

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO**

Aline Gasparoni dos Santos

**Utilização do capim Vetiver na estabilização de taludes situados em áreas de
risco geológico no município de Juiz de Fora - MG**

Juiz de Fora

2024

Aline Gasparoni dos Santos

**Utilização do capim Vetiver na estabilização de taludes situados em áreas de
risco geológico no município de Juiz de Fora - MG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído.

Orientador: Dr. César Henrique Barra Rocha

Coorientadora: Dr^a. Tatiana Tavares Rodriguez

Juiz de Fora

2024

Imprimir na parte inferior, no verso da folha de rosto a ficha disponível em:

<http://www.ufjf.br/biblioteca/servicos/usando-a-ficha-catalografica/>

Aline Gasparoni dos Santos

**Utilização do capim Vetiver na estabilização de taludes situados em áreas de
risco geológico no município de Juiz de Fora - MG**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído.

Aprovada em 06 de setembro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Dr. César Henrique Barra Rocha - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dra. Tatiana Tavares Rodriguez - Coorientadora
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Fábio de Oliveira Sanches
Universidade Federal de Juiz de Fora

Dr. Christian Ricardo Ribeiro
Universidade Federal do ABC

À vovó Rita (*in memoriam*) que sempre foi
uma fonte inesgotável de amor e
sabedoria.

AGRADECIMENTOS

Ao criarmos expectativas em relação a um determinado horizonte, todo percurso em busca desse sonho é composto por muitos encontros com pessoas especiais, que nos fortalecem e nos impulsionam a avançarmos em nosso caminho. Sendo assim, gostaria de agradecer primeiramente a Deus e a todos que fizeram parte dessa jornada.

Sinto sua presença a todo instante, Deus. Obrigada por cuidar tão bem de mim, por sempre renovar a minha fé e por tantas bênçãos concedidas, sendo a maior delas a minha família, pessoas às quais dedico essa conquista.

Gratidão infinita a meus pais, por serem meu alicerce, por viverem comigo todos os meus sonhos e por não medirem esforços para me verem feliz e realizada.

A Alícia, minha princesinha tão amada. Cada vez que seu sorriso se abre, é como se todas as preocupações e desafios do meu dia desaparecessem. Não importa o quão difícil tenha sido meu dia, o seu sorriso tem o poder mágico de transformar tudo. Obrigada por trazer tanta alegria para minha vida.

Ao Fábio, por ser o porto seguro do meu coração. Obrigada por caminhar ao meu lado, por me incentivar e me apoiar em todos os meus sonhos.

Ao professor e orientador, Dr. César Henrique Barra Rocha, cuja orientação não se limitou apenas aos aspectos acadêmicos, mas também foi fonte de inspiração e motivação. Sua experiência e amizade foram fundamentais para a concretização deste estudo.

A minha coorientadora, Dr^a. Tatiana Tavares Rodriguez, exemplo de dedicação e real vocação pela docência. Obrigada por me acolher com tanto carinho, pela ajuda em campo, no laboratório, na escrita e por ter me apresentado “os seus meninos”. Todos os seus ensinamentos foram essenciais para ampliar minha perspectiva e enriquecer meu aprendizado. Você é um exemplo de pessoa e profissional, obrigada por tanto.

Aos alunos da iniciação científica, Gabriel e João Pedro, sempre atenciosos e peças fundamentais na realização dos ensaios. Obrigada pelo tempo que se dedicaram a essa pesquisa e por toda ajuda. Vocês merecem todo sucesso e tenho certeza que chegarão longe.

Ao meu grande amigo, Sr. Francisco, que esteve ao meu lado desde o plantio das mudas e vibrava comigo em cada etapa concluída. Sua ajuda e amizade foram fundamentais nesse processo.

À Secretaria de Educação por disponibilizar o local de plantio das mudas.

Aos professores da banca de defesa, Dr. Fábio Sanches e Dr. Christian Ribeiro, que estiveram comigo desde a qualificação. Agradeço imensamente pela disponibilidade e por todas as significativas contribuições.

A todos os funcionários do laboratório de solos da UFJF e do PROAC, em especial ao João Paulo, sempre tão solícito e prestativo.

A todos que contribuíram de alguma forma, seja através de palavras, conselhos ou que ficaram na torcida, minha gratidão.

“Hoje é essencial que todos conheçam os perigos, calculáveis ou não, que ameaçam o ser humano. Sejam eles naturais ou provocados pela ação do homem, os desafios ao combate dos riscos demandam grande atenção da sociedade”
(Yvette Veyret)

RESUMO

Os deslizamentos também decorrem devido à expansão contínua e desordenada das cidades, levando a construções em locais onde a topografia é acidentada, que, por si só, apresentam grandes riscos de deslizamentos, os quais podem causar enormes prejuízos, devastação de bens públicos e privados, interdição de vias e até mortes. Tais deslizamentos ocorrem em virtude da baixa resistência dos materiais que compõem o talude, admitindo o deslizamento devido à força gravitacional, ou ainda devido ao acréscimo de esforços atuantes que ultrapassam o limite de resistência ao cisalhamento. Mediante essa situação, pode-se identificar a necessidade da utilização de mecanismos de segurança que possam diminuir e/ou eliminar tais riscos, oferecendo um arranjo estável e elevando consideravelmente as forças de resistência do maciço de terra. Dessa forma, o escopo deste trabalho é avaliar os parâmetros de resistência do solo após seis e doze meses de plantio do capim Vetiver em um talude localizado em uma área de risco geológico muito alto (R4) no município de Juiz de Fora/MG. Para tal, utilizou-se uma abordagem quali-quantitativa, por meio de pesquisa bibliográfica e experimental. Os resultados evidenciaram que as amostras contendo raízes apresentaram maiores valores para o ângulo de atrito interno em comparação ao solo sem raiz, especialmente após doze meses de plantio. Foi observado que o capim Vetiver pode melhorar substancialmente a capacidade do solo de resistir ao cisalhamento, mostrando o quão promissor pode ser o uso da espécie como técnica de estabilização de taludes, a fim de prevenir a ocorrência desses eventos adversos.

Palavras-chave: Deslizamentos. Resistência dos solos. Capim-vetiver. Bioengenharia.

ABSTRACT

Landslides also occur due to the continuous and disorderly expansion of cities, leading to construction in places where the topography is rugged, which, in itself, present great risks of landslides, which can cause enormous losses, devastation of public and private assets, road closures and even deaths. Such landslides occur due to the low resistance of the materials that make up the slope, allowing slippage due to gravitational force, or even due to the increase in acting efforts that exceed the shear resistance limit. In this situation, it is possible to identify the need to use safety mechanisms that can reduce and/or eliminate such risks, offering a stable arrangement and considerably increasing the resistance forces of the earth mass. Therefore, the scope of this work is to evaluate the soil resistance parameters after six and twelve months of planting Vetiver grass on a slope located in an area of very high geological risk (R4) in the municipality of Juiz de Fora/MG. To this end, a qualitative-quantitative approach was used, through bibliographic and experimental research. The results showed that samples containing roots presented higher values for the internal friction angle compared to soil without roots, especially after twelve months of planting. It was observed that Vetiver grass can substantially improve the soil's ability to resist shear, showing how promising the use of the species can be as a slope stabilization technique, in order to prevent the occurrence of these adverse events.

Keywords: Slips. Soil resistance. Vetiver grass. Bioengineering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1	– Definição dos tipos de movimentos de massa.....	26
Figura 1	– Esquema de um deslizamento do tipo planar.....	27
Figura 2	– Esquema de um deslizamento do tipo rotacional.....	28
Figura 3	– Classificação das áreas de risco.....	30
Figura 4	– Mapeamento das áreas de risco do município de Juiz de Fora/MG....	31
Quadro 2	– Descrição de algumas medidas estruturais e não estruturais.....	32
Quadro 3	– Vantagens dos métodos de bioengenharia.....	34
Quadro 4	– Características do capim Vetiver.....	35
Figura 5	– Touceira do capim Vetiver após 20 meses de plantio.....	36
Figura 6	– Raízes do capim Vetiver.....	37
Figura 7	– Ilustração do comportamento do capim Vetiver em áreas com potencial de ruptura	38
Figura 8	– Envoltória representada pelo critério de Mohr-Coulomb.....	43
Figura 9	– Aparelho de cisalhamento direto.....	44
Figura 10	– Esquema do equipamento de cisalhamento direto.....	44
Figura 11	– Classificação da pesquisa.....	46
Figura 12	– Mapa pedológico de Juiz de Fora com as localidades do talude de estudo e dos solos utilizados no plantio das garrafas PET.....	49
Figura 13	– Mudanças plantadas em garrafas PET após um ano.....	50
Figura 14	– Representação esquemática do plantio das mudas do capim Vetiver no talude de estudo	51
Figura 15	– Exemplares das mudas de capim Vetiver.....	52

Figura 16	– Retirada da amostra deformada de solo na profundidade 0 a 30 cm	54
Figura 17	– Amostras indeformadas do solo desnudo (A) e do solo com a raiz do capim (B) sendo coletadas.....	55
Figura 18	– Localização das amostras retiradas em campo.....	56
Figura 19	– Preparo, moldagem e montagem da caixa de cisalhamento.....	58
Figura 20	– Amostra sendo preparada para saturação.....	58
Figura 21	– Curva granulométrica.....	62
Figura 22	– DRX do talude lateral na profundidade 0 a 30 cm.....	68
Figura 23	– DRX do talude lateral na profundidade 30 a 60 cm.....	69
Figura 24	– Curvas Tensão cisalhante no SD x Deslocamento Horizontal.....	71
Figura 25	– Curvas Tensão cisalhante no solo com raízes após seis meses de plantio x Deslocamento Horizontal.....	72
Figura 26	– Curvas Tensão cisalhante no solo com raízes após doze meses de plantio x Deslocamento Horizontal.....	72
Figura 27	– Deslocamento horizontal x Deslocamento vertical no solo SD.....	73
Figura 28	– Deslocamento horizontal x Deslocamento vertical no solo com raízes após seis meses de plantio.....	74
Figura 29	– Deslocamento horizontal x Deslocamento vertical no solo com raízes após doze meses de plantio.....	74
Figura 30	– Tensão cisalhante x Tensão normal no SD.....	75
Figura 31	– Tensão cisalhante x Tensão normal no solo com raízes após seis meses de plantio.....	76
Figura 32	– Tensão cisalhante x Tensão normal no solo com raízes após doze meses de plantio.....	76

Figura 33	– Tensão cisalhante x Tensão normal para todos os ensaios.....	77
Figura 34	– Tensão cisalhante x Tensão normal e envoltórias médias.....	78
Figura 35	– Posições típicas da raiz no corpo de prova antes do ensaio: raiz concêntrica e vertical (a) e raiz inclinada (b).....	80
Figura 36	– Índice pluviométrico referente ao primeiro ano de plantio.....	81
Figura 37	– Desenvolvimento do capim Vetiver após um ano de plantio no talude de estudo.....	82
Figura 38	– Crescimento limitado das raízes no solo 2 e 4.....	85
Figura 39	– Desenvolvimento do sistema radicular em cada muda.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Classificação quanto à velocidade do movimento de massa.....	24
Tabela 2	– Classificação quanto à profundidade da massa movimentada.....	25
Tabela 3	– Aumento da resistência ao cisalhamento do solo com o capim Vetiver de acordo com a profundidade.....	38
Tabela 4	– Resistência de algumas raízes à tensão de cisalhamento.....	41
Tabela 5	– Parâmetros de resistência x profundidade das raízes.....	45
Tabela 6	– Resultados da caracterização física da amostra do talude.....	61
Tabela 7	– Classificação do solo do talude em função do diâmetro das partículas	61
Tabela 8	– Resultados da caracterização física dos solos.....	63
Tabela 9	– Classificação dos solos em função do diâmetro das partículas.....	63
Tabela 10	– Índices físicos das amostras dos solos das garrafas PET.....	63
Tabela 11	– Resultados da análise química dos solos.....	64
Tabela 12	– Resultados da análise química dos solos.....	65
Tabela 13	– Resultados da análise química dos solos.....	65
Tabela 14	– Resultado analítico de nitrogênio.....	66
Tabela 15	– Índice físico dos corpos de prova.....	70
Tabela 16	– Índice físico dos corpos de prova.....	70
Tabela 17	– Índice físico dos corpos de prova.....	70
Tabela 18	– Ângulo de atrito e Intercepto coesivo.....	77
Tabela 19	– Valores do ângulo de atrito interno e do intercepto coesivo.....	79

Tabela 20 – Valores obtidos após exumação das raízes encontradas nas amostras de solo após seis meses de plantio.....	83
Tabela 21 – Desenvolvimento do capim Vetiver após um ano de plantio no talude de estudo.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNM	Confederação Nacional de Municípios
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento de Alerta e Desastres Naturais
ODS	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável
COBRADE	Classificação e Codificação Brasileira de Desastres
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
EM-DAT	Banco de Dados Internacional de Desastres
SEDEC	Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil
FIDE	Formulário de Informações do Desastre
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
PNPDEC	Política Nacional de Proteção e Defesa Civil
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia
EIRD	Estratégia Internacional para Redução de Desastres
ONU	Organização das Nações Unidas
SV	Sistema Vetiver
SD	Solo Desnudo
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
SBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos

MPa	Megapascal
kPa	Quilopascal
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
ME	Método de Ensaio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
DRX	Difratometria de Raio X
ML	Silte de baixa plasticidade
SC	Areia argilosa
CL	Argila de baixa plasticidade
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
IP	Índice de Plasticidade
MO	Matéria Orgânica
SbN	Solução Baseada na Natureza
MDR	Ministério do Desenvolvimento Regional
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

LISTA DE SÍMBOLOS

τ_r	Resistência ao cisalhamento do solo
c	Intercepto coesivo
σ	Tensão normal aplicada no plano de cisalhamento
$\text{tg}\phi$	Tangente do ângulo de atrito interno
\emptyset	Diâmetro
γ_n	Massa específica úmida
γ_d	Massa específica seca
e	Índice de vazios
S	Grau de saturação
w	Teor de umidade
Al	Alumínio
Mn	Manganês
As	Arsênio
Cd	Cádmio
Cr	Cromo
Ni	Níquel
Pb	Chumbo
Hg	Mercúrio
Zn	Zinco
H+Al	Acidez Potencial
P	Fósforo

K	Potássio
N	Nitrogênio
Fe	Ferro
B	Boro
Cu	Cobre
C	Carbono

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	20
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	20
1.2 OBJETIVOS.....	22
1.2.1 Objetivo Geral.....	22
1.2.2 Objetivos específicos.....	22
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
2 REVISÃO TEÓRICA.....	24
2.1 TALUDE.....	24
2.2 MOVIMENTOS DE MASSA.....	24
2.3 ÁREAS DE RISCO.....	29
2.4 BIOENGENHARIA.....	32
2.5 CAPIM VETIVER.....	35
2.6 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....	42
3 METODOLOGIA.....	46
3.1 PROPOSTA METODOLÓGICA.....	46
3.2 MATERIAIS E ÁREA DE ESTUDO.....	47
3.3 MÉTODOS.....	50
3.3.1 Implantação do experimento.....	50
3.3.2 Coleta das amostras.....	53
3.3.3 Ensaio de caracterização física.....	56
3.3.4 Ensaio de cisalhamento direto.....	57

3.3.5 Ensaio de caracterização química e mineralógica.....	59
3.3.6 Cálculo dos índices físicos dos solos 1, 2, 3 e 4.....	60
4 RESULTADOS.....	61
4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS.....	61
4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS.....	64
4.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS SOLOS.....	67
4.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	69
4.5 ANÁLISE PLUVIOMÉTRICA.....	80
4.6 ANÁLISE VISUAL APÓS UM ANO DE PLANTIO.....	81
5 CONCLUSÃO.....	87
REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICE A - Classes de interpretação para a acidez ativa do solo (pH)¹.....	95
APÊNDICE B - Classes de interpretação de fertilidade do solo para a matéria orgânica e para o complexo de troca catiônica.....	96
APÊNDICE C - Classes de interpretação da disponibilidade para o fósforo, de acordo com o teor de argila do solo ou do valor de fósforo remanescente (P-rem) e para o potássio.....	97
APÊNDICE D - Classes de interpretação de da disponibilidade para o enxofre, de acordo com o valor de fósforo remanescente (P-rem).....	98
APÊNDICE E - Classes de interpretação da disponibilidade para os micronutriente.....	99

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Atualmente, vive-se em paisagens cada vez mais povoadas e as cidades se encontram em contínua ampliação. A urbanização acelerada aliada à falta de planejamento adequado causa efeitos nocivos na organização socioespacial das cidades, sobretudo em seu ordenamento urbano (Pereira, 2024).

Essa desestruturação dos espaços geográficos está relacionada ao fato de que a intensidade do crescimento dos centros urbanos não foi absorvida por todas as necessidades relacionadas à infraestrutura, resultando em problemas socioambientais, dentre os quais, destacam-se o aumento das áreas impermeáveis e a consequente alteração dos regimes de escoamento e infiltração das águas pluviais. Além disto, tem-se como consequência desse crescimento desordenado nas cidades o aumento das desigualdades sociais, uma vez que para a população menos favorecida acaba restando espaços menos favoráveis à construção devido às condições geológicas e geomorfológicas inadequadas e que propiciam a ocorrência dos desastres hidrogeológicos, surgindo então, as áreas de risco nas cidades (Santos *et al.*, 2023).

Construções precárias a partir do corte de taludes ou em aterros pouco resistentes, supressão da cobertura vegetal, bem como o incorreto descarte de resíduos sólidos ou o direcionamento de águas pluviais diretamente sobre as encostas são alguns exemplos de ações antrópicas que afetam a forma do relevo e seus processos naturais. O clima, a topografia, os tipos de solo e a distribuição das chuvas são alguns fatores que aliados aos padrões de ocupação e ao planejamento territorial, interferem na ocorrência dos eventos adversos, que por muitas vezes, resultam em perdas socioeconômicas, humanas e ambientais (Lucchese, 2022).

Esse problema associado às mudanças climáticas que vêm ocorrendo nos últimos anos em várias partes do mundo, inclusive no Brasil, torna mais frequente a ocorrência dos fenômenos naturais, como as chuvas intensas que, por sua vez, favorecem¹ as inundações e deslizamentos de talude, resultando em efeitos

¹ Embora no COBRADE exista a tipologia “desastre natural” é importante ressaltar que os desastres não são acontecimentos naturais, mas a consequência da materialização do risco, envolvendo fatores como perigo (natural ou tecnológico) e vulnerabilidade. Logo, reforça-se o entendimento de que os desastres são socialmente construídos, intensificados pela intervenção antrópica desmesurada sobre o meio ambiente (Matsuo, 2023).

negativos ao bem-estar da população e graves perdas materiais e financeiras aos municípios (CEMADEN, 2023).

De acordo com um levantamento realizado pela Confederação Nacional de Municípios - CNM (2024), entre janeiro de 2013 e dezembro de 2023, os desastres causaram R\$639,4 bilhões de prejuízos em todo o Brasil, afetando mais de 418,3 milhões de pessoas.

Entre os desastres mais frequentes, destacam-se os movimentos de massa, os quais possuem um potencial destrutivo significativo para os seres humanos (CEMADEN, 2023). Progressivamente, taludes desprotegidos e degradados podem sofrer deslizamentos e interditar estradas, vitimar vidas, deixar famílias desestruturadas e desabrigadas, além de causar enormes prejuízos financeiros.

Nesse sentido, se fazem necessárias a busca e a utilização de métodos de estabilização de taludes, a fim de minimizar a ocorrência dessas catástrofes e diminuir os seus efeitos negativos, sobretudo aos mais vulneráveis. Dentre as diversas técnicas aplicadas pela engenharia civil, destaca-se a utilização de vegetação para estabilização de taludes expostos a intempéries.

Partindo desse pressuposto, tem-se que o capim Vetiver tem sido uma alternativa para estabilização de taludes e na consequente prevenção a processos erosivos e movimentos de massa. Em uma de suas vantagens, está o fato de promover, respectivamente, uma diminuição de 50 a 70% do escoamento superficial e da erosão do solo, além de aumentar a resistência de cisalhamento do solo, devido ao crescimento de suas raízes, as quais podem chegar até 5 (cinco) metros de profundidade (Hengchaovanich, 1998; Souto, 2022).

Considerando a possibilidade de reforço do solo causado pelas raízes do capim Vetiver, estudos desta natureza também podem servir de referência para os gestores públicos como uma alternativa eficaz e viável de estabilização das áreas de riscos geológicos existentes nos municípios, a fim de prevenir e/ou mitigar a ocorrência desses eventos adversos. Sendo assim, torna-se relevante estudar o ganho de resistência pelo plantio do capim Vetiver em solos de taludes situados em áreas de risco geológico do município de Juiz de Fora-MG, sendo este o objeto do presente estudo.

Acrescenta-se, que essa pesquisa vai ao encontro do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) nº 11, o qual busca tornar as cidades e os assentamentos urbanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis, contribuindo

principalmente com as metas 11.1 (garantir o acesso de todos à habitação segura), 11.5 (reduzir o número de pessoas afetadas por catástrofes e diminuir as perdas econômicas diretas causadas por elas) e 11.7.b (aumentar o número de cidades e assentamentos humanos adotando e implementando políticas e planos integrados para a inclusão, a eficiência dos recursos, mitigação e adaptação às mudanças climáticas e a resiliência a desastres).

Logo, diante dos inúmeros registros de deslizamentos em todo o mundo, inclusive em Juiz de Fora, a busca por alternativas capazes de mitigar suas consequências nocivas à sociedade se faz necessária e representa um grande passo para a diminuição das perdas sociais e econômicas. Com base nesse problema, o presente trabalho busca responder a seguinte questão: “o capim Vetiver possui um bom desenvolvimento nos solos do município de Juiz de Fora, capaz de se tornar uma importante ferramenta na prevenção dos deslizamentos de talude no município?”.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem por objetivo avaliar o comportamento do capim Vetiver ao longo do primeiro ano de plantio em um talude situado em área mapeada pela Defesa Civil municipal com risco geológico muito alto (R4), na região sul do município de Juiz de Fora - MG, de modo a verificar se há ganho na resistência do solo. Adite-se ao objetivo, avaliar o crescimento das raízes das mudas de capim Vetiver plantadas em garrafas PET com amostras de diferentes tipos de solo encontrados na cidade.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar a resistência imposta pela raiz do capim Vetiver (interação solo-raiz) nos períodos de seis meses e um ano de plantio e comparar com a resistência do solo desnudo;
- examinar qualitativamente a adaptação e crescimento do capim Vetiver no talude estudado e em diferentes solos;

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está estruturada em 5 partes. Inicialmente, foi realizada uma exposição geral do tema (contextualização), introduzindo a problemática dos desastres geohidrológicos que ocorrem nos municípios em virtude das mudanças climáticas, do processo de crescimento das cidades e das ações antrópicas desmesuradas sobre o meio ambiente, além de abordar a relevância e os objetivos da presente pesquisa.

O segundo capítulo contempla a revisão bibliográfica a respeito do tema estudado, com foco nos deslizamentos e o uso da bioengenharia (mais especificamente, do capim Vetiver) como medida mitigadora desses deslizamentos, elencando os inúmeros benefícios do seu uso na estabilização de taludes.

O terceiro capítulo descreve a metodologia utilizada no trabalho, apontando as características específicas do local de estudo, além de uma abordagem detalhada das atividades e ensaios realizados em campo e em laboratórios, de modo a alcançar os objetivos iniciais.

No quarto capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Por último, no quinto capítulo são apresentadas as considerações finais que sintetizam as respostas geradas ao longo deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TALUDE

Segundo Siqueira (2023), toda superfície de solo ou rocha que forma um ângulo com a superfície horizontal pode ser definida como talude, o qual se subdivide em taludes naturais (também conhecidos como encostas) e taludes artificiais. Diferentemente dos taludes naturais que preservam suas características naturais, ou seja, não sofreram intervenções antrópicas, os taludes artificiais se originam após escavações, cortes e/ou aterros promovidos pelo homem, a partir de um talude natural. Essa intervenção humana pode modificar alguns fatores como a declividade, a topografia, a vegetação, o escoamento superficial das águas, entre outros, interferindo também nas condições do solo que são favoráveis à ocorrência de desastres, como os movimentos de massa.

2.2 MOVIMENTOS DE MASSA

Existem muitas definições para o termo Movimento de Massa em virtude da grande diversidade de disciplinas envolvidas no estudo desse fenômeno. Para Andrade (2021), os movimentos de massa podem ser definidos como o deslocamento de um certo volume de solo, blocos rochosos ou uma composição desses materiais, sob uma superfície inclinada que, devido à ação da gravidade, tende a se mover para baixo e para fora, após uma instabilidade provocada por agentes externos, como sobrecargas e altos índices pluviométricos.

Uma encosta é considerada estável quando a resistência ao cisalhamento do solo está em equilíbrio com as tensões cisalhantes que causam a sua movimentação. Tal equilíbrio pode ser alterado por fatores que aumentam a solicitação sobre o maciço (aumento de sobrecarga e solicitações dinâmicas) e as que diminuem a resistência ao cisalhamento do solo (aumento da poropressão, ação de intemperismo, diminuição do efeito de sucção por infiltração, entre outros) (Andrade, 2021).

Para caracterizar os movimentos de massa, alguns parâmetros são analisados, como os materiais envolvidos, a velocidade e o volume do material desprendido, sua área de dispersão, bem como os possíveis danos decorrentes do evento adverso (Gerscovich, 2016).

As Tabelas 1 e 2, demonstram as classificações para os parâmetros de velocidade e profundidade da massa movimentada, respectivamente.

Tabela 1 - Classificação quanto à velocidade do movimento de massa

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

Fonte: Varnes (1978, *apud* Gerscovich, 2016)

Tabela 2 - Classificação quanto à profundidade da massa movimentada

Nomenclatura	Profundidade
Superficial	<1,5 m
Raso	1,5 m a 5m
Profundo	5 m a 20 m
Muito profundo	> 20 m

Fonte: GeoRio (1999, *apud* Gerscovich, 2016)

Existem diferentes propostas de classificação de movimentos de massa. A NBR 11682 da ABNT (2009), por exemplo, divide os movimentos de massa em: Queda/Rolamento, Tombamento, Escorregamento e Escoamento. Por sua vez, a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE), os distingue em 4 (quatro) categorias, as quais estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1 - Definição dos tipos de movimentos de massa

Movimento de massa	Definição
Quedas, tombamentos e rolamentos	As quedas de blocos ocorrem quando materiais rochosos se desprendem de encostas muito íngremes, em um movimento rápido de queda livre; os tombamentos são movimentos rotacionais de blocos de solo ou rocha em torno de um ponto abaixo do centro de gravidade da massa desprendida; e os rolamentos são movimentos que ocorrem ao longo das encostas devido à perda de apoio de blocos de rocha.
Deslizamentos	Movimentos rápidos de solo ou rocha que se deslocam para baixo e para fora do talude, apresentando superfície de ruptura bem definida
Corridas de massa	Ocorrem quando, por índices pluviométricos excepcionais, rocha/solo/detrimento, misturados com a água, têm comportamento de líquido viscoso, de extenso raio de ação e alto poder destrutivo
Subsidências e colapsos	Afundamento rápido ou gradual do terreno devido ao colapso de cavidades, redução da porosidade do solo ou deformação de material argiloso

Fonte: Elaborado pela autora com base em Cobrade (2012)

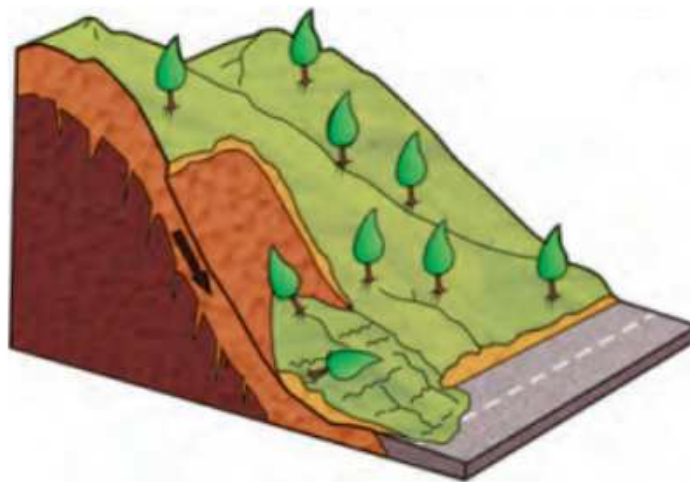
Para se adequar à classificação dos desastres do Banco de Dados Internacional de Desastres (EM-DAT), a Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC) adota o estabelecido na Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE). Tais nomenclaturas, também devem ser utilizadas pelos municípios brasileiros ao cadastrarem a ocorrência de desastres, através do preenchimento do Formulário de Informações do Desastre (FIDE) (Brasil, 2012). Dessa forma, neste trabalho, serão utilizadas as terminologias constantes na COBRADE.

Entre os tipos de movimentos de massa existentes, os deslizamentos são os mais comuns no Brasil e ocorrem principalmente em regiões declivosas, com relevos acentuados. De acordo com as características dos materiais componentes do talude

e sua geometria, são divididos em 3 (três) categorias: planar, rotacional e em cunha, sendo este último o menos comum (Tominaga; Santoro; Amaral, 2015).

De todos os tipos, o deslizamento planar ou translacional (Figura 1) é o mais frequente entre eles. Normalmente, ocorre durante ou após fortes precipitações, em taludes de alta e baixa declividade e com solos pouco desenvolvidos, onde o plano de ruptura varia entre 0,5 a 5,0 metros de profundidade. É um processo de curta duração, porém, com um rápido deslocamento dos materiais (CPRM, 2018).

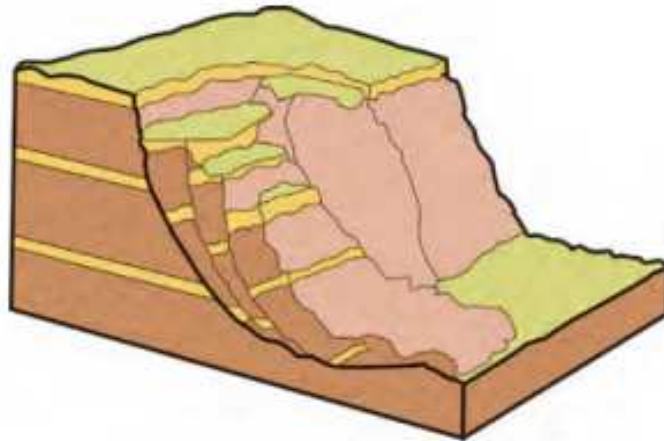
Figura 1 - Esquema de um deslizamento do tipo planar



Fonte: Tominaga; Santoro; Amaral (2015)

Já os deslizamentos rotacionais ou circulares, são movimentos mais lentos que os planares e se caracterizam por uma série de rupturas combinadas e sucessivas, conforme observado na Figura 2. Geralmente, ocorrem em encostas de solos espessos e homogêneos, como os decorrentes da alteração de rochas argilosas e aterros (Tominaga; Santoro; Amaral, 2015).

Figura 2 - Esquema de um deslizamento do tipo rotacional



Fonte: Fonte: Tominaga; Santoro; Amaral (2015)

É importante destacar que os movimentos de massa podem ser influenciados por fatores naturais e/ou antrópicos. Entre as causas naturais, destacam-se as características naturais do local, como sua topografia, densidade e demais propriedades do solo, presença de vegetação, além dos altos índices pluviométricos que aumentam a umidade do solo e as linhas de saturação (Mendes Jr., 2019).

De acordo com Tatizana *et al.* (1987, *apud* Machado e Zacarias, 2016) as principais interferências das chuvas sobre os taludes são:

- Alteração dos parâmetros de resistência dos materiais: diminuição da coesão aparente, eliminação das tensões capilares (ou poropressões negativas), dissolução da cimentação;
- aumento da solitação externa: aumento do peso específico dos materiais que formam a encosta;
- avanço da frente de saturação no maciço, provocando o desenvolvimento de poropressões positivas nos solos, subpressões nas discontinuidades rochosas e forças de percolação;
- alteração do perfil da encosta por erosão de materiais.

Já as intervenções antrópicas, segundo os mesmos autores, podem ser compreendidas por:

- Lançamento de águas servidas;
- lançamentos concentrados de águas pluviais;
- vazamento nas redes de abastecimento d'água;

- infiltrações de águas de fossas sanitárias;
- cortes realizados com declividade e altura excessivas;
- execução inadequada de aterros;
- deposição inadequada do lixo;
- remoção descontrolada da cobertura vegetal.

Os autores Tominaga, Santoro e Amaral (2015, p. 27) complementam que:

Os movimentos de massa consistem em importante processo natural que atua na dinâmica das vertentes, fazendo parte da evolução geomorfológica em regiões serranas. Entretanto, o crescimento da ocupação urbana indiscriminada em áreas desfavoráveis, sem o adequado planejamento do uso do solo e sem a adoção de técnicas adequadas de estabilização, está disseminando a ocorrência de acidentes associados a estes processos, que muitas vezes atingem dimensões de desastres.

Dessa forma, sabe-se que as condições de perigo existentes em um dado local, aliadas às intervenções humanas desmesuradas, propiciam o surgimento das áreas de risco.

2.3 ÁREAS DE RISCO

De forma clara e objetiva, o risco pode ser estabelecido como uma associação entre perigo e vulnerabilidade, onde cada uma dessas variáveis necessita ser analisada isoladamente, porém estão correlacionadas. Não existe risco sem perigo, entretanto, existe perigo sem risco, pois a existência do risco está associada à exposição humana a um fenômeno natural ou tecnológico, bem como à vulnerabilidade em que se encontra (Monte, 2022).

Logo, pode-se definir o perigo como a relação dos fenômenos (naturais ou tecnológicos) que possam causar um potencial dano ao bem estar de uma população, sendo medido e definido por sua natureza (tipo de perigo), extensão, frequência, duração, localização, intensidade (potencial de dano) e magnitude (Monte, 2022). O autor ainda acrescenta que o termo perigo pode ser associado à predisposição/suscetibilidade física de um determinado local a sofrer impactos de um evento perigoso, como por exemplo, a existência de feições de instabilidade nos taludes e critérios topográficos que favorecem a ocorrência dos movimentos de massa.

Já a vulnerabilidade pode ser entendida como a suscetibilidade de uma comunidade a um dano proveniente do perigo, mediante sua capacidade de

resiliência, o que torna boa parte dos desastres consequência das relações socioeconômicas. Em outras palavras, vulnerabilidade é o estado de fragilidade de uma dada comunidade, ou seja, um conjunto de condições físicas, sociais, culturais, econômicas, técnicas, educativas e ambientais que deixam as pessoas mais expostas ao perigo (Monte, 2022).

A partir de todo o exposto, as áreas de risco podem ser definidas como áreas passíveis de serem atingidas por processos naturais e/ou induzidos que causem efeito adverso, como danos à integridade física, perdas materiais, econômicas e socioambientais. Normalmente, essas áreas correspondem a núcleos habitacionais de baixa renda (IBGE, 2018).

No município de Juiz de Fora, as áreas de risco são mapeadas pela Defesa Civil conforme graduação representada na Figura 3.

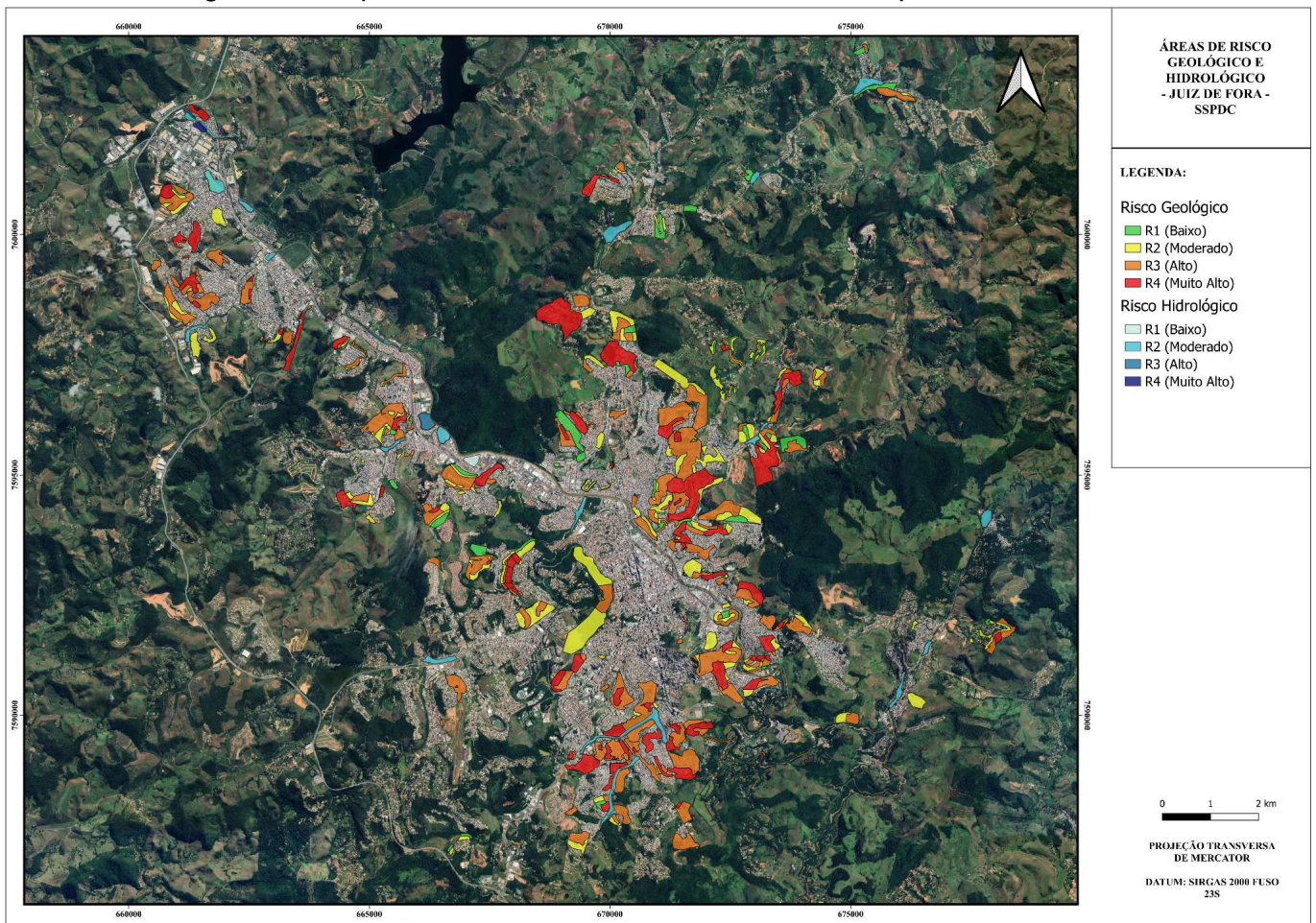
Figura 3 - Classificação das áreas de risco

Risco	Descrição
Baixo (R1)	Ausência de indícios de instabilidade no terreno, alto nível de resistência das construções. Mantidas as condições médias de chuvas para o local é baixa a possibilidade de destruição das construções por movimento gravitacional de massa.
Moderado (R2)	Há indícios pouco claros de instabilidade no terreno, alto a moderado nível de resistência das construções. Mantidas as condições médias de chuvas para o local é moderada a possibilidade de destruição das construções por movimento gravitacional de massa.
Alto (R3)	Indícios claros de instabilidade no terreno, baixo a moderado nível de resistência das construções. Mantidas as condições médias de chuvas para o local é alta a possibilidade de destruição das construções por movimento gravitacional de massa.
Muito alto (R4)	Presença marcante de indícios de instabilidade no terreno e baixos níveis de resistência das construções. Mantidas as condições médias de chuvas para o local é muito alta a possibilidade de destruição das construções por movimento gravitacional de massa.

Fonte: CEMADEN (2018)

Na Figura 4, é possível analisar o mapeamento das áreas de risco geológico em Juiz de Fora, que atualmente possui 579 (quinhentos e setenta e nove) setores de risco geológico e 224 (duzentos e vinte e quatro) setores de risco hidrológico (Juiz de Fora, 2024).

Figura 4 - Mapeamento das áreas de risco do município de Juiz de Fora/MG



Fonte: Elaborado pela Autora (2024) com base em Juiz de Fora (2024)

Em termos gerais, o risco precede os desastres, sendo que estes são resultantes da ocorrência de um evento perigoso, da exposição e vulnerabilidade dos elementos e de sua capacidade insuficiente para reduzir as consequências negativas (Zuquette, 2018). Como exemplo de desastre geológico, destacam-se os movimentos de massa (COBRADE, 2012).

Acrescenta-se que, prevenir a ocorrência de eventos adversos, como os movimentos de massa e/ou reduzir seus efeitos nocivos à sociedade, compreende uma das ações constantes na gestão de risco e desastres, promovida pela Defesa Civil, em consonância com o desenvolvimento humano, econômico, ambiental e territorial sustentável (EIRD/ONU, 2015).

Sendo assim, as ações de prevenção visam garantir um dos principais objetivos listados na PNPDEC, que é reduzir a ocorrência de desastres. Para tanto, medidas estruturais e não-estruturais podem ser tomadas, conforme alguns exemplos apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 - Descrição de algumas medidas estruturais e não estruturais

Medidas estruturais	Medidas não estruturais
Obras de contenção e de drenagem	Mapeamento das áreas de risco
Retaludamento	Planos de contingência e emissão de alertas
Soluções de bioengenharia	Planejamento urbano com políticas habitacionais

Fonte: Elaborado pela autora Autora (2024) com base nas informações de EIRD/ONU (2015) e Tominaga; Santoro; Amaral (2015)

É válido mencionar que algumas medidas estruturais são muito onerosas, especialmente as que utilizam estruturas de contenção, uma vez que requerem projetos técnicos e mão de obra especializada. Sendo assim, na busca por medidas eficientes e mais econômicas, as técnicas de bioengenharia vêm se destacando como uma boa alternativa para estabilização de encostas situadas em áreas de risco.

2.4 BIOENGENHARIA

Visando mitigar os impactos socioambientais causados pelos desastres e minimizar os riscos inerentes à instabilidade de taludes, a bioengenharia aparece como uma técnica eficiente e de baixo custo, sendo uma alternativa aos métodos tradicionais de estabilização e reforço de solos (Maicá, 2021).

Para Feitosa (2017), a bioengenharia de solos se refere à utilização da vegetação com o intuito de mitigar problemas ambientais, tais como encostas erodidas e desestabilizadas, margens de rios, reabilitação de áreas contaminadas, no controle de efluentes, dentre outros. Lage (2023) complementa que estes elementos biológicos podem ser associados a materiais inertes, como concreto, aço e fibras sintéticas para a obtenção de melhores resultados.

Partindo deste pressuposto, pode-se entender que a bioengenharia se enquadra como uma solução baseada na natureza (SbN), também conhecida como infraestrutura verde. Pode-se considerá-la um modelo ou ferramenta que integra práticas biológicas com engenharia, com o intuito de promover benefícios ecológicos, econômicos e sociais através de elementos e soluções naturais. Além da

bioengenharia, citam-se como exemplos os jardins de chuva, telhados verdes, corredores ecológicos e parques urbanos (Santos; Enokibara, 2021).

Para Fraga (2020), as SbN vêm se consolidando como uma boa alternativa para o enfrentamento das mudanças climáticas e dos diferentes desafios ambientais, sociais e econômicos em áreas urbanas. No Brasil, esse conceito guarda-chuva começou a ganhar espaço a partir do ano de 2015, inserindo-se no campo das políticas públicas (ações de mitigação, gestão de risco de desastres, resiliência, etc.) através das linhas de atuação dos Ministérios da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), do Meio Ambiente (MMA) e do Desenvolvimento Regional (MDR), contribuindo para o alcance dos ODS, além de outros marcos legais, como o Marco de Sendai para a Redução de Risco de Desastres, Nova Agenda Urbana (NAU) e Conferência das Partes (COP25).

Dentro deste âmbito, o planejamento de uma infraestrutura verde propicia a integração da natureza na cidade, de modo a torná-la mais sustentável e resiliente. A sua implantação, além de tornar as cidades mais bonitas, traz inúmeros benefícios, como a melhoria na qualidade do ar e da água, proteção e recuperação da fauna e da flora, diminuição de inundações e deslizamentos de encostas, entre outros (Fraga, 2020).

Uma das causas para os deslizamentos é a ausência de cobertura vegetal, que promove uma importante proteção do solo contra agentes externos erosivos, como a água e o vento, que além de promoverem uma degradação do solo, também diminuem sua coesão e resistência ao cisalhamento. Uma vegetação densa de gramíneas ou de herbáceas pode reduzir em até mil vezes o processo de erosão (USDA, 1978; Melo *et al.*, 2013), uma vez que protegem o solo do impacto direto das gotas das chuvas e aumentam a infiltração através dos poros produzidos pelo sistema radicular, reduzindo assim, o escoamento superficial.

Além do mais, uma cobertura vegetal adequada pode garantir ao solo uma resistência mecânica adicional através de suas raízes, agindo como um importante agente estabilizador de encostas (Araújo *et al.*, 2019). Para Teixeira (2017), uma das características mecânicas mais importantes das raízes é o fato de resistirem à tração, enquanto os solos apresentam resistência à compressão. Logo, o efeito combinado de solo e raízes garante esse reforço ao solo, resultando em uma maior estabilidade dos taludes. Segundo Hengchaovanich e Nilaweera (1998); Teixeira (2017), a resistência das raízes varia muito de acordo com cada espécie, podendo

atingir valores entre 10 a 40 Mpa, porém existem espécies que alcançam uma resistência à tração de aproximadamente 70 Mpa.

O diâmetro das raízes também influencia no valor de sua resistência, sendo inversamente proporcional a elas. Logo, tem-se que raízes com diâmetros mais finos possuem elevadas resistências à tensão radicular e também a arranques. Esse aumento será diretamente proporcional à profundidade explorada pelas raízes, portanto, a ação estabilizadora é minimizada quando decorre uma pequena penetração das raízes ao longo do perfil (Mendes Júnior, 2019).

Ao contrário de outras técnicas, onde as plantas são reconhecidas apenas por suas qualidades estéticas, na bioengenharia elas se tornam um dos elementos mais importantes, devido aos seus diversos efeitos hidromecânicos benéficos. Por exemplo, uma cobertura de gramíneas ou vegetação herbácea muito densa aumenta a estabilidade superficial do solo, enquanto uma vegetação com raízes profundas é mais eficiente para prevenir ou mitigar rupturas superficiais de massas de solo, devido ao aumento da resistência ao cisalhamento (Araújo *et al.*, 2019).

Os benefícios dos métodos da bioengenharia são descritos no Quadro 3.

Quadro 3 - Vantagens dos métodos de bioengenharia

Vantagens	
Técnicas	Proteção contra erosão superficial; aumento na estabilidade das encostas através do reforço e drenagem do solo pelas raízes; proteção contra a queda de rochas e contra o vento.
Ecológicas	Regulação da umidade e temperatura próximas à superfície, criando condições adequadas para o crescimento vegetal; aperfeiçoamento do regime hídrico do solo através da interceptação, evapotranspiração e armazenamento; melhoramento da estrutura do solo e formação de um horizonte superior; criação e provisão de habitats para a fauna e flora locais; utilização de materiais biodegradáveis.
Econômicas	Redução de custos de construção e manutenção; criação de áreas agricultáveis e de lazer .
Estéticas	Integração das estruturas à paisagem; redução da poluição visual; a paisagem se torna mais atraente.

Fonte: Adaptado de Araújo *et al.*, (2019)

No ramo da engenharia civil, tais técnicas vêm sendo empregadas no controle dos processos erosivos e como proteção/reforço de taludes não apenas pelo seu custo reduzido, mas também por requerer um conhecimento técnico relativamente simples em sua instalação e manutenção (Barbosa; Lima, 2013; Silva, 2022).

Dentre as espécies utilizadas na revegetação de taludes, o capim Vetiver tem se destacado por possuir características morfológicas, fisiológicas e ecológicas únicas, como sua adaptabilidade a diferentes condições climáticas (tropical, semi-tropical e mediterrâneo) e de tipos de solo, além do seu crescimento rápido e enraizamento profundo que funciona como tirantes, estabilizando taludes (Truong; Hart, 2001; Oliveira *et al.*, 2018). No Quadro 4, estão algumas importantes características relevantes dessa espécie.

Quadro 4 - Características do capim Vetiver

Características	Vantagens
Morfológicas	Talos duros e eretos que podem resistir a fluxos de água intensos; densas barreiras quando plantadas juntas, reduzindo a velocidade do fluxo e formando um eficiente filtro; sistema radicular profundo e denso.
Fisiológicas	Tolerância a variações do clima; ampla faixa de pH no solo; alta tolerância a níveis tóxicos de metais.
Ecológicas	Reprodução por mudas; promove a sucessão natural.

Fonte: Truong; Hart (2001); Oliveira *et al.* (2018)

2.5 CAPIM VETIVER

Originário do sul da Índia e utilizado há mais de dez mil anos por povos do continente asiático, o capim Vetiver é uma planta perene, pertencente à família Poaceae (ant. Gramineae), classificado inicialmente como uma das espécies do gênero *Vetiveria*, ficando então conhecido como *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash, entretanto, recentemente foi reclassificado como *Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty (Figura 5), gênero com mais de 40 espécies identificadas (Torrão *et al.*, 2011; Souto, 2022).

Figura 5 - Touceira de capim Vetiver após 20 meses de plantio



Fonte: Andrade e Chavez (2013)

Presente em mais de 120 países, o capim Vetiver possui um grande potencial de utilização na indústria farmacêutica, na construção civil, na fabricação de artesanatos e no setor de perfumaria, visto que de suas raízes também se extrai o óleo de vetiver, rico em terpenos, fenóis e terpenóides que lhe confere características aromatizadoras (Torrão *et al.*, 2011; Teixeira, 2017).

Em meados dos anos 80, o Banco Mundial desenvolveu na Índia o Sistema Vetiver (SV), que é baseado na aplicação desse capim para a conservação e estabilização do solo. Desde então, o SV vem sendo utilizado como uma técnica de bioengenharia eficiente na estabilização de ravinas erodidas e em encostas, saneamento de águas residuais, fito-remediação de solos e águas contaminadas, além de outros fins de proteção ambiental (Pereira, 2006; Silva, 2022).

Podendo crescer entre 1,5 a 2,0 metros de altura, possui colmos finos, eretos e resistentes e, quando plantados em fileiras, formam barreiras retentoras de sedimentos que também funcionam como dispersores de enxurrada, chegando a diminuir o escoamento superficial das águas pluviais em até 70% (Hengchaovanich, 1998; Silva, 2022).

Já as suas densas raízes em formato de cabeleira (Figura 6) possuem um alto poder de penetração em um período de tempo relativamente curto (inclusive em solo de perfil compacto como hardpan e camadas rochosas), visto que Cazzuffi *et al.* (2006 *apud* Machado, 2014) relatam que essas raízes são capazes de alcançar 2,0

metros nos primeiros dois anos de plantio. Em geral, essas raízes conseguem atingir uma profundidade de três metros, entretanto, existem registros de raízes com até 5 metros (Andrade; Chavez, 2013; Souto, 2022).

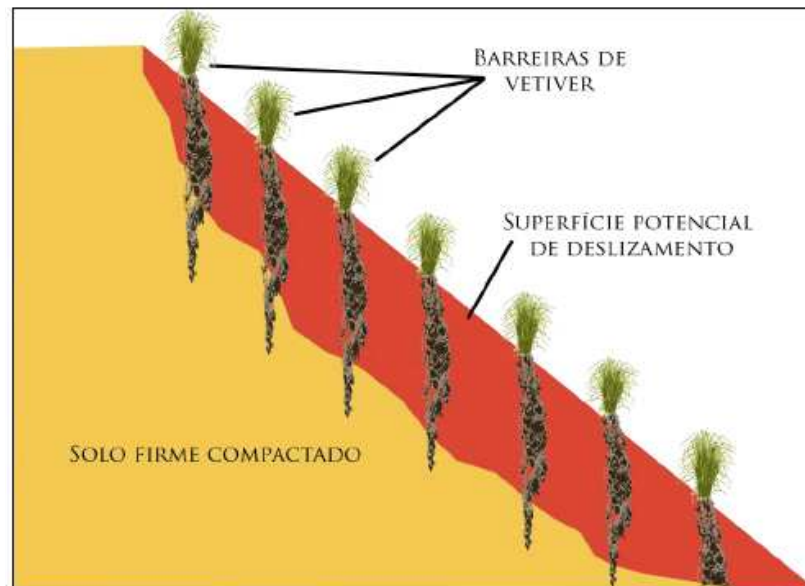
Figura 6 - Raízes do capim Vetiver



Fonte: Andrade e Chavez (2013)

O sistema radicular entrelaçado e aprofundado no solo, composto por muitas raízes finas do mesmo comprimento, auxilia no aumento da coesão (a qual aumenta as propriedades de resistência do solo), funcionando como um grampeamento natural para estabilização/reforço dos taludes (Truong; Tan Van; Pinnars, 2008; Teixeira, 2017). Em geral, sistemas radiculares com raízes fortes e profundas, que penetram potenciais planos de cisalhamento, tendem a aumentar a estabilidade contra deslizamentos superficiais, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Ilustração do comportamento do capim Vetiver em áreas com potencial de ruptura.



Fonte: Teixeira (2017)

De acordo com Holsworth (2014, *apud* Mendes Júnior, 2019), as raízes que se desenvolvem para baixo contribuem para a ancoragem da vegetação no solo; já o desenvolvimento lateral fica responsável pela estabilização do solo ao redor da planta. Para Lemes (2001, *apud* Barbosa, 2012) a quantidade das raízes vai diminuindo com a profundidade do solo, logo, os valores de maior resistência ao cisalhamento são encontrados mais próximos à superfície. Tal situação foi confirmada por Truong, Tan Van e Pinnars (2008) e Teixeira (2017) após análise da resistência do capim Vetiver com 2 anos de plantio, conforme verificado na Tabela 3.

Tabela 3 - Aumento da resistência ao cisalhamento do solo com o capim Vetiver de acordo com a profundidade

Profundidade (m)	Aumento na resistência de cisalhamento do solo (%)
0,25	90
0,5	39
1,0	12,5

Fonte: Truong, Tan Van e Pinnars (2008); Teixeira (2017)

São múltiplas as vantagens do capim Vetiver tanto em nível técnico e econômico, quanto ecológico e estético, as quais lhe conferem o título de capim milagroso, além de lhe permitir que seja utilizado com segurança e eficiência na estabilização de taludes, como destacam Truong, Tan Van e Pinnars (2008) e Silva (2022):

- A parte da coroa de seu sistema radicular fica abaixo da superfície do solo, possibilitando maior resistência a queimadas, geadas, pisoteio de animais ou outros estímulos negativos;
- Apesar de desenvolverem inflorescência, são plantas estéreis, ou seja, se reproduzem apenas através de mudas, podendo se multiplicar através de perfilhos que crescem a partir de uma “muda mãe”. Dessa forma, não se tornam uma planta invasora e prejudicial a outras espécies, sendo sua utilização altamente recomendada para qualquer sítio ecológico;
- Por ser uma planta xerófica e hidrófica, condições de extremas secas ou alagamentos/inundações não afetam seu desenvolvimento;
- É considerado tolerante a herbicidas e pesticidas, a solos bastante ácidos (pH 3,5) até muito alcalinos (pH 12,5), temperaturas muito baixas (-15° C) até bem elevadas (55° C) e ampla faixa de altitude, desde 0 até 2800 metros;
- É muito eficaz em solos pobres, altamente erodíveis e dispersíveis, apresentando um elevado nível de tolerância a alumínio (Al), manganês (Mn) e metais pesados, como o arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni), chumbo (Pb), mercúrio (Hg) e zinco (Zn), suportando também, solos salinos e sódicos;
- Não é uma planta conhecida por ser hospedeira de insetos e fungos, apresentando-se livre de pragas e doenças;

- Por ser uma planta do tipo C4, seu desenvolvimento máximo se dá em condições de maior exposição solar, entretanto, locais parcialmente sombreados, também são capazes de produzir o capim Vetiver;
- Plantas Vetiver podem crescer verticalmente em declives superiores a 150%, ou seja, uma inclinação aproximada de 56°;
- A resistência à tração de suas raízes varia entre 40 e 180 MPa para um diâmetro entre 0,2 e 2,2 mm;
- Quando usado para obras de estabilização, tem-se um custo máximo aproximado de 30% do custo dos tradicionais sistemas de engenharia e projetos. Na China por exemplo, as economias ficam em torno de 85 a 90%, enquanto na Austrália, esse valor é de aproximadamente 64 a 72%;
- É uma planta resistente a vários tipos climáticos, porém, desenvolve-se melhor em climas tropicais e subtropicais, sendo que seu plantio deve ser realizado preferencialmente durante o período chuvoso. Há registros onde a taxa do crescimento radicular foi em torno de 7,5 mm/dia.

Hengchaovanich (1998) e Silva (2022) complementam que as raízes do Vetiver possuem uma força de tração média de cerca de 75 Megapascal (MPa) para raízes com diâmetro entre 0,7 a 0,8 mm, sendo este diâmetro o mais comum para as raízes da gramínea, gerando um incremento de resistência ao cisalhamento aproximado de 40% em uma profundidade de 0,5 metros.

Ensaio de resistência à tração realizados na Universidade de Tongji, com raízes de diâmetros $\varnothing = 0,7$ mm e 0,8 mm mostraram que as mesmas foram capazes de suportar 1,890 kg (até 64 MPa) e 2,290 kg (até 72 MPa) respectivamente. Em uma comparação com o aço comum cuja resistência varia entre 235 a 500 MPa, o Vetiver possui aproximadamente 14 a 30% de sua capacidade (Hengchaovanich, 1998; Silva, 2022).

Já Hengchaovanich e Nilaweera (1996) e Silva (2022), por intermédio de um ensaio de cisalhamento direto em uma amostra indeformada de solo, constataram

que a resistência ao cisalhamento do solo cultivado com capim vetiver com dois anos de plantio aumentou em 90% em relação ao solo sem cultivo.

Hengchaovanich e Nilaweera (1998) e Teixeira (2017) complementam que as raízes do capim Vetiver oferecem grande aumento na resistência ao cisalhamento, com valores entre 6 a 10 kPa por quilo de raiz por m³ de solo, em comparação com valores entre 3,2 a 3,7 kPa por m³ de solo de raízes de outros elementos arbóreos.

Uma comparação demonstrou que as raízes do capim Vetiver são mais resistentes que a maioria das plantas utilizadas na bioengenharia, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Resistência de algumas raízes à tensão de cisalhamento

Nome botânico	Nome comum	Resistência à Tração (MPa)
Salix ssp	Willow	9 a 36
Populus ssp	Poplars	5 a 38
Alnus ssp	Alders	4 a 74
Peudotsuga ssp	Douglas	19 a 61
Acer sacharinum	Silver	15 a 30
Tsuga heterophy	Western	27
Vaccinum ssp	Huckleberry	16
Hordeum vulgare	Barley Forbs	15 a 31 2 a 20 2 a 7
Chrysopogon zizanioides	Vetiver grass	120 (média de 75)

Fonte: Hengchaovanich e Nilaweera (1998) ; Teixeira (2017)

Devido a todas essas características especiais, a utilização do capim Vetiver tem se mostrado uma alternativa promissora na prevenção a deslizamentos superficiais.

2.6 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

Toda massa de solo se rompe quando sua resistência ao cisalhamento é excedida, logo, a propriedade dos solos em suportar cargas e conservar sua estabilidade está relacionada à sua resistência (Caputo, 2022).

O autor ainda menciona que a resistência ao cisalhamento de um solo se compõe essencialmente de dois parâmetros, sendo eles, o intercepto coesivo e o ângulo de atrito interno entre as partículas, conforme a equação de Coulomb, representada pela expressão:

$$\tau_r = c + \sigma \cdot \text{tg}\varphi, \text{ onde:}$$

τ_r = resistência ao cisalhamento do solo;

c = intercepto coesivo;

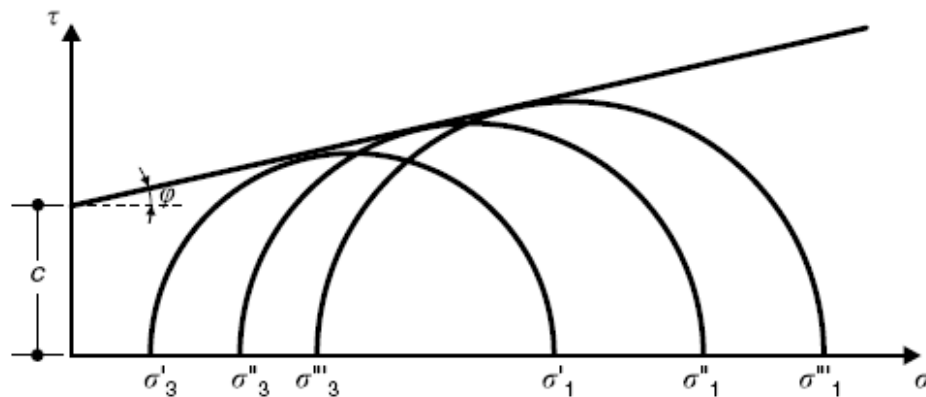
σ = tensão normal aplicada no plano de cisalhamento;

φ = ângulo de atrito interno

Pinto (2006, *apud* Sales, 2023) acrescenta que a equação de Coulomb delimita os limites da linha de envoltória de resistência que caracteriza as máximas tensões cisalhantes que o solo suporta. Sales (2023) define os critérios de ruptura como concepções que procuram representar geometricamente as condições de ruptura de um material.

Na geotecnia, o critério mais satisfatório para representar o comportamento dos solos é o de Mohr-Coulomb que expressa a ideia de que não há ruptura se o círculo que representa o estado de tensões não tocar a envoltória, ou seja, qualquer força de cisalhamento que esteja abaixo desta envoltória (Figura 8) demonstra uma situação de estabilidade.

Figura 8 - Envoltória representada pelo critério de Mohr-Coulomb



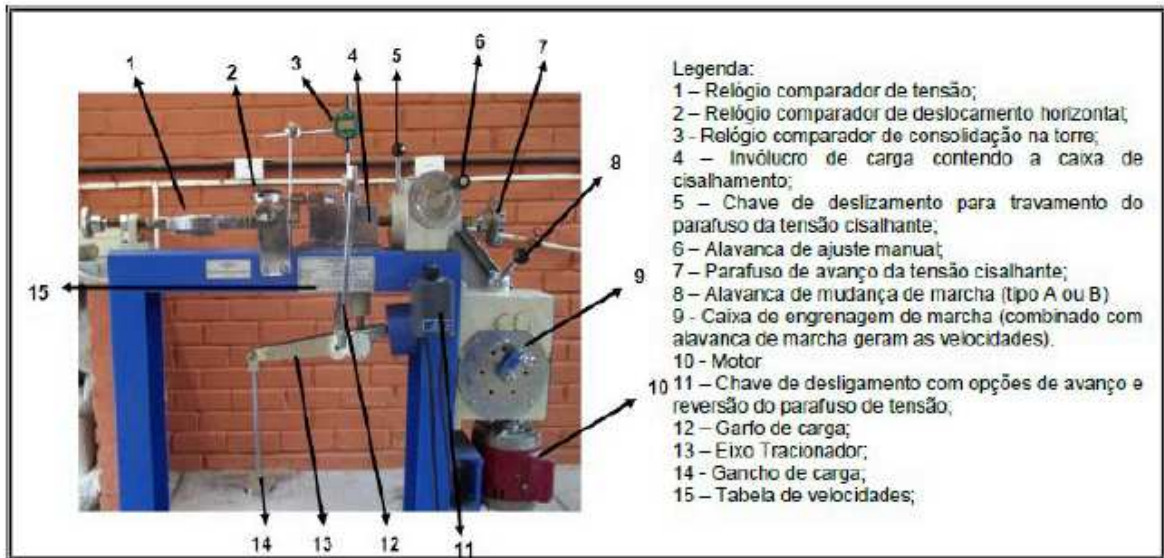
Fonte: Caputo (2022)

Gerscovich (2016) argumenta que existem muitas condicionantes que influenciam no valor da resistência de cisalhamento de um solo. Entre elas, citam-se suas propriedades químicas, mineralógicas e físicas, como a forma, tamanho e distribuição dos grãos, teor de umidade, grau de compactação do solo, presença de vegetação, além de alguns parâmetros adotados durante os procedimentos do ensaio, os quais podem gerar imprecisões nos resultados, como velocidade de deslocamento, tamanho do plano de cisalhamento e preparação das amostras.

Portanto, quando se trata de solos, é de extrema importância conhecer alguns fatores indispensáveis para subsidiar o trabalho geotécnico e, para isto, existem alguns ensaios laboratoriais, como o de compressão triaxial e o de cisalhamento direto, sendo este último, o único a ser detalhado, pois foi o método utilizado nesta pesquisa.

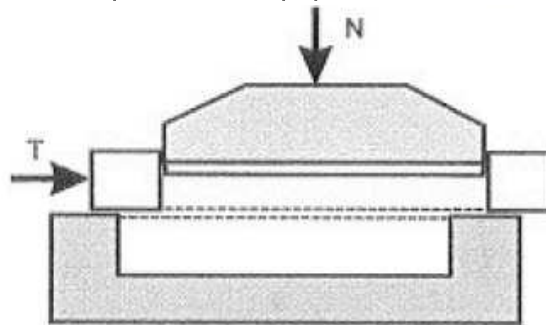
O equipamento utilizado para o ensaio de cisalhamento direto (Figura 9), em linhas gerais, consiste em uma caixa metálica de seção transversal quadrada ou circular, segmentada horizontalmente em duas partes. Pinto (2006, *apud* Sales, 2023) relaciona o ensaio com o critério de Coulomb, onde o corpo de prova é colocado no interior da caixa (Figura 10) e submetido a uma carga vertical (N) por unidade de área, em seguida, aumenta-se a força tangencial T, provocando o movimento de uma das metades da caixa em relação à outra, até a ruptura, momento em que a tensão cisalhante é aferida.

Figura 9 - Aparelho de cisalhamento direto



Fonte: Pereira (2015)

Figura 10 - Esquema do equipamento de cisalhamento direto



Fonte: Pinto (2006, *apud* Sales, 2023)

Sendo assim, com a utilização de várias magnitudes de tensões normais, é possível obter a envoltória de ruptura e, como resultado, apresentar os valores do ângulo de atrito interno e do intercepto coesivo, que são parâmetros imprescindíveis ao estudo da estabilidade dos taludes.

Feitosa (2017) aponta como desvantagem desse método, o fato dele impossibilitar que o solo se rompa ao longo do plano mais fraco, uma vez que é imposto o plano horizontal (plano de separação da caixa de cisalhamento). Apesar dessa restrição, o ensaio de cisalhamento direto é bastante utilizado devido a facilidade em sua operação e moldagem das amostras, além do seu baixo custo.

Gomes (2020) utilizou este ensaio para analisar o ganho de resistência ao cisalhamento de uma amostra de solo a uma profundidade de 0 a 30 cm após seis

meses de plantio do capim Vetiver, sendo constatado um aumento de 38,23% no ângulo de atrito e de 56,64% no intercepto coesivo.

Já Teixeira (2017) avaliou os parâmetros de resistência do solo após cinco anos de plantio do capim Vetiver a uma profundidade de até 1,20 metros. As amostras coletadas foram classificadas como argila arenosa residual, moldadas em caixas de dimensões de 100x100x20mm e submetidas a tensões normais de 25, 50, 100 e 200 kPa no equipamento de cisalhamento direto, seguindo a norma ASTM D3080 (ASTM, 2004). Os resultados encontrados estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de resistência x profundidade das raízes

Condição do solo	Intercepto de Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (Graus)
Solo sem raiz	11,73	37,14
Solo com raiz (0 a 0,30 m)	65,04	34,66
Solo com raiz (0,30 a 0,60 m)	58,48	31,56
Solo com raiz (0,60 a 0,90 m)	42,07	34,08
Solo com raiz (0,90 a 1,20 m)	17,17	34,18

Fonte: Teixeira (2017)

Percebe-se que o ângulo de atrito diminuiu, enquanto o valor do intercepto coesivo aumentou em aproximadamente 82% para uma profundidade de 0 a 30 cm; valor este que foi diminuindo gradativamente à medida que aumentava-se a profundidade das raízes, o que se justifica, pois conforme ratificado pelo autor, a densidade das raízes é menor enquanto se aprofunda no solo.

3 METODOLOGIA

3.1 PROPOSTA METODOLÓGICA

Este estudo pode ser caracterizado como uma pesquisa de natureza aplicada, exploratória e explicativa, com abordagem quali-quantitativa, aplicando-se procedimentos de pesquisa bibliográfica, como também, pesquisa experimental com solos do município de Juiz de Fora, conforme exemplificado na Figura 11.

Figura 11 - Classificação da pesquisa



Fonte: Autora (2024)

De acordo com Almeida (2021), a pesquisa aplicada busca gerar conhecimentos para contribuir na solução de alguma situação problemática. Logo, esta pesquisa visa aprofundar os conhecimentos sobre o uso do capim Vetiver que é uma das possíveis práticas que mitigam a ocorrência de deslizamentos de talude, os quais impactam negativamente a vida da população.

A pesquisa exploratória tem por objetivo promover maiores informações sobre um determinado objeto, demarcando um campo de estudo. Já a pesquisa explicativa é mais complexa, tratando-se daquela em que o pesquisador registra, classifica, analisa e interpreta os dados obtidos, aprofundando-se na realidade (Almeida, 2021).

Do ponto de vista da abordagem, o autor supramencionado, aponta que a pesquisa quali-quantitativa realiza uma análise mais profunda e que se complementa, utilizando métodos qualitativos, que têm o ambiente como fonte de

coleta de dados, não necessitando de usos estatísticos e matemáticos; e quantitativos, fazendo uso de dados matemáticos para interpretar os resultados.

Quanto aos procedimentos, inicialmente foi realizada uma pesquisa bibliográfica pertinente quanto ao tema, sendo consultados documentos que contenham dados e informações relevantes ao estudo, como livros, teses, revistas, artigos e dissertações, além de pesquisa experimental que está detalhada nos itens 3.2 e 3.3.

3.2 MATERIAIS E ÁREAS DE ESTUDO

Os materiais para a pesquisa foram obtidos no município de Juiz de Fora, localizado na Zona da Mata mineira que, por sua vez, pertence à Região Mantiqueira Setentrional. Possui uma população estimada de 540.756 habitantes distribuídos em uma área de aproximadamente 1.436km² (IBGE, 2022). A cidade é conhecida pelo seu relevo acidentado, apresentando níveis médios de 800 metros, com altitudes de até 1.000 metros nos pontos mais elevados (Ferreira *et al.*, 2023). Cerca de 2% do território de Juiz de Fora são planos, 15% são serras e os 83% restantes são mares de morro (Juiz de Fora, 2022).

O clima do município é definido como Tropical de Altitude, com duas estações bem definidas, sendo de outubro a abril, meses com maior frequência de chuvas e temperaturas mais elevadas e de maio a setembro, meses com temperaturas mais amenas e menores precipitações pluviométricas (Ferreira *et al.*, 2023).

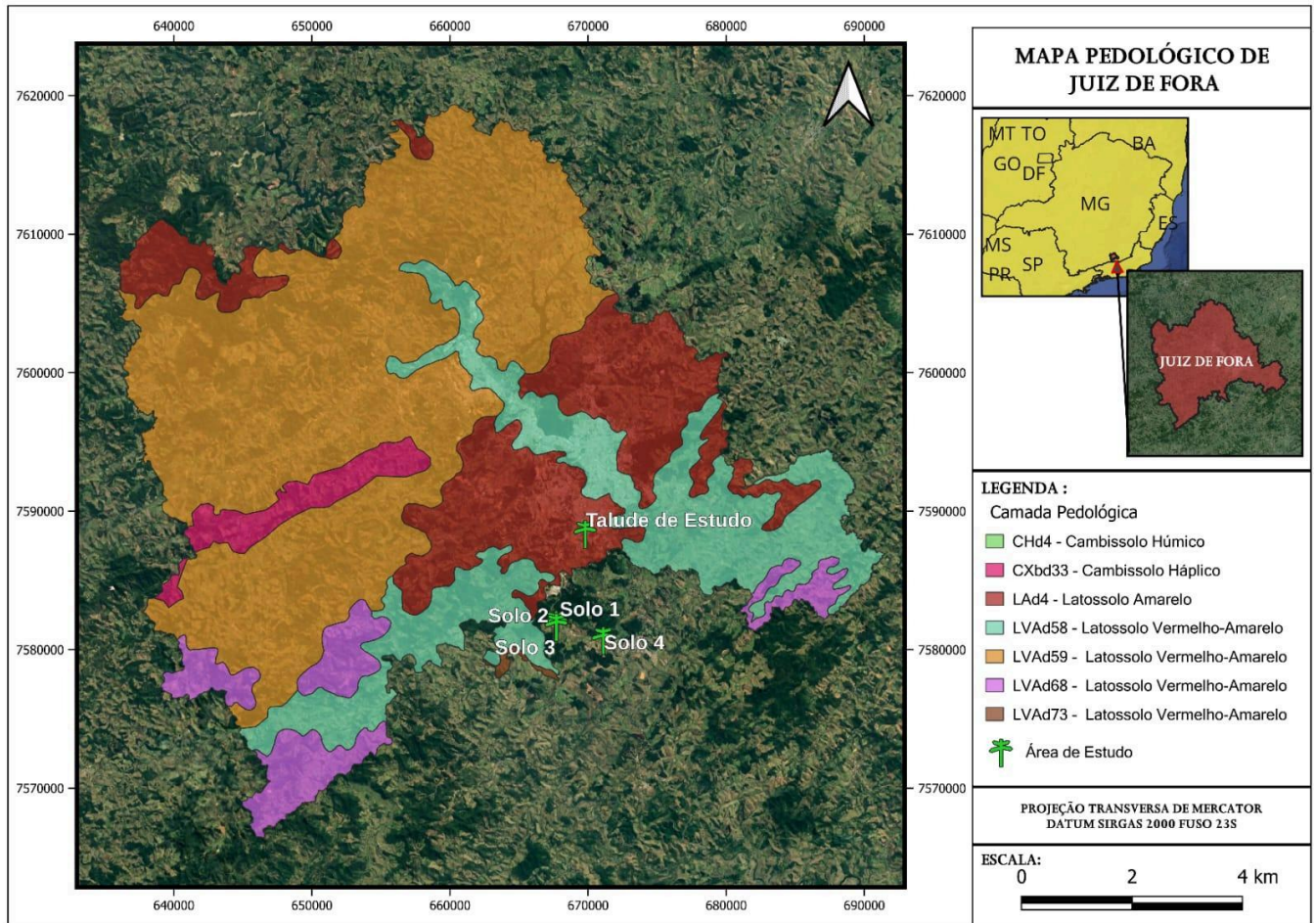
Com relação ao relevo, suas litologias apresentam cobertura de solos espessos e exposições rochosas, principalmente na região sul do município (Juiz de Fora). Os solos predominantes são os Cambissolos Húmicos, Cambissolos Háplicos, Latossolos Amarelos e Vermelho-Amarelos (Juiz de Fora, 2022).

A presença de vales profundos associados a encostas com elevadas declividades e um relevo constituído predominantemente por morros, sujeitos a chuvas com índices anuais elevados, constituem os principais fatores que imprimem à região uma dinâmica superficial bastante intensa, que pode causar o desequilíbrio das vertentes, visualizado pelos elevados índices de deslizamentos, além de processos erosivos, tanto laminares como de escoamento concentrado (Ferreira *et al.*, 2023).

Portanto, devido às características morfológicas, climáticas e geológicas da cidade, aliadas à ausência de planejamento do uso e ocupação do solo, a cidade é a terceira do estado de Minas Gerais com a maior parcela da população residindo em áreas de risco, contabilizando aproximadamente 135 mil pessoas (25% da população), sendo cerca de 90 mil pessoas residindo em áreas de risco alto (R3) ou muito alto (R4) (IBGE, 2018).

O talude de estudo onde foi implantado o experimento, localiza-se no bairro Santa Efigênia, na zona sul do município de Juiz de Fora. Com coordenadas geográficas -21.7999, -43.35746, o local situa-se próximo a área mapeada pela Defesa Civil municipal com risco geológico muito alto (R4) - Setor S_21_L2_S23. No local existe um pluviômetro do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN) o que permitiu o acompanhamento pontual do volume de precipitação sob a região estudada. Na Figura 12 é possível observar o mapa pedológico de Juiz de Fora, bem como a localização do talude de estudo, no qual foram coletadas amostras de solo e, também, os pontos onde foram coletados os solos 1, 2, 3 e 4 para o plantio das mudas de Vetiver nas garrafas PET.

Figura 12 - Mapa pedológico de Juiz de Fora com as localidades do talude de estudo e dos solos utilizados no plantio das garrafas PET



Fonte: Elaborado pela autora (2024), com base em Juiz de Fora (2022)

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo - SBCS EMBRAPA (2018), os solos identificados nos pontos de coleta são latossolos, que são solos minerais, profundos, consistentes e homogêneos, ou seja, com pouca diferenciação entre os horizontes. São solos pouco férteis, bem drenados e com baixa capacidade de troca de cátions. Possuem aspecto maciço, e são friáveis, quando secos. Apresentam diferentes texturas, sendo argilosos quando originados de basaltos e arenosos quando a rocha matriz é o arenito. Demonstram uma grande capacidade de infiltração devido ao grande volume de poros.

De modo geral, os latossolos são naturalmente estáveis, apresentando pequena suscetibilidade à erosão e movimentos de massa, porém, seu manejo inadequado pode acarretar problemas geotécnicos, em decorrência de uma grande concentração de água e consequente saturação do solo. Tal cenário pode interferir em sua estrutura, provocando colapsos, abatimentos no terreno e sulcos na

superfície do solo, as quais podem evoluir para ravinas e voçorocas (Nardotto Júnior, 2024).

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Implantação do experimento

Para a obtenção dos resultados, foram avaliados aspectos visuais do talude estudado, além de ensaios laboratoriais para avaliar as características das amostras de solo, principalmente com relação ao ganho de resistência, antes e depois do plantio do capim vetiver, nos períodos de seis meses e um ano.

Ademais, cita-se que também foram plantadas mudas em garrafas PET não padronizadas (Figura 13) para avaliar o crescimento das raízes após um ano de plantio, em quatro amostras de solo com propriedades distintas. Após o plantio, as mudas foram submetidas às mesmas condições ambientais por um período de um ano.

Figura 13 - Mudas plantadas em garrafas PET após um ano

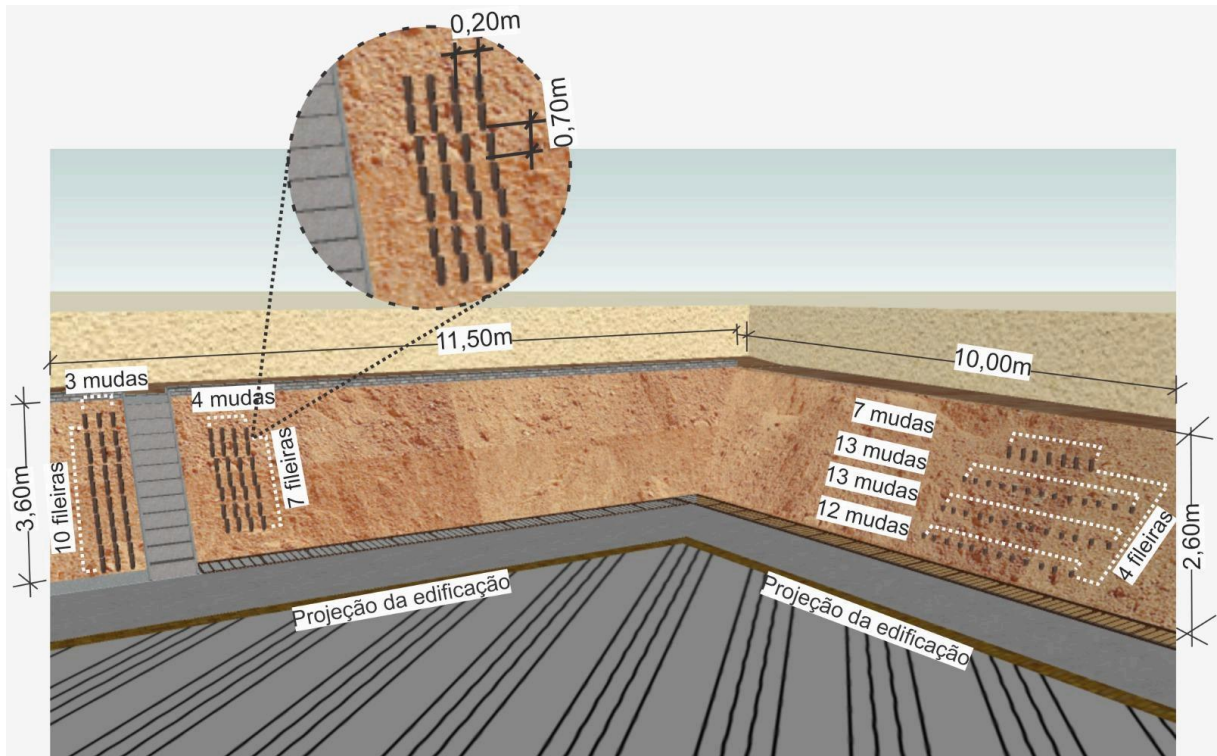


Fonte: Autora (2024)

O plantio no talude foi conduzido a partir de 103 mudas da espécie, distribuídas de forma adjacente ao longo da face do talude em aclive (tanto na parte lateral como nos fundos do terreno) com declividade média em torno de 50 a 55°,

conforme mostrado na Figura 14. Salienta-se que o talude é provido de dispositivos de drenagens, como escada hidráulica e canaletas de pé e de crista.

Figura 14 - Representação esquemática do plantio das mudas do capim Vetiver no talude estudado

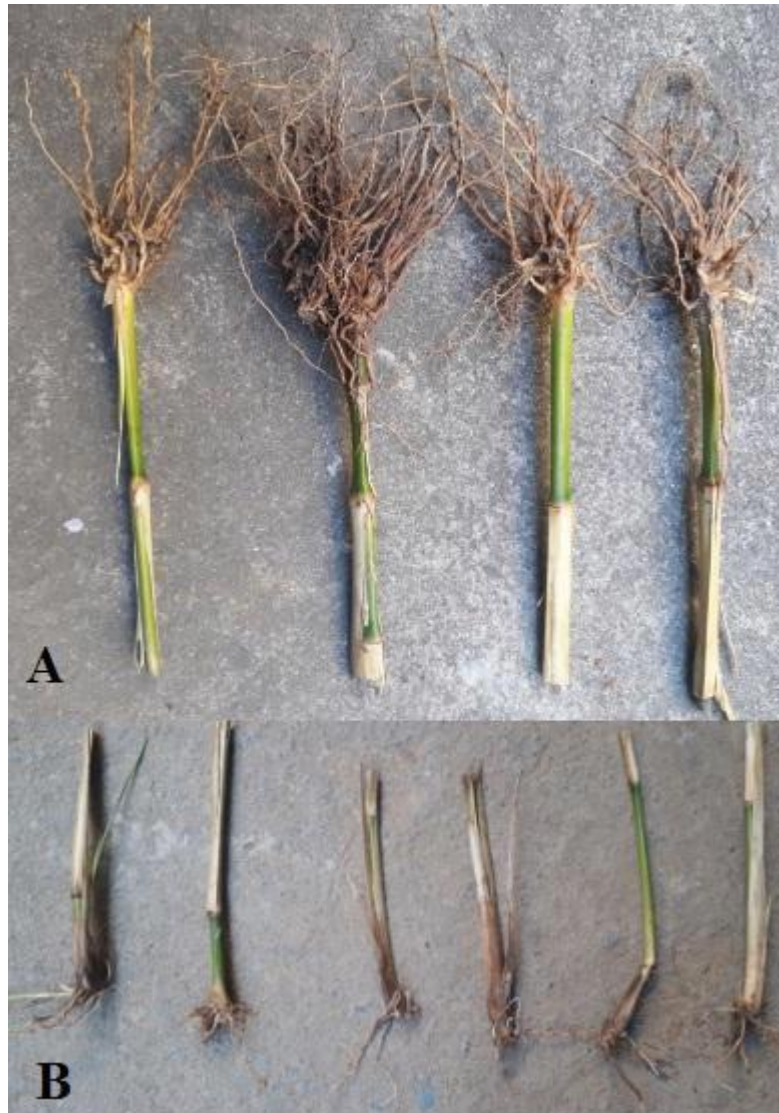


Fonte: Autora (2024)

As mudas de raízes nuas foram desenvolvidas por um produtor no município de Nova Iguaçu/RJ e enviadas pelos correios armazenadas em caixas de papelão. Pontua-se que esses dados foram cadastrados no Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado. Ao chegarem em Juiz de Fora, foram retiradas da embalagem e reidratadas por submersão das raízes em baldes com água por um período de dois dias.

Analisando a Figura 15, é possível perceber diferenças no desenvolvimento do sistema radicular das mudas antes de serem plantadas: algumas possuíam raízes mais densas, com 15 cm de extensão (A), enquanto outras, tinham poucas raízes em um comprimento de 5 cm.(B).

Figura 15 - Exemplos das mudas de capim Vetiver



Fonte: Autora (2023)

O plantio ocorreu conforme as especificações do fornecedor, no dia 16 de março de 2023. A princípio, foi realizada a limpeza manual do local (retirada de galhos e vegetação sobre a superfície) e, posteriormente, com o auxílio de uma cavadeira, foram abertas covas com profundidade de 20 cm, espaçadas 0,20 cm uma das outras. As mudas foram plantadas em curvas de nível com espaçamento de 0,70 metros. Não foi realizado nenhum tratamento especial como o uso de fertilizantes, adubos e manejos de poda. Nas primeiras duas semanas após o plantio, foi realizada a irrigação diária das mudas, por meio de um jato que simulou o efeito da chuva.

Logo, as parcelas experimentais consistiram dos seguintes tratamentos:

- Solo Desnudo - SD: solo exposto, ou seja, sem recobrimento e sem o plantio das mudas de capim Vetiver, servindo apenas para comparar a eficiência dos tratamentos aplicados (parcelas testemunhas);
- Solo com capim Vetiver: parcelas onde foi plantado o capim Vetiver em cordões, cujas mudas foram dispostas a cada 0,20 m e os cordões tiveram espaçamento linear de 0,70 m.

3.3.2 Coleta das amostras

Para os ensaios de caracterização física, química e mineralógica foram coletadas amostras deformadas e para a realização dos ensaios de cisalhamento direto foram coletadas amostras indeformadas de solo, sendo:

- Amostras deformadas do solo do talude de estudo coletadas no dia 28 de Junho de 2023:

As amostras foram provenientes da parcela SD em dois pontos distintos: na crista do talude lateral e na crista do talude aos fundos, nas profundidades de 0 a 30 cm (Figura 16) e, de 30 a 60 cm. O local foi escolhido aleatoriamente, levando em consideração a facilidade em executar tal ação.

Primeiramente foi realizada a limpeza da área, retirando galhos, pequenos fragmentos de rocha e vegetação sobre a superfície e, com o auxílio de uma cavadeira, removeu-se a quantidade necessária das amostras de solo, as quais foram acondicionadas em sacos plásticos limpos, identificadas e encaminhadas ao departamento de solos da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) e ao departamento de solos da Universidade Federal de Viçosa (UFV) para realização das análises física e química/mineralógica, respectivamente.

Figura 16 - Retirada da amostra deformada de solo na profundidade 0 a 30 cm



Fonte: Autora (2023)

- Amostras deformadas coletadas em 4 pontos distintos:

Após uma análise tátil visual, foram escolhidos 4 pontos diferentes, sendo os solos retirados dos taludes de origem com auxílio de uma pá e acondicionados em sacos plásticos, devidamente identificados. Parte das amostras foi utilizada no plantio nas garrafas PET, enquanto as outras parcelas foram submetidas às caracterizações física e química.

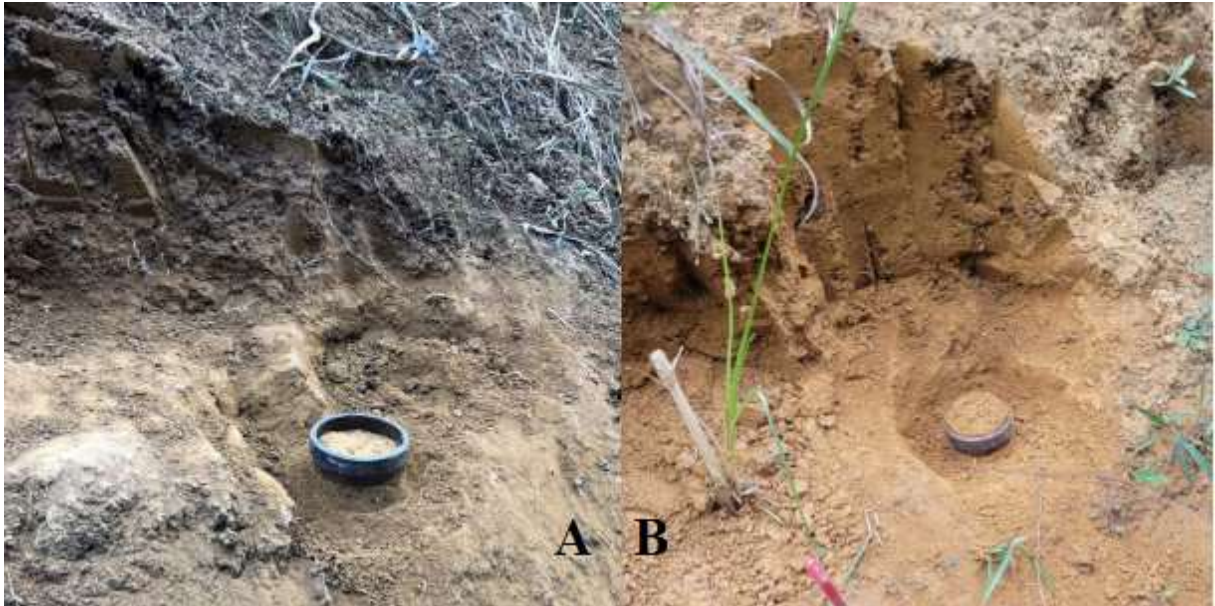
- Amostras indeformadas coletadas no talude SD (11 de agosto de 2023) e no solo com raiz Vetiver (29 de setembro de 2023):

As amostras indeformadas de solo (Figura 17) foram coletadas nesta etapa para realização do ensaio de cisalhamento direto, a fim de determinar a resistência do solo desnudo, assim como do solo contendo a raiz do capim Vetiver após seis meses de plantio.

Dessa forma, foi posicionado o anel guia de seção circular de \varnothing 6 cm e 2,3 cm de altura ($65,03 \text{ cm}^3$) no ponto de interesse do talude lateral, o qual foi introduzido no solo por meio de uma leve pressão a fim de não gerar nenhum tipo de abalo e danificar a estrutura. Com a ajuda de uma espátula, contornou-se as

laterais, de modo a esculpir a amostra até a profundidade desejada para posterior remoção completa do corpo de prova (cortando o fundo com um fio de corte). Para a coleta da amostra contendo as raízes do capim, promoveu-se a retirada das mudas antes da execução das etapas anteriormente mencionadas.

Figura 17 - Amostras indeformadas do solo desnudo (A) e do solo com a raiz do capim (B) sendo coletadas



Fonte: Autora (2023)

Após a retirada das amostras, elas foram cobertas com plástico filme de PVC, identificadas, acondicionadas em uma caixa de isopor e levadas ao laboratório de solos da UFJF. Ao todo, foram coletados seis corpos de provas SD (desses, um foi perdido durante manuseio, sendo repetido o procedimento) e oito corpos de provas providos de raízes das mudas localizadas na fileira 1 (próxima ao pé do talude), sendo retiradas no total: 4 amostras da muda nº 3, 3 amostras da muda nº 5 e 1 amostra da muda nº 9 (ambas na profundidade 0-30cm), conforme localização indicada na Figura 18. Ao tentar retirar as amostras da muda nº 6, deparou-se com a presença de um formigueiro, sendo interrompida a ação.

Figura 18 - Localização das amostras retiradas em campo



Fonte: Autora (2024)

- Amostras indeformadas coletadas no solo com raiz Vetiver (22 de Março de 2024):

Após um ano de plantio, repetiram-se os mesmos procedimentos para a coleta de 9 corpos de provas, sendo retiradas 4 amostras da muda nº 4 (três na profundidade 0-30 cm e uma na profundidade 30-60 cm) e 5 amostras da muda nº 10 (três na profundidade 0-30 cm e duas na profundidade 30-60 cm).

3.3.3 Ensaios de caracterização física

Os ensaios de caracterização física de todos os solos foram realizados por alunos da iniciação científica no laboratório de solos da UFJF, sob coordenação da professora Dr^a. Tatiana Tavares Rodriguez, coorientadora desta pesquisa.

O preparo das amostras procedeu conforme orientações contidas na norma NBR 6457 da ABNT (2016a) com opção por secagem prévia da amostra. Para a determinação do teor de umidade higroscópico foi seguido o anexo A da referida norma.

Para a definição da densidade real das partículas, foi seguida a norma ME 093 do DNER (1994), com a ressalva de utilização do picnômetro de 500 ml, ao invés do picnômetro de 50 ml, indicado pela norma. Os ensaios de granulometria

foram realizados conforme NBR 7181 da ABNT (2016b), incluindo peneiramento grosso, sedimentação e peneiramento fino.

Por fim, os limites de consistência foram estabelecidos de acordo com as normas: NBR 6459 da ABNT (2016c) para Limite de Liquidez (LL) e NBR 7180 da ABNT (2016d) para Limite de Plasticidade (LP) e Índice de Plasticidade (IP).

3.3.4 Ensaio de cisalhamento direto

A definição do incremento da resistência do solo através das raízes do Vetiver foi dada por meio de ensaios de cisalhamento direto, também realizados pelos alunos da iniciação científica da UFJF. Os procedimentos para sua realização seguiram as especificações contidas na norma ASTM D3080 (2011) e todos os dados de leitura foram obtidos através do *software* CDREV.

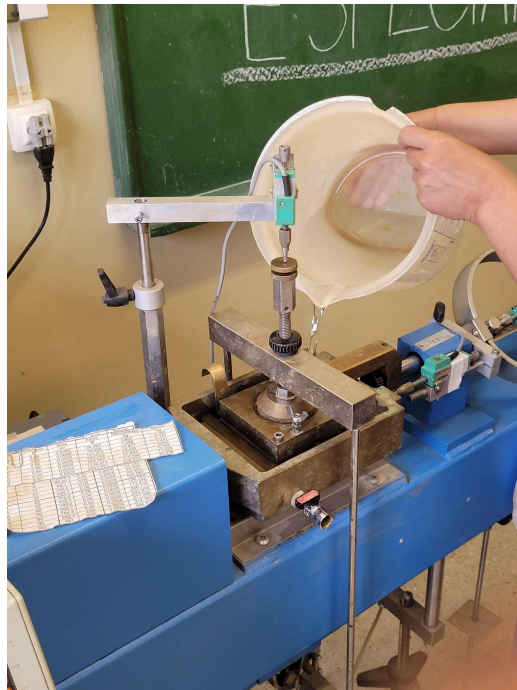
Inicialmente, retirou-se o excesso de solo do corpo de prova para posterior preparo, moldagem e montagem da caixa de cisalhamento (Figura 19), onde a amostra foi colocada para saturar por 24 horas ininterruptas (Figura 20).

Figura 19 - Preparo, moldagem e montagem da caixa de cisalhamento



Fonte: Autora (2023)

Figura 20 - Amostra sendo preparada para saturação



Fonte: Autora (2023)

Findada a saturação completa da amostra, foi aplicada uma carga normal aos espécimes, de modo a se obter o adensamento, simulando as tensões normais (25 kPa, 50 kPa e 100 kPa), a fim de representar as tensões no solo compatíveis com a profundidade de até 5 metros, que é o valor máximo reportado para o comprimento das raízes do Vetiver.

Terminada a consolidação (24 horas), as travas de segurança foram desativadas para possibilitar o deslocamento lateral, iniciando então, a etapa de cisalhamento, para qual foi utilizada uma velocidade padronizada de 0,1000 mm/min para todos os corpos de prova. Durante esse processo, a força de cisalhamento, o deslocamento horizontal relativo e o deslocamento vertical foram monitorados e registrados em sistema de aquisição automática de dados.)

Pontua-se que essa velocidade de cisalhamento ($V_{\text{cisalhamento}}$) é definida a partir do tempo correspondente a 50% do adensamento primário ($t_{50\%}$), a fim de não permitir a formação de poropressão no interior do corpo de prova. Para o cálculo, utilizam-se as fórmulas $t_f = 50 \cdot t_{50\%}$, onde t_f corresponde ao tempo necessário desde o início do ensaio até a ruptura por cisalhamento e $V_{\text{cisalhamento}} = \frac{S_{\text{ruptura}}}{t_f}$, sendo o S_{ruptura} o deslocamento relativo máximo, cujos valores para cada tipo de solo estão estimados na norma.

Cabe salientar que esse processo também foi realizado nas amostras SD. Com o término de todas as etapas do ensaio, os resultados foram analisados para obtenção dos valores de resistência dos solos testados, a partir do critério de ruptura de máxima relação tensão cisalhante por tensão normal.

3.3.5 Ensaio de caracterização química e mineralógica

Para avaliar a fertilidade e indicar os minerais presentes nos substratos, as amostras deformadas do talude de estudo foram enviadas ao laboratório do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa para caracterização química e mineralógica, enquanto nas amostras dos quatro tipos de solo foram realizadas apenas o ensaio químico. Os principais parâmetros avaliados foram pH em água, acidez potencial (H+Al), macronutrientes (P, K, N), micronutrientes (Cu, Mn, Zn, Fe, B), matéria orgânica (M.O.), carbono (C) e difração de raios-x para determinação dos minerais presentes.

A caracterização química foi realizada seguindo o manual de métodos de análise de solo da EMBRAPA (2018). Já para as análises mineralógicas foram preparadas lâminas orientadas para a fração argila e não orientadas para as frações silte e areia das diferentes amostras. As amostras não orientadas foram montadas pela adição do material e pó sobre o compartimento de um porta amostra próprio para este fim (Harris; White, 2008 *apud* UFV, 2024). Para esta análise foi utilizado um difratômetro multifuncional Panalytical X'Pert Pro PW 3040/60 com tubo de cobalto (CoKa). A faixa analisada foi de 4 a 60°2 θ , com tempo de leitura de 16 minutos por lâmina.

3.3.6 Cálculo dos índices físicos dos solos 1, 2, 3 e 4

Como as mudas já haviam sido plantadas, para estabelecer os valores da massa específica úmida (γ_n), do teor de umidade (w), da massa específica seca (γ_d), do índice de vazios (e) e do grau de saturação (S) das amostras dos solos utilizadas no plantio nas garrafas PET, foram realizados alguns cálculos, procedendo da seguinte maneira: marcou-se o nível de solo no interior de cada garrafa e todo o conjunto (solo + muda + garrafa PET) foi pesado; logo após, as garrafas foram esvaziadas, lavadas e pesadas; em seguida, as garrafas foram enchidas com água até atingir o mesmo nível de solo e depois, essa quantidade foi pesada para fazer uma comparação com o volume de solo, visto que a densidade da água é igual a 1g/cm³. Com todos os valores obtidos foi possível calcular a massa específica úmida do solo (γ_n), utilizando a equação $\gamma_n = \frac{\text{massa solo}}{\text{volume solo}}$.

Já o teor de umidade (w), foi calculado através do método da estufa. Inicialmente, pesaram-se as cápsulas vazias e limpas com tampa (M), sendo o solo retirado das garrafas PET acondicionado no interior dessas cápsulas. Após a pesagem do conjunto M_{bu} (cápsula + solo úmido) os recipientes foram levados à estufa, onde permaneceram por um período de uma semana e, novamente pesados (cápsula + solo seco = M_{bs}). Em seguida, o teor de umidade (w) foi calculado através da equação $w(\%) = \frac{M_{bu} - M_{bs}}{M_{bs} - M} \times 100$. Para cada tipo de solo, foram analisadas duas amostras, sendo calculada a média desses valores.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS

Os resultados dos ensaios de densidade real dos grãos e limites de consistência das amostras dos taludes lateral e fundos estão apresentados na Tabela 6, enquanto a Tabela 7 aponta a classificação do solo em função do diâmetro das partículas, com base na NBR 6502 da ABNT (2022).

Tabela 6 - Resultados da caracterização física da amostra do talude

PROPRIEDADE	Amostra de 0-30 cm de profundidade		Amostra de 30-60 cm de profundidade (talude lateral)
	Talude lateral	Talude fundos	
Densidade real dos grãos	2,634	2,488	2,551
Limite de liquidez (%)	46	43	44
Limite de plasticidade (%)	33	33	34
Índice de plasticidade (%)	13	10	10
Classificação SUCS	ML	ML	ML (silte de baixa plasticidade)

Fonte: UFJF (2023)

Tabela 7 - Classificação do solo do talude em função do diâmetro das partículas

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)							
AMOSTRA	Argila	Silte	Areia			Pedregulho	Classificação granulométrica
			Fina	Média	Grossa		
Talude lateral 0-30 cm	52	25	20	3	0	0	argila areno-siltosa
Talude fundos 0-30 cm	49	28	21	2	0	0	argila areno-siltosa
Talude lateral 30-60 cm	53	23	20	3	0	0	argila areno-siltosa

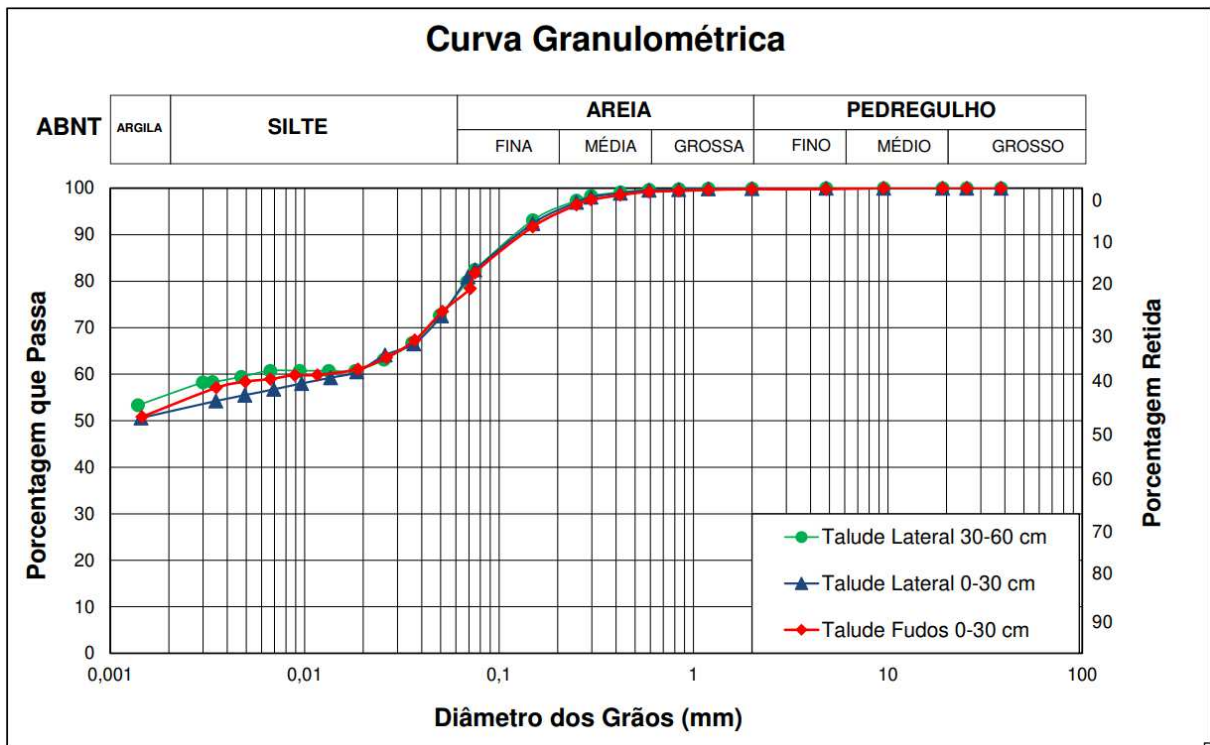
Fonte: UFJF (2023)

Os dados mostram que na profundidade de 0 a 30 cm as características físicas das amostras de solo do talude lateral e do talude aos fundos são muito parecidas. Dessa forma, optou-se por realizar os ensaios apenas nas amostras do

talude lateral para a profundidade de 30 a 60 cm, sendo essa uma amostra representativa para ambos os taludes.

A curva granulométrica das três amostras ensaiadas está apresentada na Figura 21 e, como preconizado pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), pode-se classificá-las como siltes de baixa plasticidade (ML).

Figura 21 - Curva Granulométrica



Após as análises físicas das amostras de solo nas profundidades de 0 a 30 cm e 30 a 60 cm tanto do talude lateral, como no talude dos fundos apontarem para uma similaridade de suas características, optou-se em realizar as análises químicas e mineralógicas apenas nas amostras do talude lateral em ambas as profundidades.

Paralelo à caracterização física do talude de estudo, também foi realizada a análise dos solos destinados ao plantio das mudas de capim Vetiver nas garrafas PET. Os resultados dos ensaios de densidade real dos grãos e limites de consistência do solo estão apresentados na Tabela 8, enquanto a Tabela 9 aponta a classificação do solo em função do diâmetro das partículas, com base na NBR 6502 da ABNT (2022).

Tabela 8 - Resultados da caracterização física dos solos

PROPRIEDADE	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 4
Densidade real dos grãos	2,698	2,675	2,535	2,722
Limite de liquidez (%)	NL	44	59	48
Limite de plasticidade (%)	NP	49	45	32
Índice de plasticidade (%)	NA	6	14	16
Classificação SUCS	SC (areia)	ML (silte de baixa plasticidade)	ML	CL (argila de baixa plasticidade)

Fonte: UFJF (2024)

Tabela 9 - Classificação dos solos em função do diâmetro das partículas

Composição Granulométrica (%) (Escala ABNT)							
AMOSTRA	Argila	Silte	Areia			Pedregulho	Classificação granulométrica
			Fina	Média	Grossa		
Solo 1	2	12	23	14	11	38	areia siltosa
Solo 2	56	14	21	8	1	0	argila areno-siltosa
Solo 3	26	40	22	12	0	1	silte areno-argilosa
Solo 4	14	63	22	1	0	0	silte areno-argilosa

Fonte: UFJF (2024)

Após análise dos valores, percebe-se que as amostras 2 e 3 possuem a mesma caracterização física do talude de estudo, ML - silte de baixa plasticidade, enquanto a amostra 1 foi classificada como areia (SC) e a amostra 4, argila de baixa plasticidade (CL).

Já a Tabela 10 apresenta os valores calculados para os índices físicos do solo das garrafas PET.

Tabela 10 - Índices físicos das amostras dos solos das garrafas PET

ÍNDICES FÍSICOS	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 4
Massa específica úmida (g/cm ³)	2,05	1,25	1,18	1,53
Teor de umidade (%)	0,58	14,98	13,75	1,25
Massa específica seca (g/cm ³)	2,04	1,09	1,04	1,51
Índice de vazios	0,32	1,45	1,44	0,80
Grau de saturação (%)	4,89	27,63	24,20	4,25

Fonte: Elaborado pela Autora (2024)

Pela análise dos valores, infere-se que as amostras de solo 1 e 4 estavam muito secas, o que pode influenciar no crescimento das raízes. Também se observa pouca diferenciação nos valores das amostras 2 e 3, o que se justifica, por se tratar de solos com características similares (ambos foram classificados como silte de baixa plasticidade). Em relação ao índice de vazios, observa-se que os solos 2 e 3 apresentam estrutura com maiores índices de vazios, enquanto o solo 1 apresentou o menor valor, fato que também pode influenciar o crescimento das raízes.

4.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS SOLOS

Os resultados dos ensaios da análise química de todos os solos estão apresentados nas Tabelas 11 a 14, estando sua interpretação baseada nos parâmetros da EMBRAPA, cujas tabelas encontram-se disponíveis nos Apêndices A a E.

Tabela 11- Resultados da análise química dos solos

AMOSTRA	PARÂMETROS									
	pH H ₂ O	pH KCl	pH CaCl ₂	P	K	Na	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al
				mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³	cmol _c /dm ³
Talude lateral 0-30 cm	5,38	-	-	0,8	29	-	3,39	0,17	0,00	4,3
Talude lateral 30-60 cm	4,77	-	-	0,3	13	-	1,13	0,00	0,61	5,3
Solo 1 (garrafa PET)	8,23	-	-	70,9	135	-	2,39	0,44	0,00	0,00
Solo 2 (garrafa PET)	5,54	-	-	1,1	28	-	0,22	0,07	0,21	3,1
Solo 3 (garrafa PET)	6,03	-	-	0,8	28	-	0,87	0,26	0,00	0,5
Solo 4 (garrafa PET)	5,12	-	-	0,9	18	-	0,11	0,03	0,94	1,9

Fonte: UFV (2023)

Tabela 12 - Resultados da análise química dos solos

AMOSTRA	PARÂMETROS								
	SB	t	T	V	m	ISNa	MO	P-Rem	S
	cmolc/dm ³	cmolc/dm ³	cmolc/dm ³	%	%	%	dag/kg	mg/L	mg/dm ³
Talude lateral 0-30 cm	3,63	3,63	7,93	45,8	0,00	-	3,01	14,7	-
Talude lateral 30-60 cm	1,16	1,77	6,46	18,0	34,5	-	2,26	9,9	-
Solo 1 (garrafa PET)	3,18	3,18	3,18	100,0	0,0	-	0,21	13,8	-
Solo 2 (garrafa PET)	0,36	0,57	3,46	10,4	36,8	-	1,01	10,1	-
Solo 3 (garrafa PET)	1,20	1,20	1,70	70,6	0,00	-	0,10	8,5	-
Solo 4 (garrafa PET)	0,19	1,13	2,09	9,1	83,2	-	0,08	30,2	-

Fonte: UFV (2023)

Tabela 13 - Resultados da análise química dos solos

AMOSTRA	PARÂMETROS									
	B	N	Cu	Mn	Fe	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
	mg/dm ³	dag/kg	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³
Talude lateral 0-30 cm	0,18	-	0,35	6,8	140,6	11,01	-	-	-	-
Talude lateral 30-60 cm	0,21	-	0,16	4,2	102,7	2,71	-	-	-	-
Solo 1 (garrafa PET)	0,23	-	5,10	159,4	755,5	40,08	-	-	-	-
Solo 2 (garrafa PET)	0,17	-	1,40	8,1	35,7	1,54	-	-	-	-
Solo 3 (garrafa PET)	0,12	-	0,49	5,6	28,8	0,42	-	-	-	-
Solo 4 (garrafa PET)	0,10	-	0,32	11,1	33,6	0,63	-	-	-	-

Fonte: UFV (2023)

Tabela 14 - Resultado analítico de nitrogênio

AMOSTRA	N-total (dag/Kg)
Talude lateral 0-30 cm	0,138
Talude lateral 30-60 cm	0,097
Solo 1 (garrafa PET)	0,013
Solo 2 (garrafa PET)	0,056
Solo 3 (garrafa PET)	0,012
Solo 4 (garrafa PET)	0,006

* Abertura das amostras por digestão sulfúrica e quantificação titulométrica de nitrogênio conforme método Kjeldahl
Fonte: UFV (2023)

Em relação ao talude de estudo, verifica-se então que, o pH das amostras está compreendido entre 5,38 e 4,77 o que, conforme a classificação química para interpretação de pH em água, significa que o solo se encontra ácido, sendo essa acidez mais evidente em uma profundidade superior. Já levando em consideração os parâmetros da classificação agrônômica, a acidez ativa do solo está baixa. Conforme Alvarez *et al.* (1999, *apud* EMBRAPA, 2018), em se tratando de nutrição de plantas, o pH ideal se enquadra nos valores entre 5,5 a 6,0 para contribuir com uma maior disponibilidade de nutrientes; sendo esses valores encontrados nas amostras de solo 2. Já a amostra de solo 1, apresentou o maior valor, indicando uma alcalinidade elevada.

A acidez potencial (H+Al), que apresenta valores entre 4,3 e 5,3 mg/100cc, para o talude de estudo é classificada como boa para a profundidade 30 a 60 cm e média para a profundidade de 0 a 30 cm, mesma classificação do solo 2. Já para o solo 1 o valor encontrado foi nulo, enquanto para as amostras 3 e 4 foram classificados como muito baixo e baixo, respectivamente.

Relacionada também com a acidez do solo está a disponibilidade dos nutrientes cálcio e magnésio e de micronutrientes como manganês, ferro, cobre e zinco (EMBRAPA, 2018). Em relação ao cálcio, a amostra com profundidade de 0 a 30 cm apresenta resultado bom (3,39 mg/100 cc), enquanto a profundidade de 30 a 60 cm, resultado baixo (1,13 mg/100 cc). O solo 1 apresentou valor médio, já para os solos 2, 3 e 4 os valores encontrados foram muito baixos.

Em relação ao magnésio, os valores estão compreendidos entre 0,0 e 0,44 mg/100 cc, variando de muito baixo a baixo, sendo o valor nulo encontrado na amostra com profundidade entre 30 a 60 cm.

Dentre os micronutrientes, de acordo com a interpretação para a disponibilidade de micronutrientes descrita por Alvarez *et al.* (1999, *apud* EMBRAPA, 2018), o zinco apresenta valor muito baixo para a amostra 3, baixo para a amostra 4 e médio para a amostra de solo 2. As demais amostras possuem classificação muito boa (> 2,2 ppm), sendo o valor mais significativo no solo 1.

Para o manganês, a classificação foi de baixo para a profundidade de 30 a 60 e para o solo 3, médio para a profundidade de 0 a 30 cm e solo 2, bom para o solo 4 e muito bom para o solo 1 (159,4 mg/100) , sendo este valor muito mais expressivo se comparado às demais amostras. Em relação ao ferro, as amostras 2 e 4 se encontram no parâmetro bom, enquanto na amostra 3 esse parâmetro é médio. As demais amostras apresentam valores que se enquadram como muito bom.

Analisando o cobre, este possui valores muito baixos para as amostras do talude e do solo 4, baixo para a amostra 3, bom para a amostra 2 e, muito bom para o solo 1. O Boro nas amostras de solo 3 e 4 está muito baixo, enquanto para as demais amostras se enquadra como baixo.

Analisando os macronutrientes, o nitrogênio estabelece-se numa faixa de 0,006 a 0,138%, sendo o menor valor encontrado no solo 4. Para o potássio, observa-se que na amostra de solo 1, este valor foi muito superior às demais.

A disponibilidade de fósforo, de acordo com o teor de argila do solo, é classificada como muito boa apenas na amostra de solo 1, para as demais esse valor se encontra muito baixo.

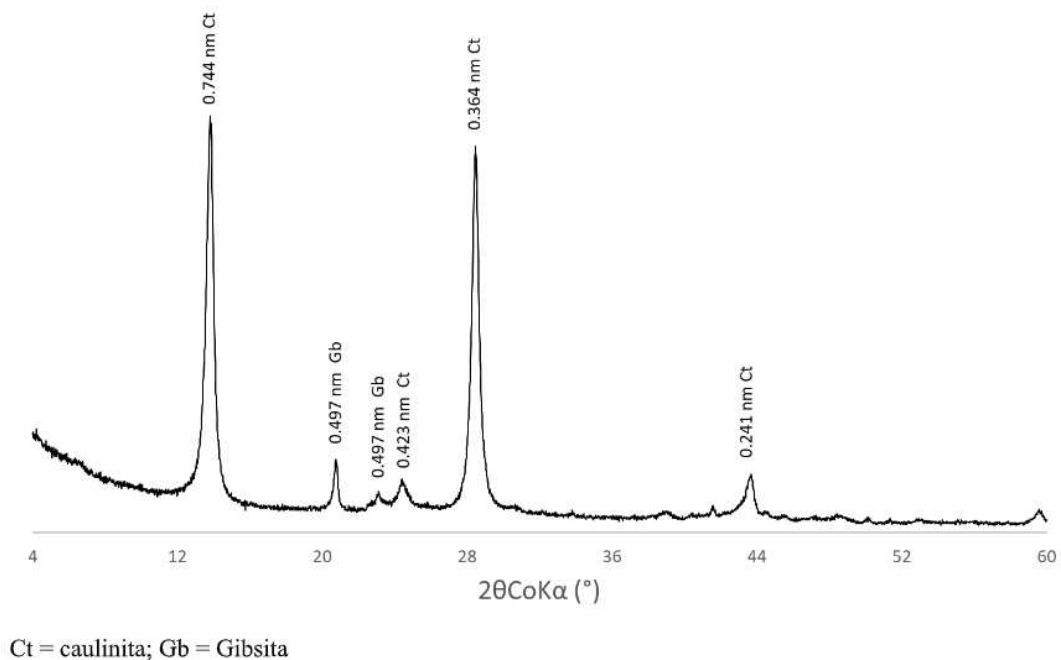
A matéria orgânica classifica-se como média, com valores de 3,01% na profundidade de 0 a 30 cm e de 2,26% na profundidade de 30 a 60 cm, já no solo 2 este valor se encontra baixo e nas demais amostras o valor encontrado foi muito baixo. Sabe-se que quanto maior este teor, menor a erodibilidade do solo, tanto que, em regiões áridas por exemplo, os solos são pobres em matéria orgânica, devido às altas temperaturas que aceleram sua decomposição (Silva *et al.*, 2024).

4.3 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

Após os resultados da análise mineralógica (Figuras 22 e 23) da fração argila por difratometria de raio x – DRX com a utilização da lâmina orientada, constatou-se

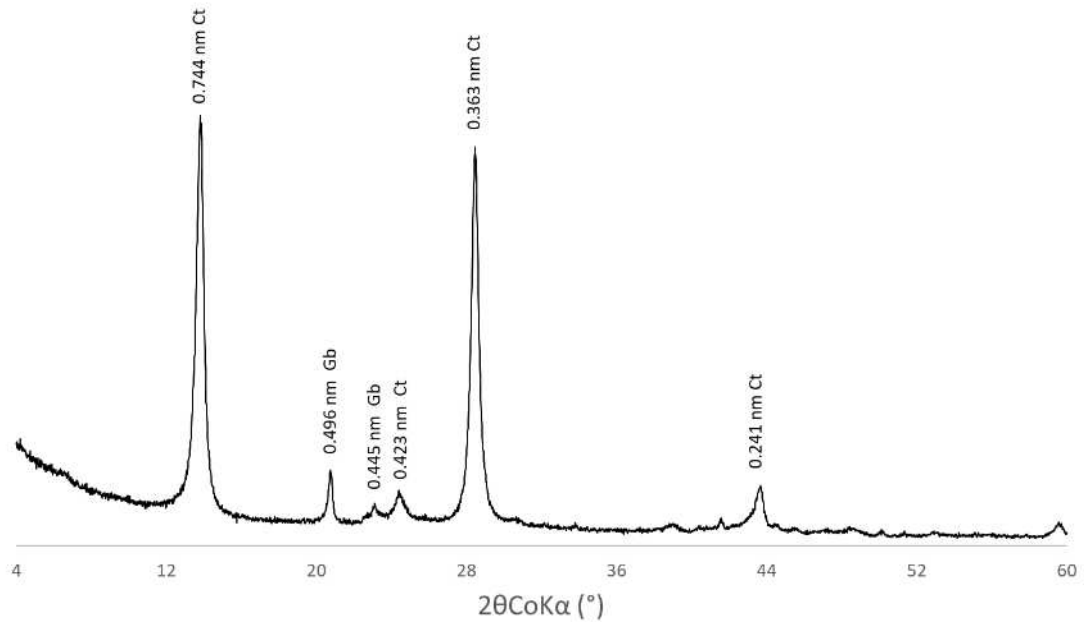
que apenas a caulinita e a gibbsita foram observadas nas amostras do talude de estudo, o que ratifica os trabalhos de Antonello *et al* (2002), que verificaram que solos típicos LAd - Latossolo Amarelo Distrófico possuem mineralogia da fração argila representada pela caulinita e gibbsita, sendo considerados solos com elevadas exigências de fertilizantes e necessidade de calagem devido a baixa saturação por bases, que pode ser verificada na análise química, uma vez que constatou que o solo do talude de estudo se encontra ácido, sendo essa acidez mais elevada a maiores profundidades, o que pode comprometer o desenvolvimento das mudas do capim Vetiver e refletir negativamente no ganho de resistência do solo.

Figura 22 - DRX do talude lateral na profundidade 0 a 30 cm



Fonte: UFV (2023)

Figura 23: DRX do talude lateral na profundidade 30 a 60 cm



Fonte: UFV (2023)

4.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Findada a realização dos ensaios, os resultados foram analisados para obter dados acerca da resistência drenada consolidada do solo testado. A interpretação destes resultados levou em consideração a dissipação de poropressão, que é característica da condição drenada nos ensaios de cisalhamento direto realizados com velocidades baixas.

Nas Tabelas 15 a 17 estão apresentados os índices físicos dos corpos de prova utilizados no ensaio (parcela SD, parcela com raiz após 6 meses de plantio e parcela com raiz após um ano de plantio, ambos a uma profundidade 0-30cm).

Tabela 15 - Índices físicos dos corpos de prova SD

Corpo de Prova		w(%) - Inicial	e	S Inicial (%)	ps (g/cm ³)	pumi (g/cm ³)	w(%) - Final	S Final (%)
Solo sem Raiz	CP01 - 25 kPa	34,573	0,881	64,238	1,40	1,701	33,438	100,0
	CP02 - 50 kPa	34,841	0,867	54,980	1,41	1,666	32,885	100,0
	CP03 - 100 kPa	34,555	0,882	49,650	1,40	1,632	33,470	100,0
	CP04 - 25 kPa	31,243	1,081	44,322	1,27	1,496	41,067	100,0
	CP05 - 50 kPa	32,394	1,007	53,140	1,31	1,579	38,263	100,0
	CP06 - 100 kPa	33,025	0,969	46,311	1,34	1,566	36,792	100,0

Fonte: UFJF (2024)

Tabela 16 - Índices físicos dos corpos de prova após seis meses de plantio

Corpo de Prova		w(%) - Inicial	e	S Inicial (%)	ps (g/cm ³)	pumi (g/cm ³)	w(%) - Final	S Final (%)
Solo com Raiz após 6 meses de plantio (Muda 1)	CPR01 - 25 kPa	21,995	0,949	61,047	1,283	1,565	36,017	100,0
	CPR02 - 50 kPa	23,839	0,957	65,584	1,346	1,666	36,352	100,0
	CPR03 - 100 kPa	24,790	0,959	68,058	1,344	1,678	36,424	100,0
Solo com Raiz após 6 meses de plantio (Muda 2)	CPR04 - 25 kPa	21,768	1,171	48,969	1,213	1,477	41,461	93,3
	CPR05 - 50 kPa	20,792	1,019	53,765	1,305	1,576	37,803	97,8
	CRP06 - 100 kPa	20,148	1,106	47,982	1,251	1,503	35,659	84,9

Fonte: UFJF (2024)

Tabela 17 - Índices físicos dos corpos de prova após doze meses de plantio

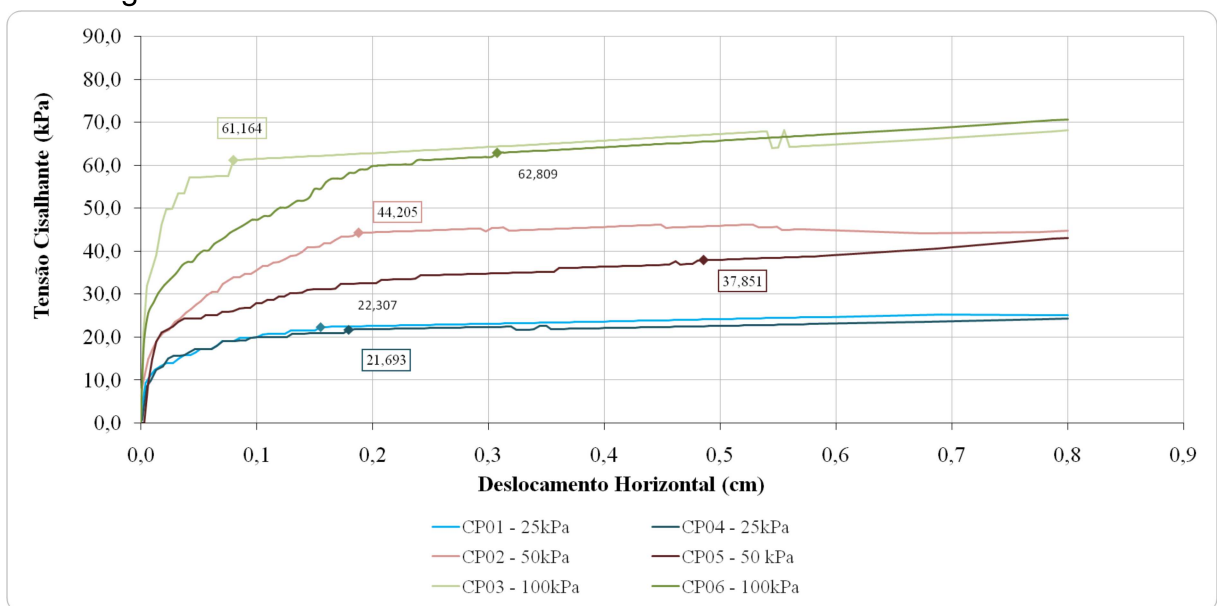
Corpo de Prova		w(%) - Inicial	e	S Inicial (%)	ps (g/cm ³)	pumi (g/cm ³)	w(%) - Final	S Final (%)
Solo com Raiz após 1 ano de plantio (Muda 3)	CPR01 - 25 kPa	22,735	1,170	51,171	1,214	1,490	39,356	88,6
	CPR02 - 50 kPa	25,904	0,997	68,421	1,315	1,656	37,854	100,0
	CPR03 - 100 kPa	25,327	1,074	62,111	1,270	1,592	36,017	88,3
Solo com Raiz após 1 ano de plantio (Muda 4)	CPR04 - 25 kPa	24,904	1,041	63,017	1,291	1,612	37,772	95,6
	CPR05 - 50 kPa	25,096	1,024	64,555	1,301	1,628	38,871	100,0
	CRP06 - 100 kPa	24,454	0,998	64,534	1,318	1,641	36,582	96,5

Fonte: UFJF (2024)

Percebe-se que não foi possível atingir 100% de saturação em todos os ensaios e, a presença das raízes, não representou diferença visível nos valores observados.

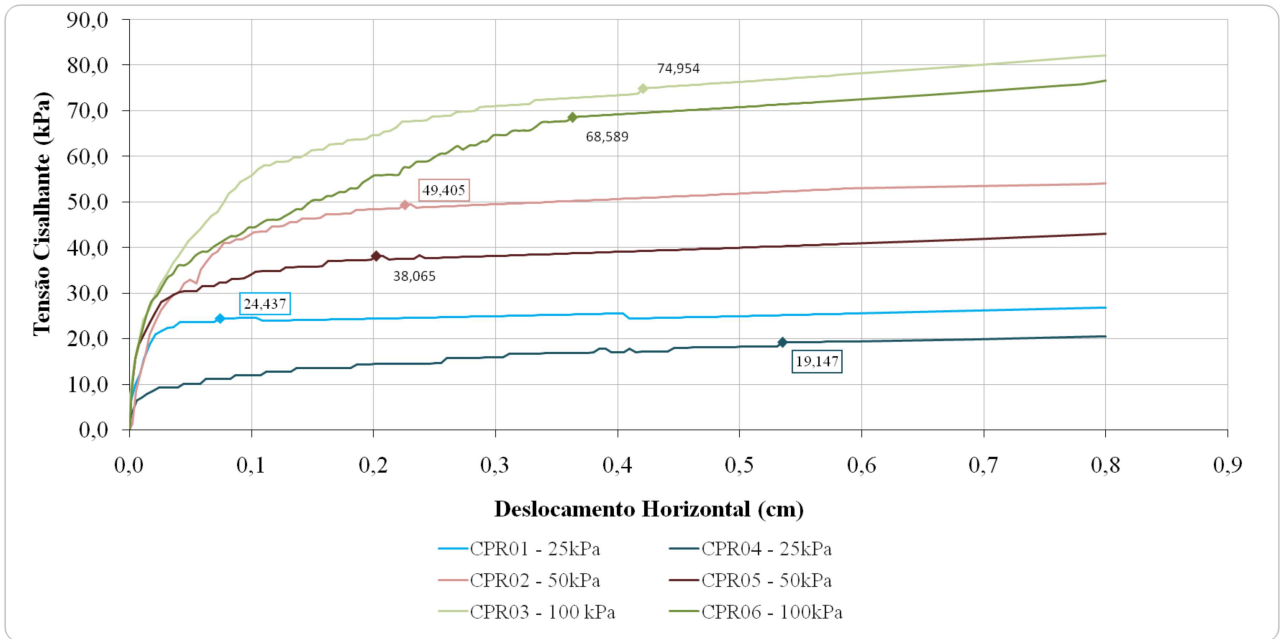
As curvas de deslocamento horizontal versus tensão cisalhante e deslocamento horizontal versus deslocamento vertical apontadas nas Figuras 24 a 29, representam o comportamento dos corpos de prova ao longo da etapa de ruptura durante o ensaio de cisalhamento.

Figura 24 - Curvas Tensão Cisalhante no SD x Deslocamento Horizontal



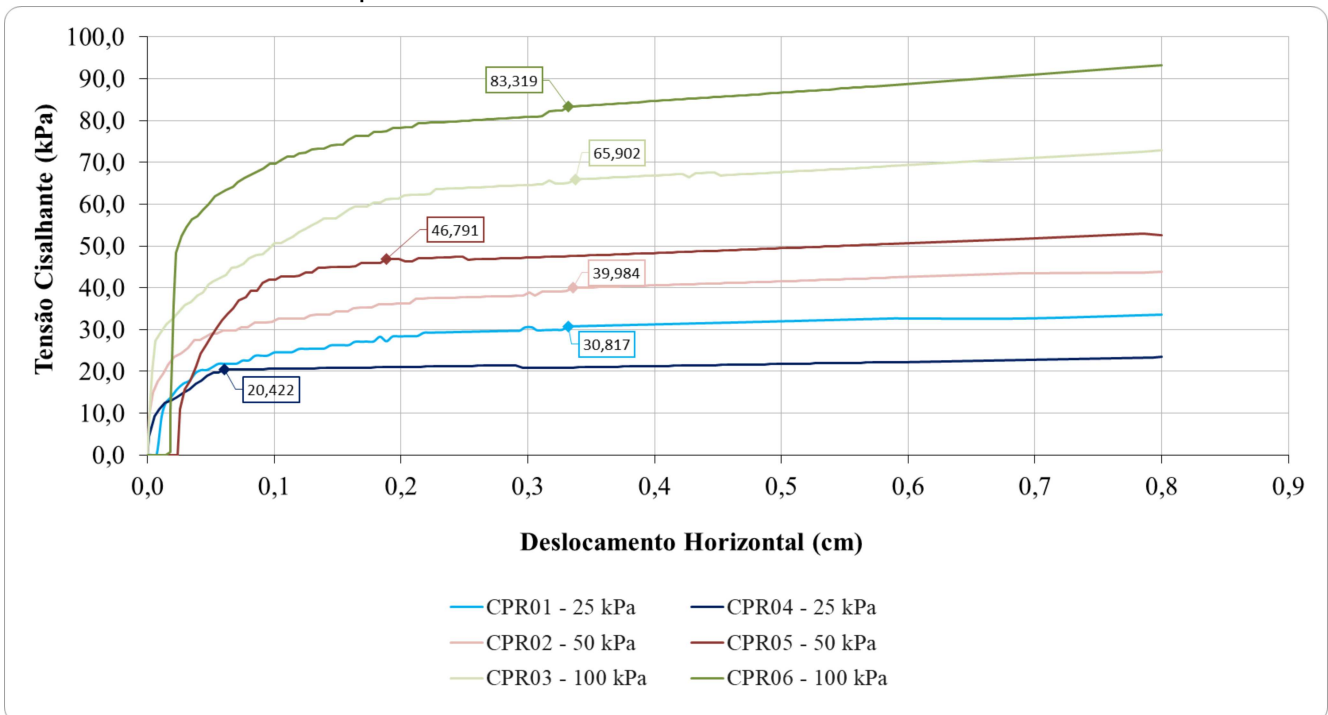
Fonte: UFJF (2024)

Figura 25 - Curvas Tensão Cisalhante no solo com raízes após seis meses de plantio x Deslocamento Horizontal



Fonte: UFJF (2024)

Figura 26 - Curvas Tensão Cisalhante no solo com raízes após doze meses de plantio x Deslocamento Horizontal



Fonte: UFJF (2024)

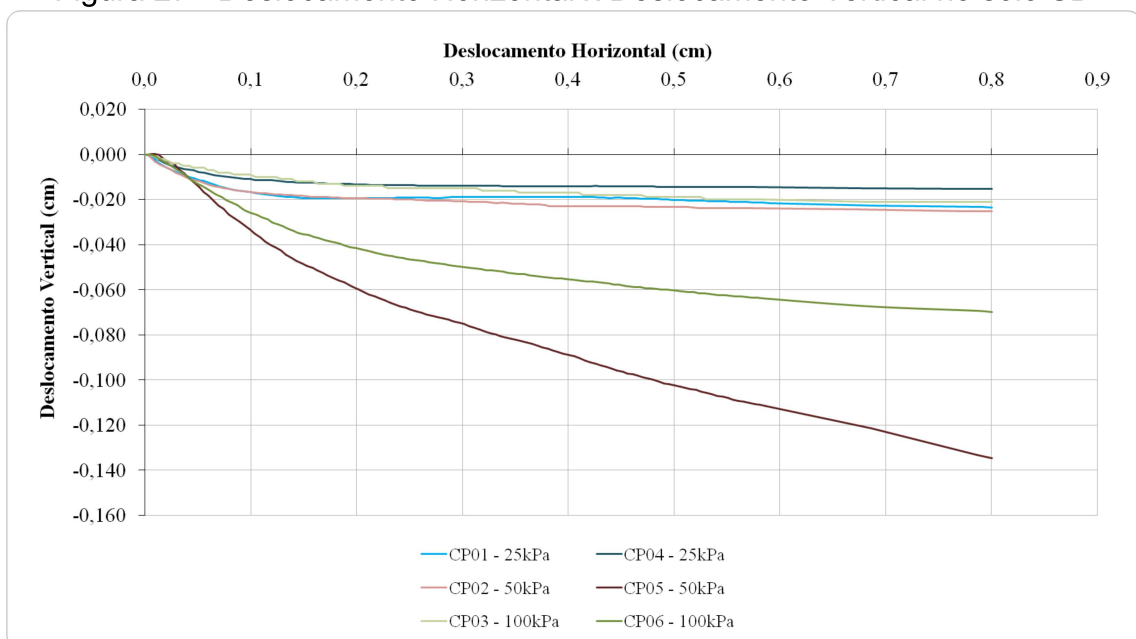
Os valores destacados nas figuras indicam a tensão de pico, ou seja, a resistência máxima até se alcançar uma deformação constante. Notavelmente, é

possível identificar nos corpos de prova um ganho contínuo de resistência com tendência à estabilização. Esse comportamento é típico de materiais dúcteis ou plásticos, ao contrário de materiais quebradiços que são caracterizados por uma tensão de pico bem divergente da tensão residual (Orozco, 2009). Na Figura 25 é possível identificar um leve pico de tensão no CPR01.

Os gráficos de tensão cisalhante *versus* deslocamento horizontal apontam que, em geral, a tensão cisalhante, apresenta um contínuo acréscimo na presença das raízes, o que, também poderia indicar que a ruptura da raiz não ocorre durante os ensaios de cisalhamento direto, se não, o alongamento ou deslizamento das fibras (Orozco, 2009).

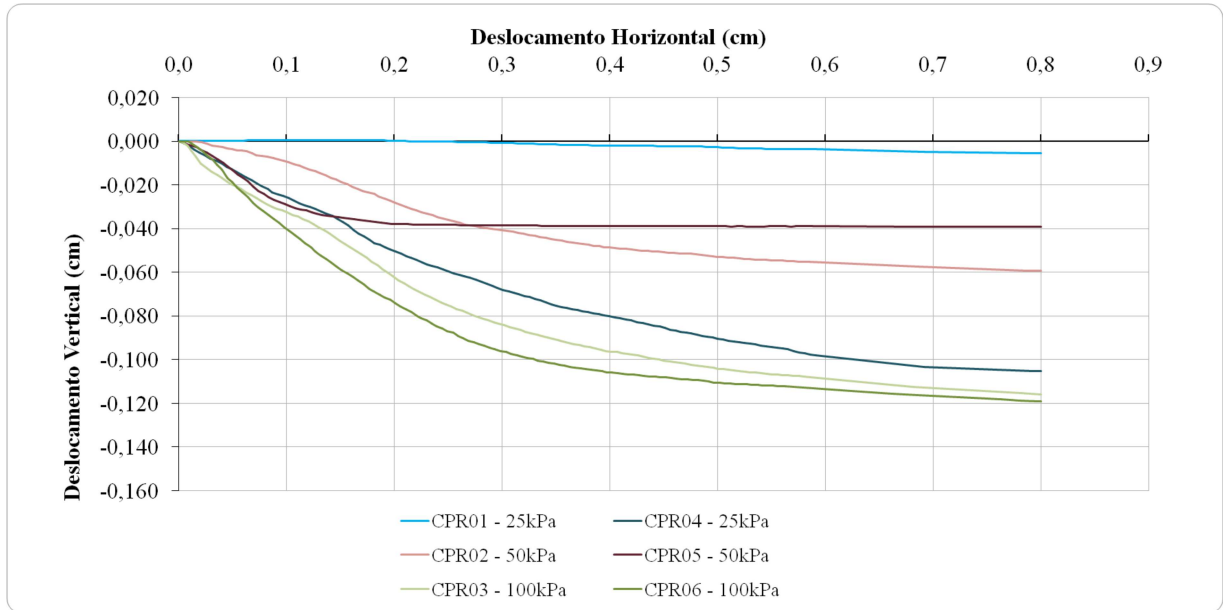
Ao analisar os gráficos, visualiza-se um acréscimo de resistência das amostras após seis meses de plantio do capim Vetiver em relação às amostras SD, sobretudo no corpo de prova 03 submetido a uma força de 100 kPa; onde, após a análise do comportamento da sua curva, verificou-se que a máxima tensão cisalhante do solo com raízes após seis meses de plantio foi de 74,954 kPa possibilitando um deslocamento um pouco superior a 0,4 cm, enquanto a amostra SD rompeu a uma tensão de 61,164 kPa, com um deslocamento inferior a 0,1 cm, ou seja, apresentou uma resistência menor, bem como um deslocamento menor (tal comportamento se repete quando analisados outros corpos de prova, inclusive nos ensaios realizados após doze meses de plantio).

Figura 27 - Deslocamento Horizontal x Deslocamento Vertical no solo SD



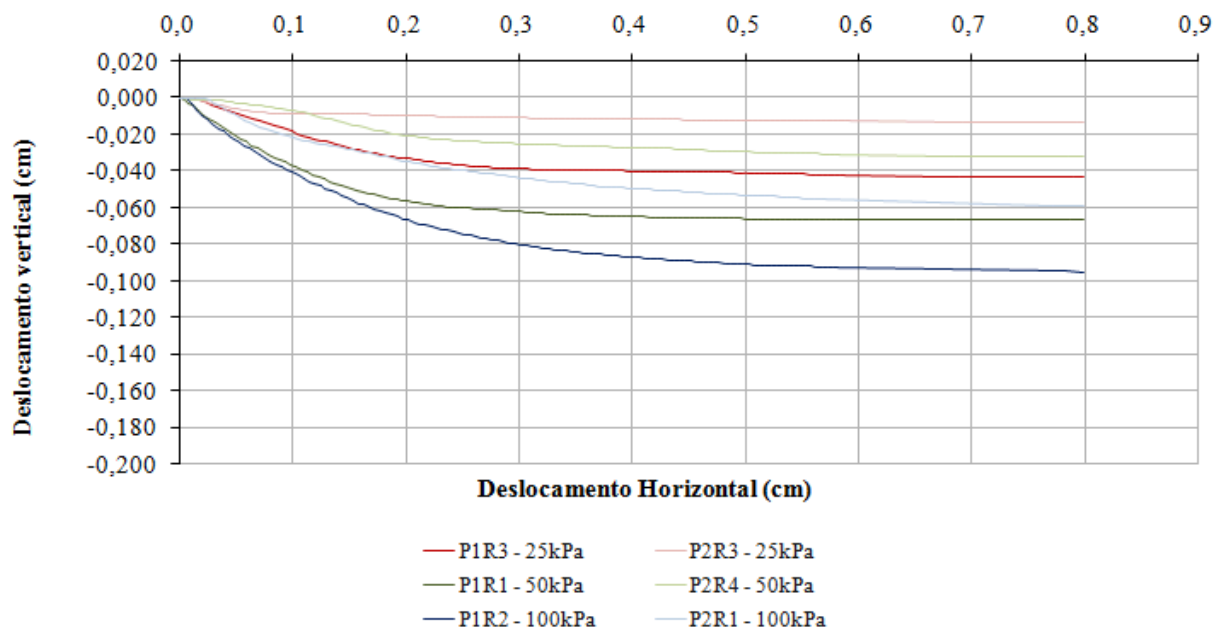
Fonte: UFJF (2024)

Figura 28 - Deslocamento Horizontal x Deslocamento Vertical no solo com raízes após seis meses de plantio



Fonte: UFJF (2024)

Figura 29 - Deslocamento Horizontal x deslocamento Vertical no solo com raízes após doze meses de plantio



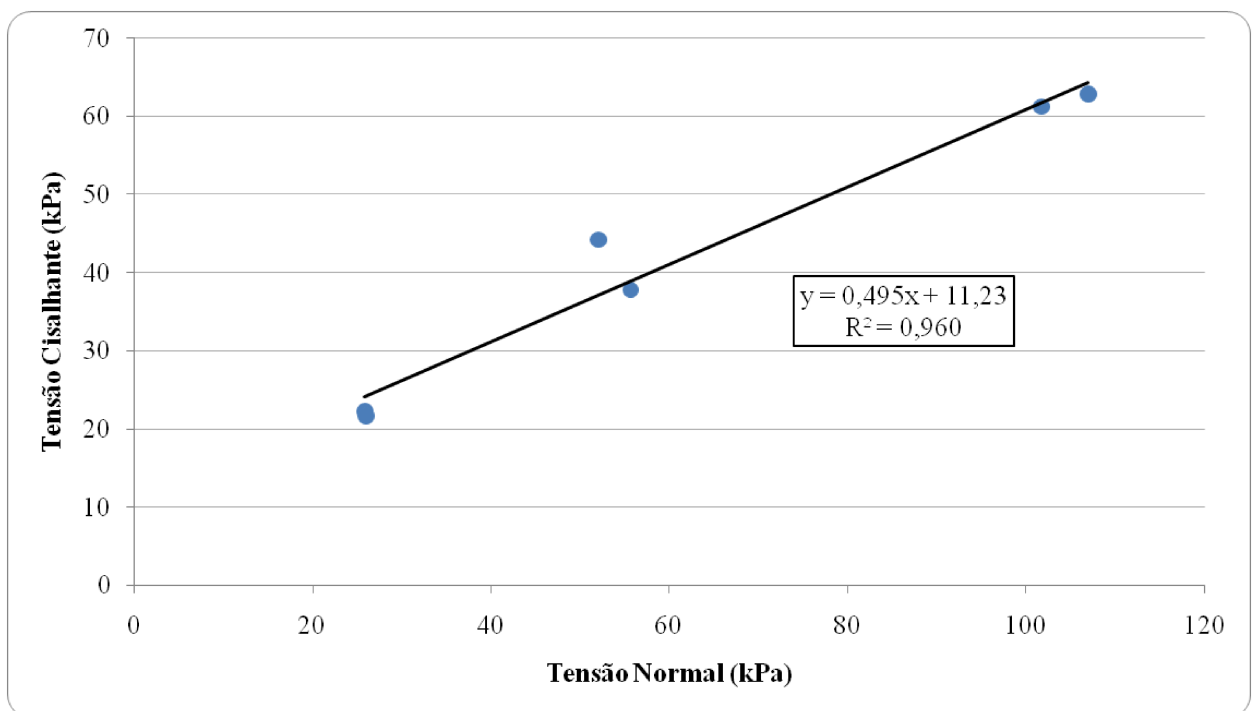
Fonte: UFJF (2024)

Com relação à variação de volume durante a fase de cisalhamento, percebe-se tendência à dilatação na amostra CPRO1 (Figura 28) testada aos seis meses de plantio, sendo este cenário compatível ao leve pico de tensão observado.

Por fim, definiu-se uma reta de tendência através do gráfico Tensão Cisalhante x Tensão Normal que demonstra a tendência do comportamento do solo e envoltória de resistência, utilizada para obter o ângulo de atrito interno e o intercepto coesivo, parâmetros de resistência indicados na Tabela 18.

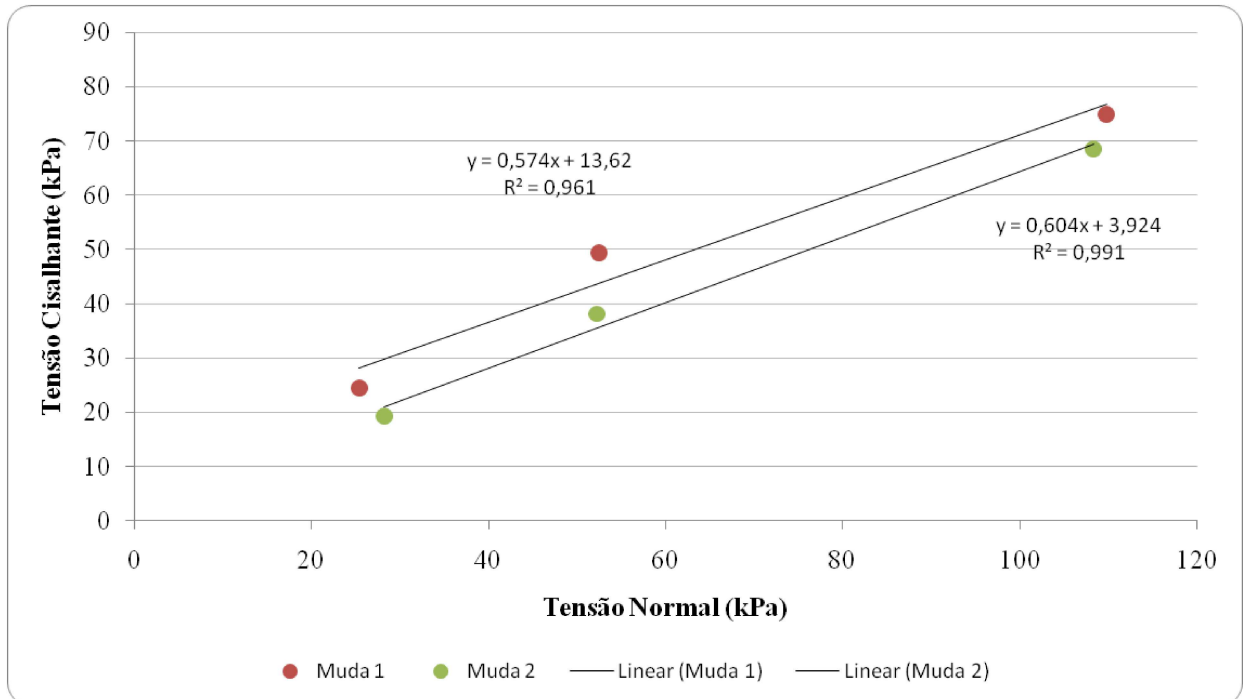
As Figuras 30 a 32 apresentam a envoltória para o solo sem raiz e as envoltórias do solo com raiz após seis meses e doze meses do plantio, separadas por muda.

Figura 30 -Tensão Cisalhante x Tensão Normal no SD



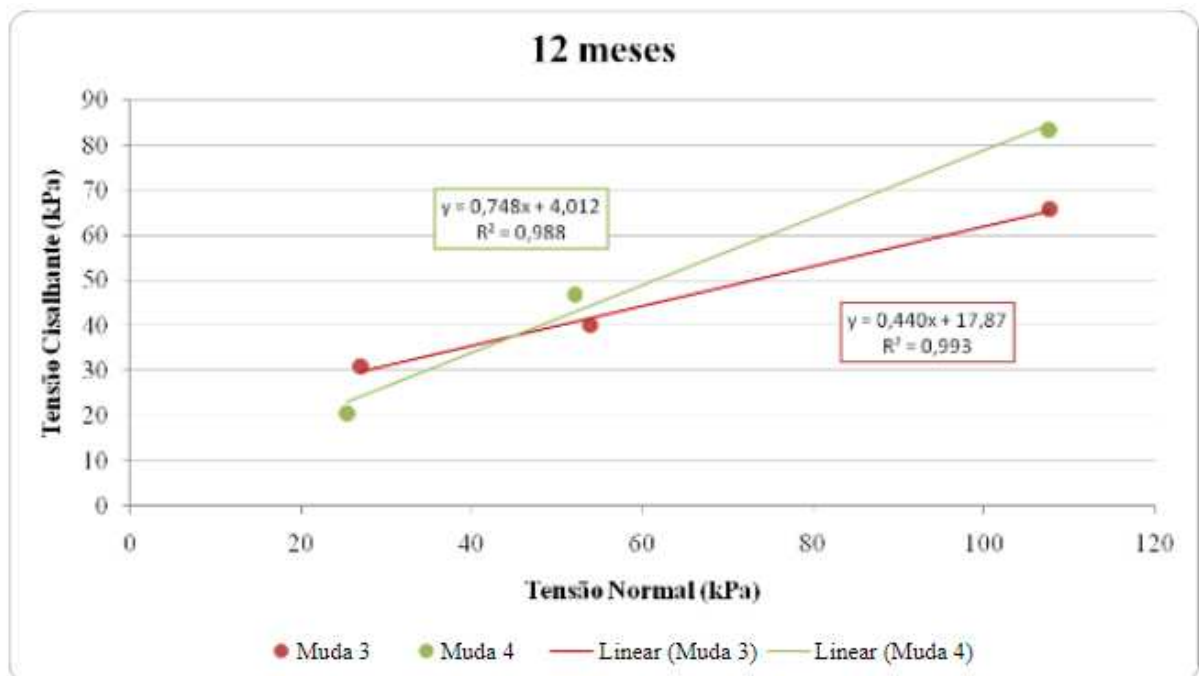
Fonte: UFJF (2024)

Figura 31 -Tensão Cisalhante x Tensão Normal no solo com raízes após seis meses de plantio



Fonte: UFJF (2024)

Figura 32 -Tensão Cisalhante x Tensão Normal no solo com raízes após doze meses de plantio



Fonte: UFJF (2024)

Tabela 18 - Ângulo de atrito interno e intercepto coesivo

	Solo sem raiz	Seis Meses Muda 1	Seis Meses Muda 2	Doze meses Muda 3	Doze meses Muda 4
phi (°)	26,33	29,85	31,13	23,75	36,80
c' (kPa)	11,23	13,62	3,924	17,87	4,012

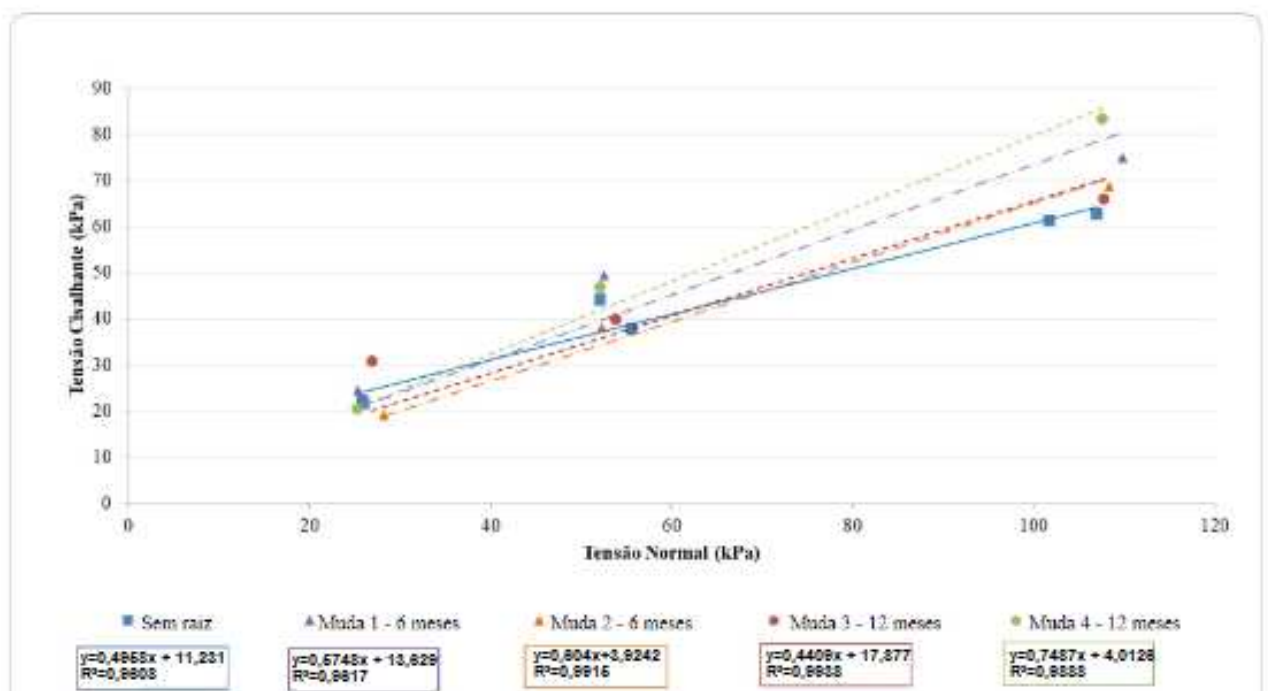
Fonte: UFJF (2024)

A análise comparativa qualitativa entre as envoltórias das mudas (Figuras 31 e 32) permite verificar que a resistência ao cisalhamento do solo com a muda 1 é nitidamente superior à resistência ao cisalhamento da muda 2 para toda a faixa de tensões nos primeiros seis meses após o plantio. Posterior a doze meses de plantio, a muda 4 obteve uma resistência maior, para tensões normais superiores a 45 kPa.

Considerando uma análise quantitativa dos valores dos parâmetros de resistência, pode-se dizer que a principal diferença encontra-se no intercepto coesivo, visto que a muda 1 apresentou valor cerca de 3 vezes superior ao valor obtido na muda 2 após seis meses de plantio.

A análise comparativa entre as envoltórias das mudas e a envoltória do SD não evidenciou uma tendência única, conforme aponta a Figura 33.

Figura 33 - Tensão Cisalhante x Tensão Normal para todos os ensaios

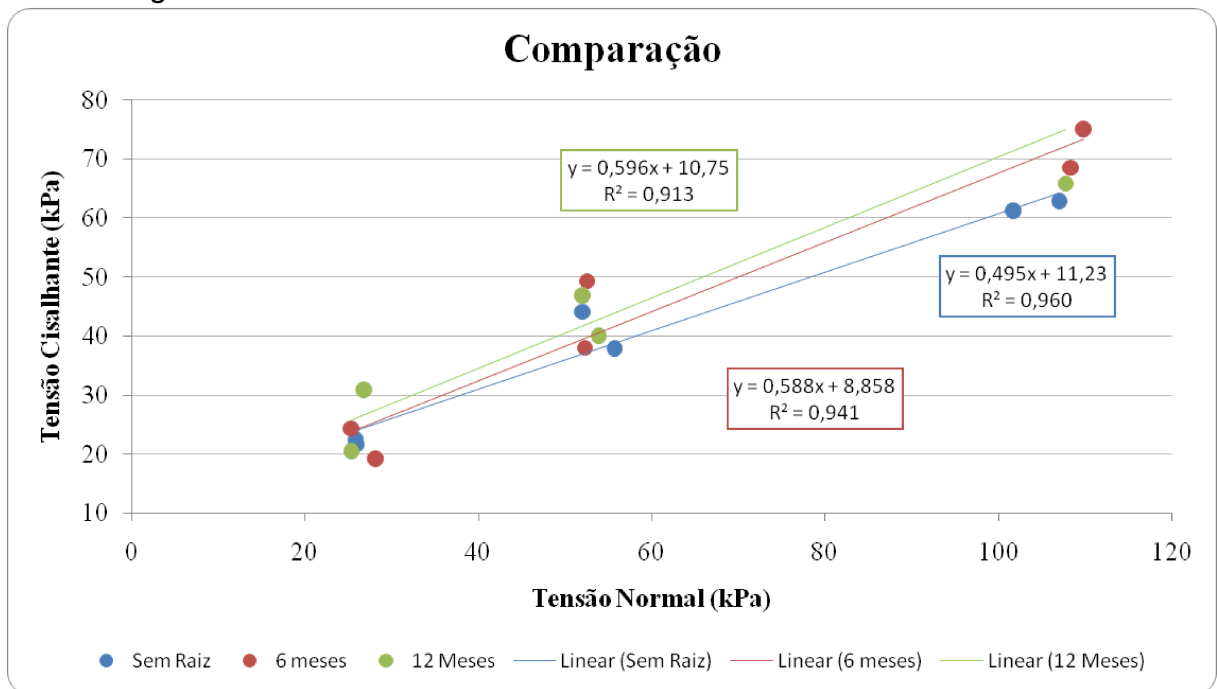


Fonte: UFJF (2024)

Observa-se que a resistência da parcela SD foi superior em comparação ao solo com raízes nas idades de seis meses e um ano quando submetida a pequenas tensões (em torno de 35 kPa). Para tensões superiores a esse valor, a introdução das raízes resultou em um aumento da resistência ao cisalhamento em comparação com o teste sem raízes, especialmente a muda 1 (seis meses) e a muda 4 (doze meses) de plantio. Já a muda 2 (seis meses) e a muda 3 (doze meses) demonstraram comportamento semelhante ao solo puro, evidenciando um aumento na resistência para valores de tensão normal acima de 80 kPa.

Dessa forma, optou-se pela comparação da resistência ao cisalhamento entre o solo sem raízes e o solo com raízes, independente do tipo de muda. Para tanto, foi gerado o gráfico da Figura 34 contendo a envoltória média do solo sem raízes e a envoltória média do solo com raízes, após seis e doze meses do plantio.

Figura 34 - Tensão Cisalhante x Tensão Normal e envoltórias médias



Na análise do gráfico da Figura 34 é possível observar que há melhoria substancial na capacidade do solo de resistir ao cisalhamento dentro da faixa de tensões normais estudadas quando as raízes estão presentes, como por exemplo, no ponto em que a tensão normal vale 80 kPa e a tensão cisalhante vale 55 kPa, percebe-se que a amostra sem raízes já teria se rompido, enquanto as amostras com raízes não, evidenciando o incremento de resistência que elas proporcionam.

Tabela 19 - Valores do ângulo de atrito interno e intercepto coesivo.

	Solo sem raiz	Seis Meses	Doze Meses
phi (°)	26,33	30,45	30,79
c' (kPa)	11,23	8,86	10,75

Fonte: UFJF (2024)

Avaliando os parâmetros apresentados na Tabela 19, é possível observar que as amostras contendo raízes apresentaram maiores valores para o ângulo de atrito interno, especialmente após doze meses de plantio, visto o aumento de aproximadamente 17%. Já os valores para o intercepto coesivo permaneceram na mesma ordem que a amostra sem raiz, entretanto, observou-se um crescimento deste após o primeiro ano de plantio em comparação aos primeiros seis meses. Já nos estudos de Feitosa (2017) o parâmetro com maior alteração foi o intercepto coesivo, que apresentou um ganho de 4 vezes em comparação às amostras sem raízes, enquanto o ângulo de atrito permaneceu sem grandes modificações.

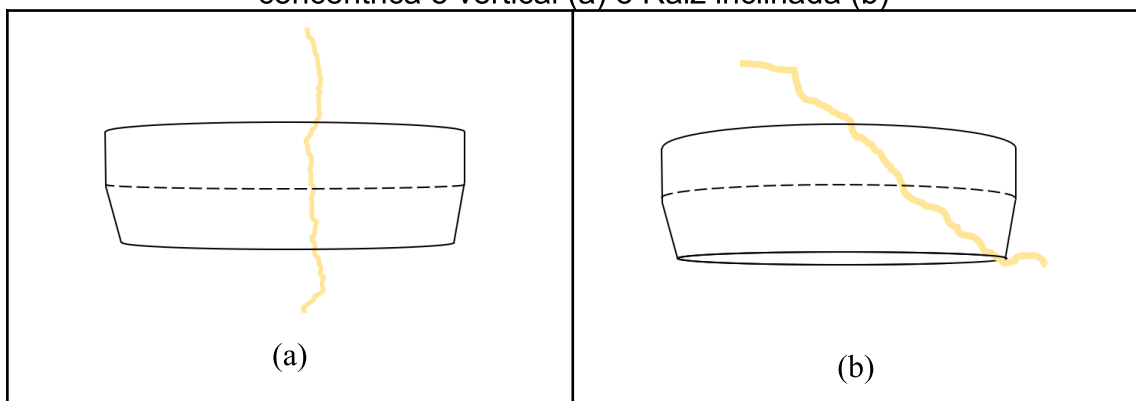
O fato da resistência após doze meses de plantio ter sido superior à resistência aos seis meses, ratifica a tendência de que as raízes, com o passar dos meses, proporcionam o aumento da resistência. Conforme apontado na literatura, no decorrer do tempo haverá um número maior de raízes presentes no solo, as quais tendem a aumentar os parâmetros de resistência (Gomes et al, 2020). Os mesmos autores apontam um aumento de 38,23% no ângulo de atrito interno e de 56,64% no intercepto coesivo após seis meses de plantio do Vetiver, quando comparados com o tratamento sem raízes do Vetiver. Em contrapartida, no estudo realizado por Orozco (2009), a maior resistência ao cisalhamento foi encontrada na amostra de solo sem raiz, que apresentou o maior valor de intercepto coesivo enquanto o ângulo de atrito interno não apresentou grandes variações após o período de um ano. Já a pesquisa realizada por Barbosa e Lima (2013) demonstrou que o aumento da resistência do solo só ocorreu após três anos de cultivo do capim Vetiver.

Ressalta-se que, diversos fatores podem afetar os resultados obtidos na análise da influência do capim Vetiver no que tange ao ganho de resistência do solo, a começar pela qualidade das mudas a serem plantadas. Segundo Pinto (2010) as mudas em saquinhos de polietileno apresentam uma taxa de sobrevivência maior se comparadas às mudas de raízes nuas, por já estarem enraizadas e aclimatadas no momento do plantio. Pereira (2006) também associou uma melhor taxa de

pegamento às raízes em sacos de polietileno, embora apresentem um custo mais elevado.

Outro fator que desempenha um papel significativo, diz respeito à morfologia das raízes (diâmetros inferiores tendem a promover maiores resistências), bem como seu posicionamento no corpo de prova, uma vez que elas podem estar localizadas em diferentes orientações no solo, não necessariamente estando concêntrica ao anel de cravação (Figura 35), fator que influencia na forma como ela interage no suporte à resistência do solo. A inclinação da raiz no corpo de prova também é um fator importante, visto que, a raiz inclinada pode estar em uma posição avançada em relação à que estaria ao longo do cisalhamento. Raízes que se desenvolvem para baixo contribuem para a ancoragem da vegetação no solo, já o desenvolvimento lateral fica responsável pela estabilização do solo ao redor da planta.

Figura 35 - Posições típicas da raiz no corpo de prova antes do ensaio: Raiz concêntrica e vertical (a) e Raiz inclinada (b)



Fonte: UFJF (2024)

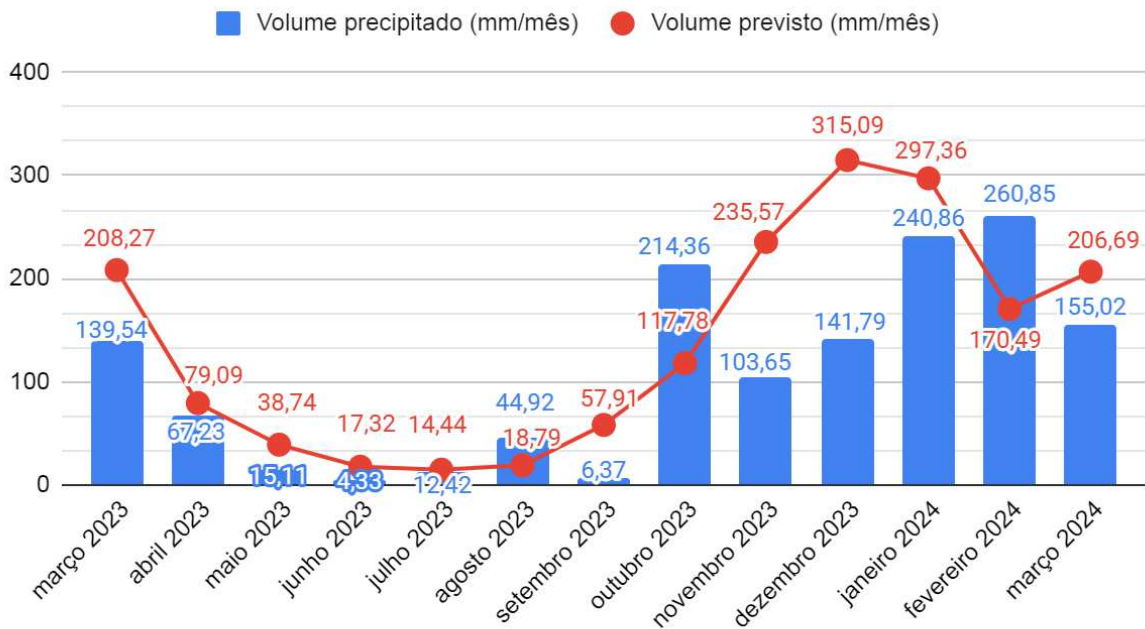
Portanto, é crucial levar em consideração esses aspectos na análise dos resultados, a fim de compreender adequadamente o impacto das raízes do capim Vetiver na resistência ao cisalhamento do solo.

4.5 ANÁLISE PLUVIOMÉTRICA

Analisando os índices pluviométricos registrados pelo pluviômetro instalado no local (Figura 36), constatou-se que durante o primeiro ano após o plantio do capim Vetiver, o volume total precipitado (1.406,45 mm) correspondeu a 79,12% do

esperado. O mesmo padrão foi visualizado nos primeiros meses após o plantio, o que pode ter prejudicado a adaptação inicial das mudas.

Figura 36 - Índice pluviométrico referente ao primeiro ano de plantio



Dados - Pluviômetro de Santa Efigênia

Fonte: Elaborado pela autora, com base em CEMADEN (2024)

4.6 ANÁLISE VISUAL APÓS UM ANO DE PLANTIO

Após um ano de plantio foi possível perceber o desenvolvimento de novos perfis a partir das mudas-mãe, bem como o desenvolvimento de novos colmos. Aproximadamente 50% das mudas plantadas se desenvolveram de maneira não uniforme: algumas atingiram 2 metros de altura e desenvolveram inflorescência, enquanto outras cresceram em torno de 0,80 a 1,50 metros. Como o local de implantação do experimento se trata de uma instituição de ensino infantil, algumas mudas localizadas ao pé do talude foram arrancadas, o que comprometeu o desenvolvimento das mesmas. A Figura 37 demonstra o comportamento das mudas após doze meses de plantio no talude lateral (A) e aos fundos (B).

Figura 37 - Desenvolvimento do capim Vetiver após um ano de plantio no talude de estudo









Fonte: Autora (2024).

Em campo, durante a coleta das amostras indeformadas de solo após seis meses de plantio, foi possível averiguar um crescimento do sistema radicular de pelo menos 0,48 m (quarenta e oito centímetros). Pontua-se que essas amostras foram exumadas, estando o diâmetro das raízes compreendido entre 0,345 mm a 1,14 mm, sendo o menor valor encontrado no CP02 e o maior valor observado no CP01, ambos retirados da mesma muda.

A Tabela 20 sintetiza os diâmetros verificados, além de expor fotos das raízes em cada corpo de prova, o que permite visualizar as ramificações radiculares em cada amostra.

Tabela 20 - Valores obtidos após exumação das raízes encontradas nas amostras de solo após seis meses de plantio

Amostras e respectivos diâmetros da raiz principal (mm)	
<p>Muda 1 - CP01 $\varnothing = 1,14$</p> 	<p>Muda 1 - CP02 $\varnothing = 0,345$</p> 
<p>Muda 1 - CP03 $\varnothing = 0,555$</p> 	<p>Muda 2 - CP04 $\varnothing = 0,96$</p> 
<p>Muda 2 - CP05 $\varnothing = 1,013$</p> 	<p>Muda 2 - CP06 $\varnothing = 1,29$</p> 

Já o comportamento das mudas plantadas nas garrafas PET pode ser observado na Tabela 21.

Tabela 21 - Desenvolvimento das mudas plantadas nas garrafas PET

CARACTERÍSTICAS	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 4
Comprimento dos colmos (cm)	80	88	81	85
Comprimento das raízes (cm)	27	33	34	47
Diâmetro das raízes	0,1 mm * a 0,6mm	0,1 mm * a 0,5mm	0,1 mm * a 0,6mm	0,1 mm * a 0,8 mm
nº de raízes principais	14	22	16	18

* foi observado \varnothing inferior a 0,1mm

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Conforme análise dos dados, verifica-se que a muda plantada no solo 4 foi a que obteve um melhor crescimento dos colmos, como também uma maior profundidade explorada pelo sistema radicular do capim Vetiver, a qual atingiu 47 cm; valor muito inferior ao obtido por Gomes (2020), que após seis meses de plantio em um talude de aterro, relata que o crescimento médio das raízes de Vetiver foi de 80 cm.

Entretanto, durante a exumação das raízes, foi possível perceber que o confinamento dentro das garrafas PET limitou o desenvolvimento das raízes no solo 2 e 4, as quais cresceram ao redor do bico da garrafa, conforme observado na Figura 38.

Figura 38 - Crescimento limitado das raízes no solo 2 e 4



Fonte: Autora (2024).

A partir da Figura 38, fica nítido o sistema radicular fasciculado, com uma densa concentração de raízes de pequenos diâmetros, as quais ocupam uma grande superfície de contato, se entrelaçando entre si.

Entende-se como qualidade física do solo a sua capacidade em prover ao sistema radicular condições apropriadas para seu crescimento e desenvolvimento das plantas. Os atributos físicos do solo que influenciam diretamente o crescimento das plantas são a retenção de água, a aeração e a resistência à penetração das raízes (Bonetti; Fink, 2020), os quais são atrelados à textura e estrutura do solo, além das práticas de manejo adotadas.

Logo, solos mais secos e com menores índices de vazios tendem a prejudicar o crescimento das raízes, uma vez que haverá pouco espaço para uma melhor movimentação/crescimento das raízes, além de poucos nutrientes disponíveis, fato que justifica o solo 1 apresentar a menor taxa de crescimento do sistema radicular e da parte aérea, bem como do número de raízes, conforme ilustra a Figura 39, onde também é possível visualizar que entre todas as amostras, as raízes da muda 4 apresentaram uma maior quantidade de pequenas ramificações.

Figura 39 - Desenvolvimento do sistema radicular em cada muda



Fonte: Autora (2024).

Pela análise dos valores obtidos, infere-se que as diferenças nos índices físicos dos solos estudados não comprometeram o desenvolvimento das mudas, visto que a taxa de crescimento dos colmos e do sistema radicular não apresentou diferenças muito expressivas.

5. CONCLUSÃO

Desenvolver práticas que visam mitigar impactos ambientais e minimizar os riscos inerentes à instabilidade de taludes além de previstas na Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, compõem estratégias importantes no desenvolvimento de uma gestão de riscos de desastres eficaz, o que tende a reduzir a ocorrência de desastres, bem como suas consequências nocivas aos seres humanos.

Sendo assim, no presente estudo procurou-se compreender como a resistência ao cisalhamento do solo pode ser afetada pela interação solo-raiz após o plantio do capim Vetiver. Com os resultados experimentais obtidos, aliados às respectivas análises ao longo do texto, pode-se concluir que:

Os procedimentos metodológicos adotados cumpriram seu propósito de modo que as análises físicas, químicas e mineralógicas proporcionaram um significativo volume de dados, que tornaram possível identificar algumas características dos objetos de estudo. Dentre os diagnósticos faz-se um destaque para a suscetibilidade aos processos erosivos do talude de estudo e, conseqüente deslizamento, dada as características físicas texturais siltosas e o pH ácido dos solos, justificando a necessidade de estabilização.

Os ensaios de cisalhamento direto realizados nos corpos de prova SD e com raízes das mudas após seis e doze meses de plantio, não representaram uma tendência única. Algumas mudas demonstraram que o capim Vetiver pode influenciar de maneira positiva no aumento da resistência ao cisalhamento do solo e, conseqüentemente, gerar uma maior estabilidade dos taludes, diminuindo sua suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos.

Considerando todas as mudas em cada idade (envoltória média) foi constatado um acréscimo no valor do ângulo de atrito interno, sendo esse ganho mais evidente após os doze meses de plantio. Por isso, ao considerar a atuação das raízes no reforço dos taludes é importante ponderar o tempo de plantio e a diversidade das mudas.

Entretanto, alguns fatores podem ter prejudicado o pleno desenvolvimento do capim Vetiver, bem como ter favorecido a baixa taxa de sobrevivência das mudas, a começar pela época do plantio, que ocorreu em meados de março, próximo ao final do período chuvoso e, como verificado pelo índice pluviométrico, as chuvas ocorridas ficaram abaixo do esperado, o que pode ter prejudicado a

adaptação inicial das mudas; a baixa fertilidade do solo do talude de estudo, pois levando em consideração os parâmetros da classificação agrônômica, a acidez ativa do solo está baixa, além dos baixos índices de macronutrientes e moderada concentração de matéria orgânica, fato que foi ainda mais prejudicado devido a falta de cuidados adicionais que potencializam o crescimento das plantas, como o enriquecimento do substrato por meio do uso de adubo e técnicas de manejo, as quais incluem o corte das folhas velhas que absorvem nutrientes em excesso. Outro empecilho, pode estar relacionado a falta de uma plena exposição solar, visto que no local há muitas construções vizinhas, que acabam provocando sombras nos limítrofes do terreno, onde se encontram os taludes de estudo.

Em relação a análise do crescimento das raízes nas garrafas PET ficou evidenciado o que mostra na literatura: o capim Vetiver é capaz de se adaptar a diferentes tipos de solos e condições adversas, visto que mesmo nos solos com baixa umidade e menores índices de vazios, a diferença da taxa do crescimento das raízes e dos colmos, não foi muito expressiva.

Fazem-se as seguintes recomendações para a complementação e aprimoramento deste estudo, ou para trabalhos futuros que venham a ser baseados nesta pesquisa:

- Realizar a implantação de parcelas experimentais com o capim Vetiver no início do período de incidência das chuvas, para conseguir um melhor e mais rápido desenvolvimento da espécie;
- utilizar práticas de manejo adequadas;
- determinar a resistência à tração das raízes do capim Vetiver.
- caracterizar sob os pontos de vista físico e químico os substratos no final do experimento, a fim de avaliar se as condições iniciais foram melhoradas após a implantação do capim, tais como a melhora na fertilidade do solo e na estabilidade dos agregados e, conseqüentemente, na prevenção de futuros deslizamentos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Ítalo D'Artagnan. **Metodologia do trabalho científico**. 23. ed. Recife: Editora UFPE, 2021.

ANDRADE, M. L. de. **Retroanálise de escorregamento de talude em solo residual de gnaiss—Estudo de caso km 133+ 500 sul da rodovia RJ-116**. 2021. Dissertação. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. 110 p. Disponível em:<<https://www.bdt.d.uerj.br:8443/handle/1/17390#preview-link0>>. Acesso em: 01 jul.2023

ANTONELO, L.L. *et al.* **Mineralogia e Química de Algumas Unidades de Solos do Estado do Rio de Janeiro**. Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Rio de Janeiro, n. 15, 21 p. 2002.

ARAÚJO, I.J. C. *et al.* **Viabilidade da aplicação do capim Vetiver em contenção de encostas no município de Maceió**. Ciências exatas e tecnológicas, Alagoas, v. 5, n.3, p. 27-36, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2016a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Solos e rochas - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181: Solo - Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682: Estabilidade de Encostas**. Rio de Janeiro, 2009.

ASTM D3080 - 04 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.

BARBOSA, Michele Cristina Rufino. **Estudo da aplicação do Vetiver na melhoria dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos em taludes**. Tese (Curso de Geotecnia). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2012. 148 p.

BONETTI, J.A.; FINK, J.R. **Manejo e conservação da água e do solo**. Lavras: Editora UFLA. 2020. Disponível em:
<https://www.researchgate.net/profile/Joao-Bonetti-2/publication/347514102_A_importancia_da_agua_para_a_producao_de_alimentos_e_o_meio_ambiente/links/5fd29692851c13fea9547b/A-importancia-da-agua-para-a-producao-de-alimentos-e-o-meio-ambiente.pdf#page=40> Acesso em 23 jun 2024.

BRASIL. **Instrução Normativa nº 1, de 24 de agosto de 2012**. Estabelece procedimentos e critérios para a decretação de situação de emergência ou estado de calamidade pública pelos Municípios, Estados e pelo Distrito Federal, e para o reconhecimento federal das situações de anormalidade decretadas pelos entes federativos e dá outras providências. Brasília, DF, 2012.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.608, de 24 de agosto de 2012**. Instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil e dá outras providências. Brasília, DF, 2012.

CAPUTO, Homero Pinto; CAPUTO, Armando Negreiros. **Mecânica dos solos: teoria e aplicações**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais. **Educação em clima de riscos de desastres**. 2.ed. São José dos Campos, 2023.

CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. **Manual técnico para elaboração, transmissão e uso de alertas de risco de movimentos de massa**. Vol. 2. São José dos Campos, 2018.

CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais. **Mapa Interativo da Rede Observacional para Monitoramento de Risco de Desastres Naturais do Cemaden**. Disponível em:
<<https://mapainterativo.cemaden.gov.br/#>>. Acesso em 25 abr de 2024.

CNM - Confederação Nacional de Municípios. **Panorama dos Desastres no Brasil entre 2013 a 2023**. Brasília (DF): Estudos Técnicos/Defesa Civil, 2024. Disponível em:
<https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2024/Estudos_tecnicos/202405_ET_Panorama_Desastres_Brasil_2013_a_2023.pdf>. Acesso em 29 jul. 2024

COBRADE - **Classificação e codificação brasileira de desastres: categoria, grupo, subgrupo, tipo, subtipo**. Ministério do Desenvolvimento Regional. Brasília: Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, 2012. Disponível em:
<<https://educacao.cemaden.gov.br/midioteca/classificacao-e-codificacao-brasileira-de-desastres-cobrade/>>. Acesso em 5 abr. 2023

COMPANHIA BRASILEIRA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM (SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL). **Manual de mapeamento de perigo e risco a movimentos gravitacionais de massa**. 2018. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro. 218 p. Disponível em:
<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/Volume1-ManualTecnicoParaMapeamentodePerigoeRiscoaMovimentos_CPRM.pdf>. Acesso em 12 nov. 2023.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 093: Solos - Determinação Da Densidade Real**. Rio de Janeiro, 1994.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

ESTRATÉGIA INTERNACIONAL PARA REDUÇÃO DE DESASTRES (EIRD/ONU). Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR).

Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres: 2015-2030. 2015.

Disponível em:

<https://www.ceped.pr.gov.br/sites/ceped/arquivos_restritos/files/documento/2022-11/marco_de_sendai_para_a_reducao_do_risco_de_desastres.pdf>. Acesso em 10 set. 2023.

FEITOSA, A. D. **A influência do Vetiver nos parâmetros de resistência do solo, coesão e ângulo de atrito**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2017. 45 p.

FERREIRA, C. C. M. *et al.* **Clima de Juiz de Fora: 50 anos de dados meteorológicos**. 1. ed. Juiz de Fora: Editora UFJF, 2023. Disponível em: <<https://www2.ufjf.br/editora/wp-content/uploads/sites/113/2023/10/Clima-de-Juiz-de-Fora-Editora-UFJF.pdf>>. Acesso em 2 abr. 2024

FRAGA, Raiza Gomes. **Soluções baseadas na Natureza: elementos para a tradução do conceito às políticas públicas brasileiras**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Sustentável). Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 2020. 177 p.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes: com exercícios resolvidos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GOMES, D. A. C. *et al.* **Efeito do capim Vetiver e dos estilozantes nos parâmetros de resistência do solo ao cisalhamento**. Brazilian Journal of Biosystems Engineering, v. 14(2), p. 187-197, 2020.

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

HENGCHAOVANICH, Diti; NILAWEERA, Nimal. **An assessment of strength properties of vetiver grass roots in relation to slope stabilization**. In: The first international conference on Vetiver, Bangkok: The Vetiver Network, p. 87-94, 1996.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **População em Áreas de Risco no Brasil**. Rio de Janeiro. 2018. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/6d4743b1a7387a2f8ede699273970d77.pdf>. Acesso em 24 jul. 2023.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **População no último censo.** Rio de Janeiro. 2022. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/juiz-de-fora/panorama>> Acesso em 24 jul. 2023.

JUIZ DE FORA (MG). **Mapeamento de áreas de risco de Juiz de Fora.** Prefeitura de Juiz de Fora. Subsecretaria de Proteção e Defesa Civil. 2023. Disponível em: <<https://www.pjf.mg.gov.br/subsecretarias/sspdc/mapeamento.php>>. Acesso em 25 jan. 2024.

JUIZ DE FORA (MG). **Plano de Saneamento Básico de Juiz de Fora - 1ª Revisão.** Prefeitura de Juiz de Fora. Secretaria de Planejamento Urbano. 2022. Disponível em: <https://www.pjf.mg.gov.br/secretarias/sepur/planos_programas/saneamento_basico/revisao_psb2022/produtos/arquivos/Produto4.pdf>. Acesso em 17 out. 2023.

LAGE, Mayara Ribeiro. **Ravinas e voçorocas: bioengenharia e retardantes químicos como tecnologia de controle e tratamento.** Tese (Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2023. 48 p.

LUCHESE, L. V. **Modelagem de suscetibilidade e de limiares de precipitação para deslizamentos de terra utilizando métodos de aprendizagem de máquina.** 2022. Tese (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2022. 240 p.

MACHADO, Lorena. **Comportamento do capim Vetiver (Chrysopogon zizanioides) como contribuição na estabilização de talude da margem do rio São Francisco.** Dissertação. Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, 2014. 67 p.

MACHADO, R. R.; ZACARIAS, G. M. **Análise de Risco de Deslizamento.** Revista Ordem Pública, v. 9, n. 1, p. 79 - 92, 2016.

MAICÁ, Vinícius Marcelo de Oliveira. **Análise da influência das raízes das gramíneas Vetiver (Chrysopogon zizanioides) e elefante (Pennisetum purpureum) na resistência ao cisalhamento de um solo argiloso.** Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul - UNIJUÍ. Trabalho de conclusão de curso. Ijuí, Rio Grande do Sul, 2021. 147 p.

MATSUO, Patrícia Mie. **Muito além da chuva: práticas educativas na era dos desastres.** 1. ed. Coimbra: Associação Portuguesa de riscos, prevenção e segurança. 2023.

MELO, F. L. et al. **Vegetação como instrumento de proteção e recuperação de taludes.** Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, Mossoró - RN, v. 8, n. 5, p. 116 - 124, 2013.

MENDES JÚNIOR, Francisco Émerson Braga. **Utilização do capim Vetiver como solução da bioengenharia para o controle da erosão de Mata Redonda.**

Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 2019. 110 p.

MONTE, Benício Emanuel Omena. **CRBi: um índice de risco de inundações desenvolvido para municípios brasileiros**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) . Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2022. 253 p.

NARDOTTO JÚNIOR, André Orlandi. **Uso do solo na bacia hidrográfica do rio São Mateus empregando ferramentas de geotecnologia**. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Agricultura Tropical). Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, Espírito Santo, 2024. 76 p.

OLIVEIRA, M. M. *et al.* **Capim Vetiver (Chrysopogon zizanioides): uma alternativa para o plantio direto na agricultura familiar**. Revista Terceiro Incluído, Goiás, v. 8, p. 77 - 84, 2018.

OROZCO, Margarita María Dueñas. **Caracterização da gramínea Vetiveria Zizanioides para aplicação na recuperação de áreas degradadas por erosão**. Dissertação (Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2009. 96 p.

PEREIRA. Claudia Rakel Pena. **Planejamento urbano e gestão de risco de inundação na bacia hidrográfica do rio Bacanga - São Luís - MA**. Geoconexões, Natal, v. 1, n. 18, p. 129 - 150, 2024.

SALES, Luanda Dantas. **Determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo na cidade de Cajazeiras-PB**. Trabalho de conclusão de curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba - Campus Cajazeiras, Cajazeiras, Paraíba, 2023. 44 p.

SANTOS. Aline Gasparoni. *et al.* **Diagnóstico dos deslizamentos de massa ocorridos na Região Leste do município de Juiz de Fora - MG**. Revista Científica ANAP Brasil, v. 16, n. 39, p. 26-40, 2023.

SANTOS, Maria Fernanda Nóbrega dos; ENOKIBARA, Marta. **Infraestrutura verde: conceitos, tipologias e terminologia no Brasil**. Paisag. Ambiente: Ensaio, São Paulo, v. 32, n. 47, p. 1-15, 2021.

SILVA, Breno Alcântara. **Uso do Capim Vetiver como interveniente na prevenção de desastres por movimentos de massa**. Especialização em Gestão Pública em Proteção e Defesa Civil. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, 2022. 57 p.

SILVA, J. B. *et al.* **Erodibilidade do solo em áreas de floresta e pastagens sob diferentes posições da paisagem em Areia, Paraíba**. Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente - FAEMA, v. 14, n. 2, p. 558 - 572, 2024.

SIQUEIRA, Caio Rogerio Sousa. **Análise da estabilidade de um talude localizado em Fortaleza-CE.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Ceará, Russas, Ceará, 2023. 56 p.

SOUTO, Aline Rafaela Rodrigues. **Estudo do capim Vetiver (Chrysopogon Zizanioides (L.) Roberty) na área ambiental: revisando aplicações.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de São Carlos, Buri, São Paulo, 2022. 57 p.

TEIXEIRA, Thiago Marques Baptista. **Análise da influência das raízes de Vetiver nos parâmetros de resistência dos solos com a profundidade.** Dissertação. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais. 2017. 219 p.

TOMINAGA, L. K; SANTORO, J; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir.** 3.ed. São Paulo: Ed. Instituto Geológico, 2015. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/233/2017/05/Conhecer_para_Prevenir_3ed_2016.pdf>. Acesso em 01 jul. 2023.

TRUONG, Paul; VAN, Tran Tan; PINNERS, Elise. **Aplicações do Sistema Vetiver. Manual Técnico de Referência.** 2.ed. Rede Internacional de Vetiver, 2008.

TRUONG, Paul; HART, Barbara. **Vetiver System for Wastewater treatment.** Boletim técnico, n. 2, PRVN/ORDPB, Bangkok, Thailand. 2001.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Prediction rainfall erosion losses: a guide to conservation planning.** Handbook n. 537. Washington D.C.: USDA, 1978. 407p

ZUQUETTE, Lázaro Valentin. **Riscos, Desastres e Eventos Naturais Perigosos - aspectos conceituais na análise e estimativas de risco.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

APÊNDICE A - Classes de interpretação para a acidez ativa do solo (pH)¹

Classificação química						
Ac. muito elevada	Acidez elevada	Acidez média	Acidez Fraca	Neutra	Alcalinidade fraca	Alcalinidade e elevada
> 4,5	4,5 - 5,0	5,1 - 6,0	6,1 - 6,9	7,0	7,1 - 7,8	> 7,8
Classificação agrônômica						
Muito baixo	Baixo	Bom	Alto	Muito alto		
< 4,5	4,5 - 5,4	5,5 - 6,0	6,1 - 7,0	> 7,0		

¹ pH em H₂O, relação 1:2,5, TFSA: H₂O.

Fonte: Alvarez V. *et al.* (1999, *apud* EMBRAPA, 2018)

APÊNDICE B - Classes de interpretação de fertilidade do solo para a matéria orgânica e para o complexo de troca catiônica

Característica	Unidade ¹	Classificação				
		Muito baixo	Baixo	Médio ²	Bom	Muito bom
Carbono orgânico (C.O.) ²	dag/Kg	£ 0,40	0,41 - 1,16	1,17 - 2,32	2,33 - 4,06	> 4,06
Matéria Orgânica (M.O.) ³	dag/Kg	£ 0,70	0,71 - 2,00	2,01 - 4,00	4,01 - 7,00	> 7,00
Cálcio trocável (Ca ²⁺) ⁴	cmol _c /dm ³	£ 0,40	0,41 - 1,20	1,21 - 2,40	2,41 - 4,00	> 4,00
Magnésio trocável (Mg ²⁺) ⁴	cmol _c /dm ³	£ 0,15	0,16 - 0,45	0,46 - 0,90	0,91 - 1,50	> 1,50
Acidez trocável (Al ³⁺) ⁴	cmol _c /dm ³	£ 0,20	0,21 - 0,50	0,51 - 1,00	1,01 - 2,00 ¹¹	> 2,00 ¹¹
Soma de bases (SB) ⁵	cmol _c /dm ³	£ 0,60	0,61 - 1,80	1,81 - 3,60	3,61 - 6,00	> 6,00
Ac. Potencial (H + Al) ⁶	cmol _c /dm ³	£ 1,00	1,01 - 2,50	2,51 - 5,00	5,01 - 9,00 ¹¹	> 9,00 ¹¹
CTC efetiva (t) ⁷	cmol _c /dm ³	£ 0,80	0,81 - 2,30	2,31 - 4,60	4,61 - 8,00	> 8,00
CTC pH 7 (T) ⁸	cmol _c /dm ³	£ 1,60	1,61 - 4,30	4,31 - 8,60	8,61 - 15,00	> 15,00
Saturação por Al ³⁺ (m) ⁹	%	£ 15,0	15,1 - 30,0	30,1 - 50,0	50,1 - 75,0 ¹¹	> 75,0 ¹¹
Saturação por bases (v) ¹⁰	%	£ 20,0	20,1 - 40,0	40,1 - 60,0	60,1 - 80,0	> 80,0

¹ dag/kg = % (m/m); cmol_c/dm³. ² O limite superior desta classe indica o nível crítico. ³ Método Walkley & Black; M.O. = 1,724 x C.O. ⁴ Método KCl 1 mol/L. ⁵ SB = Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + Na⁺. ⁶ H + Al, Método Ca(OAc)₂ 0,5 mol/L, pH 7. ⁷ t = SB + Al³⁺. ⁸ T = SB + (H + Al). ⁹ m = 100 Al³⁺/t. ¹⁰ V = 100 SB/T. ¹¹ A interpretação dessas características nessas classes deve ser alta e muito alta em lugar de bom e muito bom.

Fonte: Alvarez V. *et al.* (1999, *apud* EMBRAPA, 2018)

APÊNDICE C - Classes de interpretação da disponibilidade para o fósforo, de acordo com o teor de argila do solo ou do valor de fósforo remanescente (P-rem) e para o potássio

Característica	Classificação				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Bom	Muito bom
(mg/dm ³) ¹				
Argila (%)	Fósforo disponível (P) ²				
60 - 100	£ 2,7	2,8 - 5,4	5,5 - 8,0 ³	8,1 - 12,0	> 12,0
35 - 60	£ 4,0	4,1 - 8,0	8,1 - 12,0	12,1 - 18,0	> 18,0
15 - 35	£ 6,6	6,7 - 12,0	12,1 - 20,0	20,1 - 30,0	> 30,0
0 - 15	£ 10,0	10,1 - 20,0	20,1 - 30,0	30,1 - 45,0	> 45,0
P-rem ⁴ (mg/L)					
0 - 4	£ 3,0	3,1 - 4,3	4,4 - 6,0 ³	6,1 - 9,0	> 9,0
4 - 10	£ 4,0	4,1 - 6,0	6,1 - 8,3	8,4 - 12,5	> 12,5
10 - 19	£ 6,0	6,1 - 8,3	8,4 - 11,4	11,5 - 17,5	> 17,5
19 - 30	£ 8,0	8,1 - 11,4	11,5 - 15,8	15,9 - 24,0	> 24,0
30 - 44	£ 11,0	11,1 - 15,8	15,9 - 21,8	21,9 - 33,0	> 33,0
44 - 60	£ 15,0	15,1 - 21,8	21,9 - 30,0	30,1 - 45,0	> 45,0
Potássio disponível (K) ²					
	£ 15	16 - 40	41 - 70	71 - 120	> 120

¹ mg/dm³ = ppm (m/v). ² Método Mehlich-1. ³ Nesta classe apresentam-se os níveis críticos de acordo com o teor de argila ou com o valor do fósforo remanescente. O limite superior desta classe indica o nível crítico. P-rem = Fósforo remanescente.

Fonte: Alvarez V. *et al.* (1999, *apud* EMBRAPA, 2018)

APÊNDICE D - Classes de interpretação de da disponibilidade para o enxofre ¹, de acordo com o valor de fósforo remanescente (P-rem)

P-rem	Classificação				
	Muito baixo	Baixo	Médio ²	Bom	Muito bom
mg/L(mg/dm ³) ³				
		Enxofre disponível (S)			
0 - 4	£ 1,7	1,8 - 2,5	2,6 - 3,6	3,7 - 5,4	> 5,4
4 - 10	£ 2,4	2,5 - 3,6	3,7 - 5,0	5,1 - 7,5	> 7,5
10 - 19	£ 3,3	3,4 - 5,0	5,1 - 6,9	7,0 - 10,3	> 10,3
19 - 30	£ 4,6	4,7 - 6,9	7,0 - 9,4	9,5 - 14,2	> 14,2
30 - 44	£ 6,4	6,5 - 9,4	9,5 - 13,0	13,1 - 19,6	> 19,6
44 - 60	8,9	9,0 - 13,0	13,1 - 18,0	18,1 - 27,0	> 27,0

¹ Extrator $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ator, 500 mg/L de P, em HOAc 2 mol/L. ² Esta classe indica os níveis críticos de acordo com o valor de P-rem. ³ mg/dm³ = ppm (m/v).

Fonte: Alvarez V. *et al.* (1999, *apud* EMBRAPA, 2018)

APÊNDICE E - Classes de interpretação da disponibilidade para os micronutrientes

Micronutrientes	Classificação				
	Muito baixo	Baixo	Médio ¹	Bom	Muito bom
mg/L(mg/dm ³) ²				
Zinco disponível (Zn) ³	£ 0,4	0,5 - 0,9	1,0 - 1,5	1,6 - 2,2	> 2,2
Manganês disponível (Mn) ³	£ 2	3 - 5	6 - 8	9 - 12	> 12
Ferro disponível (Fe) ³	£ 8	9 - 18	19 - 30	31 - 45	> 45
Cobre disponível (Cu) ³	£ 0,3	0,4 - 0,7	0,8 - 1,2	1,3 - 1,8	> 1,8
Boro disponível (B) ⁴	£ 0,15	0,16 - 0,35	9,5 - 13,0	13,1 - 19,6	> 19,6

¹ O limite superior desta classe indica o nível crítico. ² mg/dm³ = ppm (m/v). ³ Método Mehlich-1. ⁴ Método água quente.

Fonte: Alvarez V. *et al.* (1999, *apud* EMBRAPA, 2018)