

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM ENCOSTAS
REVESTIDOS COM CAPIM VETIVER: ESTUDO DE CASO
EM TEUTÔNIA/RS**

LUCAS DE SANTANA OLIVEIRA DA VEIGA JARDIM

**ORIENTADOR: PROF. ANDRÉ LUÍS BRASIL
CAVALCANTE, PhD**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM GEOTECNIA

BRASÍLIA / DF: 12/2017

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES EM ENCOSTAS
REVESTIDOS COM CAPIM VETIVER: ESTUDO DE CASO
EM TEUTÔNIA/RS**

LUCAS DE SANTANA OLIVEIRA DA VEIGA JARDIM

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

APROVADA POR:

**ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**CLÁUDIA MARCIA COUTINHO GURJÃO, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**RICARDO MENDONÇA DE MORAES, DSc (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 05 de dezembro de 2017.

FICHA CATALOGRÁFICA

JARDIM, LUCAS DE SANTANA OLIVEIRA DA VEIGA

Análise de estabilidade de taludes em encostas [Distrito Federal] 2017.

xiii, 67 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2017)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Estabilidade de Taludes

2. SLOPE/W

3. Wolfram Mathematica

4. Retaludamento com Cobertura Vegetal

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

JARDIM, L.S.O.V. (2017). Estabilidade de taludes em encostas. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-001/90, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 67 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lucas de Santana Oliveira da Veiga Jardim

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Estabilidade de taludes em encostas.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2017

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Lucas de Santana Oliveira da Veiga Jardim

Qi 07 – Conjunto R – casa 75 – apartamento 202 – Guará I

71020-186 – Brasília/DF – Brasil

DEDICATÓRIA

Esse trabalho é inteiramente dedicado ao meu avô, Antônio Candido de Oliveira, a minha avó, Dora da Veiga Jardim Oliveira e ao meu pai, Robledo Oliveira da Veiga Jardim. Essas são as três pessoas que fizeram de tudo na vida para que eu chegasse até aqui. Fizeram tanto que não conseguiram me acompanhar na Terra até o final. Seja lá de onde for, espero que estejam orgulhosos.

Muito obrigado!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, um agradecimento especial à minha mãe, Antonia Oliveira da Veiga Jardim, e à minha irmã, Carolina Oliveira da Veiga Jardim. Elas aguentaram toda a pressão dentro de casa e sempre me apoiaram em todas as decisões. Além delas, todo o resto da minha família que sempre soube me guiar para superar os obstáculos da maneira mais honesta possível.

Agradeço também a Alice, minha namorada, que me entende mais do que ninguém e sabe exatamente como é estar do lado de cá.

Amigos, todos vocês, obrigado por continuarem me dando motivos para sorrir e saber que vale a pena continuar.

Por fim, e não menos importante, meu orientador André Brasil, que abriu as portas para que o sonho de ser Engenheiro se tornasse realidade. Não sei como agradecer toda a paciência e disponibilidade. Espero que o resultado tenha sido mais que o esperado.

RESUMO

A problemática sobre deslizamentos no Brasil não é nova. Há vários e consecutivos anos o país sofre com diversos desastres e incontáveis vítimas são assoladas por consequência da falta de investimento em relação a esse assunto no país. Por isso, a análise de estabilidade de taludes é uma das áreas de estudo da Geotecnia que tem a capacidade de mudar esse cenário. Sendo assim, o objetivo desse trabalho é desenvolver um referencial teórico com o conteúdo envolvido na análise de estabilidade de taludes e, com isso, elaborar a retroanálise de um caso real no Brasil.

O talude escolhido localiza-se no município de Teutônia/RS e o fator de segurança associado a esse maciço será calculado com os conceitos teóricos de ruptura plana, pelo método de análise elaborado por Bishop e pela teoria de Morgenstern e Price, sendo que, para isso, a ferramenta SLOPE/W será utilizada. Com o cálculo do fator de segurança, o passo seguinte é a comprovação da necessidade de uma intervenção de engenharia para a estabilização do local.

Dessa forma, serão expostas as possíveis soluções para o caso, analisando as prováveis modificações no fator de segurança, métodos de execução de cada uma delas e possíveis ideias de orçamento para a definição da melhor técnica.

Por fim, será proposto um processo de retaludamento, com o intuito de diminuir a inclinação natural do talude. Em complemento, uma proposta de cobertura vegetal é exposta com a utilização do Capim Vetiver, incluindo também uma lista com suas principais características.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 OBJETIVO GERAL..... | 2 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 2 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA | 3 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 2.1 TIPOS DE TALUDE..... | 4 |
| 2.1.1 TALUDES CONSTRUÍDOS..... | 5 |
| 2.1.2 TALUDES NATURAIS | 5 |
| 2.1.2.1 SOLO RESIDUAL | 6 |
| 2.1.2.2 SOLO COLUVIONAR..... | 7 |
| 2.2 TIPOS DE DESLIZAMENTOS EM MACIÇOS TERROSOS | 7 |
| 2.2.1 ESCORREGAMENTOS..... | 8 |
| 2.2.1.1 ESCORREGAMENTO ROTACIONAL..... | 8 |
| 2.2.1.2 ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL | 9 |
| 2.2.2 ESPALHAMENTOS | 11 |
| 2.2.2.1 ESPALHAMENTO LATERAL | 11 |
| 2.2.3 ESCOAMENTO..... | 12 |
| 2.2.3.1 FLUXO DE DETRITOS..... | 12 |
| 2.2.3.2 FLUXO DE TERRA..... | 14 |
| 2.2.3.3 FLUXOS LENTOS DE TERRA (RASTEJOS – CREEP)..... | 15 |
| 2.3 TRINCAS DE TRAÇÃO | 16 |
| 2.4 MÉTODOS DE ESTABILIDADE..... | 17 |
| 2.4.1 DEFINIÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA..... | 18 |
| 2.4.2 MÉTODO DO TALUDE INFINITO..... | 18 |
| 2.4.3 MÉTODO GERAL DAS FATIAS | 20 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.4.4 | MÉTODO DE BISHOP | 21 |
| 2.4.5 | MÉTODO MORGENSTERN E PRICE | 22 |
| 3. | METODOLOGIA | 24 |
| 3.1 | ESTUDO DE CASO | 24 |
| 3.2 | ENSAIOS | 25 |
| 3.2.1 | MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS..... | 25 |
| 3.2.2 | CISALHAMENTO DIRETO..... | 27 |
| 3.3 | CARACTERIZAÇÃO DO SOLO..... | 28 |
| 4. | ANÁLISE DE ESTABILIDADE..... | 31 |
| 4.1 | CONCEPÇÃO DE UM PROJETO DE ESTABILIDADE..... | 31 |
| 4.2 | MODELAGEM COMPUTACIONAL..... | 33 |
| 4.2.1 | MÉTODO DE “GRADE E RAIOS” | 35 |
| 4.3 | MODELOS ADOTADOS..... | 37 |
| 4.4 | APRESENTAÇÃO DO MODELO PROBABILÍSTICO UTILIZADO..... | 43 |
| 5. | PROPOSTA DE ESTABILIZAÇÃO..... | 44 |
| 5.1 | MUROS DE ARRIMO..... | 44 |
| 5.2 | GABIÃO..... | 45 |
| 5.3 | SOLO GRAMPEADO | 46 |
| 5.3.1 | MÉTODO CONSTRUTIVO..... | 47 |
| 5.3.1.1 | CHUMBADORES | 48 |
| 5.3.1.2 | PERFURAÇÕES | 48 |
| 5.4 | TERRA ARMADA | 49 |
| 5.4.1 | VANTAGENS DO USO DA TERRA ARMADA | 49 |
| 5.4.2 | DESVANTAGENS DO USO DA TERRA ARMADA | 50 |
| 5.5 | COBERTURA VEGETAL PARA ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES..... | 51 |
| 5.5.1 | INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NA ESTABILIDADE DO SOLO..... | 52 |

| | | |
|---------|--|----|
| 5.5.1.1 | REFORÇO DA MASSA DE SOLO PELAS RAÍZES..... | 53 |
| 5.5.1.2 | INTERCEPTAÇÃO DA CHUVA..... | 54 |
| 5.5.1.3 | REDUÇÃO DOS EFEITOS DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL..... | 54 |
| 5.5.1.4 | VELOCIDADE DE ESCOAMENTO | 54 |
| 5.5.1.5 | INFILTRAÇÃO | 54 |
| 5.5.1.6 | ESTABILIDADE DE TALUDES | 55 |
| 6. | RETALUDAMENTO COM COBETURA VEGETAL DE CAPIM VETIVER..... | 56 |
| 6.1 | RETALUDAMENTO | 56 |
| 6.1.1 | MODELAGEM DO RETALUDAMENTO EM ESTUDO..... | 56 |
| 6.2 | USO DO VETIVER NA ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES E ENCONSTAS | 58 |
| 6.2.1 | USO DO SISTEMA VETIVER NO BRASIL..... | 58 |
| 6.2.2 | CARACTERÍSTICAS DO CAPIM VETIVER..... | 59 |
| 6.2.3 | RISCOS E IMPACTOS AMBIENTAIS..... | 59 |
| 6.2.4 | ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES..... | 60 |
| 7. | CONCLUSÕES..... | 62 |
| 8. | BIBLIOGRAFIA..... | 64 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 - Exemplos de aplicações de estudos de estabilidade (Gerscovich, 2016). | 4 |
| Figura 2.2 - Respostas geodinâmicas de encostas, de acordo com a forma. | 5 |
| Figura 2.3 - Perfil de intemperismo (Gerscovich, 2016)..... | 7 |
| Figura 2.4 - Classificação quanto à velocidade do movimento de massa (Varnes, 1978). | 8 |
| Figura 2.5 - Classificação quanto à profundidade da massa deslocada (GeoRio, 1999). | 8 |
| Figura 2.6 - Esquema de escorregamento rotacional (Highland & Bobrowsky, 2008). | 9 |
| Figura 2.7 - Fotografia de um escorregamento rotacional ocorrido na Nova Zelândia (apartado de Crozier, 2007). | 9 |
| Figura 2.8 - Esquema de escorregamento translacional (Highland & Bobrowsky, 2008)..... | 10 |
| Figura 2.9 - Imagem de um escorregamento translacional que ocorreu em 2001 no Vale do Rio Beaton, Britidh Columbia, Canada. (Fotografia por Réjean Couture, Canada Geological Survey). | 10 |
| Figura 2.10 - Esquema de espalhamento lateral. (Highland & Bobrowsky, 2008)..... | 11 |
| Figura 2.11 - Fotografia de um espalhamento lateral ocorrido em uma rodovia. (Fotografia por Steve Ellen, U.S. Geological Survey). | 12 |
| Figura 2.12 - Esquema de fluxo de detritos. (Highland & Bobrowsky, 2008). | 13 |
| Figura 2.13 - Danos causados por um fluxo de detritos na cidade de Caraballeda, no litoral norte da Venezuela. (Imagem por L. M. Smith, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers)..... | 13 |
| Figura 2.14 - Esquema de um fluxo de terra. (Esquema do Geological Survey of Canada). .. | 14 |
| Figura 2.15 - Fluxo de terra de Lemieux, 1993, próximo a Ottawa, Canadá. (Imagem de G. R. Brooks do Geological Survey of Canada). | 14 |
| Figura 2.16 - Esquema de um deslizamento lento de terra, normalmente chamado rastejo. (Highland & Bobrowsky, 2008)..... | 15 |
| Figura 2.17 - Esta imagem mostra os efeitos do rastejo, em uma área próxima a East Sussex, no Reino Unido, chamada Chalk Grasslands. (Imagem de Ian Alexander)..... | 15 |
| Figura 2.18 - Círculo de Mohr para solo coesivo. (Gerscovich, 2016)..... | 16 |
| Figura 2.19 - Trinca de tração (Gerscovich, 2016). | 17 |
| Figura 2.20 – Talude infinito e sua superfície de ruptura. (Duncan & Wright, 2005)..... | 19 |

| | |
|---|----|
| Figura 2.21 - Superfície de ruptura circular com a massa de solo dividida em fatias verticais. (Duncan & Wright, 2005). | 20 |
| Figura 3.1 – Adaptado de Fritscher (2016). | 24 |
| Figura 3.2 – Dimensões do talude. (Imagem de Ester Cristina Fritscher, 2016). | 25 |
| Figura 3.3 - Agitador mecânico no ensaio de massa específica (Imagem por Ester Cristina Fritscher, 2016) | 26 |
| Figura 3.4 - Corpo de prova saturado. (Imagem por Ester Cristina Fritscher, 2016). | 27 |
| Figura 3.5 - Composição granulométrica do solo. (Ester Cristina Fritscher, 2016). | 28 |
| Figura 3.6 - Curva granulométrica do solo. (Ester Cristina Fritscher, 2016). | 29 |
| Figura 3.7 - Gráfico tensão x deformação para amostras saturadas. (Ester Cristina Fritscher, 2016). | 29 |
| Figura 3.8 - Envoltória de resistência ao cisalhamento para amostras inundadas. (Ester Cristina Fritscher, 2016). | 30 |
| Figura 3.9 - Índices físicos e valores de resistência para o solo em análise. (Ester Cristina Fritscher, 2016). | 30 |
| Figura 4.1 - Nível de Segurança - Perdas Humanas (NBR 11682, 2008) | 32 |
| Figura 4.2 - Nível de Segurança - Perdas Materiais (NBR 11682, 2008) | 32 |
| Figura 4.3 - Interface do SLOPE/W | 33 |
| Figura 4.4 - Aba para definição das propriedades | 34 |
| Figura 4.5 - Janela para definição do método de cálculo | 35 |
| Figura 4.6 - Arco definido pelo método de Grade e Raio | 36 |
| Figura 4.7 - Especificação das linhas de raio | 36 |
| Figura 4.8 - Método de Grade e Raio sendo aplicado ao talude em estudo | 37 |
| Figura 4.9 - Combinações dos parâmetros | 38 |
| Figura 4.10 - Resultado para a Combinação 1 | 39 |
| Figura 4.11 - Resultado para a Combinação 2 | 39 |
| Figura 4.12 - Resultado para a Combinação 3 | 40 |
| Figura 4.13 - Resultado para a Combinação 4 | 40 |
| Figura 4.14- Resultado para a Combinação 5 | 41 |
| Figura 4.15 - Resultado para a Combinação 6 | 41 |
| Figura 4.16 - Resultado para a Combinação 7 | 42 |
| Figura 4.17 - Resultado para a Combinação 8 | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.18 - Fator de Segurança x Grau de Confiabilidade..... | 43 |
| Figura 5.1 - Muro de Arrimo..... | 45 |
| Figura 5.2 - Gabião..... | 46 |
| Figura 5.3 - Solo Grampeado | 47 |
| Figura 5.4 - Execução de um Solo Grampeado..... | 48 |
| Figura 5.5 - Terra Armada..... | 51 |
| Figura 5.6 - Efeito da vegetação na estabilidade de um talude | 53 |
| Figura 5.7 - Efeitos mecânicos da vegetação em taludes..... | 55 |
| Figura 6.1 - Perfil após o retaludamento | 57 |
| Figura 6.2 - Capim Vetiver | 58 |
| Figura 6.3 - Execução do Capim Vetiver | 61 |
| Figura 6.4 - Capim Vetiver plantado em um talude | 61 |

SIMBOLOGIA

| | |
|----------------------------------|---|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| F | Fator de Segurança |
| FSi | Fator de Segurança arbitrado |
| NBR | Norma Brasileira Regulamentadora |
| A | Resultante da pressão de água nas fissuras |
| α | Ângulo de inclinação da base da fatia com a horizontal |
| b | Largura da fatia |
| β | Ângulo entre a superfície de ruptura plana e a horizontal |
| c | Coesão |
| c' | Coesão efetiva |
| E | Força normal entre as fatias |
| f(x) | Função arbitrária |
| fo | Fator de correção |
| h | Altura da fatia |
| k _o | Coefficiente sísmico para determinar a força dinâmica horizontal |
| l | Comprimento do arco na base da fatia |
| N | Força normal total na base da fatia de comprimento l |
| N _{α} | Parâmetro que depende da geometria da fatia |
| P | Peso próprio do material |
| r | Raio da superfície de ruptura |
| tg | Tangente |
| σ | Tensão normal no plano de ruptura |
| σ' | Tensão normal efetiva distribuída ao longo da superfície de ruptura |
| τ_d | Tensão de cisalhamento |

| | |
|----------|---|
| τ | Resistência ao cisalhamento |
| U | Resultante das pressões neutras atuantes na superfície de ruptura |
| u | Poropressão ou pressão neutra |
| w | Umidade |
| ω | Ângulo da linha de carga com a horizontal |
| ϕ | Ângulo de atrito interno |
| ϕ' | Ângulo de atrito interno efetivo |

1. INTRODUÇÃO

O solo está presente em praticamente toda e qualquer obra de engenharia, sendo um dos elementos mais importantes durante todo o processo entre projetar e executar. Além disso, a Geotecnia é umas das áreas dentro da engenharia com mais objetos de estudo a serem descobertos, pois, ainda hoje, muitas teorias relacionadas ao solo ainda se apresentam imprecisas e simplificadas. Por isso, é necessária uma atenção especial no que diz respeito a projetos que envolvam solos.

Os taludes são, em geral, estruturas que tem histórico de causarem grandes desastres naturais, principalmente no Brasil. Desde a década de 70, existem registros de pelo menos um deslizamento no Brasil por ano. Ainda assim, é impressionante a falta de investimento que existe no país em relação ao assunto.

Os movimentos de massa terrosa desse tipo são caracterizados por um alto potencial destrutivo e, por isso, a estabilidade desses taludes está diretamente relacionada à vida das pessoas. Vários relatos mostram que desastres desse tipo ocorrem em áreas que são ocupadas por moradores, muitas vezes ilegalmente. Essas pessoas, no geral, são de baixa renda e precisam ocupar esses lugares de forma ilegal por não terem onde morar. A falta de controle público em relação a essas ocupações faz com que o número de registros desse tipo de acidente aumente a cada ano que passa. Sendo assim, o fator econômico não é o único que se torna crucial nesse momento, pois também existe uma grande preocupação social em relação as consequências que um deslizamento de terra pode causar à população.

É evidente o crescimento populacional que ocorre próximo a encostas nas últimas décadas. Dessa forma, é natural que as pessoas modifiquem completamente os aspectos físicos do ambiente natural que existia em determinada localidade antes de ser ocupada. Uma das grandes modificações observadas é a configuração inclinada dos terrenos em decorrência das modificações humanas, o que torna a área altamente suscetível a acidentes, principalmente durante a época de chuvas.

Para minimizar as consequências que esses acidentes vem trazendo, são necessárias várias ações, principalmente da parte governamental. Um dos passos importantes é o mapeamento das áreas de risco de deslizamento que existem no país, começando por aquelas que tem maior número de registros ano após ano. A conscientização para a não ocupação dessas áreas é muito importante, assim como a fiscalização por parte das autoridades. Além disso, o investimento em projetos e intervenções de engenharia nas áreas mais críticas podem reduzir

os riscos de deslizamentos repentinos, sendo possível até prever probabilisticamente quando uma determinada massa de terra irá romper.

Por fim, é essencial o conhecimento sobre os limites críticos de precipitação, em conjunto com as previsões de chuvas. Esse método de análise já tem sido implementado nos últimos anos como uma parcela importante dos sistemas de previsão e alerta de riscos de deslizamentos.

Uma vez que as relações entre chuvas e deslizamentos são devidamente caracterizadas, observando também todos os fatores físicos e climatológicos condicionantes, os sistemas de alerta serão muito mais precisos quanto à ocorrência de acidentes.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho consiste no estudo de estabilidade de taludes em encostas com uma retroanálise de um maciço terroso real, localizado no município de Teutônia/RS, Brasil. Além disso, a definição de técnicas de estabilização para esse talude também serão objetos de estudo, sendo feita a escolha de uma técnica específica para estabilizar o talude em estudo.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os seguintes itens serão considerados como os objetivos específicos apresentados neste trabalho:

- Identificação na literatura dos diversos tipos de taludes em encostas existentes;
- Caracterização dos diferentes tipos de ruptura em maciços terrosos que podem vir a ocorrer;
- Caracterização física e geotécnica do talude escolhido para o estudo de caso em questão;
- Modelagem do talude em estudo;
- Análise Probabilística do Fator de Segurança e definição do grau de confiabilidade do talude;
- Definição de um método de estabilização para o estudo de caso.

1.3 JUSTIFICATIVA

Muitas obras no Brasil são feitas sem a devida análise dos taludes formados após as intervenções de engenharia que são feitas em taludes naturais. Essa negligência em relação aos taludes de corte que são originados após a execução das modificações pode gerar altos riscos as pessoas que utilizam ou utilizarão a área transformada que, no caso de estudo em questão, é uma via pavimentada.

Além de várias consequências econômicas, como a interrupção de circulação de pessoas pela via, a ruptura de um talude desse tipo compromete a vida das pessoas que trafegam ali. A integridade total das pessoas que utilizam aquela região é, sem dúvida, o mais importante.

Por isso, é de suma importância a análise do talude modificado para que a sua estabilidade seja garantida e não comprometa os futuros usuários da via.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para os objetivos desse trabalho, deslizamento será definido como qualquer movimento de descida de rocha ou solo, podendo também ser composto por ambos, em declive, quando ocorre a ruptura de uma superfície.

A compreensão das características dos vários tipos de deslizamento é essencial para o planejamento de ações apropriadas que visam minimizar os danos causados por esse fenômeno.

2.1 TIPOS DE TALUDE

Os taludes são normalmente caracterizados como sendo qualquer superfície com inclinação de um maciço de rocha ou solo. Os taludes existentes na natureza hoje podem ser naturais (também chamados de encostas) ou construídos pelo homem (aterros e cortes).

Existem várias situações práticas em que os estudos de estabilidade de taludes são necessários, como aterros, barragens de terra, barragens de rejeitos, entre outros. Serão analisados aqui apenas as teorias que se relacionam com a estabilidade de taludes em encostas, demonstrados na Figura 2.1.

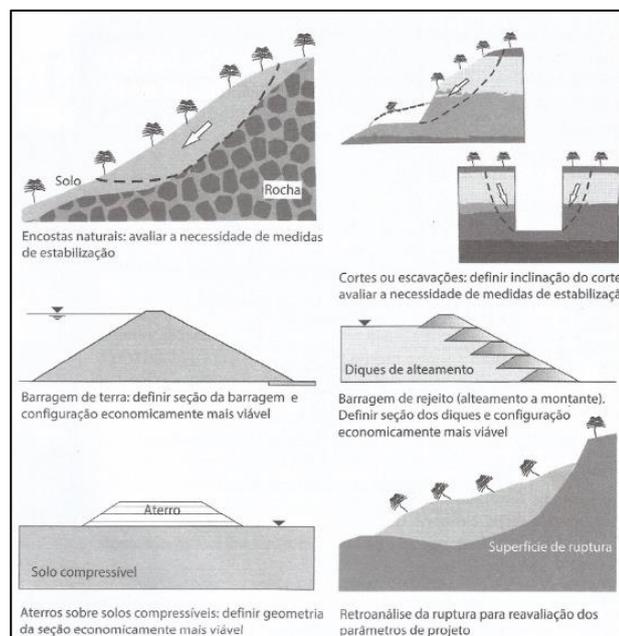


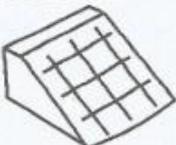
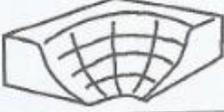
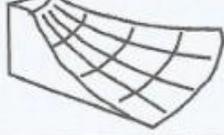
Figura 2.1 - Exemplos de aplicações de estudos de estabilidade (Gerscovich, 2016).

2.1.1 TALUDES CONSTRUÍDOS

Geralmente, os taludes construídos por ações humanas são resultado de escavações, cortes em encostas ou de lançamento de aterro. O projeto de tais cortes depende, basicamente, das condições geomecânicas dos materiais e do fluxo existente ali. Sendo assim, a execução precisa ser feita de forma que a altura e a inclinação do corte garantam a estabilidade da obra.

2.1.2 TALUDES NATURAIS

Além de rocha, os taludes naturais podem ser construídos por solo residual ou solo transportado (coluvionar). A diferença entre os dois é que os coluvionares são formados pelo resultado do transporte, principalmente realizado pela ação da gravidade. Por outro lado, os residuais permanecem no seu local de origem. Em relação à forma, os taludes podem ser encontrados com face plana, convexa ou côncava, o que afeta diretamente o fluxo natural da água. A representação das várias formas de taludes pode ser encontrada na Figura 2.2.

| TIPO DE TALUDE | SUPERFÍCIE | CONDIÇÃO DA ENCOSTA COM RELAÇÃO À ÁGUA SUPERFICIAL |
|---|------------|--|
|  | Plana | - |
|  | Convexa | Coletora |
|  | | Difusora |
|  | Côncava | Coletora |
|  | | Difusora |

Fonte: modificado de Troeh (1965).

Figura 2.2 - Respostas geodinâmicas de encostas, de acordo com a forma.

A dificuldade de estudos dos taludes naturais se deve muito aos problemas constantes de estabilidade que esses taludes sofrem, porque as ações constantes da gravidade contribuem diretamente para os movimentos de massa, até mesmo em encosta que se mantinham estáveis por anos. Isso acontece quando fatores externos atuam no maciço de tal forma a igualar as tensões cisalhantes e a resistência ao cisalhamento do solo.

A instabilidade de taludes em encostas acontece de acordo com o próprio desenvolvimento. De acordo com a evolução físico-química dos processos de alteração das rochas, os solos resultantes vão se tornando menos resistentes e, dependendo das condições do meio em que se encontram, geram condições propícias ao deslizamento.

2.1.2.1 SOLO RESIDUAL

O solo residual é formado, basicamente, pelas várias ações de intemperismo (físicas e químicas) que ocorrem na rocha-mãe. À medida que as alterações vão acontecendo, as camadas superficiais se transformam em solo. Sendo assim, é normal que os solos residuais sejam encontrados na cobertura da rocha que lhe deu origem, podendo atingir vários metros de espessura.

Como o processo de intemperismo é constante e duradouro, o solo residual se apresenta dividido em camadas de acordo com a profundidade, camadas estas que podem ser observadas na Figura 2.3. A primeira camada acima da rocha são, denominada rocha alterada, apenas indica o desenvolvimento do intemperismo ao longo das fraturas. Em seguida, percebe-se uma camada chamada de solo residual jovem, que é um pouco mais intemperizada que a rocha alterada, mas ainda assim preserva as características da rocha de origem. Por fim, o solo residual maduro, que já sofreu um alto grau de intemperismo, não contempla mais as características da rocha e tornou-se homogêneo.

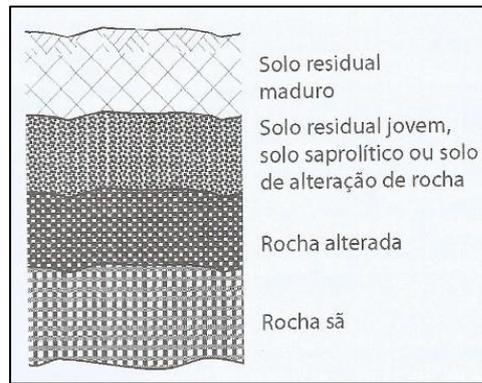


Figura 2.3 - Perfil de intemperismo (Gerscovich, 2016).

2.1.2.2 SOLO COLUVIONAR

Colúvio é o nome que caracteriza um material heterogêneo formado por diversos fragmentos de rocha sã. A deposição desses fragmentos acontece depois de uma alta taxa de transporte, que geralmente acontece devido à ação da gravidade. Com isso, é normal observar o acúmulo desses materiais na base de taludes íngremes ou em escarpas rochosas.

Na prática, a transição de solo coluvionar para solo residual é de difícil identificação, porque o intemperismo tem um alto grau de destruição das feições geológicas e isso faz com que as camadas tendam a se tornar visualmente homogêneas.

2.2 TIPOS DE DESLIZAMENTOS EM MACIÇOS TERROSOS

Entende-se por deslizamento qualquer tipo de deslocamento de um determinado volume de solo e, em geral, esses movimentos de massa são associados a problemas de instabilidade de encostas. Os tipos de deslizamento são fundamentais para a compreensão da velocidade que aquele material pode atingir, a quantidade, em volume, dos materiais que serão entrarão em movimento, o alcance desses materiais e possíveis consequências que ocorrerão ao redor da área em que acontece o deslizamento. A maioria das propostas de classificação baseia-se nas condições específicas (geológicas e climáticas) de uma região. A Figura 2.4, assim como a Figura 2.5, demonstram as classificações para características de velocidade e profundidade de massa movimentada, respectivamente.

| NOMENCLATURA | VELOCIDADE |
|---------------------|------------------------|
| Extremamente rápido | > 3 m/s |
| Muito rápido | 0,3 m/min a 3 m/s |
| Rápido | 1,5 m/dia a 0,3 m/min |
| Moderado | 1,5 m/mês a 1,6 m/dia |
| Lento | 1,5 m/ano a 1,6 m/mês |
| Muito lento | 0,06 m/ano a 1,6 m/ano |
| Extremamente lento | < 0,06 m/ano |

Figura 2.4 - Classificação quanto à velocidade do movimento de massa (Varnes, 1978).

| NOMENCLATURA | PROFUNDIDADE |
|----------------|--------------|
| Superficial | < 1,5 m |
| Raso | 1,5 m a 5 m |
| Profundo | 5 m a 20 m |
| Muito profundo | > 20 m |

Figura 2.5 - Classificação quanto à profundidade da massa deslocada (GeoRio, 1999).

Para determinar a classificação dos tipos de deslizamentos, os parâmetros analisados são, basicamente, os materiais envolvidos e em como o movimento ocorre.

2.2.1 ESCORREGAMENTOS

Escorregamento é definido como sendo um movimento de massa de solo, que acontece em superfícies inclinadas em ruptura ou em áreas sobre zonas muito finas que apresentam um grau de deformação elevado provocado por cisalhamento. A princípio, os movimentos de terra não são observados de forma simultânea, sendo o volume de material deslocado crescente.

2.2.1.1 ESCORREGAMENTO ROTACIONAL

O escorregamento rotacional, demonstrado na Figura 2.6 acontece em superfícies que são curvadas no sentido superior, como se fossem em formato de uma colher, e o movimento é rotatório em relação a um eixo paralelo ao contorno do talude. Sob determinadas circunstâncias, a massa de solo pode se mover de maneira relativamente padronizada e com pouca deformação interna. Caso aconteça de o escorregamento possuir mais de um plano de

movimentos curvos e paralelos, ele é denominado abaixamento ou, em inglês, *slump*. É possível observar na figura 2.7 um caso real.

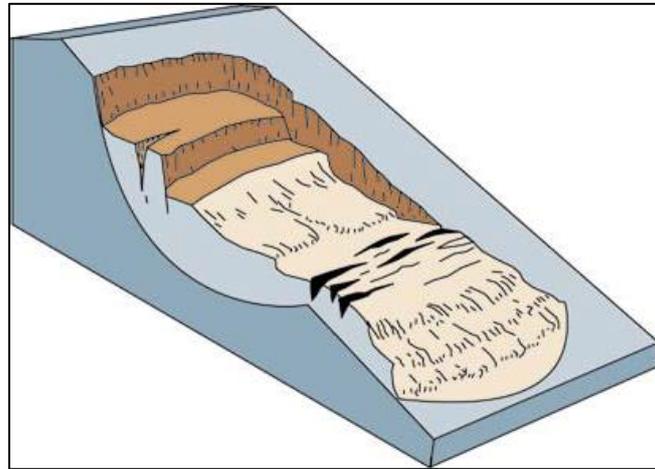


Figura 2.6 - Esquema de escorregamento rotacional (Highland & Bobrowsky, 2008).

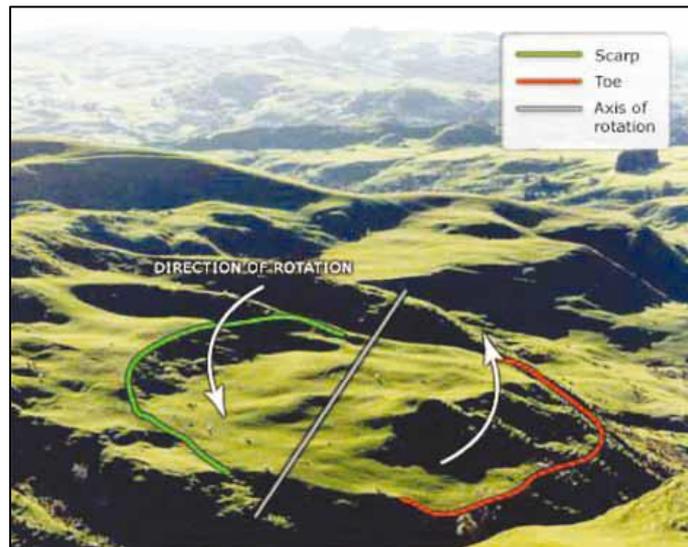


Figura 2.7 - Fotografia de um escorregamento rotacional ocorrido na Nova Zelândia (apartado de Crozier, 2007).

2.2.1.2 ESCORREGAMENTO TRANSLACIONAL

A massa de solo que desliza nesse tipo de escorregamento move-se para baixo e para fora em relação à parede do talude. A distância atingida por esse tipo de movimento pode ser considerável, caso a inclinação seja suficientemente grande, ao contrário do rotacional, que

tende a restaurar o equilíbrio do movimento. Normalmente, descontinuidades geológicas como falhas, junções ou ponto de contato entre rocha e solo provocam esse tipo de movimento. A Figura 2.8 mostra esquematicamente como esse tipo de movimentação de terra normalmente ocorre na natureza e a Figura 2.9 exibe um caso real.

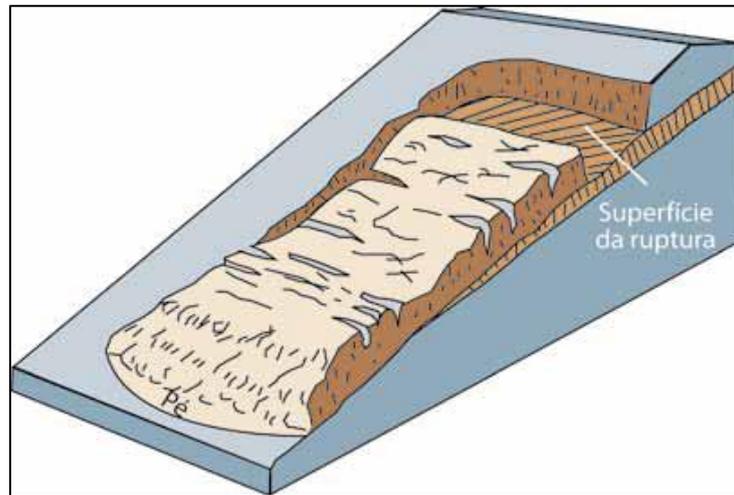


Figura 2.8 - Esquema de escorregamento translacional (Highland & Bobrowsky, 2008).



Figura 2.9 - Imagem de um escorregamento translacional que ocorreu em 2001 no Vale do Rio Beatton, British Columbia, Canadá. (Fotografia por Réjean Couture, Canada Geological Survey).

2.2.2 ESPALHAMENTOS

Geralmente ocorre devido à combinação de um afundamento generalizado de uma superfície de material coesivo (menos rígido) fraturada e uma extensão de massa coesiva formada por solo. Por muitas vezes, também é possível observar esse tipo de fenômeno acontecendo devido à liquefação do material menos rígido.

2.2.2.1 ESPALHAMENTO LATERAL

Diferente da maioria dos tipos de movimentação de massa de terra, o espalhamento lateral é observado, normalmente, em taludes com baixa inclinação ou até mesmo planos. A ruptura desse tipo de deslizamento acontece especialmente quando uma camada de solo aumenta a sua extensão e se posiciona em cima de uma camada menos rígida e mais fraca, sendo quase sempre acompanhada de um afundamento generalizado que ocorre na direção da mencionada camada inferior.

Para espalhamentos especificamente terrosos, a camada inferior rompe após se liquefazer ou deformar plasticamente. Sendo assim, os blocos remanescentes da camada superior podem girar, afundar, desintegrar ou fluir.

A Figura 2.10 traz um esquema do espalhamento, mas um exemplo real ocorreu em uma rodovia na Califórnia em 1989 e pode ser observado na Figura 2.11. O espalhamento lateral foi consequência de um terremoto ocorrido na cidade de Loma Prieta.

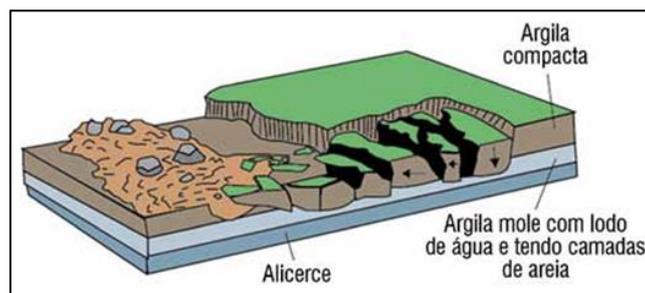


Figura 2.10 - Esquema de espalhamento lateral. (Highland & Bobrowsky, 2008).



Figura 2.11 - Fotografia de um espalhamento lateral ocorrido em uma rodovia. (Fotografia por Steve Ellen, U.S. Geological Survey).

2.2.3 ESCOAMENTO

Uma das principais características dos escoamentos é a sua continuidade. É possível observar também que as superfícies de cisalhamento quase sempre se apresentam com baixo grau de preservação e espaço reduzido entre si. Esses fatores fazem com que a massa em movimento se comporte praticamente como um líquido viscoso, sendo que suas características se alteram dependendo da quantidade de água presente no solo no momento da ruptura.

2.2.3.1 FLUXO DE DETRITOS

Acontece quando o solo solto se mistura com água, formando uma espécie de lama. Essa mistura tem altíssimo potencial de velocidade e pode, por vezes, estar misturado com material orgânico. A grande quantidade de partículas finas que se apresentam nesse tipo de movimento faz com que ele seja conhecido popularmente como “escorregamento de lama”.

Em alguns casos, é possível observar o fluxo de detritos em ambientes seco e, quando isso ocorre, é sinal que o material ali presente é areia não coesiva. As grandes preocupações com esse tipo de deslizamento são seu incrível potencial de causar mortes, pois a velocidade é muito alta e a falta de previsibilidade.

Um desastre natural conhecido como o pior do século XX ocorreu em 1999 no litoral norte da Venezuela. Uma chuva de mais de 1814 mm que durou aproximadamente 14 dias causou o deslizamento e matou aproximadamente 30.000 pessoas. Uma foto do acidente pode ser observada na Figura 2.13, assim como um esquema representativo na Figura 2.12.

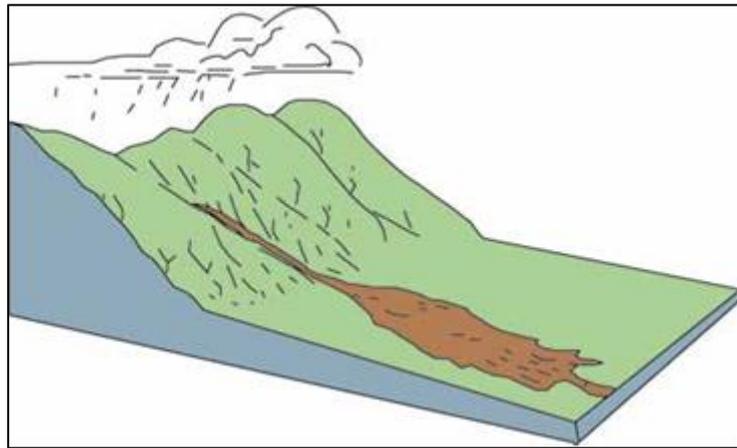


Figura 2.12 - Esquema de fluxo de detritos. (Highland & Bobrowsky, 2008).



Figura 2.13 - Danos causados por um fluxo de detritos na cidade de Caraballeda, no litoral norte da Venezuela. (Imagem por L. M. Smith, Waterways Experiment Station, U.S. Army Corps of Engineers).

2.2.3.2 FLUXO DE TERRA

Registros mostram fluxos de terra em diversos tipos de terrenos, tanto muito inclinados quanto com inclinações suaves e, geralmente, ocorrem em áreas onde a granulação do solo é fina (argila ou silte). Quando o fluxo de terra acontece, a massa em movimento compartilha-se praticamente como um fluido viscoso. Nos casos mais comuns, a argila é responsável por esse tipo de deslizamento, já que a resistência ao cisalhamento pode ser gravemente comprometida de acordo com as mudanças de umidade que o material sofre. Com isso, as velocidades atingidas são impressionantes e, normalmente, tem um potencial enorme de destruição, podendo escoar por vários quilômetros. Em seguida, um esquema na Figura 2.14 e um caso real na Figura 2.15.

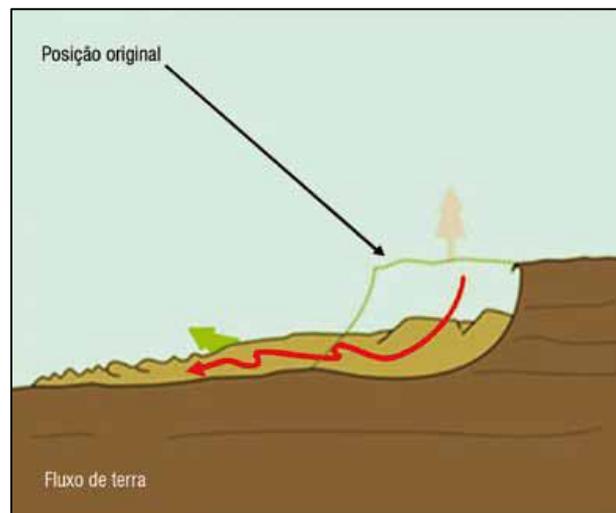


Figura 2.14 - Esquema de um fluxo de terra. (Esquema do Geological Survey of Canada).



Figura 2.15 - Fluxo de terra de Lemieux, 1993, próximo a Ottawa, Canadá. (Imagem de G. R. Brooks do Geological Survey of Canada).

2.2.3.3 FLUXOS LENTOS DE TERRA (RASTEJOS – CREEP)

Popularmente conhecido como rastejo ou, em inglês, creep, o fluxo de terra é muito lento, vagaroso, contínuo e praticamente imperceptível. É comum observar esse fenômeno em taludes onde as tensões internas tem magnitude suficiente para causar deformações, mas não conseguem causar a ruptura. Provavelmente, esse é tipo mais comum de deslizamento redor do mundo, pois ele precede quase todos os tipos de rupturas vistas anteriormente. Um desenho esquemático é mostrado na Figura 2.16, assim como um caso real na Figura 2.17.

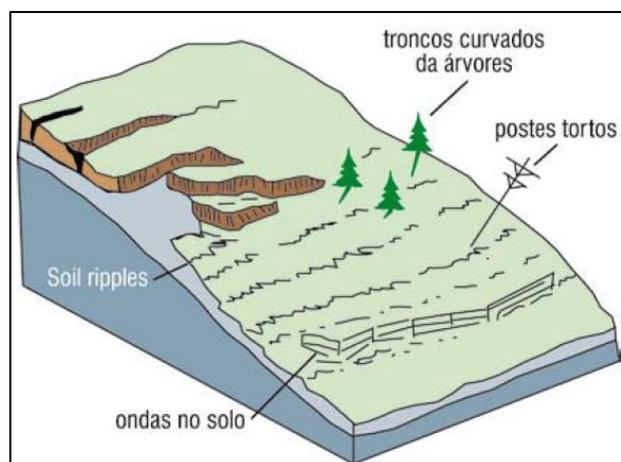


Figura 2.16 - Esquema de um deslizamento lento de terra, normalmente chamado rastejo. (Highland & Bobrowsky, 2008).



Figura 2.17 - Esta imagem mostra os efeitos do rastejo, em uma área próxima a East Sussex, no Reino Unido, chamada Chalk Grasslands. (Imagem de Ian Alexander).

2.3 TRINCAS DE TRAÇÃO

Uma das verificações mais importantes de Rankine, usando a teoria de equilíbrio limite, foi a que relaciona a menor tensão horizontal resistente de um maciço com a sua envoltória de resistência e o círculo de Mohr-Coulomb. A Figura 2.18 - Círculo de Mohr para solo coesivo. (Gerscovich, 2016). exemplifica como esses gráficos se relacionam.

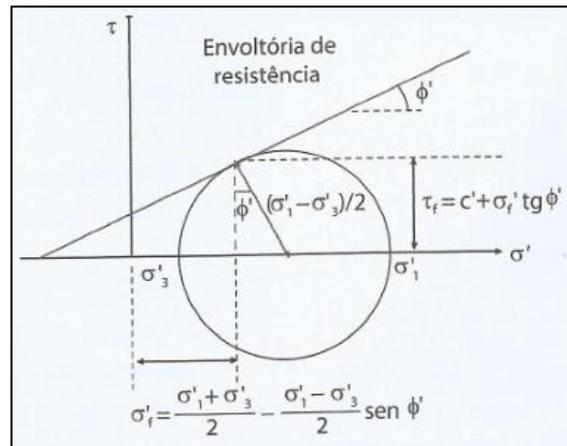


Figura 2.18 - Círculo de Mohr para solo coesivo. (Gerscovich, 2016).

Com a substituição de uma tensão normal qualquer (σ'_f) na equação que representa a envoltória de resistência, obtêm-se a seguinte expressão:

$$\frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} \cos^2 \phi' = c' \cos \phi' + \left(\frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \right) \text{sen} \phi' - \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} \text{sen}^2 \phi' \quad (2.1)$$

Multiplicando-se os dois lados por $\cos(\phi')$ e assumindo que as tensões principais maior e menor (σ'_1 e σ'_3) são iguais a $\sigma'_v = \gamma z$ e σ'_h , respectivamente, a equação a seguir é encontrada:

$$\sigma'_h = \gamma z k_a - 2c' \sqrt{k_a} \quad (2.2)$$

Onde o k_a é definido como sendo o empuxo ativo e pode ser determinado de acordo com alguma das duas equações a seguir, dependendo do tipo de superfície que será tratada:

$$k_a = \frac{\cos \beta - \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi'}}{\cos \beta + \sqrt{\cos^2 \beta - \cos^2 \phi'}} \quad (2.3)$$

As tensões horizontais são determinadas de acordo com a profundidade que é analisada, sendo que nas áreas mais superficiais ela é geralmente negativa. Logo, em determinado momento ela será zero à medida que profundidades maiores são estudadas. É exatamente nessa área entre a superfície e a tensão horizontal nula que as trincas se formam.

Sendo assim, é possível determinar a profundidade da trinca, denominada Z_T , através da expressão a seguir:

$$z_t = \frac{2c'}{\gamma} \operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{\phi'}{2}\right) \quad (2.4)$$

2.4 MÉTODOS DE ESTABILIDADE

Os métodos que serão apresentados em seguida são todos baseados na teoria de Equilíbrio Limite, tem como premissa a veracidade do estado plano de tensões e estão associados a uma determinada forma das superfícies de ruptura. Devido à grande variedade de métodos, serão expostos apenas os de Talude Infinito, Bishop Modificado e Morgenstern, tendo em vista a qualidade dos resultados que são obtidos através deles.

É muito comum a presença de trincas em solos coesivos antes do escorregamento, independente das características do deslizamento que venha a ocorrer. Com isso, a região onde a trinca se encontra deixa de ter participação na análise da estabilidade global do maciço. Pode-se observar esse fenômeno sendo representado na Figura 2.19 - Trinca de tração (Gerscovich, 2016)..

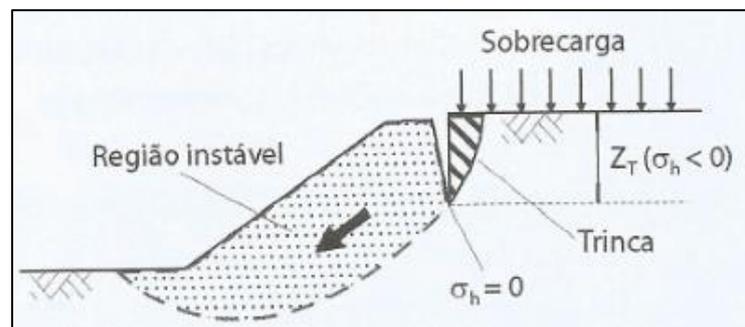


Figura 2.19 - Trinca de tração (Gerscovich, 2016).

Além de não ter contribuição efetiva para a estabilidade, outro ponto crítico das trincas é o fato de que elas podem, eventualmente, serem preenchidas por água e isso geraria esforços que antes não existiam. Naturalmente, esses esforços não estarão a favor da estabilidade do talude e precisam ser considerados para efeitos de projeto. Sendo assim, existem modos de calcular as interferências das trincas de acordo com a sua profundidade.

2.4.1 DEFINIÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA

Os métodos de cálculo para definir a estabilidade de taludes são feitos com o intuito de garantir que as forças resistentes são suficientemente maiores do que as forças que atuam no sentido de causar a ruptura do maciço. Praticamente todas as formas de cálculo utilizam as definições de fator de segurança e as equações de equilíbrio estático para obtenção desses dados, sendo que os parâmetros básicos para isso são as características das forças cisalhantes, a poro pressão causada pela água e as propriedades físicas e geométricas do talude em questão.

O fator de segurança, normalmente denominado como F , é definido em termos da força cisalhante do solo de acordo com a seguinte expressão:

$$F = \frac{s}{\tau} \quad (2.5)$$

Sendo a variável s definida como a força cisalhante solicitante e a variável τ é a força necessária para que o equilíbrio aconteça. Ou seja, a força de equilíbrio é obtida por uma força solicitante dividida por um fator de segurança determinado.

Como visto anteriormente, a força cisalhante que atua em determinado ponto do talude pode ser determinada pela equação de Mohr-Coulomb. Dessa forma, a equação 2.5 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\tau = \frac{c + \sigma \tan \phi}{F} \quad (2.6)$$

Ou, em termos de tensões efetivas:

$$\tau = \frac{c' + (\sigma - u) \tan \phi'}{F} \quad (2.7)$$

O fator de segurança expresso nas equações refere-se a uma potencial superfície de ruptura que tenha sido analisada. Por isso, é necessário que uma superfície específica seja previamente assumida para que seja possível o cálculo da estabilidade do talude e, dessa maneira, é impossível dizer que a área escolhida seja, de fato, a mais suscetível a falha. É por esse motivo que vários fatores de segurança são calculados em um talude e aquele com o menor valor definirá o que é conhecido como superfície de deslizamento crítica.

2.4.2 MÉTODO DO TALUDE INFINITO

Como o próprio nome sugere, taludes infinitos são aqueles em que suas dimensões são assumidas infinitamente extensas em todas as direções e o deslizamento é predominantemente

translacional, ocorrendo em um plano paralelo ao de sua superfície. Para o cálculo do equilíbrio das forças atuantes no talude, o formato de um corte do talude será considerado como um bloco retangular e as forças atuantes nesse bloco serão definidas de acordo com a representação da Figura 2.20 – Talude infinito e sua superfície de ruptura. (Duncan & Wright, 2005)..

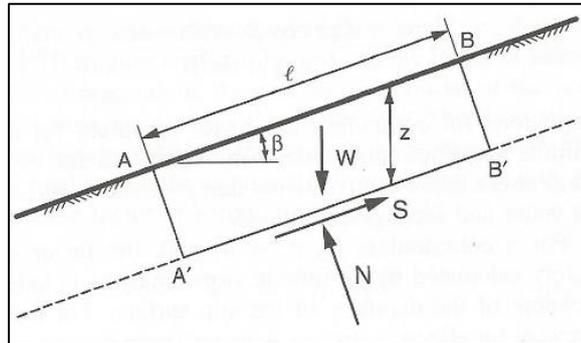


Figura 2.20 – Talude infinito e sua superfície de ruptura. (Duncan & Wright, 2005).

É possível perceber, dessa forma, que a força normal e a cisalhante poderão ser obtidas das seguintes maneiras, respectivamente:

$$S = W \operatorname{sen} \beta \quad (2.8)$$

$$N = W \operatorname{cos} \beta \quad (2.9)$$

Sendo que o ângulo β é a inclinação do talude em relação a horizontal e W o peso do bloco. Caso seja considerado um bloco onde a espessura seja unitária na direção perpendicular ao plano apresentado na Figura 2.20, o peso passa a ser representado da seguinte maneira:

$$W = \gamma l z \operatorname{cos} \beta \quad (2.10)$$

Onde γ , l e z são o peso específico do solo, a distância entre as extremidades do bloco admitido e a distância vertical da superfície até o plano de deslizamento considerado. Com isso, a substituição de W nas equações 2.8 e 2.9 gera os seguintes resultados:

$$S = \gamma l z \operatorname{cos} \beta \operatorname{sen} \beta \quad (2.11)$$

$$N = \gamma l z \operatorname{cos}^2 \beta \quad (2.12)$$

Com o intuito de obter as tensões a partir das forças calculadas, dividem-se os resultados obtidos em 2.11 e 2.12 pela área do bloco que está sendo analisado e as tensões mencionadas serão calculadas por:

$$\tau = \gamma z \operatorname{cos} \beta \operatorname{sen} \beta \quad (2.13)$$

$$\sigma = \gamma z \cos^2 \beta \quad (2.14)$$

Lembrando que a espessura considerada é unitária e, por isso, a área é igual distância entre as extremidades (l). Já com as tensões calculadas, é possível fazer a substituição desses valores na equação 2.7 para obter o fator de segurança em termos das tensões efetivas e obter a seguinte equação:

$$F = \frac{c' + (\gamma z \cos^2 \beta - u) \tan \phi'}{\gamma z \cos \beta \sin \beta} \quad (2.15)$$

2.4.3 MÉTODO GERAL DAS FATIAS

Os dois métodos seguintes analisam a massa de solo de acordo com fatias verticais acima da superfície de ruptura, sendo a superfície mencionada circular ou não. Para casos onde ela é considerada circular, o equilíbrio de momentos é o cálculo feito para a análise da estabilidade como mostra a equação seguinte.

$$M_d = \sum W_i a_i \quad (2.16)$$

As variáveis envolvidas no processo de cálculo podem ser observadas na Figura 2.21 - Superfície de ruptura circular com a massa de solo dividida em fatias verticais. (Duncan & Wright, 2005)..

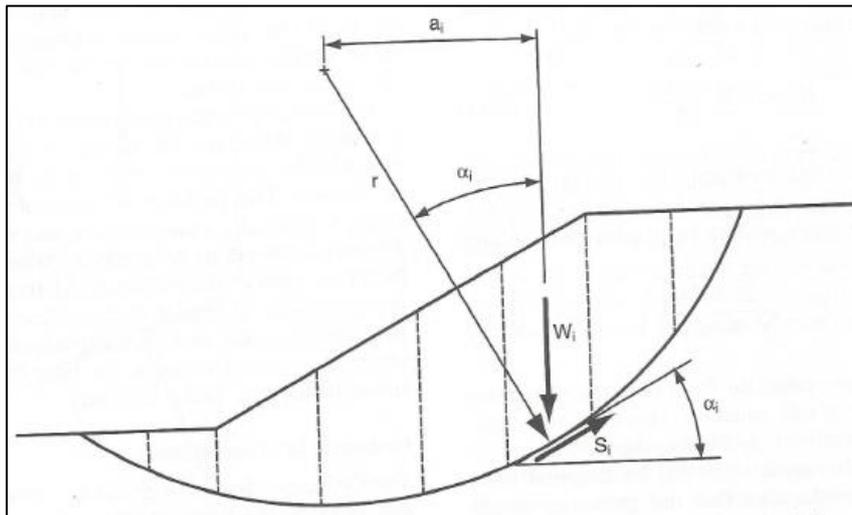


Figura 2.21 - Superfície de ruptura circular com a massa de solo dividida em fatias verticais. (Duncan & Wright, 2005).

A inclinação de cada base, representada pela letra α , se relaciona com o braço do momento (ai) por uma geometria simples:

$$a_i = r \operatorname{sen} \alpha_i \quad (2.17)$$

Sendo assim, a equação geral se torna:

$$M_d = W_i r \sin \alpha_i \quad (2.18)$$

Já o momento resistente é formado por uma parcela de força de cisalhante, que atua na base de cada fatia. É importante ressaltar que o esforço normal existente atua no sentido do centro da fatia e, por isso, não contribui de forma alguma para o momento resistente. Logo, o momento resistente produzido por todas as fatias é expresso pela equação seguinte.

$$M_d = r \sum S_i \quad (2.19)$$

Sendo que a variável S_i é a força cisalhante que atua em cada base e é calculada pelo produto entre a tensão cisalhante e a área da base da fatia, ou seja:

$$M_d = r \sum \tau_i \Delta l_i \quad (2.20)$$

Acrescentando a expressão do fator de segurança apresentada anteriormente e rearranjando as equações, é possível observar a relação entre as fórmulas da seguinte maneira:

$$F = \frac{\sum s_i \Delta l_i}{\sum W_i \operatorname{sen} \alpha_i} \quad (2.21)$$

Uma outra maneira de análise é substituindo a expressão do da tensão cisalhante.

$$F = \frac{\sum (c + \sigma \tan \phi) \Delta l}{\sum W \operatorname{sen} \alpha} \quad (2.22)$$

2.4.4 MÉTODO DE BISHOP

Alguns métodos utilizados para o cálculo do fator de segurança, diferente do método do talude infinito, consideram a superfície de ruptura como circular, que é o caso do Bishop. A característica circular da superfície de ruptura se torna mais comum a medida que a homogeneidade do solo aumenta, como é o exemplo de aterros, que são feitos de solo

basicamente homogêneos e são construídos de camadas em camadas. É normal observar um perfil de ruptura praticamente circular quando essas estruturas se rompem.

Esta hipótese desconsidera os efeitos das componentes tangenciais dos esforços entre as fatias. Sendo assim, o método não considera as componentes horizontais das forças interlamelares (GERSCOVICH, 2012).

Neste método, o cálculo do fator de segurança (F) é feito através do equilíbrio de momentos. Por isso, é necessário que se faça um método iterativo para chegar à conclusão final. Primeiramente, adota-se um valor de F_i para o cálculo de M_α seguindo a equação descrita a seguir:

$$M_\alpha = \cos \alpha \left(1 + \frac{\tan \phi' \tan \alpha}{F_i} \right) \quad (2.23)$$

Após a obtenção do primeiro valor M_α , é possível encontrar um resultado para o fator de segurança com a utilização da seguinte equação:

$$F = \frac{\sum [c'b + (W - ub) \tan \phi'] \frac{1}{M_\alpha}}{\sum W \sin \alpha} \quad (2.24)$$

Onde b é a base da fatia.

Caso o valor de FS não seja o mesmo do primeiro fator de segurança arbitrado, ele deve ser adotado como o novo F_i e uma nova estimativa de M_α é feita. Esse processo iterativo deve ser feito até o momento em que a convergência entre os valores relativos aos fatores de segurança acontece.

2.4.5 MÉTODO MORGENSTERN E PRICE

Considerado por muitos como um dos métodos de estabilidade mais rigorosos que se utiliza nos dias de hoje, Morgenstern e Price consegue contemplar qualquer superfície de ruptura e abrange todas as condições de equilíbrio, tanto para forças quanto para momentos. Uma consideração importante considerada nesse método é a relação entre as forças cisalhantes e as normais de acordo com a seguinte equação:

$$X = \lambda f(x)E \quad (2.25)$$

Onde X e E são, respectivamente, as forças verticais e horizontais entre as fatias. Em algumas literaturas, é possível encontrar as forças verticais descritas como T , referentes a forças tangenciais. Para melhor compreensão das variáveis, pode-se escrever a equação da seguinte forma:

$$\tan \theta = f(x)\lambda \quad (2.26)$$

A função $f(x)$ é determinada de acordo com a variação da inclinação das forças que atuam entre as fatias. DUNCAN & WRIGHT (2005) mostram que a solução para $f(x) = 0$ se torna exatamente igual à utilizada no método de Bishop apresentado anteriormente.

3. METODOLOGIA

A metodologia do trabalho consiste na retroanálise de um caso de necessidade de estabilização real no Brasil. Sendo assim, será necessário identificar o talude a ser analisado, além de suas características físicas e geométricas. A análise do fator de segurança do maciço em questão será feita através dos três métodos de ruptura mostrados anteriormente e a ruptura do talude será mostrada com um modelo analisado pelo software SLOPE/W. Com os resultados da modelagem, será possível propor soluções mitigadoras que poderiam ser feitas antes da ruptura, como drenos, e possíveis ações que poderiam ser tomadas após um possível deslizamento, como o retaludamento da área afetada.

É importante a observação de que o talude a ser analisado não se encontra em uma área em que fosse possível a retirada de material para a realização de ensaios. Por isso, todos os resultados apresentados aqui já foram realizados em outros momentos e suas respectivas fontes serão citadas à medida que esses dados forem sendo mostrados.

3.1 ESTUDO DE CASO

O talude escolhido para análise é localizado no interior de um município chamado Tetutônia, no Rio Grande do Sul. É possível ter uma visualização melhor com a Figura 3.1, retirada do Google Maps.

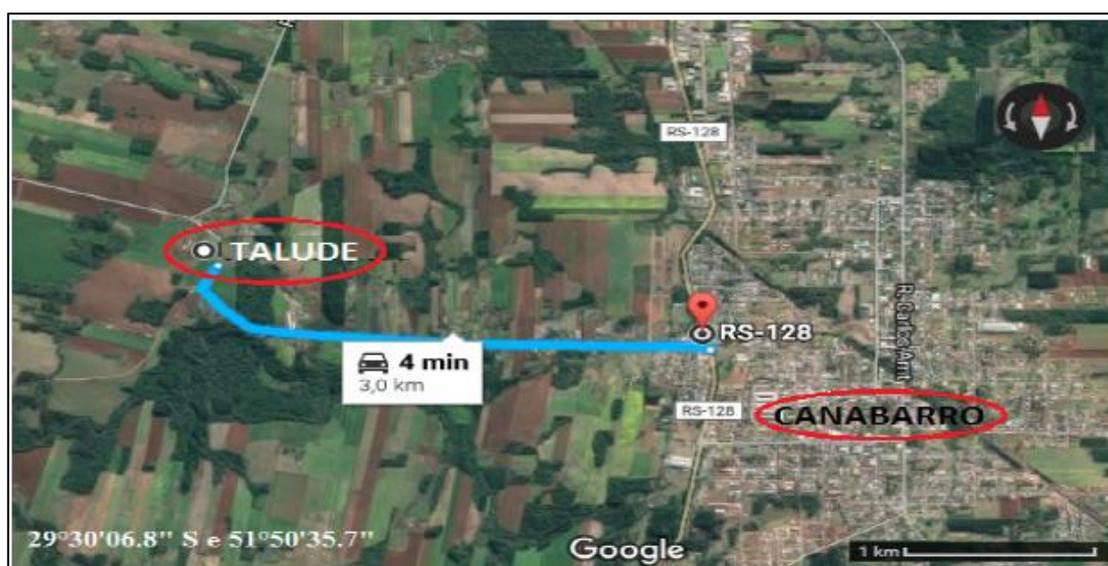


Figura 3.1 – Adaptado de Fritscher (2016).

A região onde o talude se encontra passou por várias modificações no final do ano de 2011, pois algumas obras de infraestrutura foram feitas no local. A rua que passa por lá foi pavimentada, o que significa que a vegetação que encobria a encosta foi retirada e o talude passou a ser escavado. Dessa forma, o solo ficou totalmente exposto às intempéries que levaram ao deslizamento.

As características físicas do talude, como mencionado anteriormente, foram retiradas de estudos previamente feitos. Começando pela geometria, o comprimento é avaliado em aproximadamente 65 metros, tendo trechos onde a altura varia, sendo a mínima aferida de 4,28 metros e a máxima de 8,57 metros. É possível observar também uma inclinação média de 79°. As características geométricas do talude estão expostas na Figura 3.2.

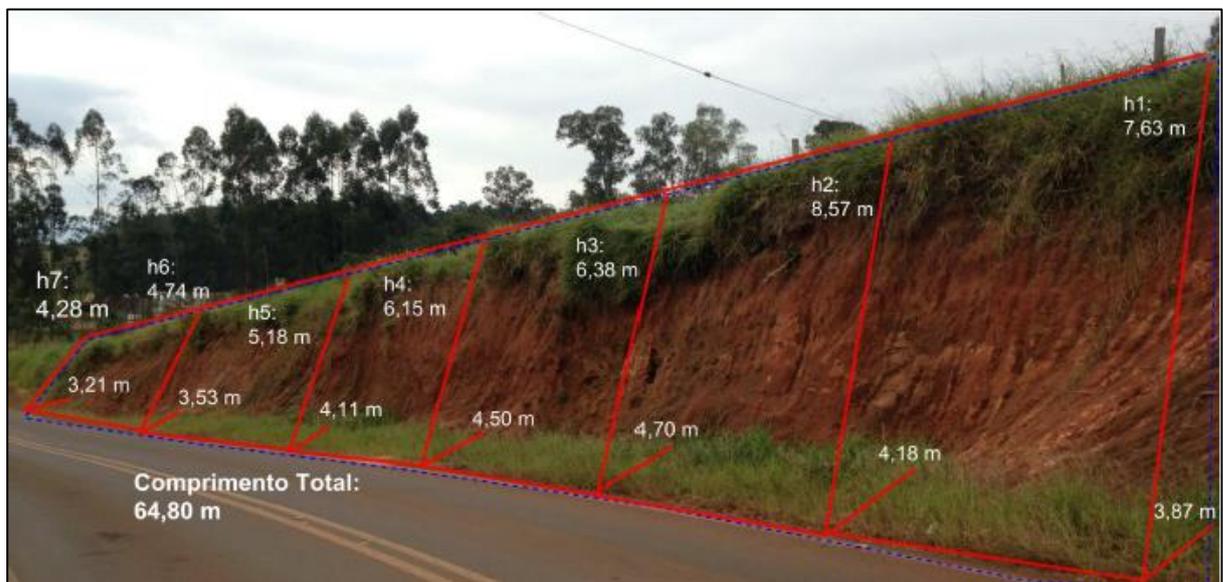


Figura 3.2 – Dimensões do talude. (Imagem de Ester Cristina Fritscher, 2016).

3.2 ENSAIOS

3.2.1 MASSA ESPECÍFICA REAL DOS GRÃOS

O procedimento para obtenção da massa específica real dos grãos foi feito com a utilização de três amostras diferentes, sendo que o resultado final foi calculado pela média aritmética simples dos resultados individuais obtidos. Cada amostra continha aproximadamente 60 gramas e foram submersas em água destilada por um período de 12 horas, de acordo com as especificações contidas na NBR 6508. Após isso, as amostras foram

movidas para um agitador mecânico, mostrado na Figura 3.3, onde foram agitadas por aproximadamente 15 minutos e a temperatura ao final do procedimento foi aferida.



Figura 3.3 - Agitador mecânico no ensaio de massa específica (Imagem por Ester Cristina Fritscher, 2016)

O próximo passo consistiu na medição das massas dos sistemas picnômetro, água e solo, assim como picnômetro e água apenas. A massa específica dos grãos foi então calculada com a utilização da seguinte fórmula

$$\delta = \frac{\frac{M_1 \cdot 100}{100 + h} \cdot \delta T}{\frac{M_1 \cdot 100}{100 + h} + M_3 - M_2} \quad (3.1)$$

Onde:

δ - massa específica dos grão do solo [g/cm³];

M_1 – massa do solo úmido;

M_2 – massa do picnômetro + solo + água na temperatura do ensaio;

M_3 – massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência na temperatura do ensaio;

h – umidade inicial da amostra;

δT - massa específica da água na temperatura do ensaio.

3.2.2 CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio de cisalhamento direto foi feito com o objetivo de determinar a resistência ao cisalhamento do solo. Nesse caso, apenas o ensaio feito com a amostra saturada será considerado, pois o objeto de estudo nesse caso é a estabilidade do talude saturado. O corpo de prova utilizado nesse ensaio tinha formato cilíndrico, 2 centímetros de altura e 6,3 centímetros de diâmetro, assim como mostra a Figura 3.4.



Figura 3.4 - Corpo de prova saturado. (Imagem por Ester Cristina Fritscher, 2016).

A estrutura cisalhante utilizada para aplicação de forças no corpo de prova iniciou o procedimento com uma força vertical, que logo foi seguida por uma força tangencial aplicada na região superior do corpo de prova. Esse processo faz com que aconteça um deslocamento até o momento em que força resistente é superada pela aplicada e o corpo de prova se rompe. Apenas forças não são suficientes para a construção do círculo de Mohr-Coulomb, por isso é necessária a divisão delas pela área da seção transversal do corpo de prova e, com isso, obtém-se as tensões.

As tensões mencionadas foram de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa, sendo aplicadas a uma velocidade de 0,025 mm/min, de acordo com as especificações encontradas na norma americana ASTM D3080 (1998).

PINTO (2006) relaciona o ensaio diretamente com o critério de Mohr-Coulomb, onde uma tensão normal é aplicada em um plano qualquer e a tensão cisalhante responsável pela ruptura é aferida. Sendo assim, com a utilização de várias magnitudes de tensões normais, é possível obter a envoltória de ruptura. Como resultado disso, apresentam-se os valores do ângulo de atrito interno, coesão e a resistência ao cisalhamento, que são parâmetros imprescindíveis ao estudo de estabilidade de um talude qualquer.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO

A curva granulométrica do solo foi gerada a partir do peneiramento, seguido por uma sedimentação e de acordo com o resultado de 2,69 g/cm³ encontrado no ensaio de massa específica real dos grãos. Segundo a NBR 6502 (ABNT, 1995), a classificação do solo é feita de acordo com os dados presentes na Figura 3.5.

| Fração | Porcentagem |
|---|--------------------|
| Pedregulho (2 mm <math><\varnothing \leq 60 \text{ mm}</math>) | 0% |
| Areia (0,06 mm <math><\varnothing \leq 2 \text{ mm}</math>) | 99,30% |
| Silte (0,002 mm <math><\varnothing \leq 0,06 \text{ mm}</math>) | 0,7% |
| Argila (<math>\varnothing 0,002="" \leq="" \text{="" math>)<="" mm}<="" td=""><td>0,0%</td></math>\varnothing> | 0,0% |

Figura 3.5 - Composição granulométrica do solo. (Ester Cristina Fritscher, 2016).

E, assim, foi gerada seguinte curva granulométrica:

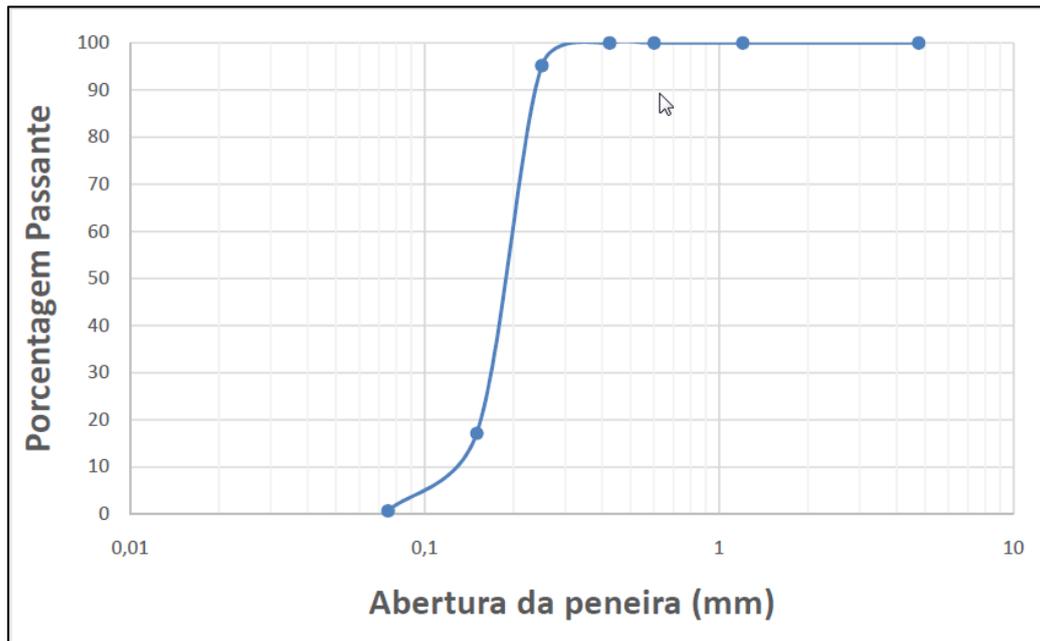


Figura 3.6 - Curva granulométrica do solo. (Ester Cristina Fritscher, 2016).

A Figura 3.7 é referente ao ensaio de cisalhamento direto feito com três amostras saturadas e com a utilização de três tensões normais de magnitudes diferentes (25, 50 e 100 kPa).

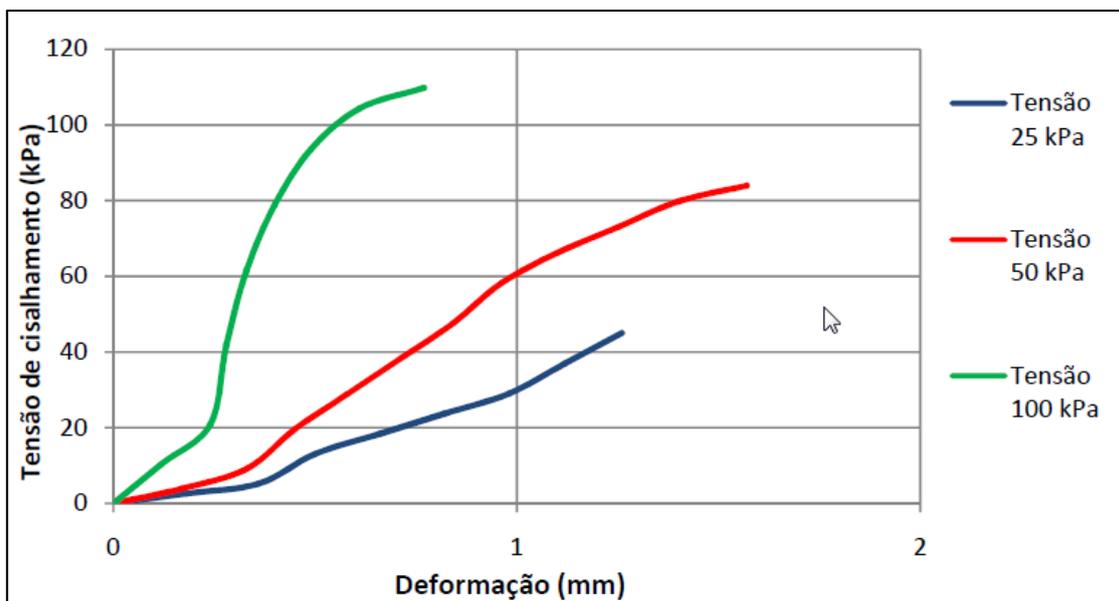


Figura 3.7 - Gráfico tensão x deformação para amostras saturadas. (Ester Cristina Fritscher, 2016).

Sendo assim, foi possível traçar a envoltória de resistência mostrada na Figura 3.8, que é necessária para a identificação dos parâmetros cruciais para a análise de estabilidade do talude.

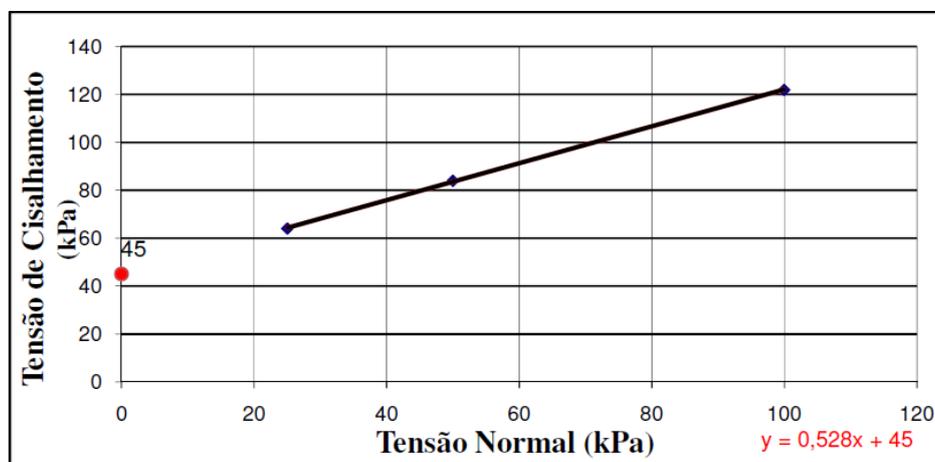


Figura 3.8 - Envoltória de resistência ao cisalhamento para amostras inundadas. (Ester Cristina Fritscher, 2016).

Com os resultados obtidos através dos ensaios realizados anteriormente, é possível obter os parâmetros do solo que são necessários para a modelagem e o estudo de estabilidade do solo encontrado no talude. De uma forma simples, os resultados são expostos na Figura 3.9 e serão usados nos próximos passos em conjunto com o software SLOPE/W para o cálculo do fator de segurança.

| CP | Tensão normal (kPa) | Peso específico γ (kN/m ³) | umidade w (%) | Grau de Saturação S(%) |
|---|-----------------------------|---|---------------|------------------------|
| 7 | 25 | 19,52 | 21,08 | 84,82 |
| 8 | 50 | 19,50 | 22,57 | 87,88 |
| 9 | 100 | 19,54 | 24,06 | 91,43 |
| Peso específico médio (kN/m³) | | | | 19,50 |
| Parâmetros de resistência | Coesão c (kPa) | | | 45 |
| | Ângulo de atrito (°) | | | 27,83 |

Figura 3.9 - Índices físicos e valores de resistência para o solo em análise. (Ester Cristina Fritscher, 2016).

É importante ressaltar que todos os dados relacionados a ensaios presentes neste trabalho foram obtidos anteriormente pela autora citada nas referências.

4. ANÁLISE DE ESTABILIDADE

4.1 CONCEPÇÃO DE UM PROJETO DE ESTABILIDADE

O grande objetivo por trás do estudo de estabilidade é a avaliar a possibilidade de que ocorra algum tipo de escorregamento da massa de solo que constitui um talude. Como já mostrado anteriormente, essa estabilidade se associa a um Fator de Segurança calculado com a relação entre tensões solicitantes e tensões resistentes. Inevitavelmente, surge a dúvida da magnitude em que esse Fator de Segurança seria considerado suficiente para trazer a segurança para determinada área. Por isso que, entre outros fatores, é de suma importância que a estabilidade do talude esteja associada a fatores como eventuais perdas humanas, materiais e econômicas.

Com o intuito de englobar tais fatores, a NBR 11682 (ABNT, 2008) define o que se chama de Nível de Segurança. Dessa forma, um determinado projeto é classificado em um tipo de Nível de Segurança de acordo com os riscos que estão envolvidos ali, em relação a perdas humanas (Figura 4.1 - Nível de Segurança - Perdas Humanas (NBR 11682, 2008)) e perdas materiais (Figura 4.2 - Nível de Segurança - Perdas Materiais (NBR 11682, 2008)). É importante ressaltar que essa classificação não considera apenas as condições atuais do maciço, sendo necessária uma análise sobre o uso futuro da área e, para isso, deve-se preservar o talude contra cortes na base, desmatamento, sobrecargas e infiltração excessiva. Todos esses fatores, se mal previstos, podem diminuir a vida útil de um projeto de estabilização, por exemplo.

| 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 |

Figura 4.1 - Nível de Segurança - Perdas Humanas (NBR 11682, 2008)

| 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 |

Figura 4.2 - Nível de Segurança - Perdas Materiais (NBR 11682, 2008)

A norma enfatiza que, em casos onde haja grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os valores apresentados nas tabelas acima devem ser majorados em 10%. Um outro aspecto fundamental e que necessita ser observado é que, independente da solução adotada para a estabilização do talude, é sempre importante que o monitoramento da região após a execução da obra seja feito. Isso é possível através da instalação de instrumentação de campo e, com isso, a aferição dos movimentos horizontais e verticais é feita, além dos níveis piezométricos. Esses dados podem, por exemplo, subsidiar o projetista em possíveis correções no modelo original do projeto.

4.2 MODELAGEM COMPUTACIONAL

Para o cálculo do Fator de Segurança e definição das superfícies de ruptura críticas, foi utilizado o software *SLOPE/W* (versão estudantil 2016), um dos componentes do pacote de softwares da *Geo Slope International Ltd*, muito utilizado nos estudos de Geotecnia. Como se trata de um software de marca registrada, a versão para estudante a utilizada para a realização da análise, o que gerou uma restrição em relação a análise probabilística dos dados e, por isso, essa análise foi feita com o auxílio do *Wolfram Mathematica*, um software que vastamente utilizado nos dias de hoje para soluções em nas várias áreas das ciências exatas. O código usado para o cálculo da confiabilidade dos taludes estudados será apresentado na seção 4.4 desse trabalho, assim como a teoria por trás dos cálculos apresentados. O programa computacional apresenta diversas metodologias distintas para calcular o Fator de Segurança que utilizam a análise de equilíbrio limite. Sendo assim, é possível comparar os resultados gerados por vários métodos diferentes.

O software apresenta uma interface, como é possível observar na Figura 4.3 - Interface do *SLOPE/W*, onde é possível desenhar a geometria do talude,

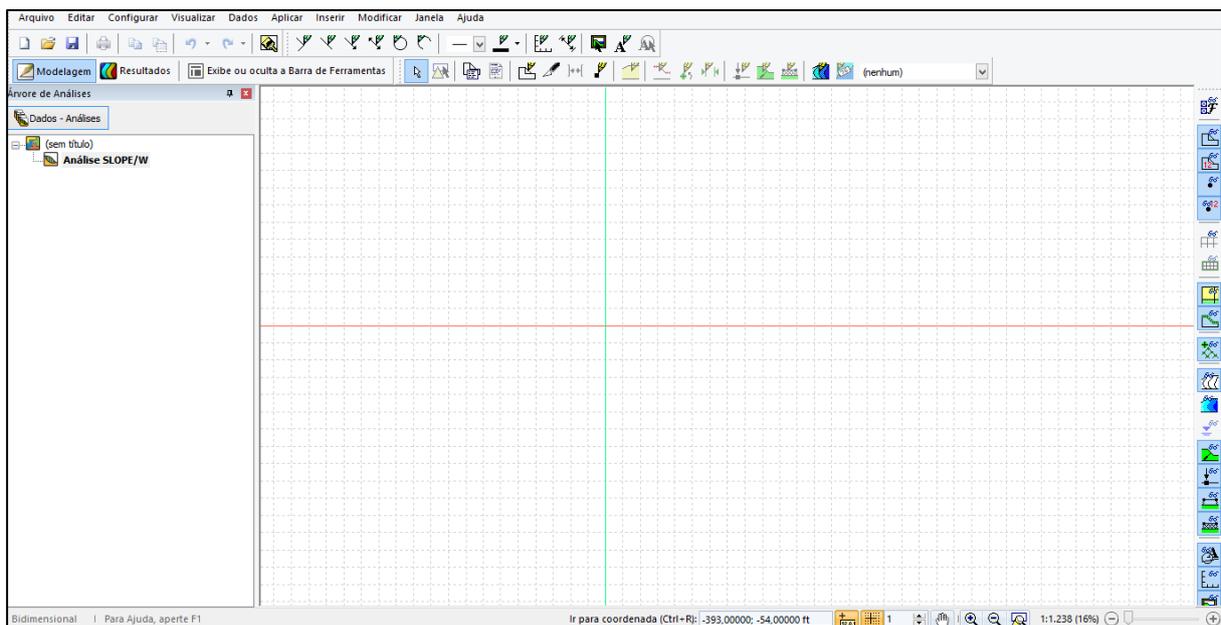


Figura 4.3 - Interface do *SLOPE/W*

abas, apresentadas na Figura 4.4 - Aba para definição das propriedades, que apresentam as opções de inserção dos materiais que compõem o maciço a ser modelado com suas respectivas características de resistência. Além disso, a definição das diferentes regiões que o dividem, a opção de definição da linha piezométrica e a determinação do tipo de análise que

será utilizada para o talude em questão, apresentadas na Figura 4.5 - Janela para definição do método de cálculo. É importante também fornecer como dado de entrada a expectativa da direção do deslizamento, sendo ela definida da esquerda para direita ou da direita para esquerda. Devido a precisão dos resultados, como citado anteriormente, Morgenstern-Price será o método de cálculo utilizado para o estudo de caso aqui tratado.

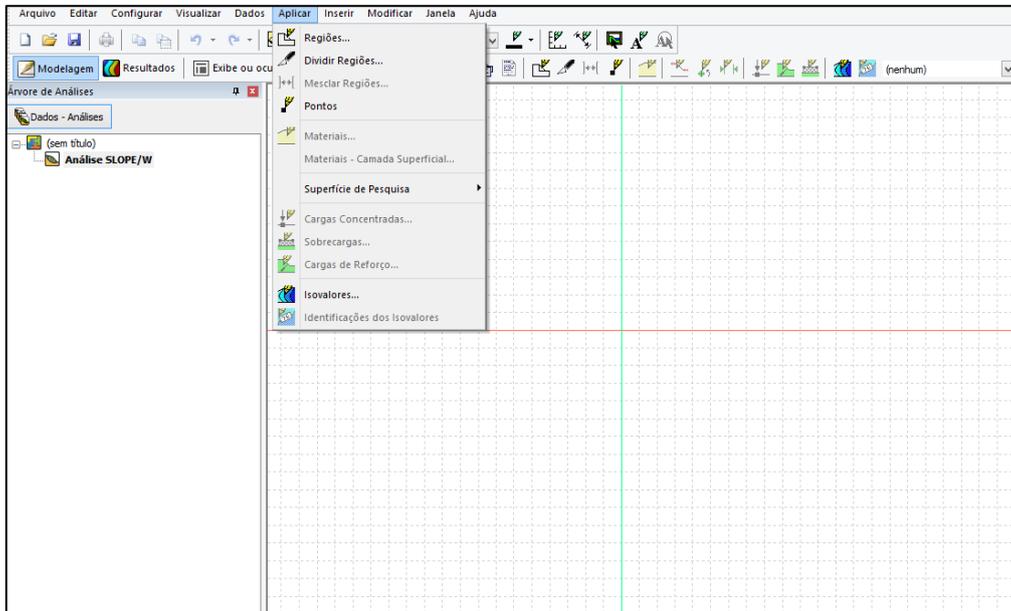


Figura 4.4 - Aba para definição das propriedades

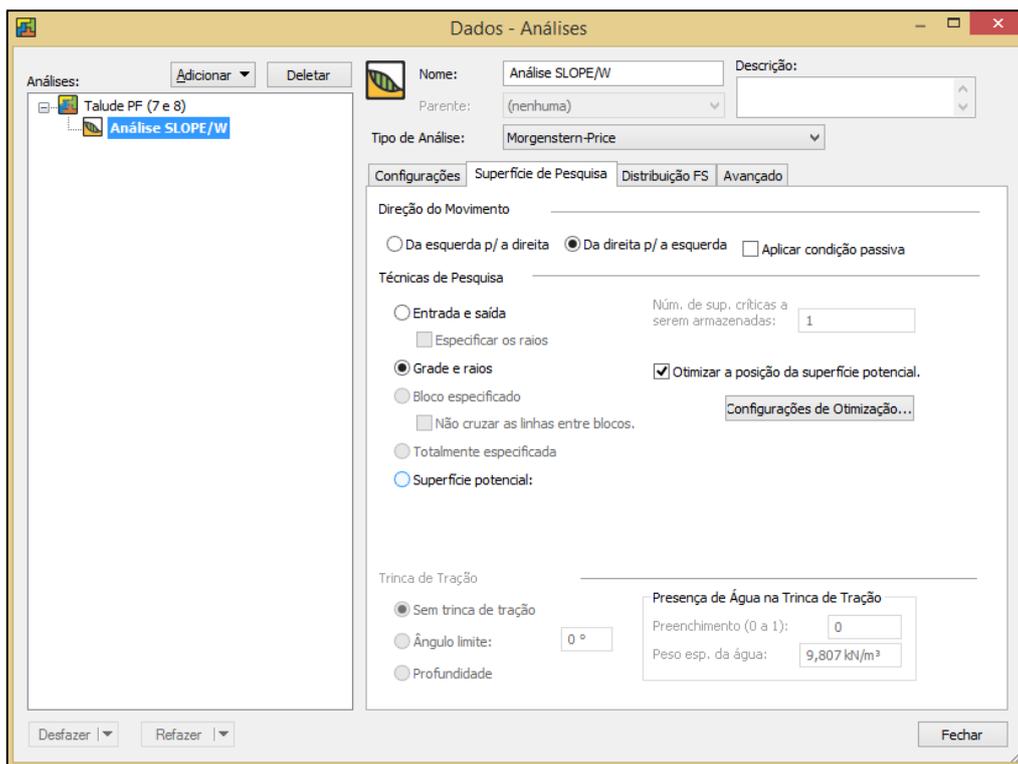


Figura 4.5 - Janela para definição do método de cálculo

Uma vez que todos os pontos e materiais estão definidos e inseridos, a aba “Aplicar”, mostrada acima, ainda serve para desenhar o contorno do talude e definir os limites entre as regiões determinadas.

Feito isso, inicia-se o processo para que o programa consiga definir cálculo do Fator de Segurança de cada uma das superfícies de ruptura determinadas. Dentre os vários métodos existentes para que isso seja feito, o de “Grades e Raios” para Superfícies Circulares será utilizado neste trabalho para definição dos resultados.

4.2.1 MÉTODO DE “GRADE E RAIOS”

As superfícies circulares eram a base das primeiras formulações da teoria de equilíbrio limite e se tornaram cada vez mais refinadas ao longo do tempo, sendo usadas até hoje. Assim, as superfícies circulares geradas por esse método são basicamente um arco, definido por uma parte de círculo, que corta uma região definida do talude. O círculo pode ser definido com a especificação das coordenadas do centro e um raio qualquer, como mostra a Figura 4.6 abaixo.

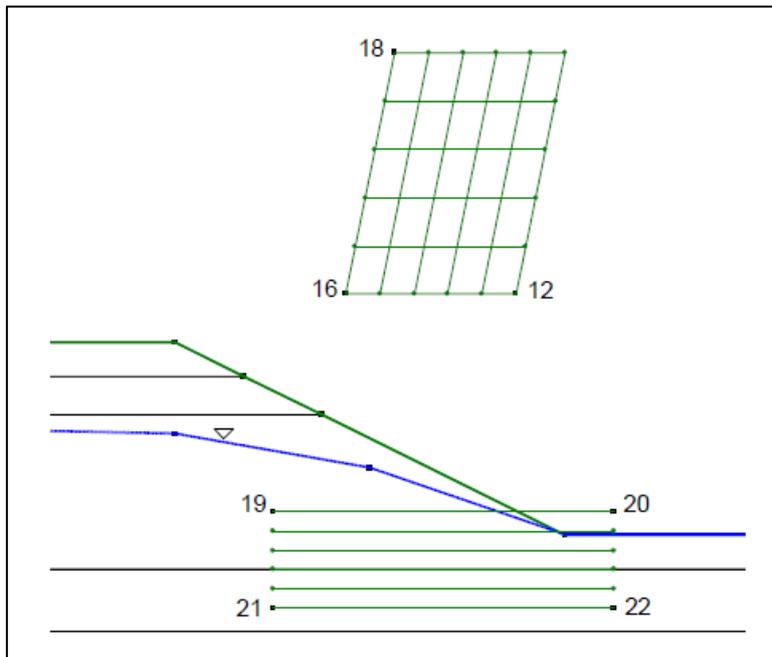


Figura 4.6 - Arco definido pelo método de Grade e Raio

No SLOPE/W a grade em questão é definida por três pontos, onde, necessariamente, precisam ser inseridos na seguinte ordem: canto superior esquerdo, canto inferior esquerdo e canto inferior direito. A partir disso, a quantidade de pontos será de acordo com o tamanho da grade especificada. Os pontos definidos pela grade mostrada acima são centros de rotação de vários círculos diferentes, sendo que cada ponto definirá um arco distinto que cortará o talude e, assim definirá uma possível superfície de ruptura, como retrata a Figura 4.7 a seguir.

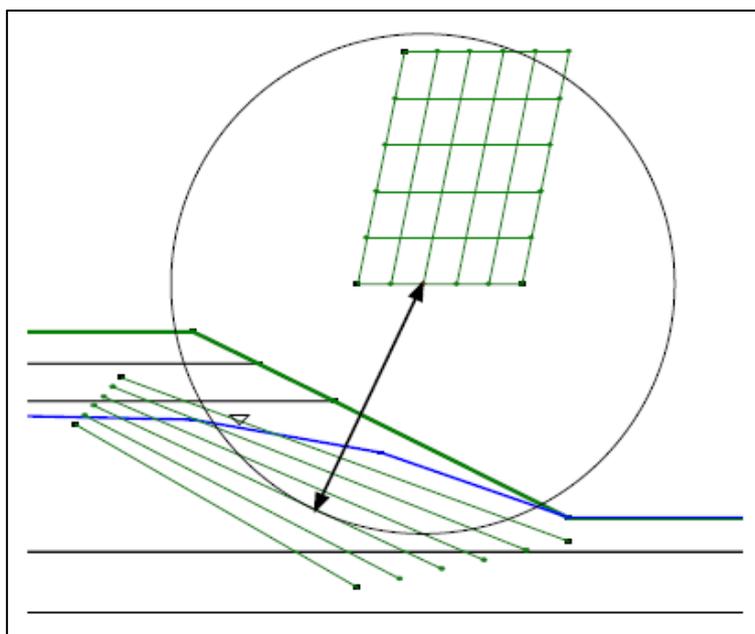


Figura 4.7 - Especificação das linhas de raio

4.3 MODELOS ADOTADOS

No estudo de caso em questão, uma grade de 20x20 foi utilizada, o que resultou em 9217 superfícies de pesquisa e aproximadamente 2000 iterações, sendo considerado um número suficiente para a validação do resultado obtido para o talude em estudo. É possível observar a grade utilizada e as superfícies determinadas na Figura 4.8 apresentada abaixo que, inclusive, representa a modelagem do talude em estudo.

Para o desenho do talude, adotou-se o perfil considerado mais crítico em relação aos dados apresentados anteriormente. Com isso, o modelo adotado apresenta por volta de 9 metros de altura e uma largura que chega próxima aos 4 metros. Assim, aproximadamente 73° é a inclinação definida para o modelo e, caso se constate a necessidade de uma intervenção de estabilidade, provavelmente a diminuição da inclinação será parte da solução.

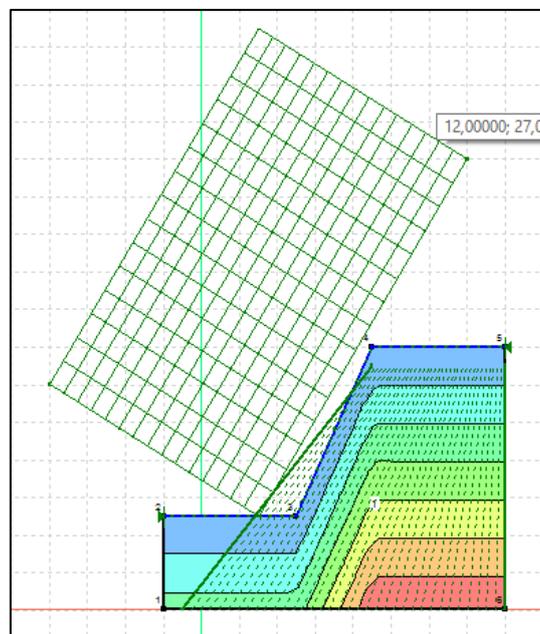


Figura 4.8 - Método de Grade e Raio sendo aplicado ao talude em estudo

Após a definição de geometria do talude, as regiões, as características dos materiais que compõem cada uma delas e o método de cálculo escolhido para a definição do Fator de Segurança, é possível clicar no botão “Iniciar” e obter os resultados.

Como previsto anteriormente, a análise probabilística é um dos objetivos desse estudo. Por isso, oito taludes foram modelados com diferentes parâmetros e a definição dessa variação foi feita de acordo com coeficientes de variação diferentes para peso específico, coesão e ângulo de atrito. Os coeficientes de variação serviram para a determinação de valores majorados e minorados para cada um dos parâmetros base que foram encontrados após os

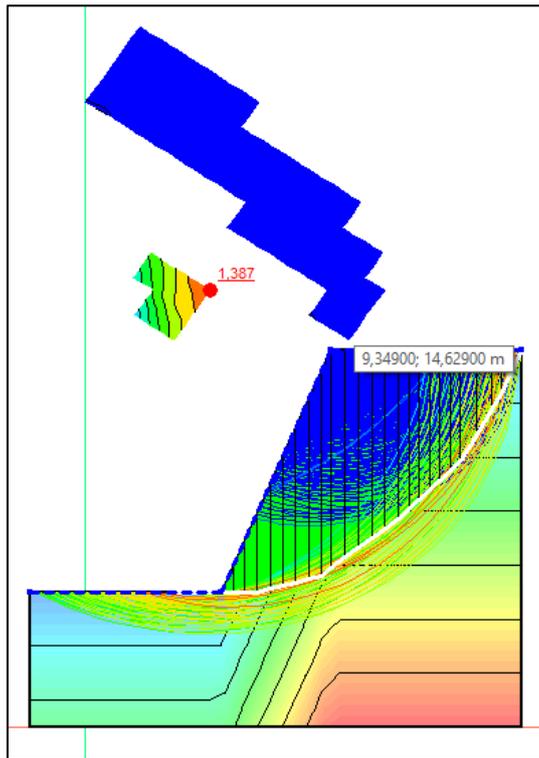


Figura 4.10 - Resultado para a Combinação 1

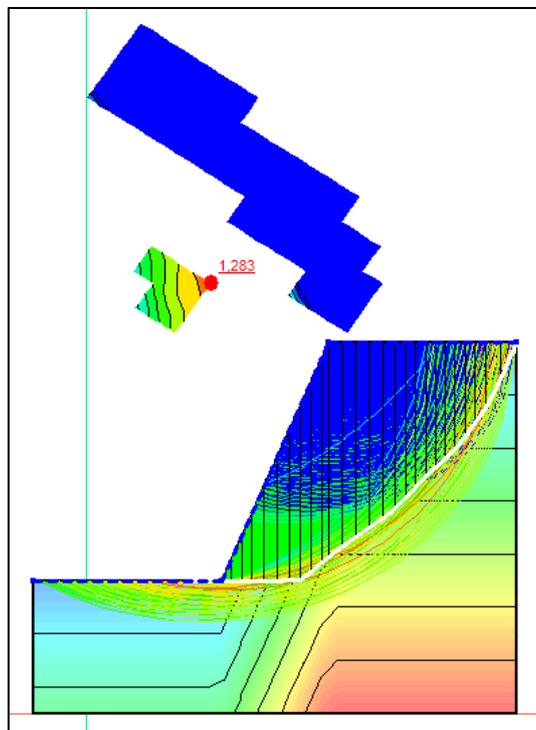


Figura 4.11 - Resultado para a Combinação 2

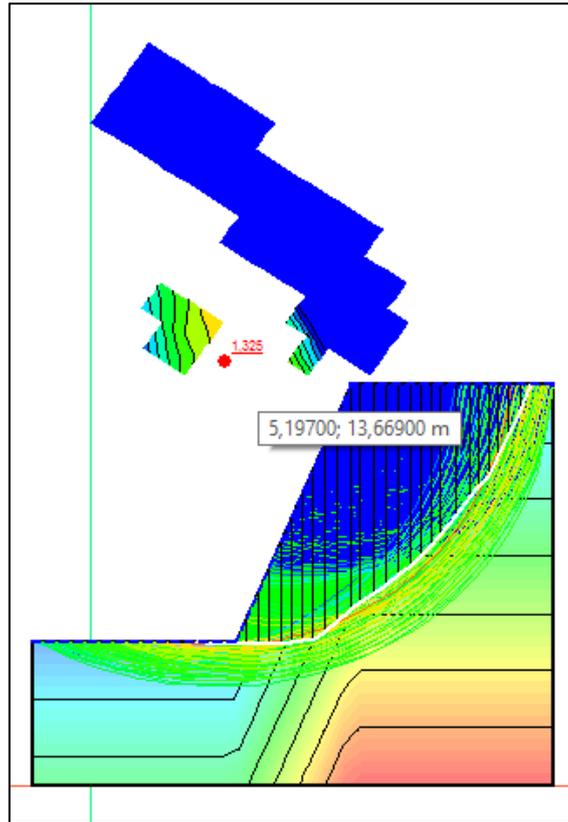


Figura 4.12 - Resultado para a Combinação 3

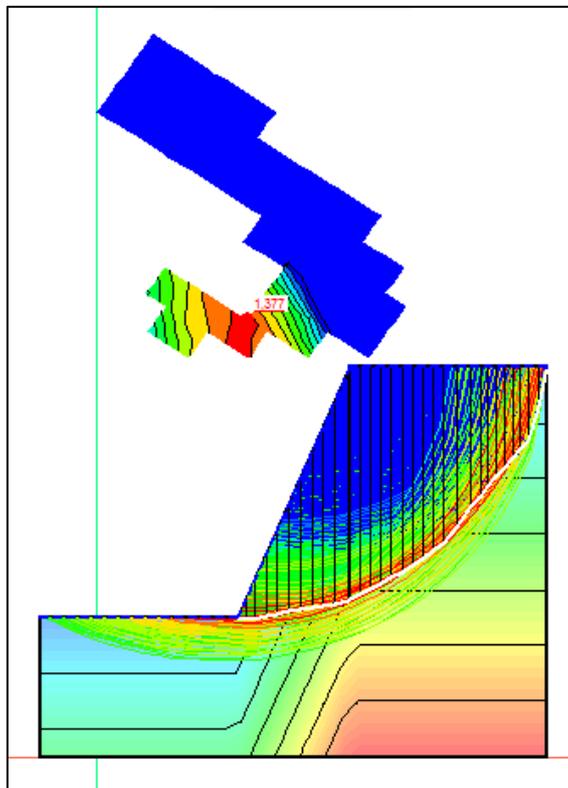


Figura 4.13 - Resultado para a Combinação 4

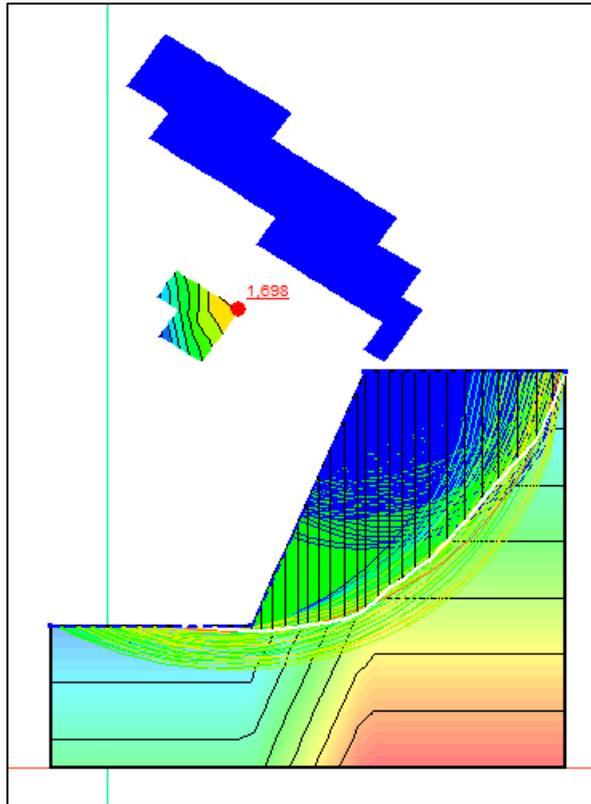


Figura 4.14- Resultado para a Combinação 5

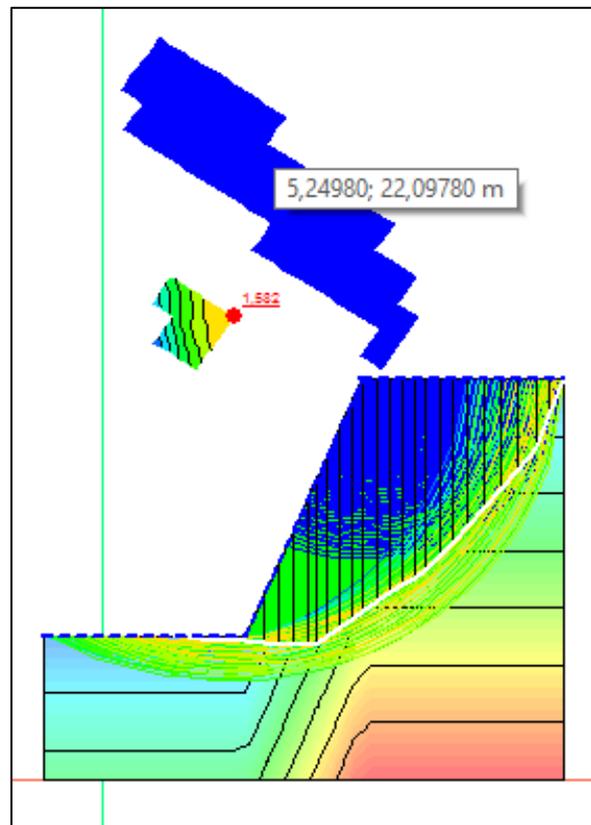


Figura 4.15 - Resultado para a Combinação 6

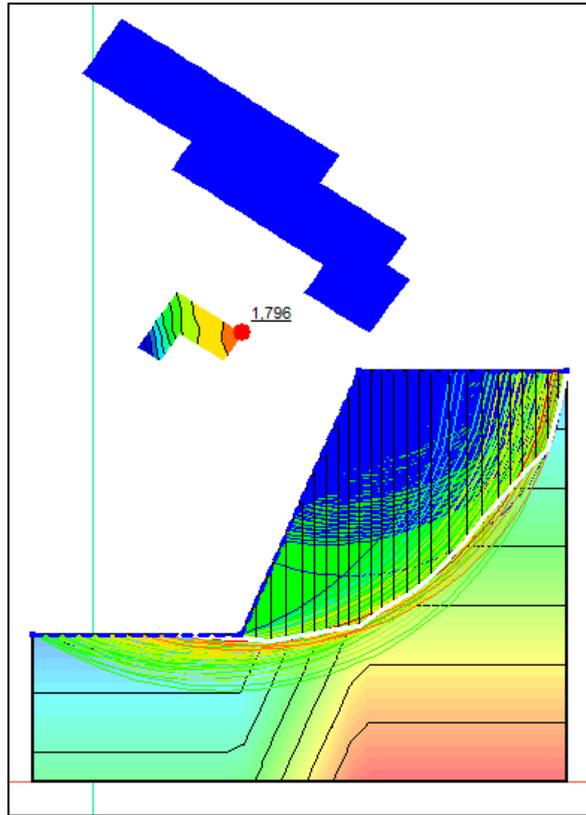


Figura 4.16 - Resultado para a Combinação 7

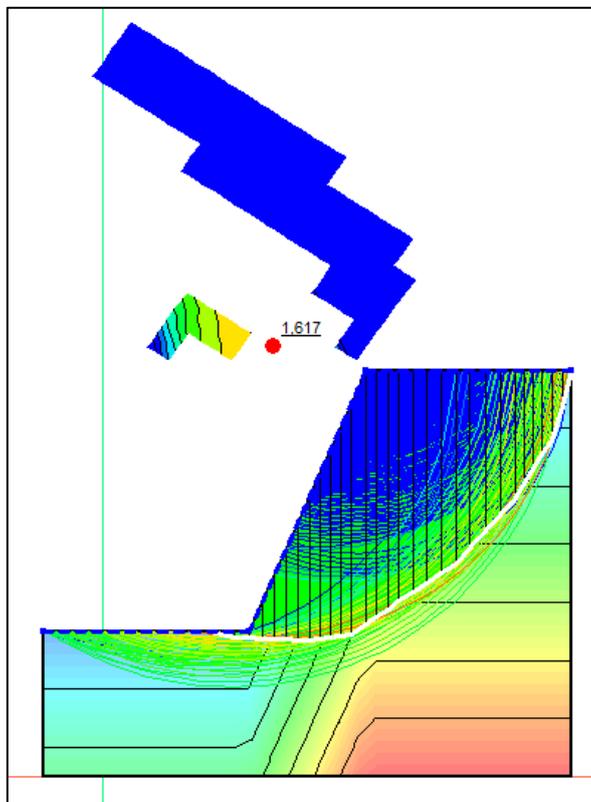


Figura 4.17 - Resultado para a Combinação 8

4.4 APRESENTAÇÃO DO MODELO PROBABILÍSTICO UTILIZADO

Para garantir a confiança dos resultados apresentados, é necessária uma análise probabilística dos Fatores de Segurança determinísticos que as modelagens apresentadas acima geraram. Para isso, o programa *Wolfram Mathematica* foi utilizado e um código desenvolvido para fazer os cálculos da probabilidade de ruptura do talude apresentado no estudo de caso. Os resultados referentes ao maciço em estudo são apresentados a seguir.

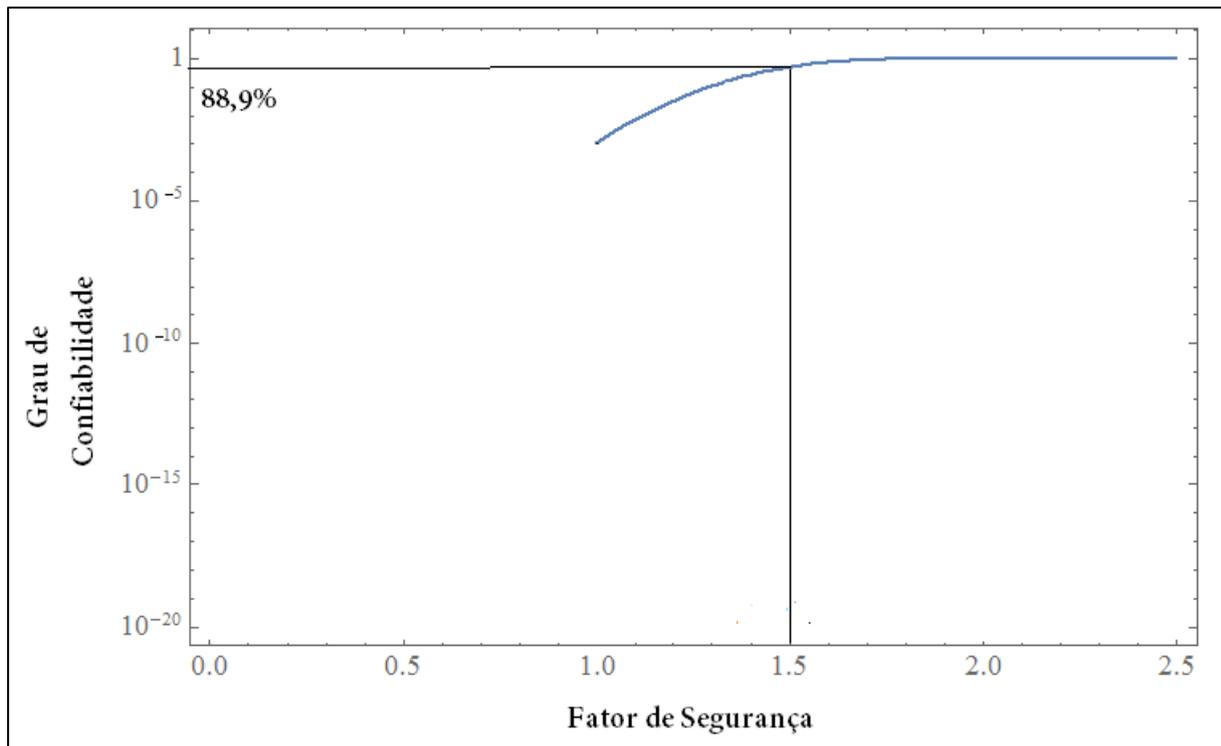


Figura 4.18 - Fator de Segurança x Grau de Confiabilidade

Como é possível observar através dos resultados obtidos, a confiabilidade do Fator de Segurança a ser considerado para o maciço não foi considerada suficiente. Sendo assim, a seguir será apresentada uma proposta de estabilização para o talude com o objetivo de modificar a estrutura e atingir um Fator de Segurança, por volta de 1,6. Esse valor foi escolhido pois a confiabilidade do talude com esse Fator de Segurança chegar a ser aproximadamente 98%, como mostra a Figura 4.18 - Fator de Segurança x Grau de Confiabilidade. As soluções apresentadas a seguir tem o intuito de mostrar processos plausíveis e factíveis de serem realizados em campo de acordo com o grau de confiabilidade que se deseja atingir.

5. PROPOSTA DE ESTABILIZAÇÃO

O principal objetivo desse capítulo é apresentar algumas possíveis propostas para a estabilização do talude que vem sendo estudado até aqui. Os métodos que serão apresentados foram escolhidos de forma que, de fato, pudessem ser executados em campo e pensando na melhor solução possível para a região. Dessa forma, serão expostas soluções estruturais para a estabilização, assim como soluções ambientais já consolidadas no mercado.

5.1 MUROS DE ARRIMO

O muro de arrimo, por vezes chamado de muro de contenção, é um tipo específico de muro que, além de isolar o terreno, tem a função de suportar as forças solicitantes que o solo impõe sobre a superfície lateral da estrutura. Geralmente, a execução de muros de arrimo é uma solução para garantir a segurança e a estabilidade de taludes que se encontram em terrenos em declive ou com inclinação que receberão cortes para se tornarem planos. Após a execução do corte previamente previsto em projeto, é normal que surjam as chamadas áreas de acomodação, que é exatamente o espaço encontrado entre o perfil do lote que existia previamente e a área que se tornou plana. O muro de arrimo garante, dessa forma, a estabilidade do maciço terroso da parte que se encontra em uma altura maior entre os dois lados da acomodação.

Os muros de arrimo são normalmente construídos com a utilização de blocos de concreto ou cerâmicos, podendo também serem executados com ou sem uma estrutura metálica. Quando a construção desse tipo de solução é feita com pedras, os gabiões são os mais comuns, como é possível observar no item 5.2.

O principal problema observado nas contenções que utilizam muro de arrimo é a desconsideração prévia do efeito que a água causa quando o solo a ser contido está saturado. Isso faz com que as tensões adicionais produzidas pelo efeito da água superem, em muitos casos, a resistência prevista para o muro. Dessa forma, é muito importante que haja um sistema capaz de retirar o máximo possível de água da parte de trás do muro, pois assim os efeitos de acréscimo de tensão são minimizados. Encontra-se, normalmente, sistemas de drenagem que utilizam drenos com a função de escoar a água pela lateral do muro de arrimo. Quando da concepção em projeto do sistema de drenagem, deve ser considerada uma camada

de brita localizada entre o solo e os drenos, pois, dessa forma, é possível evitar que a ação da água transporte partículas de solo para a parte interna dos drenos, o que faria com que eles ficassem entupidos e, com o tempo, perderiam sua função e acrescentariam um custo de manutenção desnecessário a estrutura.

Além dos elementos de precaução citados acima, talvez o mais importante de todos seja a impermeabilização da parte de trás da estrutura de contenção, principalmente se a frente estiver virada para dentro de uma casa, por exemplo. A impermeabilidade garante que o transporte da água para o lado de fora seja feito apenas através dos drenos, o que mantém o outro lado seco. É possível observar pela Figura 5.1 como é a aparência de um muro de arrimo.



Figura 5.1 - Muro de Arrimo

5.2 GABIÃO

Os gabiões são, provavelmente, uma das mais antigas soluções para problemas de infraestrutura usadas na engenharia. Registros mostram que sua utilização já era feita de maneira rudimentar por egípcios e chineses desde épocas antes de Cristo. A versão moderna do gabião, com gaiolas metálicas, surgiu na Itália em meados do século XIX.

O gabião é conhecido por ser uma estrutura de contenção com boa resistência aos esforços solicitantes, além de, comparado com outros métodos de estabilização, possuir baixos níveis de impacto ambiental quando executado. Este muro, por assim dizer, é basicamente composto por uma estrutura de pedra, onde as pedras são encaixadas em gaiolas

de arame e empilhadas de acordo com o dimensionamento feito em projeto. Essa característica faz com que sejam muito permeáveis, sendo em média 30% de seu volume composto por vazios. Os muros de gabião utilizam o seu próprio peso para gerar a resistência necessária para combater os esforços solicitantes e, por isso, geralmente possuem grandes dimensões. É normal observar soluções como essa sendo implementadas em margens de rios e córregos, pois, como mencionado anteriormente, o impacto ambiental realmente é muito baixo. Um outro ponto favorável a utilização dessa solução é o custo benefício, quando comparado com outros métodos de contenção. Porém, a execução é considerada extremamente artesanal, o que leva a um alto prazo de execução e uma mão de obra com certa especialização. A Figura 5.2 a seguir apresenta a estrutura depois de implementada.



Figura 5.2 - Gabião

5.3 SOLO GRAMPEADO

O Solo Grampeado é conhecido como uma técnica de contenção de taludes feita com a utilização de chumbadores, concreto projetado e um sistema de drenagem. Cada um dos componentes tem sua devida importância, sendo que os chumbadores são responsáveis por promover a estabilização global do maciço, o concreto projetado gera o auxílio necessário para a estabilidade local e a drenagem age em ambos os casos.

Essa solução pode ser aplicada em casos onde o maciço precise ser cortado e geometria resultante não seja estável, ocasiões em que taludes já existentes não tenham a estabilidade satisfatória e, além disso, em taludes rompidos. É importante ressaltar que não existe norma específica da ABNT para a execução de solo grampeado, por isso será apresentado em

seguido o método construtivo geralmente utilizado e que, nos dias de hoje, já é consolidado no mercado. A Figura 5.3 mostra como é um solo grampeado.



Figura 5.3 - Solo Grampeado

5.3.1 MÉTODO CONSTRUTIVO

Como mostra a Figura 5.4, o processo inicia-se com a execução do corte do solo de acordo com a geometria pré-determinada em projeto, buscando a estabilidade prevista para o talude após o corte. Em seguida, a primeira linha de chumbadores é realizada, assim como a aplicação do revestimento de concreto projetado. Em casos onde o talude já esteja cortado, a execução pode ser feita de forma ascendente ou descendente, utilizando-se sempre a maneira que for mais conveniente para os operários. De maneira simultânea ao avanço dos trabalhos, são executados os drenos profundos de paramento e as canaletas ou descidas d'água, conforme o que estiver previsto em projeto.



Figura 5.4 - Execução de um Solo Grampeado

5.3.1.1 CHUMBADORES

São peças com molde realizado *in loco* por meio de ações de perfuração, sendo possível tanto a utilização de equipamentos mecânicos ou manuais. A seguir, é feita a instalação e a fixação da armação metálica, definida previamente em projeto, com injeção de calda de cimento sob pressão. É possível encontrar também a execução de chumbadores através de cravação de barras, cantoneiras ou tubos de aço, com a utilização de martelos pneumáticos ou ferramentas manuais.

5.3.1.2 PERFURAÇÕES

As perfurações são geralmente executadas por equipamentos de fácil manuseio, instaláveis sobre qualquer talude. O fluido de perfuração utilizado pode ser água, ar ou lama. Caso seja feita a opção por trados, a utilização de fluidos não é necessária. Dependendo da profundidade do furo, do diâmetro e da área de trabalho, pode-se optar por perfuratrizes do tipo sonda, crawlair, wagon drill ou até mesmo por perfuratrizes manuais. A bainha é a fase inicial de injeção, que tem como objetivo a recomposição da cavidade escavada. Dessa forma, é injetada pelo tubo auxiliar removível, de forma ascendente, com calda de cimento até extravasar pela boca do furo. Como alternativa, pode-se preencher o furo com calda e então introduzir a estrutura metálica. Após um mínimo de 12 horas, o chumbador deve ser reinjetado através do tubo de injeção perdido, anotando-se a pressão máxima de injeção e o

volume de calda absorvida. A reinjeção não deve ser executada, a não ser que haja dois ou mais tubos de injeção perdidos.

5.4 TERRA ARMADA

Os muros em Terra Armada são normalmente estruturas de contenção do tipo gravidade e consideradas flexíveis. Esse tipo de muro é muito comercializado para obras rodoviárias, ferroviárias e industriais. Por ter uma capacidade muito alta de suportar carregamentos, o muro de Terra Armada geralmente é a solução ideal para situações onde muros de grande altura são exigidos. O princípio da tecnologia utilizada na estrutura é a interação que ocorre entre o aterro selecionado e os reforços (armaduras de alta aderência) que, se forem dimensionados de forma correta, acabam gerando um maciço bem integrado no qual as armaduras resistem de forma satisfatória aos esforços de tração desenvolvidos no seu interior. Os maciços armados resultantes acabam se comportando como um corpo “coesivo” monolítico que é capaz de suportar, além de seu próprio peso, as cargas externas para as quais foram dimensionados.

Os elementos de reforço são os componentes chave das estruturas em Terra Armada. São encontradas como reforço, na grande maioria dos casos, armaduras de aço do tipo HA. Esse tipo de aço tem alta aderência, que são perfis especiais de aço, zincados a fogo, de acordo com as especificações Terra Armada. Estes elementos têm características físicas e geométricas que lhes conferem grande resistência à tração, ductilidade, e excelente coeficiente de aderência ao solo. A elevada resistência à tração, a capacidade de não se deformar ao longo do tempo sob tensão constante e sob cargas dinâmicas e a resistência ao manuseio durante as etapas construtivas, são características importantes deste tipo de armadura, que não têm similares dentre os elementos de reforço de solos.

5.4.1 VANTAGENS DO USO DA TERRA ARMADA

RESISTÊNCIA INTERNA: Em conjunto com a estabilidade externa do maciço armado, o conjunto obtém alta capacidade de resistir tanto às cargas estáticas quanto às cargas dinâmicas que possam vir a atuar no maciço.

CONFIABILIDADE – O conhecimento sobre durabilidade dos materiais utilizados para a execução da estrutura é muito bem documentada e de fácil monitoramento. Dessa forma, o grau de confiabilidade da estrutura é alto.

ADAPTABILIDADE – A tecnologia utilizada permite que se projete soluções arrojadas para casos complexos. Dessa forma, a solução apresenta, muitas vezes, ser a melhor para problemas onde a faixa de domínio é estreita, casos onde encontra-se taludes naturais instáveis, situações onde as condições limites de fundação apresentam expectativa de recalques significativos, entre outros.

5.4.2 DESVANTAGENS DO USO DA TERRA ARMADA

É claro que existem também algumas desvantagens a serem discutidas em relação ao uso deste tipo de muros. Pode-se observar, por exemplo, a necessidade de um espaço com largura suficiente atrás da estrutura, pois normalmente os muros executados possuem uma grande espessura de forma a atingir tanto a estabilidade interna como a externa. Além disso, existe um cuidado especial durante a fase de projeto para que se garanta elementos necessários de forma que não ocorra a corrosão do aço utilizado como elemento de reforço. Por fim, projeto e execução de muros de Terra Armada não são simples, o que demanda um certo investimento em profissionais com experiência e conhecimentos específicos tanto na área geotécnica quanto na área estrutura. A Figura 5.5 apresenta como é a estrutura de um muro de Terra Armada durante sua execução.



Figura 5.5 - Terra Armada

5.5 COBERTURA VEGETAL PARA ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES

Estudos mostram que a vegetação vem sendo utilizada para soluções na engenharia há séculos, tanto no controle de processos erosivos quanto no reforço em obras civis. As técnicas que conjugam a utilização desse elemento vivo na engenharia são denominadas bioengenharia de solos (KRUEDENER, 1951), sendo as regiões tropicais e subtropicais geralmente as mais atrativas para esse tipo de solução. Isso se deve ao fato de que as condições favoráveis ao crescimento da vegetação são praticamente constantes ao longo do ano. Além disso, as soluções com utilização de vegetação são muito bem aceitas pelo mercado já que, em sua maioria, o investimento é baixo, a exigência técnica não é elevada em relação aos procedimentos de execução e a adequação paisagística agrada os especialistas.

Porém, a execução de soluções ambientais, principalmente com a utilização de cobertura vegetal, tem sido feita de forma inadequada, o que agrava os problemas ao invés de minimizá-los. Stocking (1996) expõe duas situações específicas em que a introdução equivocada de arbóreas de rápido crescimento causou o agravamento do processo erosivo que, supostamente, era para ser minimizado com a solução. A primeira delas aconteceu no Vale do Rio Doce – MG, onde o uso de *Eucalyptus ssp* para o controle de processos erosivos em sulco acabou maximizando a deterioração do local. Já o segundo exemplo ocorreu em Mondoro, no Zimbábue, e as árvores plantadas com o objetivo de controlar ravinamentos acabou provocando a evolução dos mesmos. Portanto, o uso da vegetação para controle de processos

erosivos deve atender critérios rigorosos e específicos, já que a má execução das soluções projetadas pode interferir de maneira intensamente negativa na transferência da água da atmosfera para o solo nas águas de infiltração e nos sistemas de drenagem superficial.

5.5.1 INFLUÊNCIA DA VEGETAÇÃO NA ESTABILIDADE DO SOLO

A vegetação pode exercer uma influência bastante significativa na estabilidade de taludes em encostas, mas não necessariamente esse efeito será sempre positivo. Por isso, é muito importante o conhecimento das espécies a serem utilizadas para que a aplicação ocorra nos locais desejados. A seguir é apresentada uma relação das principais qualidades e defeitos que a maioria das plantas tem sobre o maciço em que estão sendo aplicadas.

As raízes, na grande maioria dos casos, agem no sentido de agregar as partículas de solo, gerando mais coesão e aumentando a resistência do solo. Além disso, por ter uma porosidade alta, acabam aumentando a taxa de infiltração do solo e funcionam como canais de sucção. Por outro lado, raízes finas e superficiais, como as do bambu por exemplo, impedem a infiltração e desagregam as partículas do solo. Uma outra desvantagem é que raízes secas acabam por concentrar fluxo de águas pluviais.

Em relação a caules e folhas, pode-se citar o efeito positivo que tem em relação a minimização da erosão laminar e o aumento de rugosidade. Plantas rasteiras também devem ser mencionadas pelo alto potencial de recobrimento do solo com eficiência. Sobre os efeitos negativos, caules e folhas tendem a aumentar as forças atuantes no solo, o que pode ser um potencial motivo para provocar deslizamentos.

A Figura 5.6 expõe em forma gráfica como são os efeitos da vegetação na melhoria da estabilidade de um talude, comparando as mesmas condições para um talude onde existe a cobertura vegetal e sem vegetação, em razão da inclinação e do fator de segurança. Com uma inclinação de 45°, sem a proteção do talude com vegetação e na condição insaturada, o fator de segurança é algo em torno de 1,3; por outro lado, quando ocorre a execução da proteção vegetal no talude, o fator de segurança aumenta para um valor por volta de 2,8; portanto, a melhoria da estabilidade é muito significativa. É possível observar que, mesmo na condição saturada, a vegetação também contribui para melhorar a estabilidade do talude aumentando o Fator de Segurança.

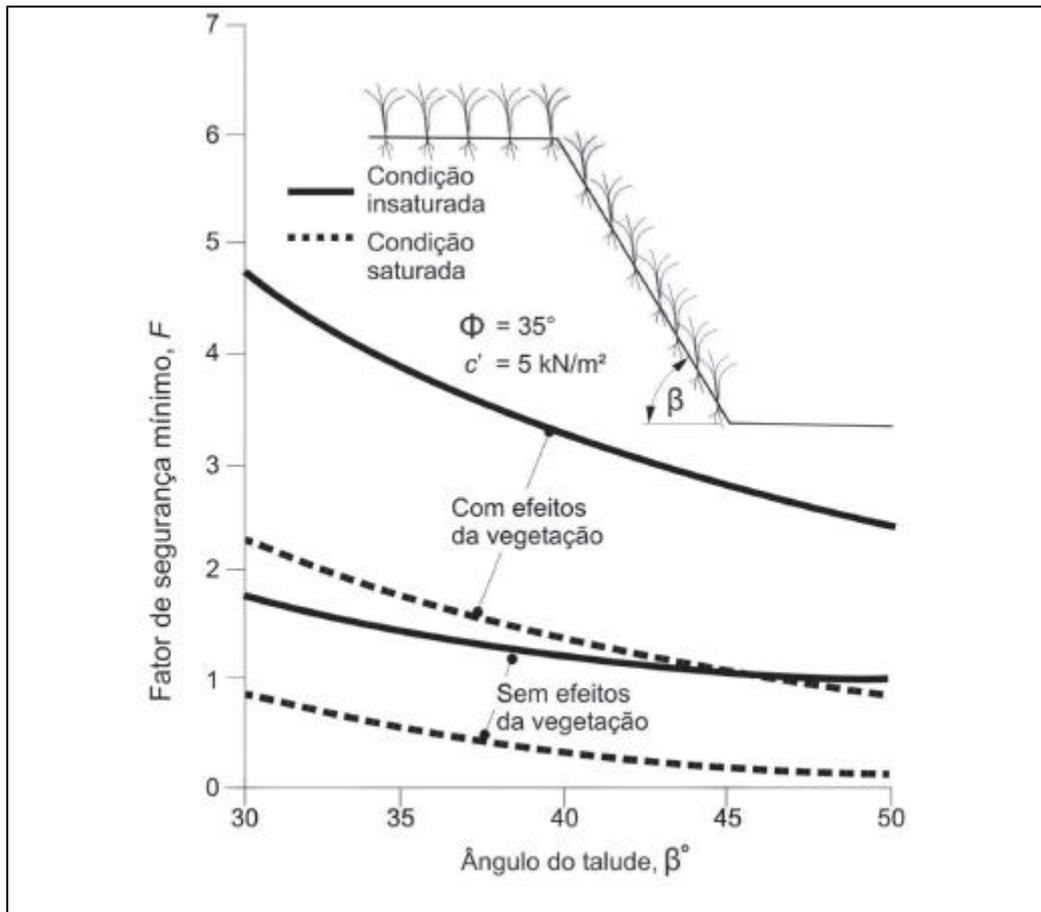


Figura 5.6 - Efeito da vegetação na estabilidade de um talude

Os principais mecanismos de interferência entre a estabilidade do solo e a vegetação constituem-se de:

5.5.1.1 REFORÇO DA MASSA DE SOLO PELAS RAÍZES

As raízes das plantas, em geral, auxiliam na estabilização das partículas do solo por meio do aumento da resistência ao cisalhamento do solo promovida pelas radículas (raízes secundárias). A estabilização de movimentos de massa é geralmente alcançada devido ao efeito das raízes pivotantes. Essas raízes são popularmente chamadas de “tirantes vivos”, pelo efeito promovido no solo, sendo muito encontrado em perfis em que existe uma diferença brusca de resistência ao cisalhamento de acordo com a profundidade.

O aumento da resistência ao cisalhamento do solo promovido pelas raízes está diretamente ligado à transferência de tensões que ocorre do solo para as raízes. Esse efeito é chamado de reforço radicular e varia de acordo com os valores de resistência à tensão das raízes, as propriedades existentes na interface entre as raízes e o solo, características da

distribuição das raízes no solo (arquitetura radicular), espessura e, por fim, a declividade do solo. É importante ressaltar que essas características variam ao longo do ano de acordo com a condições climáticas, pois tais fatores influenciam no crescimento da vegetação.

5.5.1.2 INTERCEPTAÇÃO DA CHUVA

A parte aérea da vegetação ajuda na interceptação das gotas de chuva, taxa esta que acaba variando de acordo com a intensidade e o volume de chuva, além das características da superfície foliar. Coppin e Richards (1990) mostram uma interceptação média de 30%, ao ano, para locais com cobertura vegetal.

5.5.1.3 REDUÇÃO DOS EFEITOS DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL

A vegetação, como mostrado anteriormente, auxilia a estabilização da massa de solo com os aumentos dos valores de rugosidade superficial, infiltração e interceptação. Dessa forma, possíveis enxurradas em áreas recobertas por vegetação são significativamente menores que as que ocorrem em áreas com o solo descoberto. Em pequenas áreas de contribuição recobertas por árvores e gramíneas, ela corresponde a valores que variam entre 10% a 20% do volume de água precipitados, entre 30% a 40% sob áreas cultivadas e entre 60% a 70% em assentamentos urbanos.

5.5.1.4 VELOCIDADE DE ESCOAMENTO

O aumento da rugosidade é um dos fatores positivos no processo de cobertura vegetal em taludes e essa característica é a responsável por diminuir a velocidade de escoamento da água. A rugosidade hidráulica e, conseqüentemente, o retardamento do escoamento dependerão tanto da morfologia das plantas quanto da densidade de crescimento, da altura das plantas e da espessura da lâmina d'água.

5.5.1.5 INFILTRAÇÃO

Coppin e Richards (1990) citam em seu livro que o teor de umidade do solo pode aumentar juntamente com o aumento da infiltração de enxurradas, em comparação a áreas não vegetadas. Porém, os mesmos afirmam também que os efeitos citados podem, de certa forma, serem reduzidos pelas ações de interceptação e transpiração que a vegetação provoca. Uma outra grande colaboração da vegetação é a eliminação por completo dos processos de selamento superficial, acontecendo devido à impermeabilização da camada subsuperficial do solo.

5.5.1.6 ESTABILIDADE DE TALUDES

A vegetação vem exercendo, a cada dia mais, um papel de grande importância na estabilização de taludes. As consequências que a vegetação provoca em taludes, encostas e superfícies rochosas apresentam incontáveis aplicações diferentes, como em mineração, rodovias, ferrovias, barragens, proteção de margens de corpos d'água e costeira, além de praticamente todos os tipos de execução de cortes e aterros. O quadro a seguir, de forma sintetizada, apresenta os efeitos da vegetação com esse tipo de aplicabilidade:

| Natureza do efeito | Influência | Mecanismo hidrogeológico | | | |
|---------------------------------------|----------------------------|--|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| | | | Superficial ¹ | Subsuperficial ² | Profunda ³ |
| Equilíbrio de forças da massa do solo | Reforçamento radicular | Raízes reforçam o solo, aumentando sua resistência ao cisalhamento | + | + | |
| | Atirantamento radicular | Raízes de árvores podem ancorar em estratos firmes, proporcionando suporte a estratos superiores de menor coesão | | + | + |
| | Ancoramento radicular | | | + | + |
| | Sobrecarga | O peso de árvores sobrecarrega o talude, aumentando os componentes da força normal e descensional | | - | |
| | Tombamentos | A vegetação exposta ao vento transmite forças dinâmicas para o talude | | - | |
| | Recobrimento superficial | A folhagem e a biomassa decaída protegem o solo e fornecem substâncias agregantes | + | + | |
| | Retenção | Partículas minerais do solo são soldadas pelas raízes superficiais. | + | | |
| Alterações do regime hídrico do solo | Interceptação | A parte aérea intercepta e evapora a precipitação, reduzindo a quantidade de água infiltrada | + | + | |
| | Infiltração | Raízes e ramos aumentam a rugosidade superficial e a permeabilidade do solo, aumentando a infiltração. | + / - | + / - | + / - |
| | Evapotranspiração | A sucção radicular retira umidade, reduzindo a poropressão da água no solo. Em situações extremas, pode gerar trincamentos, gerando altos índices de infiltração | + / - | + / - | + / - |
| Microclima solo-atmosfera | Proteção | Diminuição da força trativa de ventos | + | | |
| | Isolamento térmico do solo | Proteção contra trincamentos por calor ou frio | + | + | |

Figura 5.7 - Efeitos mecânicos da vegetação em taludes

6. RETALUDAMENTO COM COBERTURA VEGETAL DE CAPIM VETIVER

6.1 RETALUDAMENTO

O retaludamento é um método de estabilização bastante conhecido e comumente utilizado em obras para garantir a estabilidade de taludes, pois a sua simplicidade e eficácia são fatores que chamam bastante atenção. Geralmente, traz associada consigo uma obra de controle de drenagem e proteção superficial, com o intuito de reduzir a infiltração de água no terreno e disciplinar seu escoamento, o que é capaz de inibir os processos erosivos. Por se tratar de uma solução não estrutural, percebe-se uma execução simples e de baixo custo quando comparada a soluções estruturais. Raramente acha-se empecilhos em relação ao tipo de solo da região, fazendo com que praticamente qualquer tipo de rocha ou solo sejam adaptáveis às soluções de retaludamento. Consiste basicamente de um processo de terraplanagem onde, através de cortes ou aterros, alteram-se os taludes originalmente existentes em um determinado local para se conseguir uma estabilização do mesmo.

6.1.1 MODELAGEM DO RETALUDAMENTO EM ESTUDO

Como mostrado anteriormente na seção 4, o estudo de estabilidade mostrou, através de um cálculo de fator de segurança associado a uma análise probabilística, a necessidade de uma intervenção no sentido de garantir a estabilidade da estrutura. Depois de vários métodos de estabilização mostrados, foi apresentado que o retaludamento com auxílio de uma cobertura vegetal (capim Vetiver) seria a solução adotada para o talude em estudo. Dessa forma, é necessária uma nova modelagem, apresentando a geometria final prévia que o talude obterá depois das intervenções, assim como o novo Fator de Segurança. Para isso, utilizou-se as mesmas premissas abordadas anteriormente para a modelagem do talude original e o mesmo software (SLOPE/W).

A seguir é apresentada a estrutura novamente modelada, suas respectivas dimensões geométricas e o Fator de Segurança alcançado. Vale ressaltar que por se tratar basicamente de um processo mecânico, o retaludamento utilizado aqui não muda em nada as características

geotécnicas do solo. Sendo assim, os mesmos parâmetros utilizados anteriormente para ângulo de atrito, coesão e peso específico foram adotados para a remodelagem.

Para o talude em estudo, a remodelagem foi feita de forma que fosse possível atingir um Fator de Segurança igual a 1,6. Dessa forma, atingiria os limites estabelecidos pela norma e ainda ficaria com um nível de confiabilidade alto, por volta de 98% como a análise probabilística mostrou. As novas dimensões físicas após o retaludamento são mostradas a seguir pela Figura 6.1, assim como o respectivo Fator de Segurança alcançado. De forma resumida, o talude que se encontrava com aproximadamente 73° de inclinação, foi cortado de forma a atingir uma inclinação próxima a 50° e garantir o Fator de Segurança citado anteriormente. A geometria final não teve alteração na altura, mas o comprimento, estimado em 4 metros anteriormente, passou a ser de 8 metros.

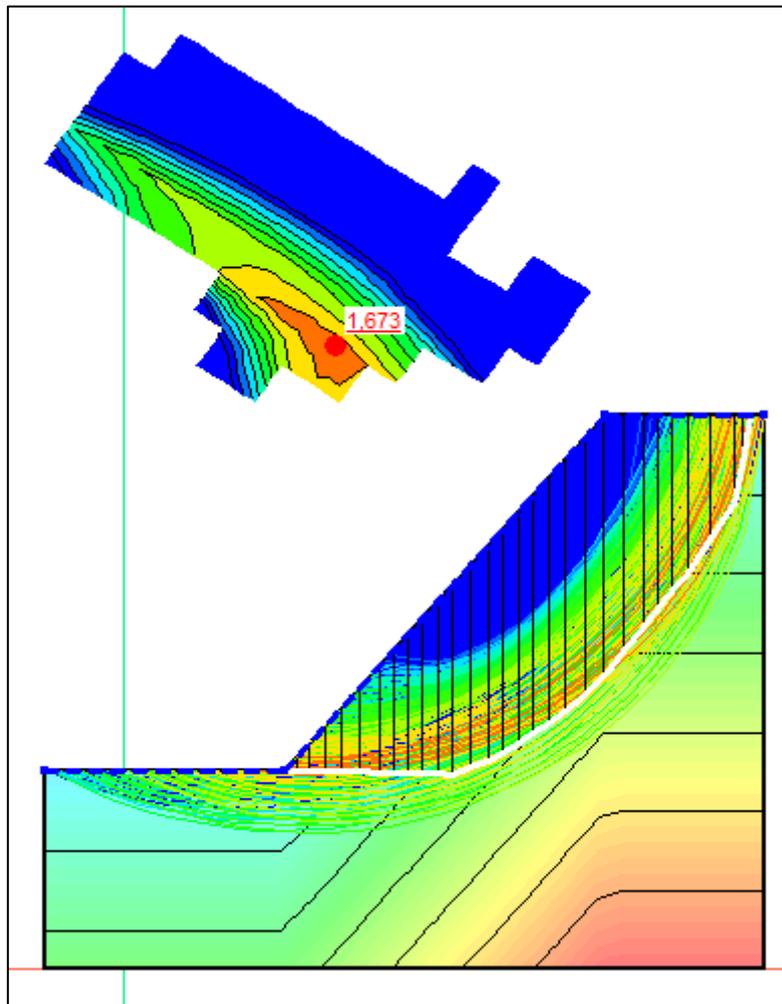


Figura 6.1 - Perfil após o retaludamento

6.2 USO DO VETIVER NA ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES E ENCONSTAS

O capim vetiver é considerado uma gramínea e já vem desde a década de 80 sendo utilizado pelo Banco Mundial, principalmente para o auxílio no controle de erosões, em processos que sejam feitos para a conservação de solos e água. Primordialmente pelo fato de se reproduzir através de mudas, o capim vetiver não é caracterizado como uma planta invasora. Dessa forma, sua utilização é altamente recomendada para qualquer sítio ecológico. A Figura 6.1 ilustra como a planta se comporta em áreas com potencial de ruptura.

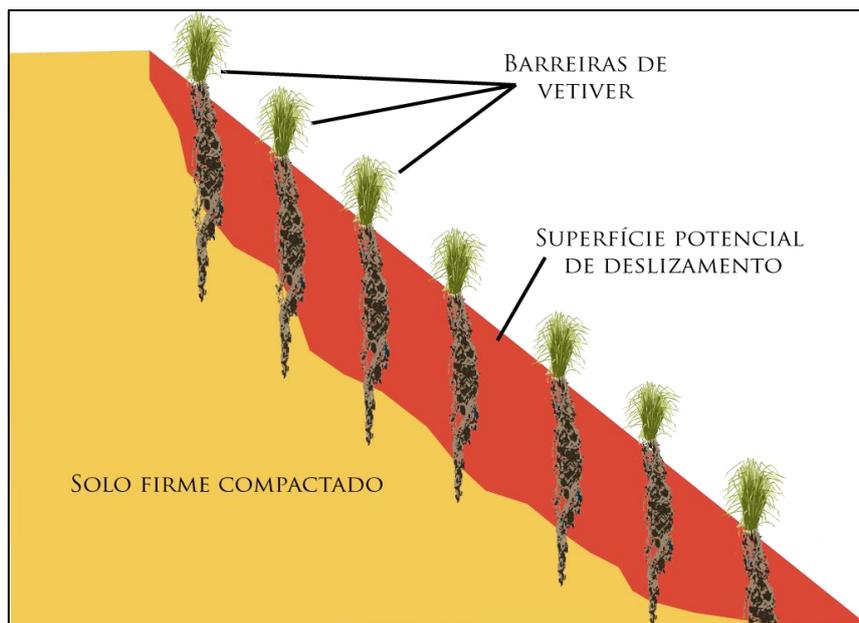


Figura 6.2 - Capim Vetiver

6.2.1 USO DO SISTEMA VETIVER NO BRASIL

O Brasil ainda não é referência no uso da solução, pois a produção ainda é pequena e não existe grande conhecimento sobre suas funções. Porém, pela alta qualidade do produto, as perspectivas de crescimento no mercado brasileiro são grandes.

Já existem, na Região Sudeste, alguns trabalhos que visam expor como funciona o uso do vetiver na estabilidade de taludes e os resultados apresentados tem mostrado grande potencial de crescimento para o produto no Brasil. As características que mais chamam atenção são baixo custo e eficiência e, por isso, a demanda deve crescer bastante nos próximos anos.

6.2.2 CARACTERÍSTICAS DO CAPIM VETIVER

Com intuito de identificar as melhores qualidades do produto, a seguir serão apresentadas algumas características que mais se destacam em soluções com a utilização do produto em estudo. Por isso, a planta pode ser usada com segurança, eficiência, sem agredir o meio ambiente e ainda com uma grande utilidade para a sociedade e para a engenharia.

- Por não serem plantas invasoras, as sementes da planta são estéreis e incapazes de se propagarem por meios próprios, o que as tornam também inofensivas no sentido de se tornarem uma erva-daninha;
- A coroa do capim vetiver encontra-se sempre embaixo do nível do solo e isso faz com que estejam sempre protegidas ao fogo e a possíveis pisadas;
- A perenidade é considerada permanente e com altíssima capacidade de sobrevivência, desenvolvendo-se apenas no local onde foram previamente plantados;
- A barreira viva formada acima da superfície do solo funciona como uma espécie de filtro, reduzindo a energia potencial do *run off* e retendo sedimentos;
- Capacidade de crescimento em praticamente qualquer tipo de terreno. Pouco influenciável por características do solo, como pH, toxidez, salinidade e resíduos industriais;
- Facilmente removível a partir do momento em que não se deseja mais utilizá-la;
- Não é uma planta conhecida por ser hospedeira de insetos e fungos, apresentando-se livre de pragas e doenças;
- Com raízes capazes de atingir até 3 (três) metros de altura, é capaz de suportar rachaduras na estrutura do solo;
- Por ser uma planta xerófica e hidrófica, condições de extremas secas ou grandes encharcamentos não afetam de forma significativa seu desenvolvimento.

6.2.3 RISCOS E IMPACTOS AMBIENTAIS

O Vetiver é considerado uma das plantas mais seguras do mundo, pois não oferece qualquer risco de se transformar em erva invasora fora de seu habitat natural. Registros mostram que, mesmo sendo cultivado há séculos em várias partes do mundo, nunca houve qualquer planta que tivesse “escapado” às áreas de cultivo previamente determinadas. Estudos recentes mostram que amostras de Vetiver provenientes de vários países, em sua grande

maioria, são geneticamente idênticas e parecem descender de um mesmo genótipo, garantindo, dessa forma, a homogeneidade e estabilidade da planta. Milhares de hectares de terras cultivadas estão sob sistema de proteção, principalmente na Índia, China e algumas regiões da África. O Sistema Vetiver já ultrapassa os 200 anos de cultivo na Índia, sendo que os “terraços vegetais” na ilhas Fiji já são conhecidos há mais de 50 anos. Durante todo esse tempo, nunca foi identificado nenhum perigo de doença ou praguejamento devido à planta. O laboratório *Engineering Research Laboratories (USACERL)* foi o responsável por testar, durante mais de 5 anos, como o Vetiver se comporta como ferramenta biotecnológica na estabilização e preservação de solos com estruturas e texturas distintas, sendo os resultados impressionantes e a constatação da qualidade do produto obtida.. A Agência para o Desenvolvimento Internacional dos Estados Unidos (U.S. Agency For International Development - USAID); o Conselho de Pesquisa dos Estados Unidos (The National Research Council – NRC), e a Academia de Ciência Naturais (National Academy of Sciences) pesquisaram o Sistema Vetiver, sendo aprovada, por unanimidade, como tecnologia barata, eficaz e segura para o efetivo controle de erosão e conservação da água no solo”. Devido as suas impressionantes características e respostas em campo, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), por meio de sua “Norma 074/2006 – ES” (Tratamento ambiental de taludes e encostas por intermédio de dispositivos de controle de processos erosivos), indica o uso da planta. Da mesma maneira, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) aconselha o uso do Vetiver no controle de voçorocas em áreas rurais, principalmente pelo baixo custo associado à execução da técnica.

6.2.4 ESTABILIZAÇÃO DE TALUDES

Uma das razões mais comuns encontradas no Brasil nos dias de hoje para a instabilidade de taludes é a erosão, o que pode causar falhas e até mesmo grandes movimentos de massa, explicados anteriormente com o uso do termo “deslizamentos”. Para o controle e segurança desse tipo de maciço, a cobertura vegetal pode ser uma solução, principalmente quando baseada no emprego de gramíneas, leguminosas e até mesmo de árvores. Porém, o uso de espécies arbóreas pode provocar o agravamento dos processos erosivos em áreas previamente instáveis. Dessa forma, a principal recomendação é o plantio de espécies que possuam um crescimento rápido, com um sistema radicular profundo e preferencialmente denso e, por esses motivos, o capim vetiver vem sendo altamente recomendado em projetos de estabilização.

O plantio é executado em fileiras de forma a construir uma barreira viva e densa com seus talos firmes, podendo resistir até 0,6 m, diminuindo a velocidade e dispersando a enxurrada. Se a localização do plantio for previamente bem determinada, as barreiras formadas atuarão como estruturas de desvio de águas, reduzindo bruscamente o poder de erosão das enxurradas que venham a acontecer na região. Portanto, o vetiver pode ser muito efetivo na estabilização de canais e de outras estruturas de drenagem.

Por fim, as Figuras 6.1 e 6.2 a seguir mostram como é o processo de execução do plantio e a aparência que o talude tem após o serviço estar completamente feito.



Figura 6.3 - Execução do Capim Vetiver



Figura 6.4 - Capim Vetiver plantado em um talude

7. CONCLUSÕES

O estudo desenvolvido neste trabalho teve o objetivo de mostrar como é o comportamento de taludes, em relação à estabilidade, de acordo com as propriedades geométricas e geotécnicas estabelecidas por medições e ensaios. Para isso, foi feita a retroanálise de um talude real que tem sua localização em Teutônia/RS. Devido a impossibilidade de visitas ao local, os dados dos ensaios necessários para a análise de estabilidade foram extraídos de um projeto já existente e a precisão deles foi adotada como suficiente para gerar os resultados previstos, como foi mostrado anteriormente.

Com os dados das medições e dos ensaios, foi possível fazer a análise de estabilidade do talude escolhido e, para isso, a primeira medida foi a execução da modelagem da estrutura de acordo com os dados estabelecidos. O programa SLOPE/W gerou resultados determinísticos para o Fator de Segurança de cada um dos modelos apresentados anteriormente e, por ser uma versão estudantil, impossibilitou a análise probabilística necessária para os resultados. Sendo assim, outro programa computacional (*Wolfram Mathematica*) foi utilizado para suprir a deficiência encontrada. Através do desenvolvimento do código mostrado na seção 4.4, o cálculo probabilístico foi feito com o intuito de mostrar, em porcentagem, o quanto a estabilidade do talude estava prejudicada de acordo com um Fator de Segurança determinado previamente. Seguindo os conceitos da norma NBR 11682, foi adotado um valor de 1,5 para o talude em estudo e, dessa forma, obteve-se um grau de confiabilidade de aproximadamente 89%, sendo suficiente para admitir necessária uma intervenção de engenharia no sentido de diminuir a probabilidade de ruptura do maciço.

Com a necessidade de uma intervenção constatada, vários métodos de estabilização foram mostrados afim de expor as características de cada um e possibilitar a melhor escolha para o estudo de caso apresentado. Nesse ponto, o fator com maior peso para a decisão foi o aspecto ambiental, fazendo com que as soluções estruturais mais conhecidas fossem menos aprofundadas e dessem mais espaço para o desenvolvimento teórico da solução escolhida.

Primeiramente, escolheu-se diminuir a inclinação original do talude por meio de um retaludamento. Como explicado anteriormente, um processo de corte foi proposto para que fosse possível amenizar a inclinação natural e, com isso, o Fator de Segurança aumentaria. Preliminarmente, o valor de 1,6 foi analisado e mostrou uma confiabilidade de aproximadamente 98%. Por isso, foi determinado que a solução deveria ser modelada de forma que alcançasse uma probabilidade de ruptura próxima aos 2%. O SLOPE/W foi

novamente utilizado para o novo modelo e o ângulo encontrado para atingir os níveis de confiabilidade exigidos foi de mais ou menos 50°.

Pela impossibilidade de uma modelagem com a consideração dos efeitos da cobertura vegetal, os resultados apresentados são simplesmente para uma nova formação geométrica do talude. Apesar disso, todo um estudo sobre o Capim Vetiver foi desenvolvido para mostrar como a planta é eficaz no sentido de ajudar no processo de estabilização de taludes. As características mostradas na seção 6.2.2 foram determinantes para a escolha da solução apresentada nesse trabalho. A grande resistência do Capim Vetiver vem mostrando resultados incríveis, mesmo que ainda não seja largamente difundida pelo país. Espera-se que, com a implantação da cobertura vegetal proposta, o Fator de Segurança exposto aumente ainda mais. Dessa forma, seria possível modelar um maciço com uma inclinação maior e diminuir o volume de corte necessário para a estabilização, gerando uma possível economia na execução.

Em resumo, as análises mostraram uma probabilidade de ruptura alta para o talude em estudo e isso fez com que fosse necessária a escolha de um sistema de estabilização. Devido, principalmente, à aspectos ambientais, um retaludamento seguido de cobertura vegetal com Capim Vetiver foi a solução escolhida para atingir um Fator de Segurança de 1,6 com um grau de confiabilidade de 98%. Esses valores foram adotados como suficientes para classificar a estrutura como estável. Todos os modelos apresentados foram cuidadosamente modelados respeitando os dados existentes. Além disso, uma cautela grande foi tomada no sentido da escolha de uma solução que, de fato, pudesse ser executada em campo e fosse viável para o estudo de caso em questão.

8. BIBLIOGRAFIA

HIGHLAND, L. M., & BOBROWSKY, P. (2008). O manual de deslizamento - um guia para a compreensão de deslizamentos, 156.

CALLE, J. A. C. (2000). Análise de ruptura de talude em solo não saturado. *Dissertação Apresentada À Escola de Engenharia de São Carlos Da Universidade de São Paulo, Como Parte Dos Requisitos Para Obtenção Do Título de Mestre Em Geotecnia.*, 156 p.

FEDERAL, U., PRETO, D. E. O., & MINAS, E. D. E. (2004). ESTUDO DE RUPTURA EM TALUDE URBANO NO MORRO DO CURRAL – OURO PRETO Mestranda : SUELI BATISTA FERREIRA.

FRITSCHER, E. C., & FRITSCHER, E. C. (2016). ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE : ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE TEUTÔNIA / RS ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE : ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE TEUTÔNIA / RS.

DUNCAN, J. M. (James M., & Wright, S. G. (Stephen G. (2005). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.

ZIRLIZ, A. C; PITTA, C. A e SOUZA, G.J.T. Um Caso Especial: Contenção pelo método de solo grampeado. Revista Engenharia ed. 591, São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.brasilengenharia.com.br/ed/591/Eng_Cons_civil.pdf>.

TORRES FILHO, Rodrigo J. de A.; ANDRADE, Vanessa C. de. Comparação entre análises determinísticas e probabilísticas de estabilidade de taludes em barragens: estudo de caso. 2015. 83 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

TONUS, B. P. A. Estabilidade de taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense. 2009. 147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

TERZAGHI, K. e PECK, R. B. Estabilidade de encostas e taludes em cortes a céu aberto. In: *Mecânica dos solos na prática de engenharia*. Tradução de A.J. da Costa Nunes e M. de L.C. Campello. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1962.

STRAUSS, Marcos. Análise de estabilidade de talude do aterro sanitário da zona norte de Porto Alegre. 1998. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

SOUZA de, Vitor A. D.; VIEIRA, Vicente de P. P. B. Análise probabilística da estabilidade do talude de jusante de uma barragem de terra em regime de operação. Comitê brasileiro de barragens. Xxvii seminário nacional de grandes barragens. Belém – PA, 03 a 07 de junho de 2007.

SILVA, A. F. P. Desenvolvimento de um programa de cálculo automático de estabilidade de taludes pelo Método de Correia. Mestrado integrado em Engenharia Civil - 2009/2010, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2010.

PRANDINI, L.F.; GUIDICINI, G.; BOTTURA, J.A.; PONÇANO, W.L.; SANTOS, A.R. Atuação da cobertura vegetal na estabilidade de encostas: uma resenha crítica. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, 38 p., 1976. (Relatório n. 1074).

PINTO, Carlos de Sousa. Curso básico de mecânica dos solos. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

PEREIRA, A. R. Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão. Belo Horizonte: FAPI, 2006.

MEDEIROS K.P.M de, BICALHO T.C.A. A impotência da revegetação na estabilidade de taludes de mineração: estudo de caso e alternativa para a Mina de Andrade (MG). Trabalho de pesquisa apresentado ao 15º Prêmio de Excelência da Indústria Minerometalúrgica Brasileira. Belo Horizonte: Revista Minérios e Minerais, 2013.

MASSAD, Façal. Obras de terra: curso básico de geotecnia. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

LONDE, Patrícia R.; BITAR, Norma A. Importância do uso de vegetação para contenção e combate à erosão em taludes do lixão desativado no município de Patos de Minas (MG). Perquirere: Patos de Minas: UNIPAM, 8(2):224-249, dez. 2011.

KRAHN, John. Stability Modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology. Geo Slope International Ltd. Canada. 2003.

INFANTI, J. N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds). Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia e Engenharia (ABGE), 1998. Cap.9, p. 131-152.

HORST, Rafael. Avaliação dos métodos para cálculo de estabilidade de taludes em maciço terroso. 2007. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade regional do noroeste do estado do Rio Grande do Sul - Departamento de tecnologia, Ijuí, 2007.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. The landslide handbook – A guide to understanding landslides, Reston, Virginia, United States Geological Survey Circular 1325, 129p, 2008.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2013.

GERSCOVICH, Denise. M. S. Estabilidade de Taludes. 2009. 160 f.– Notas de Aulas - Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

GERSCOVICH, Denise. M. S. Estabilidade de Taludes. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2016.

FLORES, Emerson A. F. Análises probabilísticas da estabilidade de taludes considerando a variabilidade espacial do solo. 2008. Dissertação de Mestrado, (Pós-Graduação em Engenharia Civil), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

FIORI, Alberto P.; CARMIGNANI, Luigi. Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

FABRÍCIO, João Vicente Falabella. Análises probabilísticas da estabilidade de taludes e contenções. 2006. Dissertação de Mestrado, (Pós – Graduação em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

DYMINSKI, A. S. Noções de Estabilidade de Taludes e Contenções. 2005. 28 f. Notas de Aulas –Departamento de Engenharia da Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2005.

DAS, Braja M. Fundamentos de engenharia geotécnica. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

CRUZ, Paulo T. da. 100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CRAIG, R. F. Craig: mecânica dos solos. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

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

Boletim Técnico CBCN. Técnicas de bioengenharia para revegetação de taludes no Brasil. Laércio Couto ... [et al.] – Viçosa, MG :CBCN, 2010.

AUSTIN, D. N.; DRIVER, T. Classifying rolled erosion control products. Erosion Control, v.2, n. 1, p. 48-53, 1995.

APAZA, M. A. F.; BARROS, J. M. C. Análise Probabilística de Estabilidade de Taludes pelo Método de Monte Carlo. XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG), Goiânia, Goiás, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

AUSTIN, D. N.; DRIVER, T. Classifying rolled erosion control products. *Erosion Control*, v. 2, n.1, p. 48-53, 1995.

AUSTIN, Theisen, M.; BIDDLE, P. G. Patterns of soil drying and moisture deficit in the vicinity of trees in clay soils. *Geotechnique*, v. 33, n. 2, p. 107-126, 1982.

BIEDENHARN, D. S., ELLIOTT, C. H, W.; ATSON, C. C. The wesstream investigation and streambank stabilization handbook. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (WES) Vicksburg, Mississippi, 1997. 435 p.

CASTILLO, V. M; MARTINEZ-MENA, M; ALBALADEJO, J. Runnoff and soil loss response to vegetation removal in semiarid environment. *Soil Science Society American Journal*, n. 61, p.1116-21, 1997.

CHEN, Y. H.; COTTON, B. A Design of roadside channels with flexible linings. *Hydraulics Engineering Circular*, Federal Highway Adm. Publication h. FHWA-IP:87-7, USDOT/FHW A, McClean, VA, n. 15, 1988. p. 35-36.

CHESIRE, M V. *Nature and origin of carbohydrates in soils*. London: Academic Press, 1979.

CHESIRE, M. V.; SPARLING, G. P.; MUNDIE, C. M. Effect of periodate treatment of soil on carbohydrate constituents and soil aggregation. *Journal of Soil Science*, n. 34, p. 105-112, 1983.

CHORLEY, T. The geomorphic significance of some Oxford soils. *American Journal of Soil Science*, n. 257, p. 503-515, 1959.

COELHO, A. T.; BRITO GALVÃO, T. C. Controle de erosão em taludes de disposição de rejeitos siderúrgicos com tapete biodegradável. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, VI. Presidente Prudente, SP. Anais... em CD-ROM, 1998.

COELHO, A T.; BRITO GALVÃO, T. C.; PEREIRA, A.R. Evaluation of two biodegradable rolled erosion control products (recp's) for stabilizing steep slopes under tropical conditions. In: ANNUAL INTERNATIONAL EROSION CONTROL ASSOCIATION EXPO - INTERNATIONAL EROSION CONTROL ASSOCIATION, 32nd. Las Vegas, Proceedings... Las Vegas: NA, 2001.

COELHO, A T.; BRITO GALVÃO, T. C.; PEREIRA, AR The effects of vegetative cover in the erosion prevention of a road slope. *Environmental Management and Health*, v. 12, n. 1, 2001.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG); UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS (UFMG); FUNDAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA (FUNDEP). Controle de erosão em margens de reservatório, com ênfase nos métodos de bioengenharia de solos. Belo Horizonte: CEMIG, 2002. 43 p.

COPPIN, R.; RICHARDS, T. Use of vegetation in civil engineering. Sevenoaks, Kent: Butterworths, 1990. 305 p.

CUR/CIRIA 1991. Manual on use of rock in coastal engineering. Netherlands: Gouda, CUR/CIRIA report n. 154, 1991.

CHENG, H. et al. A experimental study on mechanic performance and mechanism of soil reinforcement by herb root system. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. Guangzhou, China. 2003.

CHOWCHALOW, N. Vetiveria 2:1. Bangkok: Pacific Rim Network, ORDPB, 1997.

DALTON, P. Application of vetiver grass hedges to erosion control on the cropped flood plain of the Darling Downs. Southern Queensland: Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland. 1997.

DUNG, L. V. et al. Vetiver system for wave and erosion control in the Mekong delta, Vietnam. Proceedings of the third International Conference on Vetiver and Exhibition. Guangzhou, China. 2003.

GRIMSHAW, R. Vetiver grass: its use slope and structure stabilization under tropical and semitropical conditions. In: Vegetation and Slopes. Londres: Institution of Civil Engineers, 1994. p. 26-35.

GRIMSHAW, R. Vetiver grass: a world technology and its impact on water. Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition. Guangzhou, China. 2003.

HENGCHAOVANICH, D. 1998. Vetiver grass for slope stabilization and erosion control. Tech. Bull., Pacific Rim Vetiver Network, Thailand, n. 2, 1998. 28 p.

HENGCHAOVANICH, D; FREUDENBERGER, K. Vetiver victorious: the systematic use of vetiver to save Madagascar's FCE Railway. Tech. Bull, PRVN-ORDPB. Bangkok, Thailand, n. 2, 2003.