Tese de Doutorado

ESTUDO DA APLICAÇÃO DO VETIVER NA MELHORIA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS EM TALUDES

AUTORA: MICHELE CRISTINA RUFINO BARBOSA

ORIENTADOR: PROF. DR. Hernani Mota de Lima

NUGEO

ESCOLA DE MINAS / UFOP

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO – DEZEMBRO DE 2012

Michele Cristina Rufino Barbosa

ESTUDO DA APLICAÇÃO DO VETIVER NA MELHORIA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS EM TALUDES

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Doutor em Geotecnia**.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Ouro Preto

2012

B238e **Barbosa, Michele Cristina Rufino.**

Estudo da aplicação do vetiver na melhoria dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos em taludes [manuscrito] / Michele Cristina Rufino Barbosa. - 2012.

xviii, 128f.: il., color.; grafs.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia - NUGEO. Programa de Pós-graduação em Engenharia Geotécnica.

Área de concentração: Geotecnia Ambiental.

1. Solos - Compactação - Teses. 2. Vetiver - Teses. 3. Cisalhamento dos solos - Teses. 4. Taludes (Mecânica do solo) - Teses. I. Universidade Federal de Ouro Preto. II. Título.

CDU: 624.137:582.542.11

Catalogação: sisbin@sisbin.ufop.br

ESTUDO DA APLICAÇÃO DO VETIVER NA MELHORIA DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS EM TALUDES

Esta tese de doutorado foi apresentada em sessão pública e aprovada em 20 de dezembro de 2012, pela Banca Examinadora composta pelos membros:

_____

Prof. Dr. Hernani Mota de Lima (Orientador / UFOP)

_____

Prof[a]. Dr[a]. Milene Sabino Lana (UFOP)

_____

Prof. Dr. Frederico Garcia Sobreira (UFOP)

_____

Prof. Dr. Gustavo Ferreira Simões (UFMG)

_____

Dr. Aloisio Rodrigues Pereira (DEFLOR)

_____

Prof. Dr. José Aurélio Medeiros da Cruz (UFOP)

Tentar e falhar é pelo menos aprender. Não chegar a tentar é sofrer a inestimável perda do que poderia ter sido"

Geraldo Eustáquio

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais pelo apoio e motivação e também ao meu marido Cassiano pelo companheirismo.

AGRADECIMENTOS

À Deus por mais esta etapa concluída e por suas bênçãos, proteção e presença constante em minha vida.

Aos meus maravilhosos pais por todo apoio, incentivo e amor.

Ao meu amor, Cassiano, pela compreensão e amparo em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Hernani Mota de Lima pela ideia do estudo e contribuições para a realização do trabalho.

Aos professores Gustavo Ferreira Simões e Milene Sabino Lana pelas valiosas sugestões na banca de qualificação.

À Deflor Bioengenharia, em especial ao Dr. Aloisio Rodrigues Pereira por todo auxílio prestado para a realização deste estudo e aos funcionários da fazenda Guarará pela ajuda na coleta das amostras.

Aos professores do NUGEO e aos integrantes do NGA pelos conhecimentos compartilhados.

A Capes pela concessão da bolsa de estudos.

A toda a minha família, em especial meu irmão Léo, minha prima Taty que é como uma irmã e Tia Nenzinha por todo o carinho.

Aos amigos de Sete Lagoas (Carol, Lê, Diego, Maria Eliza) e aos amigos de Itajubá (Mi, Tatá, Tuti, Aninha) que sempre estiveram ao meu lado apesar da distância.
À minha querida amiga Cris pela ajuda nos ensaios de laboratório e ao técnico do Laboratório de Geotecnia Edmar pelo auxílio prestado.

À Prof. Kátia Novack pela contribuição com os ensaios realizados no Laboratório de Química da UFOP.

Às moradoras e ex-alunas da República Só A Gente, “dq’s” lindas e amigas que levarei para o resto da minha vida.

À República Móicana pela linda homenagem prestada e amizade.

Às amigas de Ouro Preto: Sandra, Rafa, Lud, Edilene e Flávia pelas conversas e risadas.

À Brenda e Rebeca que sempre foram tão especiais.

À Catarina pelo amor, lealdade e por fazer mais feliz esta fase da minha vida.

RESUMO

Taludes vegetados são mais resistentes contra movimentos de massa e erosão pela água. A vegetação contribui para a estabilidade do solo, principalmente pelo aumento da resistência ao cisalhamento via reforço oferecido pelas raízes. Uma espécie vegetal, vetiver (*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty), tem se revelado eficaz e de baixo custo na estabilização de taludes. O presente estudo apresenta os resultados de ensaios de cisalhamento direto com amostras de solos sem cobertura vegetal e solos cobertos com vetiver na idade de um, dois e três anos de plantio. Em adição, o trabalho avalia resultados de ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas de solos de um mesmo talude sem cobertura vegetal e com cobertura de vetiver na idade de sete anos com o intuito de verificar o efeito desta planta na melhoria dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos. Os resultados mostram a eficiência do vetiver na melhoria dos parâmetros de resistência, principalmente em relação ao incremento de coesão aparente oferecido ao solo. Foi observado que a aplicação do vetiver como técnica de estabilização de taludes é eficiente, porém é um processo em longo prazo, a planta necessita de certos cuidados até seu completo estabelecimento e consiste de um método de estabilização para superfícies de rupturas rasas.

ABSTRACT

Vegetated slopes are more resistant against mass movements and water erosion. The vegetation contributes to the stability of the soil mainly by increased strength shear soil provided by the reinforcement of roots. A vegetation species, vetiver (Chrysopogon zizanioides (L.) Roberty), has be proven effective and cost low in slope stabilization. This study presents the results of direct shear tests on soil samples without vegetation and soils covered with vetiver at the age of one, two and three years of planting. In addition, the study evaluates the results of direct shear tests on soil samples from the same soil without vegetation and soil of slope with vetiver coverage at the age of seven years in order to verify the effect of this plant on improving the parameters of strength shear soil. The results show the efficiency of vetiver in improving the strength parameters, mainly related increased the apparent cohesion offered to the soil. It was observed that the application of vetiver as slope stabilization technique is efficient, but is a long-term process, the plant needs some care until complete establishment and consists of a stabilization method for surfaces of ruptures shallow.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 – Envoltória de ruptura de Mohr – Coulomb.....5
Figura 2.2 – Modelo de cisalhamento simples em um sistema solo-raiz.....8
Figura 2.3 – Espécies vegetais mostrando arquitetura de raízes.....10
Figura 2.4 – Representação das forças aplicadas em uma fatia típica.....17
Figura 2.5 – Representação de um talude infinito: Forças atuantes em um talude de solo.....19
Figura 2.6 – Distribuição de forças em um talude com percolação de água.....21
Figura 2.7 – Parâmetros envolvidos na análise de um talude infinito, com altura do nível freático h_2 e fluxo de água paralelo ao talude.....24
Figura 2.8 – Elementos geométricos de um talude com vegetação e forças atuantes.....25
Figura 2.9 – Efeito das raízes de plantas da estabilidade de taludes.....30
Figura 2.10 – Planta vetiver na idade de 1 ano.....36
Figura 2.11 – Modo de plantio do vetiver.....40
Figura 2.12 – Mudas do vetiver na idade de 1 mês.....41
Figura 2.13 – Percentual de sobrevivência das espécies utilizadas para recuperar o lixão de Inconfidentes, Minas Gerais.....43
Figura 2.14 – Erosão de um Terreno na Venezuela: A foto da esquerda apresenta o problema de erosão e a foto da direita o processo erosivo solucionado com o vetiver.....48
Figura 2.15 – Processo de Estabilização de uma voçoroca no Congo utilizando o vetiver.....49
Figura 2.16 – Raízes do vetiver.....50
Figura 2.17 – Resistência à tração das raízes do vetiver de acordo com seu diâmetro.....53
Figura 2.18 – Variação da resistência à tração com o diâmetro das amostras ensaiadas (Planta de dois anos).....54
Figura 2.19 – Variação da resistência à tração com o diâmetro das amostras ensaiadas (Planta de três anos).....54

Figura 2.20 – Perda de solo por erosão (g) em função da cobertura do solo e precipitação pluviométrica (mm).....58
Figura 2.21 – Taludes de uma rodovia da Austrália antes do vetiver e após um ano de plantio do vetiver.....59
Figura 2.22 – Talude de corte às margens de uma rodovia no Vietnã mostrando o problema de erosão antes da aplicação do vetiver e o talude estável depois de 10 meses do plantio do vetiver.....59
Figura 2.23 – A Figura A apresenta o canal de drenagem completamente assoreado. A Figura B mostra o mesmo canal de drenagem após 1 mês de plantio do vetiver e a Figura C 4 meses após o plantio do vetiver, podendo-se observar os taludes estáveis e o canal de drenagem protegido do assoreamento.....60
Figura 2.24 – Uso do vetiver para estabilização e revegetação de taludes de uma pedreira na China.....61

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Talude com cobertura do vetiver, no qual foram retiradas as amostras indeformadas de solo.....64
Figura 3.2 – Sequência de coleta de amostra indeformada. Em A mostra o procedimento de retirada da amostra, B a colocação da amostra na caixa de madeira e em C o uso da parafina para manter a umidade da amostra.....66
Figura 3.3 – Equipamento detalhado utilizado para o ensaio de termogravimetria.....67
Figura 3.4 – Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento direto.....70
Figura 3.5 – Determinação do parâmetro t_{100} para a tensão normal de 50 kPa.....73
Figura 3.6 – Sequência de operações para realização do ensaio de cisalhamento direto.....74
Figura 3.7 – Quantidade de raízes das amostras indeformadas de vetiver..... 75
Figura 3.8 – Análises dos fatores de segurança nos taludes.....77

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 – Resultado da Granulometria Conjunta.....79
Figura 4.2 – Análise termogravimétrica solo sem vegetação.....80
Figura 4.3 – Análise termogravimétrica solo com um 1 de plantio de vetiver.....81

Figura 4.4 – Análise termogravimétrica solo com 2 anos de plantio de vetiver.....82
Figura 4.5 – Análise termogravimétrica solo com 3 anos de plantio de vetiver.....83
Figura 4.6 – Análise termogravimétrica do talude sem vegetação.....83
Figura 4.7 – Análise termogravimétrica do talude cultivado com vetiver.....84
Figura 4.8 – Em A tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais e B deslocamentos verticais x deslocamentos horizontais: solo sem cobertura vegetal.....91
Figura 4.9 – Envoltória de ruptura do solo sem cobertura vegetal.....92
Figura 4.10 – Em A tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais e B deslocamentos verticais x deslocamentos horizontais: solo com 1 ano de plantio de vetiver..... 93
Figura 4.11 – Envoltória de ruptura do solo com 1 ano de plantio do vetiver.....94
Figura 4.12 – Em A tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais e B deslocamentos verticais x deslocamentos horizontais: solo com 2 anos de plantio de vetiver.....95
Figura 4.13 – Envoltória de ruptura do solo com 2 anos de plantio de vetiver.....96
Figura 4.14 – Em A tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais e B deslocamentos verticais x deslocamentos horizontais: solo com 3 anos de plantio de vetiver.....97
Figura 4.15 – Envoltórias de ruptura do solo com 3 anos de plantio de vetiver.....99
Figura 4.16 – Envoltórias de ruptura por faixa de aplicação de tensões do solo com 3 anos de plantio de vetiver.....99
Figura 4.17 – Resistência ao cisalhamento de acordo com a porcentagem de matéria orgânica dos solos analisados.....102
Figura 4.18 – Em A tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais e B deslocamentos verticais x deslocamentos horizontais: talude sem cobertura vegetal.....103
Figura 4.19 – Envoltória de ruptura do talude sem cobertura vegetal.....104
Figura 4.20 – Em A tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais e B deslocamentos verticais x deslocamentos horizontais: talude com cobertura de vetiver na idade de 7 anos.....106
Figura 4.21 – Envoltórias de ruptura do talude coberto com vetiver na idade de 7 anos.....107
Figura 4.22 – Envoltórias de ruptura por faixa de aplicação de tensões normais do talude com aplicação de vetiver.....107
Figura 4.23 – Envoltórias de ruptura.....109
Figura 4.24 – Comparação do fator de segurança de acordo com os ângulos de inclinação dos taludes sem vegetação e cultivado com vetiver considerando uma zona potencial de ruptura de 1,5.....115

Figura 4.25 – Comparação do fator de segurança de acordo com os ângulos de inclinação dos taludes sem vegetação e cultivado com vetiver considerando uma zona potencial de ruptura de 0,9 m.....116

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 – Fatores de Instabilização de Taludes.....14
Tabela 2.2 – Fator de segurança e as respectivas condições de estabilidade dos taludes.....15
Tabela 2.3 – Principais medidas de estabilização de taludes.....27
Tabela 2.4 – Resultado do Ensaio de Cisalhamento Direto.....31
Tabela 2.5 – Limitações do ângulo de inclinação do talude para o estabelecimento de vegetação.....33
Tabela 2.6 – Efeitos hidromecânicos da vegetação na estabilidade de solos de taludes, efeitos positivos (+) e negativos (-).....35
Tabela 2.7 – Especificações técnicas da cultura do vetiver.....41
Tabela 2.8 – Massa metais-traço armazenada nas estruturas vegetais do vetiver.....44
Tabela 2.9 – Doses críticas de toxidez (DCT's) de chumbo para a raiz, parte aérea e planta inteira de vetiver, jureminha e algaroba.....45
Tabela 2.10 – Crescimento do vetiver nos locais plantados.....47
Tabela 2.11 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento.....51
Tabela 2.12 – Aumento da resistência ao cisalhamento do solo devido as raízes do vetiver.....52
Tabela 2.13 – Diâmetro e resistência das raízes de algumas gramíneas.....53
Tabela 2.14 – Perda de Solo e escoamento superficial em tratamentos com vegetação em talude.....57

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização física.....78
Tabela 4.2 – Análise granulométrica do solo.....79
Tabela 4.3 – Resultados das análises termogravimétricas.....84
Tabela 4.4 – Caracterização química do solo.....86
Tabela 4.5 – Características dos ensaios de cisalhamento direto.....88

Tabela 4.6 – Análise estatística dos índices de vazios inicial e final de acordo com a faixa de tensão normal aplicada.....89
Tabela 4.7 – Parâmetros de resistência de acordo com faixas de aplicação de tensões.....100
Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto.....100
Tabela 4.9 – Resistência ao cisalhamento de solos de acordo com cada tensão aplicada.....101
Tabela 4.10 – Parâmetros de resistência: talude com cobertura de vetiver.....105
Tabela 4.11 – Parâmetros de resistência de acordo com as faixas de aplicação de tensões.....108
Tabela 4.12 – Comparação entre os resultados dos ensaios de cisalhamento direto.....108
Tabela 4.13 – Resistência ao cisalhamento do talude sem cobertura vegetal e com plantio de vetiver de acordo com a tensão normal aplicada.....109
Tabela 4.14 – Parâmetros utilizados nas análises de estabilidade determinísticas.....110
Tabela 4.15 – Fatores de segurança das diferentes análises do método de talude infinito considerando a zona potencial de ruptura 1,5 m.....111
Tabela 4.16 – Resistência ao cisalhamento de solo dos taludes hipotéticos com zona potencial de ruptura de 1,5 m.....112
Tabela 4.17 – Fatores de segurança das diferentes análises do método de talude infinito considerando a zona potencial de ruptura de 0,9 m.....113
Tabela 4.18 – Resistência ao cisalhamento de solo dos taludes hipotéticos com zona potencial de ruptura de 0,9 m.....114

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIAÇÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions

ϕ – Ângulo de atrito interno

Θ – Ângulo de distorção da zona de cisalhamento

b – Largura da fatia de solo

ψ – Cisalhamento angular

c – Intercepto de coesão ou coesão aparente

CIERs – Centros Integrados de Educação Rural

c_r – Contribuição das raízes para a coesão do solo

c_s – Contribuição de coesão do solo

DCT's – Doses Críticas de Toxicidade

DTA – Análise Térmica Diferencial

ε_f – Deformação especificada na resistência de pico

E – Forças laterais à fatia

e_i – Índice de vazios inicial

e_f – Índice de vazios final

FS – fator de segurança

F_p – Força de percolação

F_{ve} – Força de arraste do vento na copa das árvores

H_0 – Altura inicial do corpo de prova

i – Inclinação do talude

IP – Índice de Plasticidade

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite de Plasticidade

γ_s – Massa específica dos sólidos

MEF – Métodos dos Elementos Finitos

MDF – Métodos das Diferenças Finitas

N – Força normal à base da fatia

NBR – Norma Brasileira

P – Peso da fatia

P_a – Peso das árvores

γ / γ_{nat} – Peso específico natural

γ_d – Peso específico seco

γ_{sat} – Peso específico saturado

γ_{sub} – Peso específico submerso

γ_w – Peso específico da água

u – Pressão neutra

τ – Resistência ao cisalhamento

τ_{sr} – Resistência ao cisalhamento do sistema solo-raiz

S – Força de cisalhamento na base da fatia

SV – Sistema Vetiver

s_r – Contribuição de coesão das raízes

T – Força de tração

TGA – Análise Termogravimétrica

t_f – Tempo para atingir a resistência de pico

t_{100} – Tempo correspondente a 100% dos recalques induzidos pelos acréscimos de carga

τ_{mob} – Tensão cisalhante atuante ou resistência mobilizada

σ_{ef} = Tensão efetiva vertical

σ_{en} – Tensão efetiva vertical normal

σ_{es} – Tensão efetiva vertical tangencial

σ – Tensão normal no plano de ruptura

σ_p – Tensão de percolação

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

v – Velocidade do ensaio de cisalhamento

x = deslocamento de cisalhamento

X – Forças verticais entre as fatias

w – teor de umidade

z – Profundidade do solo

Z = Espessura da zona de cisalhamento

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....3
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....3

CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA

2.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS.....5
2.2 ESTABILIDADE DE TALUDES.....12
2.2.1 Fatores Condicionantes de Instabilizações de Taludes.....12
2.2.2 Análise Determinística da Estabilidade de Taludes.....14
2.2.2.1 Método do Talude Infinito.....18
2.2.3 Técnicas Utilizadas na Estabilização de Taludes.....27
2.2.3.1 Uso da vegetação na estabilização de taludes.....29
2.3 SISTEMA VETIVER.....36
2.3.1 Histórico do vetiver.....37
2.3.2 Características do vetiver.....38
2.3.3 Modo de plantio do vetiver 40
2.3.4 Aplicações do vetiver.....42
2.3.5 Estabilização de Taludes com a Utilização do Sistema Vetiver.....49
2.3.5.1 Resistência ao cisalhamento e resistência à tração das raízes do vetiver.....50
2.3.5.2 Perda de solo e escoamento superficial com uso do vetiver.....55
2.3.5.3 Exemplos de aplicação do vetiver na estabilização de taludes....58
2.3.6Vantagens e Desvantagens do Sistema Vetiver.....61

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

3.1 METODOLOGIA DE CAMPO.....63
3.2 METODOLOGIA DE LABORATÓRIO.....66
3.2.1 Ensaios de Caracterização Física.....66
3.2.2 Ensaios de Caracterização Química.....67

3.2.3 Ensaio de Cisalhamento Direto.....69
3.3 ANÁLISES DE ESTABILIDADE DO TALUDE.....76

CAPÍTULO 4 – APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....78
4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA.....80
4.3 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO.....87
4.4 ANÁLISES DE ESTABILIDADE.....110

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES DA PESQUISA.....117
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....118

REFERÊNCIAS.....115

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A vegetação tem sido utilizada como uma ferramenta natural da bioengenharia para recuperar o solo, controlar a erosão e estabilizar encostas ao longo dos séculos e sua popularidade tem aumentado significativamente nas últimas décadas. Isto é parcialmente devido a apresentar um custo reduzido em comparação com outros métodos de estabilização e respeito ao meio ambiente. Além disso, a vegetação exige requisitos técnicos relativamente simples para instalação e manutenção.

As ações de amenização dos impactos nos taludes têm sido direcionadas na aplicação de cobertura vegetal na face do talude. A presença de vegetação auxilia na interceptação da água das chuvas pela folhagem, diminuindo a erosão causada pelos pingos da chuva e pelo escoamento superficial. Também favorece a estabilização do solo por meio do reforço oferecido pelas raízes com aumento da resistência ao cisalhamento de solos.

Experiências mostram que o vetiver ("*Vetiveria zizanioides* (L.) Nash"), recentemente reclassificado como *("Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty"), é uma planta eficiente no controle de erosão, reforço de solos e estabilização de taludes.

Várias pesquisas têm estudado as inúmeras aplicações do vetiver não só em relação ao controle de erosão e estabilidade do solo, mas também na reabilitação de áreas contaminadas e no controle de efluentes. Devido as suas características morfológicas e ecológicas e por não ser uma espécie invasora, o vetiver tem sido recomendado pelo Banco Mundial e órgãos ambientais em todo o mundo.

Estudos da avaliação de resistência ao cisalhamento de solos oferecida pela aplicação do vetiver ainda são escassos. Hengchaovanich e Nilaweera (1996) afirmam que o vetiver pode aumentar a resistência ao cisalhamento de solos em até 90%. Porém estes

mesmos autores não fornecem dados dos parâmetros de resistência (intercepto de coesão e ângulo de atrito) e nem em quais condições é percebido este aumento. Para uma avaliação da resistência é necessário verificar os parâmetros de resistência, pois o solo apresenta maior resistência com o aumento desses. Além disso, é importante uma análise do tipo de solo e das propriedades físicas do solo, pois cada solo se comporta de uma forma diferente.

Já nos estudos de Orozco (2009) com a realização de ensaios de cisalhamento direto de solos sem raízes e permeados com raízes de vetiver não foram verificados aumento na resistência ao cisalhamento do solo oferecida pelas raízes do vetiver.

Suarez (1997) indica que na literatura existem muitas contradições em relação ao efeito das raízes na resistência ao cisalhamento de solos. O autor justifica-se referindo-se a Gray (1974), o qual observou incrementos na resistência ao cisalhamento de 3 a 4 vezes pelo aumento da coesão aparente do solo devido às raízes e a Yagi *et al*. (1994) que concluíram não existir praticamente nenhuma variação do ângulo de atrito interno e na coesão pela presença de raízes.

Devido a divergências de resultados e a poucas referências encontradas na literatura que avaliam a resistência ao cisalhamento que as raízes impõem ao solo, seja em laboratório ou em campo, torna-se relevante um estudo de análise da contribuição das raízes no aumento da resistência ao cisalhamento do solo. Desta forma, o presente estudo pretende analisar o ganho de resistência oferecido ao solo pela aplicação do vetiver na escala cronológica e em taludes, avaliando a influência da inclinação do talude com o ganho de resistência e tempo de plantio do vetiver.

A escolha do vetiver se deu principalmente devido a escassez de referências em relação a dados quantitativos, principalmente no que diz respeito ao efeito das raízes do vetiver na resistência ao cisalhamento do solo. Existem várias literaturas (Truong *et al*.,2002; Truong, 2005; Trong *et al*., 2008, Madruga *et al*., 2007) que abordam o processo de estabilização de taludes com a utilização do vetiver, porém, o processo de estabilização sempre é abordado de forma qualitativa.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral do estudo consiste em avaliar a resistência ao cisalhamento de solos pela aplicação do vetiver, com ênfase nos parâmetros de resistência. Neste sentido serão analisadas amostras do mesmo solo sem vegetação e com cobertura vegetal de vetiver por meio de ensaio de cisalhamento direto. Também serão avaliados os ganhos de resistência com o tempo de plantio do vetiver.

Esta pesquisa também propõe avaliar a resistência oferecida ao solo pelas raízes do vetiver em taludes, analisando o mesmo talude sem vegetação e com sete anos de cultivo de vetiver para verificação dos parâmetros de resistência diretamente de taludes. Assim serão realizadas simulações nos taludes, objetivando uma análise geral de estabilidade pelo emprego do método de equilíbrio limite do talude infinito, verificando assim os fatores de segurança dos taludes simulados.

Os resultados dos fatores de segurança, bem como da resistência ao cisalhamento do solo serão comparados objetivando quantificar o ganho de resistência oferecido pelas raízes do vetiver e, consequentemente, verificar se o vetiver é uma técnica eficiente na estabilização de taludes.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A presente tese de doutorado, além da exposição geral do tema e dos objetivos da pesquisa (CAPÍTULO 1) está estruturada em mais quatro capítulos.

No Capítulo 2 é desenvolvida a revisão bibliográfica sobre o tema, sendo apontados os aspectos gerais sobre resistência ao cisalhamento de solos, análises de estabilidade e técnicas de estabilização adotadas, com ênfase na aplicação de vegetação. Também é abordado o vetiver, mostrando as características da planta, modo de plantio, aplicações gerais, destacando-se o uso do vetiver no controle de erosão e estabilização de taludes.

O Capítulo 3 descreve a metodologia utilizada no estudo mostrando os programas experimentais com abordagem detalhada dos materiais e recursos utilizados e detalhes correspondentes à preparação dos corpos de prova. Também são expostos os procedimentos adotados para as análises de estabilidade de taludes.

O Capítulo 4 apresenta a discussão e resultados dos ensaios de caracterizações físicas e químicas dos solos analisados, bem como o ensaio de cisalhamento direto que tem como principal objetivo avaliar a resistência dos solos oferecida pela aplicação do vetiver. Também são mostradas as análises de estabilidade de acordo com o método do talude infinito.

No Capítulo 5 são apresentadas as principais conclusões da pesquisa, baseadas nos resultados obtidos pelos ensaios laboratoriais, evidenciando os principais aspectos das análises e resultados obtidos, sendo propostas também sugestões para estudos futuros que visem dar continuidade a este trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS

Segundo Lambe e Whitman (1951) a resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como a máxima tensão de cisalhamento que um solo pode resistir antes da ruptura ou a tensão de cisalhamento do solo no plano em que estiver ocorrendo à ruptura.

A resistência ao cisalhamento de solos é normalmente dada pelo Critério de Mohr – Coulomb de acordo com a Equação 2.1.

$$\tau = c + \sigma \tan \phi \tag{2.1}$$

Onde:

τ = resistência ao cisalhamento

c = intercepto de coesão ou coesão aparente

σ = tensão normal no plano de ruptura

ϕ = ângulo de atrito interno

A representação gráfica da Equação 2.1 é apresentada na Figura 2.1.

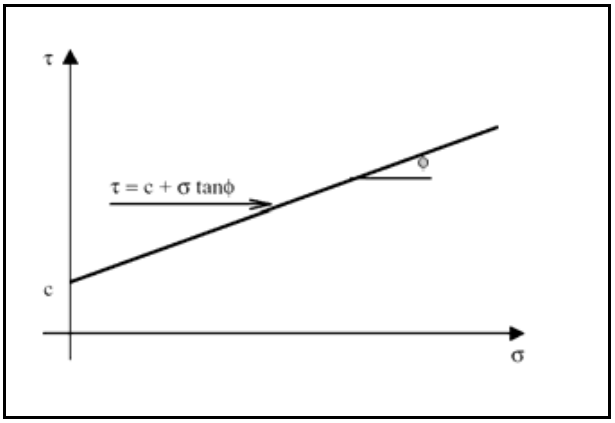

Figura 2.1 – Envoltória de ruptura de Mohr – Coulomb

A envoltória de ruptura em alguns casos pode exibir uma pequena curvatura, mas a maioria dos estudos faz uma aproximação para uma reta.

O cisalhamento ocorre devido ao deslizamento entre corpos sólidos ou partículas de solo. A coesão aparente e o ângulo de atrito interno do solo são conhecidos como os parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos. Estes parâmetros podem ser obtidos através de retroanálises de escorregamentos ocorridos, ensaios de campo e ensaios laboratoriais, como o ensaio de cisalhamento direto realizado neste estudo.

Conforme Vargas (1977), de forma intuitiva, a coesão é aquela resistência que a fração argilosa empresta ao solo, pelo qual ele se torna capaz de se manter coeso em forma de torrões ou blocos, ou pode ser cortado em formas diversas e manter esta forma. Os solos que têm essa propriedade chamam-se coesivos. Os solos não coesivos, areias puras e pedregulhos, despedaçam facilmente ao serem cortados ou escavados.

O desenvolvimento da coesão entre as partículas do solo também é fortemente influenciada pelo teor de água do solo. O aumento da coesão com a redução do teor de água do solo tem sido verificado por alguns autores (McKyes *et al*., 1994; Boeni, 2000). Arvidsson *et al*. (2001) verificaram um aumento da coesão do solo de 87 para 154 kPa em solo de textura média, quando diminuiu o teor de água no solo de 0,17 para 0,11 kg kg^{-1}, evidenciando o grande efeito da umidade na coesão do solo. De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), a diminuição do teor de água no solo reduz a distância entre as partículas, havendo um consequente aumento da atração entre elas, resultando num acréscimo da coesão do solo (Silva e Cabeda, 2005).

A resistência por atrito entre as partículas depende do coeficiente de atrito, e pode ser definida como a força tangencial necessária para ocorrer o deslizamento de um plano, em outro paralelamente a este. Esta força também é proporcional à força normal ao plano. O ângulo formado entre a força normal e a resultante das forças, tangencial e normal, é o ângulo de atrito interno do solo (ϕ), sendo o máximo ângulo que a força cisalhante pode ter com a normal ao plano sem que haja deslizamento (Fiori e Carmignani, 2009).

Os solos arenosos tendem a apresentar maior resistência ao cisalhamento, pois as partículas de areia, principalmente as de menor tamanho, quando submetidas a forças externas, ocupam mais facilmente os espaços vazios do solo, aumentando, assim, a área de contato entre os agregados (Ortigão, 2007).

No caso de solos argilosos, o estudo da resistência ao cisalhamento torna-se mais complexo, pelo fato de ser a argila a fração mais ativa do solo, e os processos físicos e químicos, tais como: sucessivas arações, flutuação do lençol freático através de drenagens, adubações fosfatadas e calagem, que atuam no sentido de aumentar ou reduzir o contato entre partículas do solo, conseqüentemente, aumentarão ou reduzirão a resistência ao cisalhamento (Rocha *et al*., 2002).

Thermann *et al.* (2006) relatam que muitos são os fatores que influenciam no valor de resistência de cisalhamento de um solo. Entre eles podem-se citar as propriedades do solo, como a forma e tamanho do grão, distribuição do tamanho dos grãos, conteúdo de água etc. Outro fator inclui parâmetros do procedimento do ensaio, como velocidade de deslocamento, tamanho do plano de cisalhamento, tipo de aparato e preparação do ensaio. Uma terceira fonte que poderia ter influência nas imprecisões dos ensaios é introduzida pelo equipamento em si e pelos procedimentos de laboratório, tais como preparação da amostra e colocação da amostra no equipamento.

A resistência ao cisalhamento do solo pode também ser usada como um indicador de compactação do solo (Ayers e Perumpral, 1982; Schjonning, 1991). Em geral, os solos mais compactados apresentam maior resistência ao cisalhamento (Azevedo, 1999), mediante a menor distância entre as partículas, o que lhes confere consequentemente, menor índice de vazios (Rocha *et al*. (2002).

A umidade e o teor de matéria orgânica também podem influenciar a resistência ao cisalhamento do solo, de forma que, em solos com baixos valores de umidade, a matéria orgânica tende a reduzir a resistência ao cisalhamento, dependendo da menor densidade do solo conferida por ela (Ekwue e Stone, 1995).

Outro fator que pode influenciar a resistência ao cisalhamento do solo é a presença da vegetação. As raízes da vegetação atuam como fibras que aumentam a resistência ao cisalhamento do solo.

Para avaliar a contribuição da resistência ao cisalhamento do solo pelas raízes é necessário considerar a interação solo-raiz. Em um sistema deste tipo, as raízes podem ser tratadas como se fossem elementos flexíveis e elásticos, que enterrados no solo, levam a um aumento da resistência (Fiori e Carmignani, 2009).

A Figura 2.2 mostra o modelo de um sistema solo-raiz sujeito a cisalhamento simples. A zona de cisalhamento está situada entre as retas (aa) e (bb), sendo ψ a distorção angular. A raiz, inicialmente na posição (cd) é deslocada a uma nova posição (cd'). Seja a resistência à tração média das raízes por unidade de área do solo, t_r, esta pode ser decomposta nas componentes paralelas (τ_r)e perpendicular (σ_r) à zona de cisalhamento.

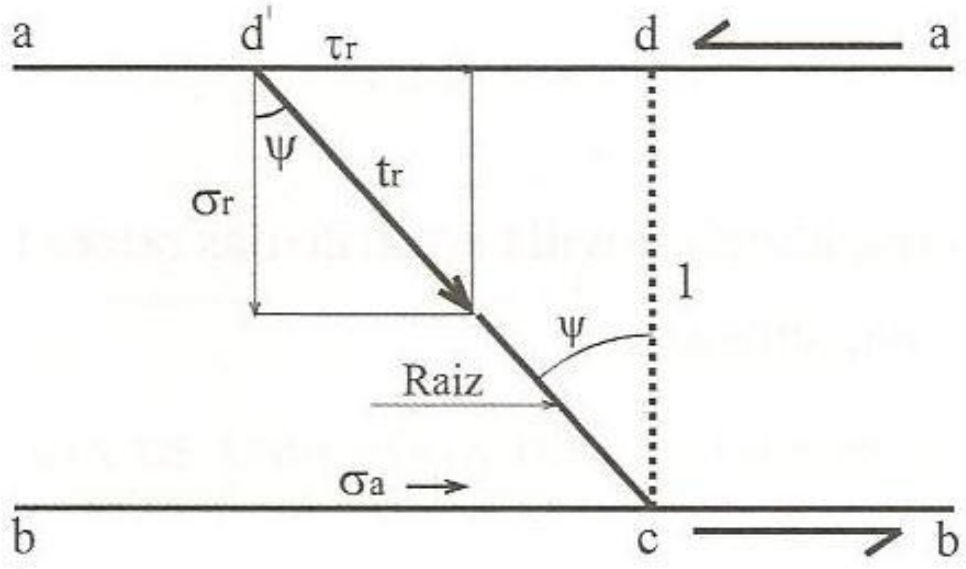

Figura 2.2 – Modelo de cisalhamento simples em um sistema solo-raiz

Pela Figura 2.2 pode-se observar que a raiz é submetida a uma extensão durante o processo de cisalhamento. O valor de ψ depende da espessura da zona de cisalhamento e da resistência da raiz até o momento de sua ruptura (Fiori e Carmignani, 2009).

Quando uma raiz de planta penetra através de uma superfície potencial de cisalhamento no perfil do solo, a distorção da zona de cisalhamento desenvolve tração na raiz, e o componente dessa tração tangencial à zona de cisalhamento diretamente resiste ao cisalhamento, enquanto que a componente normal aumenta a pressão do confinamento no plano de cisalhamento (Hengchaovanich e Nilaweera, 1996).

As fibras radiculares aumentam a resistência ao cisalhamento do solo pela transferência das tensões cisalhantes que se desenvolvem na matriz do solo para as fibras, através do atrito na interface ao longo da extensão das fibras que estão fixas. Quando o cisalhamento ocorre, a fibra é deformada. Essa deformação causa um alongamento da fibra, desde que haja atrito suficiente na interface raiz-solo e uma tensão limitada para manter as fibras no lugar e evitar deslizamento ou o arrancamento das raízes. Esse alongamento mobiliza a resistência da fibra (Gray e Sotir, 1996).

A resistência ao cisalhamento de um sistema solo – raiz é fornecida pela Equação 2.2:

$$\tau_{sr} = c + c_r + \sigma \tan\phi \qquad (2.2)$$

Onde:
τ_{sr} = resistência ao cisalhamento do sistema solo-raiz
c = intercepto de coesão
c_r = contribuição das raízes para a coesão do solo
σ = tensão normal à superfície de ruptura
ϕ = ângulo de atrito interno do solo

Cada espécie vegetal possui um determinado tipo de raiz, que de acordo com suas características, confere ao solo maior ou menor resistência ao cisalhamento. A Figura

2.3 mostra os tipos de raízes mais comuns e parte aárea das plantas, destacando dois tipos básicos de raízes: fasciculadas e pivotantes.

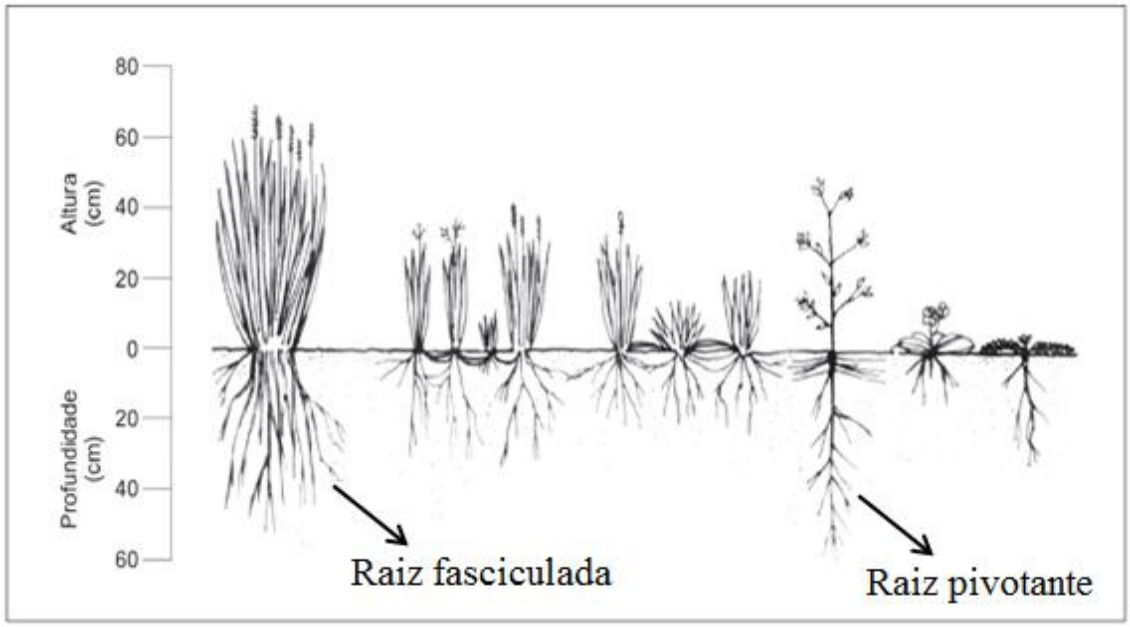

Figura 2.3 – Espécies vegetais mostrando arquitetura de raízes
Fonte: Pereira (2008)

As raízes pivotantes possuem uma raiz principal, geralmente maior que as demais, que penetra verticalmente no solo. Da raiz principal derivam-se, lateralmente, outras raizes. Já as raizes fasciculadas são constituídas de um conjunto de raízes finas, oriundas de um único ponto (Barker, 1994).

Algumas raízes pivotantes atuam como “tirantes vivos”, promovendo o ancoramento de grandes massas de solo. Ocorre uma transferência de tensões de cisalhamento do solo para as raízes, proporcionando uma redução da erodibilidade do solo e um aumento na estabilidade do talude (Barker, 1994).

As raízes fasciculadas apresentam alta resistência à tração e ao arrancamento, pois ocupam uma grande superfície e também oferecem um aumento da resistência ao cisalhamento do solo (Barker, 1994).

Existem muitas contradições em relação ao efeito das raízes na resistência ao cisalhamento dos solos. Alguns autores afirmam que as raízes podem aumentar a resistência ao cisalhamento (Gray, 1974; Mendonça e Cardoso, 1998; Goldsmith, 2006; Cazzuffi *et al*.,2006; Coelho, 2007) enquanto outros dizem que o aumento da resistência ao cisalhamento de solos é praticamente nulo com a presença de raízes (Yagi *et al*.,1994). Porém na maioria dos estudos o aumento da resistência ao cisalhamento dos solos oferecido pelas raízes é evidente.

Estudos de Ziemer (1981), Tengbeth (1989) e Waldron (1997) mostram que o reforço do solo pelas raízes pode ser significante no aumento da resistência do solo, mesmo se a densidade das raízes é baixa e em condições de baixa resistência do solo. A coesão aumenta com o aumento da densidade das raízes. Isso significa dizer que a vegetação exerce sua maior influência junto à superfície do solo, onde a densidade das raízes é geralmente maior e o solo, por outro lado, é relativamente mais fraco (Fiori e Carmignani, 2009).

Segundo O'Loughlin (1994) as raízes finas, com diâmetro entre 1 e 20 mm, contribuem mais significativamente para a resistência do solo. Gramíneas e leguminosas podem exercer um efeito significativo no reforço do solo até uma profundidade de 0,75 a 1,5 m, enquanto as árvores podem aumentar a resistência do solo à profundidade de 3 m ou mais, dependendo da morfologia das raízes.

De acordo com Gray (1995), vários pesquisadores, entre os quais Endo e Tsuruta (1969), que desenvolveram os primeiros estudos executando ensaios de campo de resistência ao cisalhamento de solos permeados por raízes, concluíram que, em relação à resistência, o efeito principal de fibras (raízes) no solo é fornecer uma medida de coesão aparente, a qual pode fazer uma diferença significativa na estabilidade com relação a rupturas rasas em solos arenosos com pequena ou sem nenhuma coesão intrínseca.

O efeito das raízes na estabilidade de taludes tem sido estudado por muitos autores que determinaram a resistência do solo com raízes e compararam com solos sem raízes e

afirma que, em geral, a resistência ao cisalhamento aumenta com o acréscimo do número de raízes (Gray, 1974; Wu, 1979; Gray e Sotir, 1996; Tabalipa e Fiori, 2008).

Wu (1996) comenta que os resultados disponíveis da contribuição das raízes à resistência do solo são limitados ao local onde os ensaios foram executados, pois suas propriedades são dependentes do solo e das condições climáticas existentes nas vizinhanças e a utilização desses em outras situações, em muitos casos seriam possíveis para cálculos aproximados.

2.2 ESTABILIDADE DE TALUDES

Talude é um termo genérico, compreendendo qualquer superfície inclinada que limita um maciço de terra, de rocha ou de ambos. Pode ser natural, caso de encostas ou vertentes, ou artificial, quando construído pelo homem, caso dos cortes e aterros.

Segundo Fiori e Carmignani (2009) um talude se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de forças distintos: forças devido ao peso dos materiais, forças devido ao escoamento de água e forças devido à resistência ao cisalhamento.

2.2.1 Fatores Condicionantes de Instabilização de Taludes

Massad (2010) afirma que dentre os diversos fatores que contribuem para a geração de movimentos de massa nas encostas com coberturas de solo destacam-se a morfologia do terreno (declividade, forma em planta e perfil, orientação, entre outros), regime pluviométrico (intensidade e volume da chuva, umidade antecedente), propriedades do solo e da rocha (espessura, textura, mineralogia, parâmetros de resistência, pesos específicos, descontinuidades, profundidade e característica do contato solo/rocha etc.), cobertura vegetal (tipo e intensidade) e uso e ocupação do solo.

Pinto (2000) diz que a deflagração das instabilizações de taludes e encostas é controlada por uma cadeia de eventos, muitas vezes de caráter cíclico, que tem sua origem na formação da própria rocha e em toda sua história geológica e geomorfológica subsequente, como movimentos tectônicos, intemperismo, erosão, ação antrópica, dentre outros fatores.

Segundo Terzaghi (1952) as causas de instabilização de taludes podem ser divididas em:

I- Causas Internas: são aquelas que atuam reduzindo a resistência interna do material constituinte do talude, sem que haja mudança no seu aspecto geométrico.

II- Causas Externas: são devidas as ações externas que alteram os estado de tensões atuantes sobre o maciço, resultantes em um acréscimo das tensões cisalhantes provocadas pelo aumento das tensões de cisalhamento que igualando ou superando a resistência intrínseca do solo, levam o maciço a condição de ruptura.

III- Causas Intermediárias – são aquelas que não podem ser explicitamente classificadas em uma das duas classes anteriormente definidas.

As causas que determinam o movimento de deslizamento de um talude dependem do fenômeno que contribui para o aumento da tensão de cisalhamento e/ou uma redução da resistência ao cisalhamento.

A Tabela 2.1 apresenta os principais fatores de instabilização de taludes.

Tabela 2.1 – Fatores de Instabilização de Taludes

Ação	Fatores	Fenômenos
Aumento Das solicitações	Remoção de massa (lateral ou da base)	Erosão, escorregamentos, cortes.
	Sobrecarga	Peso da água da chuva, neve, granizo. Acúmulo natural de material. Peso da vegetação. Construção de estruturas e aterros.
	Solicitações dinâmicas	Fenômenos naturais (terremotos, ondas, vulcões etc.). Explosões, tráfego, sismos induzidos.
	Pressões laterais	Água em trincas, material expansivo etc.
Redução da Resistência	Características inerentes ao material (textura, estrutura etc.)	Características geomecânicas do material e estado de tensões iniciais.
	Mudança nas características do Material	Intemperismo, redução da coesão e ângulo de atrito. Elevação do nível d'água.
	Outras causas	Enfraquecimento devido ao rastejo progressivo. Ação de raízes e animas.

Fonte: Guidicini e Nieble (1984)

2.2.2 Análise Determinística de Estabilidade de Taludes

O objetivo da análise de estabilidade é avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa de solo presente em talude natural ou construído. Em geral, as análises de estabilidade de taludes são realizadas comparando-se as tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento. Desta forma, define-se um fator de segurança (FS) de acordo com a Equação 2.3.

$$FS = \frac{\tau}{\tau_{mob}} \tag{2.3}$$

Onde τ_{mob} = tensão cisalhante atuante ou resistência mobilizada

O fator de segurança é o fator pelo qual os parâmetros de resistência podem ser reduzidos de tal forma a tornar o talude em estado de equilíbrio limite ao longo de uma superfície.

A adoção de um determinado fator de segurança em um projeto de contenção de taludes depende de vários fatores. Entre os quais se destacam as consequências potenciais associadas à instabilização do talude, a geometria do talude, a heterogeneidade dos materiais constituintes do talude, dentre outros.

A Tabela 2.2 mostra os fatores de segurança de acordo com as respectivas condições de estabilidade dos taludes.

Tabela 2.2 – Fator de segurança e as respectivas condições de estabilidade dos taludes

Fator de Segurança (FS)	**Condição do Talude**
FS <1	Talude instável: caso o talude venha a ser implantado nestas condições deverá sofrer ruptura.
FS = 1	Condição limite de estabilidade associada a iminência de ruptura; também condição adotada no caso de retroanálises.
FS > 1 (Pouco maior)	Condição estável: quanto mais próximo de 1 for o fator de segurança, mais frágil será a condição de estabilidade do talude.
FS > 1 (Muito maior)	Condição estável: quanto maior o FS, menores serão as possibilidades de o talude vir a sofrer ruptura quando submetido a condições críticas.

Existem dois tipos de abordagem para determinação do fator de segurança do ponto de vista determinístico: análise de tensão-deformação e teoria do equilíbrio limite.

Estudos de estabilidade baseados em análises de tensão-deformação são realizados com o auxílio de programas computacionais, baseados nos métodos dos elementos finitos (MEF) ou das diferenças finitas (MDF) calculando-se a tensão cisalhante num ponto e comparando-a com os parâmetros de resistência do material. A superfície de ruptura será configurada pela união dos menores valores dos fatores de segurança de cada ponto

(τ cisalhante $\geq \tau$ resistente), fornecendo ainda o valor do deslocamento em cada ponto (deformação do aterro ou do talude) (Gerscovich, 2012).

Este tipo de abordagem torna-se bastante útil quando há, por exemplo, a necessidade de se modificar a configuração geométrica de um talude, pois permite calcular a tensão em um ponto qualquer e compará-la à resistência do material.

Os métodos de análises por equilíbrio limite são os mais utilizados e baseiam-se na teoria de haver um equilíbrio numa massa de solo, tomada como corpo rígido plástico, na iminência de entrar em processo de escorregamento.

De acordo com Massad (2010) os métodos de equilíbrio limite partem das seguintes hipóteses:

- O solo se comporta como material rígido-plástico, isto é, rompe-se bruscamente, sem se deformar;
- As equações de equilíbrio estático são válidas até a ameaça da ruptura, quando, na realidade, o processo é dinâmico;
- O fator de segurança (FS) é constante ao longo da linha de ruptura, ou seja, ignoram-se eventuais fenômenos de ruptura progressiva.

Para o cálculo do fator de segurança é necessário que se estabeleça previamente à geometria da superfície de ruptura, a qual é repetida até que se encontre a superfície que resultará no menor coeficiente de segurança. A forma da superfície de ruptura depende da geometria do problema, da estratigrafia, das características dos materiais envolvidos e dos métodos de cálculo disponíveis para a análise.

A maioria dos métodos de equilíbrio limite divide a região do solo delimitada pela superfície de ruptura em diversas fatias verticais e aplica as forças atuantes, conforme mostra a Figura 2.4. O fator de segurança é calculado a partir do somatório das forças e momentos de todas as fatias.

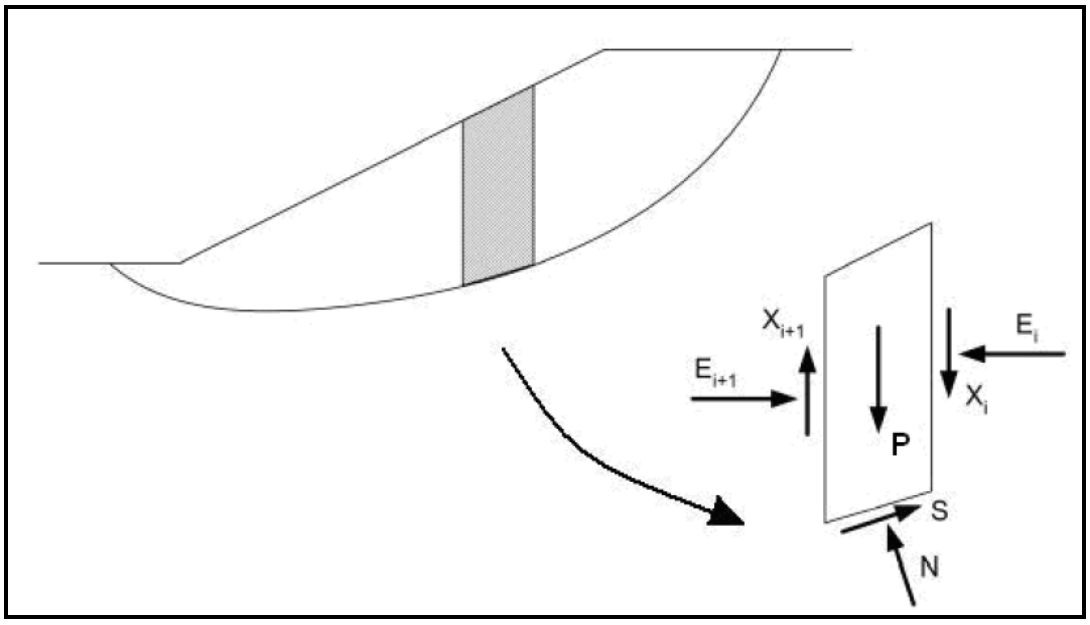

Figura 2.4 – Representação das forças aplicadas em uma fatia típica

As variáveis mostradas na Figura 2.4 são definidas a seguir:

P = peso da fatia;
E = forças laterais à fatia;
X = forças verticais entre as fatias;
N = força normal à base da fatia;
S = força de cisalhamento na base da fatia.

Com exceção do peso da fatia, todas as forças são desconhecidas e calculadas através dos métodos de equilíbrio limite.

Uma das vantagens da divisão do solo em fatias é permitir que as análises de estabilidade sejam feitas em taludes irregulares e não homogêneos, pois as fatias não precisam possuir a mesma espessura, o que permite dividi-las de forma que a base de cada uma permaneça em um tipo de solo.

Baseados na teoria de equilíbrio limite existem vários métodos de análise de estabilidade de taludes, os quais se diferenciam um dos outros em função das hipóteses

simplificadoras adotadas. Independentemente das hipóteses adotadas, é necessário estabelecer os parâmetros de resistência dos solos.

O método de análise de estabilidade utilizado no estudo foi o Método do Talude Infinito.

2.2.2.1 Método do Talude Infinito

São considerados taludes infinitos aqueles que se estendem por longas distâncias e possuem camadas consistentes no seu perfil que tem espessura muito menor que o comprimento do talude. É um método simples, podendo ser resolvido sem a utilização de programas computacionais complexos (Pimenta Júnior, 2005).

De acordo com Fiori e Carmignani (2009) do ponto de vista prático, qualquer talude de grande extensão, e com perfis de solo essencialmente do mesmo tipo, pode ser considerado como um talude infinito.

Segundo Taylor (1948) quando se utiliza o método do talude infinito para análise de estabilidade de taludes, além das hipóteses pertinentes dos conceitos de equilíbrio limite, admite-se também que as linhas de fluxo são paralelas à superfície do terreno e que a ruptura é do tipo planar e paralela à superfície do talude.

A Figura 2.5 mostra a representação do método do talude infinito, com as forças atuantes em um talude de terra, com uma camada de solo de profundidade z, largura b e comprimento unitário.

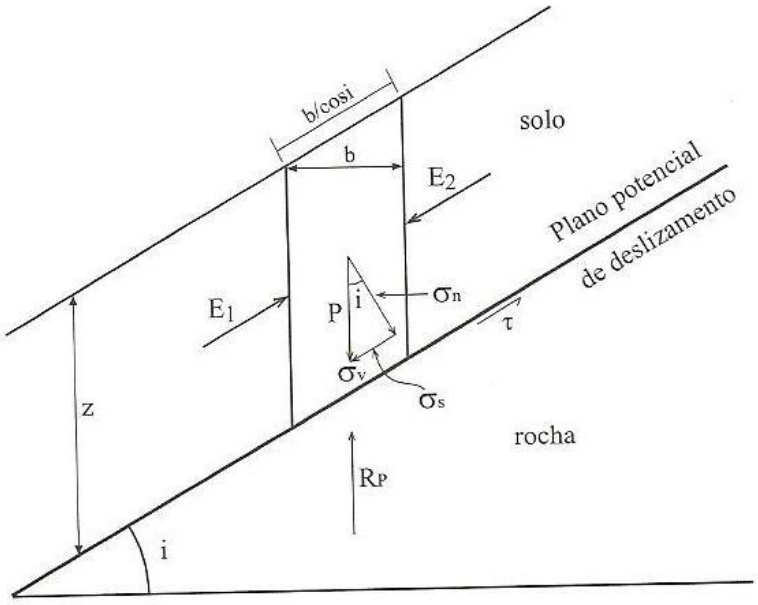

Figura 2.5 – Representação de um talude infinito: Forças atuantes em um talude de solo

Sobre a fatia do talude da Figura 2.4 atuam quatro forças, que deverão estar em equilíbrio na condição de equilíbrio limite. Uma das forças atuantes é o peso P da coluna de solo, que é considerado como um vetor passando pelo ponto médio da base, no qual P é representado pela Equação 2.4.

$$P = \gamma_{nat}.b.z \tag{2.4}$$

Onde:

γ_{nat} = peso específico natural do solo

b = largura da fatia de solo

z = profundidade do solo

As outras duas forças E_1 e E_2, que atuam nas faces laterais da fatia de solo são iguais em magnitude e apresentam sentidos opostos. E por fim tem-se a força de reação ao peso (R_p) que é igual e oposta a P.

O valor da tensão vertical (σ_v) devido ao peso (P) atuante na base do talude é dada pela Equação 2.5.

$$\sigma_v = \gamma_{nat}.z.\cos i \tag{2.5}$$

Sendo i é a inclinação do talude.

As componentes normal (σ_n) e tangencial (σ_s) da tensão vertical são expressas pelas Equações 2.6 e 2.7, respectivamente:

$$\sigma_n = \gamma_{nat}.z.\cos^2 i \tag{2.6}$$

$$\sigma_s = \gamma_{nat}.z.\cos i.seni \tag{2.7}$$

Para a determinação do fator de segurança é necessário conhecer a intensidade de resistência ao cisalhamento (τ) que considerando a coesão como sendo igual a zero é definida pela Equação 2.8.

$$\tau = \gamma_{nat}.z.\cos^2 i.tg\phi \tag{2.8}$$

Sendo ϕ é o ângulo de atrito interno do solo.

Desta maneira seguindo a definição de fator de segurança (FS) e desconsiderando o efeito da coesão do solo, este pode ser expresso pela Equação 2.9.

$$FS = \frac{tg\phi}{tgi} \tag{2.9}$$

Segundo Fiori e Carmignani (2009) considerando o valor da coesão diferente de zero, o fator de segurança é definido pela Equação 2.10.

$$FS = \frac{2.c}{\gamma_{nat}.z.sen2i} + \frac{tg\phi}{tgi} \qquad (2.10)$$

Sendo c é a coesão do solo.

A análise do método de talude infinito levando em consideração a presença de água é representada pelo surgimento de um novo campo de esforços que se deve à pressão hidrostática, responsável pela poropressão e pelas forças de percolação, conforme mostra Figura 2.6.

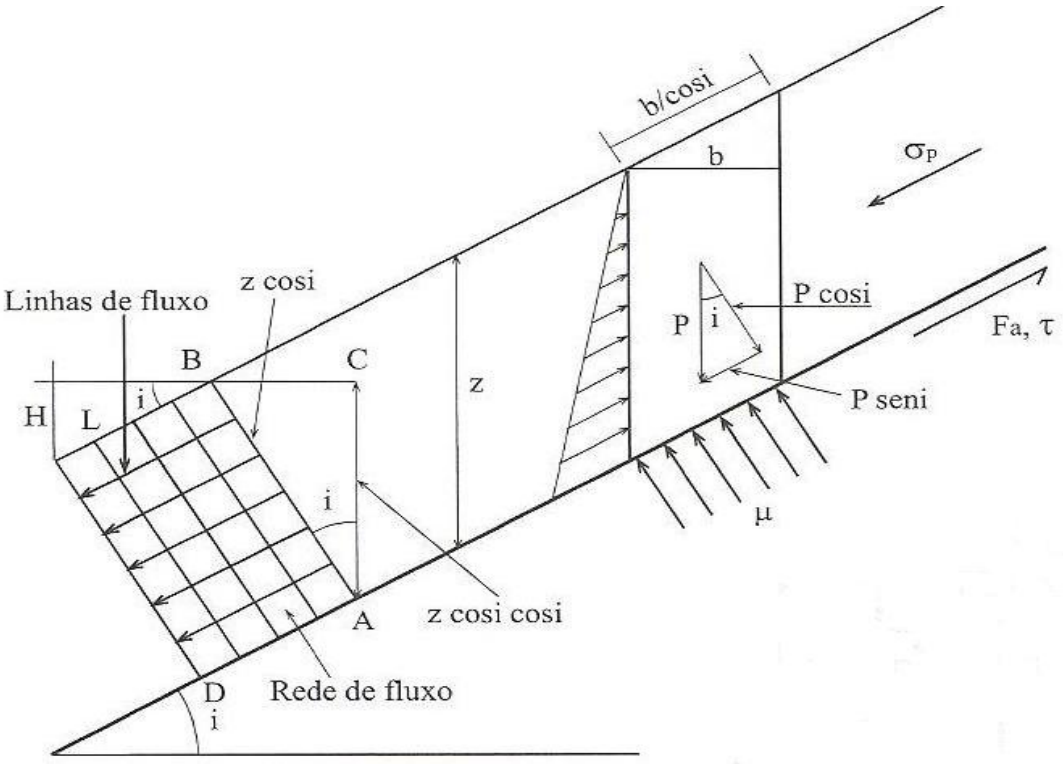

Figura 2.6 – Distribuição de forças em um talude com percolação de água

A poropressão (u) pode ser obtida pela Equação 2.11.

$$u = \gamma_w.z.\cos^2 i \qquad (2.11)$$

Sendo γ_w é o peso específico da água.

O peso efetivo do solo saturado da fatia é dado pela diferença entre o peso do solo saturado e o peso da coluna de água, que exerce uma força contrária.

A tensão efetiva vertical (σ_{ef}) é dada pela Equação 2.12.

$$\sigma_{ev} = \gamma_{sub}.z.\cos i \tag{2.12}$$

Sendo γ_{sub} é o peso específico submerso.

As componentes normal (σ_{en}) e tangencial (σ_{es}) da tensão efetiva vertical são expressas pelas Equações 2.13 e 2.14, respectivamente.

$$\sigma_{en} = \gamma_{sub}.z.\cos^2 i \tag{2.13}$$

$$\sigma_{es} = \gamma_{sub}.z.\cos i.seni \tag{2.14}$$

A Força de percolação (F_p) é representada pela Equação 2.15.

$$F_p = \gamma_w.b.z.seni \tag{2.15}$$

A pressão de percolação (σ_p) é calculada pela Equação 2.16.

$$\sigma_p = \gamma_w.z.seni.\cos i \tag{2.16}$$

A pressão de percolação resulta da ação da água infiltrada no solo, que ao movimentar, induz, por atrito viscoso, pressões de arraste nos grãos de solo, na direção do movimento. Essa pressão depende da altura do nível da água no solo e, portanto, atinge um valor máximo no final de um período chuvoso, por causa do acúmulo de infiltração

de várias chuvas, e um valor mínimo no final do período seco, quando o nível freático alcança valores mínimos (Fiori e Carmignani, 2009).

O fator de segurança levando em consideração a presença de água no solo e uma coesão igual a zero é dado pela Equação 2.17.

$$FS = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_{sat}} . \frac{tg\phi}{tgi} \tag{2.17}$$

Onde γ_{sat} é o peso específico saturado do solo.

De acordo com Fiori e Carmignani (2009) considerando agora a coesão (c) diferente de zero, o fator de segurança é representado pela Equação 2.18.

$$FS = \frac{2.c}{\gamma_{sat}.z.sen2i} + \frac{\gamma_{sub}.tg\phi}{\gamma_{sat}.tgi} \tag{2.18}$$

Porém, se o talude não estiver saturado e o nível do lençol freático atingir a uma altura (h_2) acima do plano de escorregamento, conforme mostra a Figura 2.7, o fator de segurança pode ser expresso segundo a Equação 2.19.

$$FS = \frac{c + \left(\gamma_{sat} - \frac{h_2}{z} . \gamma_w \right).z.\cos^2 i.tg\phi}{z.\gamma_{sat}.seni.\cos i} \tag{2.19}$$

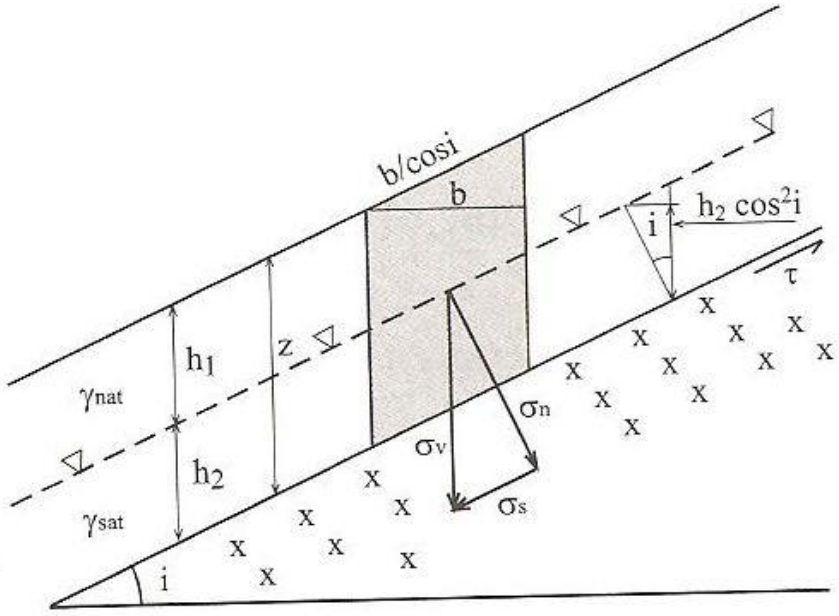

Figura 2.7 – Parâmetros envolvidos na análise de um talude infinito, com altura do nível freático h_2 e fluxo de água paralelo ao talude

Na análise de estabilidade de um talude infinito com presença de vegetação deve-se levar em consideração:

- Tipo de vegetação (árvores, gramíneas ou arbustos);
- Força do vento;
- Ação das raízes na resistência do sistema solo-raiz.

O efeito do aumento do peso é considerado somente para árvores, uma vez que o peso de gramíneas e arbustos é comparativamente muito menor. A sobrecarga advinda do peso das árvores aumenta as forças mobilizantes de um talude (Firori e Carmignani, 2009).

A pressão exercida pelo vento sobre uma cobertura vegetal pode ser transmitida ao solo como uma pressão adicional. Se o vento sopra na direção da inclinação do talude, a força do vento deverá ser adicionada às forças mobilizantes, reduzindo a resistência à ruptura. Porém foi verificado através de investigações que esta pressão do vento é

insignificante, não exercendo grande influência na estabilização de taludes (Fiori e Carmignani, 2009).

Segundo Styczen e Morgan (1995), a pressão do vento somente tem significado quando atua em árvores e quando sua velocidade é superior 40 km/h.

A ação das raízes é considerada como um reforço que aumenta a resistência à ruptura, conforme mostra a Equação 2.20.

$$c = c_s + s_r \tag{2.20}$$

Em que:
c = coesão do solo total
c_s = contribuição de coesão do solo
s_r = contribuição de coesão das raízes

A Figura 2.8 mostra os elementos geométricos de um talude florestado, com o nível freático a uma distância h_1 da superfície e uma distância h_2 da base da camada de solo.

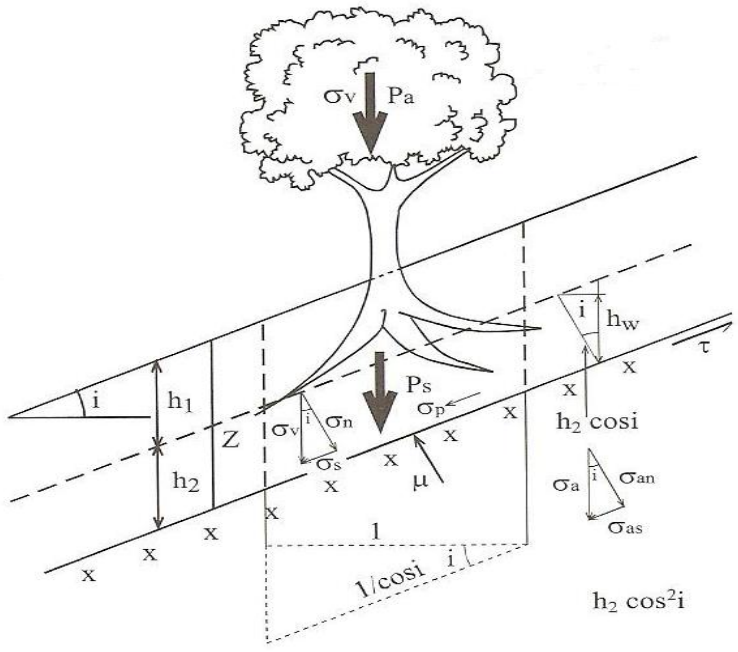

Figura 2.8 – Elementos geométricos de um talude com vegetação e forças atuantes

A resistência ao cisalhamento considerando a análise de um talude infinito com vegetação é dada pela Equação 2.21.

$$\tau = c_s + s_r + \left[\left(h_1 \cdot \gamma_{nat} + h_2 \cdot \gamma_{sub} + P_a\right)\cos^2 i\right] tg\phi \qquad (2.21)$$

Onde P_a é o peso das árvores.

Fiori e Carmignani (2009) afirma que o fator de segurança pode ser obtido através da Equação 2.22.

$$FS = \frac{c_s + s_r + \left(h_1 \cdot \gamma_{nat} + h_2 \cdot \gamma_{sub} + P_a\right)\cos^2 i.tg\phi}{\left[\left(h_1 \cdot \gamma_{nat} + h_2 \cdot \gamma_{sub} + h_2 \cdot \gamma_w + P_a\right)seni + F_{ve}\right]\cos i} \qquad (2.22)$$

Onde F_{ve} é a força de arraste do vento na copa das árvores.

No caso do talude estar saturado o fator de segurança é expresso segundo Fiori e Carmignani (2009) pela Equação 2.23.

$$FS = \frac{c_s + s_r + \left(z.\gamma_{sub} + P_a\right).\cos^2 i.tg\phi}{\left[(\gamma_{sat}.z + P_a).seni + F_{ve}\right]\cos i} \qquad (2.23)$$

Considerando-se o aumento de coesão do solo como uma função da densidade das raízes pode-se analisar a influência da tensão suportada pelas raízes na resistência do solo à ruptura. O efeito máximo na resistência à ruptura ocorre quando a resistência à tração das raízes é totalmente mobilizada. A ruptura das raízes ocorre quando sua resistência à tração é excedida e pela perda de ancoragem.

2.2.3 Técnicas Utilizadas na Estabilização de Taludes

Existem várias técnicas de estabilização de taludes disponíveis atualmente. A escolha de um ou outro método depende do tipo de problema a ser resolvido, da viabilidade de execução e viabilidade financeira do projeto a ser executado. Na Tabela 2.3 são apresentadas as obras e as medidas de estabilização de taludes mais comuns.

Tabela 2.3 – Principais medidas de estabilização de taludes

GRUPOS	TIPOS
Obras sem estrutura de contenção	Retaludamentos (corte, aterro compactado); Sistemas de drenagem (superficial, subterrâneo, de estruturas de contenção); Proteção superficial (naturais ou artificiais);
Obras com estrutura de contenção	Muros de gravidade Antirantamentos Aterros reforçados Estabilização de blocos
Obras de proteção	Barreiras vegetais Muros de espera

Uma técnica de estabilização de taludes que tem sido utilizada é a bioengenharia de solos.

O princípio básico que norteia a bioengenharia de solos compreende a utilização de elementos inertes como concreto, madeira, aço e fibras sintéticas em sinergismo com elementos biológicos, como a vegetação, no controle da erosão (Couto *et al*., 2010).

As espécies vegetais contribuem com o sistema radicular e o caule, sendo utilizadas em diferentes arranjos geométricos como elementos estruturais e mecânicos para contenção e proteção do solo, melhorando as condições de drenagem e retenção das movimentações de terra.

As técnicas de bioengenharia têm sido utilizadas desde o Império Romano para controlar os problemas de erosão em taludes e margens de rios, em diferentes partes do mundo. Essas técnicas caíram em desuso após o advento da Revolução Industrial, que

popularizou o uso da tecnologia do concreto e do aço, favorecendo a utilização de materiais de construção rígidos e inertes nos projetos de engenharia, já que inicialmente apresentaram-se baratos e seguros (Couto *et al.*, 2010).

Posteriormente, em especial após a década de 30 do século XX, engenheiros norte-americanos e europeus retomaram o desenvolvimento e a utilização de diversas técnicas de bioengenharia.

A bioengenharia vem sendo utilizada pelo governo dos Estados Unidos desde 1940, quando o *National Resources Conservation Services* preconizava o uso dessas técnicas para proteção de lagos e conservação de margens de rios (Couto *et al*., 2010).

Segundo Araújo *et al*. (2005) existe atualmente muitas publicações e experiências que se tem com referência à bioengenharia e também à evolução das técnicas. Porém, ainda há resistência às técnicas em muitos países, inclusive no Brasil, justamente pelo fato de ainda serem pouco conhecidas e divulgadas.

Segundo Couto *et al*. (2010) dentre as vantagens do uso de tecnologias baseadas na bioengenharia dos solos, destacam-se:

- Menor requerimento de maquinário: as técnicas de bioengenharia de solos apesar de requererem maior utilização de mão de obra, requerem menor utilização de maquinário. Desta forma oferecem maior retorno social, já que além de utilizar maior quantidade de mão de obra braçal, requer menor qualificação do que as práticas tradicionais de engenharia.
- Utilização de materiais naturais e locais: madeira, pedras, compostos orgânicos, dentre outros, reduzem os custos de transporte, além de gerarem diversos outros benefícios locais.
- Compatibilidade ambiental: as técnicas de bioengenharia de solos geralmente requerem a utilização mínima de equipamentos e da movimentação de terra, o que ocasiona menor perturbação durante a execução das obras de proteção de taludes e controle de erosão. Além disso, são atributos favoráveis em áreas onde

a estética constitui fator de grande importância, fornecendo ainda habitat para a fauna nativa, restauração ecológica e conforto ambiental.

- Execução em locais de acesso precário ou inexistente: em locais de difícil acesso ou inacessíveis para o maquinário, as técnicas de bioengenharia de solos podem constituir a única alternativa viável para a execução de obras de proteção de taludes e controle de erosão.

2.2.3.1 Uso da vegetação na estabilização de taludes

A vegetação vem sendo utilizada há séculos pelo homem no controle de processos erosivos e como proteção e reforço em obras civis. As técnicas de bioengenharia de solos são empregadas em decorrência do seu baixo custo, do requerimento técnico relativamente simples para instalação e manutenção, bem como a adequação paisagística e ambiental (Pereira, 2008).

A importância da vegetação frequentemente é verificada quando se procede a supressão dela. Após a retirada da cobertura vegetal na maioria das vezes ocorre intenso aumento de processos erosivos e de instabilizações de taludes. A retomada do crescimento vegetal, por sua vez, promove a diminuição destes processos.

O principal mecanismo de interferência entre a estabilidade do solo e a vegetação são as raízes. As raízes são responsáveis pela fixação do vegetal ao solo, além de absorver e servir de reservatório de nutrientes importantes para o desenvolvimento da vegetação. A quantidade de nutrientes absorvidos e reservados depende de propriedades das raízes, tais como diâmetro e profundidade em que se encontra (Walker, 2004).

A magnitude do reforço na estabilidade do solo contra escorregamentos promovido pelas raízes decai rapidamente em resposta a derrubada da mata. Grande parte da resistência do sistema de raízes reside naquelas mais finas, que, por sua vez, perdem sua resistência e apodrecem após o desmatamento (Fiori e Carmignani, 2009).

Burroughs e Thomas (1977) estimaram a resistência total de áreas florestadas por unidade de área de solo em torno de 17 kN/m^2, declinando-se rapidamente para 2 kN/m^2 após o corte das árvores.

Para o aumento da resistência ao cisalhamento do solo a elevada concentração de fibras radiculares de pequeno diâmetro é mais efetiva do que poucas raízes de diâmetro maior (Pereira, 2008).

Segundo Lemes (2001), devido ao fato da quantidade de raízes diminuírem com a profundidade do solo, a influência das raízes no talude está limitada a uma região de aproximadamente 1,50 m da superfície, sendo que a maiores profundidades o efeito da resistência ao cisalhamento diminui.

A Figura 2.9 apresenta o mecanismo de estabilização do talude oferecido pela vegetação, sendo que o comportamento das raízes é satisfatório no controle de escorregamentos quando penetrarem através da superfície potencial de ruptura.

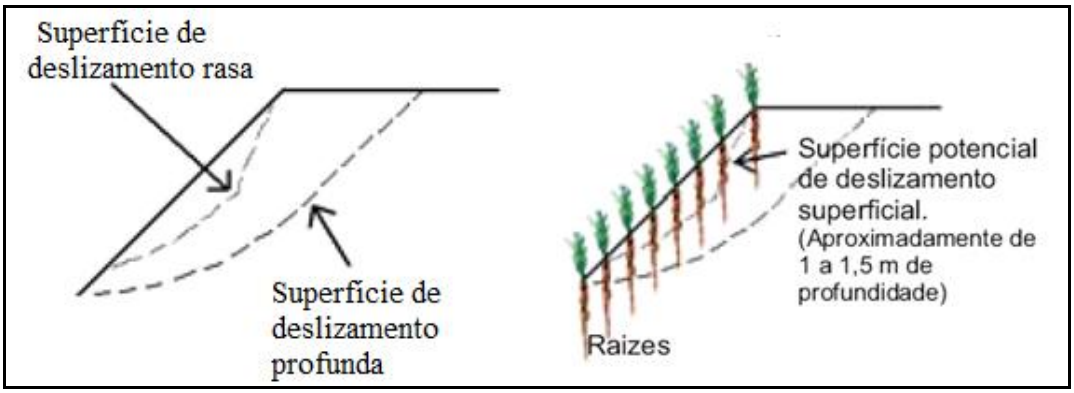

Figura 2.9 – Efeito das raízes de plantas da estabilidade de taludes

Fonte: Madruga *et al*. (2007)

Gray e Sotir (1996) efetuaram análises de estabilidade de taludes utilizando a coesão radicular em função da concentração de raízes no solo com a profundidade, verificando que uma pequena variação na coesão radicular pode influenciar o fator de segurança dos taludes. Essa influência foi verificada nas menores profundidades de solo.

Yagi *et al*. (1994) investigaram rupturas rasas ocorridas no Japão. Fazendo a análise da área levando em conta uma densa vegetação, o fator de segurança aumentou de 10 a 13,5%. Geralmente se obtém aumentos de até 30% para os casos de densa vegetação e superfícies de rupturas com até 2 m de profundidade. O efeito é menor no caso de superfícies de rupturas profundas e é muito pequeno para rupturas a mais de 5 m de profundidade, pois em taludes de alta declividade, as raízes de árvores geralmente não alcançam este nível (Lemes, 2001).

Chaulya *et al*. (2000) realizaram estudos de estabilização por vegetação em uma pilha de estéril de uma mina de carvão localizada no distrito de Dhandab, Índia. Nesta pesquisa foi utilizada uma integração biológica entre duas espécies de gramíneas nativas (*Dalbergia sisoo* e *Leucena leucocephala*). Por meio de ensaios de cisalhamento direto determinaram-se as propriedades de resistência ao cisalhamento de solos da pilha de estéril, sem a vegetação e 3 anos após o plantio das gramíneas. Os resultados dos ensaios estão apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Resultado do Ensaio de Cisalhamento Direto

Parâmetros	**Solo natural da pilha**	**Solo da pilha após 3 anos de plantio das gramíneas**
Coesão (kN/m^2)	64	108
Ângulo de Atrito (^{0})	32	33,5

Fonte: Chaulya *et al*. (2000)

Observa-se pela Tabela 2.4 que as raízes das gramíneas melhoraram as propriedades de resistência do solo da pilha de estéril. A principal mudança está no intercepto de coesão que teve um aumento considerável (Chaulya *et al*., 2000).

Os mesmos autores também observaram um aumento do fator de segurança da pilha de estéril, antes era de 1,4 e passou para 1,8 após plantio da vegetação.

Uma das características mecânicas importantes das raízes é a sua resistência à tração, ao contrário dos solos, que apresentam resistência à compressão. O efeito combinado de solo e raízes resulta em reforço do solo (Baets *et al.*, 2008). Três diferentes respostas são possíveis durante o cisalhamento de um solo reforçado com fibras, que são o rompimento, o alongamento ou o deslizamento de fibras.

Wu *et al*. (1988) estudaram a resistência ao cisalhamento de solo reforçado por raízes, considerando a força de tração exercida sobre elas. Há a referência de que, em análises de estabilidade de encostas, as raízes agem como um reforço do solo. Em análises de estabilidade de taludes por equilíbrio limite, considera-se a estabilidade da cunha limitada pela superfície potencial de deslizamento e para que ocorra a ruptura dessa superfície a raiz precisa romper por tração ou arrancamento. Observações de raízes escavadas concluem que só romperam por tração raízes de diâmetro igual ou menor que 0,7 mm. Estes autores citam que foram executados diversos ensaios de cisalhamento direto em laboratório e em campo por vários pesquisadores. A maioria dos resultados mostrou um acréscimo da resistência ao cisalhamento do solo com o volume de raiz e que os fatores mais importantes para esta contribuição de reforço são a rigidez e a orientação da raiz.

Gray e Ohashi (1983) por outro lado, mostraram através de ensaios de laboratório que a orientação do reforço das fibras perpendicular à superfície de ruptura fornece resultados similares ao reforço das fibras orientadas aleatoriamente, que é a situação mais comum com as raízes no solo.

Segundo Gray e Sotir (1996) a resistência à tração das raízes varia muito de espécie para espécie, sendo que a maioria das espécies vegetais apresentam valores de resistência a tração de 10 a 40 MPa. Porém, existem espécies vegetais que podem apresentar valores de resistência à tração da ordem de 70 MPa.

Suarez (1997) afirma que, de uma espécie vegetal para outra, os resultados da resistência à tração podem variar muito dentro do mesmo tipo ou variedade, o que dificulta a adoção de uma resistência específica para elaborar um modelo matemático e

que a resistência à tração é função da idade da espécie vegetal e suas condições ambientais, tais como clima e umidade do solo.

Várias espécies vegetais podem ser utilizadas na estabilização de taludes, revegetação de áreas impactadas, controle de erosões e proteção de reservatórios e cursos d'água. As espécies vegetais são escolhidas de acordo com as características do solo e clima da região em que serão plantadas. A Tabela 2.5 mostra as limitações do estabelecimento da vegetação em relação à inclinação do talude.

Tabela 2.5 – Limitações do ângulo de inclinação do talude para o estabelecimento de vegetação

Ângulo de inclinação do talude (graus)	**Tipo de Vegetação**	
	Gramíneas	**Arbustos/Árvores**
0 – 30	Dificuldade baixa; Técnicas de rotina de plantio podem ser utilizadas	Dificuldade baixa; Técnicas de rotina de plantio podem ser utilizadas
30 – 45	Muita dificuldade no seu estabelecimento, aplicação rotineira de hidrosemeadura	Muito difícil para plantar
> 45	Consideração especial exigida	Plantio deve ser executado geralmente em bancos

Fonte: Truong *et al*. (2008)

O uso da vegetação no controle de processos erosivos deve ser criterioso. A escolha correta de plantas para uso em áreas degradadas, erosões e áreas instáveis permite obter o sucesso da revegetação e até mesmo estabilizar áreas que apresentam instabilidade.

Segundo Pereira (2008) os principais efeitos positivos das plantas são:

- Reduzem o transporte de sedimentos: as raízes agregam partículas e aumentam a resistência do solo. Os caules das plantas aumentam a rugosidade, reduzindo a energia cinética da água;

- Reduzem o escoamento superficial, pois as raízes aumentam a taxa de infiltração da água no solo, a porosidade do solo e os canais de sucção, bem como o tempo de infiltração;
- Reduzem a erosão, pois as plantas interceptam as águas das chuvas reduzindo a erosão laminar, evitando a erosão pelo efeito das gotas de chuva, que não atingem diretamente o solo;
- No controle de erosão as plantas mais eficientes são as de folhas curtas e espessas, de raízes profundas que apresentam grandes níveis de tolerância e aumentam o efeito de atirantamento do solo;

Pereira (2008) diz ainda que a vegetação inadequada pode causar instabilidade, podendo provocar os seguintes efeitos:

- Redução da umidade do solo quando se utilizam espécies que necessitam de grande consumo de água, causando trincas e aberturas, principalmente em solos expansivos;
- O peso das árvores aumenta as forças atuantes, provocando deslizamentos;
- A pressão do vento ao atingir as árvores pode ativar deslizamentos;
- As raízes podem contribuir para danificar estruturas cimentadas superficialmente, nos canais, revestimentos, passeios e sistemas de drenagem em taludes;
- As raízes e árvores secas podem contribuir para concentrar o fluxo da água pluvial e provocar sulcamentos e ravinamentos;
- Quando muito concentradas e em grande volume as raízes superficiais podem contribuir para desagregação do solo;
- Plantas de raízes finas e superficiais impedem a infiltração e desagregam partículas do solo;
- Plantas altas e de folhas largas podem causar a erosão, pois concentram água nas folhas, que podem depois atingir o solo em maior proporção.

A Tabela 2.6 mostra os principais efeitos positivos e negativos da vegetação no movimento de massa em taludes.

Tabela 2.6 – Efeitos hidromecânicos da vegetação na estabilidade de solos de taludes, efeitos positivos (+) e negativos (-)

Natureza do efeito	Influência	Mecanismo hidrogeológico	Efeito da Estabilidade de taludes		
			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 mais profundos e mais firmes proporcionando suporte		+	+
	Ancoramento radicular	Estratos superiores de menor coesão		+	+
	Sobrecarga	O peso de árvores sobrecarrega o talude, aumentando os componentes da força normal		-	
	Tombamento	A vegetação exposta ao vento transmite forças dinâmicas para o talude		-	
	Recobrimento superficial	A folhagem e a biomassa decaídas 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 casos extremos pode gerar trincamentos e 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	+	+	

Obs.: [1]– até 0,30 m de profundidade; [2] – 0,50 a 1,50 m de profundidade; e [3] – mais de 1,50 m de profundidade.

Fonte: Couto *et al*. (2010)

2.3 SISTEMA VETIVER

Uma vegetação que se tem revelado eficaz e de baixo custo na estabilização de taludes é o vetiver (Figura 2.10).

Figura 2.10 – Planta vetiver na idade de 1 ano

O vetiver ("*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty") é uma planta aromática da família *Gramineae* originada no sul da Índia. Consiste de uma planta herbácea, perene, cespitosa (em moita) que chega a atingir cerca de 2 metros de altura e com raízes que podem penetrar até 3 metros de profundidade. Possui um sistema de raízes que contêm um óleo essencial que é largamente utilizado em perfumaria. É também conhecido como capim-vetiver, capim-de-cheiro, grama-cheirosa, grama-das-índias, falsopachuli (ou, simplesmente, pachuli) e raiz-de-cheiro, sendo vastamente cultivado na Indonésia, Índias Ocidentais, África e Polinésia (Truong *et al*., 2008).

O Sistema Vetiver (SV), que é baseado na aplicação do capim vetiver, foi desenvolvido pelo Banco Mundial para a conservação do solo e da água na Índia em meados de 1980. Embora esta aplicação ainda desempenha um papel vital na gestão de terras agrícolas,

estudos realizados nos últimos 20 anos demonstraram que, devido às características do vetiver, este pode agora ser utilizado como uma técnica de bioengenharia para proteção do meio ambiente (Pereira, 2006).

2.3.1 Histórico do vetiver

Segundo Pereira (2006) o vetiver é utilizado há mais de 3 mil anos na Índia e em grande parte da Ásia como base para perfumes e medicamentos, repelente de insetos, e para o controle de erosão em solos cultivados.

Inicialmente, o uso do vetiver se deu para a confecção de diversos produtos artesanais e também como forro para as casas. Não se sabe ao certo quando se começou a utilizar o vetiver como barreiras vivas para o controle de erosão. Após o cultivo, o vetiver passou a ser utilizado em obras civis como estradas e ferrovias, mas o maior avanço foi na década de 1970, que compreende a fase do desenvolvimento das teorias e práticas modernas para o controle de erosão utilizando o sistema vetiver. Os pioneiros que impulsionaram essa tecnologia foram os pesquisadores John Greenfield da Nova Zelândia e o norte-americano Richard Grimshaw, que receberam grande apoio do Banco Mundial. Posteriormente foram-se descobrindo diversas potencialidades do vetiver na biorremediação. Nesse aspecto, o australiano Paul Truong trouxe muitas contribuições importantes, enfatizando as ótimas características dessa planta na criação de barreiras vivas e outros usos na conservação dos solos (Pereira, 2006).

Na Venezuela, pelo que se tem informação, o vetiver foi introduzido, possivelmente, há mais de 100 anos, mas há 25 anos que se vem estudando sobre suas propriedades anti – erosivas. Esses estudos iniciaram-se na Faculdade de Agronomia da Universidade Central da Venezuela, pelos professores Napoléon Fernandez e Oscar Rodrigues, tendo sido introduzida anteriormente nos campos de experimentação nessa faculdade pelo professor Jaime Henao Jaramillo. Contudo foi graças ao apoio da Rede Mundial do vetiver, criada por iniciativa do Sr. R. G. Grimshaw, que se desenvolveu desde 1996 um programa de divulgação na Venezuela. Posteriormente apoiou-se a criação da Rede

Latino-americana do vetiver, estabelecida em Costa Rica, a cargo de James Smyle e Joan Miller, atualmente fixada na Venezuela, com sede na Sociedade Conservacionista Aragua, situada em Limón, Maracay (Pereira, 2006).

Ainda de acordo com Pereira (2006) desde 1931 foi observado o desenvolvimento do vetiver em Kuala Lumpur, na Malásia, com o objetivo de contenção de encostas e taludes íngremes.

Em agosto de 1996, a tecnologia vetiver chegou ao Brasil por intermédio dos CIERs - Centros Integrados de Educação Rural, com a implantação de pequenos viveiros para a multiplicação das plantas no Estado do Espírito Santo. Em 1999, na região de Camamu – Bahia, foram conseguidas as primeiras mudas do vetiver, assim como em outros Estados do Brasil. Para melhor informar sobre as vantagens e utilizações desta técnica alternativa, com apoio da Rede Mundial e Rede Latino-Americano do Capim Vetiver, foi publicada a cartilha: "Capim Vetiver - A Barreira Vegetal Contra a Erosão: perguntas & respostas e próximos passos". Porém, o uso do capim vetiver no Brasil para controle de erosão, estabilidade de encostas e recuperação de áreas degradadas ainda é muito restrito em razão da deficiência de conhecimento das técnicas de utilização (Lopes, 2005).

2.3.2 Características do vetiver

O vetiver é uma planta herbácea, ereta, pertencente ao grupo das gramíneas (*Poaceae*) do tipo C4, portanto se desenvolve melhor em plena exposição solar, alcançando uma altura que varia de 1,5 a 2 m, com folhas de 2 cm de largura na base, terminando em pontas pontiagudas. Por meio de testes de DNA, tem-se comprovado que a maioria dos cultivos do vetiver, distribuídos entre mais de 120 países tropicais e subtropicais, são estéreis (Pereira, 2006).

A esterilidade e a incapacidade de produzir rizomas e estolões fazem do vetiver uma planta não invasora, não se auto propaga, não se tornando uma erva daninha. Isso faz

com que seja recomendada por todos os órgãos ambientais internacionais (Truong, 2006).

Segundo Truong *et al*. (2008) o vetiver pode ser usado com segurança e eficiência, pois não agride o meio ambiente e têm utilidade para a sociedade, agricultura e engenharia, apresentando as seguintes características:

- Resistência a fogo. O vetiver tem sua coroa abaixo da superfície do solo permanentemente, se protegendo do fogo e pisoteio;
- Capacidade de perenidade permanente, com grande capacidade de sobrevivência como uma barreira vegetal densa por longo período de tempo, se desenvolvendo apenas no local onde foi plantado;
- Capacidade de formar uma barreira vegetal viva e densa permanentemente, acima do nível do terreno, funcionando como um filtro, retendo sedimentos e reduzindo a energia cinética do escoamento superficial;
- Capacidade de crescer e se desenvolver em diferentes tipos de solo;
- Capacidade de desenvolver novas raízes quando sua coroa ficar encoberta de sedimentos, devendo crescer até atingir o novo nível do terreno, e continuar a formação de terraços naturais;
- Possui baixo custo de implantação e manutenção, não necessitando podas periódicas, adubação ou irrigação, devido a sua rusticidade e tolerância à seca, alagamento etc;
- Capacidade de não competir com espécies que estão protegendo, devido principalmente à profundidade de seu sistema radicular, que apresenta grande geotropismo positivo;
- Capacidade de não ser hospedeira de insetos e fungos, se apresentando livre de pragas e doenças;
- Possui um sistema radicular penetrante, capaz de suportar entubamentos (túneis) e rachaduras nas estruturas do solo;
- Característica de planta xerófica e hidrófica para sobreviver em condições intempéricas, por isso, o vetiver após seu estabelecimento suporta condições extremas de seca e enchentes;

- Característica de possuir colmos eretos e resistentes, de maneira a conter o fluxo de água de pelo menos 1.500 litros/minuto e 30 cm de altura da lâmina d'água;
- Característica de grande adaptabilidade a extremas condições edafoclimáticas, com precipitações de 300 mm a 3.000 mm, temperaturas de -9°C até 50°C, capaz de suportar grande período de estiagem, superior a 6 meses.

2.3.3 Modo de plantio do vetiver

Como a maioria das principais aplicações requer um grande número de plantas, a qualidade do material de plantio é importante na aplicação bem sucedida do SV. Isso requer viveiros (berçários) capazes de produzir grandes quantidades de mudas de alta qualidade e baixo custo.

O vetiver, apesar de ser uma planta resistente a vários tipos climáticos, desenvolve-se melhor em climas tropicais e subtropicais, sendo que seu plantio deve ser realizado preferencialmente na época chuvosa (Pereira, 2008).

O plantio do vetiver deve ser realizado de acordo com a Figura 2.11.

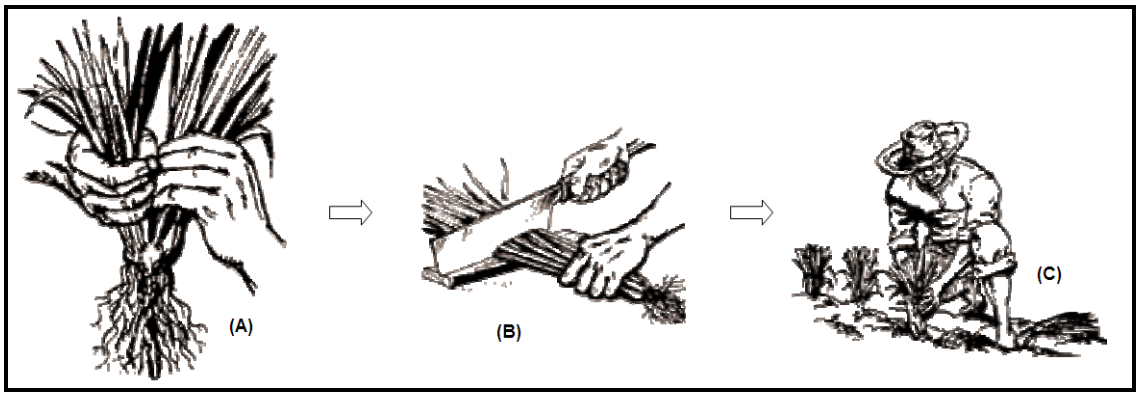

Figura 2.11 – Modo de plantio do vetiver

Fonte: Lopes (2005)

A Figura 2.11 mostra primeiramente, em (A) divisão do tufo do vetiver em hastes individuais com raízes (mudas). Em (B) corte da parte superior de cada muda a aproximadamente 15 a 20 cm da base. Em (C) colocação das raízes a 10 cm abaixo da base. As mudas são plantadas em fileiras em pequenas valas (colocando um pouco de adubo ou composto, se possível).

A Tabela 2.7 apresenta as especificações técnicas da cultura tradicional do vetiver.

Tabela 2.7 – Especificações técnicas da cultura do vetiver

Melhor época de Plantio	Outubro à Dezembro
Espaçamento	90 – 120 cm entre linhas e 30 – 50 cm entre plantas
Mudas necessárias	18.000 – 39.000/hectare, feitas por subdivisão das touceiras
Solos	Preferência arenosos para facilitar colheita
Controle de pragas	Dispensável
Colheita	10 meses após plantio
Rotação	Leguminosas ou outras espécies não gramíneas

Fonte: Adaptado de Lopes (2005)

A Figura 2.12 mostra um viveiro com mudas de vetiver.

Figura 2.12 – Mudas do vetiver na idade de 1 mês

2.3.4 Aplicações do vetiver

O vetiver tem sido utilizado na retenção e descontaminação de agroquímicos, especialmente os pesticidas, impedindo-os de contaminar o solo e acumular nas culturas. A investigação conduzida em plantações de couve em uma encosta na Tailândia indicou que o vetiver foi fundamental no processo de descontaminação de agroquímicos. Na Austrália, em canaviais e cultivo de algodão o vetiver foi plantado em todas as linhas de drenagem e foi eficiente na captura de partículas contendo alta concentração de agroquímicos. Nas plantações de cana, 69% de sedimentos de fósforo (P) da enxurrada foram aprisionados e nas plantações de algodão foram aprisionados 67 a 90% dos pesticidas, 48% dos herbicidas, 52% de P solúvel, 73% de nitrogênio (N) solúvel e 55% de enxofre (S) (Truong *et al*., 2002).

O vetiver também demonstrou ser eficiente no controle biológico de pragas. A pesquisa realizada pela Universidade Guangxi, China, mostrou que das 79 espécies de insetos encontrados nas plantações em fileiras de vetiver, apenas quatro atacaram as folhas da gramínea. No entanto, devido à sua pequena população os danos foram mínimos. Na Tailândia, o extrato natural de metanol do vetiver no solo, raiz e caule revelou-se eficaz na prevenção da germinação de uma série de espécies infestantes. Estes resultados indicam o potencial natural do vetiver como um pré-emergente de ervas daninhas (Chen, 1999).

O vetiver também tem sido utilizado no controle de efluentes e algas. Estudos chineses demonstraram que o vetiver tem potencial de diminuir concentrações de nitrogênio, fósforo e outros elementos que incentivam o crescimento de algas (Wagner *et al*., 2003).

Outra aplicação do vetiver é a reabilitação de solos e águas contaminadas.

Pinto *et al*. (2010) conduziram um experimento no lixão da cidade de Inconfidentes, Estado de Minas Gerais, com 12 espécies de plantas, entre elas o vetiver, com o objetivo de avaliar a sobrevivência e desenvolvimento das espécies em solos

contaminados para posterior utilização na recuperação de lixões da região. A sobrevivência das espécies plantadas após 30 dias da implantação do experimento encontra-se representada na Figura 2.13.

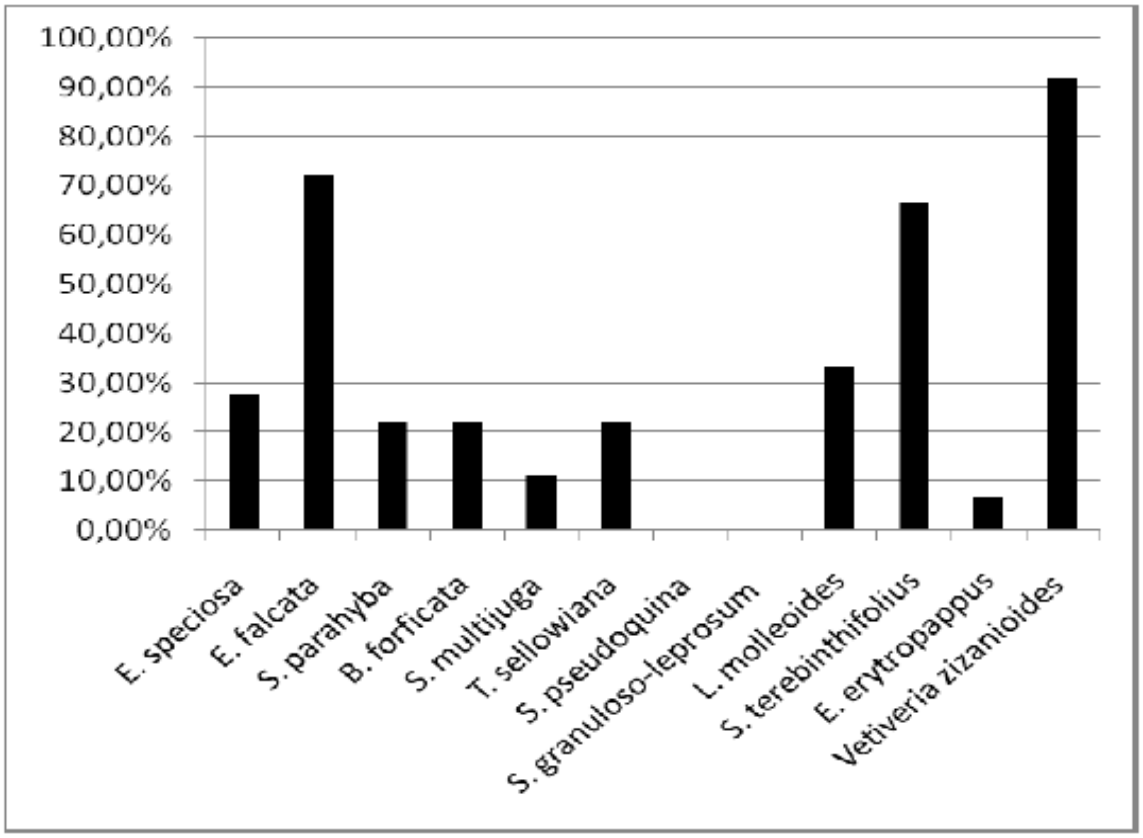

Figura 2.13 – Percentual de sobrevivência das espécies utilizadas para recuperar o lixão de Inconfidentes, Minas Gerais

Fonte: Pinto *et al*. (2010)

De acordo com Pinto *et al*. (2010) entre as 12 espécies avaliadas a que mais se destacou quanto ao percentual de sobrevivência foi o vetiver, com 92%.

Almeida (2011) avaliou o potencial do vetiver na fitorremediação de metais-traço presentes em ambientes aquáticos. Para esta avaliação foi realizado um experimento em escala de laboratório, por meio da implantação de tanques experimentais. Para o cultivo do vetiver em condições de ausência de solo fez-se o uso da técnica hidropônica, no qual as raízes ficaram submersas em água e todos os tanques receberam aplicação de

uma solução nutritiva e balanceada de NPK, essencial ao desenvolvimento das plantas. Após o estabelecimento e adaptação das plantas à nova condição de ausência de solo, período de 30 dias, iniciou-se o ensaio experimental e as plantas foram submetidas à aplicação dos metais-traço. O experimento foi implantado em triplicata perfazendo um conjunto de 18 tanques, que corresponderam aos cinco elementos-traço de interesse, Cd, Cr, Ni, Pb e Zn, além de um conjunto controle que compunha o experimento, sendo caracterizado como branco. O branco do experimento recebeu apenas solução nutritiva e manteve-se livre de contaminação. O experimento foi conduzido em água parada, em um sistema fechado e em cada tanque manteve-se um volume constante de 50 litros de água. A Tabela 2.8 apresenta os resultados das massas dos elementos Cd, Cr, Ni, Pb e Zn que mantiveram-se armazenadas nas estruturas vegetais do vetiver.

Tabela 2.8 – Massa metais-traço armazenada nas estruturas vegetais do vetiver

Massa de elemento-traço armazenada no Vetiver				
Elemento-traço	Estruturas vegetais	Massa quantificada em 1g de planta (mg)	Massa seca da planta (g)	Total de massa na estrutura (mg)
Cd	Folha	0	27,19	0
	Caule	0,007	184,83	1,29
	Raiz	0,348	310,86	108,18
Cr	Folha	0,003	24,52	0,074
	Caule	0,007	281,65	1,97
	Raiz	0,562	273,39	153,65
Ni	Folha	0,013	38,59	0,502
	Caule	0,043	193,30	8,31
	Raiz	0,534	445,04	237,65
Pb	Folha	0,005	29,93	0,150
	Caule	0,032	158,70	5,08
	Raiz	1,219	297,77	362,98
Zn	Folha	0,127	35,64	4,526
	Caule	0,284	395,53	112,33
	Raiz	3,397	295,93	1.005,27

Fonte: Almeida (2011)

Observa-se pela Tabela 2.8 que o vetiver, a partir do mecanismo de fitoextração, capturou e armazenou os elementos-traço nos seus tecidos vegetais, mostrando-se uma espécie promissora para os programas de fitorremediação, podendo ser aplicado como

polimento no tratamento de efluentes e desta forma maximizar a eficiência do processo, para as concentrações pesquisadas (Almeida, 2011).

Alves *et al*. (2008) avaliaram a tolerância a absorção e distribuição de Pb em plantas vetiver fazendo uma comparação com as plantas jureminha (*Desmanthus virgatus* (L.) Willd) e algaroba (*Prosopis juliflora* (SW) DC). Estas espécies foram empregadas devido à tolerância ao déficit hídrico. Para esta avaliação as plantas foram cultivadas em vasos plásticos, revestidos com sacos plásticos em seu interior. Foram aplicadas nas plantas doses crescentes de Pb, utilizando-se como fonte o acetato de Pb ($Pb(CH_3COO)_2$) nas concentrações de 0, 50, 100, 200 mg L^{-1} do elemento em solução. As plantas foram mantidas nessa solução durante 45 dias. Decorrido esse tempo, as plantas foram coletadas e divididas em raiz e parte aérea e o teor de Pb foi determinado. Verificou-se que as doses críticas variaram com a espécie e com o compartimento analisado, segundo mostra a Tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Doses críticas de toxidez (DCT's) de chumbo para a raiz, parte aérea e planta inteira de vetiver, jureminha e algaroba

Espécie	Compartimento		
	Raiz	Parte aérea	Planta inteira
	Pb, mg L^{-1}		
Vetiver	75	88	84
Jureminha	61	61	62
Algaroba	54	82	72

Fonte: Alves *et al*. (2008)

Segundo Alves *et al*. (2008) o vetiver demonstrou maior tolerância à contaminação com Pb, em relação às demais espécies, em todos os compartimentos estudados, o que

pode tornar esta espécie de grande importância para programas de fitorremediação de áreas contaminadas com Pb.

De acordo com Pereira (2008) o vetiver também beneficia a atmosfera terrestre, pois pode sequestrar grandes quantidades de dióxido de carbono da atmosfera, mas estudos ainda não comprovaram a quantidade de gases do efeito estufa que o vetiver pode remover. Cálculos aproximados revelam que uma planta do vetiver é capaz de sequestrar cerca de 5 kg/ano de carbono que são incorporados ao solo.

O vetiver também é utilizado em escala comercial e na fabricação de produtos farmacêuticos.

O óleo de vetiver é um importante produto obtido da raiz da planta e que contém centenas de terpenos, terpenóides, fenóis etc. Atualmente possui três aplicações comerciais primárias: como aromatizante em perfumes, como aditivos flavorizantes de alimentos e como inseticida natural (Truong, 2006).

O óleo do vetiver foi, recentemente, testado quanto às suas propriedades antioxidantes, anticarcinogênicas e termiticidas. Dos resultados obtidos, pôde ser concluído que o óleo do vetiver possui atividades biológicas multifuncionais. O vetiver confirmou ser não só um antioxidante natural como um termiticida alternativo. No que diz respeito a seu potencial anticarcinogênico, o óleo do vetiver demonstrou que pode ser a chave para novas drogas contra cânceres específicos, já que inibiu o crescimento em até 89% de três tipos de células cancerígenas testadas (Truong *et al*., 2008).

O vetiver é utilizado no artesanato. As folhas são usadas em cestaria e na fabricação de tapetes, bem como para cobrir telhados. As raízes podem servir para fazer telas, tecidos grosseiros, leques, entre outros artefatos.

Portocarrero (2009) conduziu um estudo de avaliação dos efeitos de diferentes técnicas de bioengenharia aplicadas em talude de corte associando diversas espécies vegetais de leguminosas e gramíneas, incluindo o vetiver. O experimento foi realizado em uma

estação experimental em um talude de corte, denominado Morro do Radar localizado no Aeroporto do Galeão, Rio de Janeiro. O vetiver foi implantado juntamente com outras espécies vegetais em forma de cordões na crista do talude e em outras duas linhas na face do talude com o objetivo de contenção de enxurrada. As avaliações do vetiver foram qualitativas e de caráter secundário, sendo observado seu desempenho nas diferentes posições do talude no decorrer do período de monitoramento. Foi observado excelente crescimento do vetiver em todas as linhas de plantio, conforme pode ser observado pela Tabela 2.10.

Tabela 2.10 – Crescimento do vetiver nos locais plantados

Posição	Plantio	Maio - 08 (cm)	Maio - 09 Altura (cm)
Crista	29-11-07	30	180
Linha I	17-12-07	22	55
Linha II	17-12-07	18	65

Fonte: Portocarrero (2009)

Foi verificado que os valores de umidade foram maiores nas áreas de plantio do vetiver. Também observou-se que o vetiver atuou em um ordenamento das águas superficiais, solucionando o problema de erosão (Portocarrero, 2009).

Uma das maiores aplicações do vetiver é no controle de erosão. A Figura 2.14 mostra o uso do vetiver em uma área atingida pela erosão na Venezuela, mostrando o problema e depois a solução com a aplicação do vetiver.

Figura 2.14 – Erosão de um Terreno na Venezuela: A foto da esquerda apresenta o problema de erosão e a foto da direita o processo erosivo solucionado com o vetiver
Fonte: Du e Truong (2003)

O vento e a mudança de temperatura também são elementos importantes causadores da erosão. O vetiver sendo plantado em fileiras forma uma barreira vegetal no controle de ventos.

A Figura 2.15 mostra a estabilização de uma voçoroca no Congo (África) com a aplicação do vetiver.

Figura 2.15 – Processo de Estabilização de uma voçoroca no Congo utilizando o vetiver
Fonte: Madruga *et al*. (2007)

É importante ressaltar que as Figuras 2.14 e 2.15 apresentam a aplicação do vetiver de forma qualitativa.

2.3.5 Estabilização de taludes com a utilização do vetiver

A aplicação do vetiver em obras de engenharia é uma alternativa vantajosa e tem apresentado excelentes resultados na estabilização de taludes de estradas, ferrovias, canais, barragens, tanto pela sua eficiência, como por seus custos reduzidos em comparação com as técnicas tradicionais de engenharia.

2.3.5.1 Resistência ao cisalhamento e resistência à tração das raízes do vetiver

As raízes do vetiver (Figura 2.16) são raízes fasciculadas, que podem chegar até 3 metros de profundidade, exercem um papel de atirantamento do solo, com consequente aumento da resistência ao cisalhamento do solo (Truong *et al*., 2008).

Figura 2.16 – Raízes do vetiver
Fonte: Truong *et al.* (2008)

Orozco (2009) realizou ensaios de cisalhamento direto em amostras indeformadas de solo sem vegetação e com cultivo de vetiver na idade de dois anos na mesma área na qual foi feito o presente estudo. Os resultados dos parâmetros de resistência admitindo o critério de Mohr – Coulomb são mostrados na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento

Planta	Ensaio	Profundidade (cm)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
1	1	0-50	2,0	30
	2	50-80	1,7	27
	5	100-140	6,0	25
2	6	0-40	3,4	30
Solo sem raiz	4	0-40	13,0	30

Fonte: Orozco (2009)

Ao contrário da maioria dos dados apresentados na literatura (Mendonça e Cardoso, 1998; Cazzuffi *et al.*, 2006), a maior resistência ao cisalhamento foi encontrada na amostra de solo sem raiz, que apresentou o valor mais alto de coesão, mas ângulo de atrito semelhante às demais amostras. Embora as amostras tenham sido coletadas no mesmo solo, os índices físicos iniciais, que também foram analisados, especificamente o índice de vazios mostrou que na amostra de solo sem raízes, o solo era muito mais denso e consequentemente mais resistente que os demais (Orozco, 2009).

A mesma autora acredita que a escala de trabalho usada para a realização dos ensaios de cisalhamento direto não foi a mais adequada, devido às dimensões dos corpos de prova testados (10 x 10 x 2 cm) que não simulariam com total fidelidade a situação real que apresenta-se em campo (Orozco, 2009).

O contrário já ocorreu nos estudos de Hengchaovanich e Nilaweera (1996). Esses autores realizaram ensaios de cisalhamento direto em amostras do mesmo solo de um talude sem vegetação e com vetiver na idade de dois anos. Foram realizados ensaios de cisalhamento direto para profundidade de solo de 0,25 m, 0,50 m, 0,75 m, 1,00 m, 1,25 m e 1,50 m. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.12.

Tabela 2.12 – Aumento da resistência ao cisalhamento do solo devido as raízes do vetiver

Profundidade (m)	Ar (mm^2)	Ar/A x 10^{-4}	Δs (KN/m^2)	% Δs
0,25	331,0	3,31	8,92	90,2
0,50	176,2	1,76	4,17	39,3
0,75	137,8	1,38	3,46	34,6
1,00	106,8	1,07	2,61	26,3
1,25	71,2	0,71	1,94	19,0
1,50	51,6	0,52	1,28	12,5

Ar = Área da raiz na superfície de cisalhamento; A = Área da superfície de cisalhamento; Δs = Aumento da resistência ao cisalhamento devido as raízes

Fonte: Hengchaovanich e Nilaweera (1996)

Verifica-se pela Tabela 2.12 que as raízes de vetiver na profundidade de 0,25 m pode aumentar a resistência ao cisalhamento do solo em até 90%, sendo que este incremento de resistência diminui com a profundidade do solo.

Os mesmos autores também realizaram ensaios de resistência à tração com 80 diferentes raízes de vetiver na faixa de diâmetro de 0,2 a 2,2 mm. O ensaio foi feito com amostras de raízes retas com cerca de 15 a 20 cm de comprimento. A ponta de uma extremidade da raiz era presa a um aparelho que continha uma mola calibrada, enquanto a outra extremidade da raiz era fixada a um suporte que era puxado manualmente até a ruptura da raiz. A força de tração aplicada era determinada a partir da mola (Hengchaovanich e Nilaweera, 1996). O resultado do ensaio é apresentado na Figura 2.17.

Pela Figura 2.17 é observado que a resistência à tração das raízes do vetiver aumenta com a redução do diâmetro da raiz, o que implica que, raízes mais finas oferecem maior resistência do que as raízes mais grossas. A resistência à tração de raízes do vetiver varia entre 40 – 180 MPa na faixa de diâmetro de raiz entre 0,2 – 2,2 mm. Isso significa uma resistência à tração de aproximadamente 75 MPa entre 0,7 mm e 0,8 mm de diâmetro da raiz, que é o tamanho mais comum de raízes de vetiver (Hengchaovanich e Nilaweera, 1996).

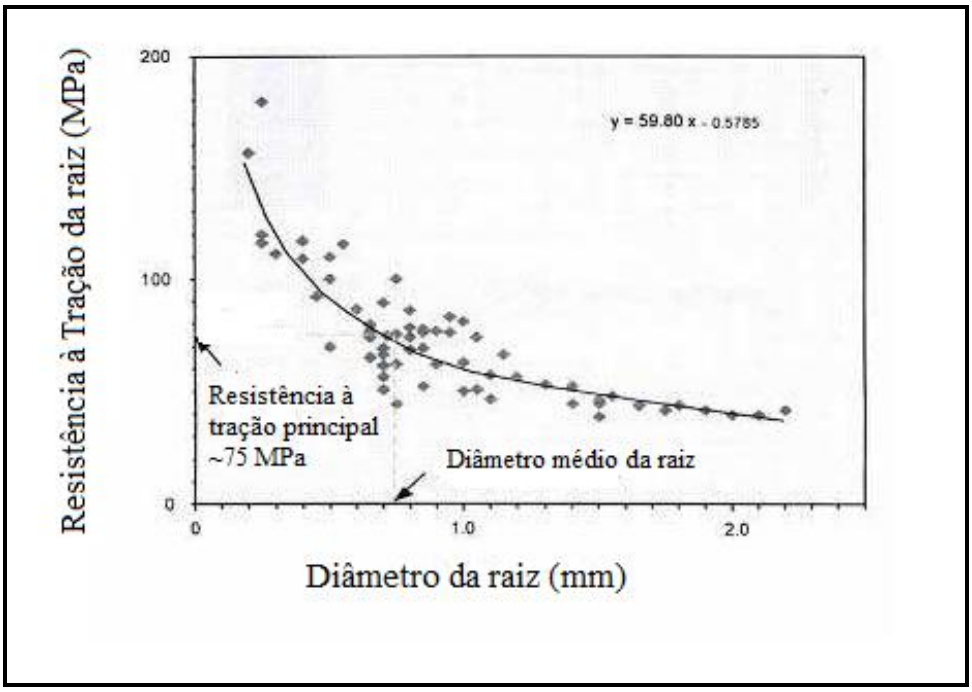

Figura 2.17 – Resistência à tração das raízes do vetiver de acordo com seu diâmetro
Fonte: Adaptado de Hengchaovanich e Nilaweera (1996)

Cheng *et al*. (2003) completaram a investigação de Hengchaovanich e Nilaweera (1996) sobre a força das raízes de vetiver encontrando um valor médio de resistência à tração de cerca de 85 MPa. Os mesmos autores também realizaram ensaios de resistência à tração em outras gramíneas, conforme mostra a Tabela 2.13. Embora o vetiver não apresente as raízes de diâmetros menores, a sua resistência à tração é maior do que todas as plantas testadas.

Tabela 2.13 – Diâmetro e resistência das raízes de algumas gramíneas

Gramíneas	**Diâmetro médio das raízes (mm)**	**Resistência média à tração (MPa)**
Juncellus Late	0,38 ± 0,43	24,50
Gama dallis	0,92 ± 0,28	19,74 ± 3,0
White Clover	0,91 ± 0,11	24,64 ± 3,36
Vetiver	0,66 ± 0,32	85,10 ± 31,2
Grama comum	0,66 ± 0,05	27,30 ± 1,74
Grama Bahia	0,73 ± 0,07	19,23 ± 3,59
Grama Manila	0,77 ± 0,67	17,55 ± 2,85
Grama Bermudas	0,99 ± 0,17	13,45 ± 2,18

Fonte: Cheng *et al*. (2003)

Orozco (2009) também realizou ensaios de resistência à tração em amostras de vetiver no mesmo local do presente estudo. Os ensaios foram realizados com plantas vetiver na idade de dois e três anos de plantio e foram escolhidos diâmetros aproximados de raiz de 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm e 2 mm e para cada diâmetro foram extraídos 50 corpos de prova. Os resultados do ensaio são mostrados nas Figuras 2.18 e 2.19.

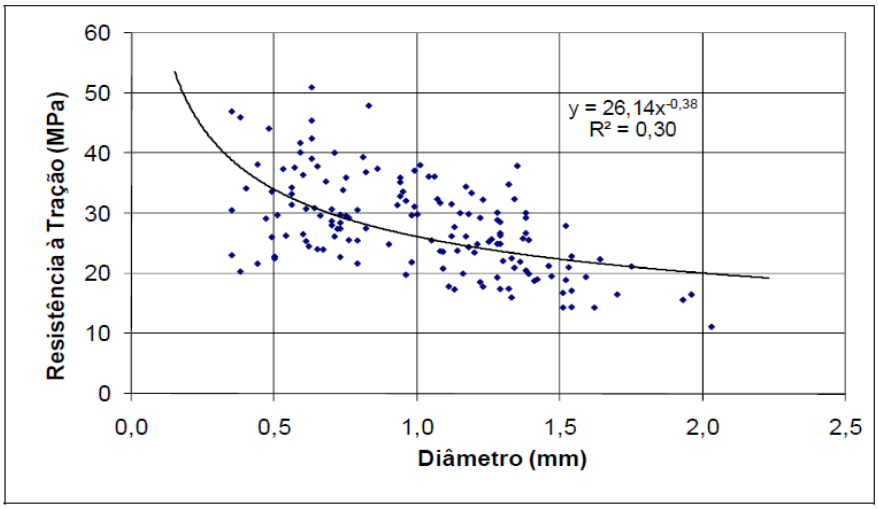

Figura 2.18 – Variação da resistência à tração com o diâmetro das amostras ensaiadas (Planta de dois anos)

Fonte: Orozco (2009)

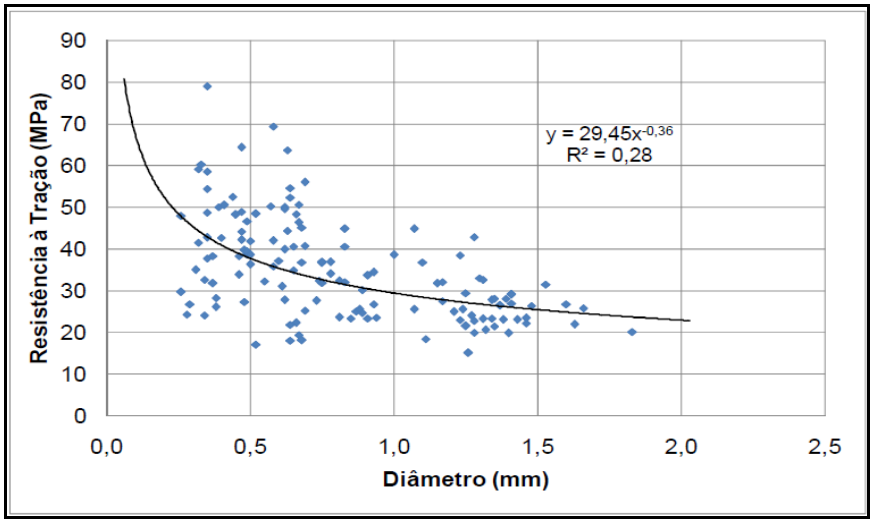

Figura 2.19 – Variação da resistência à tração com o diâmetro das amostras ensaiadas (Planta de três anos)

Fonte: Orozco (2009)

Observa-se pelas Figuras 2.18 e 2.19 uma grande dispersão dos valores, mas de uma forma geral, confirmou-se a tendência de redução da resistência à tração das raízes do vetiver com o aumento do diâmetro das amostras ensaiadas (Orozco, 2009).

Na planta de dois anos de idade o valor máximo obtido foi de 51 MPa na faixa de 0,5 a 0,75 mm de diâmetro, enquanto que na planta de três anos o máximo valor foi de 79 MPa, apresentado na faixa de diâmetros inferiores a 0,50 mm. Este último valor apresentou-se muito próximo ao valor de resistência média descritos por Hengchaovanich e Nilaweera (1996) e Cheng *et al*. (2003), porém os valores médios obtidos mostraram-se inferiores aos relatados na literatura (Orozco, 2009).

Essa variação de resistência à tração das raízes do vetiver pode ser explicada por alguns fatores que podem ser responsáveis pela variabilidade na resistência à tração das raízes, como variações na idade da raiz, taxa de crescimento, direção pela variação do conteúdo de umidade do solo, textura e estado do solo (Baets *et al.*, 2008).

Hengchaovanich (1998) observou que plantas vetiver podem crescer verticalmente em declives superiores a 150% (aproximadamente 56º). Outra característica que o diferencia das raízes de outras árvores é o seu poder de penetração que pode penetrar inclusive em camadas rochosas com pontos fracos. As raízes podem até mesmo perfurar o asfalto pavimentado de concreto. O mesmo autor caracteriza as raízes de vetiver como grampos vivos no solo ou buchas de 2 a 3 metros de profundidade.

2.3.5.2 Perda de solo e escoamento superficial com uso do vetiver

O vetiver quando plantado em fileiras formam moitas espessas e seu rígido tronco permite que essas coberturas elevem-se no mínimo de 0,6 metros, formando uma barreira viva que diminui e espalha a água de escoamento. Devidamente planejadas, as coberturas do vetiver são estruturas eficazes que espalham e desviam a água da enxurrada para áreas estáveis ou para áreas de boa drenagem (Truong *et al*., 2008).

As barreiras formadas pelo vetiver não são impermeáveis, controlam a velocidade de escoamento da água na superfície do terreno, filtrando e regulando a passagem de água, evitando a formação de sulcos, ravinas e voçorocas com consequente perda de solos e assoreamento de drenagens. Suas raízes, resistentes e profundas, ajudam na estabilização do solo, prevenindo deslizamentos cujos planos de instabilidade sejam inferiores a dois metros.

À montante das barreiras de vetiver se forma uma capa de sedimentos geralmente de alta fertilidade. Conforme aumenta a espessura dos sedimentos, há um incremento de fertilidade e umidade do substrato, formando-se terraços naturais. O vetiver tem a particularidade de emitir raízes quando sua base é recoberta por sedimentos. Portando, quanto mais alta for a capa de sedimentos retidos, maiores também serão as barreiras de vetiver (Madruga *et al*., 2007).

Dalton *et al*. (1999) realizaram experimentos para descrever quantitativamente as características hidráulicas do vetiver. Foram instaladas coberturas de vetiver em calhas perpendiculares ao fluxo em um canal de água. Os ensaios foram realizados em março, julho, setembro e dezembro de 1993 e julho de 1994. Cada experimento consistiu de medições das profundidades a montante e a jusante de cada cobertura, com o intutito de verificar a velocidade da água e a erosão do solo na planície de inundação. Como resultado, as coberturas de vetiver conseguiram controlar o fluxo de inundação, a vazão, bem como a movimentação do solo da planície.

A vegetação em terrenos inclinados aumenta a infiltração da água, porém este aumento é compensado pela retirada de água do solo pelo vetiver. A Universidade Southern Queensland – Austrália realizou uma pesquisa sobre umidade do solo em colheitas na Austrália e mostrou que, sob condições de baixa precipitação, a retirada de água do solo pelo vetiver reduz a umidade do solo a até 1,5 metros de profundidade (Dalton *et al*., 1999).

A Tabela 2.14 faz uma comparação entre o vetiver e outros tratamentos com vegetação em taludes, observando a taxa de perda de solo e escoamento superficial.

Tabela 2.14 – Perda de Solo e escoamento superficial em tratamentos com vegetação em talude

Vegetação	**Perda de solo (t/ha)**		**Escoamento superficial (%)**
	Inclinação (15%)	**Inclinação (30%)**	
Testemunha	16,81	35,52	88,00
Lírio	11,98	16,06	76,00
Zacate Limón	7,58	7,62	81,00
Helecho	4,22	5,55	76,00
Vetiver	1,13	4,90	72,00

Fonte: Hengchaovamich (1998)

Observa-se pela Tabela 2.14 que a perda de solo e o escoamento superficial com o plantio do vetiver são menores em comparação com outras espécies vegetais utilizadas na estabilização de taludes.

Souza *et al*. (2011) desenvolveram estudos em uma encosta experimental com declividade média de 30^0, sendo realizados três tratamentos na encosta: solo exposto, vetiver plantado no espaçamento de 0,15 a 1,0 m e vetiver plantado no espaçamento de 0,45 a 2,0 m. Dez meses após o plantio mensurou-se a perda de solo por erosão em relação a quatro chuvas de diferentes intensidades, sendo 9 mm, 7 mm, 12 mm e 5 mm. Os resultados estão apresentados na Figura 2.21.

Observa-se pela Figura 2.20 que a cobertura do solo com vetiver, em ambos os espaçamentos de plantio, mostrou-se eficiente, proporcionando perdas de solo por erosão de pelo menos 34,4% inferior ao solo exposto (Souza *et al*., 2011).

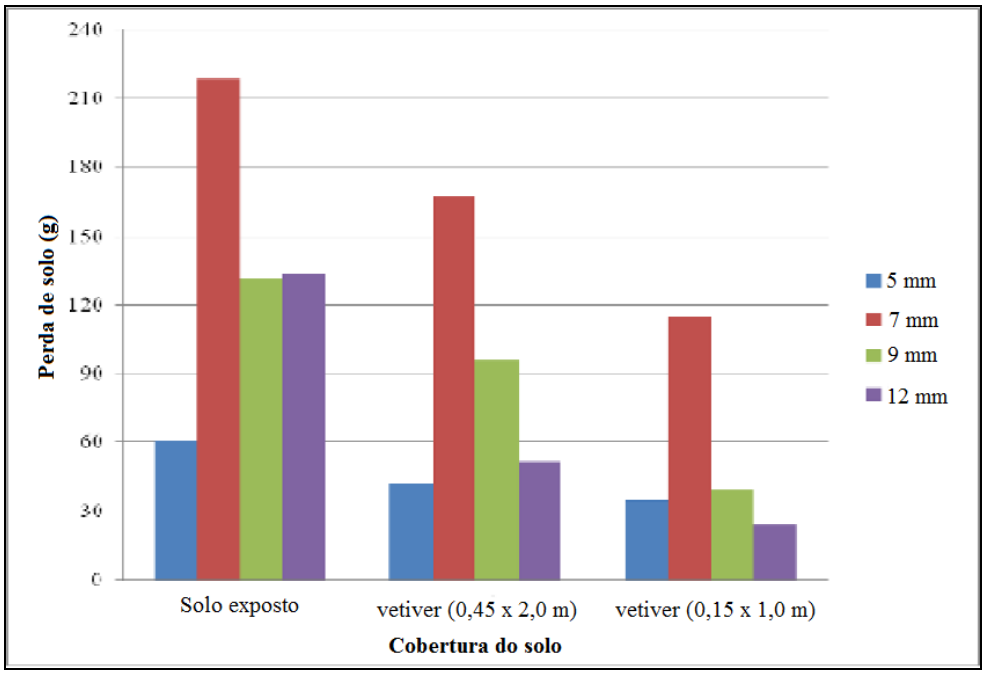

Figura 2.20 – Perda de solo por erosão (g) em função da cobertura do solo e precipitação pluviométrica (mm)

Fonte: Souza *et al*. (2011)

2.3.5.3 Exemplos de aplicação do vetiver na estabilização de taludes

A seguir são apresentadas ilustrações que mostram resultados qualitativos de sucesso do uso do vetiver na proteção de obras rodoviárias contra processos erosivos e de assoreamentos. Essa proteção começa nos taludes de cortes e aterros, passando pelas estruturas de drenagem e na proteção das áreas no entorno de rodovias.

A Figura 2.21 mostra uma comparação de taludes de estrada, na Austrália, antes e após a aplicação do vetiver com 1 ano de plantio.

Figura 2.21 – Taludes de uma rodovia da Austrália antes do vetiver e após um ano de plantio do vetiver

Fonte: Madruga *et al*. (2007)

A Figura 2.22 mostra um típico talude de corte no qual o capim vetiver foi recomendado para a estabilização quanto aos processos erosivos, apresentando o resultado do emprego do vetiver após 10 meses de aplicação.

Figura 2.22 – Talude de corte às margens de uma rodovia no Vietnã mostrando o problema de erosão antes da aplicação do vetiver e o talude estável depois de 10 meses do plantio do vetiver

Fonte: Truong *et al*. (2008)

A exposição dos taludes de corte aos processos erosivos levam a uma série de transtornos que se iniciam com o assoreamento das canaletas de drenagem, gerando perda de sua eficiência e ocasionando, devido às chuvas, o transbordamento com

lançamento de águas para a plataforma da estrada trazendo riscos de acidentes com os veículos que por ela circulam. Com a sequência de chuvas os sedimentos vão sendo transportados em suspensão pelas canaletas de drenagem e, ao serem lançados no terreno natural, acabam alcançando os leitos dos mananciais (nascentes, córregos e rios), causando assoreamentos e danos ambientais, muitas vezes irreparáveis.

A Figura 2.23 mostra um exemplo de como o problema de taludes de corte expostos a processos erosivos que provocavam o assoreamento da canaleta de drenagem de uma rodovia foi resolvido no Senegal com a aplicação do vetiver.

Figura 2.23 – A Figura A apresenta o canal de drenagem completamente assoreado. A Figura B mostra o mesmo canal de drenagem após 1 mês de plantio do vetiver e a Figura C 4 meses após o plantio do vetiver, podendo-se observar os taludes estáveis e o canal de drenagem protegido do assoreamento

Fonte: Madruga *et al*. (2007)

O vetiver além de ser utilizado em obras rodoviárias também pode ser utilizado na mineração para estabilização de taludes das estruturas da mina. Em uma pedreira na China o vetiver foi usado para estabilização e vegetação de taludes (Figura 2.24).

Figura 2.24 – Uso do vetiver para estabilização e revegetação de taludes de uma pedreira na China
Fonte: Truong (2005)

2.3.6 Vantagens e Desvantagens do Sistema Vetiver

A grande vantagem do SV sobre medidas de engenharia convencional é o seu baixo custo e longevidade. Para a estabilização de encostas na China, por exemplo, as economias são da ordem de 85 a 90% (Xia *et al*., 1999). Na Austrália, a vantagem de custo de SV sobre os métodos de engenharia convencional varia de 64% a 72%, dependendo do método utilizado (Braken e Truong, 2001). O custo máximo do vetiver é cerca de 30% do custo das soluções de engenharia tradicionais. Além disso, os custos anuais de manutenção são reduzidos significativamente, quando as coberturas vetiver ficam estabelecidas.

Outra vantagem do vetiver está relacionada ao respeito ao meio ambiente, pois suaviza as severas medidas da engenharia convencional, tais como estruturas de concreto e de pedra. Isto é particularmente importante em áreas urbanas e áreas semi-rurais.

O vetiver destaca-se ainda pela eficácia em solos pobres, altamente erodíveis e pelo baixo custo de mão de obra.

Como desvantagem apresenta a intolerância ao sombreamento, em particular na fase de seu estabelecimento. O sombreamento parcial retarda seu crescimento e o sombreamento significativo pode eliminá-la a longo prazo, reduzindo a sua capacidade de competir com espécies tolerantes à sombra (Truong *et al*., 2008).

O Sistema Vetiver também só é eficiente quando as plantas ficarem bem estabelecidas. O planejamento eficaz requer um período de estabelecimento inicial de cerca de 2 a 3 meses em clima quente e 4 a 6 meses em épocas frias (Truong *et al*., 2008).

Truong *et al*. (2008) afirmam que o vetiver só é eficaz quando formam coberturas de crescimento bem juntas. As brechas entre as moitas devem ser replantadas oportunamente.

Outra desvantagem é em relação à inclinação do terreno a ser plantado o vetiver, pois é difícil realizar plantio em terrenos de relevo acentuado, bem como irrigar a vegetação e o vetiver precisa de água no início de seu estabelecimento. Durante a fase de estabelecimento o vetiver também necessita ser protegido contra gado (Truong *et al*., 2008).

De acordo com Truong *et al*. (2008) para garantir o sucesso, o projeto deve ser criado por pessoas treinadas e o plantio do vetiver deve ser monitorado até seu estabelecimento, pois a capacidade total de reforço e suporte do vetiver só é eficaz depois da planta madura.

Segundo Orozco (2009) como qualquer outra planta, o vetiver precisa no início de todos os cuidados necessários para um adequado e rápido crescimento. Devem ser consideradas medidas como a abundante irrigação, o enriquecimento do substrato por meio de adubo e a adequação dos terrenos onde irá ser plantado.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia experimental utilizada na pesquisa que foi elaborada a partir da necessidade de comprovação do aumento de resistência ao cisalhamento oferecido pelo vetiver para verificar a eficiência desta planta na estabilização de taludes. Desta forma, foram realizados ensaios de laboratório de caracterizações física e química de solos e ensaios de cisalhamento direto para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo.

3.1 METODOLOGIA DE CAMPO

As amostras de solo foram coletadas em uma das unidades da DEFLOR Bioengenharia, Fazenda Guarará, localizada na área rural do Município de Santana dos Montes, Estado de Minas Gerais.

A DEFLOR Bioengenharia foi fundada em 1984 para atuar na área de proteção florestal, no controle de pragas. Posteriormente, chegou às áreas de limpeza de barragens hidráulicas e recuperação de áreas degradadas. Na unidade de Santana dos Montes são produzidas anualmente 1.000.000 de mudas de vetiver sendo utilizadas em quase todos os trabalhos da empresa relacionados à contenção, proteção e revestimento de taludes.

Santana dos Montes está localizada na região central de Minas Gerais a uma distância de 126 km da capital do Estado, Belo Horizonte. Possui uma temperatura média anual de 19,4 ^{0}C e um índice pluviométrico médio anual de 1474, 9 mm. O clima quente favorece o estabelecimento das mudas do vetiver.

Para caracterizar o solo e verificar a resistência do solo foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de sete locais da Fazenda Guarará:

1- Solo sem vegetação;
2- Solo com um ano de plantio de vetiver;
3- Solo com dois anos de plantio de vetiver;
4- Solo com três anos de plantio de vetiver;
5- Solo com quatro anos de plantio de vetiver;
6- Talude de solo sem vegetação;
7- Talude de solo com aproximadamente sete anos de plantio de vetiver.

As amostras do solo sem vegetação, com 1, 2, 3 e 4 anos de plantio de vetiver foram coletadas no mês de novembro de 2009. Já as amostras do talude sem vegetação e do talude com aproximadamente 7 anos de plantio de vetiver foram coletadas no mês de julho de 2010.

A Figura 3.1 apresenta o talude com cobertura vegetal de vetiver com aproximadamente 7 anos de plantio.

Figura 3.1 – Talude com cobertura do vetiver, no qual foram retiradas as amostras indeformadas de solo

Para cada grupo de solo foram colhidas 1 amostra deformada e 3 amostras indeformadas, totalizando 7 amostras deformadas de solo e 21 amostras indeformadas de solo.

As amostras deformadas de solo foram coletadas de acordo com a NBR 9.604/86 a uma profundidade de aproximadamente 30 cm, sendo estas acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e levadas para o laboratório para posteriores ensaios de caracterização do solo.

As amostras indeformadas também foram coletadas de acordo com a NBR 9.604/86 em formato de blocos com dimensões de 30 x 30 x 30 cm. A coleta das amostras de solo sem cobertura vegetal e solos vegetados com vetiver com um, dois, três e quatro anos de plantio se deu a uma profundidade de 0 – 60 cm. Já as amostras do talude sem cobertura vegetal e com cultivo de vetiver foram coletadas a uma profundidade de 30 – 90 cm, pois nas camadas superficiais do talude que continha o vetiver com aproximadamente 7 anos foi verificado um grande número de raízes, o que inviabilizaria a realização do ensaio de cisalhamento direto devido a dificuldade de moldagem do corpo de prova.

Os blocos de solos indeformados coletados foram devidamente parafinados para evitar a perda da umidade natural e levados para o Laboratório de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). No laboratório, os blocos foram colocados em uma câmara úmida especial para manter as propriedades do solo até a realização do ensaio de cisalhamento direto.

A Figura 3.2 mostra a sequência do procedimento da coleta de amostra indeformada.

Figura 3.2 – Sequência de coleta de amostra indeformada. Em A mostra o procedimento de retirada da amostra, B a colocação da amostra na caixa de madeira e em C o uso da parafina para manter a umidade da amostra

Em campo foram determinados a massa específica e o teor de umidade do solo em cada local de estudo (solo sem vegetação, solos com 1, 2, 3 e 4 anos de plantio de vetiver, talude sem vegetação, talude cultivado com vetiver) através da coleta de amostra em um cilindro de volume conhecido, pesado posteriormente e levado à estufa a uma temperatura de 105^0C por um período de 24 horas.

3.2 METODOLOGIA DE LABORATÓRIO

3.2.1 Ensaios de Caracterização Física

Executaram-se em triplicatas os seguintes ensaios de caracterização do solo para cada grupo de amostra coletada:

- Granulometria Conjunta (NBR 7.181/84);
- Massa Específica dos Sólidos (NBR 6.508/84);
- Limite de Liquidez (NBR 6.459/84);
- Limite de Plasticidade (NBR 7.180/84);
- Massa Específica (EMBRAPA, 1999);
- Teor de umidade (EMBRAPA, 1999);
- Índice de vazios (MB-3336/1990).

Todos os ensaios de caracterização física foram realizados no Laboratório de Geotecnia da UFOP.

3.2.2 Ensaios de Caracterização Química

Para verificação do teor de matéria orgânica do solo foram realizados ensaios de análises termogravimétricas (TG). A termogravimetria consiste em uma técnica na qual a mudança da massa de uma substância é medida em função da temperatura enquanto esta é submetida a uma programação controlada.

O equipamento utilizado para o ensaio de termogravimetria é constituído basicamente por uma microbalança, um forno, um programador de temperatura e um sistema de aquisição de dados (computador). A Figura 3.3 apresenta o equipamento de análise termogravimétrica.

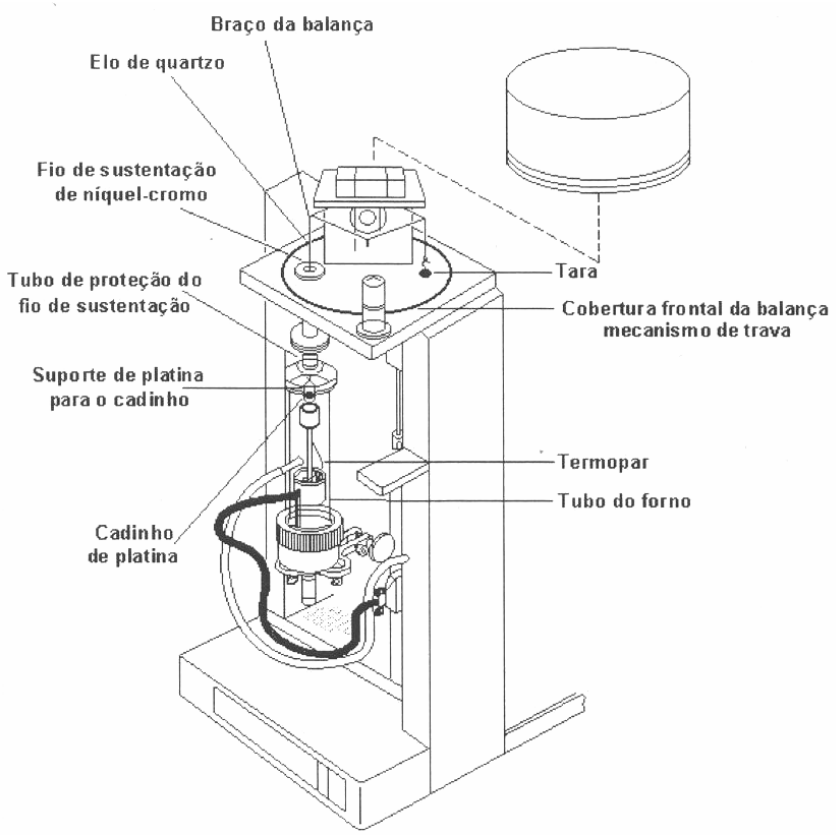

Figura 3.3 – Equipamento detalhado utilizado para o ensaio de termogravimetria

Fonte: Bueno, 2007.

Para a realização do ensaio, inicialmente devem-se estabelecer, no programa computacional interligado ao equipamento, as temperaturas inicial e final da análise e a velocidade de variação de temperatura. Caso a análise seja para uma situação isotérmica, deve-se fornecer a temperatura e o tempo do ensaio. Coloca-se o cadinho vazio no equipamento, para zerar a massa desse recipiente. Retira-se o cadinho do equipamento, e coloca-se a amostra. Devolve-se o conjunto (amostra e cadinho) para o equipamento, podendo ser dado o comando para a leitura de variação de massa da amostra com a variação de temperatura. Ao se realizar o ciclo completo de temperatura pré-estabelecido, retira-se o cadinho com o que restou da amostra e efetua-se a limpeza desse recipiente. Todas as informações permanecem gravadas no computador e é gerada uma curva de variação de massa em porcentagem (%) *versus* variação de temperatura ou tempo.

O ensaio termogravimétrico foi realizado no Laboratório de Química da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), sendo executado com razão de aquecimento de 10^0C min^{-1} seguindo a norma ASTM E1131, em atmosfera de ar. O instrumento utilizado foi uma termobalança modelo 2960 SDT V3. 0F.

As curvas termogravimétricas foram registradas no intervalo de temperatura entre 20^0C e 600^0C. Há muitos trabalhos na literatura que mencionam a determinação de matéria orgânica em várias matrizes através de decomposição térmica em temperatura até 600^0C (Soares, 2004; Marengo, 2006; Lira, 2008).

As análises termogravimétricas foram feitos em cada um dos seguintes grupos de amostras (solo sem vegetação, 1 ano de plantio de vetiver, 2 anos de plantio de vetiver, 3 anos de plantio de vetiver, talude sem vegetação e talude com cultivo de vetiver). A amostragem colocada em cada corpo de prova foi realizada de maneira aleatória sendo observado um maior número de raízes do vetiver com o tempo de plantio, o que foi evidenciado em campo.

Os ensaios termogravimétricos podem não simular com total fidelidade a situação real de campo, pois a escala de trabalho utilizada pode não ser a mais adequada, devido aos

pequenos tamanhos dos corpos de prova, normalmente amostras com peso de aproximadamente 8 mg. Porém consiste em um dos melhores ensaios para determinação de matéria orgânica.

Demais dados de caracterização química (pH, H, Al, Ca, Mg, P, K, C, N, Cu, Zn, Fe, B e Na) do solo da Fazenda Guarará foram obtidos através da pesquisa de Orozco (2009) no qual a autora também efetuou estudos com o solo na mesma região do presente estudo.

3.2.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto apresenta algumas deficiências inerentes. A confiabilidade dos resultados pode ser questionada porque não se permite que o solo rompa ao longo do plano mais fraco, pois ele é forçado a romper ao longo do plano de separação da caixa de cisalhamento.

Outra deficiência importante do ensaio de cisalhamento direto é a impossibilidade de controle da drenagem no corpo-de-prova, pois a caixa não tem um sistema de vedação adequado. Mesmo que fossem usadas placas impermeáveis no topo e na base da amostra, seria impossível impedir a saída da água, pois logo que se inicia o ensaio o deslocamento de uma parte da caixa sobre a outra provoca uma abertura entre elas, permitindo a drenagem. Com isso, as tensões efetivas seriam alteradas, tornando difícil a análise dos resultados. Por estas razões, a única solução é conduzir o ensaio em condições totalmente drenadas, mantendo nulas as poropressões. A condição drenada implica a total dissipação de poropressões durante o cisalhamento.

Apesar dessas deficiências, o ensaio de cisalhamento direto é o mais simples, econômico e um dos mais utilizados para determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados de acordo com a norma ASTM D3080-04 (Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions) no Laboratório de Geotecnia da UFOP. O equipamento de cisalhamento direto utilizado foi uma prensa digital da marca Contenco, conforme mostra a Figura 3.4.

Figura 3.4 – Equipamento utilizado no ensaio de cisalhamento direto

No ensaio de cisalhamento direto realizado, os corpos de prova, previamente preparados foram confinados em uma caixa metálica bipartida (caixa de cisalhamento) de seção transversal quadrada de dimensões de 10 x 10 x 2 cm, mantendo-se um certo espaçamento entre as metades superior e inferior da caixa. Pedras porosas associadas a placas metálicas ranhuradas (para evitar o deslizamento do solo em relação às pedras porosas), foram colocadas no topo e na base do corpo de prova para permitir a livre drenagem da água intersticial durante os ensaios. Foram adotados ensaios de cisalhamento direto sob deslocamentos controlados.

A metodologia dos ensaios de cisalhamento direto condiciona o processo de ruptura a uma interface pré-definida, a distribuição de tensões no plano de ruptura não é uniforme e ocorrem rotações das tensões principais na medida em que se incrementam as tensões cisalhantes aplicadas. Outro aspecto relevante refere-se às dimensões do corpo de prova (10 x 10 x 2 cm) que, na maioria dos casos, influenciam muito a magnitude de mecanismos de interação mecânica das interfaces, os efeitos de escala. Desta forma, a representatividade destas amostras não simula com total fidelidade a situação real de campo.

Nos ensaios de deslocamento controlado, uma taxa constante de deslocamento cisalhante é aplicada a uma metade da caixa por um motor que atua por meio de engrenagens. A taxa constante de deslocamento cisalhante é medida por um extensômetro horizontal. A força resistente de cisalhamento do solo, que corresponde a qualquer deslocamento cisalhante, é medida por um anel dinamométrico horizontal.

As cargas normais, mantidas constantes durante o ensaio, são aplicadas a amostra por meio de uma sapata rígida superior e esforços horizontais são impostos a metade superior da caixa de cisalhamento, forçando seu deslocamento em relação à metade inferior, mobilizando-se, desta forma, tensões cisalhantes gradualmente crescentes ao longo do plano horizontal que constitui a interface entre as metades da caixa de cisalhamento. As grandezas medidas no ensaio são as forças horizontais (cujos valores, divididos pela respectiva área de interface, correspondem às tensões cisalhantes mobilizadas), os deslocamentos horizontais, os deslocamentos verticais e as cargas normais aplicadas.

Os valores de tensão normal adotados foram de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. Para a análise em questão, no caso de zonas potenciais de ruptura rasas, quanto menor a tensão normal adotada mais confiável é o ensaio, pois representa melhor a situação de campo, pois simulam o nível de tensão da obra.

Os ensaios foram realizados de forma drenada. Desta forma, tornou-se necessária a determinação prévia da velocidade a ser adotada nos ensaios, de modo a garantir a livre

dissipação das poropressões geradas. Para a estimativa da velocidade de cisalhamento, foram realizados ensaios testes com cada um dos grupos de amostras.

A velocidade do ensaio de cisalhamento direto foi obtida a partir dos valores de adensamento da amostra de acordo com Head (1994) por meio da Equação 3.1.

$$v = \varepsilon_f \cdot H_0 \cdot \frac{1}{100.t_f} \tag{3.1}$$

Onde:

v = velocidade do ensaio de cisalhamento

ε_f = deformação especificada na resistência de pico

H_0 = altura inicial do corpo de prova

t_f = tempo para atingir a resistência de pico

A deformação especificada para atingir a resistência de pico é função do tipo de solo, índice de vazios, estado de compacidade do material ensaiado, peso específico, dentre outros fatores.

Para os ensaios de cisalhamento direto convencional em condições drenadas e sob dupla fronteira drenante, o tempo necessário para se atingir a condição de ruptura (t_f), é estabelecido pela Equação 3.2.

$$t_f = 14.t_{100} \tag{3.2}$$

Onde t_{100} é o valor do tempo correspondente a 100% dos recalques induzidos pelos acréscimos de carga.

Os resultados do ensaio teste para uma tensão de 50 kPa, na amostra de dois anos de plantio de vetiver, em termos da variação de altura do corpo de prova ao longo da raiz quadrada dos tempos estão indicados na Figura 3.5, que corresponde ao gráfico da condição do máximo valor de t_{100}. Neste caso o valor de t_{100} apresentou um valor igual a 27,04 minutos.

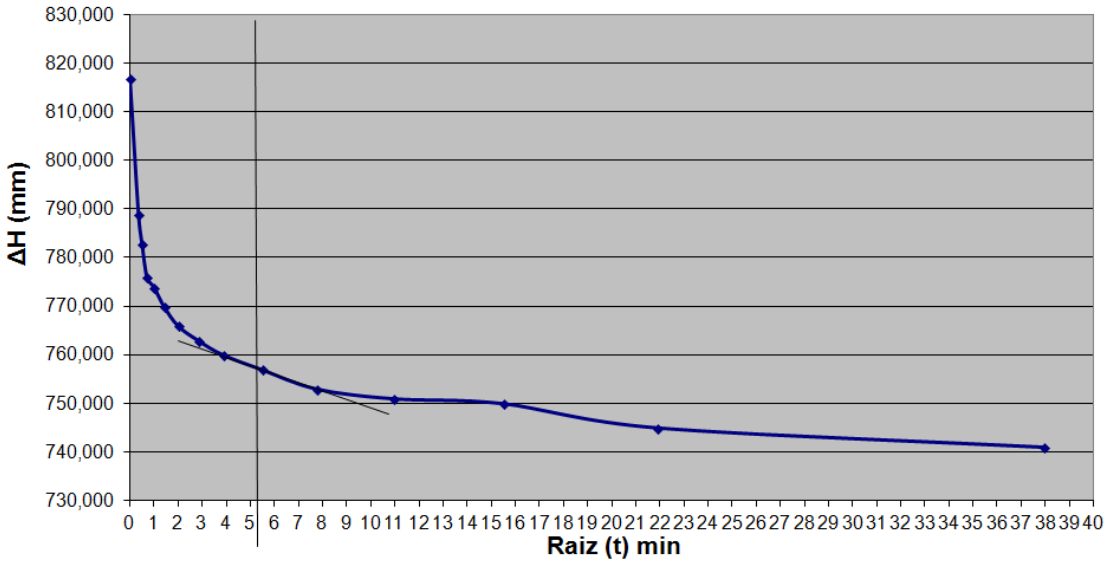

Figura 3.5 – Determinação do parâmetro t_{100} para a tensão normal de 50 kPa

Nos ensaios de cisalhamento direto os valores de velocidade de ensaio de acordo com o descrito anteriormente seguindo os estudos de Head (1994) variaram entre 0,04 e 0,06 mm/min.

Em resumo, o ensaio de cisalhamento direto foi realizado de acordo com as seguintes etapas:

1- Retirada da Camada de parafina do corpo de prova;
2- Retirada de corpo de prova em dimensões de 10 x 10 x 2 cm da amostra indeformada;
3- Montagem da caixa de cisalhamento;
4- Colocação do corpo de prova na caixa de cisalhamento;
5- Colocação das placas ranhuradas, papel filtro e pedras porosas;
6- Colocação da caixa de cisalhamento no equipamento de cisalhamento direto;
7- Colocação da tampa em cima da caixa de cisalhamento;
8- Imersão da amostra em água destilada por 24 horas;

9- Início da fase de adensamento para determinação do valor da velocidade de ensaio de cisalhamento direto;

10- Execução do ensaio de cisalhamento direto no equipamento.

A Figura 3.6 ilustra as etapas mostradas anteriormente para a execução do ensaio de cisalhamento direto.

Figura 3.6 – Sequência de operações para realização do ensaio de cisalhamento direto

A moldagem do corpo de prova nas amostras com quatro anos de plantio de vetiver foram perdidas devido a grande quantidade de raízes (Figura 3.7) sendo impossível a moldagem do corpo de prova. Desta forma as amostras com quatro anos de plantio foram descartadas. Logo a comparação do aumento de resistência ao cisalhamento de solos foi realizada de acordo com os resultados das amostras de um ano, dois anos e três anos de plantio de vetiver.

Figura 3.7 – Quantidade de raízes das amostras indeformadas de vetiver

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos (intercepto de coesão e ângulo de atrito interno) foram obtidos pelo critério de Mohr – Coulomb considerando uma envoltória de ruptura linear.

Também foram obtidas as resistências ao cisalhamento de solos de acordo com cada nível de tensão normal aplicada (25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200kPa) de todos os grupos de amostras.

3.3 ANÁLISES DE ESTABILIDADE DO TALUDE

A análise determinística de estabilidade de taludes realizada neste estudo foi baseada no método do talude infinito, pois é o método de análise que se mostrou mais apropriado para avaliar solos com presença de vegetação, nos quais as raízes atuam em planos superficiais de ruptura.

Análises determinísticas são caracterizadas por utilizarem valores médios das variáveis envolvidas no problema, como coesão, ângulo de atrito e peso específico do solo. Não consideram, portanto, a variação desses parâmetros e fornecem como resultado um valor de coeficiente de segurança.

Os parâmetros (intercepto de coesão e ângulo de atrito interno) utilizados nas análises de estabilidade do talude cultivado com vetiver e do mesmo talude sem vegetação foram obtidos nos ensaios de cisalhamento direto. O peso específico do solo foi obtido pelos ensaios de caracterização do solo.

Para a determinação dos coeficientes de segurança foram realizadas simulações considerando dois taludes hipotéticos homogêneos (mesmo tipo de solo), um com inclinação de 30^0 e outro com inclinação de 45^0. Sendo que para cada um dos taludes os procedimentos de análise foram realizados de acordo com o mostrado na Figura 3.8.

Foram consideradas duas zonas potenciais de ruptura, uma com altura de 1,5 m e nível d'água de 0,75 m e outra com uma altura 0,9 m e nível d'água de 0,4 m. As alturas das zonas potenciais de ruptura foram escolhidas de forma aleatória, visto que as raízes das plantas atuam no aumento da resistência em planos rasos de ruptura até uma profundidade de 1,5 metros. Também, observações de campo durante as coletas das amostras não evidenciaram raízes tão profundas conforme descreve a literatura, chegando a uma profundidade de aproximadamente 1 m. As raízes do vetiver também diminuem de diâmetro conforme a profundidade. Acredita-se que a profundidade das raízes do vetiver devem estar relacionadas ao tipo de solo e as condições climáticas, visto que o vetiver, se desenvolve melhor em climas quentes e úmidos.

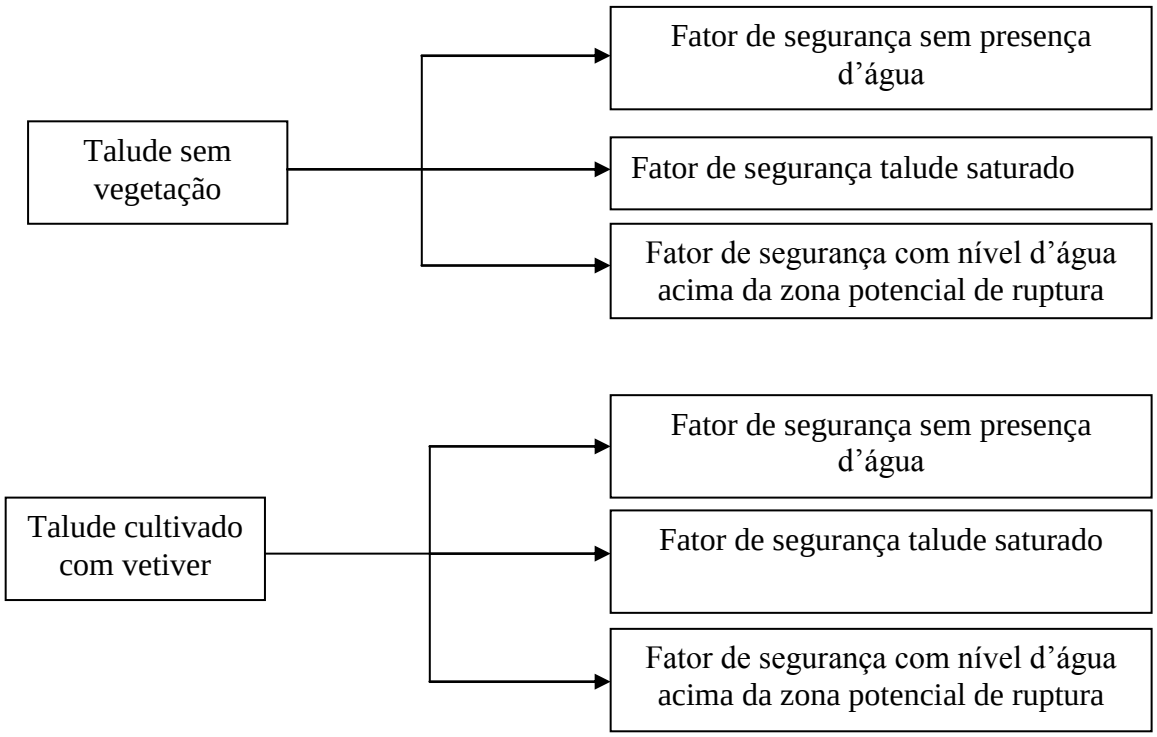

Figura 3.8 – Análises dos fatores de segurança nos taludes

Na análise do talude com cobertura de vetiver foi desconsiderada a ação do vento e o peso da planta, pois para efeito de cálculo os parâmetros peso da planta e a ação dos ventos só são considerados em árvores.

Também de acordo com as equações de resistência ao cisalhamento de solos pelo método do talude infinito, obtiveram-se as resistências do solo dos dois taludes hipotéticos.

Os valores de resistência obtidos pelo talude infinito foram comparados com a resistência ao cisalhamento de solos obtidos pelo critério de Mohr – Coulomb através do ensaio de cisalhamento direto de acordo com cada nível de tensão normal aplicada. O objetivo da comparação foi verificar se foram utilizadas tensões adequadas para a situação real de campo.

CAPÍTULO 4

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

A Tabela 4.1 mostra os resultados dos ensaios de limites de consistência, massa específica dos sólidos, peso específico natural, peso específico seco e teor de umidade dos solos das áreas de estudo.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização física

SOLO	LL (%)	LP (%)	IP (%)	γ_s (kN/m^3)	γ (kN/m^3)	γ_d (kN/m^3)	w (%)
Sem vetiver	49	39	10	25,94	19,98	15,13	32
1 ano de plantio	47	32	15	26,13	20,42	16,08	27
2 anos de plantio	48	33	15	26,40	20,59	16,47	25
3 anos de plantio	48	31	17	26,85	20,68	17,38	19
Talude sem vegetação	51	40	11	25,82	20,23	15,74	28,5
Talude com 7 anos de plantio de vetiver	47	32	15	27,21	20,81	16,92	23

Legenda:

LL = Limite de Liquidez

LP = Limite de Plasticidade

IP = Índice de Plasticidade

γ_s = Massa específica dos sólidos

γ = Peso específico natural

γ_d = Peso específico seco

w = Teor de umidade

Os valores de peso específico aparente natural encontrados foram em torno de 20,5 kN/m^3, considerado valores comuns para solos predominantemente arenosos. Os valores de peso específico seco também estão de acordo com o tipo de solo em questão, que segundo Das (2007) varia de 16 a 19 kN/m^3.

De acordo com Carvalho *et al*. (2006) quanto maior o índice de plasticidade menor a erodibilidade e, consequentemente, o solo é mais estável. Apesar da pequena diferença entre os valores de índice de plasticidade dos grupos analisados, as amostras cultivadas com vetiver apresentaram um índice de plasticidade maior.

A Figura 4.1 e a Tabela 4.2 apresentam o resultado do ensaio de granulometria segundo a classificação ABNT, norma 6.502/95 e o Sistema Unificado. É mostrado apenas um gráfico na Figura 4.1, pois o solo do local de coleta de amostras e do talude apresentaram as mesmas características correspondendo ao mesmo tipo de solo.

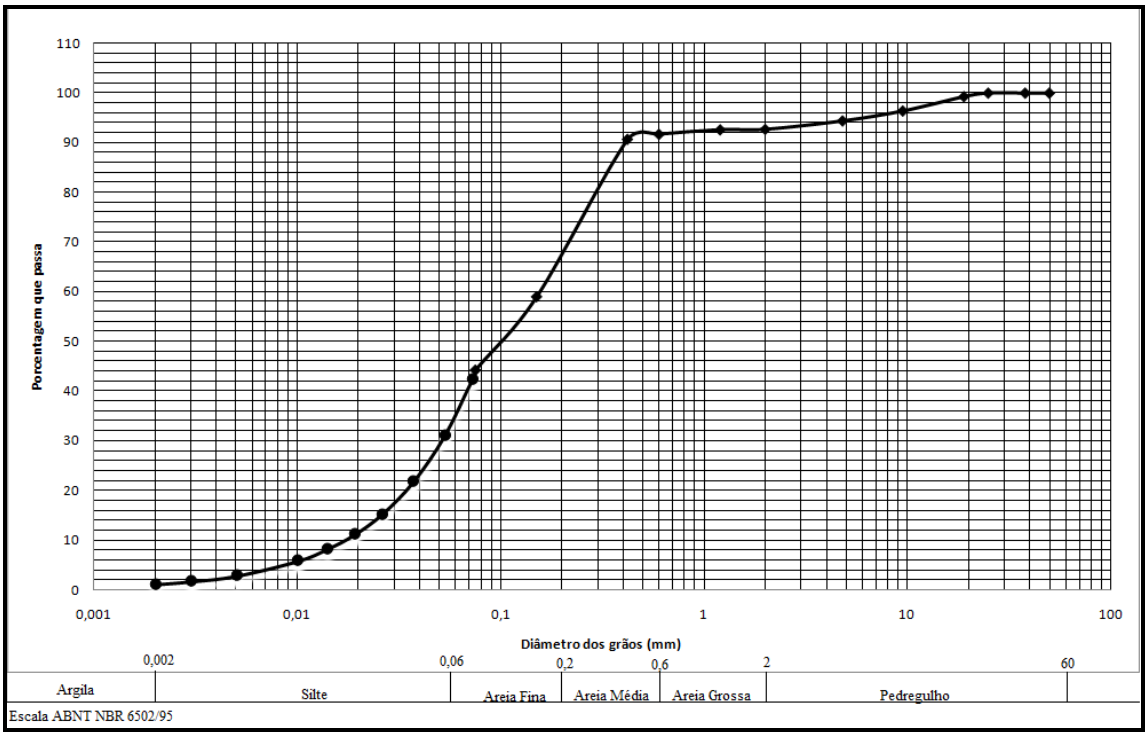

Figura 4.1 – Resultado da Granulometria Conjunta

Tabela 4.2 – Análise granulométrica do solo

Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Sistema Unificado
8	58	32	2	Areia siltosa

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Para a verificação do teor de matéria orgânica nos solos analisados foram realizados ensaios de termogravimetria, no qual como resultados são fornecidos gráficos que apresentam três curvas:

1- Análise Termogravimétrica (TGA): Onde se observa a perda de massa do solo analisado com a temperatura;
2- Análise Térmica Diferencial (DTA): Onde são observadas as transições térmicas sofridas pelo solo;
3- Curva derivada da perda de massa (DTG).

A Figura 4.2 mostra o gráfico referente à análise termogravimétrica para a amostra de solo sem vegetação. O peso do corpo de prova analisado foi de 6,2650 mg e o teor de matéria orgânica foi de 13,35%.

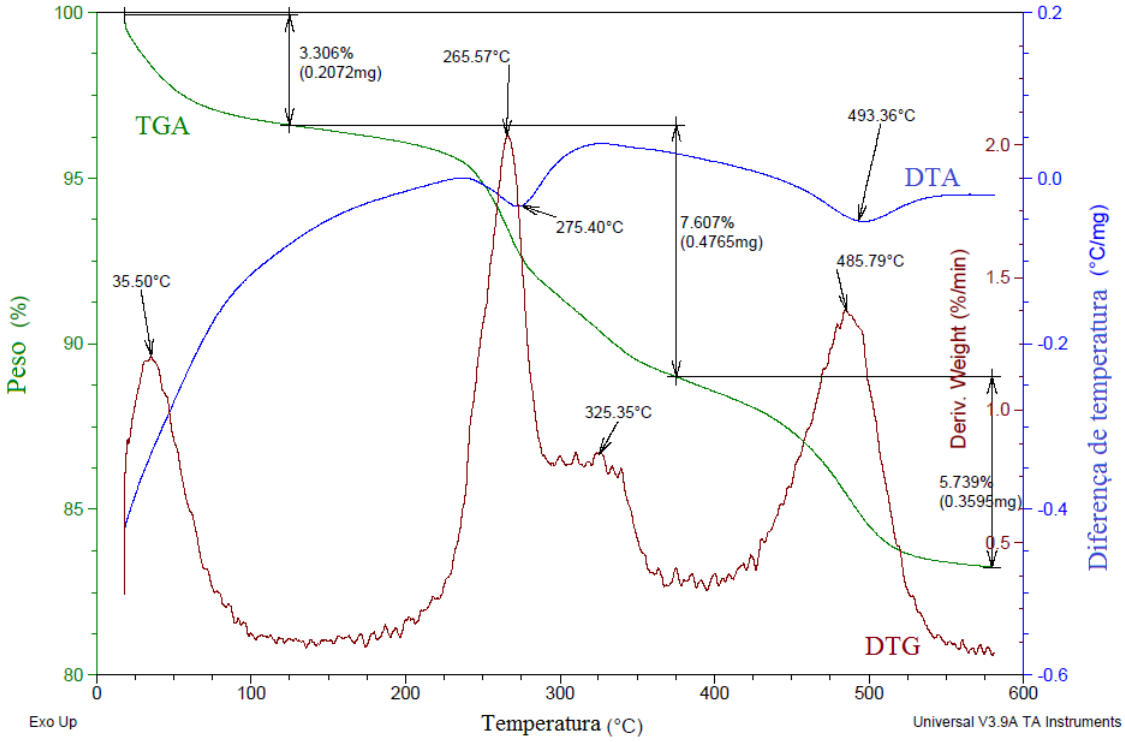

Figura 4.2 – Análise termogravimétrica solo sem vegetação

Na Figura 4.3 é apresentado o gráfico do solo com um ano de plantio de vetiver. O peso do corpo de prova analisado foi de 6,3893 mg, correspondendo a um teor de matéria orgânica de 14,54%.

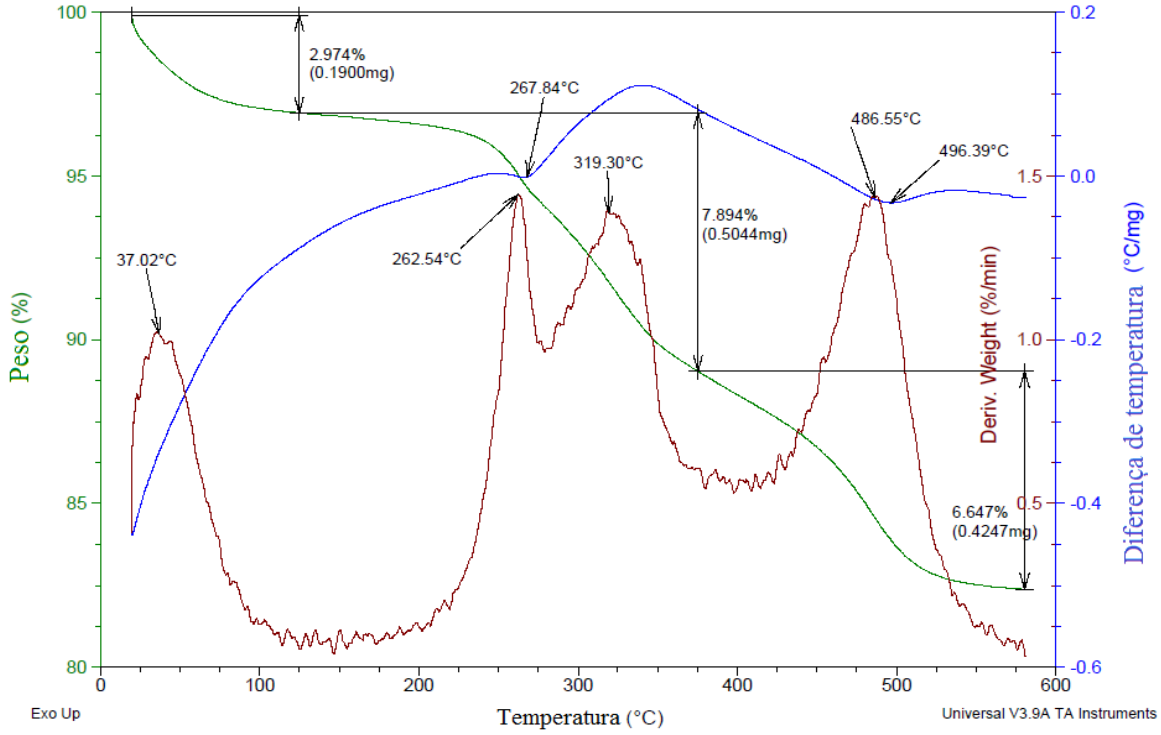

Figura 4.3 – Análise termogravimétrica solo com um 1 de plantio de vetiver

A Figura 4.4 apresenta o resultado da análise termogravimétrica para o solo com dois anos de plantio de vetiver. O peso da amostra foi de 7,4057 mg, obtendo um teor de matéria orgânica de 17,95%.

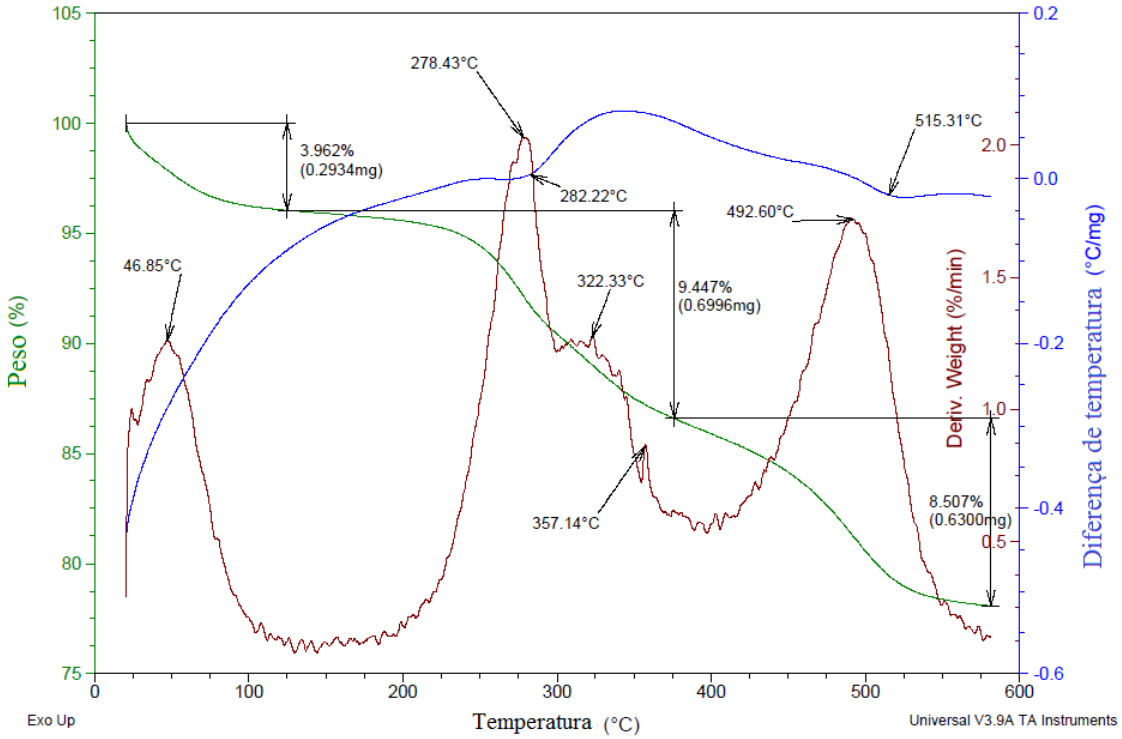

Figura 4.4 – Análise termogravimétrica solo com 2 anos de plantio de vetiver

Na Figura 4.5 são apresentados os resultados das análises termogravimétricas para o solo com três anos de plantio de vetiver que correspondeu a uma amostra de 8,5562 mg com um teor de matéria orgânica de 28,51%. Já a Figura 4.6 mostra o gráfico referente à análise termogravimétrica para a amostra do talude sem vegetação. O peso do corpo de prova do talude sem vegetação foi de 7,2773 mg e obteve-se um teor de matéria orgânica de 11,58%.

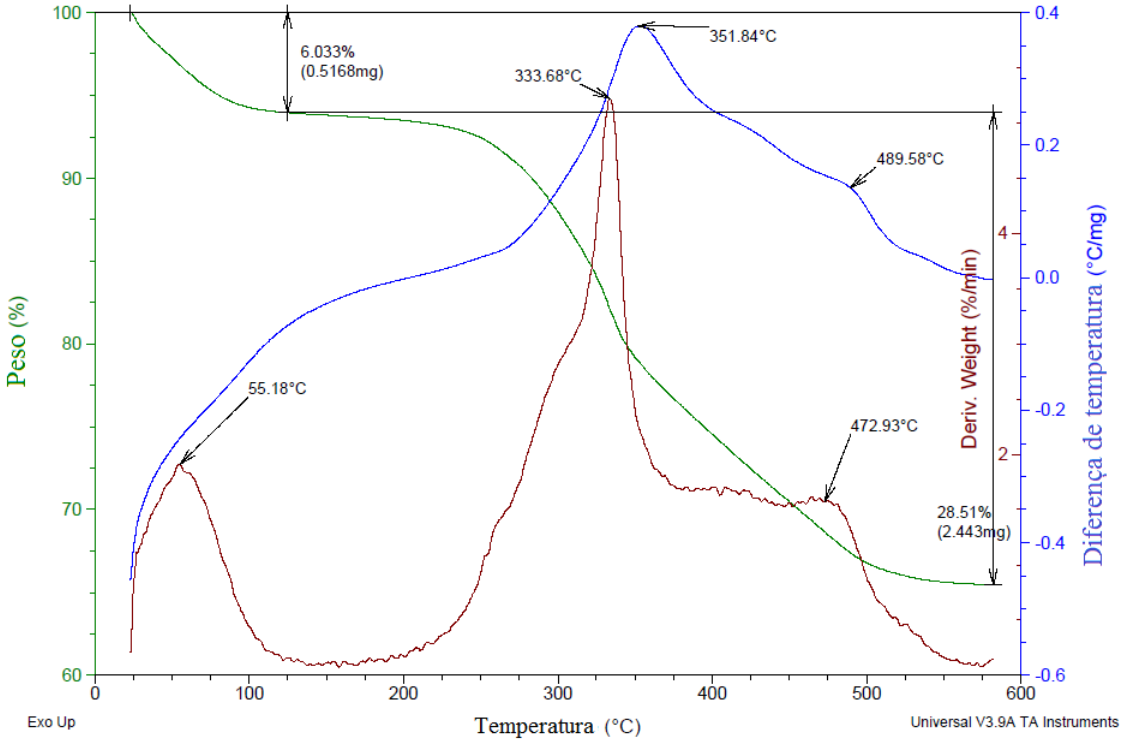

Figura 4.5 – Análise termogravimétrica solo com 3 anos de plantio de vetiver

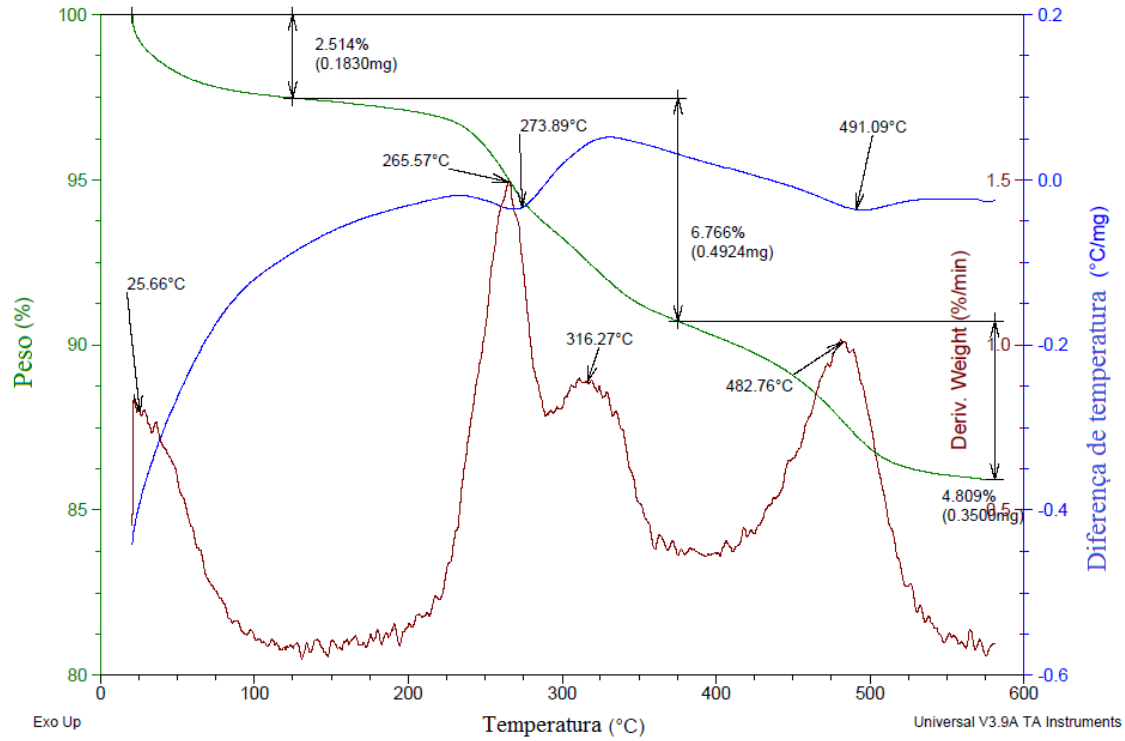

Figura 4.6 – Análise termogravimétrica do talude sem vegetação

Na Figura 4.7 é mostrado o resultado da análise termogravimétrica para o talude com plantio de vetiver na idade de aproximadamente sete anos. O peso da amostra analisada foi de 7,3962 mg e o teor de matéria orgânica obtido de 33,37%.

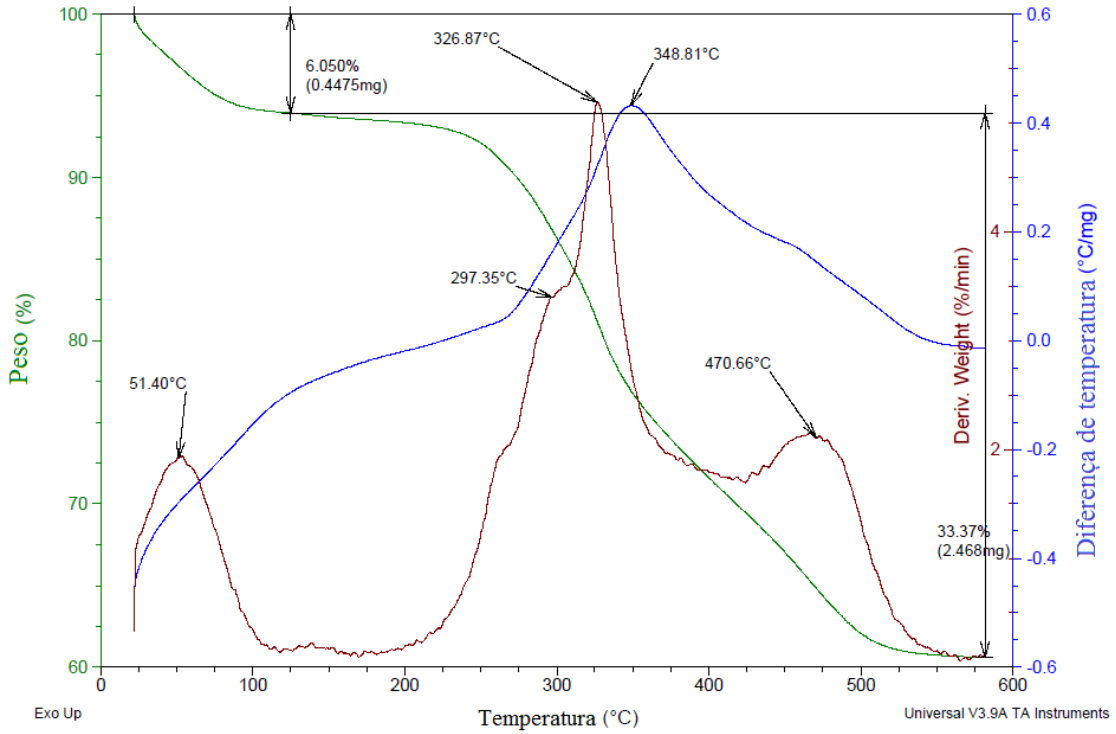

Figura 4.7 – Análise termogravimétrica do talude cultivado com vetiver

A Tabela 4.3 exibe os resultados dos ensaios de análises termogravimétricas para todas as amostras ensaiadas.

Tabela 4.3 – Resultados das análises termogravimétricas

Amostras de solo	**Peso (mg)**	**Teor de matéria orgânica (%)**
Solo sem vegetação	6,2650	13,35
1 ano de plantio de vetiver	6,3893	14,54
2 anos de plantio de vetiver	7,4057	17,95
3 anos de plantio de vetiver	8,5562	28,51
Talude sem vegetação	7,2773	11,58
Talude com 7 anos de plantio de vetiver	7,3962	33,37

Pela Tabela 4.3 é observado que o teor de matéria orgânica é maior nos solos vegetados com vetiver do que nos solos sem vegetação, destacando o solo com três anos de plantio de vetiver e o talude com cerca de sete anos de cultivo de vetiver que apresentaram valores de teores de matéria orgânica bem maior que os demais solos analisados.

Na literatura há uma divergência de resultados em relação aos teores de matéria orgânica e análise da resistência ao cisalhamento do solo, mostrando situações em que maiores teores de matéria orgânica são acompanhados de diminuição da resistência ao cisalhamento do solo (Ohu *et al*., 1985; Ohu *et al*., 1986) e outros nos quais essa aumenta (Davies, 1985; Ekwue, 1990; Braida, 2004). Provavelmente, essas diferenças são devido à origem da matéria orgânica (Ekwue, 1990), ao tempo decorrido após a incorporação da matéria orgânica e ao teor de água no solo (Davies, 1985; Zhang e Hartge, 1990).

A matéria orgânica atua sobre os parâmetros do cisalhamento de diferentes formas. Basicamente, espera-se um aumento da coesão entre as partículas do solo, resultante do aumento da força das ligações e/ou estabelecimento de novas ligações entre as mesmas, seja pelas características físicas e químicas das moléculas orgânicas, seja em função de enlaces de partículas produzidas por filamentos orgânicos como as raízes (Soane, 1990).

De acordo com Braida *et al*., (2010) a matéria orgânica aumenta a resistência do solo à compressão, quando predominam os efeitos de: aumento dos parâmetros de cisalhamento; aumento da tensão capilar com aumento da coesão aparente; redução do efeito da água na redução da fricção entre partículas; redução da densidade por efeito de diluição; e aumento da elasticidade do solo.

É importante ressaltar que o ensaio termogravimétrico trabalha com corpos de prova muito pequenos, com amostras de cerca de 8 mg o que pode não representar com total fidelidade a situação real. Outros ensaios para determinação de matéria orgânica são feitos com corpos de prova maiores, como é o caso da mufla. Logo, é importante a realização de outros ensaios de determinação de teores de matéria orgânica que

trabalham com amostras de maiores dimensões para comparar com os resultados do ensaio de análise termogravimétrica para verificar alguma possível diferença.

Apesar da limitação quanto ao tamanho do corpo de prova, o ensaio termogravimétrico demonstrou adequado, pois as amostras com maior número de raízes foram as que tiveram maior porcentagem de matéria orgânica. Porém torna-se necessário a realização de um ensaio com mufla para comprovação destes valores de matéria orgânica obtidos.

A Tabela 4.4 apresenta os dados da caracterização química do solo da área de estudo.

Tabela 4.4 – Caracterização química do solo

Amostra	**pH**	**Eq. Mg/ 100 cc**				**PPM**		**%**			**Micronutrientes ppm**					**ppm**
	H_20	**H**	**Al**	**Ca**	**Mg**	**P**	**K**	**MO**	**C**	**N**	**Cu**	**Mn**	**Zn**	**Fe**	**B**	**Na**
Solo Fazenda Guarará	7,3	1,0	Tr	7,1	1,0	7	91	1,72	0,99	0,10	3,4	82	7,7	229,8	Tr	18

Tr: Traço

MO: Matéria Orgânica

Fonte: Orozco (2009)

Observa-se, então, que segundo a classificação química para interpretação de pH em água, o pH do solo é de 7,3 o que significa que o solo encontra-se entre uma acidez fraca e uma alcalinidade fraca, muito perto do valor neutro. Conforme a classificação agronômica, a acidez ativa do solo está compreendida entre alta e muito alta. Em termos de nutrição de plantas a faixa ideal de pH deveria estar entre 5,5 a 6,0 para contribuir com uma maior disponibilidade de nutrientes (Orozco, 2009).

A acidez potencial (H+Al), que apresenta valor de 1,0 mg/100cc, é classificada como baixa. Relacionada também com a acidez do solo está a disponibilidade dos nutrientes cálcio e magnésio e de micronutrientes como manganês, ferro, cobre e zinco Os valores obtidos de nutrientes e micronutrientes apresentam valores muito bons (EMBRAPA, 2000).

A disponibilidade de fósforo de acordo com o teor de argila do solo é classificada como baixa (Orozco, 2009).

O carbono orgânico e a matéria orgânica apresentam tendências similares aos macronutrientes, sendo estes classificados como baixo (Orozco, 2009).

Com respeito à erodibilidade do solo, quanto maior o teor de matéria orgânica, menor a erodibilidade deste e, consequentemente, maior a estabilidade do solo. Regiões áridas, por exemplo, são pobres em matéria orgânica porque as temperaturas altas aceleram sua decomposição. Este escasso conteúdo de matéria orgânica torna o solo mais suscetível à erosão (Gómez, 1990).

4.3 ENSAIOS DE CISALHAMENTO DIRETO

A Tabela 4.5 apresenta os índices de vazios iniciais e os índices de vazios finais que foram determinados na etapa de adensamento dos solos dos ensaios de cisalhamento direto realizados no laboratório. Para cada nível de tensão normal aplicada obteve-se os valores dos índices de vazios inicial e final.

Pode-se observar pela Tabela 4.5 uma pequena variação entre os valores dos índices de vazios das amostras de solos sem vegetação e das amostras de solos cultivados com vetiver.

O índice de vazios expressa a relação existente entre o volume de vazios e o volume de sólidos de um solo. O solo do talude vegetado com vetiver na idade de sete anos foi o que apresentou o maior valor para o índice de vazios. Em contrapartida apresenta a maior densidade. Porém é importante ressaltar que a variação entre o maior índice de vazios e o menor índice de vazios, para o mesmo nível de tensão normal aplicada, é de apenas 7%.

Em relação à variação de índices de vazios inicial e índices de vazios final dos solos analisados, esta também é praticamente a mesma para todos os níveis de tensões normais aplicadas, sendo a menor diferença encontrada do talude com sete anos de plantio de vetiver.

Tabela 4.5 – Características dos ensaios de cisalhamento direto

Solo	**z (cm)**	**σ (kPa)**	**e_i**	**e_f**
Solo sem raiz	0 – 60	25	0,86	0,69
		50	0,79	0,61
		100	0,74	0,56
		200	0,67	0,49
Solo com 1 ano de plantio de vetiver	0 – 60	25	0,89	0,73
		50	0,81	0,64
		100	0,77	0,58
		200	0,68	0,53
Solo com 2 anos de plantio de vetiver	0 – 60	25	0,89	0,71
		50	0,82	0,67
		100	0,76	0,58
		200	0,71	0,52
Solo com 3 anos de plantio de vetiver	0 – 60	25	0,90	0,77
		50	0,88	0,67
		100	0,82	0,62
		200	0,76	0,39
Talude sem vegetação	30 – 90	25	0,85	0,68
		50	0,83	0,62
		100	0,77	0,54
		200	0,68	0,47
Talude com 7 anos de plantio de vetiver	30 – 90	25	0,91	0,74
		50	0,84	0,68
		100	0,78	0,62
		200	0,61	0,54

Legenda:

z = Profundidade e_f = Índice de vazios final

σ = Tensão normal e_i = Índice de vazios inicial

A Tabela 4.6 apresenta o tratamento estatístico dos índices de vazios inicial e final de acordo com cada faixa de tensão normal aplicada

Tabela 4.6 – Análise estatística dos índices de vazios inicial e final de acordo com a faixa de tensão normal aplicada

Nível de tensão	**Tratamento Estatístico**	**e_i**	**e_f**
25 kPa	Média	0,88	0,72
	Mediana	0,89	0,72
	Desvio padrão	0,023	0,033
	Coeficiente de variação	0,00055	0,0011
50 kPa	Média	0,83	0,65
	Mediana	0,83	0,66
	Desvio padrão	0,031	0,029
	Coeficiente de variação	0,00094	0,00086
100 kPa	Média	0,77	0,58
	Mediana	0,77	0,58
	Desvio padrão	0,027	0,032
	Coeficiente de variação	0,00071	0,001
200 kPa	Média	0,69	0,49
	Mediana	0,68	0,51
	Desvio padrão	0,049	0,055
	Coeficiente de variação	0,0024	0,0031

Legenda:

e_i = Índice de vazios inicial e_f = Índice de vazios final

Pela análise estatística exposta na Tabela 4.6 pode-se observar a pequena variação dos valores de acordo com o nível de tensão normal aplicada, sendo que os menores índices de vazios tanto inicial como final foram menores na faixa de tensão de 200 kPa e maiores para a tensão de 25 kPa, notando pequenos valores de desvio padrão e de coeficiente de variação em todas as análises.

O diâmetro das raízes do vetiver das amostras indeformadas de solo variaram entre 0,2 e 1,1 mm, encontrando-se maior quantidade de raízes na faixa de 0,7 mm. De acordo com os estudos de Orozco (2009) as raízes do vetiver na faixa de diâmetro de 0,7 mm em

uma planta de 2 anos apresentaram uma resistência a tração média de 32 MPa, enquanto que uma planta de vetiver na idade de 3 anos para esta mesma faixa de diâmetros apresentou uma resistência a tração média de 39 MPa. A mesma autora diz que possivelmente devem ser encontrados valores mais altos de resistência a tração em plantas com idades maiores.

Outros estudos (Hengchaovanich e Nilaweera, 1996; Cheng *et al*., 2003) verificaram valores maiores de resistência a tração das raízes do vetiver para a mesma faixa de diâmetro em uma planta de dois anos de idade, aproximadamente 75MPa.

Existe certa influência da resistência à tração das raízes no incremento da resistência ao cisalhamento de solos. Plantas caracterizadas por apresentarem valores altos de resistência à tração são as espécies capazes de oferecer um maior incremento na resistência ao cisalhamento de solos (Cazzuffi *et al.*,2006).

A moldagem dos corpos de prova foi executada com as raízes inclinadas verticalmente, com uma inclinação de no máximo 20^0, assim as raízes ficaram a aproximadamente um ângulo de 70^0 em relação ao plano de ruptura.

A Figura 4.8 apresenta dois gráficos (A e B) de resultados dos ensaios de cisalhamento direto para o solo sem cobertura vegetal. O gráfico A exibe as curvas em termos de tensões cisalhantes *versus* deslocamentos horizontais. No gráfico B são mostradas as curvas em termos de deslocamentos verticais *versus* deslocamentos horizontais. Foram plotados 4 ensaios com valores de tensão normal correspondentes a 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa. Os valores das tensões cisalhantes e deslocamentos verticais foram obtidos até o deslocamento horizontal de 20 mm.

Nas amostras de solo sem cobertura vegetal a tensão de cisalhamento aumentou com o deslocamento cisalhante (deslocamento horizontal) até alcançar a tensão de ruptura que corresponde à resistência ao cisalhamento de pico. Após a tensão de ruptura ser atingida, a tensão resistente ao cisalhamento diminui gradualmente enquanto o

deslocamento cisalhante aumenta até um valor constante, indicando um comportamento de solo frágil, pois é observada uma diferença entre a tensão de pico e a tensão residual.

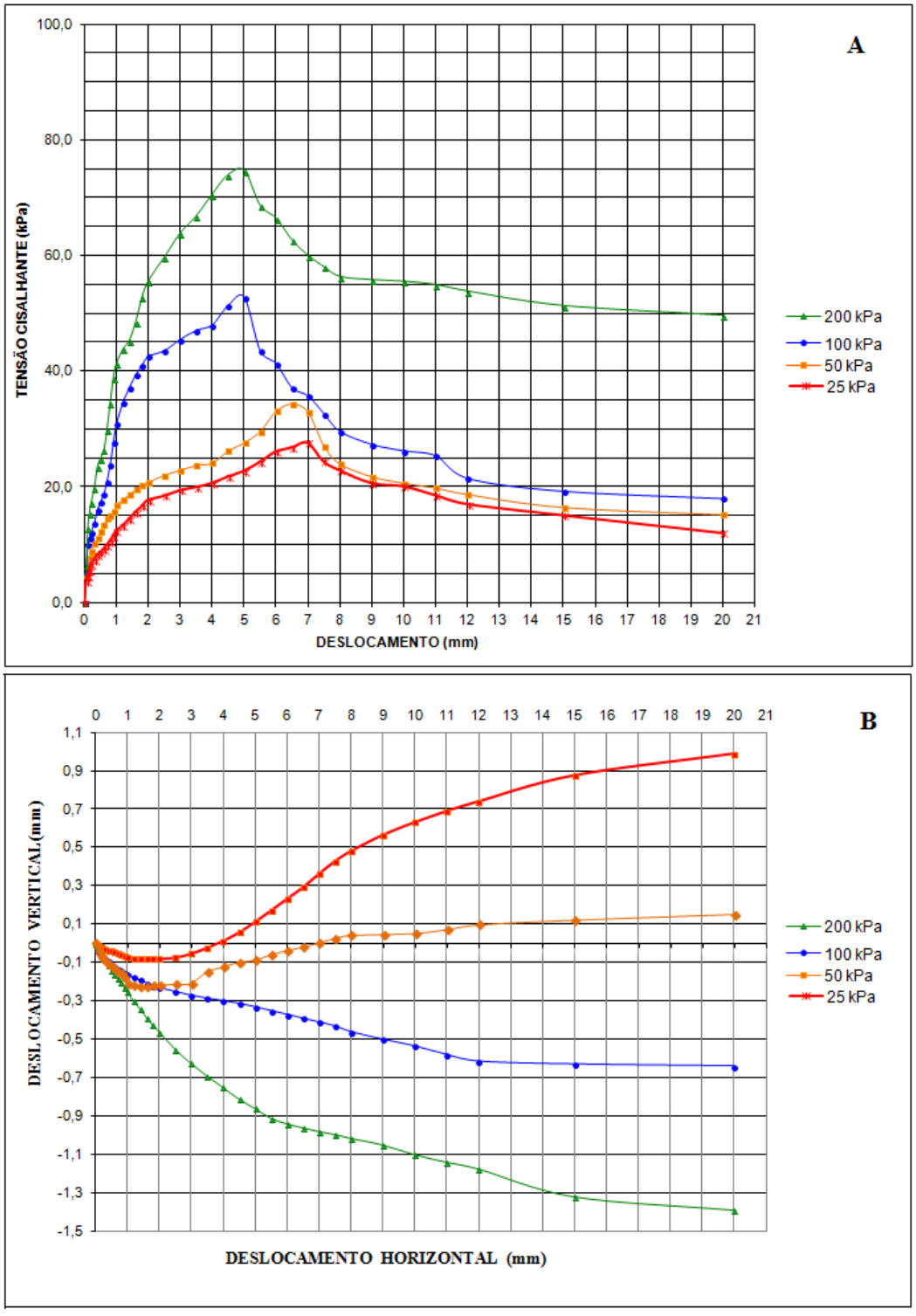

Figura 4.8 – Em A tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais e B deslocamentos verticais x deslocamentos horizontais: solo sem cobertura vegetal

Pelo gráfico B da Figura 4.8 é notado que para as tensões normais aplicadas de 100 kPa e 200 kPa ocorreu uma compressão do solo, apresentando o comportamento de uma areia fofa. O contrário ocorre para as tensões de 25 kPa e 50 kPa produzindo de início uma compressão e depois uma expansão do solo, caracterizando o comportamento de uma areia compacta.

A Figura 4.9 apresenta o gráfico de tensão cisalhante *versus* tensão normal, que corresponde à envoltória de ruptura na qual foram obtidos os parâmetros de resistência (intercepto de coesão e ângulo de atrito interno) do solo sem vegetação.

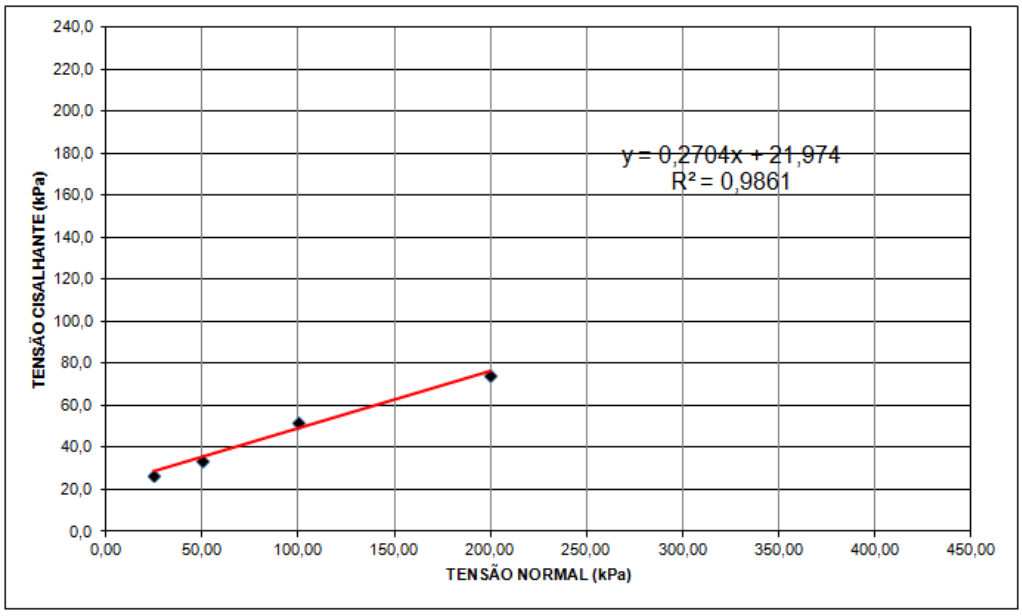

Figura 4.9 – Envoltória de ruptura do solo sem cobertura vegetal

A Figura 4.10 mostra os resultados do ensaio de cisalhamento direto em termos de tensões cisalhantes *versus* deslocamentos horizontais (A) e em termos de curvas de deslocamentos verticais *versus* deslocamentos horizontais (B) para o solo coberto com vetiver na idade de um ano. Os valores das tensões cisalhantes e dos deslocamentos verticais foram obtidos até o deslocamento horizontal de 20 mm.

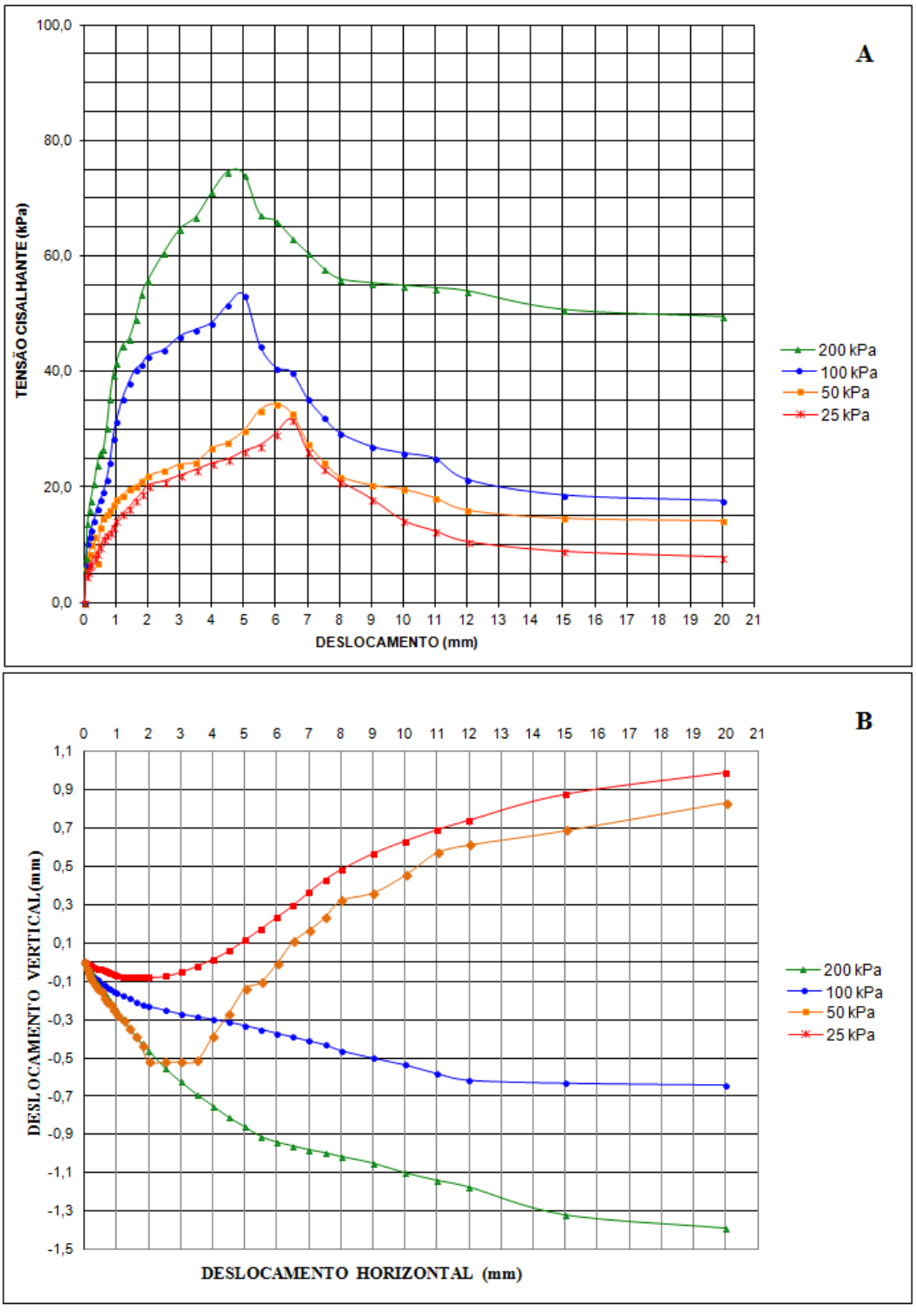

Figura 4.10 – Em A tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais e B deslocamentos verticais x deslocamentos horizontais: solo com 1 ano de plantio de vetiver

As curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamentos horizontais da Figura 4.10 apresentam o mesmo comportamento do solo sem vegetaçao, caracterizando um solo frágil, apresentando uma diferença acentuada entre a tensão de pico e a tensão residual. Verifica-se assim que o vetiver da idade de um ano de plantio não ofereceu resistência ao solo.

É notado que o comportamento do solo com um ano de plantio de vetiver em relação aos deslocamentos horizontais e verticais é parecido com o comportamento do solo sem vegetação, observando-se uma maior diferença na curva de tensão normal de 50 kPa, porém ainda ocorre expansão do solo para este nível de tensão.

A Figura 4.11 apresenta o gráfico de tensão cisalhante *versus* tensão normal no qual foram obtidos os parâmetros de resistência para o solo com um ano de plantio do vetiver.

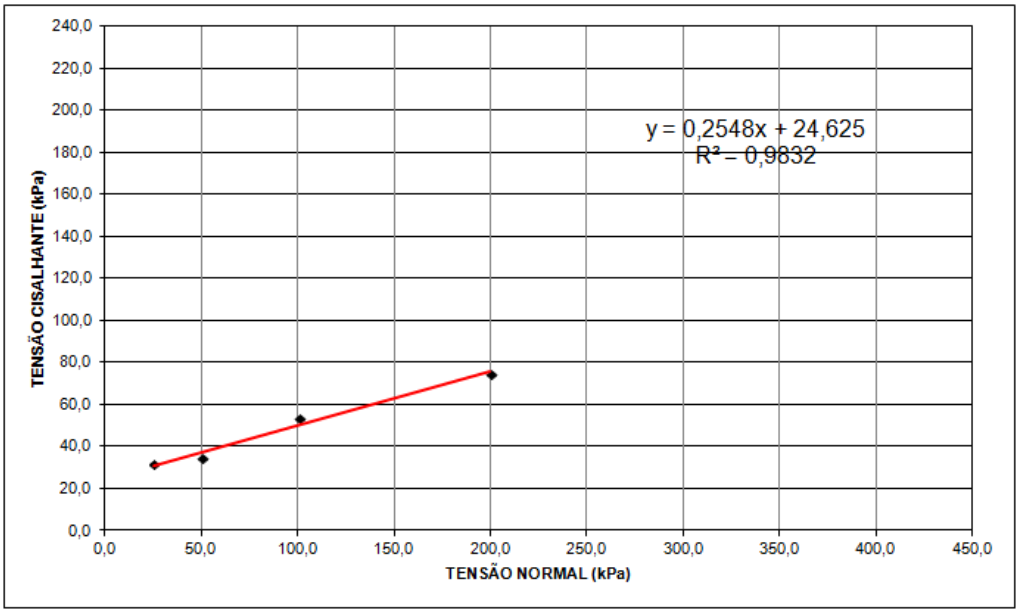

Figura 4.11 – Envoltória de ruptura do solo com 1 ano de plantio do vetiver

A Figura 4.12 exibe os gráficos de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal (A) e deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal (B) para ensaio de cisalhamento

direto das amostras de solo com dois anos de plantio do vetiver. Os valores das tensões cisalhantes foram obtidos até o deslocamento horizontal de 20 mm.

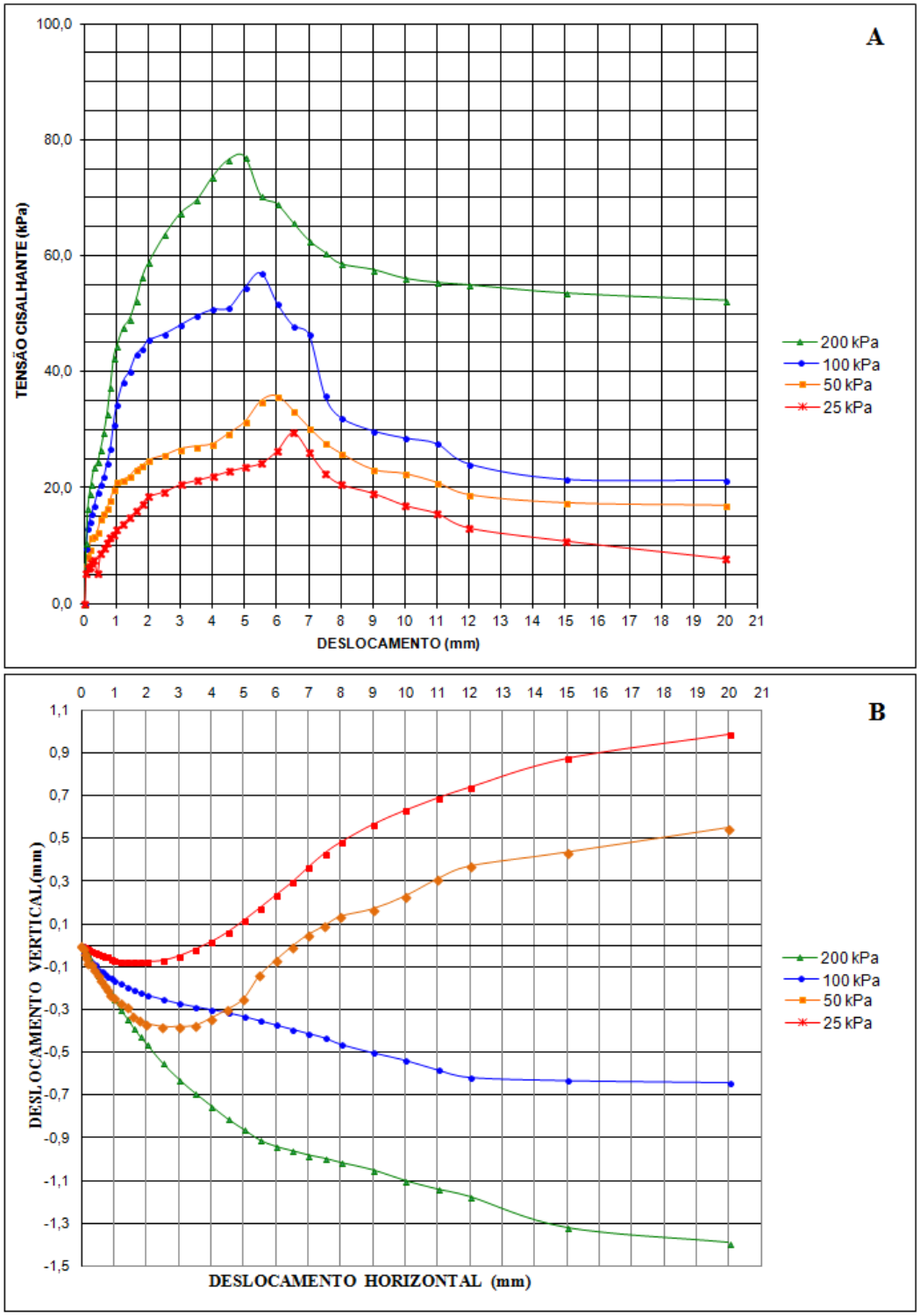

Figura 4.12 – Em A tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais e B deslocamentos verticais x deslocamentos horizontais: solo com 2 anos de plantio de vetiver

Pode-se verificar pela Figura 4.12 que o solo apresenta um comportamento frágil, sendo o mesmo comportamento observado nos solos sem vegetação e com um ano de plantio de vetiver. É observado também que os deslocamentos horizontais e verticais são semelhantes às curvas do ensaio de cisalhamento direto para o solo com um ano de plantio de vetiver, ocorrendo expansão nas tensões de 25 kPa e 50 kPa e compressão nas tensões de 100 kPa e 200 kPa.

Na Figura 4.13 é exposta a envoltória de ruptura da qual é obtida os parâmetros de resistência para o solo com dois anos de plantio de vetiver.

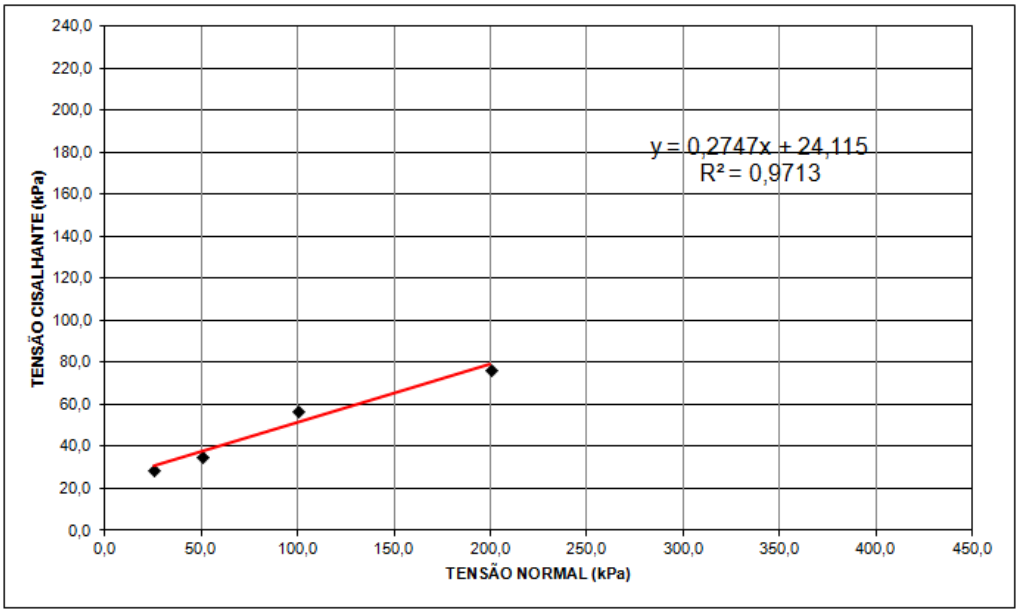

Figura 4.13 – Envoltória de ruptura do solo com 2 anos de plantio de vetiver

Na Figura 4.14 são mostradas as curvas de tensões cisalhantes *versus* deslocamentos horizontais (A) e em B as curvas em termos de deslocamento vertical *versus* deslocamento horizontal para o solo com três anos de plantio do vetiver.

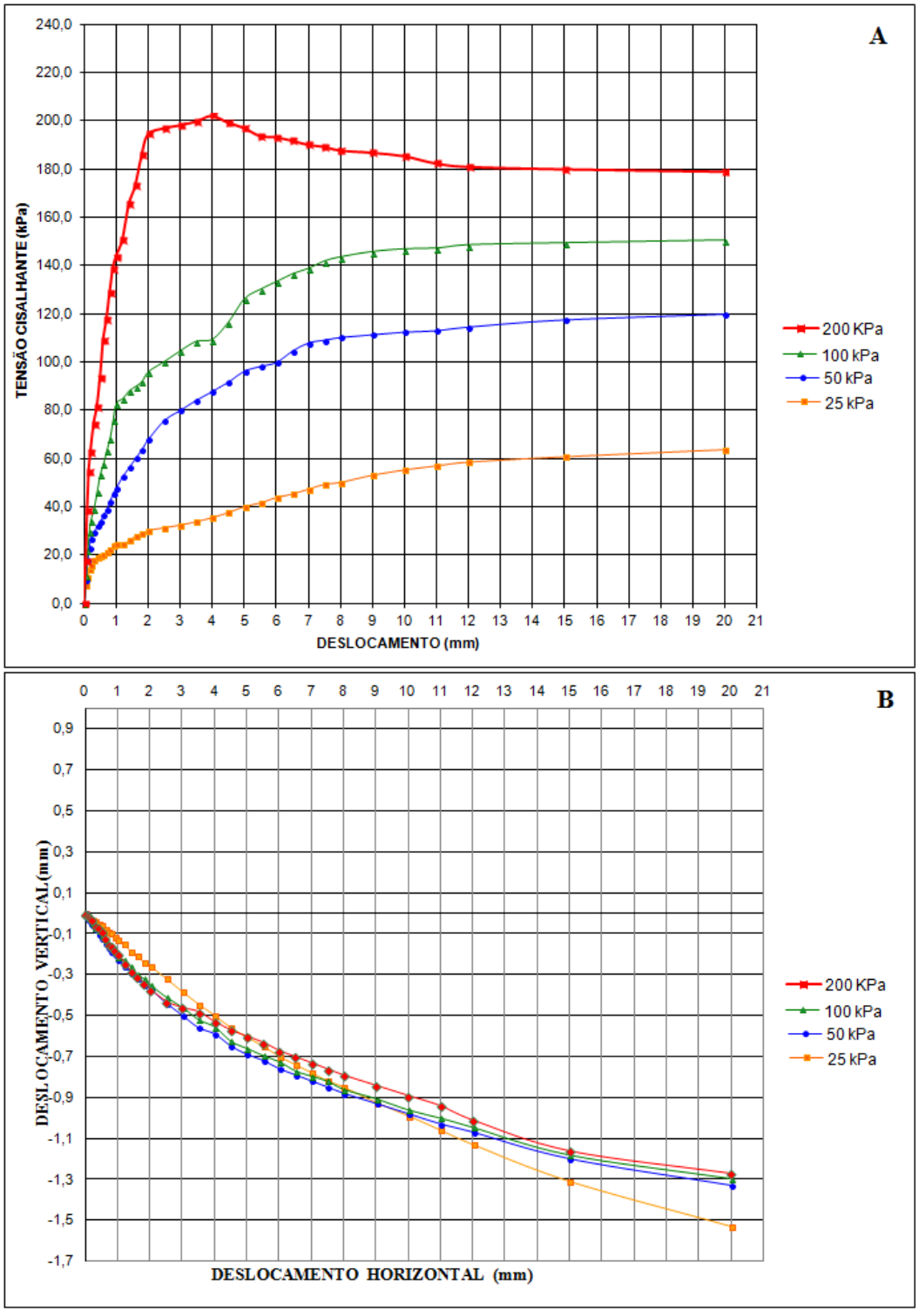

Figura 4.14 – Em A tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais e B deslocamentos verticais x deslocamentos horizontais: solo com 3 anos de plantio de vetiver

É visto pelo gráfico A da Figura 4.14 que as curvas referentes às tensões de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa apresentam um comportamento dúctil, não sendo observado uma tensão de pico. Já na curva referente à tensão de 200 kPa é observada uma tensão de pico, apresentando um comportamento de solo frágil. Verifica-se ainda que para os valores de menor tensão normal o vetiver na idade de três anos de plantio oferece uma maior resistência ao solo do que o vetiver com um e dois anos de plantio.

Pelo gráfico B da Figura 4.14 observa-se que as variações volumétricas indicam uma tendência a compressão para todas a tensões aplicadas, o que diferencia das variações volumétricas para o solos sem vegetação, com um ano de plantio de vetiver e com dois anos de plantio de vetiver, nos quais nas curvas referentes as tensões normais de 25 kPa e 50 kPa ocorreram dilatância.

Em areias compactas durante o ensaio de cisalhamento direto há uma tendência do corpo de prova dilatar à medida que o ensaio avança. Em areias fofas o volume diminui gradualmente. Um aumento ou diminuição de volume significa uma variação do índice de vazios no solo. Logo, o solo ensaiado (sem vegetação, um e dois anos de plantio de vetiver) para as tensões de 25 kPa e 50 kPa apresentam comportamento de um areia compacta, enquanto que os demais solos ensaiados apresentam o comportamento de uma areia fofa.

Na Figura 4.15 é exibido o gráfico em termos de tensão cisalhante *versus* tensão normal para o solo com três anos de plantio de vetiver, sendo mostrada a curva linear (admitindo critério de Mohr – Coulomb) e a curva não linear. As envoltórias não lineares apresentaram melhores ajustes aos dados de campo.

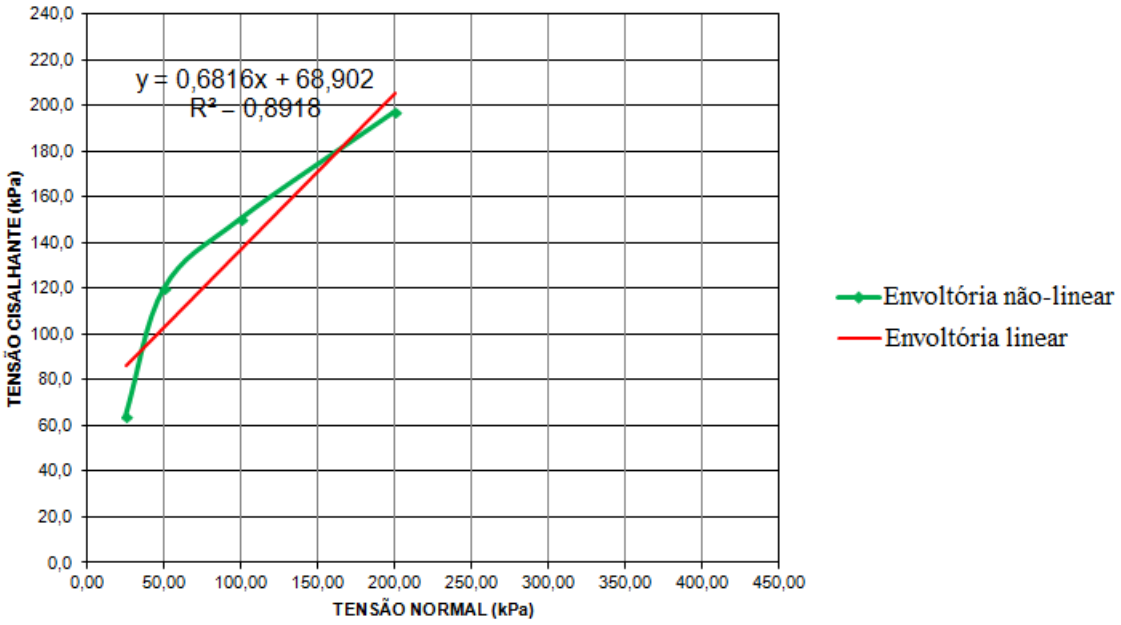

Figura 4.15 – Envoltórias de ruptura do solo com 3 anos de plantio de vetiver

É percebido pela Figura 4.15 que a envoltória de ruptura do solo com três anos de plantio seria melhor representada pela envoltória de ruptura não linear. Nesses casos os valores de intercepto de coesão e ângulo de atrito podem ser selecionados a partir das faixas de tensões de trabalho, conforme mostra a Figura 4.16.

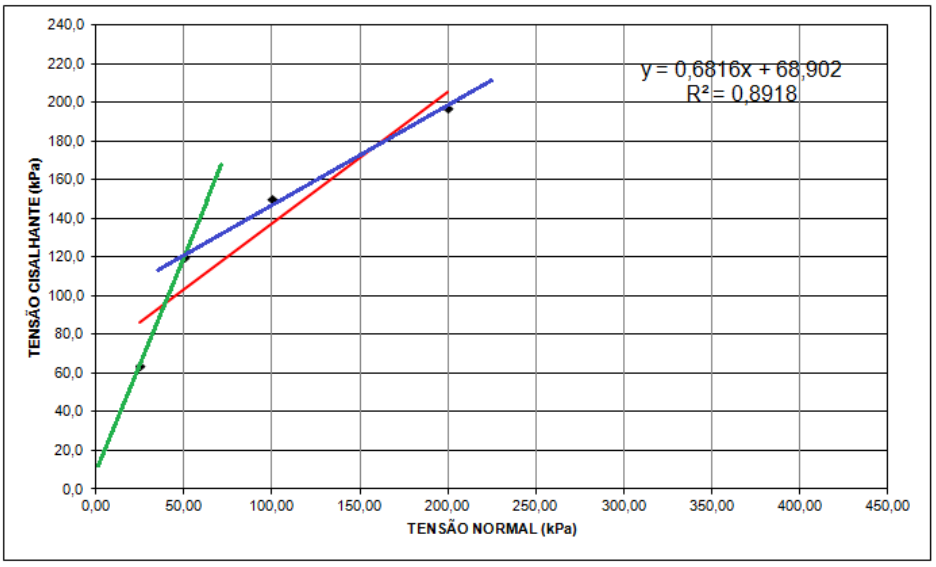

Figura 4.16 – Envoltórias de ruptura por faixa de aplicação de tensões do solo com 3 anos de plantio de vetiver

É observado na Figura 4.16 que a maior dispersão da reta é para menor nível de tensão, ou seja, 25 kPa. A envoltória de ruptura apresenta uma pequena curvatura entre a tensão de 25 kPa e 50 kPa, o que sugere a necessidade de realização de mais ensaios em níveis de tensões normais mais baixos, pois simularia de forma mais apropriada à situação real de campo. Desta forma foi feita uma aproximação para uma reta e os parâmetros de resistência foram determinados pela reta através do critério de Mohr – Coulomb de acordo com as faixas de tensões normais aplicadas, conforme mostra a Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Parâmetros de resistência de acordo com faixas de aplicação de tensões

Tensões Normais (kPa)	**Ângulo de atrito**	**Intercepto de Coesão (kPa)**
0 – 50	~69^0	~13
50 – 200	~30^0	~92

Pela Tabela 4.7 é observada a grande variação dos valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos. Se considerar uma envoltória de ruptura linear o ângulo de atrito equivale a $34{,}3^0$ e o intercepto de coesão 68,90 kPa, valores divergentes dos obtidos de acordo com as faixas de aplicações de tensões.

A Tabela 4.8 mostra os parâmetros de resistência obtidos através dos gráficos de envoltórias de rupturas das amostras sem vegetação, com um ano de plantio de vetiver, dois anos de plantio de vetiver e três anos de plantio de vetiver considerando a envoltória de ruptura linear.

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto

Solos	**Tensões (kPa)**	**Ângulo de atrito Interno**	**Intercepto de coesão (kPa)**
Sem vegetação	25 – 200	15,1º	21,97
1 ano de plantio	25 – 200	14,3º	24,63
2 anos de plantio	25 – 200	15,3º	24,12
3 anos de plantio	0 – 50	69^0	13,3
	50 – 200	30^0	92

Os resultados dos ensaios de cisalhamento direto mostram uma variação pequena em relação ao ângulo de atrito para o solo sem vegetação e com um e dois anos de idade do vetiver, o mesmo ocorre com os valores de intercepto de coesão. Já para o solo com vetiver na idade de três anos o valor do ângulo de atrito é maior para tensões aplicadas menores, ocorrendo um aumento de 350% em relação ao ângulo de atrito do solo com vetiver na idade de dois anos e para tensões maiores esse aumento diminui, passa a ser de 96%.

Em relação ao intercepto de coesão para o solo com três anos de plantio de vetiver este é menor para menores valores de tensão e aumenta com o aumento das tensões aplicadas.

A Tabela 4.9 mostra os valores de tensões cisalhantes no momento de ruptura, ou seja, apresenta a resistência ao cisalhamento de solos de acordo com as tensões normais aplicadas. Pode ser observado um aumento da resistência ao cisalhamento de acordo com o aumento das tensões normais aplicadas, sendo que este aumento destaca-se no solo com vetiver na idade de três anos, com um acréscimo de aproximadamente 150% em relação ao solo com dois anos de plantio de vetiver e de aproximadamente 170% em relação ao solo sem vegetação para uma tensão normal aplicada de 25 kPa.

Tabela 4.9 – Resistência ao cisalhamento de solos de acordo com cada tensão aplicada

	Solo sem vegetação	**1 ano de plantio de vetiver**	**2 anos de plantio de vetiver**	**3 anos de plantio de vetiver**
σ (kPa)	**τ (kPa)**	**τ (kPa)**	**τ (kPa)**	**τ (kPa)**
25	28,72	31,00	30,96	78,43
50	35,46	37,37	37,79	120,87
100	48,89	50,12	51,48	149,74
200	75,93	75,61	78,83	207,47

Gray e Ohashi (1983) realizaram ensaios de cisalhamento direto em areias sem reforço e reforçadas com raízes de vegetação e verificaram que com o aumento da quantidade de raízes ocorreu um incremento na resistência ao cisalhamento de solos.

Nas amostras indeformadas coletadas do solo com três anos de plantio de vetiver foram observadas um maior número de raízes em comparação com as amostras dos solos com um e dois anos de plantio de vetiver. Também foi notado que o diâmetro das raizes diminuiu com a profundidade.

A Figura 4.17 mostra um gráfico de resistência ao cisalhamento de solo *versus* porcentagem de matéria orgânica para o solo sem vegetação, com 1, 2 e 3 anos de plantio de vetiver. Para os valores de resistência ao cisalhamento de acordo com o tempo de plantio do vetiver foi considerada uma tensão normal aplicada de 25 kPa, simulando o nível de tensão do campo e a porcentagem de matéria orgânica pode ser tida como a representação da quantidade de raízes do vetiver no solo.

Figura 4.17 – Resistência ao cisalhamento de acordo com a porcentagem de matéria orgânica dos solos analisados

Observa-se pela Figura 4.17 uma diferença acentuada entre o valor da resistência do solo com vetiver na idade de dois e três anos. Desta forma, pode-se considerar que o vetiver oferece um aumento de resistência ao cisalhamento do solo a partir de três anos de plantio.

A Figura 4.18 apresenta os resultados do ensaio de cisalhamento direto das amostras do talude sem a cobertura vegetal em termos das curvas de tensões cisalhantes *versus*

deslocamentos horizontais (A) e em B as curvas em termos de deslocamento vertical *versus* deslocamento. Os valores das tensões cisalhantes e dos deslocamentos verticais foram obtidos até o deslocamento horizontal de 20 mm.

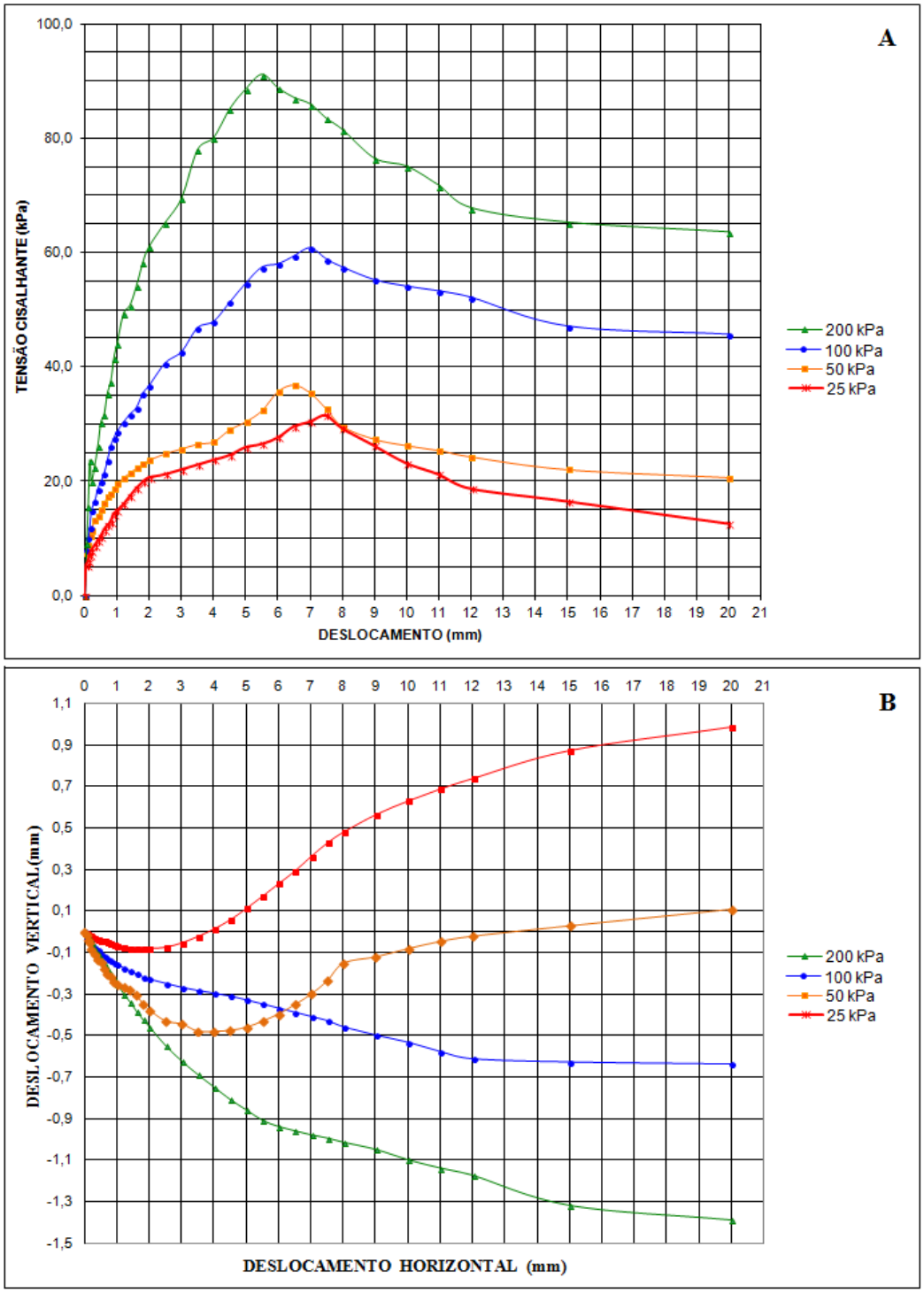

Figura 4.18 – Em A tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais e B deslocamentos verticais x deslocamentos horizontais: talude sem cobertura vegetal

À medida que a tensão normal foi aumentada ocorreu um aumento na tensão cisalhante com redução no deslocamento horizontal no pico. Em adição, o material apresentou um comportamento frágil, pois após a tensão de pico elevado houve uma queda da curva do gráfico A, principalmente no valor de tensão normal de 200 kPa, apresentando uma diferença acentuada entre tensão de pico e tensão residual. O comportamento do talude sem vegetação é o mesmo para os solos sem cobertura vegetal e cobertos com vetiver na idade de um e dois anos de plantio.

Pelas curvas do gráfico B da Figura 4.18 é visto que o comportamento foi o mesmo apresentado das amostras de solos sem cobertura vegetal e cobertas com vetiver com um e dois anos de plantio, podendo-se notar uma dilatância nas tensões normais aplicadas de 25 kPa e 50 kPa e uma tendência a compressão nas demais tensões.

A Figura 4.19 mostra o gráfico de tensão cisalhante *versus* tensão normal, que corresponde à envoltória de ruptura na qual foram obtidos os parâmetros de resistência do talude sem a cobertura de vetiver.

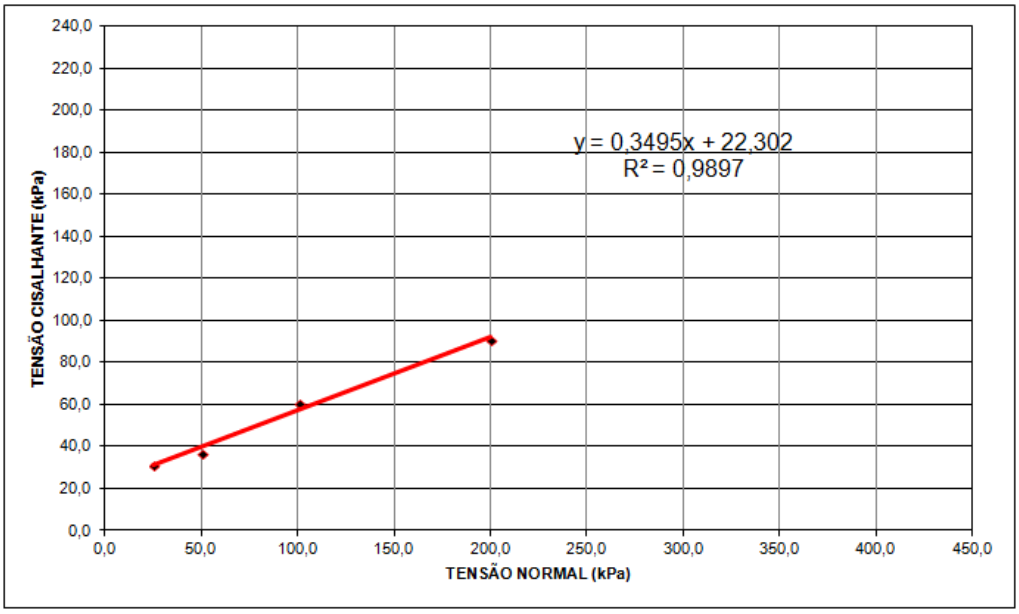

Figura 4.19 – Envoltória de ruptura do talude sem cobertura vegetal

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento considerando o critério de Mohr-Coulomb estão apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 – Parâmetros de resistência: talude sem cobertura vegetal

Talude	**Ângulo de atrito**	**Intercepto de Coesão (kPa)**
Sem cobertura vegetal	$19{,}3^0$	22,3

A Figura 4.20 mostra os resultados dos ensaios de cisalhamento direto das amostras do talude com cobertura de vetiver em termos das curvas de tensões cisalhantes *versus* deslocamentos horizontais (A) e as curvas de deslocamento vertical *versus* deslocamento (B). Os valores das tensões cisalhantes e dos deslocamentos verticais foram obtidos até o deslocamento horizontal de 20 mm.

As curvas do gráfico A da Figura 4.20 apresentam um comportamento dúctil, ou seja, ganho contínuo de resistência com uma tendência à estabilização para elevados níveis de deslocamento. É observado que com o aumento da tensão normal, ocorreu aumento da tensão cisalhante, porém não se verificou redução no deslocamento horizontal. Não foi observada uma diferença entre tensão de cisalhamento de pico e tensão de cisalhamento residual. Com o contínuo acréscimo das tensões cisalhantes com o deslocamento horizontal, pode-se dizer que não ocorreu ruptura da raiz do vetiver durante o ensaio de cisalhamento direto para a amostra do talude cultivado com vetiver na idade de sete anos.

Já as curvas do gráfico B da Figura 4.20 indicam um comportamento de areia fofa do solo e uma tendência à compressão, sendo equivalente ao resultado obtido do ensaio de cisalhamento direto para o solo com três anos de plantio do vetiver.

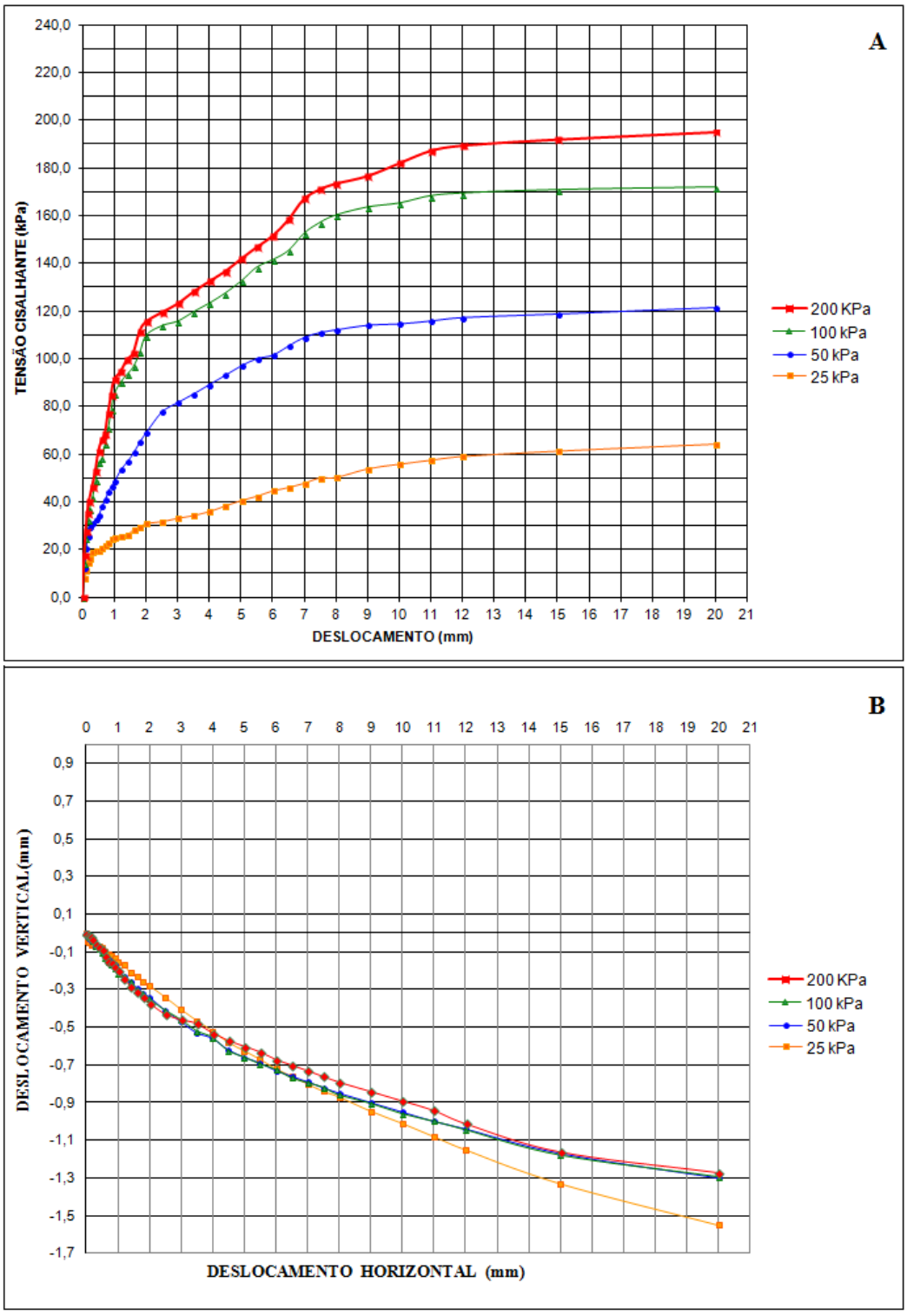

Figura 4.20 – Em A tensões cisalhantes x deslocamentos horizontais e B deslocamentos verticais x deslocamentos horizontais: Talude com cobertura de vetiver na idade de 7 anos

A Figura 4.21 mostra as envoltórias de ruptura linear e não linear do talude coberto com vetiver na idade de sete anos. Nota-se que a envoltória de ruptura não linear representa melhor a situação real de campo.

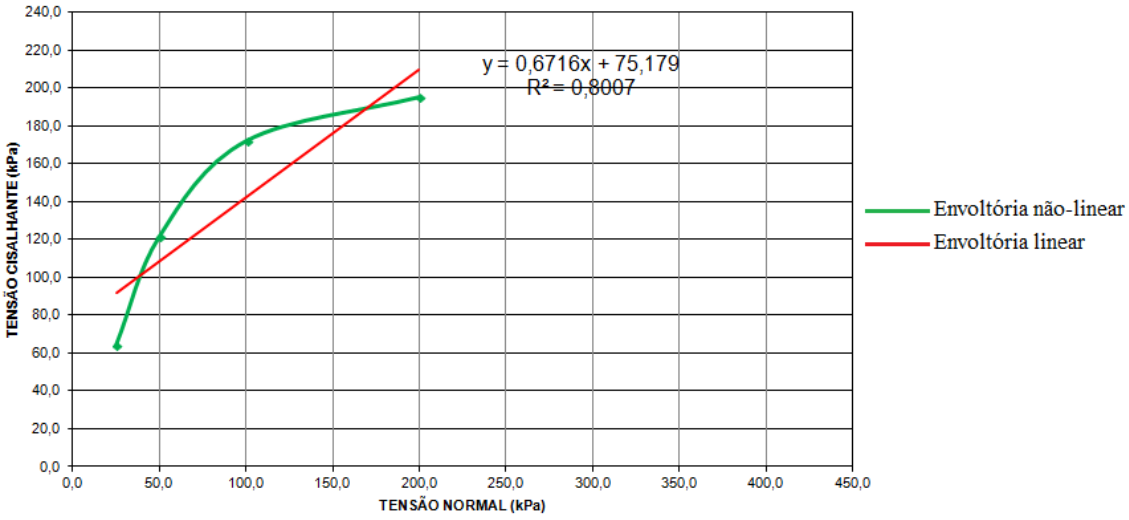

Figura 4.21 – Envoltórias de ruptura do talude coberto com vetiver na idade de 7 anos

A Figura 4.22 mostra a envoltória de ruptura linear por faixas de tensões aplicadas.

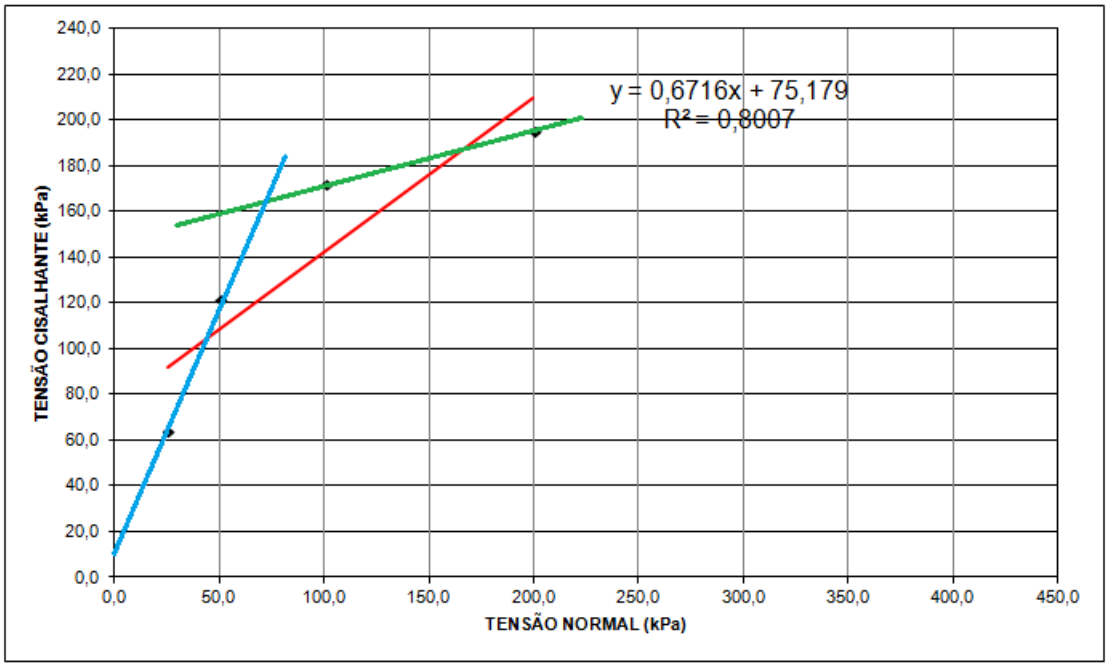

Figura 4.22 – Envoltórias de ruptura por faixa de aplicação de tensões normais do talude com aplicação de vetiver

A Tabela 4.11 mostra os parâmetros de resistência do talude com plantio de vetiver de acordo com as faixas de tensões normais aplicadas.

Tabela 4.11 – Parâmetros de resistência de acordo com faixas de aplicação de tensões

Tensões (kPa)	**Intercepto de coesão (kPa)**	**Ângulo de atrito**
0 – 70	~11	~66^0
70 – 200	~145	~15^0

Considerando apenas a envoltória linear de ruptura o valor de ângulo de atrito é de 33,90 e de intercepto de coesão 75,2 kPa, valores divergentes dos obtidos levando em consideração as faixas de aplicações de tensões.

A Tabela 4.12 faz uma comparação entre os valores de ângulo de atrito e intercepto de coesão para os ensaios realizados com amostras do mesmo talude sem cobertura vegetal e com vetiver na idade de sete anos.

Tabela 4.12 – Comparação entre os resultados dos ensaios de cisalhamento direto

Talude	**Tensões (kPa)**	**Ângulo de atrito Interno**	**Intercepto de coesão (kPa)**
Sem vegetação	25 – 200	19,3º	22,3
Com cobertura de vetiver	0 – 70	66º	11
	70 – 200	15^0	145

Houve um aumento do ângulo de atrito interno nas amostras do talude com plantio de vetiver para menores valores de tensões normais aplicadas, diminuindo com o aumento das tensões. Em relação ao intercepto de coesão ocorreu o contrário, a coesão foi menor para menores níveis de tensões e maior para os maiores níveis de tensão.

A Tabela 4.13 apresenta a resistência ao cisalhamento de solos do talude sem cobertura vegetal e cultivado com vetiver de acordo com as tensões normais aplicadas.

Tabela 4.13 – Resistência ao cisalhamento do talude sem cobertura vegetal e com plantio de vetiver de acordo com a tensão normal aplicada

Tensão normal (kPa)	**Resistência ao cisalhamento do talude sem vegetação (kPa)**	**Resistência ao cisalhamento do talude com plantio de vetiver (kPa)**
25	31,05	67,15
50	39,81	123,30
100	57,32	171,79
200	92,34	198,59

Pela Tabela 4.13 é observado que a resistência ao cisalhamento aumentou com a tensão normal. A resistência ao cisalhamento do solo do talude cultivado com vetiver teve um aumento de aproximadamente 115% para a tensão normal de 25 kPa em comparação com a resistência ao cisalhamento do solo do talude sem vegetação. A resistência ao cisalhamento do solo do talude com cobertura de vetiver para a tensão de 200 kPa teve também teve um aumento de aproximadamente 115% em relação a resistência ao cisalhamento do solo do talude sem vegetação.

A Figura 4.23 apresenta as envoltórias de ruptura dos ensaios de cisalhamento direto de todos os grupos de solos ensaiados.

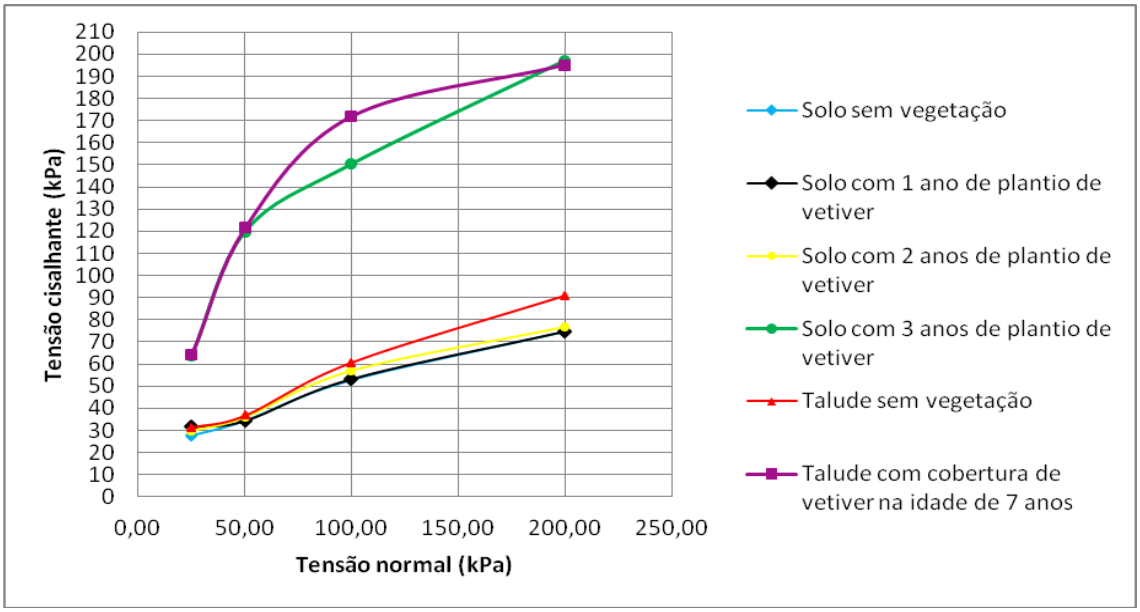

Figura 4.23 – Envoltórias de ruptura

Pela Figura 4.23 pode-se observar o incremento de resistência ao cisalhamento do solo com três anos de plantio de vetiver e do talude coberto com vetiver na idade de sete anos. Já nos demais solos ensaiados o incremento de resistência ao cisalhamento é baixo.

Pelos resultados dos ensaios é possível afirmar que o vetiver oferece uma parcela de resistência ao cisalhamento do solo a partir de três anos de plantio.

Para uma melhor representação da situação de campo seria relevante à realização de um maior número de ensaios de cisalhamento direto com tensões normais menores. Uma das razões para a não realização de um maior número de ensaios de cisalhamento direto no laboratório foi à dificuldade e o tempo exigido para moldar os corpos de prova, pois muitas amostras apresentavam um grande número de raízes e quebravam durante a moldagem. Outro fator importante que deve ser considerado é o tempo de execução total dos ensaios de cisalhamento direto, que passa pelas fases de inundação, adensamento e cisalhamento, sendo que um só ensaio dura três dias consecutivos e durante a fase de cisalhamento é necessário à verificação das leituras de acordo com extensômetro horizontal, não podendo se ausentar do laboratório.

4.4 ANÁLISES DE ESTABILIDADE

A Tabela 4.14 resume os parâmetros adotados nas análises de estabilidade, que foram extraídos dos ensaios de caracterização do solo e dos ensaios de cisalhamento direto.

Tabela 4.14 – Parâmetros utilizados nas análises de estabilidade determinísticas

Solos	**γ (kN/m^3)**	**c (kPa)**	**ϕ (^{0})**
Talude sem cobertura vegetal	20,23	22,3	19,3
Talude com cobertura de vetiver	20,81	11	66

Os parâmetros utilizados de ângulo de atrito e intercepto de coesão para as análises de estabilidade do talude com sete anos de plantio foram os valores relativos aos menores níveis de tensões normais aplicadas, pois representam com maior fidelidade a situação de campo.

A Tabela 4.15 apresenta a análise de estabilidade conforme equações apresentadas no item 2.2.2.1. São mostrados os valores dos fatores de segurança considerando dois taludes hipotéticos, um com inclinação de 30^0 e outro com inclinação de 45^0. A análise pelo método do talude infinito considerou-se uma zona potencial de ruptura de 1,5 m e altura do nível d'água 0,75 m.

Tabela 4.15 – Fatores de segurança das diferentes análises do método de talude infinito considerando a zona potencial de ruptura 1,5 m

Análise	**Fator de Segurança do talude sem vegetação**		**Fator de segurança do talude com 7 anos de plantio de vetiver**	
	Inclinação de 30^0	**Inclinação de 45^0**	**Inclinação de 30^0**	**Inclinação de 45^0**
Sem presença de água	2,30	1,82	4,70	2,95
Talude saturado	2,06	1,69	2,86	1,89
Nível d'água acima da superfície potencial de ruptura	2,21	1,78	3,79	2,42

Pela Tabela 4.15 é observado que os valores dos fatores de segurança no talude sem vegetação são menores do que os valores dos fatores de segurança do talude com plantio de vetiver na idade de sete anos, sendo observado o menor valor de fator de segurança para a condição saturada do solo. Comparando as inclinações dos taludes, para a menor inclinação (30^0), os valores dos coeficientes de segurança são maiores. Fazendo uma comparação entre os valores dos fatores de segurança do talude sem vegetação e com cultivo de vetiver na pior situação, condição saturada, observa-se um aumento de aproximadamente 38% para a inclinação de 30^0 e de cerca de 12% para a inclinação de 45^0, evidenciando-se assim a contribuição do vetiver na estabilização de taludes.

A Tabela 4.16 apresenta a resistência ao cisalhamento de solos pelo método do talude infinito, conforme equações apresentadas no item 2.2.2.1 das diferentes análises de estabilidade considerando a zona potencial de ruptura de 1,5 m e altura do nível d'água de 0,75 m.

Tabela 4.16 – Resistência ao cisalhamento de solo dos taludes hipotéticos com zona potencial de ruptura de 1,5 m

Análise	**Resistência ao cisalhamento (kPa): Talude sem vegetação**		**Resistência ao cisalhamento (kPa): Talude com 7 anos de plantio de vetiver**	
	Inclinação de 30^0	**Inclinação de 45^0**	**Inclinação de 30^0**	**Inclinação de 45^0**
Sem presença de água	30,27	27,61	63,58	46,05
Talude saturado	26,14	24,86	38,24	29,16
Nível d'água acima da superfície potencial de ruptura	28,21	26,24	50,91	37,61

Nota-se pela Tabela 4.16 que a resistência ao cisalhamento dos solos é maior para o talude cultivado com vetiver. Na pior situação do solo, condição saturada, é observada um aumento da resistência ao cisalhamento do talude com cobertura de vetiver de 46% para a inclinação de 30^0 e um aumento de 17% para a inclinação de 45^0 em comparação com o talude sem cobertura vegetal. Considerando o talude seco este aumento é maior, 110% para a inclinação de 30^0 e 67% para a inclinação de 45^0. Observa-se também que a resistência ao cisalhamento do solo é maior para a menor inclinação do talude.

Comparando-se os valores da Tabela 4.16 com o valores da Tabela 4.13 que mostra os valores de resistência ao cisalhamento de solos dos taludes de acordo com a faixa de tensão aplicada é observado que para o menor valor de tensão normal aplicada, 25 kPa, o talude sem vegetação apresenta uma resistência ao cisalhamento de 31,05 kPa e o talude cultivado com vetiver uma resistência ao cisalhamento de 91,99 kPa, nos quais consistem de valores de resistência ao cisalhamento maiores do que a resistência ao cisalhamento obtida pela simulação do talude para as duas inclinações. Mais uma vez, mostra a necessidade da realização de ensaios de cisalhamento direto para menores

valores de tensão normal, pois representaria melhor a situação de campo visto que com a aplicação de tensões normais altas provavelmente levaria a ruptura do solo.

A Tabela 4.17 mostra os fatores de segurança pelo método do talude infinito considerando uma zona potencial de ruptura de 0,9 m e uma altura de nível d'água de 0,4 m. Foram considerados dois taludes hipotéticos, um com inclinação de 30^0 e outro com inclinação de 45^0. Comparando os resultados dos fatores de segurança do talude sem vegetação e com cobertura de vetiver verificaram-se fatores de segurança menores no talude sem vegetação, apenas para a inclinação de 45^0 considerando a condição saturada, o fator de segurança do talude com plantio de vetiver foi menor do que o fator de segurança do talude sem cobertura vegetal, observando um aumento de 14%. Observa-se também, assim como na simulação anterior, que os menores valores de fatores de segurança representam a condição de saturação do solo do talude.

Tabela 4.17 – Fatores de segurança das diferentes análises do método de talude infinito considerando a zona potencial de ruptura de 0,9 m

Análise	**Fator de Segurança do talude sem vegetação**		**Fator de segurança do talude com 7 anos de plantio de vetiver**	
	Inclinação de 30^0	**Inclinação de 45^0**	**Inclinação de 30^0**	**Inclinação de 45^0**
Sem presença de água	3,43	2,80	5,25	3,42
Talude saturado	3,23	2,71	3,41	2,36
Nível d'água acima da superfície potencial de ruptura	3,40	2,81	4,44	2,96

Comparando as duas simulações dos taludes hipotéticos (Tabela 4.15 e Tabela 4.17) observa-se que os fatores de segurança são maiores considerando uma menor zona potencial de ruptura. Isso indica que o vetiver pode ser utilizado como uma técnica eficiente no processo de estabilização de taludes de rupturas rasas e quanto menor a zona potencial de ruptura maior será a estabilização oferecida pelas raízes do vetiver.

Na Tabela 4.18 são apresentadas as resistências ao cisalhamento de solos pelo método do talude infinito das diferentes análises de estabilidade considerando a zona potencial de ruptura de 0,9 m e altura do nível d'água de 0,4 m.

Tabela 4.18 – Resistência ao cisalhamento de solo dos taludes hipotéticos com zona potencial de ruptura de 0,9 m

Análise	**Resistência ao cisalhamento (kPa): Talude sem vegetação**		**Resistência ao cisalhamento (kPa): Talude com 7 anos de plantio de vetiver**	
	Inclinação de 30^0	**Inclinação de 45^0**	**Inclinação de 30^0**	**Inclinação de 45^0**
Sem presença de água	27,08	25,49	42,55	32,03
Talude saturado	24,60	23,84	27,34	21,90
Nível d'água acima da superfície potencial de ruptura	25,98	24,75	35,79	27,53

Comparando as resistências ao cisalhamento obtidas pelas duas simulações dos taludes hipotéticos (Tabela 4.16 e Tabela 4.18) verifica-se que as resistências ao cisalhamento para a menor zona potencial de ruptura (0,9 m) são menores em comparação com a zona potencial de ruptura mais profunda (1,5 m), porém essa diferença é pequena. Isso ocorre, pois quanto mais próximo da superfície, menores são as tensões normais aplicadas e menor é o confinamento do solo.

Comparando-se as resistências ao cisalhamento obtidas pelas simulações do talude (Tabela 4.18) e a resistência ao cisalhamento obtida por faixa de tensões normais aplicadas (Tabela 4.13), as resistências ao cisalhamento na simulação nos taludes são menores, o que indica mais uma vez a necessidade de ensaios para tensões normais mais baixas.

A Figura 4.24 mostra o efeito das raízes do vetiver na melhoria da estabilidade do talude, quando comparada à mesma condição de um talude sem vegetação e com sete anos de plantio de vetiver, em função da inclinação do talude e do fator de segurança. Foi considerada uma zona potencial de ruptura de 1,5 m, sendo a profundidade

considerada limite para atuação do efeito da vegetação. Foram analisadas duas situações: condição insaturada do solo e condição saturada do solo. É notado um aumento do fator de segurança do talude cultivado com vetiver o que proporciona uma estabilidade do talude.

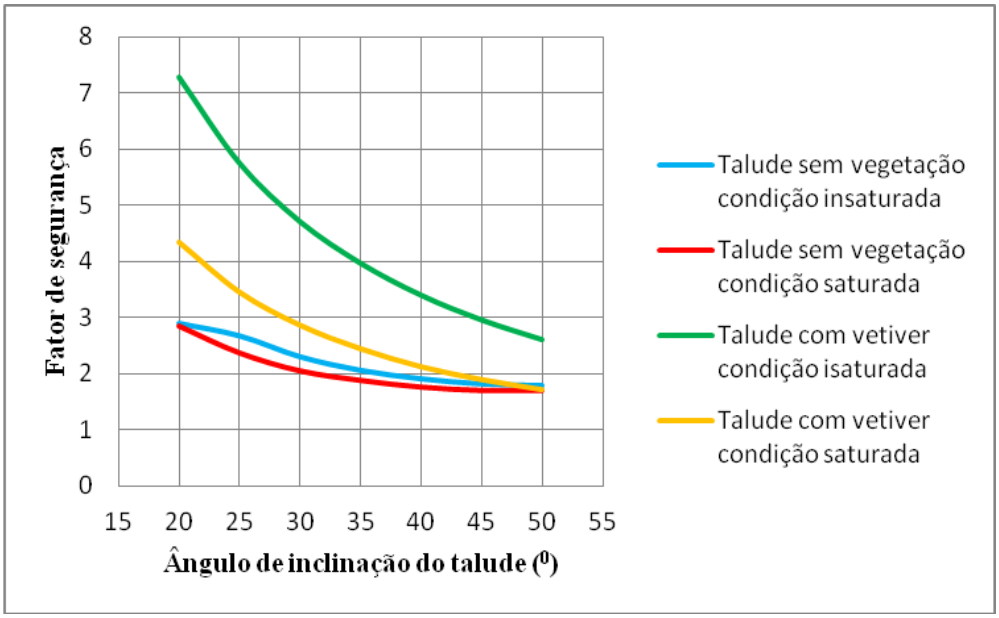

Figura 4.24 – Comparação do fator de segurança de acordo com os ângulos de inclinação dos taludes sem vegetação e cultivado com vetiver considerando zona potencial de ruptura de 1,5 m

A Figura 4.25 apresenta o efeito das raízes do vetiver na melhoria da estabilidade do talude, quando comparada à mesma condição de um talude sem vegetação e com sete anos de plantio de vetiver, em função da inclinação do talude e do fator de segurança, considerando agora uma zona potencial de ruptura de 0,9 m.

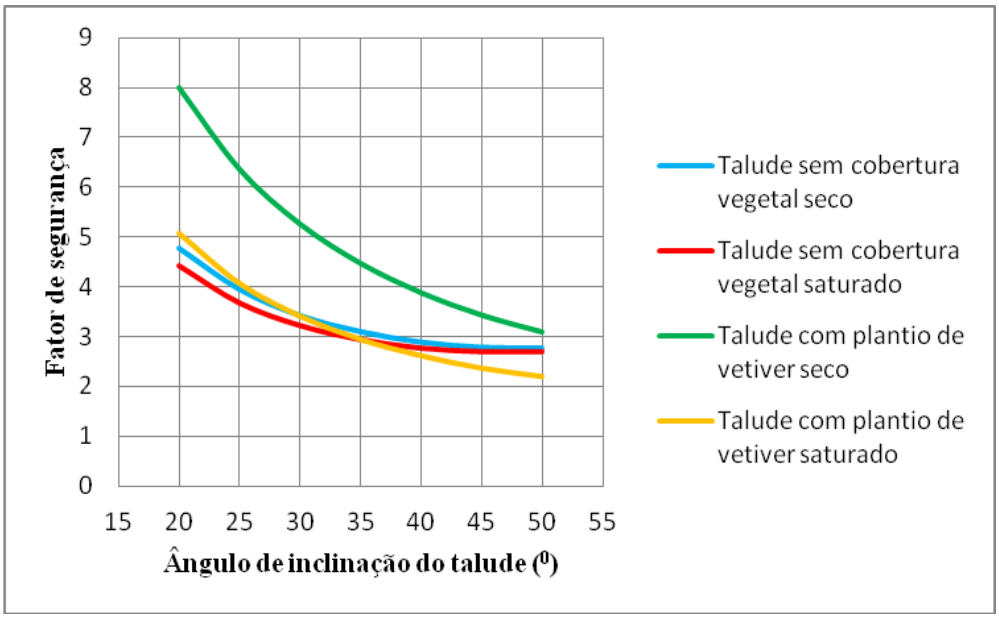

Figura 4.25 – Comparação do fator de segurança de acordo com os ângulos de inclinação dos taludes sem vegetação e cultivado com vetiver considerando zona potencial de ruptura de 0,9 m

Observa-se pela Figura 4.25 que para inclinações do talude acima de 35^0 o talude cultivado com vetiver considerando uma condição saturada apresenta os menores fatores segurança o que indica que o vetiver na condição saturada do solo deve ser utilizado como técnica de estabilização de talude para taludes com inclinação até 35^0. Já o talude cultivado com vetiver na condição seca apresentou os maiores valores de fatores de segurança em todas as inclinações de talude analisadas.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES DA PESQUISA

As análises desenvolvidas neste trabalho permitem estabelecer as seguintes conclusões:

- A presença de raízes do vetiver no solo proporciona um incremento de coesão aparente ao solo;

- O vetiver na idade de três anos de plantio aumenta a resistência ao cisalhamento do solo, pelo aumento dos parâmetros de resistência (intercepto de coesão e ângulo de atrito interno) podendo ser considerada uma planta eficiente no reforço de solo em longo prazo.

- Foi observado que o vetiver, apesar de apresentar segundo referências de literatura raízes que podem chegar até 3 metros de profundidade, no local de coleta de amostras as raízes do vetiver na idade de sete anos chegavam até aproximadamente 1 metro de profundidade e nesta profundidade ficou evidenciado o aumento da resistência ao cisalhamento de solos com o plantio de vetiver. A profundidade das raízes do vetiver deve estar relacionada ao tipo de solo, idade da planta, condições climáticas, dentre outros fatores.

- Na simulação realizada nos taludes hipotéticos o vetiver proporcionou uma estabilização pela verificação do aumento do fator de segurança em todas as situações analisadas, inclusive o talude com cultivo de vetiver na condição saturada tem um maior fator de segurança do que o talude sem vegetação na condição seca.

- Em relação ao aumento de resistência ao cisalhamento ficou comprovada a necessidade de mais ensaios de cisalhamento direto para menores valores de tensões normais aplicadas, pois simulariam melhor a situação de campo uma vez que nas simulações realizadas nos taludes hipotéticos a resistência ao cisalhamento foi menor do que a resistência ao cisalhamento do solo para uma tensão normal aplicada de 25 kPa.

- O vetiver é uma planta eficiente no reforço de solos e estabilização de taludes, porém consiste de uma técnica de estabilização para superfícies de rupturas rasas e depois de três anos de plantio, o que neste intervalo pode ocorrer ruptura.

- É importante ressaltar que os resultados das análises realizadas neste estudo estão limitados a região onde foram coletadas as amostras e a utilização destes dados só é possível por estimativas e cálculos aproximados.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Ao longo desta pesquisa avaliou especificamente a contribuição oferecida ao solo pelas raízes do vetiver por meio de ensaios de cisalhamento direto para verificar o aumento da resistência ao cisalhamento do solo. Neste sentido foram consideradas algumas hipóteses e descartadas outras que podem constituir novas frentes de pesquisas, dentre elas são propostas as seguintes abordagens:

- Realização de ensaios de cisalhamento direto com valores de tensões normais menores que 25 kPa para melhor simulação da situação real de campo, assim como em diferentes tipos de solo.

- Realização de ensaios de cisalhamento direto com corpos de prova maiores, bem como um maior número de ensaios com vetiver de diferentes idades, principalmente acima de 4 anos de plantio;

- Realização de ensaios triaxiais que oferecem melhores resultados para averiguar a resistência ao cisalhamento do solo das raízes do vetiver.

- Avaliar a quantidade de raiz do vetiver e relacionar com a resistência ao cisalhamento do solo;

- Realizar uma comparação em relação ao custo-benefício do vetiver com outras técnicas de estabilização de taludes para superfícies de rupturas rasas, determinando a viabilidade do uso do vetiver;

- Realização de estudos que visem o uso do vetiver para outros fins, como fitorremediação, reabilitação de áreas contaminadas e controle de efluentes.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.508**: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.459:** Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.180:** Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7.181:** Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9.604:** Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Rio de Janeiro, 1986

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **MB 3336:** Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional. Rio de Janeiro, 1990.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6.502**: Solos e Rochas. Rio de Janeiro, 1995.

ALMEIDA, E. A. P. **Avaliação do Potencial da Espécie Vetiveria Zizanioides na Fitorremediação de Metais-Traço Presentes em Ambientes Aquáticos**. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011. 92 p. Dissertação de Mestrado.

ALVES, J. C.; SOUZA, A. P.; PORTO, M. L. ARRUDA, J. A.; TOMPSON JÚNIOR, U. A.; SILVA, G. B.; ARAUJO, R. C.; SANTOS, D. Absorção e Distribuição de Chumbo em Plantas de Vetiver, Jureminha e Algaroba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 32, p. 1329-1336, 2008.

ARAUJO, G.; ALMEIDA, J.; GUERRA, A. **Gestão ambiental de áreas degradadas**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005. 320 p.

ARVIDSSON, J.; TRAUTNER, A.; VAN DEN AKKER, J.J.H. & SCHJONNING, P. Subsoil compaction caused by heavy sugarbeet harvesters in southerm Sweden. II. Soil displacement during whecling and model computations of compaction. **Soil and Tillage Research**, v. 60, p. 79-89, 2001.

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

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E1131:** Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry, USA, 2008.

AYERS, P.D. & PERUMPRAL, J.V. Moisture and density effect on cone index. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng**., n. 2, p. 169-1172, 1982.

AZEVEDO, M. A. A. **Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa** – MG, Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 169p. Dissertação de Mestrado.

BAETS, S.; POESEN, J.; REUBENS, B.; WEMANS, K.; De BAERDEMAEKER, J.; MUYS, B. Root tensile strength and root distribution of typical Mediterranean plant species and their contribution to soil shear strength. **Plant Soil**, Belgium, n. 305, p. 207-226, 2008.

BARKER, D. H. **Vegetation and Slopes: Stabilisation, Protection and Ecology**, London: Thomas Telford, 1994, 221p.

BOENI, M. **Comportamento mecânico de solos escarificados em função do teor de água e pressão de inflação dos pneus do trator**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 99p. Dissertação de Mestrado.

BRACKEN, N. & TRUONG, P.N. Application of Vetiver Grass Technology in the stabilization of road infrastructure in the wet tropical region of Australia. In: SECOND INTERNATIONAL VETIVER CONFERENCE, 2., 2001, Thailand. **Anais…,** Thailand: The Vetiver Network, 2001, p. 448-452.

BRAIDA, J. A. **Matéria orgânica e resíduos vegetais na superfície do solo e suas relações com o comportamento mecânico do solo sob plantio direto**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 2004. 126p. Tese de Doutorado.

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; DALVAN, J.; REINERT, D. J. & Veiga, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um nitossolo e um argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, n. 14, p. 131-139, 2010.

BUENO, M. T. N. S. **Análise da Degradação de alguns Geossintéticos em Contato com Fluidos Agressivos.** Brasília, Universidade de Brasília, 2007. 229p. Tese de doutorado.

BURROUGHS JR, E.R. & THOMAS, B.R. Declining Root Strength in Douglas-fir after Felling as a Factor in Slope Stability. **USDA Forest Service Research Paper INT-190**, Ogden, Utah. 1977.

CARVALHO, J.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO, M.T.S. **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. 1 ed. Brasília: FINATEC, 2006, 464 p.

CAZZUFFI, D.; CORNEO, A.; CRIPPA, E. Slope stabilisation by perennial "gramineae" in Southern Italy: plant growth and temporal performance. **Geotechnical and Geological Engineering**, Italy, n. 24, p. 429-447, 2006.

CHAULYA, S. K.; SINGH, R. S.; CHAKRABORTY, M. K. & SRIVASTAVA, B. K. Quantification of stability improvement of a dump through biological reclamation. **Geotechnical and Geological Engineering**, n. 18, p.193-207, 2000.

CHEN, H.M. Vetiver for Metal Mine Rehabilitation and Sea Water Tolerance. **Annual Report, Vetiver Development Foundation**, China, n. 3, p. 193-201, 1999.

CHENG, H.; XIAOJIE, Y.; AIPING, L.; HENGSHENG, F.; MING, W. A Study on the Performance and Mechanism of Soil-reinforcement by Herb Root System. In: THIRD INTERNATIONAL VETIVER CONFERENCE, 3. 2003, China. **Anais…,** China: The Vetiver Network, 2003, p. 397-402.

COELHO, A. T. **Efeitos da vegetação herbácea associada a técnicas de bioengenharia de solos no controle de erosão em margens de áreas de reservatório da UHE Volta Grande, nos municípios de Água Comprida/MG e Miguelópolis/SP**. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 184 p. Tese de Doutorado.

COUTO, L.; GONÇALVES, W.; COELHO, A. T.; PAULA, C. C.; GARCIA, R. AZEVEDO, R. F.; LOCATELLI, M. V.; ADVÍNCULA, T. G. L.; BRUNETTA, J. M. F.; COSTA, C. A. B.; GOMIDE, L. C.; MOTTA, P. H. Técnicas de Bioengenharia para Revegetação de Taludes no Brasil. **Boletim Técnico CBCN,** Viçosa, n.1, 2010.

DALTON, P. A., SMITH, R. J. AND TRUONG, P. N. V. (1999). Vetiver grass hedges for erosion control on a cropped floodplain, hedge hydraulics. **Agric. Water Management**, n.4, p. 91-104, 1999.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. 6. ed. São Paulo, Thomson Learning, 2007. 562p.

DAVIES, P. Influence of organic matter content, moisture status and time after reworking on soil shear strength**. Journal of Soil Science**, n. 36, p. 299-306, 1985.

DU, L. V. & TRUONG, P. Vetiver System for Erosion Control on Drainage and Irrigation Channels on Severe Acid Sulphate Soil in Southern Vietnam**. In:** THIRD INTERNATIONAL VETIVER CONFERENCE, 3. 2003, China. **Anais…,** China: The Vetiver Network, 2003, p. 361-377.

EKWUE, E. I. Organic matter effects on soil strength properties. **Soil & Tillage Research**, n. 16, p. 289-297, 1990.

EKWUE, E.J. & STONE, R.J. Organic matter effects on the strength properties of impacted agricultural soils. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng**., n. 38, p. 357-365, 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Fertilidade de Solos. **Interpretação de resultados de análise do solo.** 2000**.** Disponível em: http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Milho/CultivodoMilho/feranalise.htm. Acesso em 10 de janeiro de 2013.

ENDO, T. & TSURUTA, T. The Effect of Tree Roots on the Shearing strength of Soil. **Annual Report, Forest Experiment Station**, Hokkaido, n.6, p. 133-145, 1969.

FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York, John Wiley, 1993. 517p.

FIORI, A. P. Fatores que influem na estabilidade de vertentes e no movimento de massa em encostas. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 43, p. 7-24, 1995.

FIORI, A. P. & BOCHARDT, N. Influência da Vegetação da Estabilidade de Taludes Naturais. Curitiba: **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 45. P. 43-58. 1997.

FIORI, A. P. & CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas, aplicações na estabilidade de taludes**. 2.ed. Curitiba, Editora UFPR, 2009. 602 p.

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

GOLDSMITH, W. Soil strength reinforcement by plants. In: PROCEEDINGS OF ANNUAL CONFERENCE, INTERNATIONAL EROSION CONTROL ASSOCIATION, 2006, California. **Anais…**, California, 2006, p.186-198.

GÓMEZ, A. M. **Control de la erosión hídrica**. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 1990. 83 p.

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

GRAY, D. H. Influence of the vegetation on the stability of slopes. In: IINTERNATIONAL CONFERENNCE ON TH INTERACTION OF VEGETATION WITH BATURAL AND FORMED SLOPES, 2., 1995, London. **Anais...,** London: Thomas Telford, 1995, p. 2-25.

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

GRAY, D. H. & SOTIR R. B. **Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control**. 1.ed. Canada, John Wiley & Sons, 1996. 378p.

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

GUIDICINI, G. & NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes naturais e de Escavação**. São Paulo: Editora da USP, 1984. p. 216.
HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing**. 2.ed. New York: John Wiley, 1994. 440p.

HENGCHAOVANICH, D. **Vetiver Grass for slope stabilization and erosion control**. 2.ed. Thailand: Pacific Rim Vetiver Network, 1998, 28p.

HENGCHAOVANICH, D. & NILAWEERA, N. An assessment of strength properties of vetiver grass roots in relation to slope stabilization. In: THE FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON VETIVER, 1., 1996. Bangkok. **Anais…**, Bangkok: The Vetiver Network, 1996, p. 87-94.

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

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

LIRA, D. C. **Desenvolvimento de uma Metodologia para Caracterização de Amostras de Sedimentos (Rio Jundiaí/RN)**. Rio Grande do Norte, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008. 152 p. Dissertação de Mestrado.

LOPES, M. H. Capim Vetiver. Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas – SBRT**. REDETEC – Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro, 2005. 4p.

MADRUGA, E. L.; SCHELE, E. L. & SALOMÃO, F. X. T. (2007). **Uso do capim vetiver (sistema vetiver) na estabilização de taludes de rodovias, proteção de drenagens e de áreas marginais**. Disponível em: http://www.iwfplanet.com/arquivos/Pesquisa_Vetiver(1).pdf. 25p. Acesso em outubro de 2009.

MARENGO, E. Investigation of Anthropic Effects Connected With Metal Ions Concentration, Organic Matter and Grain Size in Bormida River Sediments. **Analytica Chimica Acta**, v. 560, p. 172-183, 2006.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2010. 216p.

McKYES, E.; NYAMUGAFATA, P. & NYAMAPFENE, K.W. Characterization of cohesion, friction and sensitivity of two hardsetting soils from Zimbabwe. **Soil & Tillage Research,** n. 29, p. 357-366, 1994.

MENDONÇA, A. & CARDOSO, A. Contribuição da vegetação para a estabilidade de taludes. Parte II – Estudo de um caso. **Geotecnia**, Portugal, n. 83, p. 5-26, 1998.

OHU, O.J.; RAGHAVAN, G.S.V. & McKYES, E. Peat moss effect on the physical and hydraulic characteristics of compacted soils. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng**., n. 28, p. 420-424, 1985.

OHU, O.J.; RAGHAVAN, G.S.V.; McKYES, E. & MEHUYS, G. Shear strength prediction of soils with varying added organic matter contents. **Trans. Am. Sci. Agric. Eng.**, n. 29, p. 351-355, 1986.

O'LOUGHLIN, C. L. Effectiveness of Induced Forets Vegetation for Protecting Agaisnt Landslides and Erosion in New Zealand's Steeplands. In: SYMPOSIUM ON EFFECTS OF FOREST LAND USE ON EROSION AND SLOPE STABILITY, 1994. Hawaaii. **Anais...,** Hawaaii, 1994. P. 139-147.

OROZCO, M. M. D. **Caracterização da Gramínea Vetiveria Zizanioides para Aplicação na Recuperação de Áreas Degradadas por Erosão**. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. 96p. Dissertação de Mestrado.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução a Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3ª edição. . Rio de Janeiro: Terratek, 2007. 391p.

PEREIRA, A. R.. Uso do Vetiver na Estabilização de taludes e Encostas. **Boletim Técnico**. Belo Horizonte: Editora FAPI Ltda., 2006. 22p.

PEREIRA, A. R. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle da erosão**. Belo Horizonte: Editora Fapi Ltda., 2008. 150 p.

PIMENTA JÚNIOR, I. **Caracterização Geotécnica e Análise de Estabilidade de taludes de Mineração em Solos da Mina de Capão Xavier**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2005. 162p. Dissertação de Mestrado.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos, em 16 aulas**. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2000. 368p.

PINTO, L. V. A.; SILVA, S.; RESENDE, L. A.; OLIVEIRA, T. M. Seleção de Espécies para Recuperação de Áreas de Lixão. In: I CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL**,** 2010. São Paulo. **Anais...**, São Paulo: IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2010, p. 1-5.

PORTOCARRERO, H. **Avaliação do Efeito de Técnicas de Bioengenharia em Parâmetros Hidrossedimentológicos Utilizando Instrumentação Automatizada**. Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2009. 678p. Tese de Doutorado.

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

SCHJONNING, P. Soil strength as influenced by texture, water content and soil management. **Soil and Tillage Research**, n. 12, p. 277-283, 1991.

SILVA, A. J. N. & CABEDA, M. S. V. Influência de diferentes sistemas de uso e manejo na coesão, resistência ao cisalhamento e óxidos de Fe, Si e Al em solo de tabuleiro costeiro de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 29, p. 447-457, 2005.

SOANE, B. D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil & Tillage Research**, n.16, p. 179-201, 1990.

SOARES, M. C. C. Análise Geoquímica dos Sedimentos do Fundo do Arroio do Salso. **Pesquisas em Geociências**, v.3. p. 139-150, 2004.

SOARES, P. C.; SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Raciocínio Probabilítico aplicado à susceptibilidade de escorregamentos: um estudo de caso em Campo Largo, Paraná, Brasil. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v. 51, p. 59-76, 2002.

SOUZA, R. X.; PEREIRA, M. W. M.; PINTO, L. V. A.; FERREIRA, J. A. Análise da Eficiência do Capim Vetiver para Proteção de Encostas: Quantificação da Perda do Solo por Erosão Hídrica. In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 2011. Londrina. **Anais...**, Londrina: IBEAS – Instituto Brasileiro de 2 Estudos Ambientais, 2011, p. 1-5.

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

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

TABALIPA, N. L. & FIORI, A. P. Influência da Vegetação na Estabilidade de Taludes na Bacia do Rio Ligeiro (PR). **Revista Geociências**, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 387 – 399. 2008.

TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics**. New York: John Willey & Sons, 1948. 700p.

TENGBETH, G. T. **The Effect of Grass Cover on Bank Erosion**. Silso e College, Cranfield Institute of Tecnology, 1989. 234p. PhD Thesis

TERZAGHI, K. Mecanismos dos Escorregamentos de Terra. **Resista Politécnica**, São Paulo, n. 167, 1952. 41p.

THERMANN, K.; GAU, C.; TIEDEMANN, J. Shear strength parameters from direct shear tests – influencing factors and their significance. In: IAEG – INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT: ENGINEERING GEOLOGY FOR TOMORROW'S CITIES. 10th, 2006, Nottingham, **Anais…,** Nottingham: The Geological Society of London, 2006, p. 215-222.

TRUONG, P. **Vetiver System for Mine and Quarry Rehabilitation**. Australia: Veticon Consulting, 2005. 21p.

TRUONG, P.; MASON, F.; WATERS, D.; AND MOODY. P. Application of VGT in offsite pollution control. In: TRAPPING AGROCHEMICAL AND NUTRIENTS IN AGRICULTURAL LANDS PROCEEDINGS, 2002. Bangkok. **Anais…**, Bangkok: ORDPB, 2002, p. 296-302.

TRUONG, P. Vetiver Propagation: Nurseries and Large Scale Propagation. In: WORKSHOP ON POTENTIAL APPLICATION OF THE VS IN THE ARABIAN GULF REGION, 2006. Kuwait City. **Anais…**, Kuwait City, 2006, p.103-111.

TRUONG, P.; VAN, T. T. & PINNERS, E. **Vetiver system applications: technical reference manual**, 2.ed. Vietnam: The Vetiver Network International, 2008. 127p.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**, 1.ed. São Paulo: MCgraw-Hill do Brasil, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1977. 509p.

WAGNER, S., TRUONG, P, VIERITZ, A. AND SMEAL, C. Response of Vetiver Grass to Extreme Nitrogen and Phosphorus Supply. In: PROC. THIRD INTERNATIONAL VETIVER CONFERENCE, 2003. China. **Anais…**, China, 2003, p. 213-219.

WALDRON, L. J. The Shear Resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil. J. **Soil Sci. Soc. Am.,** n. 41, p. 843-849, 1997.

WALKER, D. **How to Select, Estabilish and Use Plants for Erosion Control**. IECA – Phyladelphia, Pensylvania, USA: International Erosion Control Association, 2004. 75 p.

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

WU, T. H.; BEAL, P. E.; LAN, C. In Situ Shear of Soil Root Systems. **Journal Geotechnical Engineering**, New York, v. 114, n.12, p. 176-194, 1988.

WU, T. H. **Slope Stabilization**. In: MORGAN, R. P. C.; RICKSON, R. J. (Ed). Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach. London: E & FN SPON, 1996, 274p.

XIA, H. P. A.; LIU, S. Z. AND HE, D. Q. Application of the Vetiver Grass Bio-engineering Technology for the Prevention of Highway Slippage in Southern China. In:

INTERNATIONAL VETIVER WORKSHOP, 1999. China. **Anais…**, China, 1999. p. 93-98.

YAGI, R.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; BARBOSA, J.C. Organic matter fractions and soil fertility under the influence of liming, vermicompost and cattle manure. **Scientia Agricola**, v.60, p.549-557, 1994.

ZHANG, H.Q. & HARTGE, K.H. Cohesion in unsaturated sandy soils and the influence of organic matter. **Soil Technology**, n. 3, p. 311-326, 1990.

ZIEMER, R. R. Roots and Stability of Forested Slopes. **Int. Assoc. Hidrol. Sci.**, n. 132, p. 343-361, 1981.