquisador gera a partir de informações e opiniões, valores quantitativos que podem ser examinados (SILVA; MENEZES, 2001). Os três artigos científicos relevantes que apresentavam essas abordagens de pesquisa, foram:

- Resistência ao cisalhamento de solos e taludes vegetados com capim vetiver de Barbosa e Lima (2013).
- Estabilização de taludes com técnicas de bioengenharia de solos no Baixo São Francisco de Holanda *et al.* (2008).

-Análise de estabilidade de um talude de corte submetido a técnicas de bioengenharia de Oliveria *et al.* (2012).

Ademais, foram criados mapa de localização de cada estudo de caso, fazendo uso das funcionalidades disponíveis no QGIS, um *software* de Sistema de Informação Geográfica (SIG), para identificação das posições dos sítios de estudo. Os critérios de avaliação incluíram a eficácia das intervenções, estratégias adotadas, limitações, viabilidade e os resultados obtidos pelos autores. Além disso, realizou-se comparações em relação a resistência e estabilidade entre os resultados alcançados nos casos.

Segundo Naína Tumelero (2019, online), “as interpretações dos dados irão confirmar ou rejeitar as hipóteses definidas e contribuir para a solução do problema de pesquisa.” Além disso, foram realizadas propostas e recomendações baseadas na revisão bibliográfica para orientar as futuras pesquisas e para o emprego seguro e sustentável das técnicas no Brasil.

4. ESTUDOS DE CASO

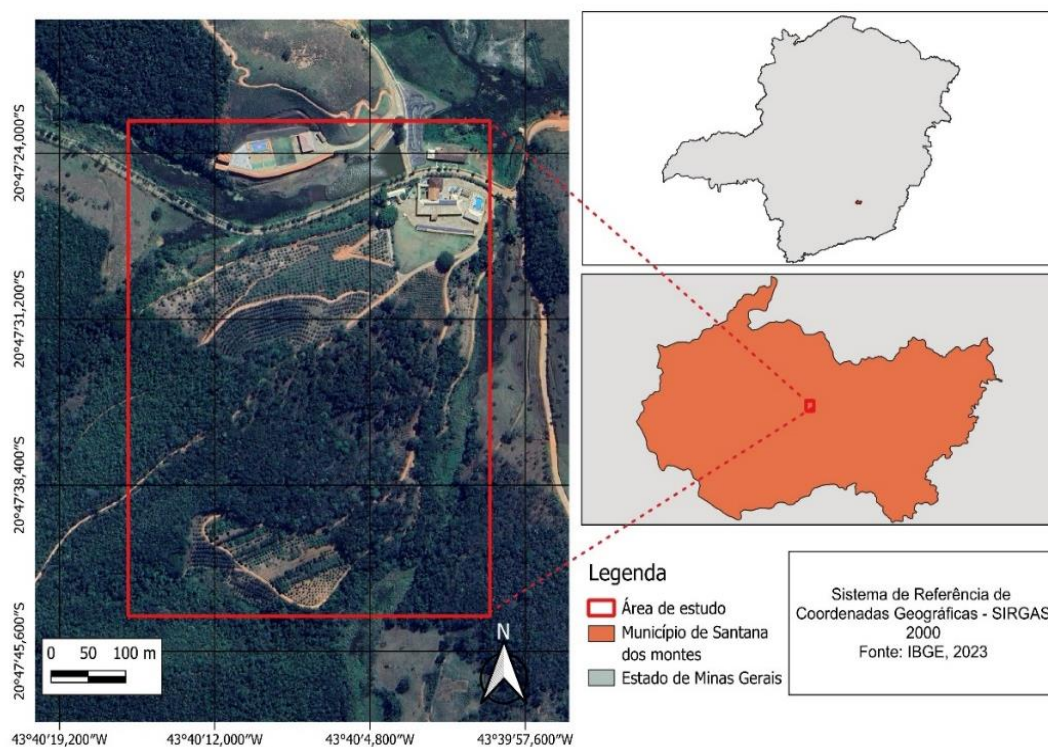
4.1 Caso 1

Uma das plantas mais recomendadas na bioengenharia para controlar os processos erosivos e reforçar os solos é o capim vetiver (BARBOSA, 2012). Essa planta é comumente cultivada na Indonésia, Índias Ocidentais, África e Polinésia e possui raízes que conseguem penetrar até 3 metros de profundidade e alcançar até 2 metros de altura (TRUONG *et al.*, 2008). Segundo Truong e Truong (2013), o seu caule é rígido e o oferece resistência ao fluxo de água, reduzindo a velocidade do fluxo superficial e retendo os sedimentos carregados junto ao solo, e normalmente, é plantado em linhas alinhadas as curvas de nível, formando uma barreira protetora.

A preferência pelo capim vetiver é dada pela sua adaptabilidade às condições ambientais diversas (ANDRADE *et al.*, 2005). Essa espécie de planta é resistente às temperaturas que variam entre 9 ° a 35°, apta para lugares com chuvas variam entre 500 a 1500 mm, consegue se desenvolver em solos de baixa fertilidade, com qualquer condição de drenagem, tolerante a secas, pragas, acidez, geadas, fogo e alagamento (PEREIRA, 2006). No entanto, em temperaturas inferiores a 15°C, tem a sua atividade fotossintética reduzida, sendo caracterizada como uma planta com fisiologia C4(SILVA, 1995).

Com intuito de avaliar os indicadores de resistência do solo e a estabilidade do talude após o plantio desse capim, Barbosa e Lima (2013) retiraram amostras indeformadas de solo de uma unidade da DEFLOR Bioengenharia, no município de Santana dos Montes, em Minas Gerais (Figura 8). Segundo ABNT e o Sistema Unificado, o solo da área de estudo é um areno-siltoso.

Figura 8- Caracterização do Sítio do Caso 1



Fonte: Autoria Própria

Por meio de amostras indeformadas do solo de um terreno plano sem vegetação e cultivadas com capim vetiver, nas idades de 1 a 4 anos de cultivo e amostras sem vegetação e com a cobertura do capim vetiver de aproximadamente 7 anos de plantio de um talude de mesmo terreno, efetuaram experimentos de cisalhamento direto, conforme a abordagem proposta por Chaulya *et al.* (2000) para a determinação dos os parâmetros de resistência do solo.

Os ensaios de cisalhamento direto foram conduzidos na forma drenada, seguindo a ASTM D3080 (ASTM, 2004), a velocidade foi previamente definida no ensaio conforme Head (1994). A determinação dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno foi realizada segundo Lambe & Whitman (1951) e obtida aplicando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, nas quais foram aplicadas tensões normais de 50,100,200 e 400 kPa nas amostras indeformadas

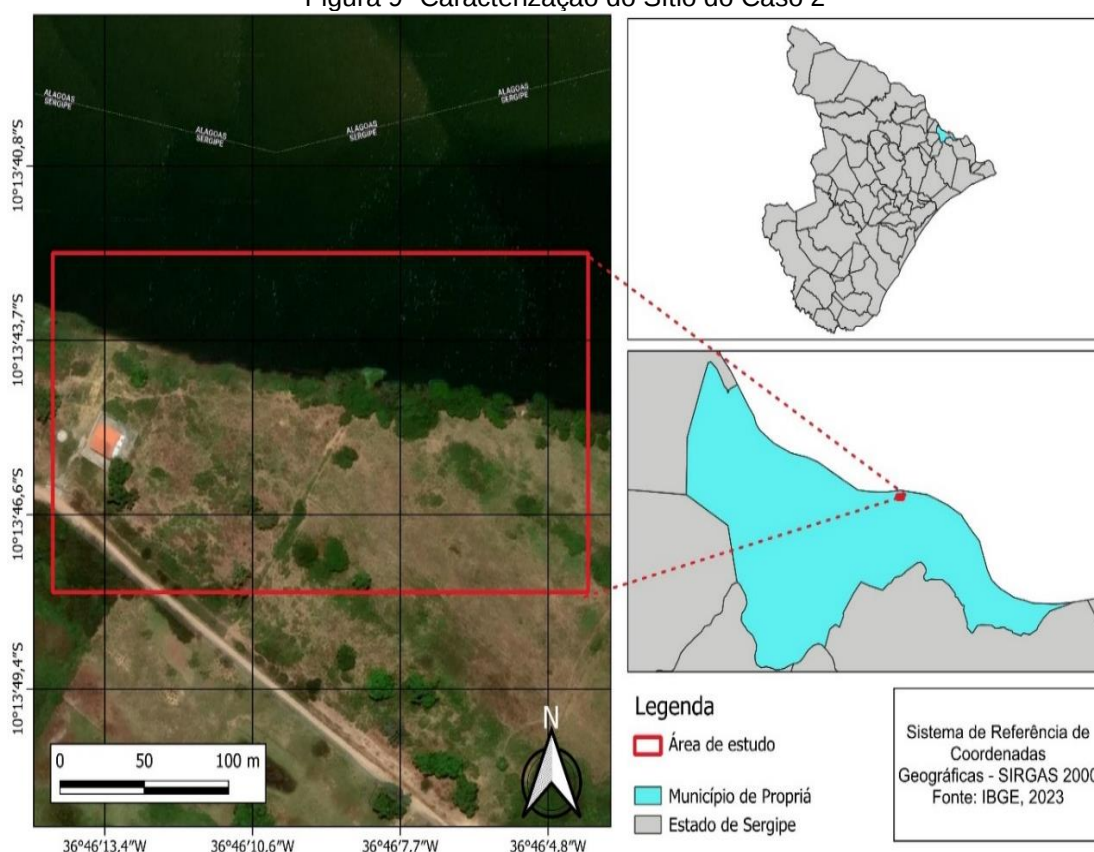
O coeficiente de segurança médio do talude foi encontrado por meio de simulações feitas pelo software da Geoslope pelo método do equilíbrio limite, empregando os métodos de Bishop, Janbu e Morgenstern-Price. Nessas simulações, considerou-se o solo homogêneo, inclinação do talude a 45 ° e rompimento ocorrendo na camada superficial.

4.2 Caso 2

A Bacia do Rio São Francisco tem sido contemplada com projetos elétricos ao passar do tempo que tem alterado o regime hídrico no seu baixo curso. Associada a isso, o desmatamento da mata ciliar, vem provocando o solapamento da base dos taludes marginais.

Diante disso, Holanda *et al.* (2008) aplicaram as técnicas de bioengenharia para estabilizar o talude marginal no Baixo do curso do São Francisco (Figura 9), como também agregaram espécies vegetais (arbustivas e gramíneas) para formarem um ambiente adequado para a recuperação da vegetação ciliar no município de Propriá, no estado de Sergipe. A região de estudo exibia as seguintes características:

Figura 9- Caracterização do Sítio do Caso 2



Fonte: Autoria Própria

- O clima da região definido como megatérmico Semi -Árido Brando, com temperatura anual de 26°,
- A precipitação média anual era de 806,1 mm por ano.
- O período chuvoso era no mês de março a agosto.

- O solo classificado como Neossolo Flúvico, de acordo Casado *et al.* (2002), é composto de mais de 90% de areia média, fina e muito fina.
- O solo apresentava baixa coesão, resistência ao cisalhamento e ângulo de atrito (de 17 a 25°).
- O fator de Segurança (FS) do talude marginal era igual a 0,667.
- O talude marginal possuía uma declividade média de 34%, altura de 3,35m, com dimensões de 127 m de comprimento por 11m de largura.

A área experimental foi dividida em dois tratamentos, uma com tratamento de bioengenharia com 70m de comprimento e a outra sem o uso (testemunha) com 57 de comprimento, ambas com áreas semelhantes.

Em junho de 2004, foi iniciado a suavização do talude de maneira manual, e em seguida, empregou-se o geotêxtil Fibrax ®400 BF, constituído de 100% de fibra de coco, entrelaçada por uma malha de propileno foto degradável, que possui como particularidade, um período de degradação de 48 a 60 meses, fixado com grampo de aço em forma de “V”.

Para ancorar o geotêxtil no solo e promover uma cobertura rápida do talude, semeou-se a gramínea *Brachiaria decumbens*. De acordo Pereira (2006), essa gramínea suporta temperaturas de 15 ° a 30 °, é apropriada para ambientes com níveis de precipitação entre 800 a 1200 mm, cresce em solos pobres e ácidos, apresentando tolerância a secas e se propagam por meio de sementes como também consegue proteger o solo da erosão e suportar o pastejo (BIANCO *et al.*, 2005). Além disso, a gramínea *Brachiaria decumbens* é perene e possui raízes com alto poder de penetração no solo (OLIVEIRA *et al.*, 2006).

Ao longo da linha d'água, utilizou-se o retentor de sedimentos Bermalonga ® D-40 (Deflor, 2005), composto de fibras vegetais desidratadas prensadas, cobertas pela mesma malha de polipropileno foto degradável, no qual foi fixado no pé do talude, utilizando-se estacas de maçaranduba que foram colocadas na extremidade e introduzidas no meio dos Bermalongas.

As mudas utilizadas para recuperação da vegetação ciliar foram de espécies florestais nativas da região que foram plantadas dentro dos limites da área experimental, são elas: aroeira vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi.), mulungu (*Erythrina velutina* Willd.), tamboril (*Enterolobium contortisiliquum* (Vellozo) Morong),

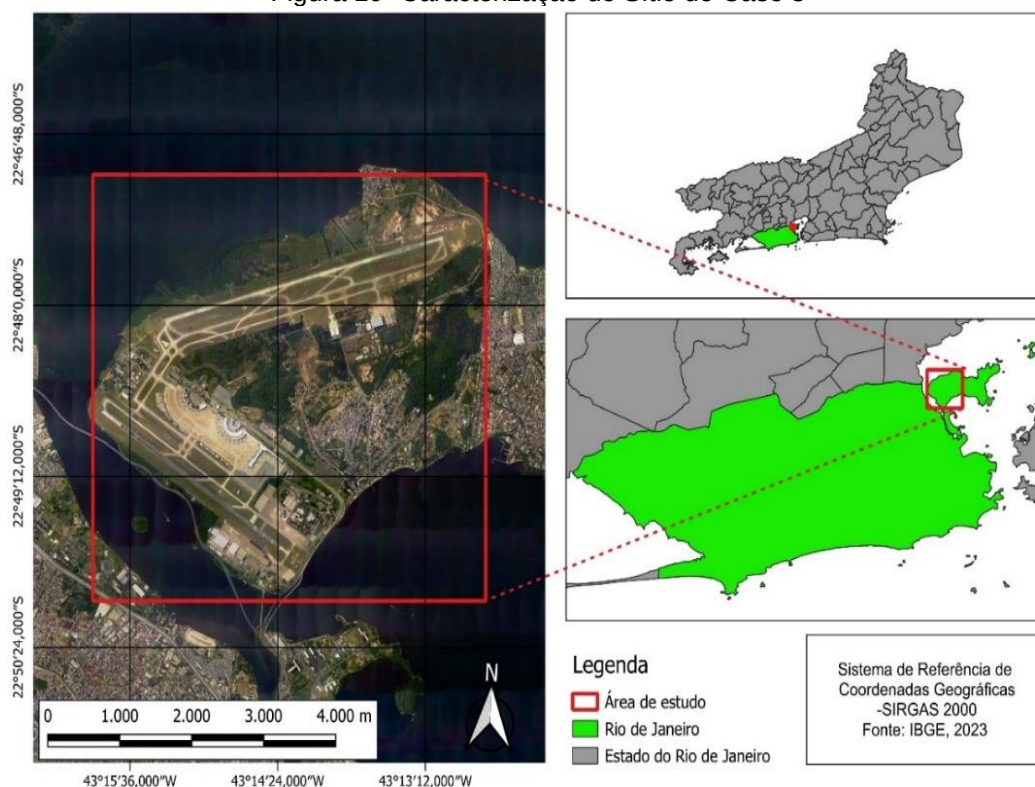
pau-pombo (*Tapirira guianensis* Aubl.), canafístula (*Cassia grandis* L.f.) e pau-ferro (*Caesalpinia leiostachya* (Bentham) Ducke).

A avaliação do comportamento do talude foi realizada por meio de um levantamento planialtimétrico aos 30, 180, 360 e 540 dias de realização do experimento. Utilizando métodos topográficos, como a criação de um modelo digital do terreno por irradiação e o uso de uma estação total Trimble 3303 DR, para avaliar o processo erosivo. Além disso, seis seções transversais foram medidas a cada vinte metros ao longo do sítio experimental. Posteriormente, realizou-se a confecção dos perfis e a interpretação dos dados encontrados no laboratório.

4.3 Caso 3

Em um talude corte localizado no Aeroporto Internacional do RJ-Galeão/Tom Jobim (Figura 10), foi realizado um estudo conduzido por Oliveira *et al.* (2012), no qual foi constatado um aumento na resistência ao cisalhamento estimulado pela vegetação implantada, recorrendo às técnicas de bioengenharia. O talude do estudo, está em uma área degradada, chamada de Área Z, que durante a década de 1970, serviu como área de empréstimo e desde 2007 tem sido recuperado por meio das técnicas de bioengenharia, sob a supervisão da Embrapa Solos.

Figura 10- Caracterização do Sítio do Caso 3



Fonte: Autoria Própria

As primeiras obras de recuperação do talude de corte, iniciaram-se com a conformação com inclinação 1:1,5, instalação de terraços e bacias de sedimentação para direcionar o escoamento superficial, recobrimento do solo com aparas de grama para proteger da erosão pluvial e plantação de cordões de capim vetiver na crista do talude para conter as enxurradas. Após essa etapa, foram criadas mais três parcelas revegetadas (Figura 11), utilizando técnicas distintas e uma parcela vazia, sem cobertura vegetal para efeitos de comparação.

Figura 11- Parcelas antes do trabalho de revegetação



Fonte: Oliveira *et al* (2012).

Na primeira parcela, foram plantados linhas de capim Vetiver, leguminosas arbustivas e arbóreas de rápido crescimento, inoculadas com bactérias fixadoras de nitrogênio e fungos micorrízicos arbusculares. A segunda parcela, era uma parcela vazia, na terceira parcela, usou gramíneas e leguminosas rasteiras, usando o método da hidrossemeadura e a última parcela, aplicou a biomanta antierosiva com semeio a lanço.

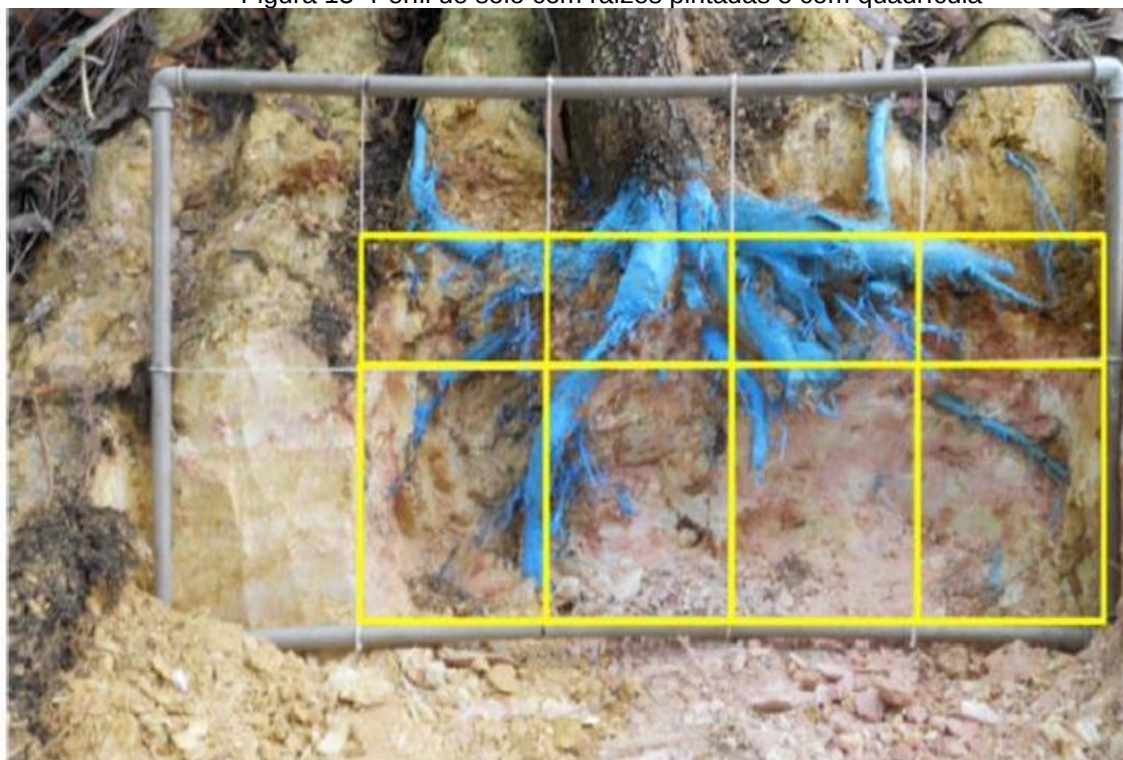
Oliveira *et al.* (2012) analisaram a primeira e a segunda parcela (figura 12). Para isso, executaram dois procedimentos, o primeiro consistia na análise do perfil do solo (método das trincheiras) por meio de imagens digitais processadas e analisadas pelo Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo- *SIARCS*® (JORGE; CRESTANA, 1996). Este sistema, permite dividir a imagem em segmentos distintos (Figura 13), em função do número de colunas e linhas desejadas, mensurando o percentual da área radicular em cada segmento (OLIVEIRA *et al.*, 2012).

Figura 12- Parcelas 1 e 2 após revegetação



Fonte: Olivera *et al.* (2012).

Figura 13- Perfil de solo com raízes pintadas e com quadrícula



Fonte: Olivera *et al.* (2012).

Posteriormente, realizou ensaios de cisalhamento em corpos de prova moldados com raízes da espécie arbustiva *Acacia auriculiformis* (4 anos e 10 meses após o transplante) e amostras do mesmo solo sem raízes. Franco *et al.* (1992) indicam essa espécie para recuperação de solos degradados, pela sua capacidade de fixar o nitrogênio. Além disso, apresenta um fuste com formato irregular e pode ter seus galhos ou sua estrutura inteira quebrada na presença de ventos fortes (CARVALHO *et al.*, 2001).

Segundo os autores, essa espécie pode atingir uma altura de até 30 metros e adequada para ambientes com altitudes de até 600 metros, toleram temperaturas que variam de 25° a 60°, com níveis de precipitação entre 1000 e 1800 mm, desenvolve bem em solos ácidos com pH de até 3, solos lateríticos e areias quartzosas e a sua propagação pode ser realizada por meio de estacas lenhosas.

Na análise da estabilidade do talude, realizou ensaios de cisalhamento direto com amostras do solo com e sem raízes, pelos métodos do talude infinito (T.I.) e de Mosgentern-Price (M & P). Os corpos de prova revelaram que o solo da área é heterogêneo tanto em relação à sua coloração quanto à sua textura, apresentado uma estrutura estratificada.

Para Lemes (2001), este tipo de solo apresenta uma fertilidade variável e permeabilidade diferente entre os estratos. A coloração do solo variava em tons de roxo, vermelho e amarelo, sugerindo a presença de minerais ou compostos diversos e a sua textura variava entre areia e argila em áreas diferentes e havia concreções lateríticas em algumas faixas de solo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados do caso 1

Barbosa e Lima (2013) obtiveram os seguintes resultados:

- Incremento da coesão e do ângulo de atrito interno do solo à medida que aumenta o tempo de plantio do capim vetiver (Tabela 2)

Tabela 2- Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo sem e com plantio do capim vetiver

Solo /Talude	Ângulo de átrio interno	Intercepto de coesão kPa
Sem vegetação	14,6 °	23,4
Um ano de plantio de capim vetiver	14,6°	23,8
Dois anos de plantio de capim vetiver	14,8°	25,9
Três anos de plantio de capim vetiver	16,9°	68,9
Quatro anos de plantio de capim vetiver	19,9°	73,5
Talude de solo		
Sem plantio de capim vetiver	19,5°	28,4
Com plantio de capim vetiver	19,9°	74,5

Fonte: Barbosa e Lima (2013)

- Elevação do teor de matéria orgânica (MO), exibindo valores maiores nas amostras do talude de solo com cobertura do capim vetiver (Tabela 3).

Tabela 3- Quantidade de matéria orgânica (MO) das Amostras de solo

Solo	MO % 0-60 cm
Sem vegetação	10,1
Um ano de plantio de capim vetiver	15,9
Dois anos de plantio de capim vetiver	17,5
Três anos de plantio de capim vetiver	21,9
Quatro anos de plantio de capim vetiver	22,2
	30-90 cm
Talude de solo sem vegetação	9,1

Talude com aplicação de capim vetiver 23,4

Fonte: Barbosa e Lima (2013)

- Baixo teor de umidade das amostras com o capim vetiver.
- Maior quantidade de raízes com o aumento do plantio do capim vetiver.
- Os coeficientes de segurança para o talude com capim vetiver nos 3 métodos utilizados (Tabela 4).

Tabela 4- Coeficientes de segurança do talude

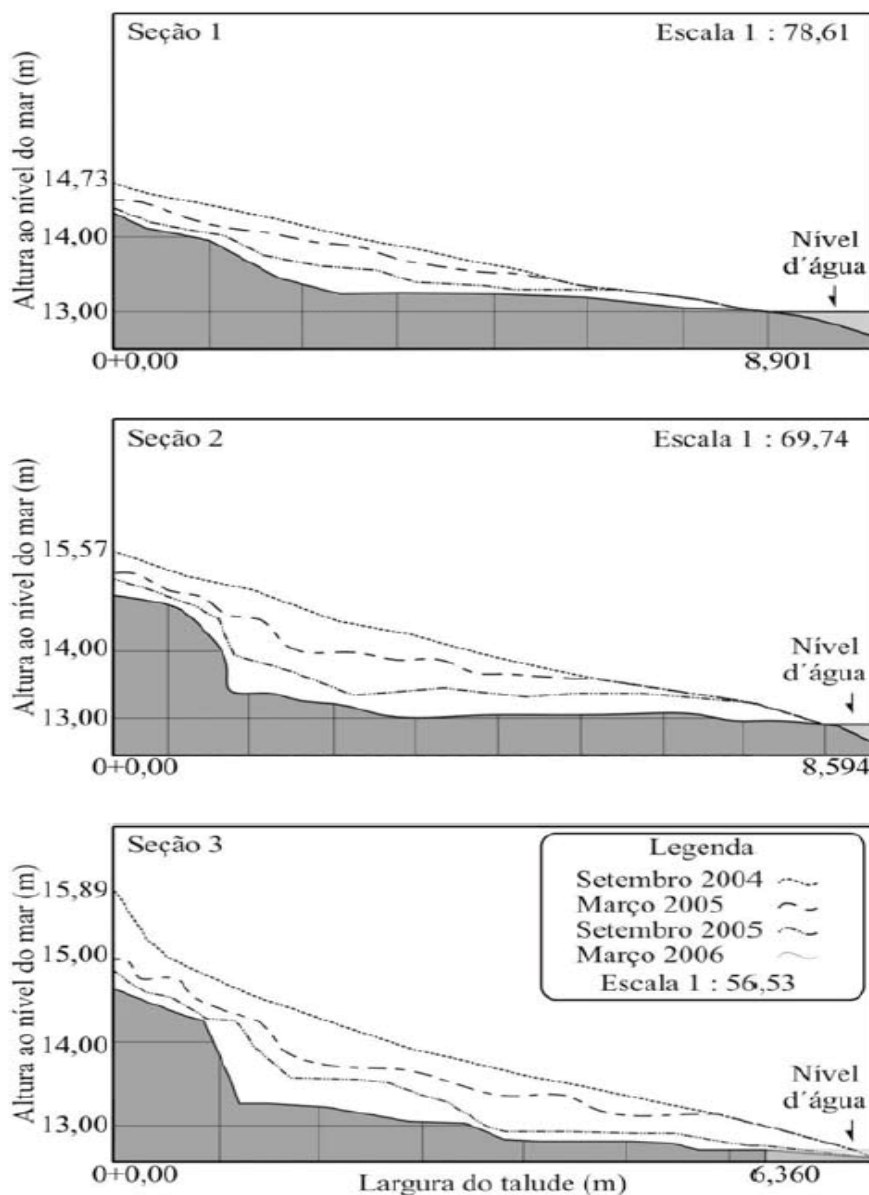
Talude	Morgenstern-Price	Bishop	Jambu
Sem cobertura vegetal	1,421	1,422	1,387
Com cobertura vegetal	3,765	3,765	3,771

Fonte: Barbosa e Lima (2013)

5.2 Resultados do caso 2

Holanda *et al.* (2008) notaram que as áreas onde não foram aplicadas as técnicas de bioengenharia apresentaram alterações na sua estrutura ao longo do monitoramento. As principais modificações foram em relação ao topo do talude, que se apresentou mais rebaixado e a margem mais verticalizada. Os autores associaram essas mudanças à baixa coesão do solo e a pouca cobertura vegetal que deixou a região vulnerável à ação das ondas, conforme a Figura 14.

Figura 14- Evolução temporal das seções 1,2 e 3, sem aplicação das técnicas de bioengenharia



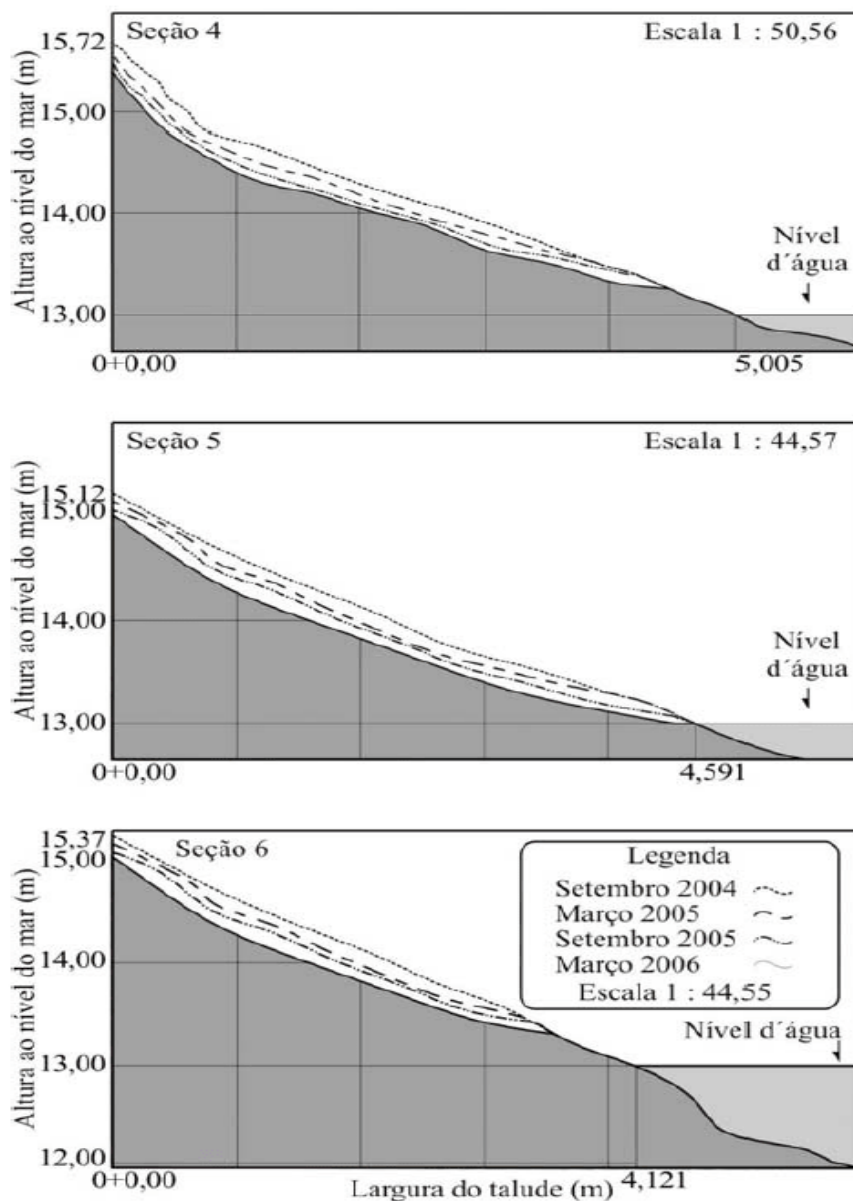
Fonte: Holanda *et al.* (2008)

Nas seções com maiores inclinações o processo erosivo fluvial foi mais intenso. De acordo Holanda *et al.* (2008) há uma relação direta entre a declividade do talude com o processo de erosão, onde havia maior declividade, os movimentos de massa eram mais expressivos, como quedas de grandes blocos por solapamento da base.

Nas áreas que foram empregadas as técnicas (Figura 15), Holanda *et al.* (2008) verificaram que o processo erosivo, o recuo da margem, rebaixamento do topo foram menores. No entanto, notaram em algumas áreas, danos no geotêxtil provocados pelo

deslocamento de animais de grande porte e pelo desmoronamento por basculamento na seção 5.

Figura 15- Evolução temporal das seções 1,2 e 3, com aplicação das técnicas de bioengenharia



Fonte: Holanda *et al.* (2008)

Holanda *et al.* (2008) observaram que a gramínea *Brachiaria decumbens* em épocas de cheias, apresentou pouca adaptabilidade e em períodos de estiagem, houve pouca renovação. Já as gramíneas nativas da base do talude, adaptadas à

inundação, suportaram os eventos de cheias e tiveram um desenvolvimento satisfatório nessas situações.

Além disso, notaram que as estacas que fixaram os retentores de sedimentos rasgaram a malha que envolve o cilindro de palha, provocando sua destruição como também a quantidade foi insuficiente para obter a proteção adequada, o que colaborou para o solapamento na base do talude. Diante disso, foi sugerido a utilização de um material mais resistente.

Mesmo diante a essas adversidades, Holanda *et al.* (2008) alegaram que o geotêxtil conseguiu reduzir os processos erosivos do solo e consequentemente, diminuiu o agravamento do processo de solapamento da base do talude que durante o experimento, manteve as declividades constantes.

Após o experimento, Holanda *et al.* (2008) notaram que a erosão do solo voltou a ocorrer na seção 6, a porção final do tratamento com bioengenharia, porém, a quantidade de solo desprendido foi menor comparado às áreas sem tratamento. Além disso, verificaram que em ambas áreas de estudo houve perdas das plantas nativas plantadas, principalmente nas regiões afetadas pela erosão do solo.

Em 2005, nos períodos de fevereiro a abril, o rio aumentou sua vazão em mais de 100%, o que viabilizou a retomada intensiva dos processos erosivos nas áreas sem o geotêxtil, diferentemente das áreas com as técnicas de bioengenharia, onde os movimentos de massa foram menos expressivos, como menciona Holanda *et al.* (2008).

5.2.1 Análise do desempenho do caso 2

Verifica-se que o tempo de constância da vazão nos períodos de fevereiro a abril, trouxe instabilidade no sistema, além disso, a erosão e as solicitações dinâmicas (ondas) associada à própria natureza do solo composto de partículas mais finas e não coesas, colaboram para a deflagração dos movimentos de massa.

É preciso que o talude continue sendo monitorado, principalmente durante o rebaixamento da vazão que tende aumentar a infiltração do solo e causar erosões por infiltração, especialmente em areias finas. Diante disso, deve-se considerar a drenagem do corpo do talude para uma maior eficiência.

Nota-se o importante papel do geotêxtil como elemento de bioengenharia, capaz de criar um ambiente favorável para o desenvolvimento da vegetação e diminuir as taxas de erosão. No entanto, a destruição dos retentores de sedimentos associado aos pontos de erosão em alguns pontos do talude, nos quais foram implantados os elementos de bioengenharia em processo de estabilização, são fatores que causaram fragilidades no talude, uma vez que eles iriam facilitar a deposição dos sedimentos e diminuir a declividade do processo erosivo linear e dessa maneira, aumentaria a segurança do talude.

Neste contexto, é necessário que a base do talude tenha cobertura vegetal necessária para oferecer uma maior rugosidade, reduzindo dessa forma as velocidades do fluxo e retendo mais sedimentos, que poderá ser feita utilizando as próprias gramíneas e arbustos nativos em quantidades adequadas, fascinas vivas (Quadro 5), estacas de madeira (Quadro 5) e paladiças de madeira (Quadro 5).

Para uma proteção mais segura da base do talude marginal, poderá ser considerado o uso de materiais inertes para redirecionar o fluxo da margem, como pedras, toras de árvores derrubadas, palhetas rochosas que irão dissipar a energia da água e diminuir as tensões de tração do pé do talude. Considerando a disponibilidade local e o custo mais acessível.

Verifica-se que no próprio estudo, que as gramíneas nativas são mais adequadas às pressões particulares do talude marginal, onde eventos de cheias são comuns, visto que se desenvolveram melhor neste cenário. Diante disso, seria mais viável induzir seu crescimento e a expansão ao longo do talude do que a própria gramínea *Brachiaria decumbens* escolhida para as técnicas, que apresentou limitações no crescimento e renovação neste cenário.

Um ponto destacado pelos autores, foi a perda das mudas nativas plantadas para a recuperação da mata ciliar dentro do perímetro experimental. A estratégia adotada pelos autores em estabelecer espécies nativas características do clímax da área, exige um incentivo maior para que elas se estabeleçam no ambiente diante das mudanças contínuas.

As medidas de incentivo envolvem insumos periódicos e manejo adequado, além disso, torna-se necessário a reposição de mudas nativas e melhora do solo ao redor da planta por meio de fertilizantes antes de serem inseridas no ambiente para um melhor enraizamento e contato com solo.

Por outro lado, seria mais apropriado uma segunda abordagem, que opte pela seleção de espécies pioneiras com propriedades biotécnicas que desenvolvem num clímax ou subclímax, na qual a gestão interferiria apenas para garantir a direção da sucessão vegetal.

Nas áreas que foram empregadas as técnicas, Holanda *et al.* (2008) verificaram que o processo erosivo, o recuo da margem, rebaixamento do topo foram menores. No entanto, notaram em algumas áreas danos no geotêxtil causados pelo pisoteio de animais de grande porte e pelo desmoronamento por basculamento na seção 5.

As áreas em que o geotêxtil foi pisoteado por animais de grande porte pode indicar uma ameaça para a efetividade das técnicas de bioengenharia, visto que esses animais além de pisotear o local, podem consumir a vegetação em estado de estabelecimento, o que limitaria a renovação da planta, provocando a redução da estabilidade dos solos.

Além disso, ao depender do nível de ocupação desses animais, o solo poderá ser compactado, impactando diretamente na capacidade de infiltração do solo e no crescimento das raízes. Por outro lado, os dejetos dos animais do solo e a renovação das plantas podem minimizar os efeitos negativos do pisoteio. Diante disso, deve-se considerar o isolamento da área de estudo, para impedir o fluxo dos animais, que pode ser feito por meio de cercas com tramas e palanques com quatro fios.

5.3 Resultados do caso 3

Oliveira *et al.* (2012) verificaram que o sistema radicular da espécie em questão, alcançou uma profundidade máxima de 1 metro de solo. No entanto, não foi identificado a presença de um raiz pivotante, apenas um crescimento considerável de raízes secundárias laterais, atingindo um diâmetro de 10 centímetros. Além disso, foi visto que a rede de raízes finas, em comparação com as raízes principais que sustenta *Acacia auriculiformis*, não se desenvolveu de forma considerável.

A pesquisa indicou um aumento na coesão (de 4,83 kPa para 5,98 kPa) e no ângulo de atrito (de 21,76° para 31,25°) dos corpos de prova que tinham raízes da *Acacia auriculiformis*. Quanto à análise da estabilidade, foi obtido um fator de segurança de 1,47 para o solo com raízes e 1,05, no solo sem raízes, pelo Método de Morgenstern-Price, e 1,39 para o solo com raízes e 1,01 pelo Método do talude infinito.

Oliveira *et al.* (2012) apontam que as simulações consideraram um material que representa todo o corpo do talude e os resultados obtidos levaram a uma superestima do fator de segurança para o valor do solo com raízes, o que não ocorre no talude, dado que a vegetação cria uma zona de raízes, da ordem de 1 m em uma área radicular média de 26,25% (Tabela 5), ou seja, é um sistema completo que não pode classificado com segurança em uma simplificação com esta.

Tabela 5- Área radicular (%) de *Acacia auriculiformis*

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

Fonte: Oliveira *et al.* (2012)

5.3.1 Análise do desempenho do caso 3

À medida que a *Acacia auriculiformis* se desenvolve, considerando seu porte, poderá favorecer na sobrecarga do talude e sofrer perturbações causadas pela força do vento. É necessário garantir que sua presença no talude se concentre na base do talude, o que proporcionará uma maior estabilidade, caso esteja no topo, poderá favorecer o movimento descendente da massa de solo.

A *Acacia auriculiformis* de 4 anos e 10 meses de transplântio, contribuiu para o aumento da coesão em 24% e em 44% no ângulo de atrito comparada às amostras sem a presença de raízes. Nota-se que as amostras de solo do talude com raízes apresentaram valores de coesão baixos e ângulo de atrito altos. No entanto, é preciso avaliar o nível piezométrico do talude para se ter um equilíbrio adequado, no qual a vegetação absorve a água do solo, reduzindo a pressão da água e regulando o nível piezométrico e dessa maneira, contribuindo para a estabilidade do talude.

As folhas e os caules da *Acacia auriculiformis* poderão armazenar gotas de tamanhos variáveis durante as chuvas, que ao atingirem o solo, podem aumentar as taxas de desprendimento do solo. Por se tratar de uma espécie de porte maior, as gotas de chuva cairão de uma altura mais elevada e apresentarão uma energia

cinética maior, desprendendo as partículas do solo. Diante disso, é preciso considerar a proteção do solo com material vegetal e detritos para amortecer o impacto das gotas.

A estrutura estratificada do solo, com fertilidade variada e graus de compactação diversas, deve ter interferido nos processos metabólicos e nas funções vitais da *Acacia auriculiformis*, e principalmente, na possibilidade de alongamento e exploração das raízes no solo, especialmente da raiz pivotante, a raiz central mais forte, não detectada no estudo, o que poderá afetar a estabilidade do talude de corte.

Os valores dos fatores de segurança encontrados pelos dois métodos de análise da estabilidade estão próximos do valor admissível. Considerando os valores da tabela 1 para um nível de segurança alto, majorados em 10%, como sugerem alguns especialistas devido às incertezas decorrentes das amostras, os resultados obtidos na análise se tornam menos seguros.

5.4 Análise comparativa dos resultados

- *Em relação a resistência*

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento após o plantio do capim vetiver encontrados por Barbosa e Lima (2013) foram melhores do que as da *Acacia auriculiformis* (OLIVEIRA *et al.*, 2012). Como foi mencionado, as raízes do capim vetiver melhorou consideravelmente a coesão do solo, graças ao aumento de matéria orgânica e de forma insignificante no ângulo de atrito. Em contrapartida, os resultados das amostras da *Acacia auriculiformis*, mostraram um aumento considerável do ângulo de atrito, que possivelmente está relacionado ao peso da planta.

- *Em relação a estabilidade*

Nas análises de estabilidade do talude pelo método de Morgenstern-Price, ambas mostraram valores de coeficiente de segurança maiores comparadas ao talude sem cobertura vegetal, mas o destaque foi para o capim vetiver, que aumentou em 165% o coeficiente de segurança comparado aos 40% da *acácia auriculiformis*.

Nota-se que o aumento da coesão do solo trouxe resultados mais seguros nos fatores de segurança. Todavia, é preciso considerar que essas diferenças resultam

da interação de cada espécie com ambiente de estudo, do tempo de plantio, das condições de crescimento e da época do ano.

5.1.1 Análise do desempenho do caso 1

Os resultados demonstraram que o capim vetiver contribuiu na estabilização de taludes, visto que ao longo do seu plantio, aumentou a resistência do solo, dada pelo aumento de coesão, associada ao aumento da matéria orgânica, que possibilitou a formação de compostos estáveis no solo. Considerando que a coesão é mais acentuada em solos argilosos, o solo do estudo, classificado como areno-siltoso apresentou uma maior coesão devido a presença do capim vetiver. Já em relação ao ângulo de atrito interno do talude, a sua foi influência insignificante.

As simulações feitas, mostraram que o fator de segurança cresceu de forma considerável e sem alterações significativas entre os métodos utilizados. Todos eles apresentaram valores maiores que 1,5, considerando situações que necessitam de fatores de segurança altos, conforme NBR 11682 (ABNT; 2008), os valores encontrados proporcionaram uma maior confiabilidade nas técnicas de bioengenharia, ao evidenciar valores elevados de segurança.

Este experimento revelou o potencial do capim vetiver em melhorar a resistência do solo, resultando em um aumento do fator de segurança e da estabilidade do talude. No entanto, não é ideal em um projeto de bioengenharia depender exclusivamente de uma espécie de planta, como o capim vetiver, mesmo possuindo esse potencial.

As monoculturas tendem a envelhecer e adoecer ao mesmo tempo, o que poderá provocar falhas na cobertura vegetal e isso impactaria na estabilidade do talude. O ideal em um projeto, é associar outras espécies para aumentar a estabilidade interna, ou variar as idades das mudas para aumentar as chances de recuperação nestes casos. Além disso, deve-se considerar o tempo de dormência do capim vetiver e verificar a sua capacidade de fornecer a sua função biotécnica na estação que mais lhe é exigida como também a sua resposta a ação pragas e predadores naturais do Brasil.

5.5 Considerações sobre a viabilidade e limitações

As técnicas de bioengenharia empregadas nos casos exibiram resultados satisfatórios, como comprovado nos dados apresentados nos quadros 6,7 e 8.

Quadro 6- Resumo das principais influências das técnicas de bioengenharia no Caso 1

Solo	Técnicas de Bioengenharia	Características vistas	Influencia na Estabilidade do talude
Areno-siltoso	Plantio da Gramínea <i>Vetiveria Zizanioides</i> (Capim vetiver)	Aumento do fator de segurança do talude	Revela que a presença das raízes do capim vetiver, possibilitou um maior ancoramento do solo e o aumento da coesão do mesmo que resultou no aumento considerável do fator de segurança do talude, que exibiu valores maiores que 1,5, nos três métodos utilizados pelos autores, evidenciando uma maior segurança do talude na presença dessa espécie.
		Maior teor de matéria orgânica	As amostras com a presença do capim vetiver exibiram um maior teor de matéria orgânica, que torna o solo mais coeso e mais resistente a compressão.
		Amostras apresentaram quantidades maiores de raízes do capim vetiver	Demonstra que a espécie conseguiu se desenvolver no solo areno- siltoso, revelando sua capacidade de manutenção da área e de incremento na resistência do solo. No entanto, essa contribuição pode ser desfeita caso haja um ataque de pragas ou uma surja uma doença que acometa a espécie.

Fonte: Autoria própria.

Quadro 7- Resumo das principais influências das técnicas de bioengenharia no Caso 2

Solo	Técnicas de bioengenharia	Características vistas	Influencia na Estabilidade do talude
Neossolo Flúvico	Gramínea <i>Brachiaria decumbens</i> .	Pouca adaptabilidade	A gramínea contribuiu no recobrimento e no aumento da rugosidade da superfície do talude, o que reduziu a capacidade erosiva da água no talude. No entanto, apresentou problemas em se desenvolver nas cheias do rio e em se renovar nos períodos de estiagem.
	Geotêxtil Fibrax ®400 BF	Inclinação do talude	O geotêxtil controlou a erosão e resistiu aos movimentos de massa, uma vez que possibilitou uma melhor redistribuição do peso do solo do talude e diminuiu a possibilidade das porções de solo se tornarem instáveis e se movimentarem ao longo do talude, como também viabilizou a manutenção da gramínea <i>Brachiaria decumbens</i> e das gramíneas da base do talude.
		Pisoteio animal	Revela a suscetibilidade do geotêxtil à movimentação de animais que poderá compactar o solo e dessa forma, interferir na infiltração do solo e alongamento das raízes das plantas, comprometendo a drenagem do talude e o desenvolvimento da vegetação que não será capaz de suportar com eficiência as tensões que causam a movimentação do solo.
	Bermalonga ® D-40	Destruição dos retentores de sedimentos	Inicialmente, os retentores de sedimentos possibilitaram uma proteção ao fluxo intenso de água na base do talude. Contudo, as próprias estacas responsáveis por sua fixação, rasgaram sua malha e provocaram sua destruição, o que tornou a base do talude instável e possibilitou, a

			retomada da movimentação de massa nessa região.
	Mudas nativas	Perdas das mudas nativas	Inviabilizou sua contribuição na estabilidade do talude. Por se tratar de um talude bastante degradado e suscetível as perturbações do meio como fluxo intenso de água do rio, as interferências artificiais no sistema para manter as mudas no local serão maiores, visto que o solo ainda passará por mudanças advindas pela própria dinâmica da natureza ao longo do tempo para permitir o crescimento de plantas mais complexas.

Fonte: Autoria própria.

Quadro 8- Resumo das principais influências das técnicas de bioengenharia no Caso 3

Solo	Técnica de bioengenharia	Características vistas	Influencia na Estabilidade do talude
Solo estratificado, apresentando tons de roxo, vermelho e amarelo e textura variada com porções de areia, argila e concreções lateríticas	Transplântio da Arbustiva <i>Acacia auriculiformis</i>	Aumento da resistência do solo	Esse aumento ocorreu em decorrência do aumento da coesão e principalmente pelo aumento do atrito do solo, em decorrência do peso da espécie que aumentou o contato das partículas de solo e possibilitou uma resistência ao cisalhamento do solo do talude.
		Sobrecarga	Em virtude do porte da espécie, sua presença acrescenta uma carga no talude que poderá favorecer a movimentação de massa caso esteja no topo no talude, mas poderá ser benéfica caso esteja na base do talude.
		Interceptação das gotas de chuva	As gotas de chuva interceptadas pelas folhas da espécie, cairão de altura maior, por causa do seu porte, e ao tocarem o solo, desprenderão mais partículas de solo, enfraquecendo a superfície do talude.

		Exploração das raízes	O sistema radicular possibilitou o aumento da resistência do solo, no entanto, não foi identificado a raiz pivotante, responsável pela fixação da árvore e pela redução das possibilidades de queda. E como resultado, o talude torna-se vulnerável à movimentação de massa, uma vez que a espécie pode falhar no seu papel na estabilidade.
		Aumento do fator de segurança	Na presença da espécie, o talude obteve valores maiores de segurança, mas valores próximos ao admissível que é igual a 1,5, o que não proporciona uma margem de segurança adequada, considerando as incertezas associadas ao solo, a presença da vegetação e as cargas.

Fonte: Autoria própria.

Contudo, é necessário avaliar os efeitos das técnicas na estabilidade, uma vez que as simulações de estabilidade para os solos com raízes são maiores, mas há incertezas sobre o número das amostras e parâmetros geotécnicos. Além disso, os efeitos da vegetação na estabilidade podem ser negativos, a capacidade de infiltração pode ser excessiva, o peso das árvores pode deslocar a massa de solo e a contribuição das raízes na resistência se limitam às camadas superficiais.

Dessa forma, o uso das técnicas de bioengenharia deve ser empregue com cautela, pois não se trata apenas de uma revegetação simples do talude, é preciso que a espécie escolhida tenha requisitos funcionais e se adapte às condições locais para que contribua para a estabilidade, visto que a situações em que a própria condição local impede o estabelecimento das espécies.

A utilização do geotêxtil no caso 2, possibilitou uma eficiência equilibrada na estabilidade após a sua aplicação. Contudo, por se tratar de um material fotodegradável, após a sua degradação, espera-se que a vegetação tenha se estabelecido. No entanto, dados referentes ao intervalo de tempo entre a degradação do geotêxtil e o estabelecimento ainda não foram reconhecidos.

Ademais, a falha dos retentores de sedimentos e a pouca adaptação da gramínea adotada no caso 2, pode representar um risco a estabilidade como também é um indicativo de que será dispendioso manter a vegetação ainda em estabelecimento, uma vez que essa fase inicial já é mais custosa e a seleção inadequada das técnicas de bioengenharia potencializa esses custos, exigindo uma maior manutenção para que se adaptem ao local.

Em contrapartida, as técnicas de bioengenharia executadas corretamente na área de projeto, favorecem a estética das margens do rio, colaborariam para a reabilitação do ecossistema e para o equilíbrio ambiental, que não ocorreriam caso fossem utilizadas as técnicas de engenharia tradicionais.

Conforme observado, as abordagens de bioengenharia para estabilização de taludes, frequentemente, incorporam espécies exóticas, como o capim vetiver. É crucial o estudo das espécies nativas adaptadas às condições encontradas no Brasil para serem empregadas em obras de Engenharia civil. Além disso, as estratégias devem ser condizentes com as condições encontradas no contexto brasileiro, isso conduziria a uma implementação mais sucedida e com maior desempenho das técnicas, o que aumentaria a sua credibilidade.

O engenheiro poderá se basear em técnicas empregadas com sucesso nas mesmas zonas climáticas ou em condições ambientais análogas ao projeto de bioengenharia. Contudo, isso requer o domínio dos fatores condicionantes do projeto, pois a aplicação das técnicas de bioengenharia, não é uma solução generalizada para resolver a estabilidade de taludes.

Além disso, é importante considerar sistemas de drenagem superficiais quanto subterrâneos, especialmente, em locais que as taxas de evaporação são menores que as de infiltração, e a percolação é mais intensa no talude, favorecendo o aumento das pressões neutras ao longo das superfícies potenciais de ruptura.

5.6 Sugestões de estudos

Os estudos avaliados mostraram que as técnicas de bioengenharia foram aptas na estabilização dos taludes no período estudado. Ainda assim, há necessidade de monitorar ao longo prazo as técnicas, descrevendo o seu comportamento e quantificando os efeitos físicos conforme o Quadro 3.

As incertezas sobre as cargas futuras, anomalias geológicas que podem não ter sido detectadas no projeto, eventos como efeito das chuvas na poro-pressão, infiltração excessiva, sucção e o próprio comportamento da vegetação podem comprometer todo o sistema. Diante disso, há necessidade de estudos e experimentos mais sistemáticos para garantir um emprego seguro das técnicas, para tal foram delineadas algumas sugestões.

- Quantificação da capacidade do geotêxtil de resistir à danos causados pelo pisoteio de animais.
- Quantificação do grau de compactação do solo em variados níveis de pastejo, identificando qual nível é o mais adequado para ser conciliado com as técnicas de bioengenharia.
- Realização de experimentos com variados geotêxteis, simulando as condições de projeto, para verificar se a sua degradação coincide com estabelecimento da vegetação.
- Quantificação da resistência ao cisalhamento das espécies potenciais nativas para serem usadas nas técnicas de bioengenharia.
- Quantificação da resistência ao cisalhamento das raízes do capim vetiver em situações de pragas e doenças.

6. CONCLUSÃO

A literatura analisada menciona muitas vantagens relacionadas ao uso da vegetação na estabilização de taludes. Contudo, as vantagens só são verificadas, quando se compreende as interações das plantas com o local de projeto. Nos estudos de caso analisados, as técnicas de bioengenharia possibilitaram o aumento da estabilidade, o controle da erosão, a integração das estruturas com a paisagem e o aumento do fator de segurança dos taludes, mostrando-se alternativas promissoras.

No caso 2, o talude marginal se tornou mais resistente aos movimentos de massa após a aplicação das técnicas, mas as escolhas das técnicas não foram as mais indicadas, por se tratar de um talude no qual a ação da água é constante, as escolhas das técnicas de bioengenharia devem ser mais apropriadas, considerando sempre o grau de adaptação das técnicas a área de estudo.

No caso 1 e 3, os parâmetros de resistência para o solo com raízes foram maiores, e isso acarretou no aumento do fator de segurança, diminuindo as chances de ruptura dos taludes. O capim vetiver apresentou resultados mais confiáveis comparados a *Acacia auriculiformis*, mas o parâmetro da resistência do solo com a presença de raízes, é apenas um aspecto considerado, não há certezas de que os valores encontrados correspondem a esse valor na prática, uma vez que os ensaios de resistência adotados são determinísticos. Além disso, outros efeitos da vegetação devem ser avaliados, como a infiltração, sobrecarga, impacto do vento e das passadas dos animais.

Nesses casos, as análises de estabilidade pelo equilíbrio limite tendem a ter valores maiores e não consideram os casos de rupturas progressivas, visto que essa análise considera uma situação hipotética na qual as tensões distribuem uniformemente na superfície de ruptura. Dessa forma, torna-se necessário experimentos que busquem avaliar essa estabilidade em situações de pragas, doenças e diferentes estágios das espécies como também uma abordagem probabilística para garantir uma maior segurança, considerando a complexidade de cada projeto.

Verifica-se que espécies exóticas, têm sido objeto de estudo nos casos abordados na pesquisa. Todavia, o mais aconselhável, é observar a vegetação que circunda o local de projeto e selecionar as espécies nativas habituadas às condições

específicas do ambiente, como solo, clima, topografia, o que resultaria numa menor gestão.

O sucesso das técnicas de bioengenharia dependerá do conhecimento multidisciplinar e da experiência do engenheiro, no qual deverá avaliar a disponibilidade dos materiais, os custos, impactos e especialmente, as características locais que apontaram onde é adequado as técnicas de bioengenharia. Em geral, a estabilidade dos taludes por meio das técnicas de bioengenharia pode ser alcançada considerando as limitações, fragilidades e o manejo adequado das técnicas.

Entre as limitações identificadas, destacam-se, pragas e doenças que podem atingir as monoculturas e causar falhas na cobertura vegetal, a movimentação excessiva dos animais, que aumenta a compactação do solo, diminuindo sua capacidade de infiltração e restringindo o crescimento das raízes, a característica do solo associada a sua fertilidade que dificulta o crescimento e enraizamento das espécies no local e a baixa adaptabilidade das espécies selecionadas que reduz a sua possibilidade de sobrevivência na área.

Contudo, esses empecilhos podem ser contornados com uma abordagem que considere esses fatores e faça escolhas apropriadas para cada local. Portanto, é fundamental haver uma seleção cuidadosa das espécies adaptadas ao ambiente onde serão empregadas. Além disso, a gestão necessita fornecer condições adequadas para que elas possam se desenvolver e conseqüentemente, contribuir para estabilização do talude.

Os fundamentos apresentados na revisão oferecem informações valiosas para explorar o potencial das técnicas de bioengenharia, lidando de forma eficaz e segura com seus efeitos adversos. Constata-se que as técnicas de bioengenharia são opções eficientes na estabilização de taludes. Por todos esses aspectos, este estudo propiciou um avanço significativo, oferecendo um suporte valioso para futuras pesquisas no solo brasileiro, considerando o crescimento das preocupações ambientais e a necessidade de práticas mais sustentáveis.

REFERÊNCIAS

ABERNETHY, B.; RUTHERFORD, I. D. The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. **Hydrological Processes**. v. 15, n. 1, p. 63-79, 2001. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.152>. Acesso em: 17. nov. 2023.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Estabilidade de encostas**. NBR 11682, 2008.

ALBERNETHY, B.; RUTHERFORD, D. I. The effect of riparian trees on the mass stability river banks. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 25, n. 9, p. 921-937, Aug. 2000.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS -ASTM. **Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, D3080**. 2004.

ANDRADE, L. A.; LEITE, I. M.; TIBURTINO, U.; BRABOSA, M. R. Análise da cobertura de duas fitofisionomias de caatinga, com diferentes históricos de uso, no município de São João do Cariri, Estado da Paraíba. **Cerne**, v.11, n.3, 2005.

ARAÚJO, G. H. S., ALMEIDA, J. R. **Gestão Ambiental de Áreas Degradadas**. 3.ed. Bertand Brasil, 2012.

AYALA, C.; J, F.; GIJON, M. F.; MOZO, C.O.; RODRIGUEZ, J. L. S. **Mapa previsor de riesgos por expansividad de argillas en España a Escala 1:1.000.000**, In: Geologia Ambiental. Instituto Geologico y Minero de España, Centro de Estudios y Experimentacion de Obras Públicas, España, Madrid, 1986.

BARBOSA, M. C. R. **Estudo da aplicação do vetiver na melhoria dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos em taludes**. Ouro Preto, Minas Gerais - MG. Universidade Federal de Ouro Preto, 2012. Tese de Doutorado.

BARBOSA, M.C. R; LIMA, H. Resistência ao cisalhamento de solos e taludes vegetados com capim vetiver. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, n1, p.113-120, 2013.issn 1806-9657.

BIANCO, S.; TONHÃO, M. A. R.; PITELLI, R. A. Crescimento e nutrição mineral de capim-braquiária. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 23, n. 3, p. 423-428, 2005.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; DALVAN, J.; REINERT, D.J.& VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um nitossolo e um argissolo. **R. Bras.Eng. Agríc. Amb.**, 14:131-139, 2010.

BRASIL. Ministério do Exército, Diretoria de Obras de Cooperação. **Utilizando a Bioengenharia**. Boletim Técnico. Disponível em: <http://www.doc.eb.mil.br/>. Acesso em: 16. maio 2023.

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

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Fundamentos. (6a ed.) Livros Técnicos e Científicos. Volume 1, 2008.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6. ed., rev. ampl. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; MORTARI, D.; FÁZIO, J. A.; MOTTA, N. O.; FRANCISCO, R. A. **Processos erosivos**. In: CARVALHO, J. C.; SALES, M., M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. Processos erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Brasília, FINATEC, 2006. p. 40-91.

CARVALHO, Margarida M.; XAVIER, Deise F.; ALVIM, Maurilio J. **Características de Algumas Leguminosas Arbóreas Adequadas para a Associação com**

Pastagens. Juiz de Fora:Embrapa Gado de Leite, 2001. 24 p. (Embrapa Gado de Leite. Circular Técnica,64.

CARVALHO, P.A.S.(Coord.). **Manual de geotecnia: taludes de rodovias, orientações para diagnóstico e soluções dos seus problemas** (Publicação IPT, n.1843). São Paulo:IPT,1991.338P.

CARVALHO, S. R., DIAS, P. F. & ARONOVICH, S. (1993). **Importância de gramíneas forrageiras perenes na recuperação de solos degradados.** In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 30, 1993, Rio de Janeiro. Anais. Niterói: Sociedade Brasileira de Zootecnia.

CASADO, A. P. B. HOLANDA, F. S. R. ARAÚJO FILHO, F. A. G.; YAGUIU, P. Bank erosion evolution in São Francisco River. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.231-239, 2002.

CHAULYA, S.K.; SINGH, R.S.; CHAKRABORTY, M.K. & SRIVASTAVA, B.K. Quantification of stability improvement of a dump through biological reclamation. **Geotechn. Geol. Eng.**, 18:193-207, 2000.

CHAULYA, S.K.; SINGH, R.S.; CHAKRABORTY, M.K. & SRIVASTAVA, B.K. Quantification of stability improvement of a dump through biological reclamation. **Geotechn. Geol. Eng.**, 18:193-207, 2000.

COELHO, Arnaldo T.; PEREIRA, Aloísio R. **Efeitos da vegetação na estabilidade de taludes e encostas.** Belo Horizonte: FAPI Ltda., 2006. 20 p. Boletim Técnico.

COELHO, A. T. **Nova tecnologia para controle de erosão.** Folha Florestal, v.90, p.10-12,1998.

COPPIN, N. J.; RICHARDS, I. J. Use of vegetation in civil engineering. Construction Industry Research and Information Association, **Butterworths**, London, 2007. 312 p.

COPPIN, NJ e Richards, IG. “Uso de vegetação na engenharia civil”, Associação de Pesquisa e Informação da Indústria da Construção, **Butterworths**, Londres, 1990.

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

COUTO L. **Técnicas de bioengenharia para revegetação de taludes no Brasil**. Boletim Técnico: CBCN, nº 001, ISSN: 2177-305X. Viçosa – MG, 2010.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. **Landslide Types and Processes**. In: Turner, A. K.; Shuster, R. L. (eds.), Landslides Investigation and Mitigation, Transportation Research Board Special Report 247, National Research Council, Washington D. C., p. 36-75, 1996.

DAS, B. J.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Tradução de Noveritis do Brasil. 8ª. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. ISBN 978-85-221-1823-6.

DAS, D.M.; SANTOS, E.C.; GOMES, D.P.P. **Bioengenharia dos solos para estabilização de taludes aplicada nas indústrias nucleares do Brasil-INB**. Itapetinga, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 2011.

DEMO, P. **Metodologia do conhecimento científico**. São Paulo: Atlas, 2000.

DE PLOEY, J. **Uma equação de fluxo de tronco para gramíneas e vegetação semelhante**. Catena, 9, 139–52, 1982.

DE PLOEY, J. (1982) **Uma equação de fluxo de tronco para gramíneas e vegetação semelhante**. Catena, 9, 139–52.

DEFLORE – Defesa Florestal Ltda. **Catálogo de produtos e serviços de bioengenharia**. Belo Horizonte: Deflor, 2005. 26p.

DUNNE, T.; LEOPOLD, L. B. **Water in environmental planning**. 1ªed. San Francisco: W.H. Freeman & Company San Francisco, 1978. 818 p.

DURLO, M. A.; SUTILI, F. J. **Bioengenharia: manejo biotécnico de cursos de água**. Porto Alegre/RS: EST Edições, 2005. 189p.

FISRWG. Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG). **Stream Corridor Restoration: principles, processes, and practices**. By the Federal Interagency Stream Restoration Working Group (FISRWG). 15º Federal agencies of the US gov't, 1998.

FELLENIOUS, W. **Calculations of the stability of earth dams**. In: Trans. 2nd Congress on Large Dams, Washington DC, v. 4, 1936. 445 p.

FIORI, A. P.; BORCHARDT, N. **Influência da vegetação na estabilidade de taludes naturais**. Curitiba: Boletim Paranaense de Geociência, n,45p.43-58,1997.

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

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes**. 2ª ed. Revisada e ampliada. Ed. UFPR – Curitiba, PR, 2009.

FRANCO, A.A., DIAS, L.E.; FARIA, S. M.; CAMPELLO, E.F.C. e SILVA, E.M.R. (1992) **Uso de leguminosas florestais noduladas e micorrizadas como agentes de recuperação e manutenção da vida do solo: Um modelo tecnológico**. In: Simpósio sobre Estrutura, Funcionamento e Manejo de Ecossistemas, UFRRJ, Resumo. Itaguaí, CNPAB/EMBRAPA. 13p.

GERSCOVICH, D. **Estabilidade de Taludes**. 1. ed. Rio de Janeiro: Oficina de Textos, 2012. 168p.

GONÇALVES, J.O.N. & GIRARDI-DEIRO, A.M. **Efeito de três cargas animais sobre a vegetação da pastagem natural**. Pesq. agropec. bras., Brasília, 21(5):547-54, maio 1986.

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

GRAY, D. H.; SOTIR, R. B. **Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization**. John Wiley and Sons, Inc., New York, 1996. 400 p.

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

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

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

GREENWOOD, J. R. A simple approach to slope stability. **Ground Engineering**, v. 16, n. 4, p. 45-98, 1983.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. Ed. Blucher, 2ª ed., São Paulo, 1983.

HEAD, K.H. **Manual of soil laboratory testing**. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1994. 440p.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. San Diego Academic Press, 1998.

HOLANDA, F.S.R.; ROCHA, I.P.; OLIVERIA, V.S. Estabilização de taludes com técnicas de bioengenharia de solos no Baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.570-575,2008.

HUBBLE, T. C. T. Improving the stream of consciousness: A nomenclature for describing the factor of safety in river bank stability analysis. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 12, p. 1765-1768, 2010.

HUBBLE, T. C. T. Improving the stream of consciousness: A nomenclature for describing the factor of safety in river bank stability analysis. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 12, p. 1765-1768, 2010.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P. & TORMENA, C.A. Spatial heterogeneity of soil properties in areas under elephantgrass short-duration grazing system. **Plant Soil**, 219:161-168, 2000b.

JORGE, L.A.C; CRESTANA, S. SIARCS® 3.0: novo aplicativo para análise de imagens digitais aplicado a ciência do solo. **Congresso Latino Americano de Ciência do Solo Águas de Lindóia-SP**, Solo Suelo 96. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo.5p. CD-ROM,1996.

KULANTHAIVEL, P.; SOUNDARA, B.; VELMURUNGAN, S.; NAVEENRAJ, V. **Experimental investigation on stabilization of clay soil using nano-material and white cement**. Materials Today: Proceedings, v. 45, p. 507-511, 2020.

LAL, R. (1976) **Problemas de erosão do solo em um Alfisol no oeste da Nigéria e seu controle**: efeito da cobertura morta no escoamento e perda de solo. Monografia No. 1 do IITA, Instituto Internacional de Agricultura Tropical, Ibadan, Nigéria.

LAMBE, T.W. & WHITMAN, R.V. **Soil testings for engineers**. 2.ed. New York, John Wiley, 1951. 165p.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, A.P.B. Least limiting water range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. **Soil Tillage Res.**, 88:297-285, 2006.

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

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Adv. Soil Sci.**, 1:277-294, 1985.

LEWIS, L. **Soil bioengineering—an alternative to roadside management—a practical guide**. Technical Report 0077-1801-SDTDC. San Dimas, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, San Dimas Technology and Development Center, 2000. 44p.

LIDDLE, MJ. **Os efeitos do pisoteio e dos veículos na vegetação natural**. Tese de Doutorado, Faculdade Universitária de Gales do Norte, Bangor,1973.

MAFFRA, C. R. B.; MORAES, M. T.; SOUSA, R. S.; SUTILI, F. J.; PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M. D. Métodos de avaliação da influência e contribuição das plantas sobre a estabilidade de taludes. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 4, p. 129–143, 2017a.

MARCHÃO, R.L.; BALBINO, L.C., SILVA, E.M.; SANTOS JUNIOR.D. G; AS, M.A.C.; VILELA, L.; BECQUER,T.Qualidade física de um latossolo vermelho sob sistemas de integração lavoura -pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.873-882,2007.

MARIANO, Daniela Pratas. **Efeito do coberto vegetal no reforço e na proteção de taludes**. 2015. 114 f. Tese (Mestrado em Engenharia Geológica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2015.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura do Estado do Rio Grande do Sul, Diretoria de Terras e Colonização, Secção de Geografia. 1961. 61 p.

MORETTO, R. L. **Análise dos efeitos da vegetação na proteção de taludes rodoviários e proposição de alternativas de revegetação na BR-386**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Dissertação de mestrado.

MORETTO, R.L. **Efeitos da vegetação na proteção de taludes rodoviários e proposição de alternativas de revegetação na BR-386**. Dissertação Mestrado UFRGS, Porto Alegre, 2012. 124p.

MORGAN, RPC; FINNEY, HJ (1987) **Coeficientes de arrasto de fileiras de culturas únicas e suas implicações para o controle da erosão eólica, em Geomorfologia Internacional 1986**. Parte II (ed. V.Gardiner). Wiley, Chichester, pp.

NICOLL, B. C.; GARDINER, B. A.; RAYNER, B.; PEACE, A. B. The architecture of *Picea sitchensis* structural root systems on horizontal and slop terrain. **Trees**, v. 20, n. 6, p. 701-712, 2006.

NORRIS. J. E.; GREENWOOD, J. R.; ACHIM, A.; GARDINER, B. A.; NICOLL, B. C.; CAMERAAT, E; MICKOVSKI, S. B. **Hazard Assessment of Vegetated Slopes**. In: NORRIS, E. J.; STOKES, A.; MICKOVSKI, S. B.; CAMMERAAT, E.; VAN BEEK, R.; NICOLL, B. C.; ACHIM, A. (eds.) *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. Springer, Dordrecht, Netherlands, 2008. p. 119-166.

OLIVEIRA, C. M. M. de; PORTOCARRERO, H; CAMPOS, T. M. P. de; ANDRADE, A. G. de; PROTÁSIO, F. N.M.; ESCOBAR, F. **Análise de estabilidade de um talude de corte submetido a técnicas de bioengenharia**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 16., 2012, Recife. Anais. Recife: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Pernambuco, Universidade de Pernambuco, Universidade Católica de Pernambuco, 2012.

OLIVEIRA, S. G.; BERCHIELLI, T. T.; PEDREIRA, M. S. et al. 2006. Effect of tanin levels in sorghum silage and concentrate supplementation on apparent digestability and methane emission in beef cattle. **Animal Feed Science and Technology**, v.135, p.236-248, 2007

PEREIRA, A. R. **Determinação de perda de solo. In: SIMPÓSIO DE EROSÃO**, 1999. Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: Sociedade Mineira de Engenheiros (SME), 1999. p. 27.

PEREIRA, A.R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão**.Belo Horizonte:FAPL,2006.150 p.

PINTO C.S. 2002. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. 2.ed., São Paulo, Oficina de textos, 355 p.

POLLEN, N.; SIMON, A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model. **Water Resources Research**, v. 41, n. 7, p. 1-11, 2005.

QUEIROZ, RUDNEY C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil**. Editora Blucher, 2016.

RAUCH H.P. **Application of soil bioengineering techniques for river engineering projects with special focus on hydraulics and morphological issues**. Lifelong Learning Programme:Higher Education Erasmus, 60p, 2008.

ROCHA, W.W.; DIAS JUNIOR, M.S.; LIMA, J.M.; MIRANDA, E.E.V. & SILVA, A.R. Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **R. Bras. Ci. Solo**, 26:297-303, 2002.

ROSA, Vinícius; Gaiofatto, Robson Luiz. Bioengenharia aplicada à estabilização de encostas no município de Petrópolis -RJ. **Geotecnia Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, p. 1-15, 2018.

SCHIECHTL, Hugo Meinhard. **Bioengineering of land reclamation and conservation**. Edmonton, AB, Canada: The University of Alberta ,1980.404 p.

SCHWARZ, M.; PRETI, F.; GIADROSSICH, F.; LEHMANN, P.; OR, D. Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy). **Ecological Engineering**, v. 36, n. 3, p. 285-291, 2010.

SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 58:1775-1781, 1994.

SILVA, L. S.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. Manual de orientação. Florianópolis, 2001. Disponível em: <<http://www.scribd.com/doc/2367267/DA-SILVA-MENEZES-2001-Metodologia-da-pesquisa-e-elaboracao-de-dissertacao>> Acesso em: 08 de out. 2023.

SILVA, S. C. da. **Condições edafo-climáticas para a produção de Panicum sp.** In: PEIXOTO, A.M.; MOURA, J.C.; FARIA, V.P. SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 12. Anais. Piracicaba: FEALQ, 1995. p.129-146.

SOTIR, R. B.; GRAY, D. H. **Fill slope repair using soil bioengineering systems**. In: INTERNATIONAL EROSION CONTROL ASSOCIATION. Methods and techniques for stabilizing steep slopes. Stremboat Springs. CO: International Erosion Control Association. 1997. p. 413-425.

SOUZA, N. M.; MELO, M. T. S. Processos erosivos no Centro-Oeste Brasileiro. Brasília, **FINATEC**, 2006. p. 40-91.

SOUZA, R. **Metodologia para especificação de plantas com potencial biotecnico em Engenharia Natural**. Dissertação apresentada à Universidade

Federal de Santa Maria Para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal,133p,2015.

SOUSA, R. S.; SUTILI, F. J. Aspectos técnicos das plantas utilizadas em Engenharia Natural. **Ciência & Ambiente**, v. 46/47, p. 31-71, 2017.

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

SRAGUE, MA; TRIPLETT, GB. **Manejo do preparo do solo para uma agricultura permanente, em Plantio Direto e Superfície Agricultura de cultivo** (eds MASprague e GBTriplett). Wiley, Chichester,1986.

STYCZEN, M. E.; MORGAN, R. P. C. **Engineering Properties of Vegetation**. In: MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. (eds) Slope Stabilization and Erosion control: A Bioengineering Approach. E&FN Spon, London, 1995. p. 5-58.

SUTILI, F. J.; DURLO, M. A.; BRESSAN, D. A. **Potencial biotécnico do sarandi-branco** (*Phyllanthus sellowianus* Müll. Arg.) e vime (*Salix viminalis* L.) para revegetação de margens de curso de água. v. 14, n. 1. Santa Maria: Ciência Florestal, jun. 2004. p.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977. 509p.

TABALIPA, N. L.; FIORI, A. P. **Influência da vegetação na estabilidade de taludes na bacia do rio Ligeiro (PR)**. Revista Geociências, v.27, n. 3, p. 387-399, 2008.

TENGBEH, GT. **O efeito da cobertura de grama na erosão das margens**.Tese de doutorado, Silsoe College, Cranfield Intitute of Tecnologia, 1989.

TEIXEIRA, Elizatbeth. **As três metodologias: acadêmica, da ciência e da pesquisa**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2005.

TRUJILLO, W.; FISCHER, M.J. & LAL, R. Roots dynamics of native savanna and introduced pastures in the Eastern Plains of Colombia. **Soil Tillage Res.**, 87:28-38, 2006.

TRUONG P., TRUONG N. Computer model for treatment of small volume waste water CONFERÊNCIA LATINO AMERICANA DE SISTEMAS VETIVER, 2., Medellín, 2013. Proceedings. **Medelin: The Vetiver Network International**, 2013. 13p.

TRUONG, P.; TAN, T. e PINNERS, V. E. Vetiver system applications technical reference manual. **The Vetiver Network International**. 2008, 2^a Ed.

TUMELERO, Naína. Pesquisa documental conceitos, exemplos e passo a passo. **METTZER**. Florianópolis - SC. 01 de Out. 2019. Disponível em: <https://blog.mettzer.com/pesquisa-documental/>. Acesso em: 05 nov. de 2023.

USDA–NRCS. **Technical Supplement 14I Streambank Soil Bioengineering**. In 210–VI–NEH, 2007. 84p.

USDA–NRCS. **Technical Supplement 14I Streambank Soil Bioengineering**. In 210–VI–NEH, 2007. 84p.

VARNES, D. J. **Landslides, analysis and control**. Special Report 176, National Academy of Sciences, cap. II, 1978.

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

WOLLE, C. M.; CARVALHO, C. S. **Deslizamentos em encostas na Serra do Mar – Brasil**. Solos e Rochas, v. 12, n. 1, p. 27-36, 1989.

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

WU, T. H. Slope stabilization. In: MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. (eds.). Slope Stabilization and Erosion Control: **A Bioengineering Approach**. London: E & FN Spon, 1995. p. 233-282.

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

XIA, J. Q. et al. An analysis of soil composition and mechanical properties of riverbanks in a braided reach of the Lower Yellow River. **Chinese Science Bulletin**, v. 53, n. 15, p. 2400-2409, 2008.