

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

Leticia Rodrigues Pimentel Magalhães

Uso de ensaios geotécnicos na concepção de projetos de recuperação de áreas degradadas: estudo de caso da voçoroca do Jardim Botânico da UFJF, em Juiz de Fora (MG)

Juiz de Fora

2021

Leticia Rodrigues Pimentel Magalhães

Uso de ensaios geotécnicos na concepção de projetos de recuperação de áreas degradadas: estudo de caso da voçoroca do Jardim Botânico da UFJF, em 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.
Área de concentração: Técnicas do Ambiente Construído

Orientador: Prof. Dr. Jonathas Batista Gonçalves Silva

Coorientadora: Prof. Dra. Tatiana Tavares Rodriguez

Juiz de Fora

2021

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Magalhães, Leticia Rodrigues Pimentel.

Uso de ensaios geotécnicos na concepção de projetos de recuperação de áreas degradadas: estudo de caso da voçoroca do Jardim Botânico da UFJF, em Juiz de Fora (MG) / Leticia Rodrigues Pimentel Magalhães. - 2021.

219 p. : il.

Orientador: Jonathas Batista Gonçalves Silva

Coorientadora: Tatiana Tavares Rodriguez

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído, 2021.

1. Solo degradado. 2. Resistência ao cisalhamento. 3. Erodibilidade. 4. Bioengenharia. I. Silva, Jonathas Batista Gonçalves, orient. II. Rodriguez, Tatiana Tavares, coorient. III. Título.

Letícia Rodrigues Pimentel Magalhães

Uso de ensaios geotécnicos na concepção de projetos de recuperação de áreas degradadas: estudo de caso da voçoroca do Jardim Botânico da UFJF, em 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.
Área de concentração: Técnicas do Ambiente Construído

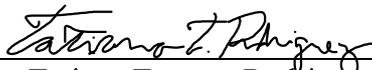
Aprovada em 29 de novembro de 2021

BANCA EXAMINADORA



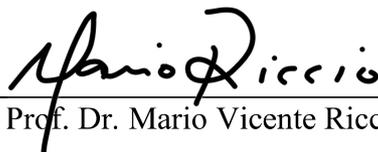
Prof. Dr. Jonathas Batista Gonçalves Silva - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dra. Tatiana Tavares Rodriguez - Coorientadora

Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Dr. Mario Vicente Riccio Filho

Universidade Federal de Juiz de Fora



Klinger Senra Rezende

Univçosa – Centro Universitário de Viçosa

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, pelo sustento durante toda a minha caminhada, permitindo que eu chegasse até aqui e concluísse mais esta etapa em minha formação acadêmica.

Ao meu esposo Caio, pelo carinho, incentivo e companheirismo em todos os momentos, especialmente nesse período do mestrado. A minha mãe Elizabeth, pelo amor e cuidado de sempre. A minha irmã Natália, pela amizade e apoio em todas as situações. Todas as minhas conquistas são deles também!

Ao meu cunhado Guilherme e ao meu sobrinho Théo, por compartilharem comigo tantos momentos alegres e divertidos. A minha segunda família, Reinaldo, Patrícia e Beatriz por também sempre me apoiarem e torcerem por mim.

Ao professor Jonathas, por ser um orientador excepcional e por todos os ensinamentos e conselhos compartilhados de forma tão atenciosa e paciente. À professora e coorientadora Tatiana, que também contribuiu de forma impecável na minha formação e na elaboração deste trabalho. Muito obrigada, de coração, por toda dedicação e apoio nesse período, foi por causa de vocês que não desisti!

Aos demais professores membros da banca examinadora, por aceitarem o convite e enriquecerem o trabalho com suas contribuições.

Aos colegas de turma e de trabalho, especialmente à Letícia Carvalho e à Lethicia Fernandes, que também participaram no desenvolvimento desta pesquisa; à Laura Oliveira e Lázaro Lopes pela ajuda na coleta de campo e nos ensaios de laboratório; à Marlilene, pela amizade que temos desde a graduação e por me auxiliar sempre que precisei.

À Universidade Federal de Juiz de Fora e à Faculdade de Engenharia, pelas oportunidades, aprendizados e experiências que me proporcionaram desde a graduação. À agência de fomento Fapemig, pela concessão da bolsa de estudos durante o segundo ano do mestrado, permitindo que essa pesquisa fosse realizada.

Aos demais amigos, familiares e professores, por fazerem parte da minha caminhada e contribuírem na minha formação pessoal e profissional, muito obrigada!

“Nada é suficientemente bom. Então vamos fazer o que é certo,
dedicar o melhor de nossos esforços para atingir o inatingível,
desenvolver ao máximo os dons que Deus nos concedeu,
e nunca parar de aprender.”

(Ludwig van Beethoven)

RESUMO

Um dos principais fatores para a expansão de áreas degradadas no Brasil e no mundo são os processos erosivos, que podem ser causados por diferentes agentes. Para recuperação dessas áreas, são elaborados Planos de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD). No entanto, em sua maioria, as soluções propostas não consideram as características intrínsecas do solo, como sua resistência ao cisalhamento e erodibilidade. Sendo assim, esta pesquisa pretende avaliar o emprego de ensaios geotécnicos simples, rápidos e viáveis na compreensão da erodibilidade do solo de uma voçoroca situada no Jardim Botânico da UFJF, na cidade de Juiz de Fora (MG), com vistas à elaboração de um PRAD conceitual. Para tanto, a metodologia utilizada foi a partir da coleta de amostras para realização de ensaios em laboratório, a saber: ensaio de caracterização química, ensaio de cisalhamento direto e ensaio de Inderbitzen modificado, para então ser feita a análise de estabilidade e a proposição das técnicas de recuperação. Pelos resultados do ensaio de caracterização química, o solo possui acidez de média a elevada, deficiência em nutrientes importantes, baixo índice de matéria orgânica e alto índice de saturação por alumínio. No ensaio de cisalhamento direto, foram obtidos os parâmetros intercepto coesivo nulo e ângulo de atrito entre 36° e $37,5^\circ$. Pela análise de estabilidade do talude utilizando o *software* Geo-Slope, o ângulo de retaludamento de projeto de 32° atendeu ao fator de segurança mínimo de 1,2 e foi a inclinação utilizada no ensaio de Inderbitzen modificado, em que as amostras apresentaram alta velocidade no processo erosivo e foram classificadas na faixa com menor resistência à erosão. A partir desses resultados, foi possível propor medidas para melhorar a qualidade química do solo, importante para o crescimento da vegetação; identificar qual o ângulo adequado para o retaludamento, atendendo ao fator de segurança requerido; e propor técnicas mais apropriadas para conter os processos erosivos. Assim sendo, confirmou-se relevância da realização dos ensaios geotécnicos, que permitiu a elaboração de um PRAD conceitual bem fundamentado, direcionado e com justificativas geotécnicas para a recuperação plena da voçoroca em estudo.

Palavras-chave: Solo degradado. Resistência ao cisalhamento. Erodibilidade. Bioengenharia.

ABSTRACT

One of the main factors for the expansion of degraded areas in Brazil and around the world are erosion processes, which can be caused by different agents. Degraded Area Recovery Plans (PRAD) are made to recover these areas. However, the majority of Degraded Area Recovery Projects (PRAD) propose solutions without considering some intrinsic characteristics of soil, such as shear strength and erodibility. Therefore, this research aims to evaluate the use of simple, fast and viable geotechnical tests to understanding the erodibility of a soil from a gully situated in UFJF Botanical Garden, in Juiz de Fora (MG), in order to elaborate a conceptual PRAD. For this purpose, the methodology used was based in a collection of samples for laboratory tests, namely: chemical characterization test, direct shear test and modified Inderbitzen test, and then the stability analysis and the proposition of recovery techniques were done. According to the results of the chemical characterization test, the soil has medium to high acidity, a deficiency in important nutrients, a low organic matter index and a high aluminum saturation index. In the direct shear test, the parameters obtained were: null cohesive intercept and friction angle between 36° and 37.5° . According to the slope stability analysis by *Geo-Slope software*, the 32° angle met the minimum safety factor of 1.2 and was the angle used in the modified Inderbitzen test, in which the samples presented high speed in the erosive process and were classified in a range with the lowest resistance to erosion. From these results, it was possible to propose measures to improve the chemical quality of the soil, which is important for the growth of vegetation; to identify which angle is suitable for re-sloping, taking into account the required safety factor; and to propose more appropriated techniques to contain erosive processes. Therefore, it was confirmed the relevance of carrying out the geotechnical tests, which allowed the elaboration of a well-founded and directed conceptual PRAD, with geotechnical justifications for the full recovery of the gully under study.

Keywords: Degraded soil. Shear strength. Erodibility. Bioengineering.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ábaco de classificação MCT.....	22
Figura 2 - Exemplo de Latossolo (Vermelho-Amarelo), Argissolo (Vermelho) e Neossolo (Quartzarênico).....	23
Figura 3 - Principais solos da região Sudeste.....	24
Figura 4 - Representação esquemática das estruturas do solo quanto à forma	27
Figura 5 - Esquema dos fenômenos relacionados à capilaridade	31
Figura 6 - Exemplo de curva característica de retenção em solo não-saturado.....	33
Figura 7 - Formatos típicos de curvas de retenção	33
Figura 8 - Tensões principais e suas componentes atuando num ponto	34
Figura 9 - Círculo de Mohr e o estado de tensões	35
Figura 10 - Círculos de Mohr e envoltória de resistência	36
Figura 11 - Forças atuantes em um plano inclinado	37
Figura 12 - Atuação da força de atrito	38
Figura 13 - Representação dos critérios de ruptura de Coulomb	39
Figura 14 - Exemplo de envoltória de resistência	40
Figura 15 - Curvas geradas em função da deformação	40
Figura 16 - Interpolação dos pontos de ruptura para obtenção da envoltória de Mohr-Coulomb	41
Figura 17 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de um solo arenoso.....	42
Figura 18 - Exemplo de envoltória de resistência em solos não saturados.....	43
Figura 19 - Resultado de um ensaio de cisalhamento com umidade equilibrada em um solo franco-arenoso	44
Figura 20 - Efeitos da vegetação e compactação do solo no processo erosivo	46
Figura 21 - Efeito splash (a) e selagem (b) causados no solo pelo impacto das gotas de chuva	47
Figura 22 - Erosão laminar e por sulcos em Juiz de Fora	49
Figura 23 - Erosão em ravinas em Juiz de Fora	50
Figura 24 - Voçoroca provocada pelo desvio inadequado de água pluvial em beira de estrada	51
Figura 25 - Resultado de um ensaio de Inderbitzen modificado em solo residual.....	57
Figura 26 - Critério de erodibilidade pela classificação MCT	59
Figura 27 - Ábaco de classificação MCT-M e faixas de erodibilidade	60

Figura 28 - Ábaco de erodibilidade para solos tropicais.....	61
Figura 29 - Faixas de erodibilidade a partir da resistência à tração e sucção.....	65
Figura 30 - Esquema de talude de corte e aterro	67
Figura 31 - Esquema representativo dos elementos importantes em um talude.....	67
Figura 32 - Esquema representativo dos movimentos de massa segundo Augusto Filho (1992)	70
Figura 33 - Esquema representativo dos movimentos de massa segundo ABNT (2009).....	71
Figura 34 - Linha do tempo das legislações brasileiras pertinentes à proteção ambiental	76
Figura 35 - Esquema de controle de erosão em uma voçoroca	87
Figura 36 - Terraços (a) e bacia de retenção (b) para voçorocas.....	87
Figura 37 - Drenagem interna da voçoroca com sacos de solo cimento.....	88
Figura 38 - Paliçadas (a) e retentores de sedimentos (b) em uma voçoroca	88
Figura 39 - Coveamento e plantio nos taludes internos da voçoroca	90
Figura 40 - Recuperação de uma voçoroca	91
Figura 41 - Retaludamento mecânico com escavadeira hidráulica	93
Figura 42 - Retaludamento com redução da inclinação média do talude	94
Figura 43 - Retaludamento com redução da altura do talude.....	94
Figura 44 - Retaludamento por meio de aterro na base do talude	94
Figura 45 - Dispositivos para drenagem em talude	95
Figura 46 - Capim vetiver na proteção de taludes	97
Figura 47 - Técnicas de engenharia natural associadas à inclinação do local.....	98
Figura 48 - Semeadura a lanço	99
Figura 49 - Aplicação da hidrossemeadura	99
Figura 50 - Alguns tipos de mantas sintéticas	100
Figura 51 - Bobinas de biomantas e sua aplicação em taludes.....	101
Figura 52 - Fixação adequada dos grampos para biomantas em diferentes inclinações (H:V)	101
Figura 53 - Entrançados vivos.....	103
Figura 54 - Estacas vivas na implantação e após o crescimento dos ramos e raízes.....	103
Figura 55 - Paliçada de bambu em voçoroca	104
Figura 56 - Biorrolos e sua aplicação em taludes.....	104
Figura 57 - Implantação e resultado das faixas vegetativas	105
Figura 58 - Muros de suporte vivos.....	105
Figura 59 - Grade viva associada e estacas vivas	106

Figura 60 - Implantação de grade viva e muro vivo	106
Figura 61 - Aplicação de gabiões vivos e resultado	107
Figura 62 – Esquema e execução de solo envelopado verde	107
Figura 63 - Solo grampeado verde.....	108
Figura 64 - Jardim Botânico da UFJF.....	109
Figura 65 – Mata do Krambeck: Área protegida, Unidade de Conservação Estadual	109
Figura 66 - Voçorocas no JB-UFJF ao longo dos anos utilizando imagens do Google Earth	110
Figura 67 - Alguns detalhes e técnicas utilizadas no projeto de recuperação da voçoroca 1 do JB-UFJF	111
Figura 68 - Croqui dos pontos de coleta de amostras	112
Figura 69 - Posição dos solos nas paredes da voçoroca.....	115
Figura 70 - Locais de coleta das amostras indeformadas dos solos 1, 2 e 3	115
Figura 71 - Etapas de execução do trabalho.....	117
Figura 72 - Médias mensais de temperatura e chuva em Juiz de Fora	118
Figura 73 - Mapa de riscos à erosão em Juiz de Fora - MG.....	119
Figura 74 - Localização do JB-UFJF em Juiz de Fora.....	121
Figura 75 - Perfil de elevação transversal	121
Figura 76 - Perfil de elevação longitudinal	122
Figura 77 - Fotografia aérea da voçoroca do JB-UFJF	122
Figura 78 - Altimetria da região em estudo.....	123
Figura 79 - Delimitação da região ao entorno da voçoroca	124
Figura 80 - Altimetria da voçoroca.....	125
Figura 81 - Localização da coleta de amostras indeformadas (seta vermelha) em comparação à coleta de amostras deformadas (setas azuis) de Carvalho (2020)	126
Figura 82 - Anel de cisalhamento para ser cravado no solo (a), obtenção da amostra indeformada (b) e corpo de prova pronto para ser ensaiado no laboratório (c).....	127
Figura 83 – Chapas metálicas em formato de L (a) e o molde para coleta (b).....	127
Figura 84 - Coleta da amostra em campo (a), bloco coletado e protegido (b), abertura do molde (c) e corpo de prova pronto para ser ensaiado (d)	128
Figura 85 - Equipamento do ensaio de cisalhamento direto	129
Figura 86 - Caixa bipartida do aparelho de cisalhamento.....	129
Figura 87 - Equipamento do ensaio de Inderbitzen modificado.....	132
Figura 88 - Recipientes em repouso (a), material que foi para estufa (b) e após secagem (c)	133
Figura 89 - Passo a passo para realizar análise de estabilidade utilizando o Geo-Slope	138

Figura 90 - Página inicial do Geo-Slope	138
Figura 91 - Inserindo dados iniciais no Geo-Slope.....	139
Figura 92 - Desenho da geometria do talude no Geo-Slope	139
Figura 93 - Propriedades do material do talude no Geo-Slope	163
Figura 94 - Análise de estabilidade 1 (FS=1,21 para o critério 1).....	164
Figura 95 - Análise de estabilidade 2 (FS=1,2 para o critério 2).....	164
Figura 96 - Ângulos de estabilidade para o talude no critério 1 (a) e critério 2 (b)	165
Figura 97 - Análise de estabilidade 3 (ângulo de 45° para o critério 1, TSP).....	166
Figura 98 - Análise de estabilidade 3 (ângulo de 45° para o critério 1, IZP).....	167
Figura 99 - Análise de estabilidade 4 (ângulo de 45° para o critério 2, TSP).....	167
Figura 100 - Análise de estabilidade 4 (ângulo de 45° para o critério 2, IZP).....	168
Figura 101 - Inclinação da rampa no ensaio de Inderbitzen modificado	169
Figura 102 - Comportamento da amostra 1 no ensaio de Inderbitzen modificado.....	170
Figura 103 - Comportamento da amostra 2 no ensaio de Inderbitzen modificado.....	170
Figura 104 - Comportamento da amostra 3 no ensaio de Inderbitzen modificado.....	171
Figura 105 - Velocidade de erosão pelo tempo no estudo de Vieira (2017).....	174
Figura 106 - Croqui do perfil longitudinal do terreno e áreas de corte e aterro	176
Figura 107 - Croqui do novo contorno após o retaludamento.....	177
Figura 108 - Croqui dos perfis transversais AA', BB' e CC'	177
Figura 109 - Croqui com os dispositivos de drenagem.....	178
Figura 110 - Seção transversal de uma canaleta trapezoidal de pedra argamassada	179
Figura 111 - Ecocalha	179
Figura 112 - Bacia de dissipação com madeira e pedras	180
Figura 113 - Barreira de capim vetiver ao entorno do dissipador de energia	180
Figura 114 - Canal verde a ser revitalizado.....	181
Figura 115 - Detalhes do microcoveamento.....	181
Figura 116 - Croqui das regiões de plantio e respectivos grupos.....	183
Figura 117 - Esquema do modelo de linhas alternadas.....	185
Figura 118 - Croqui dos elementos de proteção superficial do talude.....	186
Figura 119 - Associação de bermalongas e vetiver, antes e depois.....	187
Figura 120 - Modelo da biomanta mista (a) e do grampeamento indicado (b).....	188
Figura 121 - Croqui com as técnicas de recuperação escolhidas	189
Gráfico 1 - Curva granulométrica.....	113

Gráfico 2 - Gráfico de Taylor com dados do adensamento.....	130
Gráfico 3 - Gráfico de Taylor para o CP09	146
Gráfico 4 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Tensão Cisalhante	148
Gráfico 5 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Deslocamento Vertical	149
Gráfico 6 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Tensão Cisalhante/Normal para o CP01	150
Gráfico 7 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Tensão Cisalhante/Normal para o CP02	150
Gráfico 8 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Tensão Cisalhante/Normal para o CP03	151
Gráfico 9 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Tensão Cisalhante/Normal para o CP04	152
Gráfico 10 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Tensão Cisalhante/Normal para o CP05	152
Gráfico 11 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Tensão Cisalhante/Normal para o CP06	153
Gráfico 12 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Tensão Cisalhante/Normal para o CP07	153
Gráfico 13 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Tensão Cisalhante/Normal para o CP08	154
Gráfico 14 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Tensão Cisalhante/Normal para o CP09	154
Gráfico 15 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Tensão Cisalhante/Normal para o CP10	155
Gráfico 16 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Tensão Cisalhante/Normal para o CP11	155
Gráfico 17 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Tensão Cisalhante/Normal para o CP12	156
Gráfico 18 - Deslocamento Horizontal <i>versus</i> Tensão Cisalhante/Normal para o CP13	156
Gráfico 19 - Envoltória de resistência considerando o critério de ruptura 1.....	157
Gráfico 20 - Envoltória de resistência considerando o critério de ruptura 2.....	158
Gráfico 21 - Faixa de aceitação dos pontos na análise de regressão para o critério 1	160
Gráfico 22 - Faixa de aceitação dos pontos na análise de regressão para o critério 2.....	162
Gráfico 23 - Perdas de solo <i>versus</i> tempo de ensaio.....	172
Gráfico 24 - Medida de erosão E <i>versus</i> tempo de ensaio	172
Gráfico 25 - Medida de erosão E acumulado <i>versus</i> tempo de ensaio	173
Gráfico 26 - Velocidade de erosão <i>versus</i> tempo de ensaio.....	173

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação granulométrica dos grãos	26
Quadro 2 - Estimativa de perdas anuais por erosão em MG	48
Quadro 3 - Classificação de voçorocas quanto à profundidade e área da bacia de contribuição	50
Quadro 4 - Classificação de erodibilidade de acordo com o fator K.....	54
Quadro 5 - Índices de fragilidade à erosão em solos do litoral sul de São Paulo.....	58
Quadro 6 - Classes de suscetibilidade à erosão laminar	58
Quadro 7 - Características dos grupos MCT quanto à erosão em cortes	59
Quadro 8 - Critério de erodibilidade pela classificação MCT-M.....	60
Quadro 9 - Critério de erodibilidade pelo fator E.....	61
Quadro 10 - Critérios de erodibilidade a partir do ensaio de penetração de cone.....	62
Quadro 11 - Algumas relações entre declividade e inclinação.....	68
Quadro 12 - Classificação de taludes quanto ao ângulo de inclinação	68
Quadro 13 - Condicionantes dos movimentos de massa.....	69
Quadro 14 - Tipos de movimentos de massa segundo Augusto Filho (1992)	70
Quadro 15 - Tipos de movimentos de massa segundo ABNT (2009)	71
Quadro 16 - Nível de segurança desejado contra perda de vidas humanas	72
Quadro 17 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais.....	72
Quadro 18 - Fatores de segurança mínimos para escorregamentos.....	72
Quadro 19 - Resumo dos principais métodos de análise de estabilidade de taludes	73
Quadro 20 - Recomendação de nutrientes para solo de voçorocas	89
Quadro 21 - Algumas inclinações utilizadas em retaludamento	92
Quadro 22 - Inclinações mais comuns de estabilidade de taludes para os diferentes tipos de solo e rocha	92
Quadro 23 – Inclinações máximas recomendadas por empresas de bioengenharia para uso das biomantas e geomantas	102
Quadro 24 - Critérios importantes na escolha da técnica de revestimento de taludes.....	102
Quadro 25 - Resultados do ensaio de densidade real dos grãos	113
Quadro 26 - Classificação quanto à granulometria.....	114
Quadro 27 - Distribuição granulométrica dos solos 1, 2 e 3	114
Quadro 28 - Resultados do ensaio de desagregação e dispersão.....	116
Quadro 29 - Áreas com riscos a escorregamentos em Juiz de Fora	120

Quadro 30 - Faixas de classificação de erodibilidade.....	134
Quadro 31 - Equações para análise estatística probabilística.....	136
Quadro 32 - Classificação do coeficiente de variação (CV)	137
Quadro 33 - Interpretação do coeficiente de correlação (r)	137
Quadro 34 - Descrição dos capítulos X, XI e XII do Termo de Referência para elaboração do PRAD	140
Quadro 35 - Resultados e classificação do pH	141
Quadro 36 - Classes de interpretação dos componentes do solo em Minas Gerais.....	142
Quadro 37 - Resultados da análise química do solo com classificação em cores	142
Quadro 38 - Resultados da análise de fósforo no solo.....	145
Quadro 39 - Resultados para o cálculo da velocidade de cisalhamento	147
Quadro 40 - Distribuição dos corpos de prova quanto à tensão aplicada	147
Quadro 41 - Valores de tensão normal e tensão cisalhante para o critério de ruptura 1	157
Quadro 42 - Valores de tensão normal e tensão cisalhante para o critério de ruptura 2.....	158
Quadro 43 - Parâmetros dos cálculos estatísticos para o critério 1	159
Quadro 44 - Desvios-padrão e limites de confiança da tensão cisalhante para o critério 1 ...	160
Quadro 45 - Resultados da análise estatística para os parâmetros do critério 1.....	161
Quadro 46 - Parâmetros dos cálculos estatísticos para o critério 2	161
Quadro 47 - Desvios-padrão e limites de confiança da tensão cisalhante para o critério 2...	162
Quadro 48 - Resultados da análise estatística para os parâmetros do critério 2.....	163
Quadro 49 - Resultados do ensaio de Inderbitzen modificado.....	171
Quadro 50 - Quantidades dos insumos a serem aplicados	182
Quadro 51 - Espécies de gramíneas para recuperação de áreas degradadas e controle de erosão	184
Quadro 52 - Espécies de leguminosas para recuperação de áreas degradadas e controle de erosão	184
Quadro 53 - Características das espécies arbóreas do Brasil, que compõem os diferentes grupos ecológicos.....	185
Quadro 54 - Informações técnicas sobre os diferentes modelos de Bermalonga®	186
Quadro 55 - Justificativas de algumas técnicas que não foram escolhidas	189
Quadro 56 - Descrição das principais atividades na fase de manutenção.....	190
Quadro 57 - Grau de importância dos principais indicadores na fase de monitoramento	191
Quadro 58 - Cronograma físico do PRAD	192

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APP	Área de Preservação Permanente
CP	Corpo de Prova
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
CV	Coefficiente de Variação
DMP	Diâmetro Médio Ponderado
DP	Desvio Padrão
EMQ	Erro Médio Quadrado
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FS	Fator de Segurança
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IEA	Índice de Estabilidade dos Agregados
IP	Índice de Plasticidade
JB-UFJF	Jardim Botânico da UFJF
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
MCT	Miniatura Compactada Tropical
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MO	Matéria Orgânica
PNF	Programa Nacional das Florestas
PRAD	Plano de Recuperação de Área Degradada
Proinfra	Pró-Reitoria de Infraestrutura e Gestão da UFJF
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFV	Universidade Federal de Viçosa
USLE	Equação Universal das Perdas de Solo

LISTAS DE SÍMBOLOS

Ac	área corrigida
c	intercepto de coesão
c_{nat}	intercepto de coesão na condição natural
c_s	intercepto de coesão na condição saturada
d	declividade
D	diâmetro
dh	deslocamento horizontal
DR	variação de resistência à compressão simples
e'	índice derivado da perda por imersão
H	amplitude
k	coeficiente de permeabilidade
K	fator de erodibilidade do solo
L	comprimento
Pi	coeficiente de massa perdida
PS	perda de solo média anual
r	coeficiente de correlação
s	coeficiente de sorção
x_m	média aritmética da variável em questão
α	ângulo de inclinação
γ_w	peso específico da água
Δc	variação do intercepto de coesão
π	sucção osmótica
σ	tensão normal
σ_1	tensão principal maior
σ_3	tensão principal menor
σ_t	tensão de resistência à tração
σ_α	tensão normal ao plano α
τ	tensão cisalhante ou tangencial
τ_f	resistência ao cisalhamento em solos não saturados
τ_r	tensão de resistência interna ao cisalhamento
τ_α	tensão tangencial ao plano α

φ	ângulo de atrito
Ψ	potencial energético da água no solo
ψ	sucção total
u_a	poropressão do ar
u_w	poropressão da água

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo geral	20
1.2.2 Objetivos específicos	20
2 REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1 CARACTERÍSTICAS DO SOLO.....	22
2.2 SOLOS SATURADOS E NÃO SATURADOS.....	28
2.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS SATURADOS E NÃO SATURADOS	34
2.4 A EROSÃO DO SOLO.....	44
2.4.1 Definições, causas, conseqüências e tipos de erosão	44
2.4.2 Avaliação da erosão	51
<i>2.4.2.1 Ensaios diretos de erodibilidade</i>	54
<i>2.4.2.2 Ensaios indiretos de erodibilidade</i>	57
2.5 ESTABILIDADE DE TALUDES.....	67
2.6 ÁREAS DEGRADADAS.....	75
2.6.1 Definições e legislações importantes	75
2.6.2 Áreas degradadas e o sistema de drenagem	82
2.6.3 Recuperação de áreas degradadas	83
<i>2.6.3.1 Técnicas de recuperação em voçorocas</i>	86
<i>2.6.3.2 Técnicas de recuperação em taludes</i>	91
<i>2.6.3.3 Técnicas de engenharia natural</i>	97
2.7 JARDIM BOTÂNICO DA UFJF	108
2.7.1 Breve histórico e contextualização	108
2.7.2 Informações geotécnicas de trabalhos anteriores	112
3 MATERIAL E MÉTODOS	117
3.1 CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO	117
3.1.1 O município de Juiz de Fora	117
3.1.2 Local de estudo	120
3.2 COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS.....	126
3.3 ENSAIOS GEOTÉCNICOS	128

3.3.1 Caracterização química	128
3.3.2 Ensaio de cisalhamento direto	128
3.3.3 Ensaio de Inderbitzen modificado	132
3.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS.....	134
3.5 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE	137
3.6 PLANO CONCEITUAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREA DEGRADADA (PRAD)....	140
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	141
4.1 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA	141
4.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	146
4.2.1 Cálculo da velocidade de cisalhamento	146
4.2.2 Gráficos e interpretação	147
4.2.3 Tratamento estatístico dos dados	159
4.2.3.1 <i>Critério 1 de ruptura</i>	159
4.2.3.2 <i>Critério 2 de ruptura</i>	161
4.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE	163
4.4 ENSAIO DE INDERBITZEN MODIFICADO	169
4.5 PRAD CONCEITUAL	175
4.5.1 Implantação	175
4.5.2 Manutenção	190
4.5.3 Monitoramento	190
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	193
5 CONCLUSÃO	195
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	196
ANEXO A – LISTA DE ESPÉCIES ARBUSTIVAS ENCONTRADAS NO JARDIM BOTÂNICO DA UFJF	213
ANEXO B – LISTA DE ESPÉCIES ARBÓREAS ENCONTRADAS NO JARDIM BOTÂNICO DA UFJF	215

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A expansão de áreas degradadas tem chamado atenção de grupos técnicos e científicos. Em escala global, mais de 30% dos solos do mundo estão degradados (DIAS, 2016; FAO, 2018). Estima-se que a cada cinco segundos, uma superfície de terra equivalente a um campo de futebol é degradada. Se permanecer nesse ritmo, mais de 90% de todos os solos do planeta podem estar desgastados até 2050 (AGÊNCIA EFE, 2019). Na América Latina, cerca de 50% dos solos estão sujeitos a algum tipo de degradação, conforme Mendonça (2015).

No Brasil, dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA) indicam que existem mais de 140 milhões de hectares de áreas degradadas, o que corresponde a aproximadamente 16% do território brasileiro, ou ainda, “duas Françás” (SPITZCOVSKY, 2012). No país, os principais problemas encontrados são a erosão, a perda de carbono orgânico e o desequilíbrio de nutrientes (MENDONÇA, 2015).

A degradação ambiental é um processo que, historicamente, vem ocorrendo no país devido à interferência humana. Desde a colonização, com a exploração do pau-brasil pelos portugueses, passando pelos ciclos econômicos da cana-de-açúcar, do ouro e do café, a vegetação nativa vem sendo substituída para realização de diversas atividades antrópicas. Tal processo teve início nas regiões nordeste, sudeste e sul, onde a Mata Atlântica foi fortemente desmatada, restando, em 2019, apenas 12,4% da cobertura florestal original (INPE, 2019). O avanço para as regiões norte e centro-oeste também ocorreu rapidamente, prejudicando e degradando as áreas da Floresta Amazônica e do Cerrado brasileiro.

A erosão é um dos principais fatores causadores da degradação e deterioração da qualidade ambiental, ocorrendo de forma acelerada devido ao uso e manejo inadequado do solo (PRUSKI, 2009). Além das atividades agrícolas e mineradoras, a pecuária e a formação das cidades também contribuíram para a ampliação de áreas degradadas.

Como resultados, podem ser citados diversos impactos ambientais, como perda de fertilidade do solo, assoreamento dos cursos d'água, espécies da fauna e flora ameaçadas em extinção e mudanças climáticas (MARTINS, 2013), que acabam provocando outros graves problemas de ordem econômica e social, como riscos de desabamentos em encostas, prejuízos na produção agropecuária e disponibilidade de alimentos.

As áreas em estágios avançados de erosão caracterizam-se pela presença de voçorocas, que necessitam de técnicas mais complexas e onerosas para recuperação. Com isso, admite-se a necessidade e urgência em promover ações de conservação dos solos e recuperação das áreas

degradadas. Atualmente, existem técnicas edáficas, vegetativas e mecânicas, que são escolhidas de acordo com as especificidades de cada situação (PRUSKI, 2009).

No Brasil, as propostas de recuperação de áreas degradadas são definidas a partir da elaboração de um Plano de Recuperação de Área Degradada (PRAD), que deve seguir as orientações da legislação vigente. Pode-se citar, como modelo, o Termo de Referência disposto na Instrução Normativa nº 4 (IBAMA, 2011) ou nº 11 (ICMBIO, 2014), onde são estabelecidas as orientações e exigências mínimas necessárias.

Na instrução do IBAMA (2011), por exemplo, dentre outras colocações, o § 2º do art. 2º cita que deve ser dada atenção especial à proteção e conservação do solo e dos recursos hídricos, porém cabe destacar o seguinte trecho: “e caso se façam necessárias, técnicas de controle da erosão deverão ser executadas”. Contudo, não há exigências nem diretrizes indicativas de quando é necessário fazer o controle de erosão nem como deve ser executado.

Com isso, há uma carência de informações mais detalhadas sobre a importância de se realizar ensaios geotécnicos diretos e indiretos do solo a fim de analisar sua erodibilidade, estabilidade e outras propriedades pertinentes ao tema. Entende-se que esta análise contribuiria de forma incisiva na tomada de decisão para mitigar os processos erosivos e recuperar as áreas degradadas.

A pesquisa pretende, portanto, por meio de um estudo de caso local, relacionar os resultados de ensaios geotécnicos com a análise das propriedades do solo e de estabilidade do talude, para então sugerir propostas de recuperação da área. A partir dessa associação, espera-se que seja possível obter benefícios relacionados à eficácia do método escolhido, quando comparados aos métodos “tradicionais” de recuperação.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Esta pesquisa tem por objetivo avaliar o emprego de ensaios geotécnicos simples, rápidos e viáveis na compreensão da erodibilidade de um solo, com vistas à elaboração de um plano de recuperação de áreas degradadas, situado no Jardim Botânico da UFJF na cidade de Juiz de Fora, Minas Gerais.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, tem-se:

I. Obter a caracterização química e a classificação quanto à erodibilidade do solo de uma voçoroca presente no Jardim Botânico da UFJF;

- II. Determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do mesmo solo, utilizá-los na análise de estabilidade e comparar com valores utilizados na literatura;
- III. Propor medidas de recuperação tecnicamente viáveis para a área;
- IV. Elaborar um Plano Conceitual de Recuperação de Área Degradada para o local em estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CARACTERÍSTICAS DO SOLO

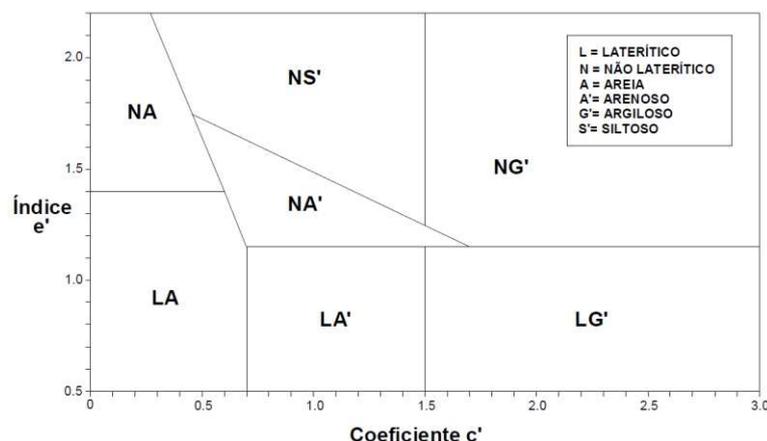
Os solos originam-se da decomposição das rochas, seja por agentes físicos ou químicos. O solo é considerado um sistema trifásico, possuindo partículas sólidas e vazios preenchidos por água e/ou ar. Suas partículas diferenciam-se pelo tamanho e pela composição química e mineralógica, recebendo influência direta da constituição original da rocha matriz, além do clima, do relevo, da ação do tempo e de organismos. O solo pode ser classificado quanto à origem em residual ou transportado.

Os solos residuais são aqueles que permanecem no mesmo local em que se formaram. Sua ocorrência é comum em regiões tropicais, como o Brasil, devido às condições climáticas que favorecem a rapidez na velocidade de decomposição das rochas. Conforme Sousa Pinto (2006), este tipo de solo ainda pode ser subdividido em horizontes que variam no grau de intemperismo: solo maduro (superficial, sem vestígios da rocha-mãe), solo jovem ou saprolítico (mantém a estrutura da rocha-mãe, mas perdeu a consistência de rocha) e rocha alterada (ainda possui blocos de rochas).

Já os solos transportados, são aqueles que foram levados para um local diferente de sua origem por meio de agentes transportadores. Estes, por sua vez, recebem nomenclaturas especiais de acordo com o agente: solos coluvionares (pela ação da gravidade), aluvionares (pela ação da água), eólicos (pela ação dos ventos) e *drifts* (pela ação de geleiras).

No caso de solos em regiões tropicais, foi proposta uma classificação alternativa por meio da metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), por Nogami e Villibor (1981). A partir dos parâmetros c' , obtido da curva de deformabilidade e e' , obtido pelo ensaio de perda de massa por imersão, o solo é classificado como laterítico ou não laterítico, em sete categorias possíveis, de acordo com o ábaco representado na Figura 1.

Figura 1 - Ábaco de classificação MCT



Fonte: Nogami e Villibor (1981)

Vertamatti e Araújo (1990), citado por Couto (2015), propuseram algumas alterações na classificação anterior, dando origem à classificação MCT modificada (MCT-M), onde o grupo NA' foi excluído e incluíram-se alguns solos transicionais, tais como LA'G', NS'G', TA', TA'G' e TG'.

Outra forma de identificação do solo é através da classificação pedológica de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), que leva em consideração diversos atributos diagnósticos, como material orgânico e mineral; tipo, espessura e sequência dos horizontes; estrutura, textura, cor, profundidade, drenagem, reação (ácido, neutro ou alcalino), consistência, porosidade, entre outros aspectos. Neste caso, o solo é dividido em camadas superficiais e subsuperficiais.

As camadas superficiais podem ser formadas pelo horizonte O (de cobertura, principalmente com constituição orgânica) e horizonte A (camada com predominância de húmus, decomposição de matéria orgânica e minerais). Já as camadas subsuperficiais podem ser formadas pelo horizontes B (com partes bastante degradadas da rocha-mãe e acúmulo de argila e minerais como ferro e alumínio), horizonte C (material ainda pouco degradado da rocha-mãe), horizonte E (alta concentração de areia e silte), horizonte F (rico em ferro e alumínio e pobre em matéria orgânica) e horizonte R (substrato rochoso contínuo, que origina o solo ao ser intemperizado), além das possíveis combinações entre eles (IBGE, 2007).

A classificação segundo o SiBCS (EMBRAPA, 2018) divide-se em até 6 níveis categóricos: ordens, subordens, grandes grupos, subgrupos, famílias e séries. O primeiro nível categórico é formado por 13 classes, sendo que os mais presentes no território brasileiro são: Latossolo, Argissolo e Neossolo, exemplificados na Figura 2.

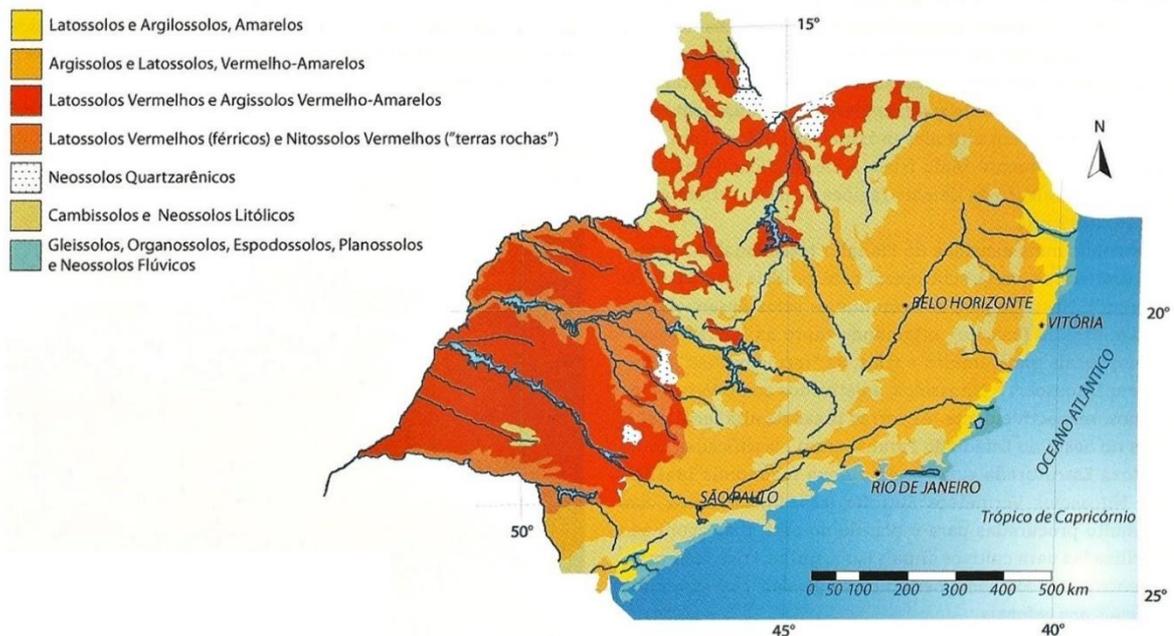
Figura 2 - Exemplo de Latossolo (Vermelho-Amarelo), Argissolo (Vermelho) e Neossolo (Quartzarênico)



Fonte: EMBRAPA (2018)

Os Latossolos caracterizam-se pelas diversas transformações em seu processo de formação, resultando em intemperização intensa dos constituintes minerais, principalmente argilominerais resistentes e óxidos/hidróxidos de ferro e alumínio. Os Argissolos, por sua vez, possuem maior teor de argila em camadas subsuperficiais, apresentando-se mais comumente na tonalidade vermelha e/ou amarela. Já os Neossolos são solos pouco evoluídos (jovens), devido à baixa atuação dos processos pedogenéticos ou por característica própria do material de origem (EMBRAPA, 2018). Na Figura 3, tem-se um mapa generalizado dos principais solos da região sudeste, conforme Lepsch (2010).

Figura 3 - Principais solos da região Sudeste



Fonte: Lepsch (2010), adaptado de EMBRAPA (1981) e IBGE (2001).

Os solos também podem ser classificados quanto à caracterização química e mineralógica, que pode ser feita por meio de técnicas como fluorescência de raios X, espectroscopia de absorção no infravermelho, difração de raios X, análises térmicas, microscopia eletrônica de varredura ou de força atômica, conforme Prandel (2015), entre outras.

A análise mineralógica tem sua importância na identificação e no entendimento de algumas propriedades físico-químicas do solo, sua estrutura e comportamento hidromecânico. Os constituintes minerais podem ser divididos em primários e secundários.

Os minerais primários são aqueles diretamente ligados ao material de origem dos solos, sendo o quartzo, feldspato e micas os mais comuns. Através destes minerais, é possível avaliar o grau de evolução do perfil de um solo e também sua reserva de nutrientes a curto, médio e longo prazo (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

Os minerais secundários, por sua vez, podem ser formados a partir do intemperismo ou alterações na estrutura de minerais primários do solo ou mesmo a partir do material de origem, sendo reunidos em grupos. Os mais conhecidos são os argilominerais (silicatos de alumínio no estado cristalino), de estrutura 1:1 como a caulinita ou estrutura 2:1, como a montmorilonita, vermiculita e ilita. A presença de minerais de argila é relevante devido a características como a carga eletronegativa disponível para fazer ligações catiônicas, a capacidade de fazer ligações estáveis com a matéria orgânica, a grande superfície específica que permite retenção de água e a expansibilidade com a absorção de água, por exemplo. Além disso, existem outros tipos de minerais secundários, como silicatos não cristalinos (como alofana e imogolita), óxidos e hidróxidos de alumínio (como gibbsita) e ferro (como hematita, magnetita, goethita), carbonatos de cálcio e magnésio (como calcita e dolomita) (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2015).

Dentre os parâmetros químicos, destacam-se neste trabalho o pH (potencial hidrogeniônico), a acidez trocável e potencial do solo (íons H^+ e Al^{3+}); teores trocáveis de Ca, Mg, K, Na e soma de bases; a capacidade de troca catiônica efetiva e potencial; saturação por bases e por alumínio; fósforo assimilável e matéria orgânica.

A determinação do pH de um solo é feita através da medição de atividade dos íons H^+ , tendo sua importância na identificação do grau de acidez ou alcalinidade do solo, que está diretamente associado à solubilidade de alguns elementos, disponibilidade de nutrientes e fertilidade do meio. Para avaliar a acidez de um solo, determina-se a quantidade de cátions ácidos presentes, podendo separá-la em acidez trocável (ligada eletrostaticamente à superfície das argilas, basicamente formada apenas por íons Al^{3+}) e acidez potencial (que também considera a acidez em radicais carboxílicos em ligações covalentes, formadas por íons H^+ e Al^{3+}), conforme IBGE (2007).

As bases trocáveis são determinadas através de extratores químicos, que quantificam os cátions trocáveis de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ . O somatório desses valores é representado através da soma de bases (SB).

A capacidade de troca de cátions (CTC) pode ser definida como “a soma total dos cátions que o solo pode reter na superfície coloidal prontamente disponível à assimilação pelas plantas” (EMBRAPA, 2011, p. 107). Pode-se calcular a CTC, então, através da acidez adicionada à soma de bases. Quando se utiliza a acidez trocável, tem-se a CTC efetiva, utilizada para correção de acidez em fertilidade do solo. Quando se utiliza a acidez potencial, tem-se a CTC potencial (T) ou a chamada CTC do solo a pH 7, que é utilizada para fins de classificação (IBGE, 2007).

O índice de saturação por bases (V) representa a porcentagem de bases trocáveis em relação à CTC potencial, tendo sua importância na distinção de solos com alta ou baixa fertilidade. Quando esta taxa é superior a 50%, diz-se que o solo é eutrófico ou de alta saturação, enquanto inferior a 50%, o solo é dito como distrófico ou de baixa saturação (EMBRAPA, 2018). Já o índice de saturação por alumínio (m) representa a porcentagem de Al^{3+} em relação ao total de cátions no complexo de troca.

O fósforo assimilável (P) pode ser obtido utilizando-se um extrator, porém há dificuldades na obtenção deste parâmetro devido à complexidade da dinâmica do fósforo no solo. Sua importância está em determinar a quantidade deste elemento que se encontra na forma disponível para poder ser utilizado pelas plantas (IBGE, 2007).

A matéria orgânica (MO) é um dos constituintes mais importantes do solo, podendo diminuir sua acidez, aumentar sua CTC, disponibilizar nutrientes e favorecer a estabilização dos agregados, como será tratado adiante. A fim de quantificar a MO presente no solo, tem sido utilizada uma equação em função do teor de carbono (C), conforme EMBRAPA (2011).

Para caracterização física do solo, dentre outros atributos importantes, destaca-se a granulometria, os limites de consistência, estrutura, índice de vazios e massa específica do solo e dos grãos, e porosidade.

A granulometria é a medição do diâmetro das partículas constituintes do solo e sua distribuição em porcentagens de massa, permitindo gerar a curva granulométrica. Estes dados podem ser obtidos por peneiramento, sedimentação ou combinação dos dois procedimentos. Existem diferentes sistemas de classificação geotécnica quanto à granulometria. Neste trabalho, adotou-se a classificação de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 1995), conforme indicado no Quadro 1.

Quadro 1 - Classificação granulométrica dos grãos

Classificação	Diâmetro do grão
Pedregulho	Entre 2,0 e 60,0 mm
Areia	Entre 0,06 e 2,0 mm
Silte	Entre 0,002 e 0,06 mm
Argila	Menor que 0,002 mm

Fonte: ABNT (1995) (Adaptado pela autora)

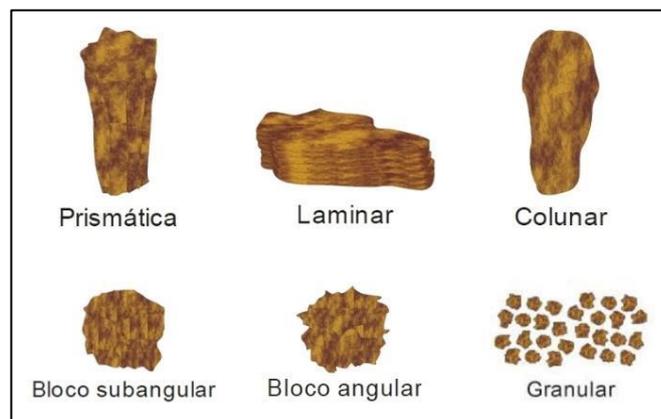
Os limites de consistência ou limites de Atterberg estão relacionados ao teor de umidade em solos finos. O limite de liquidez (LL) é a umidade de um solo remoldado no limite entre os estados líquido e plástico; o limite de plasticidade (LP), entre os estados plástico e semi-sólido; e o limite de contração (LC), entre os estados semi-sólido e sólido, abaixo do qual não há mais diminuição de volume do solo por secagem. O índice de plasticidade (IP) é obtido pela diferença

entre LL e LP, representando a quantidade máxima de água que pode ser adicionada, a partir de LP, de modo que o solo mantenha sua consistência plástica (BURGOS; CONCIANI, 2015).

A estrutura do solo consiste no arranjo das partículas em relação umas às outras. Diversos modelos de arranjos já foram propostos, conforme Collins e McGown (1974) exemplificam em seu estudo. Os autores analisaram uma série de solos de diferentes origens (deposição fluvial, eólica e glacial), buscando relacionar os arranjos do solo com o seu tipo de ambiente de formação, associando também a diferentes comportamentos frente a obras de engenharia. De acordo com os resultados, algumas interações entre as partículas de areia, silte e argila seguiam alguns padrões, mas não eram previsíveis e predominantes. O tipo de estrutura não poderia ser diretamente relacionado a apenas alguns fatores, sendo que diversos outros aspectos também influenciam neste quesito.

Pode-se subdividir o estudo da estrutura de um solo em dois segmentos distintos: macroestrutura e microestrutura (IBGE, 2007). O solo pode ser classificado quanto à macroestrutura de acordo com a forma, o grau de desenvolvimento e o tamanho. Quanto à forma, pode-se citar estrutura laminar, prismática, colunar, em blocos ou granular, conforme indicado na Figura 4.

Figura 4 - Representação esquemática das estruturas do solo quanto à forma



Fonte: Capeche (2008) (Adaptado pela autora)

Existem diferentes graus de estrutura, por exemplo: sem estrutura, que podem ser os grãos simples (partículas totalmente soltas, em horizontes de textura arenosa) ou maciços (partículas fortemente ligadas, em horizontes coesos); e com estrutura, podendo ser subdividida em fraca, moderada ou forte, conforme IBGE (2007). A ligação de partículas primárias do solo (areia, silte, argila) com outros componentes minerais e orgânicos dão origem aos agregados.

Os agregados se formam a partir de uma aproximação das partículas e atuação de uma força que as mantém ligadas devido ao equilíbrio de cargas elétricas. Para que os agregados permaneçam estáveis, é necessária a participação de um agente cimentante. Os fatores

fundamentais e determinantes na formação e estabilidade dos agregados são, principalmente, argila, matéria orgânica, óxidos de ferro e alumínio, sucção (MOTA, 2004). Além disso, existem fatores biológicos condicionantes para agregação do solo, como a fauna (minhocas, fungos, bactérias) e a vegetação, por ação direta ou indireta.

Quanto ao tamanho, pode-se classificar determinada estrutura desde muito pequena a extremamente grande. Os microagregados possuem diâmetro menores que 0,1 mm; já os macroagregados são visíveis a olho nu e possuem diâmetro maior que 0,25 mm. Conforme Capeche (2008), a estabilidade dos macroagregados pode ser comprometida devido a alguns fatores, como o manejo inadequado do solo, a compactação do solo que dificulta a infiltração da água e o impacto da chuva em solos sem cobertura vegetal, podendo provocar a quebra dos agregados, alterando o tamanho das unidades estruturais e reduzindo sua resistência à desagregação.

Outro índice físico relevante a ser estudado é a porosidade, que é a razão entre o volume de vazios e o volume total do solo. Além disso, para melhor entendimento do comportamento do solo, os poros podem ser subdivididos de acordo com o seu tamanho em macroporos ou microporos (MOTA, 2004). Os macroporos, também chamados de poros de aeração ou poros livres de água, possuem diâmetro maior ou igual a 50 μm , com função drenante. Já os microporos, também conhecidos por poros capilares, possuem diâmetro menor que 50 μm e tem a função de reter água e abastecer o solo.

Considerando os vazios do solo, é importante conhecer alguns aspectos, como o índice de vazios, calculado pela divisão do volume de vazios pelo volume de partículas sólidas e a massa específica do solo, calculada pela razão entre a massa total e o volume total do solo (considerando os vazios). Já a massa específica dos sólidos ou dos grãos, é calculada pela razão entre a massa e o volume das partículas do solo.

Com relação aos vazios, o solo pode estar seco (todos os vazios são preenchidos por ar), saturado (todos os vazios são preenchidos por água) ou não-saturado (os vazios estão preenchidos por água e ar), assunto que será tratado em maiores detalhes no capítulo seguinte.

2.2 SOLOS SATURADOS E NÃO SATURADOS

Em geral, as teorias tradicionais da mecânica dos solos aplicam-se a solos totalmente secos (apenas ar nos poros) ou totalmente saturados (apenas água nos poros). Já os solos não-saturados, também chamados de parcialmente saturados, possuem ao mesmo tempo água e ar (em forma de bolhas oclusas ou canaliculos intercomunicados) nos poros e necessitam de

teorias específicas para o estudo de seu comportamento mecânico e hidráulico, visto que são diretamente influenciados pelo grau de saturação (LIMA; RODRIGUES, 2015).

A divisão do estudo em solos saturados e não saturados já indica a importância da água no meio poroso, seja do ponto de vista geotécnico ou agrônomico. Na chamada “zona ativa” desse tipo de solo (entre a superfície terrestre e a zona freática), ocorre variação constante do grau de saturação e sucção do solo, podendo dar início aos processos erosivos e estar relacionado a outros possíveis problemas, como instabilidade de taludes, colapso, expansão, transporte de contaminantes, entre outros, conforme Mascarenha *et al.* (2015).

Ainda segundo os autores, a configuração não-saturada é comumente encontrada nos solos brasileiros, devido à predominância do clima tropical. Em regiões tropicais, é de fundamental importância o estudo deste tipo de solo para garantir maior segurança e otimização dos projetos e execução de obras. Suas propriedades e comportamentos são afetados, principalmente, pelas características estruturais, químicas e mineralógicas do solo, recebendo influência direta também do intemperismo.

Para melhor entendimento do comportamento dos solos, é importante conhecer as tensões atuantes, que geralmente são devidas ao peso próprio e a cargas aplicadas. Em solos saturados, onde a água preenche todos os vazios, a tensão normal total é dada pela tensão transmitida pelo contato entre as partículas (grão a grão), chamada de tensão efetiva e pela tensão que se desenvolve na água devido à profundidade em relação ao nível freático, chamada de poropressão ou pressão neutra, que não ocasiona deslocamento dos grãos. Segundo o princípio de Terzaghi, a tensão efetiva é calculada a partir da diferença entre tensão total e poropressão e aumenta se houver drenagem (SOUSA PINTO, 2006; BARNES, 2016).

Em solos não saturados, qualquer carregamento aplicado provoca uma compressão do ar presente nos vazios, aumentando a tensão efetiva. Neste caso, o principal fator a ser avaliado é o efeito da pressão do ar e da água nos poros do solo, sendo que a primeira é sempre superior à segunda (SOUSA PINTO, 2006). Devido a isso, não é possível aplicar a equação de Terzaghi nestes casos. A diferença de pressão entre estes dois fluidos, chamada tensão de sucção, está ligada a diversos fenômenos como capilaridade, adsorção e osmose (MACHADO; VILAR, 2015), que serão abordados mais adiante.

Ainda segundo os autores, o fluxo ou movimento de um fluido em um meio surge da diferença de energia interna entre as moléculas do fluido que, em busca de equilíbrio, migram das regiões com maior energia para regiões com menor energia. No contexto deste capítulo, o fluido tratado é a água e o meio, neste caso poroso, é o solo. A energia interna está ligada ao grau de agitação das moléculas de água, que é definido de acordo com os potenciais de energia.

O potencial total de água no solo é dado pela Equação 1, com o somatório dos potenciais de energia que podem ocorrer. Cabe ressaltar o potencial matricial e o potencial osmótico da água, que serão explicados em sequência, devido a sua importância no fluxo de água em solos não saturados.

$$\Psi_{total} = \Psi_{term} + \Psi_z + \Psi_{cin} + \Psi_p + \Psi_{pn} + \Psi_m + \Psi_{osm} \quad (1)$$

Onde:

Ψ_{total} = potencial total de água do solo, kPa;

Ψ_{term} = potencial térmico da água, kPa;

Ψ_z = potencial gravitacional da água, kPa;

Ψ_{cin} = potencial cinético da água, kPa;

Ψ_p = potencial de pressão da água, kPa;

Ψ_{pn} = potencial pneumático da água, kPa;

Ψ_m = potencial matricial da água, kPa;

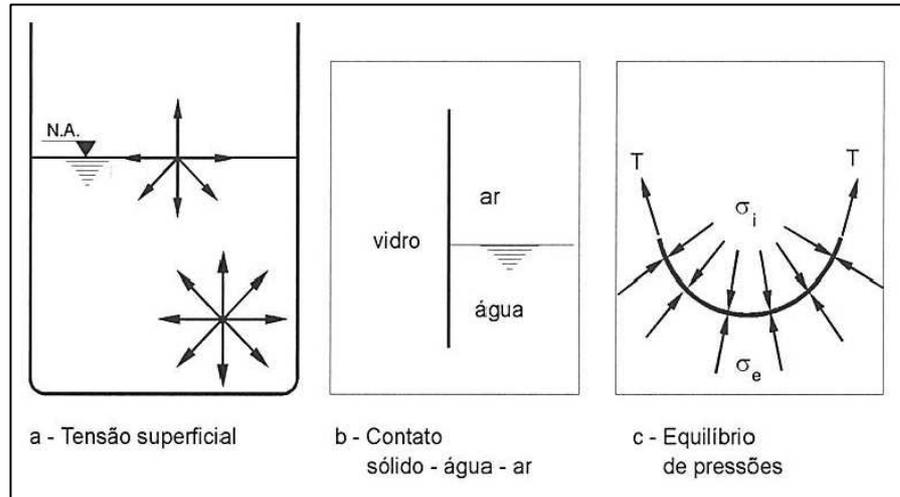
Ψ_{osm} = potencial osmótico da água, kPa.

O potencial matricial (Ψ_m) pode ser definido como “o efeito conjunto dos fenômenos de capilaridade e adsorção sobre a energia livre da água do solo”, conforme Machado e Vilar (2015, p. 84).

O potencial capilar é resultado das forças de atração existentes nas moléculas, que podem ser divididas em forças de coesão (atração entre as moléculas de mesmo tipo, no caso moléculas de água) e forças de adesão (atração das moléculas de água por uma superfície sólida) relacionada principalmente a propriedades físicas do solo, como a distância entre partículas, a pressão capilar, a tensão superficial e o ângulo de contato (MACHADO; VILAR, 2015). No caso do solo, sua importância está associada à capacidade de armazenar água e abastecer as raízes das plantas, por exemplo.

As partículas de água presentes na superfície possuem forças de atração não balanceadas, pois a atração entre moléculas de água é maior que a interação água-ar, que pode ser visto na Figura 5-a. Havendo este desequilíbrio, as moléculas de água são puxadas para o interior, a superfície do líquido se contrai, formando uma membrana contrátil, que pode ser considerada uma quarta fase do solo (FREDLUND; MORGENSTERN, 1977 *apud* BURGOS; CONCIANI, 2015).

Figura 5 - Esquema dos fenômenos relacionados à capilaridade



Fonte: Sousa Pinto (2006)

A tensão atuante é chamada de tensão capilar ou superficial e recebe influência direta da temperatura do meio e viscosidade do fluido. A força resultante na interface sólido-água-ar é responsável pelo surgimento de uma curvatura do menisco, conforme a Figura 5-c que dá origem à ascensão capilar. O movimento de ascensão no solo ocorre acima do nível d'água, contra a ação da gravidade. A altura de alcance do líquido é inversamente proporcional ao diâmetro dos vazios, sendo que em solos arenosos a altura costuma ser da ordem de centímetros, enquanto em solos argilosos pode chegar até dezenas de metros.

O potencial de adsorção, por sua vez, resulta da existência de cargas superficiais não balanceadas presentes no solo. A superfície das argilas, por exemplo, sendo eletronegativa e com dupla camada difusa, atraem moléculas de água (que são dipolares) e cátions pelo fenômeno de adsorção. Existem diferentes tipos de interações que podem ocorrer nas dispersões coloidais aquosas, sendo que algumas delas são interessantes para a análise de problemas envolvendo técnicas de remediação em recuperação de áreas degradadas, conforme Machado e Vilar (2015).

Já o potencial osmótico (Ψ_{osm}) refere-se à concentração de solutos e difusão molecular, devido a propriedades coligativas próprias do soluto. A adição de sais na água, além de diminuir a energia interna e a pressão de vapor, tende a migrar a água de regiões com menor concentração de sais para regiões com maior concentração, resultando no espalhamento do soluto.

Pode-se dizer que a sucção consiste no surgimento de uma poropressão negativa nos solos não-saturados, sendo definida por Marinho (2005, p. 31) como “a energia com que um elemento poroso absorve água quando está livre para se mover”. A medição e controle de

sucção pode ser feita por meio do uso de tensiômetros, papel filtro, placa de sucção e placa de pressão, conforme o mesmo autor.

Representando o estado energético da água em solos não-saturados, a sucção é dada pela diferença de pressão entre as fases ar e água. A sucção pode ser considerada de duas formas, a saber: sucção matricial e sucção total.

A sucção matricial ($u_a - u_w$) está relacionada à capilaridade e adsorção, enquanto a sucção total, além dos fenômenos citados anteriormente, também considera a osmose e pode ser calculada pela Equação 2 (GITIRANA JÚNIOR *et al.*, 2015). Cabe colocar que, em geral, a parcela de sucção osmótica não apresenta valores significativos nas situações recorrentes de engenharia.

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi \quad (2)$$

Onde:

ψ = sucção total, kPa;

u_a = poropressão do ar, kPa;

u_w = poropressão da água, kPa;

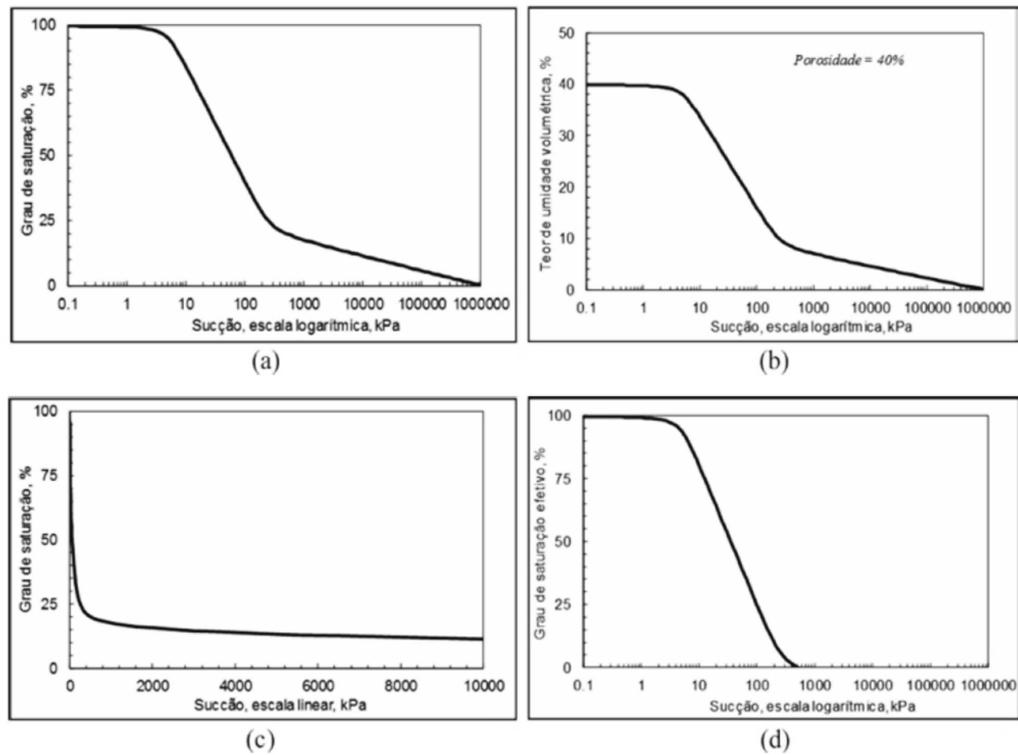
π = sucção osmótica, kPa.

A sucção está relacionada principalmente a propriedades químico-mineralógicas, dependendo do estado de tensões do solo, granulometria, arranjo estrutural, porosidade total, distribuição dos poros e matéria orgânica, podendo influenciar tanto na perda de massa quanto na estabilidade estrutural do solo (MACHADO; VILAR, 2015).

Para compreensão dos fenômenos ocorrentes na zona não-saturada, também denominada de zona vadosa, é necessário conhecer a curva de retenção de água pelo solo, também chamada de curva característica da relação solo/água, que representa graficamente a relação entre a sucção e a quantidade de água do solo. À medida que a quantidade de água diminui, o raio dos meniscos capilares também diminui e a pressão de sucção aumenta (SOUSA PINTO, 2006; GITIRANA JÚNIOR *et al.*, 2015).

A quantidade de água pode ser definida por meio do teor de umidade gravimétrico, volumétrico ou, ainda, pelo grau de saturação. O teor de umidade gravimétrico é a relação entre a massa de água e a massa de sólidos. Já o teor de umidade volumétrico é a razão entre volume de água e volume total. Sua representação gráfica na curva característica pode ser feita a partir de escalas lineares ou logarítmicas (MARINHO, 2005), conforme pode ser observado na Figura 6.

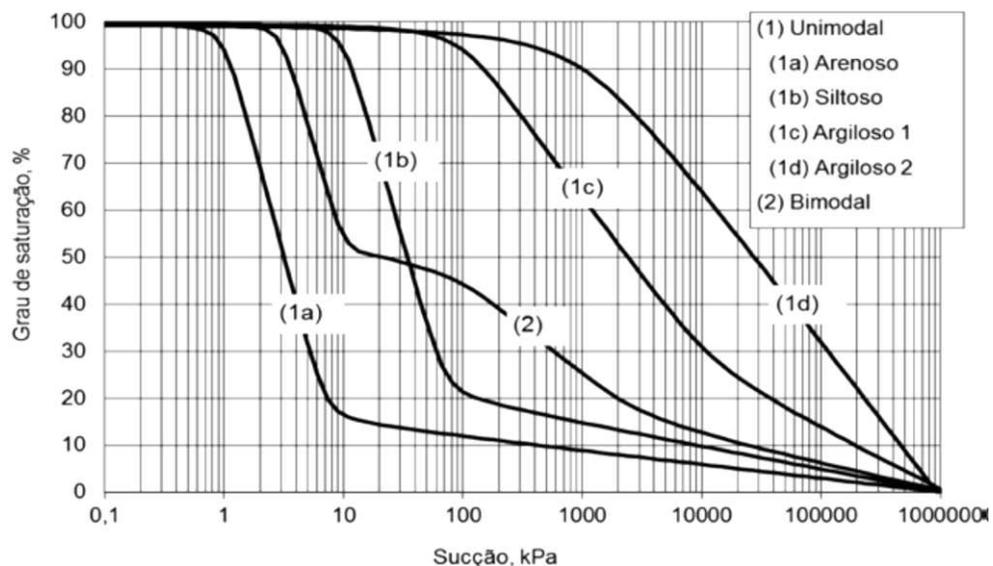
Figura 6 - Exemplo de curva característica de retenção em solo não-saturado



Fonte: Gitirana Júnior *et al.* (2015)

Alguns autores consideram a curva de retenção como a propriedade mais importante de solos não saturados, segundo Gitirana Júnior *et al.* (2015). A forma da curva depende da distribuição dos poros, granulometria e compressibilidade do solo, que são diretamente afetadas pela umidade inicial (gravimétrica ou volumétrica), mineralogia, estrutura e índice de vazios do solo. Alguns formatos típicos podem ser observados na Figura 7.

Figura 7 - Formatos típicos de curvas de retenção



Fonte: Gitirana Júnior *et al.* (2015)

Esta curva também depende da trajetória ou do sentido de variação da umidade (secagem ou umedecimento), que gera o fenômeno de histerese na curva, associado à forma de absorção ou perda de água (MARINHO, 2005).

Este fenômeno pode ser observado ao originar curvas de retenção distintas e não superpostas, sendo que quanto maior a divergência entre as curvas, maior a histerese. A escolha de um determinado comportamento de curva também poderá implicar em efeitos na irrigação, considerando que o processo de secagem corresponde à evaporação e o umedecimento caracteriza a infiltração de água no solo (SANTOS *et al.*, 2015b).

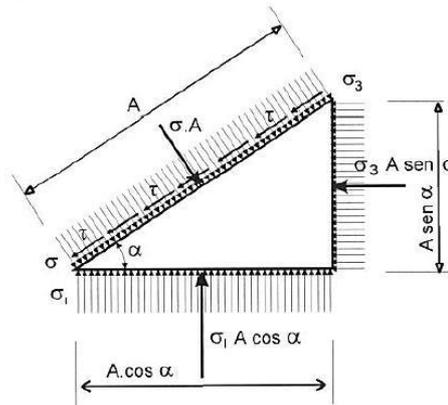
2.3 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS SATURADOS E NÃO SATURADOS

A resistência ao cisalhamento de um solo pode ser definida como “a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura” (SOUSA PINTO, 2006, p. 260). Suportando as tensões internas (devido ao peso próprio) e externas (devido ao carregamento), o solo mantém seu equilíbrio estável. Já quando as tensões se igualam à resistência, há o equilíbrio incipiente, onde já há ruptura, e quando são superiores à resistência, o equilíbrio é instável.

Normalmente, considera-se o solo como homogêneo e contínuo em todas as direções, caracterizando a condição particular de $\sigma_2 = \sigma_3$, reduzindo o sistema a uma condição bidimensional (estado plano de tensões), formado por σ_1 (tensão principal maior, na direção vertical) e σ_3 (tensão principal menor, na direção horizontal).

Quando o ponto passa por um outro plano, inclinado a um ângulo α em relação ao plano principal maior, há duas componentes de tensão atuando: σ_α e τ_α (normal e tangencial ao plano α , respectivamente), conforme a Figura 8.

Figura 8 - Tensões principais e suas componentes atuando num ponto



Essas componentes podem ser calculadas em função das tensões principais σ_1 e σ_3 e o ângulo α de inclinação do plano considerado, conforme as Equações 3 e 4, a seguir.

$$\tau_\alpha = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \times \sin \alpha \quad (3)$$

$$\sigma_\alpha = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \times \cos 2\alpha \right) \quad (4)$$

Onde:

τ_α = tensão tangencial ao plano α , kPa;

σ_α = tensão normal ao plano α , kPa;

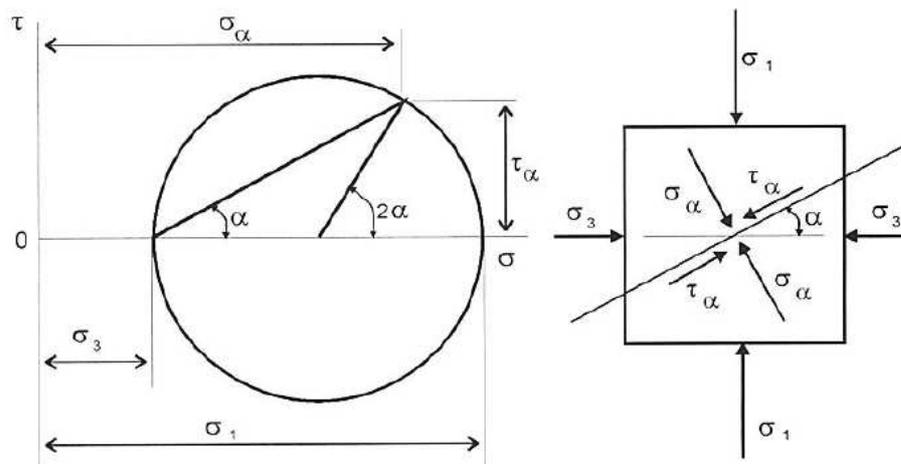
σ_1 = tensão principal maior, kPa;

σ_3 = tensão principal menor, kPa;

α = ângulo compreendido entre o plano considerado e o plano principal maior, °.

A representação gráfica dos estados de tensões num ponto no plano cartesiano forma o Círculo de Mohr, onde o eixo das abcissas corresponde às tensões normais (σ) e o eixo das ordenadas às tensões tangenciais (τ). O Círculo de Mohr, representado na Figura 9, é o lugar geométrico que traduz todos os valores de coordenadas (σ_α , τ_α) correspondentes a todos os planos inclinados que podem passar no ponto O e que fazem ângulo α qualquer com o plano principal maior.

Figura 9 - Círculo de Mohr e o estado de tensões



Fonte: Sousa Pinto (2006)

Primeiramente, marcam-se as tensões principais σ_1 e σ_3 no eixo das abcissas. A diferença $(\sigma_1 - \sigma_3)$ é o diâmetro do círculo, logo, sua metade corresponde ao raio e é possível traçar o círculo. Conforme a Figura 9, tomando-se um ponto qualquer, é possível identificar suas coordenadas σ_α e τ_α , que representam as componentes definidoras do estado de tensões

naquele ponto quando agem no mesmo as tensões principais σ_1 e σ_3 (MURRIETA, 2018; SOUSA PINTO, 2006).

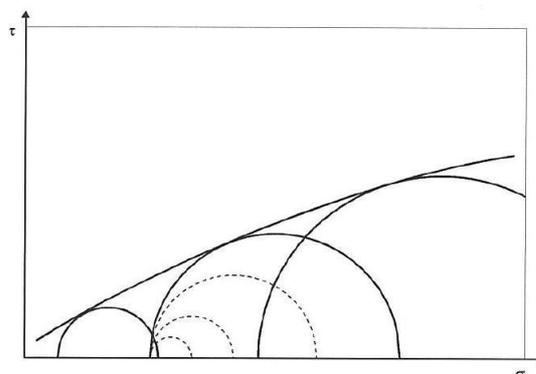
No caso de solos, o critério mais simples para definição da resistência ao cisalhamento é o de Mohr-Coulomb que foi criado considerando os conceitos do critério de Mohr e do critério de Coulomb.

O critério de ruptura de Mohr é essencialmente empírico, obtido a partir de informações resultantes de ensaios em corpos de prova que permitem o traçado de vários Círculos de Mohr.

Para isso, inicialmente seria preciso ensaiar uma infinidade de corpos de prova indeformados (para argilas) ou deformados (para solos compactados ou areias), aplicando-se uma tensão lateral σ_3 constante e uma tensão axial σ_1 crescente, até ocorrer sua ruptura. Como resultado, há um cisalhamento do corpo de prova segundo um ângulo α , do plano de ruptura, e a parte superior do corpo de prova se desloca em relação à inferior. Ao fim do ensaio tem-se o par de tensões principais σ_1 e σ_3 correspondentes ao estado de ruptura, permitindo o traçado do Círculo de Mohr.

Repetindo o ensaio para um segundo corpo de prova, aplicando-se σ_3 maior que a anterior, obtém-se σ_1 de ruptura também maior que a anterior, podendo-se traçar um segundo Círculo de Mohr. Ao repetir o processo sucessivas vezes e obter vários Círculos de Mohr, é possível observar uma linha curva que tangencia os círculos correspondentes à ruptura, visto na Figura 10, a chamada “curva intrínseca” ou “curva envoltória” de Mohr, que limita graficamente o espaço para representar estados de tensões ocorrentes até a ruptura. Esta linha representa a tensão de resistência interna ou resistência ao cisalhamento do material (τ_r).

Figura 10 - Círculos de Mohr e envoltória de resistência



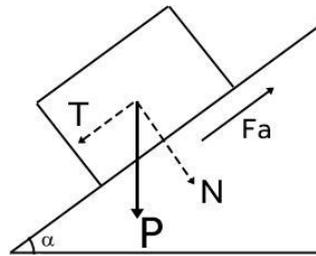
Fonte: Sousa Pinto (2006)

O critério de Mohr, portanto, pode ser expresso como “não há ruptura enquanto o círculo representativo do estado de tensões se encontrar no interior de uma curva, que é a envoltória

dos círculos relativos a estados de ruptura, observados experimentalmente para o material” (SOUSA PINTO, 2006, p. 263).

O critério de Coulomb tem por base os princípios da Física. A Figura 11 indica as forças geradas em um corpo de peso P em um plano inclinado a um ângulo α , que são: as componentes normal (N) e tangencial (T) do peso, calculadas pelas Equações 5 e 6, e a força de atrito (F_a) na mesma direção de T , em sentido contrário.

Figura 11 - Forças atuantes em um plano inclinado



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

$$N = P \times \cos \alpha \quad (5)$$

$$T = P \times \sin \alpha \quad (6)$$

Onde:

P = força peso atuante no corpo, N;

N = componente normal da força peso, N;

T = componente tangencial da força peso, N;

α = ângulo de inclinação do plano, °.

Se o plano é horizontal ($\alpha=0$), então $N=P$ e $T=0$ e o equilíbrio estável. Se $\alpha \neq 0$, há três possibilidades, comparando-se o ângulo de inclinação do plano (α) com o ângulo de atrito de contato entre as superfícies (φ).

Se $\alpha < \varphi$, então $T < F_a$, o equilíbrio é estável e não há deslocamento do corpo para baixo. Aumentando a inclinação do plano até que $\alpha = \varphi$, tem-se $T = F_a$, onde o equilíbrio é incipiente. Quando a inclinação é tal que $\alpha > \varphi$, então $T > F_a$ e o equilíbrio torna-se instável, havendo deslocamento. A partir das Equações 5 e 6 é possível chegar na Equação 7.

$$T = N \times \operatorname{tg} \alpha \quad (7)$$

Onde:

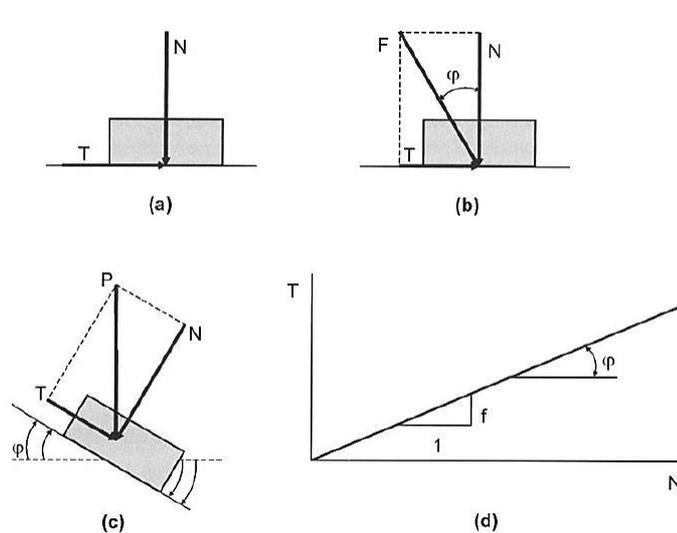
T = componente tangencial da força peso, N;

N = componente normal da força peso, N;

α = ângulo de inclinação do plano considerado, °.

Neste caso, quando $\alpha=\varphi$, obtém-se a resistência limite ao escorregamento, também denominada resistência de atrito. Na Figura 12, pode-se observar esquemas do atrito entre dois corpos.

Figura 12 - Atuação da força de atrito



Fonte: Sousa Pinto (2006)

Relacionando esses conceitos ao solo, observa-se que as frações granulares (agregados secos, como areias) possuem resistência interna devido ao contato grão a grão (por atrito), em função da tensão de compressão. A tensão de resistência interna ao cisalhamento (τ_r) tem o mesmo valor da componente tangencial (τ_α), atuando na mesma direção e sentido contrário, atuando ambos no plano de ruptura, e segue a Equação 8.

$$\tau_r = |\tau_\alpha| = \sigma_\alpha \operatorname{tg} \varphi \quad (8)$$

Onde:

τ_r = tensão de resistência interna ao cisalhamento, kPa;

σ_α = tensão normal ao plano de ruptura α , kPa;

$\operatorname{tg} \varphi$ = coeficiente de atrito interno do material, adimensional.

Já as frações finas (ligantes, como silte e argila) possuem uma parcela de resistência independente da tensão normal, devido à atração físico-química das partículas (por carga elétrica), desenvolvendo a coesão (c), fenômeno que confere resistência à tração. Acrescentando esta componente na resistência ao cisalhamento, tem-se a Equação 9, chamada de Equação de Coulomb, que representa a resistência interna dos solos.

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c \quad (9)$$

Onde:

τ = tensão cisalhante, kPa;

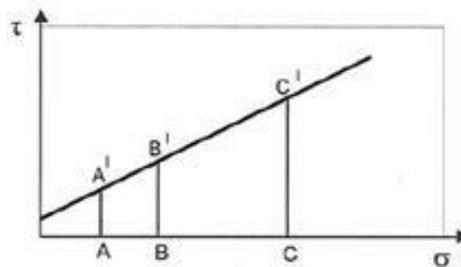
σ = tensão normal, kPa;

φ = ângulo de atrito interno, °;

c = coesão, kPa.

O critério de Coulomb pode, então, ser definido como “não há ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar um valor dado pela expressão $(c + \sigma \tan \varphi)$, onde c e $\tan \varphi$ são constantes do material e σ a tensão normal existente no plano de cisalhamento” (SOUSA PINTO, 2006, p. 263). Os gráficos de resistência referentes ao critério de ruptura de Mohr e de Coulomb são representados nas Figura 10 e Figura 13, respectivamente.

Figura 13 - Representação dos critérios de ruptura de Coulomb



Fonte: Sousa Pinto (2006)

As envoltórias de resistência mais utilizadas para solos podem ser dos tipos: linear, bilinear ou curva, dependendo do que melhor se ajusta aos pontos obtidos em cada caso. Como as envoltórias curvas são de difícil aplicação, a envoltória de Mohr tem sido substituída por uma reta que melhor se ajusta à curva. Desta forma, o critério de ruptura torna-se análogo ao de Coulomb, através da Equação 10, e o critério passa a ser chamado de Mohr-Coulomb.

$$\tau_R = c + \sigma \tan \varphi \quad (10)$$

Onde:

τ_R = resistência ao cisalhamento, kPa;

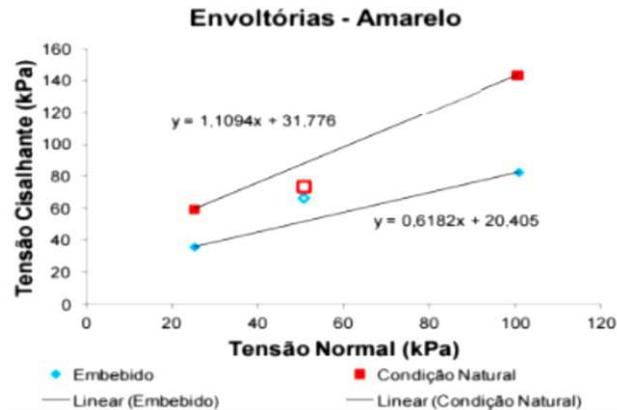
σ = tensão normal, kPa;

c = intercepto de coesão, kPa;

φ = ângulo de atrito, °.

Desta forma, após definida a reta de resistência ao cisalhamento, a componente que define o coeficiente linear (c) deixa de ter o sentido de coesão propriamente dito e passa a ser somente um coeficiente da equação, por isso recebe o nome de “intercepto de coesão” (SOUSA PINTO, 2006). Na Figura 14, tem-se um exemplo de envoltória traçada a partir do resultado do ensaio de cisalhamento direto em três corpos de prova de um solo residual (silte areno-argiloso), obtida por Vieira *et al.* (2017).

Figura 14 - Exemplo de envoltória de resistência



Fonte: Vieira *et al.* (2017)

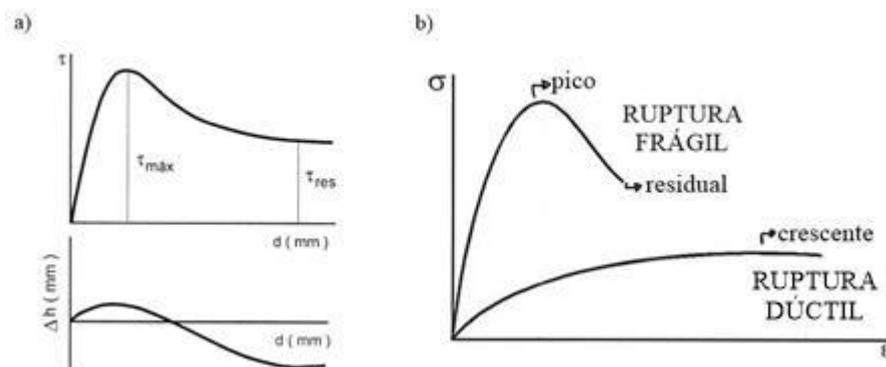
Existem vários ensaios que permitem a avaliação da resistência ao cisalhamento, tais como: compressão simples, compressão triaxial e cisalhamento direto. Dentre eles, destaca-se o último, que será efetuado nesta pesquisa.

Para o ensaio de cisalhamento direto, aplica-se inicialmente uma força vertical N (normal), perpendicular ao plano principal da amostra de solo, onde ocorrerá a ruptura. Esta força é definida a partir do nível de tensões esperado para o solo em serviço, nível de tensão que vai atuar no campo ou em uma obra, portanto, é um valor adotado.

Uma força horizontal T (tangencial) é aplicada ao anel que contém a parte superior do CP, no sentido paralelo ao plano de cisalhamento da amostra, provocando seu deslocamento. Este valor é crescente e, então, é necessário medir a evolução da força suportada pelo solo, ao longo do ensaio.

Gera-se uma curva da tensão de cisalhamento em função do deslocamento; também é possível obter a curva da deformação vertical em função do deslocamento horizontal, conforme mostrado na Figura 15-a. As curvas tensão *versus* deformação podem apresentar ruptura frágil ou plástica, conforme a Figura 15-b.

Figura 15 - Curvas geradas em função da deformação



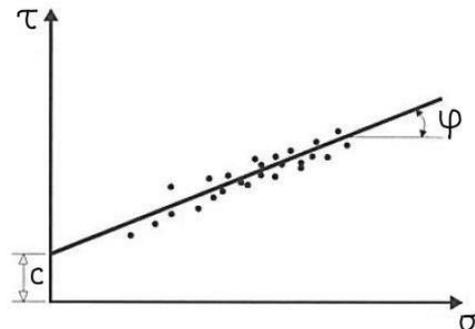
Fonte: Sousa Pinto (2006) (Adaptado pela autora)

Na ruptura frágil, a tensão aumenta até atingir um valor máximo (resistência de “pico”) e cai acentuadamente ao continuar a deformação, mantendo-se uma tensão residual que o CP ainda sustenta após a ruptura. Este comportamento é observado para argilas rijas e duras ou areias compactadas.

Já na ruptura dúctil, o esforço é mantido com a continuidade da deformação, a curva é crescente e não há um valor máximo (resistência residual), comportamento típico de argilas moles ou médias e areias fofas ou pouco compactadas.

Dividindo-se as forças N e T pela área da seção transversal do CP obtém-se as tensões σ (normal) e τ (cisalhante) que ocorrem. Ao realizar o ensaio com diferentes tensões normais (no mínimo 3 CP), obtém-se diversos pares (σ , τ). Através do gráfico $\sigma \times \tau$, plotam-se os pontos referentes às respectivas tensões σ (adotadas) e τ (medidas), que em seguida são graficamente interpolados, formando uma reta, a fim de definir a envoltória de resistência do solo pretendida. Com o traçado da envoltória de Mohr-Coulomb, identifica-se o ângulo de atrito (ϕ) e o intercepto coesivo (c), conforme indicado na Figura 16.

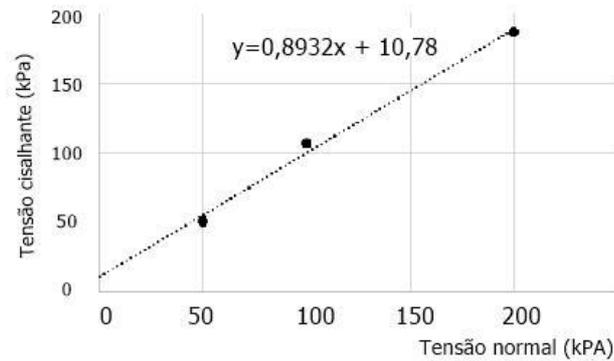
Figura 16 - Interpolação dos pontos de ruptura para obtenção da envoltória de Mohr-Coulomb



Fonte: Sousa Pinto (2006) (Adaptado pela autora)

Na Figura 17, tem-se um exemplo de envoltória de resistência ao cisalhamento obtido por Ayres *et al.* (2017) ao realizarem o ensaio na condição saturada em um solo arenoso do município de Fortaleza (CE). O ângulo de atrito obtido foi $41,77^\circ$ e o intercepto coesivo foi de 10,78 kPa.

Figura 17 - Envoltória de resistência ao cisalhamento de um solo arenoso



Fonte: Ayres *et al.* (2017)

Quanto à coesão, distinguem-se a coesão aparente e a coesão verdadeira. A primeira é na realidade um fenômeno de atrito, no qual a tensão normal que a determina é consequente da pressão capilar em solos parcialmente saturados. A segunda é devida às forças eletroquímicas de atração das partículas de argila (CAPUTO, 2015).

Em caso de solos não saturados, considerando os conceitos de tensões efetivas ou variáveis de tensões, existem diversas propostas para definir equações de resistência, que chegam em resultados semelhantes. Dentre elas, cita-se a Equação 11, proposta por Fredlund *et al.* (1978 *apud* CAMPOS; MOTTA, 2015).

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a)_f \operatorname{tg} \Phi' + (u_a - u_w)_f \operatorname{tg} \Phi^b \quad (11)$$

Onde:

τ_f = resistência ao cisalhamento em solos não saturados, kPa;

c' = coesão efetiva, °;

Φ' = ângulo de atrito efetivo, °;

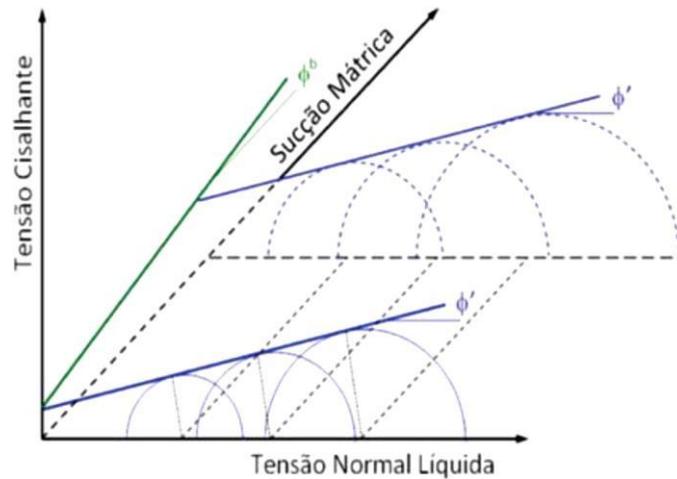
$(\sigma_n - u_a)_f$ = tensão normal líquida atuante no plano de ruptura, na ruptura, kPa;

$(u_a - u_w)_f$ = sucção matricial na ruptura, kPa;

Φ^b = parâmetro que quantifica o aumento na resistência devido a um aumento na sucção, °.

Para definir a envoltória de resistência deste tipo de solo, considera-se um espaço tridimensional, chamando-a de envoltória de ruptura estendida de Mohr-Coulomb (FREDLUND; RAHARDJO, 1993 *apud* CAMPOS; MOTTA, 2015), exemplificada pela Figura 18. Cabe colocar, porém, que sua validade é duvidosa, particularmente devido às variações dos diferentes parâmetros envolvidos em caso de solos de regiões tropicais (CAMPOS; MOTTA, 2015).

Figura 18 - Exemplo de envoltória de resistência em solos não saturados



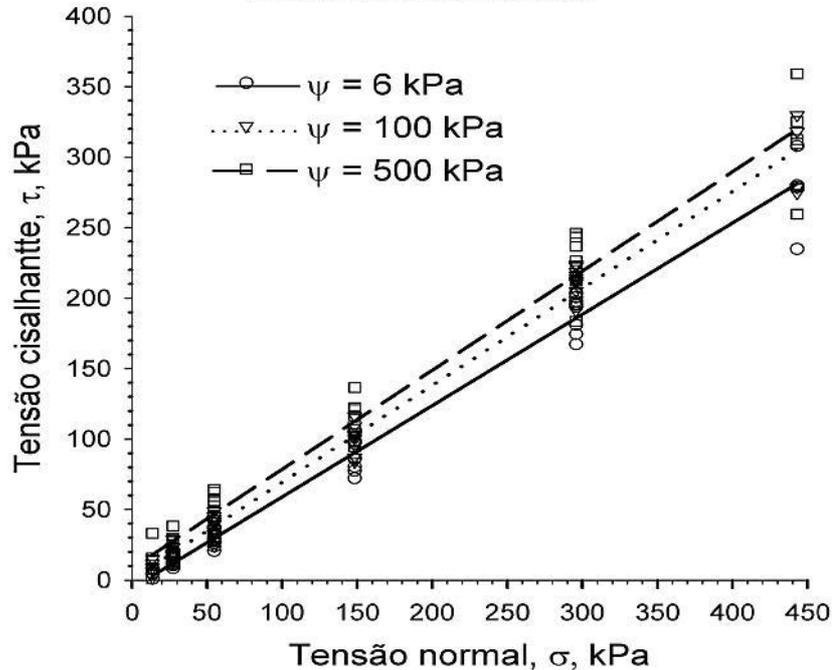
Fonte: Campos e Motta (2015)

De forma semelhante aos solos saturados, os parâmetros de resistência de solos não saturados podem ser obtidos em laboratórios por meio de ensaios triaxiais e de cisalhamento direto, podendo-se controlar ou não a sucção. Dentre os ensaios triaxiais citam-se o ensaio consolidado drenado ao ar e água (CD), consolidado não drenado (CU), não consolidado e não drenado (UU), “teor de umidade constante” que é consolidado e drenado ao ar mas não drenado à água (CW) e compressão simples que também é não drenado (CAMPOS; MOTA, 2015).

Na Figura 19 apresentam-se os resultados obtidas pelo ensaio de cisalhamento na condição não saturada realizado por Braida *et al.* (2007) em um argissolo vermelho amarelo arênico localizado no município de Santa Maria (RS). Avaliando a relação entre os parâmetros de resistência ao cisalhamento e os teores de água, observou-se que o ângulo de atrito interno e a coesão apresentaram variação significativa em função da tensão de água no solo, tornando-se maiores à medida que o solo se tornava mais seco (BRAIDA *et al.*, 2007).

Figura 19 - Resultado de um ensaio de cisalhamento com umidade equilibrada em um solo franco-arenoso

Envoltórias de resistência ao cisalhamento de um argissolo vermelho-amarelo arênico, obtidas com amostras da camada superficial (0 - 0,02 m) e submetidas a três tensões de água



Tensão (kPa)	Umidade Gravimétrica (g.g ⁻¹)	Grau de saturação da água (%)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (kPa)
6	0,21	62,7	32,5	0
100	0,14	39,1	34,9	1,06
500	0,09	24,6	35,4	7,95

Fonte: Braida *et al.* (2007)

2.4 A EROSÃO DO SOLO

2.4.1 Definições, causas, consequências e tipos de erosão

A erosão é um conjunto de processos em que ocorre a desagregação das partículas que formam a estrutura do solo, seguida de sua remoção e transporte pela ação de agentes erosivos, tais como o vento, chuva, rios, mares ou geleiras (BASTOS, 1999).

Em regiões com predominância de clima tropical e alto índice pluviométrico, o tipo de erosão mais ocorrente é causado pela ação da água da chuva, recebendo o nome de erosão hídrica, que é o caso mais comum no Brasil. Pode-se diferenciar a erosão hídrica em interna e superficial. As erosões internas são causadas devido ao elevado gradiente hidráulico, podendo ser em forma de *piping* (formação de túneis devido ao arraste das partículas) ou esqueletização (transporte difuso das partículas). Já as erosões superficiais ocorrem devido ao impacto da chuva e ao escoamento da água (MASCARENHA *et al.*, 2015).

São diversos os fatores intervenientes na erosão hídrica, sendo que uma das maiores dificuldades no estudo desse fenômeno é justamente a complexidade dos mecanismos envolvidos. Dentre estes fatores, destacam-se como principais os fatores climáticos, topográficos, o tipo de solo e vegetação (BASTOS, 1999; LEPSCH, 2010), além do manejo inadequado dos recursos naturais.

Com relação ao clima, a temperatura e radiação solar podem ser importantes nesse sentido, porém ressalta-se sobretudo características relacionadas ao regime de chuvas. A quantidade e intensidade das chuvas está diretamente ligada à capacidade de absorção do solo, a rapidez de sua saturação e formação do escoamento superficial. Também deve-se considerar sua distribuição ao longo do ano, pois nas regiões de secas longas, encontram-se solos mais suscetíveis à erosão (BASTOS, 1999).

A capacidade da chuva de provocar erosão pode ser representada pela *erosividade*, grandeza que considera aspectos como velocidade de queda, energia cinética das gotas, intensidade, duração e frequência das chuvas (PRUSKI, 2009). Silva (2004) propôs a divisão do Brasil em oito regiões homogêneas, em termos de características de precipitação, apresentando equações que estimam a erosividade em cada região para cada mês, a partir das precipitações médias mensais e precipitação média anual.

Dois aspectos topográficos a serem considerados são a declividade e o comprimento de rampa. A declividade do terreno influencia diretamente na concentração, dispersão e velocidade do escoamento superficial, sendo que quanto mais inclinado, maior será a velocidade de escoamento e, conseqüentemente, sua tendência à erosão (BASTOS, 1999).

Com relação ao tipo de solo, alguns são mais suscetíveis à erosão que outros, devido a características físicas (como permeabilidade, textura, estrutura, teor de umidade), químicas (como concentração de nutrientes) e biológicas (como teor de matéria orgânica) (VIEIRA, 2017). Essa suscetibilidade à erosão pode ser calculada através da erodibilidade do solo, propriedade que será descrita em maiores detalhes adiante.

Ao mesmo tempo, a cobertura vegetal apresenta-se como fator determinante na erosão de um local, como ilustrado na Figura 20. Sua presença permite que parte da água da chuva seja interceptada, diminuindo o impacto das gotas sobre o solo e, ainda, reduz a velocidade e energia do escoamento superficial, pois aumenta a rugosidade hidráulica do percurso (LEPSCH, 2010). De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1990), a cobertura vegetal é a defesa natural de um terreno contra a erosão. Além disso, de acordo com Pruski (2009), a retirada de vegetação e incidência da radiação solar direta sobre o solo podem destruir a matéria orgânica e microorganismos em uma camada de até 5 cm.

Figura 20 - Efeitos da vegetação e compactação do solo no processo erosivo



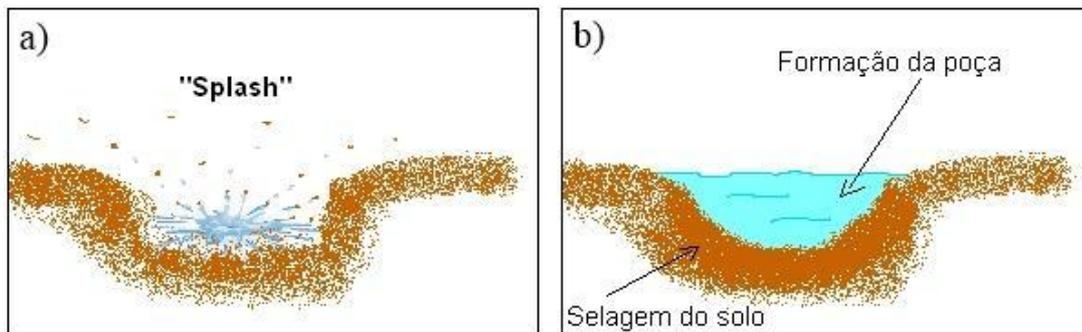
Fonte: Didonet (2014)

Costuma-se subdividir a erosão hídrica em três fases: desagregação, transporte e deposição. As duas primeiras podem ocorrer tanto pela ação das gotas da chuva ao entrarem em contato com o solo quanto pelo escoamento superficial. Já a terceira e última fase, ocorre quando a quantidade de sedimentos no escoamento supera sua capacidade de transporte (PRUSKI, 2009).

Conforme Lepsch (2010), a velocidade com que as gotas de chuva atingem a superfície varia de 5 a 15 km/h, enquanto a velocidade de uma enxurrada não ultrapassa 1 km/h, logo, o contato inicial tem um impacto muito maior sobre o solo. Este impacto entre a gota e o solo causa, em um primeiro instante, o destacamento de suas partículas, chamado efeito “*splash*” ou salpicamento, conforme representado na Figura 21-a. Segundo Mascarenha *et al.* (2015) tal impacto está diretamente relacionado à direção e velocidade do mesmo, à intensidade e duração da precipitação, ao diâmetro da gota e à qualidade da água da chuva. As chuvas ácidas, por exemplo, originadas em grandes centros urbanos devido à intensa emissão de gases poluentes pelas indústrias e veículos, podem acelerar o processo de acidificação do solo, empobrecendo-o. É um fenômeno comum em regiões de clima úmido, onde as chuvas constantes lixiviam grande quantidade de bases adsorvidas nos colóides do solo, substituindo-as por hidrogênio, tornando o solo ácido (LEPSCH, 2010).

Em seguida, há a formação de crostas, onde os macroporos são preenchidos de sedimentos e a porosidade do solo diminui. Tal processo é denominado como selagem ou selamento do solo, representado na Figura 21-b, reduzindo sua capacidade de infiltração. Após a saturação do solo, este perde a capacidade de absorção, com isso ocorre a formação do fluxo superficial que dá origem ao escoamento e carreamento das partículas (PRUSKI, 2009; LEPSCH, 2010).

Figura 21 - Efeito *splash* (a) e selagem (b) causados no solo pelo impacto das gotas de chuva



Fonte: Nacinovic (2009)

A erosão pode ocorrer de forma natural (erosão geológica) e ser intensificada pela ação humana (erosão acelerada) (PITTELKOW, 2013). Dentre as atividades antrópicas que interferem nesse processo, pode-se citar a urbanização acelerada; o mau uso, ocupação e/ou manejo do solo; projetos inadequados; falta de planejamento e/ou manutenção.

Como consequências, o processo erosivo acelerado pode gerar, entre outros prejuízos socioeconômicos e ambientais, a perda de fertilidade do solo; a necessidade do uso intensivo de corretivos e fertilizantes; aumento dos custos de produção; degradação de terras agrícolas; poluição e assoreamento de rios e lagos; deslizamentos em áreas de risco e comprometimento de serviços públicos, como interdição de estradas e a exposição ou ruptura de canalizações e dutos enterrados (MASCARENHA *et al.*, 2015; PRUSKI, 2009).

O uso indevido do solo na agricultura, silvicultura e outras atividades humanas pode provocar perdas rápidas e significativas de carbono pelo solo, que são convertidos em gases poluentes. Neste sentido, estudos indicam que a erosão do solo contribui para quase 24% das emissões de gases do efeito estufa (AGÊNCIA EFE, 2019), conforme afirmou o subsecretário executivo da Convenção das Nações Unidas para a Luta contra a Desertificação, Pradeep Monga. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, para alcançar a meta de manter o aquecimento global abaixo dos 2°C nos próximos anos, é fundamental que a emissão dos gases citados seja reduzida em todos os setores, incluindo, portanto, a necessidade de uma gestão mais sustentável no manejo e uso do solo (ONU BRASIL, 2019).

Além disso, a erosão do solo pode causar perdas de até 50% no rendimento de algumas culturas agrícolas, conforme Agência EFE (2019). As perdas de solo anuais por erosão em áreas cultivadas no estado de Minas Gerais, por exemplo, podem ser observadas no Quadro 2. Em termos econômicos, as perdas dos nutrientes citados correspondem a aproximadamente US\$ 173.578.303,00 (PRUSKI, 2009).

Quadro 2 - Estimativa de perdas anuais por erosão em MG

Perdas por erosão no estado de Minas Gerais	
Perda anual de solo (t/ha)	19
Área cultivada (ha)	3.627.222
Perda anual total (t/ano)	68.917.218
Perda de calcário dolomítico (t/ano)	136.000
Perda de cloreto de potássio (t/ano)	8.000
Perda de superfosfato simples (t/ano)	660
Perda de sulfato de amônia (t/ano)	379.040
Perda de esterco de galinha (t/ano)	1.636.780

Fonte: Pruski (2009) (Adaptado pela autora)

Já em âmbito nacional, de acordo com Hernani *et al.* (2002 *apud* PRUSKI, 2009), as perdas anuais de solo em áreas ocupadas por lavouras e pastagens no Brasil são, aproximadamente, 822,7 milhões de toneladas. Tais perdas correspondem a um prejuízo de US\$ 4,24 bilhões por ano, considerando custos internos, como reposição de corretivos e fertilizantes e maiores custos de produção devido à menor produtividade, e externos, como tratamento de água, recarga de aquíferos, manutenção de estradas, maior consumo de combustível e energia.

No contexto mundial, dados do relatório *Status of the World's Soil Resources* da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) indicam que a erosão é responsável pela eliminação de 25 a 40 bilhões de toneladas de solo por ano. As perdas de produção de cereais devido à erosão somam em torno de 7,6 milhões de toneladas anuais, que correspondem a aproximadamente 250 milhões de toneladas até 2050. Esta perda equivale à retirada de 1,5 milhão de quilômetros quadrados de terras cultiváveis (MENDONÇA, 2015). Com isso, pode-se dizer que a perda de solos por erosão prejudica a produção de alimentos e a segurança alimentar, contribui para o aumento dos preços e agrava as ocorrências de fome, pobreza e desigualdade social (ONU BRASIL, 2019).

Alguns estudos identificaram valores máximos tolerantes de perda de solo por erosão, para fins agrícolas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990). Tais limites consideram fatores físicos, econômicos, tipo de solo e tempo de formação. Estes valores são associados aos diferentes usos das terras agrícolas, sendo aceitáveis por não comprometerem sua capacidade produtiva. Porém, cabe ressaltar a importância de considerar e avaliar também a sustentabilidade dos outros setores envolvidos nas perdas de solo, sobretudo questões relacionadas à bacia hidrográfica (PRUSKI, 2009).

A erosão também pode reduzir a quantidade de água que chega ao lençol freático, comprometendo o abastecimento dos aquíferos. Segundo De Maria (1999 *apud* PRUSKI,

2009), as perdas de água anuais devido à erosão correspondem a 171 bilhões de metros cúbicos em áreas sob uso agropecuário.

A seguir, serão apresentados os quatro tipos de erosão, em ordem crescente de gravidade: erosão laminar, erosão em sulcos, erosão por ravinamento e, por fim, erosão por voçorocamento.

A erosão laminar é a remoção de uma fina camada da superfície do terreno e pode ser observada no início do talude da Figura 22. O choque entre as gotas de chuva e o solo provoca a quebra dos agregados, transformando-os em partículas menores, suscetíveis ao arraste pela energia da enxurrada. As primeiras porções do solo que se desprendem são matéria orgânica e argila, também considerados os componentes mais ricos em nutrientes para as plantas (MAGALHÃES, 2001). Inicialmente é um processo quase imperceptível, sendo que alguns agricultores e pecuaristas chegam a considerar esse desgaste laminar como algo natural, não se atentando à possibilidade de avanço da erosão (PRUSKI, 2009; LEPSCH, 2010).

Figura 22 - Erosão laminar e por sulcos em Juiz de Fora



Fonte: Barbosa (2017)

Quando a intensidade da chuva excede a capacidade de infiltração do solo, forma-se um fluxo superficial, causando remoção progressiva e uniforme nos horizontes superficiais. A concentração deste fluxo em determinados locais do terreno resulta na formação de sulcos, definidos por Camapum de Carvalho (2015) como pequenas incisões na superfície, de até 10 cm de profundidade, podendo ser observados na parte inferior da Figura 22. A atuação das gotas provoca a erosão entressulcos, enquanto o escoamento superficial promove a erosão em sulcos, isto é, o transporte das partículas destacadas pelas gotas e o desgaste do leito do sulco. Os sulcos também podem ser denominados como rasos ou profundos, segundo Lepsch (2010).

O aumento significativo da concentração do fluxo, pode dar início à formação de ravinas, que são considerados canais com profundidade máxima de 50 cm. Esse estágio da

erosão, já mais preocupante, implica em grandes perdas de solo e compromete a regularidade do terreno (BASTOS, 1999) e pode ser visualizada na Figura 23.

Figura 23 - Erosão em ravinas em Juiz de Fora



Fonte: Stephan (2010)

Por último, as voçorocas (ou boçorocas) são o estágio mais avançado e complexo da erosão, podendo ser definidas como ravinas de grandes dimensões, que surgem a partir da grande concentração de fluxo devido, principalmente, a atividades antrópicas. As principais causas são o uso incorreto do solo, sem a adoção de técnicas de conservação do mesmo e a ineficácia do sistema de drenagem para conter o escoamento (MARTINS, 2013). Com alto poder destrutivo, além da erosão superficial e interna do solo, podem também ocasionar solapamentos, desabamentos e escorregamentos no terreno (STEPHAN, 2010).

De acordo com Martins (2013, p. 218), as voçorocas são “enormes fendas ou cortes nos terrenos causadas por erosão do solo”. Existem diferentes linhas de definição das voçorocas, uma delas considera como ravinas que atingiram o lençol freático, causando também erosão interna (MARQUES, 2015) ou que apresentam queda em bloco e afloramento do lençol freático e/ou surgência de água, conforme o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (ITP, SP). Já Pruski (2009) conceitua como sulcos com profundidade superior a 30 cm e largura superior a 1 m, sendo mais comuns em divisas de propriedades, para onde o escoamento superficial costuma ser direcionado. As voçorocas podem ser classificadas quanto à profundidade e extensão da bacia de contribuição, conforme indicado no Quadro 3.

Quadro 3 - Classificação de voçorocas quanto à profundidade e área da bacia de contribuição

Voçoroca	Profundidade	Bacia de contribuição
Pequena	< 2,5 m	< 10 ha
Média	entre 2,5 m e 4,5 m	entre 10 e 50 ha
Grande	> 4,5 m	> 50 ha

Fonte: Tavares *et al.* (2008)

Alguns solos apresentam maior suscetibilidade à formação de voçorocas, conforme Fendrich *et al.* (1988 *apud* MACHADO *et al.*, 2006): solos arenosos, ácidos, pouco coesivos, horizonte A com cor vermelho intenso, com areia muito fina, siltosa e pouca argila, predominando nos horizontes subjacentes areias mais claras, levemente rosadas ou amarelas, com tendência à cor branca. O tipo de rocha de origem e a profundidade do solo também podem influenciar no desenvolvimento de voçorocas, sobretudo quando o horizonte C (saprólito) é profundo e exposto (TAVARES *et al.*, 2008).

Conforme Lepsch (2010), os fatores que contribuem para a evolução de sulcos para voçorocas são, geralmente, aradura, semeadura, cultivos alinhados no sentido morro abaixo, pecuária extensiva com animais caminhando repetidamente em uma mesma direção muito inclinada e estradas rurais mal-planejadas. As voçorocas, como observado na Figura 24, podem atingir vários metros de profundidade e chegar até o horizonte C dos solos, indicando destruição total de terras agrícolas ou urbanas. Além da dificuldade no controle desse processo erosivo, as técnicas de recuperação de áreas degradadas nesse estágio são complexas e de custo elevado, muitas vezes dificultando ou até impedindo o trabalho de máquinas agrícolas.

Figura 24 - Voçoroca provocada pelo desvio inadequado de água pluvial em beira de estrada



Fonte: Tavares *et al.* (2008)

É importante evitar ao máximo que o nível de erosão do solo chegue a este estágio, onde o controle é muito difícil e de alto custo, exigindo, na maioria das vezes, técnicas de recuperação por obras de engenharia (MARTINS, 2013), conforme será tratado em capítulos posteriores.

2.4.2 Avaliação da erosão

Os primeiros estudos e equações para entender e estimar a erosão do solo surgiram na primeira metade do século XIX, por meio de modelos empíricos. Cabe destacar a Equação

Universal das Perdas de Solo (USLE), desenvolvida por Wischmeier e Smith (1978 *apud* PRUSKI, 2009) para estimativa da perda média anual de solo, conforme a Equação 12.

$$PS = RKLSCP \quad (12)$$

Onde:

PS = perda de solo média anual, t ha⁻¹ ano⁻¹;

R = fator de erosividade da chuva, MJ mm ha⁻¹ h⁻¹;

K = fator de erodibilidade do solo, t ha⁻¹/(MJ mm ha⁻¹ h⁻¹);

L = fator de comprimento da encosta, adimensional;

S = fator de declividade da encosta, adimensional;

C = fator de uso e manejo do solo, adimensional;

P = fator de práticas conservacionistas, adimensional.

A USLE foi feita com base em observações em parcelas-padrão (amostras de 3,5 m por 22,1 m e 9% de declividade) em diversas regiões dos Estados Unidos. Os fatores R, K, L e S dependem das condições naturais, enquanto C e P são fatores antrópicos.

O fator K, que indica a erodibilidade, a princípio era encontrado pela inclinação da curva ajustada no gráfico entre o índice de erosividade e as perdas de solo e, posteriormente, através de nomogramas e modelos matemáticos. Ambos fatores apresentaram valores significativos para os locais de estudo, porém observou-se que em regiões tropicais os resultados não eram satisfatórios. Devido à diversidade edáfica e heterogeneidade de comportamento dos solos regiões tropicais, como no Brasil, sugere-se o desenvolvimento de outros métodos e modelos específicos para estimar a erosividade e erodibilidade (AMORIM *et al.*, 2009).

Segundo os mesmos autores, as principais limitações da USLE consistem em estimar a erosão apenas nos estágios iniciais (laminar e por sulcos), além de dificilmente se aplicar a regiões com condições edafoclimáticas diferentes do país de origem. Para adaptá-la a outras condicionantes, deveria ser desenvolvido um banco de dados, que demandaria tempo e recursos financeiros inviáveis. Algumas melhorias foram feitas ao desenvolverem a Equação Universal de Perdas de Solo Revisada (RUSLE), acrescentando bancos de dados mais abrangentes. Entretanto, por ainda ser um método empírico e que não considera a deposição dos sedimentos, ainda apresenta muitas limitações.

Nos últimos anos, vem crescendo o uso de simulações computacionais para estudo das interações entre os processos físicos, químicos, hidrológicos e meteorológicos. A modelagem permite que estes processos sejam descritos matematicamente, auxiliando no entendimento dos

fenômenos envolvidos e na tomada de decisões por técnicas mais adequadas para prevenção ou mesmo controle da erosão (AMORIM *et al.*, 2009).

A erosão tem sido foco de diversos estudos em diferentes áreas do conhecimento, dentre as quais pode-se citar a agronomia, hidráulica, geologia e engenharia. Em engenharia, é importante que seja feita a avaliação do potencial erosivo de cada região antes mesmo desta ser ocupada ou receber uma obra, a fim de evitar o surgimento de problemas mais sérios como voçorocas, instabilidade de taludes e movimentos de massa (MASCARENHA *et al.*, 2015).

A erodibilidade pode ser definida como “a propriedade do solo que retrata a maior ou menor facilidade com que suas partículas são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo” (BASTOS, 2001, p. 2), sendo considerada uma das propriedades mais complexas do solo. Conforme Silva (2011), corresponde à quantidade de solo desprendido por unidade de área, tempo e de tensão aplicada.

A erosão não deve ser confundida com erodibilidade. Enquanto a primeira depende de fatores como declividade, intensidade das chuvas, vegetação e etc., a segunda é um fator intrínseco de cada solo (LIMA *et al.*, 1992 *apud* SILVA, 2011), sendo considerada como uma de suas características mais complexas (BASTOS, 1999). Segundo Pruski (2009), a erodibilidade também depende da capacidade de infiltração e de armazenamento da água, das forças de resistência do solo à ação da chuva e ao escoamento superficial.

Conforme Nacinovic (2009), a erodibilidade não pode ser baseada na análise isolada de características físicas, químicas e mineralógicas do solo. Além desses dados, para ter uma visão mais completa do processo erosivo, é necessário considerar e avaliar a geomorfologia, o meio físico biótico e antrópico. A seguir, serão citados alguns critérios utilizados para classificação da erodibilidade de um solo.

Conforme Ziegler *et al.* (2000), a erodibilidade pode ser variável, sofrendo alterações ao longo do escoamento. Alguns modelos dinâmicos de simulação, como o *Water Erosion Prediction Project* (WEPP), por exemplo, consideram a erosão em duas etapas: a primeira causada pelo impacto das gotas de chuva (erosão entre sulcos) e a segunda pelo escoamento superficial (erosão no sulco), sendo que cada uma corresponde a um valor de erodibilidade. Desenvolvido a partir da década de 1980, o modelo tem capacidade de estimar a distribuição espacial e temporal da perda de solo e deposição do sedimento. Além disso, possui versões para encostas, malhas e bacias hidrográficas (PRUSKI, 2009; BASTOS, 1999).

A erodibilidade de um solo pode ser determinada qualitativa ou quantitativamente por meio de ensaios, que serão dispostos a seguir. Nos ensaios diretos, os resultados já representam

o potencial erosivo de um solo, enquanto os ensaios indiretos permitem a avaliação da erodibilidade utilizando correlações.

2.4.2.1 Ensaios diretos de erodibilidade

a) Avaliação do fator K

Bastos (1999) propôs a classificação da condição erodível de um solo com base nos valores do fator K, mencionado no tópico anterior, conforme o Quadro 4.

Quadro 4 - Classificação de erodibilidade de acordo com o fator K

Fator erodibilidade (g/cm ² /min/Pa)	Classificação
$K < 0,001$	Baixa erodibilidade
$0,001 \leq K < 0,1$	Média erodibilidade
$K > 0,1$	Baixa erodibilidade

Fonte: Bastos (1999)

b) Simuladores de chuva

A utilização de simuladores de chuva em campo ou laboratório permite a determinação de perdas e desagregação do solo, água e nutrientes, formação do encrostamento, infiltração de água e lixiviação de compostos ou metais em solos. Dentre as vantagens, pode-se citar a redução do tempo e custo do experimento, maior controle das condições e possibilidade de repetições sob condições idênticas. É bastante utilizado na área de agronomia e, recentemente, tem sido alvo de pesquisas em geotecnia também (MASCARENHA *et al.*, 2015).

Com o uso de simuladores de chuva, foi possível a determinação do fator erodibilidade de alguns solos no Brasil. Denardin (1990 *apud* PRUSKI, 2009) estimou o fator de erodibilidade para 31 solos brasileiros a partir de parâmetros físicos e químicos. Segundo o autor, solos com horizonte B latossólico possuem erodibilidade entre 0,002 e 0,034 t h MJ⁻¹ mm⁻¹, enquanto solos com horizonte B textural possuem de 0,004 a 0,044 t h MJ⁻¹ mm⁻¹.

c) Ensaio de dispersão

O ensaio de dispersão ou *crumb test* identifica e classifica a dispersibilidade de solos argilosos, variando do grau 1 (não dispersivo) ao grau 4 (altamente dispersivo). Consiste na submersão de um torrão de solo em água destilada e em solução de NaOH 0,01 N, observando o estado de turbidez da água durante alguns períodos, segundo a NBR 13601 (ABNT, 1996a). Havendo ocorrência de dispersão, provavelmente trate-se de um solo erodível, porém, nem todo solo erodível é dispersivo (MASCARENHA *et al.*, 2015). A dispersibilidade de solos argilosos também pode ser determinada pelo ensaio sedimentométrico comparativo e *Pinhole Test*.

d) Ensaio sedimentométrico comparativo e *Pinhole Test*

O ensaio sedimentométrico comparativo avalia a dispersão em solos que apresentam mais de 12% de fração argilosa, comparando curvas granulométricas com e sem defloculante, conforme a NBR 13602 (ABNT, 1996b), além de permitir a análise do estado de agregação do solo.

O *Pinhole Test* ou ensaio do furo de agulha determina direta e qualitativamente a dispersão de solos finos, dividindo em 6 categorias de classificação, segundo a NBR 14114 (ABNT, 1998). O procedimento consiste em aplicar cargas hidráulicas por meio de um orifício axial em um corpo de prova cilíndrico moldado a partir de amostra indeformada de solo. Para classificar quanto à dispersão, avaliam-se a turbidez do efluente, a vazão e o diâmetro final do furo.

e) Ensaio de desagregação

O ensaio de desagregação, por sua vez, verifica a influência da água no comportamento do solo, quando submerso, indicando sua estabilidade. É utilizado, principalmente, em amostras indeformadas de taludes, que podem sofrer inundação total ou parcial, durante um período determinado. A imersão total representa a situação em que o talude é inundado de forma abrupta, enquanto a imersão parcial representa a ascensão lenta do lençol freático, onde a água ascende por capilaridade. Segundo Holmgren e Flanagan (1977 *apud* MASCARENHA *et al.*, 2015), o resultado do ensaio pode ser classificado como sem resposta ou colapso por abatimento, fraturamento e dispersão.

f) Ensaio de Inderbitzen

O ensaio de Inderbitzen, também chamado de ensaio de erosão ou erosômetro, foi idealizado em 1961 por Anton L. Inderbitzen. Considerado simples e de fácil utilização, é comumente realizado para avaliação da erosão superficial, de preferência com amostras coletadas à profundidade inferior a 25 cm (MASCARENHA *et al.*, 2015).

O ensaio consiste em simular o escoamento superficial de água no solo, considerando fatores como vazão e tempo de atuação do fluxo, declividade da rampa e propriedades do solo, a fim de avaliar o seu efeito. A simulação é feita por meio de uma rampa metálica que possui um orifício ao meio para colocar o corpo de prova coletado em anel metálico e um tubo de cobre perfurado na parte superior para transmitir o fluxo de água. Como resultados diretos, obtêm-se os valores de perdas de solo (STEPHAN, 2010).

Além disso, utilizando as perdas de solo, é possível estimar graficamente o fator erodibilidade (K), que corresponde ao coeficiente angular da reta ajustada do gráfico entre

tensão cisalhante hidráulica e perda de solo. A tensão cisalhante hidráulica (τ_h) pode ser calculada por meio da Equação 13, utilizando a altura da lâmina de fluxo (h), que por sua vez é calculada pela Equação 14 (MASCARENHA *et al.*, 2015).

$$\tau_h = \gamma_w \times h \times d \quad (13)$$

Onde:

τ_h = tensão cisalhante hidráulica, kPa;

γ_w = peso específico da água, kN/m³;

h = altura da lâmina de fluxo, m;

d = declividade da rampa, adimensional.

$$h = \frac{Q}{l \times v} \quad (14)$$

Onde:

Q = vazão, m³/s;

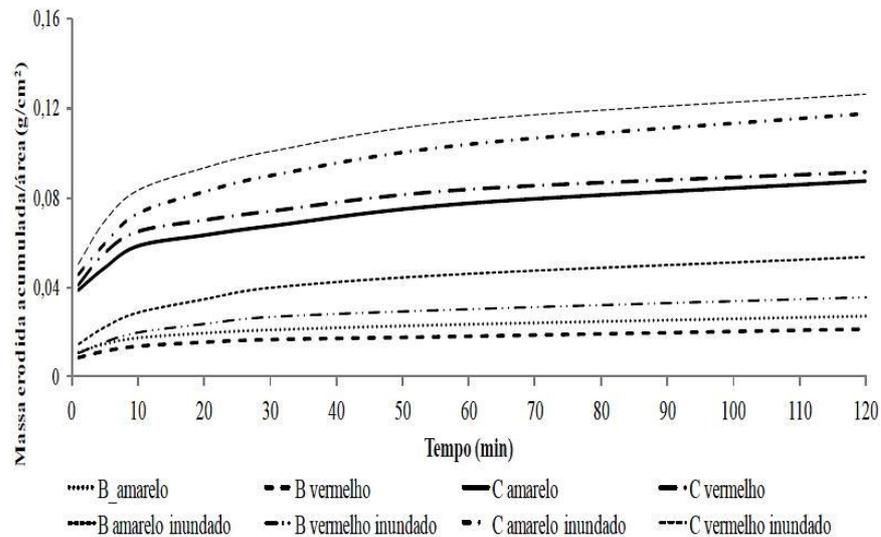
l = largura do canal, m;

v = velocidade do escoamento, m/s.

Algumas modificações foram propostas ao ensaio de Inderbitzen original, como a avaliação do efeito “*splash*” devido ao impacto das gotas de chuva por Freire (2001), a substituição dos tubos perfurados por um chuveiro como realizado por Grando (2011) e Vieira (2017).

A Figura 25 indica os resultados do ensaio de Inderbitzen modificado realizado em um solo residual de classificação granulométrica areia siltosa, localizado na sub-bacia do Sana (Macaé, RJ), na condição natural e inundada. Observou-se uma classificação de erodibilidade intermediária, onde os horizontes saprolíticos (C) apresentaram maiores valores de perda de solo do que os horizontes pedológicos (B). A menor resistência ao arraste hídrico no horizonte C pode ser justificada em função de suas menores plasticidades e teores de argila, resultando em menor agregabilidade e estabilidade durante o processo erosivo (MOREIRA; POLIVANOV, 2018).

Figura 25 - Resultado de um ensaio de Inderbitzen modificado em solo residual



Fonte: Moreira e Polivanov (2018)

2.4.2.2 Ensaios indiretos de erodibilidade

a) Granulometria e limites de consistência

A granulometria possibilita a determinação do diâmetro das partículas de um solo, que influencia nos fenômenos de desagregação e transporte. Conforme Chuquipiondo (2007), alguns autores afirmam que solos mais erodíveis apresentam partículas da ordem de areia fina ou silte, e pouca quantidade de argila. Os Limites de Atterberg, por sua vez, são associados à compressibilidade, permeabilidade e resistência dos solos, características que são importantes na análise de erodibilidade.

Gray e Leiser (1989 *apud* Bastos, 1999) apresentaram uma classificação de erodibilidade com base na granulometria e limites de consistência, permitindo uma classificação unificada do solo, seguindo a seguinte ordem, do menos erodível para o mais erodível: GW<GP<GM<CH<CL<OL<MH<SC<SM<ML, sendo cascalho (G), areia (S), silte (M), argila (C), orgânico (O), bem graduados (W), mal graduados (P), e para partículas mais finas, se $LL < 50$ (L) ou $LL > 50$ (H).

b) Classificação do solo e declividade

Morato *et al.* (1997) elaboraram uma carta de fragilidade potencial de alguns solos de São Paulo a partir da combinação de características dos solos e da declividade, considerando atributos como a estrutura, textura, plasticidade, grau de coesão das partículas e profundidade dos horizontes superficiais e subsuperficiais. As combinações das classes de solos e de declividade segundo seus respectivos graus de fragilidade encontram-se no Quadro 5.

Quadro 5 - Índices de fragilidade à erosão em solos do litoral sul de São Paulo

Classes de declividade	Inferior a 6%	Entre 6% e 12%	Entre 12% e 20%	Entre 20% e 30%	Superior a 30%
Classes de solos					
Espodossolos	Muito fraca (1)	Fraca (2)	Média (3)	Forte (4)	Muito forte (5)
Organossolo	Muito fraca (1)	Fraca (2)	Média (3)	Forte (4)	Muito forte (5)
Cambissolo	Forte (4)	Forte (4)	Forte (4)	Forte (4)	Muito forte (5)

Fonte: Morato *et al.* (1997)

Salomão (1999 *apud* CHUQUIPIONDO, 2007) estabeleceu índices de erodibilidade para classificar os solos quanto à suscetibilidade à erosão laminar, apresentado no Quadro 6, onde o autor considerou uma associação entre tipos de solo e declividade.

Quadro 6 - Classes de suscetibilidade à erosão laminar

Classe		Erodibilidade	Unidades pedológicas
1	Extremamente suscetível	10,0 a 8,1	Cambissolos, solos litólicos; podzólicos* abruptos, textura arenosa média; areias quartzosas
2	Suscetível	8,0 a 6,1	Podzólicos* não abruptos; textura média/argilosa e textura média
3	Moderadamente suscetível	6,0 a 4,1	Podzólicos* de textura argilosa
4	Pouco suscetível	4,0 a 2,1	Latossolo de textura média; latossolo de textura argilosa; terra roxa estruturada
5	Não suscetível	2,0 a 0	Solos hidromórficos em relevo plano

* A nomenclatura “podzólico” foi substituída por “argissolo” (JACOMINE, 2008)

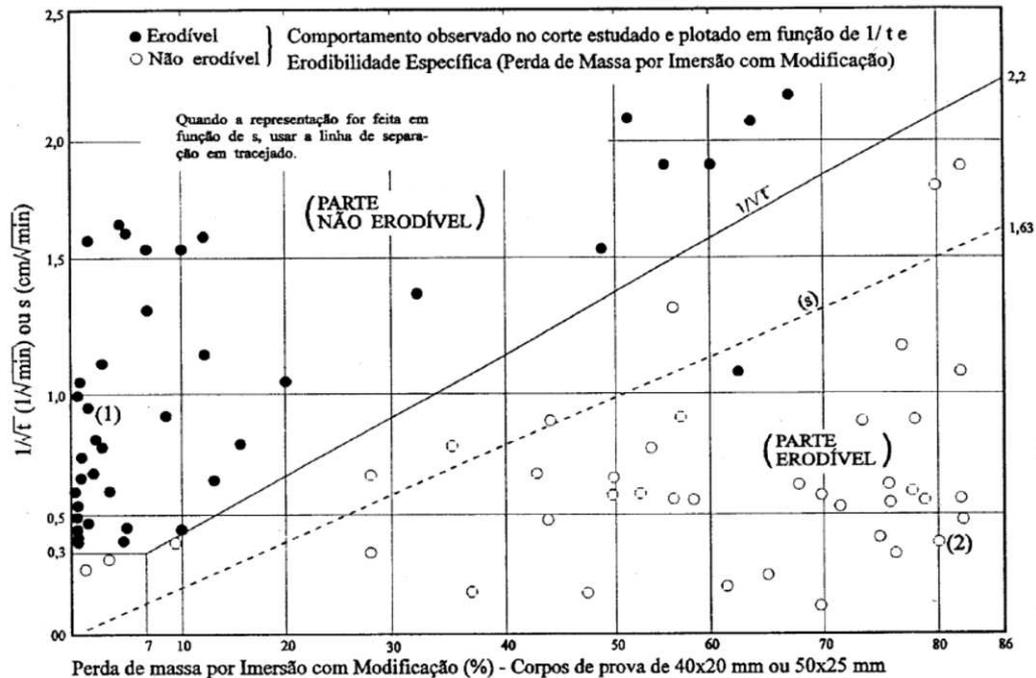
Fonte: Chuqipiondo (2007)

c) Classificação MCT e MCT-M

A classificação MCT (NOGAMI; VILLIBOR, 1981) é utilizada para avaliar a erodibilidade em solos sob condições de clima tropical, a partir dos ensaios de infiltrabilidade e perda de massa por imersão.

O ensaio de infiltrabilidade, feito em solos não saturados, identifica a facilidade com que a água infiltra no solo através de sua superfície. Para climas tropicais e subtropicais, a infiltrabilidade é mais representativa que a permeabilidade saturada como propriedade que regula a quantidade de escoamento superficial (BASTOS, 1999). O ensaio consiste em submeter uma amostra cilíndrica confinada a um fluxo ascendente por ascensão capilar, a partir do qual gera-se uma curva e obtém-se o coeficiente de sorção (s). O coeficiente que representa a porcentagem de massa de solo seca perdida (Pi) é obtido no ensaio de perda de massa por imersão. A partir desses parâmetros, Nogami e Villibor (1979) propuseram que solos potencialmente erodíveis possuem $Pi/s > 52$, critério que pode ser observado graficamente na Figura 26. Posteriormente, Pejon (1992 *apud* BASTOS, 1999) realizou o experimento em um número maior de ensaios e sugeriu uma mudança deste critério para $Pi/s > 40$.

Figura 26 - Critério de erodibilidade pela classificação MCT



Fonte: Nogami e Villibor (1995)

As principais características de erodibilidade segundo os grupos da classificação MCT estão dispostas no Quadro 7, conforme Bastos (1999). No estudo em análise, considerou-se a erosão em taludes de corte em solos isotrópicos e homogêneos, inclinados de 45° a 60° em condições climáticas do estado de São Paulo.

Quadro 7 - Características dos grupos MCT quanto à erosão em cortes

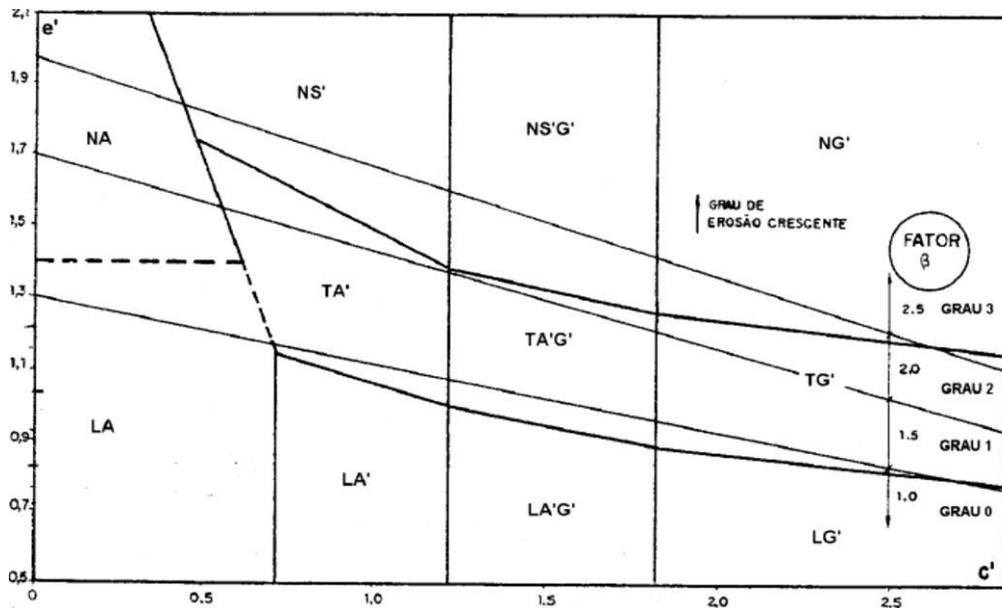
GRUPO MCT	NA	NA'	NS'	NG'	LA	LA'	LG'
Erodibilidade*	B,M,E	B,M,E	B,M,E	M,E	B	B	B
Formas de erosão*	desag. E	desag. M	sulcos E	Sulcos e desag. E	firme	desag. B	desag. B

* Abrev.: B = baixo; M = médio; E = elevado; desag. = desagregações

Fonte: Bastos (1999), modificado de Nogami e Villibor (1995)

Vertamatti e Araújo (1990 *apud* Bastos, 1999) utilizaram a classificação MCT-M, que é uma modificação da classificação MCT (Figura 1), para indicar a erodibilidade, subdividindo em quatro graus, conforme visualiza-se no ábaco da Figura 27. O grau de erodibilidade foi avaliado em taludes rodoviários e, em geral, pode ser associado ao tipo de solo conforme indicado no Quadro 8.

Figura 27 - Ábaco de classificação MCT-M e faixas de erodibilidade



Fonte: Vertamatti e Araújo (1990)

Quadro 8 - Critério de erodibilidade pela classificação MCT-M

Grau de erodibilidade	Característica do talude	Classificação MCT-M
Grau 0	Talude intacto	Solos lateríticos
Grau 1	Talude pouco erodido com sulcos esparsos	Solos transacionais
Grau 2	Talude medianamente erodido com sulcos frequentes	
Grau 3	Talude muito erodido, com desconfiguração total da face e presença de sulcos muito frequentes e interligados	Solos saprolíticos

Fonte: Vertamatti e Araújo (1990) (Adaptado pela autora)

O fator β , obtido a partir do ábaco da Figura 27 varia de 1 a 2,5 e é utilizado para o cálculo do fator de erodibilidade proposto pelos mesmos autores, conforme a Equação 15. A classificação quanto à erodibilidade segundo o fator E, válida para amostras compactadas ou indeformadas de solos não saturados, é dada no Quadro 9.

$$\text{fator } E = \alpha\beta \quad (15)$$

Onde:

fator E = índice de erodibilidade do solo, adimensional;

α = índice que expressa o desenvolvimento das curvas de sucção, adimensional;

β = índice obtido a partir da classificação MCT-M, adimensional.

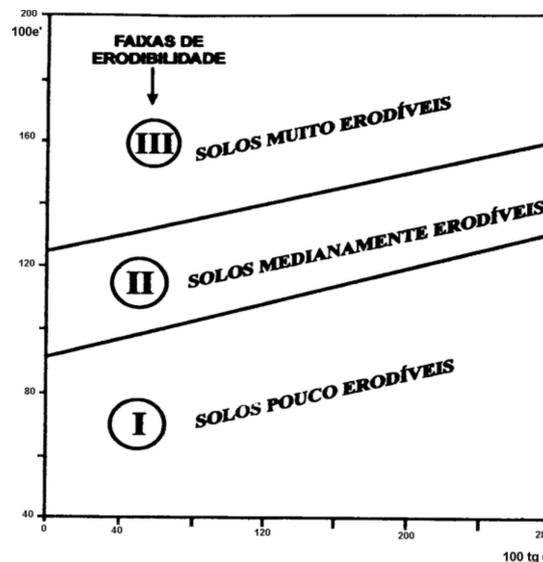
Quadro 9 - Critério de erodibilidade pelo fator E

fator E	Classificação
Inferior a 3	Solo muito pouco erodível
Entre 3 e 5	Solo pouco erodível
Entre 5 e 8	Solo medianamente erodível
Superior a 8	Solo muito erodível

Fonte: Vertamatti e Araújo (1990) (Adaptado pela autora)

Este critério permitiu a criação de um ábaco (Figura 28) de erodibilidade para solos tropicais, utilizando os parâmetros e' (já mencionado na Figura 1) e θ (inclinação da curva de sucção no trecho de 0 a 10 kPa), dividindo em três faixas de erodibilidade.

Figura 28 - Ábaco de erodibilidade para solos tropicais



Fonte: Vertamatti e Araújo (1998)

d) Ensaio de penetração de cone

O ensaio de penetração de cone em amostras de solos tropicais permite a determinação dos valores de penetração médio nas condições de umidade natural e saturada, que são usados para calcular os parâmetros DP e DPA, conforme as Equações 16 e 17. De acordo com Alcântara (1997), citado por Bastos (1999), esses parâmetros, juntamente com o coeficiente de sorção (s), comentado anteriormente, são utilizados para classificar a erodibilidade, como indicado no Quadro 10.

$$DP = \frac{Psat - Pnat}{Pnat} \quad (16)$$

$$DPA = \frac{Psat - Pnat}{Psat} \quad (17)$$

Onde:

DP = parâmetro de variação de penetração na condição natural, adimensional;

DPA = parâmetro de variação de penetração na condição saturada, adimensional;

Pnat = penetração do cone em condição de umidade natural, mm;

Psat = penetração do cone em condição de umidade saturada, mm.

Quadro 10 - Critérios de erodibilidade a partir do ensaio de penetração de cone

Critério	Classificação
DP > 4,5 Pnat	Solos com erodibilidade alta
DP > 46,4s +25 ou DPA > 21,4s +20	
DP < 4,5 Pnat	Solos com erodibilidade baixa a nenhuma
DP < 46,4s +25 ou DPA < 21,4s +20	

Fonte: Alcântara (1997)

e) Ensaio de estabilidade dos agregados

O ensaio de estabilidade dos agregados consiste em mensurar a quantidade e a distribuição do tamanho dos agregados estáveis em água, permitindo o cálculo do índice de estabilidade de agregados por meio da Equação 18, segundo Castro Filho *et al.* (1998).

$$IEA = \frac{MS - w_{p0,25}}{MS} \times 100 \quad (18)$$

Onde:

IEA = índice de estabilidade dos agregados, %;

MS = massa seca da amostra, g;

w_{p0,25} = massa dos agregados da classe inferior a 0,25 mm, g.

A partir deste ensaio também é possível calcular o diâmetro médio ponderado, calculado pela Equação 19, que quando assume valores superiores a 1,5 mm indicam erodibilidade alta, segundo Alcântara (1997 *apud* BASTOS, 1999).

$$DMP = \sum x_i \times w_i \quad (19)$$

Onde:

DMP = diâmetro médio ponderado, mm;

x_i = diâmetro médio de cada fração, mm;

w_i = razão da massa da fração em relação à massa total da amostra, adimensional.

f) Parcela hidroerosiva

A parcela hidroerosiva ou parcela de erosão é utilizada para medir o escoamento superficial e a produção de sedimentos segundo APHA (2005 *apud* MASCARENHA *et al.*, 2015). Consiste em uma área experimental delimitada por folhas de flandres, onde a água da chuva é retida e conduzida por uma calha para um recipiente ou amostradores como roda Coshocton ou sistema divisor tipo Geib. Segundo Mendes (2006), a padronização dos métodos

de mensuração de erosão e escoamento superficial é importante para correlacionar os resultados com demais pesquisas. Desta forma, o experimento permite a realização de estudos comparativos com diferentes manejos de solo e coberturas vegetativas em relação ao processo erosivo, identificando qual a forma de produção mais sustentável em cada caso.

g) Ensaio de permeabilidade

O ensaio de permeabilidade permite o cálculo do coeficiente de permeabilidade (k), em cm/s, a partir da aplicação de carga hidráulica por meio de um permeâmetro. Esta propriedade influencia no comportamento do solo quanto à erodibilidade, conforme Nacinovic (2009), sendo um ensaio fundamental para avaliar a capacidade de infiltração do solo durante precipitações. A carga hidráulica pode ser constante ou variável. A primeira é direcionada para solos granulares contendo, no máximo, 10% em massa de material passante na peneira de 0,075 mm, conforme a NBR 13292 (ABNT, 1995). Já a segunda é aplicável para os solos que não se enquadram na restrição anterior, seguindo a NBR 14545 (ABNT, 2000).

h) Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto, conforme descrito no tópico 2.3, é importante para determinação dos parâmetros de resistência necessários na análise da erodibilidade do solo e também na análise de estabilidade dos taludes: o ângulo de atrito (φ) e o intercepto coesivo (c). A partir da variação do intercepto coesivo (Δc), calculada pela Equação 20, Bastos (1999) propôs que solos potencialmente erodíveis possuem $\Delta c \geq 85\%$.

$$\Delta c = \frac{c_{nat} - c_s}{c_{nat}} \times 100 \quad (20)$$

Onde:

Δc = variação do intercepto de coesão, %;

c_{nat} = intercepto de coesão na condição natural, kPa;

c_s = intercepto de coesão na condição saturada, kPa.

Este critério não se aplicou ao estudo de Oliveira (2018), quando utilizados os valores de intercepto de coesão obtidos por meio das envoltórias linear e curva de resistência do solo. A coesão obtida por meio de ensaios com o solo na condição natural consiste na soma da coesão aparente e coesão verdadeira, sendo que a primeira está diretamente ligada ao fenômeno de sucção e a segunda é obtida por meio de ensaios realizados sob a condição saturada. Relacionando a coesão verdadeira com a erodibilidade do solo encontrada pelos ensaios diretos, Oliveira (2018) obteve resultado satisfatório, considerando-a como o melhor parâmetro para o

estudo. Constatou-se, então, que a resistência à tração influencia na erodibilidade do solo por estar diretamente relacionada à determinação da coesão verdadeira.

A resistência ao cisalhamento também pode ser encontrada por meio do ensaio de compressão simples e do ensaio triaxial.

i) Ensaio de compressão simples

O ensaio de compressão simples também possibilita identificar a variação de resistência à compressão simples com a saturação, calculada pela Equação 21. Conforme Alcântara (1997), citado por Bastos (1999), solos de alta erodibilidade apresentam $DR > 70\%$.

$$DR = \frac{R_{cnat} - R_{csat}}{R_{cnat}} \times 100 \quad (21)$$

Onde:

DR = variação de resistência à compressão simples, %;

R_{cnat} = resistência à compressão em condição natural, kPa;

R_{csat} = resistência à compressão em condição saturada, kPa.

j) Ensaio de compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral ou ensaio brasileiro foi idealizado por Lobo Carneiro em 1953, inicialmente para corpos de prova de concreto e, posteriormente, aplicado para rochas, solos e pavimentos. Consiste na aplicação de carga vertical uniformemente distribuída na direção axial de um corpo de prova cilíndrico ou em disco, gerando uma tensão de tração na direção horizontal da seção transversal do mesmo. Determina-se a carga P em que ocorre abertura de fissura primária na amostra, para então calcular a respectiva resistência à tração, de acordo com a Equação 22. Apresenta como vantagens a facilidade na preparação das amostras, equipamento similar ao de compressão simples e ruptura relativamente insensível às condições da superfície de contato da amostra (KRISHHAYYA; EISENSTEIN, 1974).

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (22)$$

Onde:

σ_t = tensão de resistência à tração, kPa;

P = carga máxima do ensaio, kN;

D = diâmetro da amostra, m;

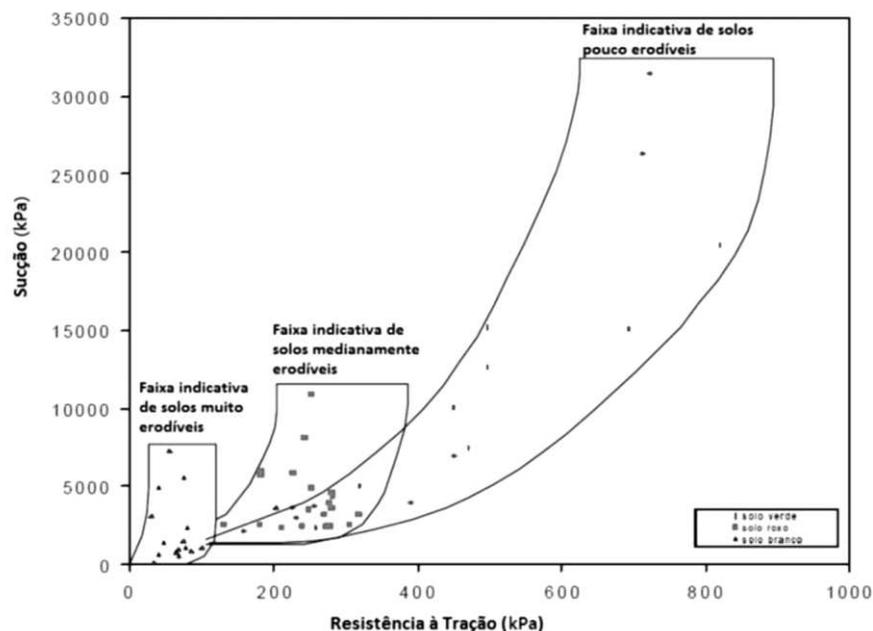
L = comprimento axial da amostra, m.

De acordo com Araújo e Campos (2013), a resistência à tração e a sucção possuem relação direta com o processo erosivo, de modo que quanto maior a sucção e a resistência à

tração, menor a suscetibilidade do solo à erosão. Em solos não saturados, é importante verificar como a sucção influencia na perda de massa e estabilidade estrutural dos solos.

Os autores realizaram uma das primeiras pesquisas que procuraram relacionar a resistência à tração com a erodibilidade. Por meio do ensaio de compressão diametral, três tipos de solo foram ensaiados a diferentes graus de saturação, gerando gráficos que relacionaram a resistência à tração e umidade. A partir do ensaio de sucção pelo método do papel filtro, também foram geradas curvas características relacionando sucção e umidade, que indicaram uma tendência de comportamento à erosão dos solos. Com isso, foi possível correlacionar a sucção com a resistência à tração, gerando um gráfico com faixas indicativas da erodibilidade dos solos, conforme a Figura 29, que pode ser adotado como um outro indicativo de suscetibilidade à erosão para pesquisas seguintes.

Figura 29 - Faixas de erodibilidade a partir da resistência à tração e sucção



Fonte: Araújo e Campos (2013)

No intuito de verificar a confiabilidade de alguns métodos simples propostos para avaliação de erodibilidade, Araújo e Campos (2013) realizaram o estudo em três tipos de solo de Itambi – RJ, a partir da comparação de observações feitas em campo com ensaios feitos em laboratório, a saber: ensaio de desagregação, penetração de cone, sucção e resistência à tração. Foi notado que a avaliação isolada de alguns parâmetros físicos, como proposto por vários autores na literatura, se mostrou inadequada e insuficiente para determinar alguma tendência relacionada ao potencial erodível dos solos. Somente a hierarquia de erodibilidade com base no Sistema Unificado de Classificação dos Solos mostrou-se aplicável ao caso. Já os ensaios

realizados, apresentaram resultados satisfatórios e representativos do comportamento esperado, exceto para o solo dispersivo, devido à sua composição mineralógica.

Leite *et al.* (2016) estudaram o potencial erodível de solos siltosos (amarelo e rosa) do Cultural, no bairro Salvaterra em Juiz de Fora, por meio de ensaios diretos e indiretos: *Pinhole Test*, classificação MCT e ensaios de caracterização física, como teor de umidade, massa específica dos sólidos, limite de liquidez e de plasticidade, análise granulométrica com e sem defloculante. O *Pinhole Test* e a classificação MCT resultaram no alto potencial erodível do solo rosa, como esperado. Porém os resultados pelos limites de consistência não corresponderam à realidade e a correlação pela curva granulométrica não foi capaz de diferenciar os dois solos quanto à erodibilidade.

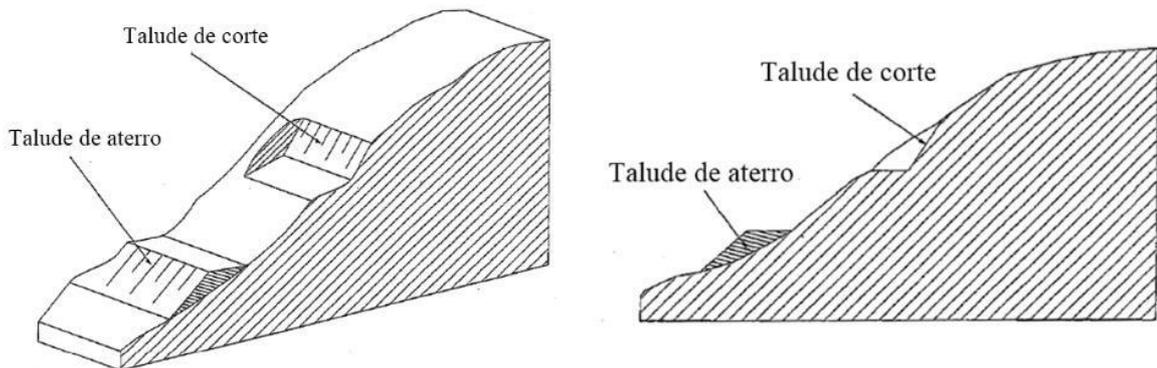
Ainda na mesma região, Vieira *et al.* (2017) estudaram a relação entre a erodibilidade do solo e a estabilidade do talude. Para avaliar a erodibilidade, foram realizados os ensaios de Dispersão, *Pinhole Test* e Cisalhamento Direto. Para determinação da estabilidade do talude, foi utilizado o software Slide, que calcula o fator de segurança na situação atual e futura do talude, com possível avanço dos processos erosivos. De acordo com os ensaios, o solo rosa e o solo amarelo foram considerados dispersíveis, principalmente o primeiro, apesar deste possuir maior quantidade de argila. O solo amarelo, por sua vez, apresentou comportamento anisotrópico, provavelmente devido à presença de estruturas reliquias. As características dispersíveis e erodíveis controlam o comportamento do respectivo talude, onde a estabilidade pode ficar comprometida com o avanço da erosão.

Em estudo de Vieira *et al.* (2018) utilizando amostras indeformadas de solo do mesmo bairro de Juiz de Fora, foi verificada a influência das estruturas reliquias em ensaios de erodibilidade. As estruturas reliquias podem ser definidas como feições geológicas presentes na rocha matriz (como fraturas, falhas, juntas, clivagens, foliações, etc.) que persistem nas camadas de solos residuais jovens (MACHADO, 2012). Tais estruturas não influenciaram os resultados do ensaio de dispersão. Em contrapartida, no ensaio de desagregação, os resultados dependeram da direção das amostras (perpendicular ou paralela às estruturas). Em direção paralela (favorável à foliação do solo), o fraturamento somente ocorreu quando havia estrutura reliquiar (fissuras) no corpo de prova. Já na direção perpendicular (desfavorável à foliação do solo), além do fraturamento nas estruturas reliquias (xistosidades), também ocorreu devido à pressão exercida pela água (poropressão) no processo de saturação da amostra. Para os ensaios com amostras indeformadas que tenham algum tipo de estrutura destaca-se, portanto, a importância de posicioná-las de acordo com a posição real de campo.

2.5 ESTABILIDADE DE TALUDES

Os taludes são terrenos inclinados, conforme a NBR 11682 (ABNT, 2009). Podem ser de origem natural, nesse caso chamados de encostas e constituídos de rocha e/ou solo. Também podem ter origem artificial (antrópica), resultante de processos de escavação ou deposição de material, distinguindo-se em taludes de corte ou taludes de aterro, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 30 (IPT, 2007; GERCSOVICH, 2012).

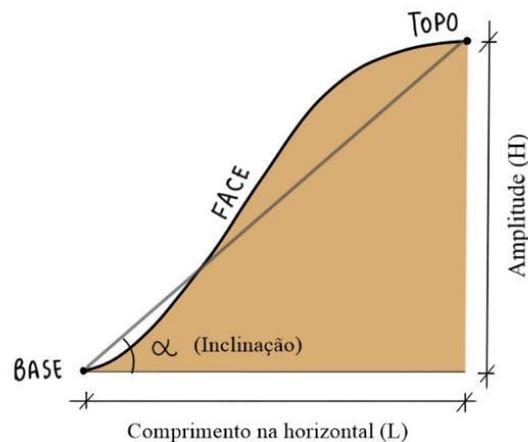
Figura 30 - Esquema de talude de corte e aterro



Fonte: ABNT (2009)

Os principais elementos geométricos de um talude são a base (também chamada de pé), a face e o topo (também chamado de crista), indicados na Figura 31. É importante conhecer as medidas de amplitude (ou altura), comprimento horizontal e inclinação do talude, indicados na mesma figura. A amplitude (H) é a diferença de nível entre a base e o topo do talude; o comprimento na horizontal (L) é a projeção horizontal entre a base e o topo do talude; e a inclinação (α) é o ângulo médio do talude com o eixo horizontal (IPT, 2007).

Figura 31 - Esquema representativo dos elementos importantes em um talude



Fonte: Souza *et al.* (2018) (Modificado pela autora)

A declividade representa a inclinação em uma relação percentual entre a amplitude e o comprimento na horizontal (IPT, 2007). O Quadro 11 indica a relação entre alguns valores declividade e inclinação. A classificação dos taludes quanto ao grau de inclinação pode ser feita conforme o Quadro 12.

Quadro 11 - Algumas relações entre declividade e inclinação

Declividade	Inclinação
$d(\%) = (H \times L) / 100$	$\alpha(^{\circ}) = \arctg (H/L)$
100%	45°
50%	~27°
30%	~17°
20%	~11°
12%	~7°
6%	~3°

Fonte: IPT (2007)

Quadro 12 - Classificação de taludes quanto ao ângulo de inclinação

Ângulo	Classe
0° a 2°	Plano
2° a 5°	Suavemente inclinado
5° a 15°	Fortemente inclinado
15° a 25°	Íngreme
25° a 35°	Muito íngreme
35° a 55°	Precipício
> 55°	Vertical

Fonte: Scholz (1972 *apud* NASCIMENTO, [201?])

Dentre os principais problemas relacionados ao talude, pode-se colocar a erosão e a instabilidade, que ocasiona os movimentos de massa.

A erosão pode ocorrer de forma longitudinal, ao longo de todo o talude; ou de forma localizada, geralmente associada a obras de drenagem. Em taludes de aterro ainda pode ocorrer erosão interna (*piping*). As principais causas são deficiências no sistema de drenagem, na proteção superficial e concentração da água superficial ou interceptação do lençol freático (MASSAD, 2010).

A estabilidade do talude pode ficar comprometida devido a duas razões, a saber: a diminuição da resistência ao cisalhamento de seu material constituinte (fator interno) ou o aumento das solicitações externas aplicadas ao maciço (fator externo) (GERCSOVICH, 2012). O deslocamento de solo ou rocha nos taludes é chamado de movimento de massa (ABNT, 2009), podendo ser natural (devido à fatores geológicos) ou induzido (devido à interferência

antrópica). Os agentes causadores são chamados de condicionantes dos movimentos de massa, dispostos no Quadro 13.

Quadro 13 - Condicionantes dos movimentos de massa

Aumento da solicitação externa	
Remoção da massa	Erosão, escorregamentos, cortes
Sobrecarga	Peso da água da chuva ou da vegetação, acúmulo de depósitos, aterros, construções, etc.
Pressões laterais	Água em trincas, congelamento, material expansivo
Diminuição da resistência ao cisalhamento	
Características inerentes ao material	Características da rocha/solo, espessura, geometria
Mudanças ou variações que influem nas condições do material	Intemperismo gerando novos minerais com menor resistência, variações cíclicas de umedecimento e secagem, elevação do lençol freático, infiltração da água, excesso de poropressão, implantação de obras, fluxo preferencial em trincas/juntas

Fonte: Varnes (1978 *apud* GERCSOVICH, 2012)

Dentre os condicionantes, destaca-se a influência da água intersticial, que pode desencadear diversos fatores causadores dos movimentos de massa, associados ao aumento da sobrecarga, poropressão e saturação do solo, além do excesso de infiltração e percolação preferencial (SOUZA *et al.*, 2018).

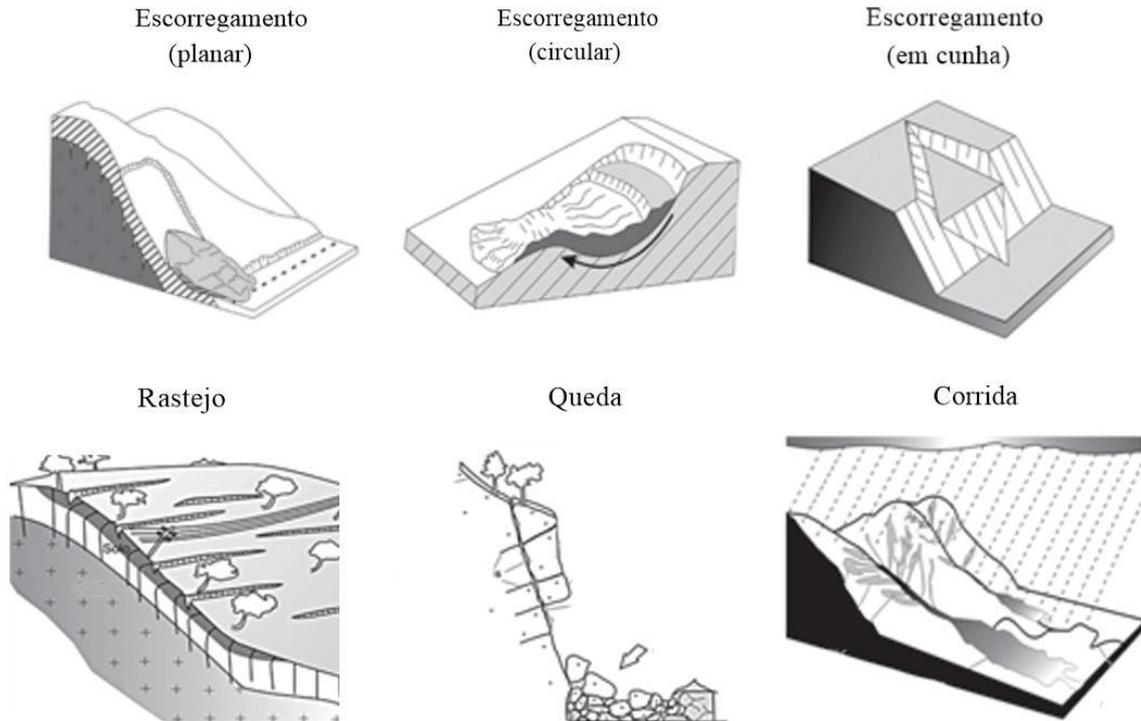
A vegetação, por sua vez, contribui para a instabilidade dos taludes por aumentar sua sobrecarga, sujeitar o maciço a forças dinâmicas dos ventos e favorecer a infiltração da água no solo devido à redução de umidade dos mesmos e aumento da rugosidade do terreno. Contudo, torna-se um fator contraditório, pois a remoção da vegetação natural dos taludes intensifica o processo erosivo e reduz sua proteção, aumentando o risco de deslizamentos de terra, conforme Martins (2013). Os fatores benéficos da vegetação incluem a interceptação da água das chuvas, a redução da poropressão, o aumento do suporte e da resistência ao cisalhamento devido às raízes (GREEWAY, 1987 *apud* MICHEL, 2013).

Cabe ressaltar a contribuição do ser humano nesses fenômenos, por meio do uso inadequado das encostas, com sobrecarga de edificações ou tráfegos, execução incorreta de cortes e aterros, remoção da cobertura vegetal, lançamento de lixos, concentração de águas pluviais e servidas, vazamentos nas redes de água ou esgoto, entre outros. É importante colocar que os movimentos de massa, geralmente, não são associados a um único e definitivo fator condicionante, mas a uma cadeia de fatores e efeitos que devem ser corretamente identificados para auxiliar na tomada de decisão das medidas corretivas ou preventivas (GERCSOVICH, 2012; IPT, 2007).

Existem diversas classificações quanto aos diferentes tipos de movimentos de massa, das quais duas serão citadas a seguir.

A classificação segundo Augusto Filho (1992) divide os movimentos em rastejo, escorregamento (podendo ser planar, circular ou em cunha), queda e corrida, ilustrados na Figura 32 e descritos no Quadro 14.

Figura 32 - Esquema representativo dos movimentos de massa segundo Augusto Filho (1992)



Fonte: IPT (2007)

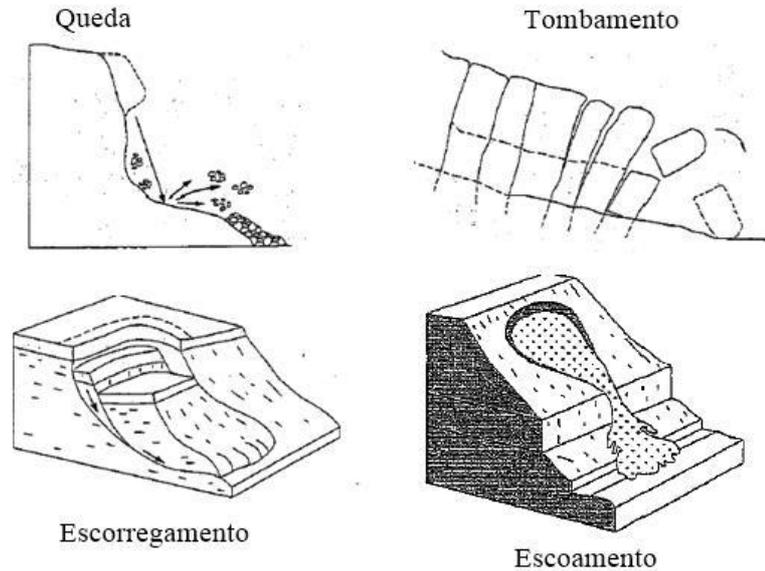
Quadro 14 - Tipos de movimentos de massa segundo Augusto Filho (1992)

Movimento de massa	Descrição
Rastejos (ou fluência)	Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes, em velocidade baixa ou muito baixa e decrescente com a profundidade. Não possui superfície de ruptura bem definida.
Escorregamentos	Movimentos rápidos, podendo deslocar pequenos ou grandes volumes de material. Possui superfície de ruptura bem definida, podendo ser subdividido do tipo planar, circular ou em cunha.
Quedas	Movimentos de queda livre ou a velocidades muito altas em plano inclinado. Geralmente ocorre em blocos de rocha. Pode ser subdividido em deslocamento, rolamento ou tombamento.
Corridas	Movimentos relacionados ao excesso de água, similar a um líquido viscoso a altas velocidades. Podem ser corridas de lama, de detritos ou de blocos.

Fonte: Augusto Filho (1992) (Adaptado pela autora)

Já a NBR 11682 (ABNT, 2009), considera os movimentos de massa subdivididos em: queda, tombamento, escorregamento e escoamento, ilustrados na Figura 33 e descritos no Quadro 15.

Figura 33 - Esquema representativo dos movimentos de massa segundo ABNT (2009)



Fonte: ABNT (2009)

Quadro 15 - Tipos de movimentos de massa segundo ABNT (2009)

Movimento de massa	Descrição
Queda (ou rolamento)	Desprendimento de fragmentos do terreno, que caem de certa altura em queda livre ou outra trajetória.
Tombamento	Em forma de báscula com eixo na base.
Escorregamento	Deslocamento sobre uma ou mais superfícies.
Escoamento	Movimento com propriedades de fluido, lento ou rápido.

Fonte: ABNT (2009) (Adaptado pela autora)

Comparando as duas classificaes, pode-se observar que a classe “queda” de Augusto Filho (1992), corresponde às classes de “queda” ou “tombamento” da ABNT (2009). O “escoamento” da ABNT (2009) corresponde à classificao de Augusto Filho (1992) “corridas”, quando o movimento  rápido, ou ainda, aos “rastejos”, quando lento. Já a classe de “escorregamento” é similar em ambas, que consiste no deslocamento sobre uma superfície bem definida, que pode ocorrer de forma planar, circular ou em cunha.

Segundo a NBR 11682 (ABNT, 2009), o fator de segurança (FS)  a razão entre a resistência (tensão cisalhante máxima disponível) e a resistência mobilizada (tensão cisalhante atuante ao longo da superfície de ruptura) (ABNT, 2009). Quando estas tensões se igualam, isto é, quando o FS atinge o valor unitário, o talude é considerado instável (GERSCOVICH, 2012).

Para determinação do FS mínimo a ser adotado, primeiramente é necessário avaliar o projeto de estabilidade do talude quanto ao nível de segurança desejado contra perda de vidas humanas (Quadro 16) e contra danos materiais e ambientais (Quadro 17), considerando as situações atuais e futuras, previstas ao longo da vida útil do talude (ABNT, 2009).

Quadro 16 - Nível de segurança desejado contra perda de vidas humanas

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

Fonte: ABNT (2009)

Quadro 17 - Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais

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

Fonte: ABNT (2009)

A partir disso, estipula-se o valor do FS mínimo para escorregamentos, de acordo com o Quadro 18.

Quadro 18 - Fatores de segurança mínimos para escorregamentos

Nível de segurança contra danos a vidas humanas		Alto	Médio	Baixo
Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Alto	1,5	1,5	1,4
	Médio	1,5	1,4	1,3
	Baixo	1,4	1,3	1,2
OBS.: Em caso de grande variabilidade dos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores de segurança do quadro acima deverão ser majorados em 10%.				

Fonte: ABNT (2009)

O estudo da estabilidade de taludes permite avaliar a possibilidade de ocorrência dos movimentos de massa, evitando, assim, que os mesmos aconteçam. Esta análise pode ser feita por meio de métodos determinísticos, utilizando o FS, ou métodos probabilísticos, avaliando o risco de ruptura. Neste caso, os principais métodos consideram a abordagem de equilíbrio limite, que avaliam as condições de equilíbrio da massa de solo num estado de ruptura iminente. Em geral, tais análises são desenvolvidas no plano (bidimensionais), considerando uma seção típica do maciço. (MASSAD, 2010). Tratam-se de métodos simples e precisos, desde que a adoção dos elementos geométricos, geológicos, geotécnicos e hidrológicos seja feita de forma cautelosa (SANTOS, 2014).

Nos métodos de equilíbrio limite admite-se, como hipóteses: a existência de uma linha de ruptura (ou linha crítica) de forma conhecida (plana, circular ou outras), associada a um FS mínimo constante, que delimita a porção de solo instável acima dela; o solo possui comportamento rígido-plástico, com ruptura brusca e sem deformação. A superfície potencial de ruptura é determinada por um processo iterativo (MASSAD, 2010).

Alguns métodos de análise de estabilidade são descritos no Quadro 19, para diferentes tipos de ruptura e aplicações, onde também são observadas suas principais vantagens e limitações.

Quadro 19 - Resumo dos principais métodos de análise de estabilidade de taludes

Método	Superfície	Considerações	Vantagens	Limitações	Aplicação
Taylor (1948)	Circular	Método do círculo de atrito. Análise de tensões totais. Taludes homogêneos.	Métodos simples, com cálculos manuais.	Aplicado somente para algumas condições geométricas indicadas nos ábacos	Estudos preliminares, pouco usado na prática.
Talude infinito	Plana	Estabilidade global representada pela estabilidade de uma fatia vertical.	Métodos simples, com cálculos manuais.	Aplicado somente para taludes com altura infinita em relação à profundidade da superfície de ruptura	Escorregamentos longos, com pequena espessura da massa instável, por exemplo uma camada fina de solo sobre o embasamento rochoso
Das cunhas	Poligonal	Equilíbrio isolado de cada cunha, compatibiliza as forças de contato entre as cunhas.	Resolução analítica ou gráfica, com cálculos manuais.	Considera cunhas rígidas. O resultado é sensível ao ângulo de inclinação das forças de contato entre as cunhas.	Materiais estratificados, com falhas ou juntas.

Bishop simplificado (1955)	Circular	Considera o equilíbrio de forças e os momentos entre fatias. Resultante das forças verticais entre fatias é nula.	Método simples com cálculos manuais ou em computador. Resultados conservativos.	Método iterativo, aplicação imprecisa para solos estratificados.	Muito usado na prática. Recomendado para projetos simples.
Bishop e Morgenst (1960)	Circular	Aplica o método simplificado de Bishop.	Facilidade de uso.	Limitado a solos homogêneos e taludes superiores a 27°.	Para estudos preliminares em projetos simples de taludes homogêneos.
Spencer (1967)	Não circular	Método rigoroso; satisfaz todas as condições de equilíbrio estático.	Valores de FS mais realísticos.	Complexidade dos cálculos.	Para análises mais sofisticadas, com restrições geométricas da superfície de ruptura.
Hoek e Bray (1981)	Circular	Mass instável considera um corpo rígido. Solução pelo limite inferior.	Uso simples. Taludes inclinados de 10° a 90°.	Para materiais homogêneos, com cinco condições específicas de nível freático do talude.	Para estudos preliminares, com riscos reduzidos de escorregamento.
Jambu (1981)	Não circular	Satisfaz o equilíbrio de forças e os momentos em cada fatia, porém despreza as forças verticais entre fatias.	Superfícies de ruptura realísticas. Adaptação simples em computador.	Aplicado para solos homogêneos, pode subestimar o FS. O método generalizado não tem essa limitação.	Grande utilização na prática, devem ser consideradas as limitações das rotinas de cálculo.
Morgenstern e Price (1965)	Não circular	Método rigoroso. Satisfaz todas as condições de equilíbrio estático. Resolve o equilíbrio geral do sistema.	Mais preciso que o método de Jambu.	Não é um método simples, exige cálculos de computador.	Para estudos ou análises detalhadas (retroanálise).
Sarma (1973, 1979)	Não circular	Método rigoroso. Atende às condições de equilíbrio. Considera forças sísmicas.	Redução no tempo de cálculo, sem perda de precisão.	Método exige cálculos em computador. Sarma (1973) pode ser resolvido manualmente.	Aplicado como uma alternativa ao método de Morgenstern e Price.

Fonte: GEORIO (1999 *apud* GERSCOVICH, 2012)

Para o auxílio dos cálculos matemáticos e representações geométricas, tem-se utilizado recursos computacionais que facilitam este processo. Existem diversos *softwares* desenvolvidos

para analisar os diferentes tipos de ruptura e movimentos de massa, como SLOPE/W, ROCKFALL, UDEC, SWEDGE, PLAXIS, SLIDE, FLAC, entre outros (FERREIRA, 2010).

2.6 ÁREAS DEGRADADAS

2.6.1 Definições e legislações importantes

Inicialmente, serão colocadas algumas definições de termos importantes dentro do assunto abordado, conforme Martins (2013).

Um *ecossistema estável* é aquele que, ao sofrer um impacto, reage sem sofrer mudanças e ajusta-se aos seus processos ecológicos. Já um *ecossistema perturbado*, é aquele que ao ser submetido a um distúrbio, sofre alterações, mas ainda consegue regenerar-se naturalmente, pois possui resiliência (capacidade de se recuperar de perturbações internas naturais ou provocadas pelo homem). A *área degradada*, por sua vez, após sofrer um forte impacto, não possui mais a capacidade de retornar naturalmente ao estado original ou a um equilíbrio dinâmico.

O Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, órgão ambiental do governo brasileiro criado em 2007 lançou a Instrução Normativa nº 11 (ICMBIO, 2014), que se assemelha à Instrução Normativa nº 4 (IBAMA, 2011), ao estabelecer procedimentos para elaboração, análise, aprovação e acompanhamento da execução de PRAD. Cabe destacar que, em suas definições, trouxe pela primeira vez o conceito de *resiliência*:

capacidade de um sistema suportar perturbações ambientais e retornar a sua tendência sucessional, mantendo sua estrutura e padrão geral de comportamento, enquanto sua condição de equilíbrio é modificada, sendo avaliada pelo tempo necessário para o sistema passar de uma fase para outra do processo sucessional, sendo quanto maior esse tempo, menor a resiliência (ICMBIO, 2014, inciso XI, art. 2º).

A área degradada, portanto, é aquela que perdeu a resiliência, podendo ser caracterizada como um ecossistema que não é capaz de repor as perdas de matéria orgânica do solo, nutrientes, biomassa e banco de sementes, além de possuir parte de sua vegetação e fauna destruída, removida ou expulsa, com perdas da camada fértil de solo e alterações do sistema hídrico. Sendo assim, a degradação ameaça a produtividade de alimentos e a qualidade das águas (IBAMA, 1990; TAVARES, 2008). Sua recuperação encontra respaldo na legislação brasileira, que será tratada adiante.

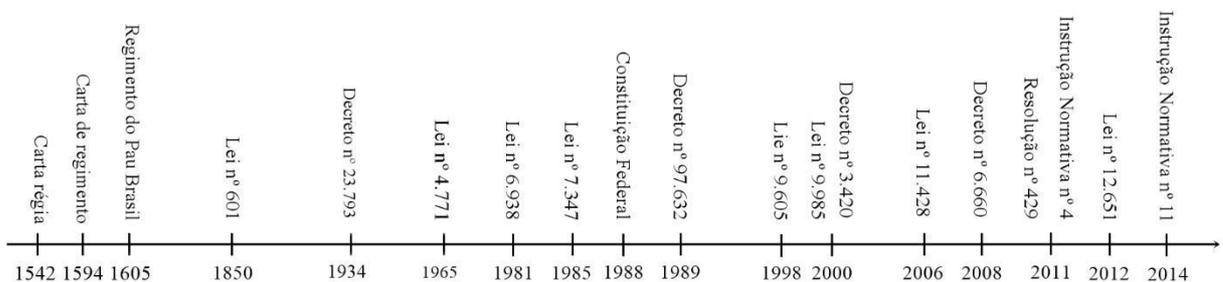
Cabe colocar o papel fundamental da educação ambiental para conscientizar diferentes segmentos da população sobre a preservação dos ecossistemas naturais e disseminar os conhecimentos por meio de treinamentos, cursos e palestras. Conforme sugerido por Martins (2013), deve-se investir em, pelo menos, duas frentes distintas: uma destinada ao grande

público, através de campanhas educativas em escolas e através da mídia; e outra à população diretamente ligada às áreas de conservação, tanto os produtores e demais profissionais, quanto os usuários. Nesse sentido, deve-se enfatizar a importância do uso e ocupação racional do solo, os benefícios socioambientais e econômicos da utilização de técnicas de proteção e conservação do solo e água.

Há a necessidade de adequação ambiental dos imóveis rurais, atividades mineradoras, obras de infraestrutura e outras práticas degradadoras, contando com a participação das empresas e dos cidadãos, além da fiscalização dos órgãos responsáveis para assegurar o cumprimento das legislações vigentes.

A leis ambientais do Brasil, ainda que relativamente recentes, estão entre as mais completas e bem elaboradas do mundo. Porém, ainda existem algumas lacunas e o que é proposto na teoria, nem sempre acontece na prática. Admitindo a importância do conhecimento dos dispositivos legais que normatizam as medidas de recuperação de áreas degradadas, neste tópico será feita uma sucinta abordagem sobre as principais legislações relacionadas ao tema, seguindo a sequência indicada na Figura 34, bem como a definição de conceitos importantes que foram surgindo no decorrer dos anos.

Figura 34 - Linha do tempo das legislações brasileiras pertinentes à proteção ambiental



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

As primeiras normas para disciplinar a exploração de recursos naturais no Brasil surgiram logo após o seu descobrimento, porém para fins econômicos. Na época, havia um crescimento progressivo do comércio de madeiras, bem como de seu valor, o que levou a coroa portuguesa a determinar punições ao desperdício do produto. Dentre elas, pode-se citar a Carta Régia, de 1542; a Carta de Regimento, de 1594; e o Regimento do Pau Brasil, de 1605, que pode ser considerado a primeira manifestação legal de proteção à cobertura florestal no país, conforme Séguin e Carrera (1999).

A Lei nº 601 (BRASIL, 1850), também conhecida como Lei de Terras, foi a primeira tentativa de organizar e regulamentar a posse de terras no país. Ainda incipiente e sem

preocupações ambientais, não tratava sobre áreas degradadas ou sua recuperação. Tais assuntos só começaram a ser discutidos no século seguinte.

O Decreto nº 23.793, em 1934, instituiu o Primeiro Código Florestal brasileiro, visando impedir os efeitos sociais e políticos negativos causados pelo aumento do preço (ou falta) da lenha, num contexto de expansão cafeeira. Uma das medidas dispostas era de que os donos de terras deveriam manter 25% (ou a “quarta parte”) da área de seus imóveis com a cobertura de mata original, porém sem dar indicações de qual parte deveria ser feita a preservação (SENADO FEDERAL, 2011a).

Em 1965, este foi substituído pelo Segundo Código Florestal, instituído pela Lei nº 4.771, em que novas fontes de energia e combustíveis tomavam importância no mercado, ao mesmo tempo em que se iniciava uma conscientização ambiental e preocupação em proteger as florestas. Uma das mudanças instituídas foi transformar a “quarta parte” em reserva legal, sendo que na Amazônia deveria ser 50% da área do imóvel, e nas demais localidades, 20% (SENADO FEDERAL, 2011b). Pode ser considerada uma das primeiras medidas que visava a preservação dos diferentes biomas, mantendo-se em voga até ser substituída em 2012, que será citada posteriormente.

A criação da Lei nº 6.938, em 1981, foi um marco importante para as questões ambientais no país. De acordo com esta lei, o Poder Executivo deve incentivar atividades voltadas ao meio ambiente, visando “ao desenvolvimento, no país, de pesquisas e processos tecnológicos destinados a reduzir a *degradação da qualidade ambiental*” (BRASIL, 1981, inciso I, art. 13), que foi definida como “a alteração adversa das características do meio ambiente”.

Através dela, instituiu-se a Política Nacional do Meio Ambiente, que tem por objetivo:

a preservação, melhoria e *recuperação* da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no País, condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana, atendidos os seguintes princípios: [...] VIII – *recuperação de áreas degradadas*; IX – proteção de áreas ameaçadas de degradação (grifo nosso) (BRASIL, 1981).

Além disso, um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente são as penalidades disciplinares ou compensatórias ao não cumprimento das medidas necessárias à preservação ou correção da degradação ambiental (BRASIL, 1981, inciso IX, art. 9º). O art. 14 apresenta as penalidades devido ao não cumprimento das medidas necessárias à preservação ou correção dos inconvenientes e danos causados pela degradação da qualidade ambiental a saber:

I - à multa simples ou diária, nos valores correspondentes, no mínimo, a 10 (dez) e, no máximo, a 1.000 (mil) Obrigações Reajustáveis do Tesouro Nacional - ORTNs, agravada em casos de reincidência específica, conforme dispuser o regulamento, vedada a sua cobrança pela União se já tiver sido aplicada pelo Estado, Distrito Federal, Territórios ou pelos Municípios.

II - à perda ou restrição de incentivos e benefícios fiscais concedidos pelo Poder Público;

III - à perda ou suspensão de participação em linhas de financiamento em estabelecimentos oficiais de crédito;

IV - à suspensão de sua atividade (BRASIL, 1981).

A Lei nº 7.347, de 1985, disciplina ações de responsabilidade por danos morais e patrimoniais causados, entre outros fatores, ao meio ambiente (BRASIL, 1985, inciso I, art. 1º), criando instrumentos que permitem a defesa do meio ambiente na esfera jurisdicional.

Pode-se dizer que o ambiente ecologicamente equilibrado é citado como um direito pela Constituição Federal de 1988. De acordo com o art. 225,

todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações (BRASIL, 1988, art. 225).

Conforme o inciso I do § 1º, para assegurar a efetividade desse direito, incumbe ao Poder Público “preservar e *restaurar* os processos ecológicos essenciais e prover o manejo ecológico das espécies e ecossistemas” (BRASIL, 1988, não paginado, grifo nosso). E pelo § 2º, aquele que explora recursos minerais tem a obrigatoriedade de recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente (BRASIL, 1988).

O Decreto nº 97.632 (1989) regulamenta a Lei nº 6.938/81, tornando obrigatória a apresentação de um PRAD juntamente com o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e do Relatório do Impacto Ambiental (RIMA) para empreendimentos que se destinam à exploração de recursos minerais. De acordo com o art. 2º (BRASIL, 1989, não paginado), são considerados como degradação “os processos resultantes dos danos ao meio ambiente, pelos quais se perdem ou se reduzem algumas de suas propriedades, tais como, a qualidade ou capacidade produtiva dos recursos ambientais”. De acordo com o art. 3º, a recuperação deve ter por objetivo “o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização, de acordo com um plano preestabelecido para o uso do solo, visando a obtenção de uma estabilidade do meio ambiente” (BRASIL, 1989, não paginado).

Almeida (2016b) destaca a necessidade de ampliar a obrigatoriedade do PRAD para outras atividades potencialmente degradadoras. Para isso, sugere que sejam feitas legislações estaduais específicas para recuperação de áreas degradadas, complementares à legislação federal existente.

A Lei Federal nº 9.605, de 1998, também conhecida por Lei dos Crimes Ambientais, dispõe sobre sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, dentre as quais pode-se citar, conforme o art. 50-A: desmatar, explorar economicamente ou degradar floresta, plantada ou nativa, em terras de domínio público ou devolutas, sem autorização do órgão competente. Dentre as penalidades, estão as multas; restritivas de direitos; prestação de serviços à comunidade, sendo que uma das atividades é a execução de obras de recuperação de áreas degradadas (inciso 2, art. 23); a suspensão parcial ou total de atividades; a interdição temporária de estabelecimento, obra ou atividade; proibição de contratar com o Poder Público, bem como dele obter subsídios, subvenções ou doações (BRASIL, 1998, art. 21 e 22).

A Lei nº 9.985, de 2000, instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), que possui, dentre outros objetivos, contribuir para a preservação e a restauração da diversidade de ecossistemas naturais; proteger e recuperar recursos hídricos e edáficos; recuperar ou restaurar ecossistemas degradados (BRASIL, 2000b, art. 4º). O SNUC será gerido pelos órgãos: Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente, Instituto Chico Mendes e o Ibama. Foram definidas as categorias de unidades de proteção, sendo elas: Unidades de Proteção Integral (onde é admitido apenas o uso indireto de seus recursos naturais) e Unidades de Uso Sustentável (onde procura-se compatibilizar o uso sustentável e a conservação da natureza) (BRASIL, 2000b, art. 7º).

É interessante destacar duas definições importantes presentes nesta lei: a *recuperação* de uma área degradada, como a restituição de um ecossistema degradado a uma condição não degradada, que pode ser diferente de sua condição original; e a *restauração*, quando a restituição do ecossistema é o mais próximo possível da sua condição original (BRASIL, 2000b).

O Decreto nº 3.420, de 2000, dispõe sobre o Programa Nacional de Florestas (PNF), que tem como um dos objetivos fomentar as atividades de reflorestamento em pequenas propriedades rurais e recuperar florestas de preservação permanente, reserva legal e áreas alteradas (BRASIL, 2000a, art. 2º). Também foi criada a Comissão Nacional de Florestas (CONAFLO), que atua como um colegiado de caráter consultivo, agregando a participação social ampla à formulação das políticas públicas de florestas, considerando os biomas: Amazônia, Cerrado e Pantanal, Caatinga, Mata Atlântica e Campos Sulinos (BRASIL, 2000a).

A Lei nº 11.428, de 2006, visa a conservação, proteção, regeneração e utilização do Bioma Mata Atlântica, patrimônio nacional com o objetivo geral o desenvolvimento sustentável e objetivos específicos a salvaguarda da biodiversidade, da saúde humana, dos valores

paisagísticos, estéticos e turísticos, do regime hídrico e da estabilidade social, que serão feitos dentro de condições que assegurem:

- I - a manutenção e a recuperação da biodiversidade, vegetação, fauna e regime hídrico do Bioma Mata Atlântica para as presentes e futuras gerações;
- II - o estímulo à pesquisa, à difusão de tecnologias de manejo sustentável da vegetação e à formação de uma consciência pública sobre a necessidade de recuperação e manutenção dos ecossistemas;
- III - o fomento de atividades públicas e privadas compatíveis com a manutenção do equilíbrio ecológico;
- IV - o disciplinamento da ocupação rural e urbana, de forma a harmonizar o crescimento econômico com a manutenção do equilíbrio ecológico (BRASIL, 2006, art. 7º).

De acordo com o art. 10 (BRASIL, 2006), o poder público fomentará o enriquecimento ecológico da vegetação do Bioma Mata Atlântica, bem como o plantio e o reflorestamento com espécies nativas, em especial as iniciativas voluntárias de proprietários rurais. O enriquecimento ecológico é definido como “atividade técnica e cientificamente fundamentada que vise à recuperação da diversidade biológica em áreas de vegetação nativa, por meio da reintrodução de espécies nativas” (BRASIL, 2006, não paginado). Dentre as atividades imprescindíveis à proteção da integridade da vegetação nativa, citam-se a prevenção, combate e controle do fogo, controle da erosão, erradicação de invasoras e proteção de plantios com espécies nativas. Além disso, também foi instituído o Fundo de Restauração do Bioma Mata Atlântica (BRASIL, 2006, art. 36), destinado ao financiamento de projetos de restauração ambiental e de pesquisa científica.

Ainda referente à Mata Atlântica, o Decreto nº 6.660, de 2008, regulamenta a Lei nº 11.428, citada anteriormente. Nele, estão mais detalhadas as concernentes à exploração, plantio, reflorestamento, pousio, supressão de vegetação, anuência dos órgãos ambientais e plano municipal de conservação e recuperação da mata atlântica. Com relação à recuperação ambiental, este decreto prevê a compensação ambiental através da destinação de área equivalente à desmatada, de forma que o órgão competente é responsável pela vistoria prévia da área destinada à compensação para avaliar e atestar que as características ecológicas e a extensão da área são equivalentes à desmatada (BRASIL, 2008, art. 26).

A Resolução nº 429 (CONAMA, 2011) dispõe especificamente sobre a recuperação de Áreas de Preservação Permanente (APP) que, de acordo com o art. 3º, pode ser feita pelos seguintes métodos: condução da regeneração natural de espécies nativas; plantio de espécies nativas; e plantio de espécies nativas conjugado com a condução da regeneração natural de espécies nativas. Um dos requisitos e procedimentos citados que devem ser observados

mediante os métodos colocados, é “a adoção de medidas de controle da erosão, quando necessário” (CONAMA, 2011, p. 2).

A Instrução Normativa nº 4 (IBAMA, 2011) estabelece as exigências mínimas, as principais diretrizes e orientações técnicas para nortear a elaboração do PRAD e PRAD Simplificado. Todas as informações necessárias devem ser observadas e atendidas pelo responsável técnico na elaboração e execução do PRAD, seguindo o modelo do Termo de Referência, presente em anexo na Instrução Normativa. Através do PRAD, propõe-se medidas que assegurem a proteção das áreas degradadas, a implantação e a manutenção das ações de recuperação, além de apresentar planilhas com o detalhamento dos custos e cronogramas de todas as atividades previstas. Também é exigida a entrega de relatórios semestrais de monitoramento e, por fim, o relatório de avaliação. São feitos monitoramentos, vistorias e avaliações para verificar a efetividade da recuperação e se os objetivos foram ou não alcançados.

O PRAD deve conter informações, diagnósticos, levantamentos e estudos que permitam a avaliação da degradação e a consequente definição de medidas adequadas à recuperação da área. Os métodos e técnicas a serem empregados variam de acordo com as peculiaridades de cada local, podendo atuar de forma isolada ou conjunta, de preferência os que possuem eficácia já comprovada (IBAMA, 2011) O método a ser utilizado deve ser fundamentado na literatura vigente e justificado tecnicamente no PRAD (ICMBIO, 2014).

A Lei nº 12.651 (BRASIL, 2012) institui o Novo Código Florestal do país e dispõe sobre a proteção de vegetação nativa, propondo ações entre o setor público e a sociedade civil na criação de políticas para a preservação e restauração da vegetação nativa e de suas funções ecológicas e sociais nas áreas urbanas e rurais. Dentre outros assuntos tratados, pode-se citar: a delimitação das Áreas de Preservação Permanente, Áreas de Uso Restrito, Área de Reserva Legal, Cadastro Ambiental Rural, exploração florestal, controle do desmatamento e destaque para o programa de apoio e incentivo à preservação e recuperação do meio ambiente, no capítulo X. É proposta a adoção de tecnologias e boas práticas que conciliem a produtividade agropecuária e florestal, com redução dos impactos ambientais, como forma de promoção do desenvolvimento ecologicamente sustentável. Foi instituída a Cota de Reserva Ambiental (CRA) e o Programa de Regularização Ambiental (PRA), além da criação e mobilização de incentivos jurídicos e econômicos para fomentar a preservação e a recuperação, dentre eles: pagamento ou incentivo a serviços ambientais como retribuição; compensação pelas medidas de conservação ambiental; incentivos para comercialização, inovação e aceleração das ações de

recuperação, conservação e uso sustentável das florestas e demais formas de vegetação nativa (BRASIL, 2012, art. 41).

2.6.2 Áreas degradadas e o sistema de drenagem

O território brasileiro possui, em média, 1,5 milhão de quilômetros de estradas, das quais apenas 211 mil quilômetros correspondem a vias pavimentadas (ÁLVARES, 2018), isto é, aproximadamente 86% das estradas brasileiras não são pavimentadas.

As estradas não pavimentadas também são conhecidas como estradas rurais, vicinais ou de terra, caracterizadas pela ausência de revestimento em asfalto. O pavimento é constituído por materiais locais ou, ainda, com algum tipo de revestimento primário. Além disso, possuem baixo volume de tráfego e são comumente utilizadas para permitir acesso a atividades agropecuárias ou a áreas florestais (OLIVEIRA, 2005; GALLEGO *et al.*, 2008). Sua importância está diretamente relacionada à possibilidade de interligar o meio rural a outras comunidades e serviços, sendo, portanto, uma ferramenta de integração econômica e social, conforme Carvalho *et al.* (2010). Dentre os principais problemas relacionados a este tipo de via, pode-se citar a erosão causada pela água das chuvas.

A erosão hídrica é desencadeada devido a diversos fatores, como intensidade e duração das chuvas, características do material da estrada, declividade, volume de tráfego, sistema de drenagem, construção e manutenção de estradas e áreas externas para drenagem. Segundo MDEP (2001), 80% dos problemas estão associados a questões de má drenagem da estrada.

Para controlar os processos erosivos, deve-se adotar práticas de prevenção e manutenção das estradas não pavimentadas, como planejamento, monitoramento, drenagem frequente e rápida, evitar concentração do escoamento e mantê-lo a uma velocidade baixa, controlar o peso das cargas e o fluxo de veículos em épocas chuvosas, minimizar áreas de solo exposto e utilizar práticas de estabilização quando necessário (SILVA, 2011).

O escoamento superficial que se concentra ao longo do canal de drenagem, ao provocar tensão cisalhante superior à de resistência do solo, pode causar o desprendimento das partículas do solo, desencadeando processos erosivos nos canais e causando danos à via. Nestes casos, os problemas erosivos devem ser analisados de forma ainda mais cuidadosa do que em estradas pavimentadas, devido à fragilidade de seu material, segundo Silva (2011). Ainda segundo o autor, as estradas mais recentes geralmente possuem maior taxa de erosão, pois a cobertura vegetal proporciona maior proteção às estradas mais antigas. Croke *et al.* (2006) chamam a atenção para os taludes das estradas, em que pela interceptação do escoamento subsuperficial, há aumento do volume escoado no canal de drenagem.

Para melhor conservação das estradas, o sistema de drenagem deve considerar alguns componentes fundamentais, conforme Silva (2011), a saber: a declividade transversal do leito; a construção de canais de escoamento (sarjetas) ao longo das margens para coletar e conduzir a água; a instalação de canais desaguadouros para drenar a água; e a construção de dutos para remoção do escoamento para fora da estrada, sendo que em algumas vezes é necessária a utilização de estruturas hidráulicas para realizar a retenção e infiltração da água drenada. A água pode ser transferida para áreas de cultivo e terraços, se houver, ou bacias de infiltração, que são construídas com essa finalidade.

Uma das formas de controlar e amenizar os processos erosivos é através da utilização de modelos matemáticos que simulam as condições existentes, a fim de auxiliar a escolha e o dimensionamento de estruturas hidráulicas. Há vários tipos de modelagem para representar, de forma simplificada, os processos erosivos, por meio da estimativa da perda de solo, da produção e transporte de sedimentos e taxas de erosão, além de simular as condições das estradas, as precipitações, o volume do escoamento.

Silva (2011) cita alguns modelos empíricos e modelos baseados em processos físicos que têm sido utilizados nos últimos anos. O autor elaborou um modelo próprio para dimensionamento de sistemas de drenagem em estradas não pavimentadas, a partir da análise diária do escoamento no canal da estrada e o desprendimento das partículas que é provocado pelo mesmo. Tal modelo apresentou boa estimativa do aprofundamento do canal, tanto em escala temporal quanto espacial, apresentando maior sensibilidade à variação da tensão crítica de cisalhamento do solo e declividade do canal, e menor sensibilidade à variação da erodibilidade do solo. Por meio do *software* desenvolvido para aplicação do modelo, foi possível determinar o espaçamento máximo entre desaguadouros, de modo que a soma das perdas de solo ocorrentes no canal não ultrapassasse o valor de perda de solo tolerável, além de permitir o dimensionamento das bacias de infiltração.

2.6.3 Recuperação de áreas degradadas

Existem diferentes possibilidades para tratar uma área degradada. Para melhor compreensão, serão definidos alguns conceitos conforme Martins (2013).

A *restauração* de áreas degradadas era considerada, inicialmente, uma forma de retornar às condições originais do ambiente antes da degradação. De acordo com ICMBio (2014), área degradada dificilmente é restaurada, sendo apenas recuperada. Deste modo, visto que o objetivo da restauração é praticamente inviável, este termo tem sido utilizado hoje em dia no sentido de

restaurar a integridade ecológica do ecossistema, sua biodiversidade e estabilidade no longo prazo.

A *recuperação* de áreas degradadas está relacionada à aplicação de técnicas silviculturais, agronômicas e de engenharia visando a recomposição topográfica e a revegetação. Em um sentido mais amplo, a recuperação ambiental analisa as áreas como um todo, preocupando-se com diversos fatores além da recomposição vegetal.

Segundo o MMA (2012, não paginado), a recuperação de áreas degradadas está intimamente ligada à ciência da *restauração ecológica*, que é “o processo de auxílio ao restabelecimento de um ecossistema que foi degradado, danificado ou destruído”. Trata-se de uma nova abordagem que busca restaurar os processos ecológicos que garantem a sustentabilidade dos ecossistemas, por meio da regeneração natural e autorrecuperação. Sendo assim, um ecossistema recuperado é aquele que possui recursos bióticos e abióticos suficientes para continuar seu desenvolvimento sem auxílio ou subsídios adicionais.

A *redefinição* ou *redesignação* é quando um ecossistema degradado que foi recuperado passa a ter um uso distinto do original. Por fim, a *reabilitação* é quando há intervenção antrópica para atribuir à área degradada uma função adequada ao uso humano, restabelecendo suas principais características e uma situação alternativa e estável (MARTINS, 2013).

A *sucessão ecológica* é um processo natural de recuperação que ocorre em um ecossistema após sofrer perturbação. A sucessão primária é um processo lento, feito por organismos pioneiros em locais desabitados. A sucessão secundária, por sua vez, pode ser rápida ou lenta, ocorre em local já habitado, com solo formado e recebe influência da comunidade existente. Existem quatro grupos ecológicos principais em que as espécies podem ser classificadas, como: pioneiras, secundárias iniciais, secundárias tardias e clímax (MARTINS, 2013). É importante conhecer os aspectos relacionados à sucessão ecológica para elaborar projetos de recuperação de áreas degradadas mais apropriados e eficazes.

As pesquisas e propostas de recuperação de áreas degradadas brasileiras eram, inicialmente, quase empíricas. Os ecossistemas ainda eram vistos como sistemas fechados, sem levar em consideração a possibilidade de perturbações. Com isso, aplicavam-se apenas técnicas agronômicas e silviculturais aos projetos de recuperação, tomando como referência espécies de ecossistemas maduros e, por isso, não obtinham sucesso (MARTINS, 2013).

Ainda segundo o autor, com os avanços na teoria sucessional e ecologia florestal, foi possível ampliar o entendimento dos ecossistemas como sistemas abertos e suscetíveis a distúrbios, compreendendo a sucessão como algo pouco previsível e sujeito à diversos fatores ambientais e antrópicos. Desta forma, para maior eficiência nos projetos de recuperação, tem-

se considerado vários aspectos além dos tradicionais, que visam sustentar a integridade dos ecossistemas ao longo prazo.

Os modelos sucessionais mais aplicados na recuperação de áreas degradadas são os de facilitação e de inibição, propostos por Connell e Slatyer (1977 *apud* MARTINS, 2013). O modelo de facilitação consiste na introdução de espécies pioneiras que melhoram as condições ecológicas do local, preparando-o para receber espécies mais exigentes em seguida, como exemplo o plantio de leguminosas fixadoras de nitrogênio. Já o modelo de inibição consiste em impedir ou dificultar inicialmente a regeneração arbustivo-arbórea, introduzindo espécies pioneiras que monopolizam os recursos e substituindo-as por novas espécies quando as primeiras entram em declínio, como por exemplo gramíneas braquiária, capim-gordura e leucena.

A recuperação de áreas degradadas passa por práticas conservacionistas para o controle da erosão, que tem por objetivos reduzir a energia cinética da chuva, aumentar a capacidade de armazenamento de água, aumentar a infiltração ou, ainda, a resistência ao cisalhamento do solo. Para melhores resultados, deve-se utilizar técnicas que sejam adequadas às condições brasileiras, além da necessidade de maior integração entre o meio científico e técnico na busca e aplicação das possíveis soluções (PRUSKI, 2009).

Em geral, as práticas conservacionistas para controle de erosão dividem-se em técnicas de caráter edáfico, vegetativo e mecânico, que serão brevemente descritas a seguir.

As técnicas edáficas são as mais simples e econômicas, relacionadas à fertilidade do solo, buscando adequar o sistema de cultivo de forma que mantenha ou aumente a disponibilidade de nutrientes do solo, bem como a sua cobertura. Dentre elas, pode-se citar o controle das queimadas, a adubação (verde, química ou orgânica) e a calagem do solo (PRUSKI, 2009; LEPSCH, 2010)

As técnicas vegetativas tem por objetivo manter e ampliar a cobertura do solo, de forma que as plantas sejam responsáveis pela proteção contra a erosão. Como exemplo, tem-se o florestamento ou reflorestamento, o manejo adequado de pastagens, a utilização de plantas de cobertura, cultivo em contornos e faixas, cordões de vegetação ou barreiras vivas, ceifa de plantas daninhas, alternância de capinas, cobertura morta, rotação de culturas, entre outros (PRUSKI, 2009).

Ainda segundo o mesmo autor, as técnicas mecânicas são necessárias em alguns casos em estágios mais avançados da erosão, sendo também mais dispendiosas. Caracterizam-se pela utilização de máquinas e, usualmente, provocam modificação do relevo para atenuar declives muito acentuados. Por meio da construção de estruturas artificiais, promovem a interceptação

e condução do escoamento superficial, reduzindo sua velocidade, bem como a capacidade de desprender as partículas ou transportar aquelas já desprendidas. Dentre essas técnicas, as mais conhecidas são: diferentes tipos de terraceamento e barragens de contenção (barraginhas) para áreas agrícolas, canais desaguadouros e bacias de acumulação para estradas não-pavimentadas.

As técnicas de recuperação em voçorocas e talude serão descritas em maiores detalhes nos próximos itens, visto que se trata do caso estudado no trabalho, com destaque para as técnicas de engenharia natural.

2.6.3.1 Técnicas de recuperação em voçorocas

O planejamento de recuperação de áreas degradadas por voçorocas deve começar pela análise física, química e biológica do solo e levantamento dos aspectos topográficos da área. A partir disso, analisa-se quais as possibilidades e finalidades da recuperação da voçoroca (MACHADO *et al.*, 2006).

Como, em geral, as voçorocas são instáveis, isto é, possuem movimentação constante, deve-se priorizar, inicialmente, técnicas para controlar o processo erosivo que visem a estabilização e conservação do solo. Ao identificar os fatores de degradação, admite-se as técnicas mais adequadas para eliminá-los e, somente em seguida, são feitas intervenções diretas na voçoroca (MARTINS, 2013). Os procedimentos básicos serão descritos a seguir.

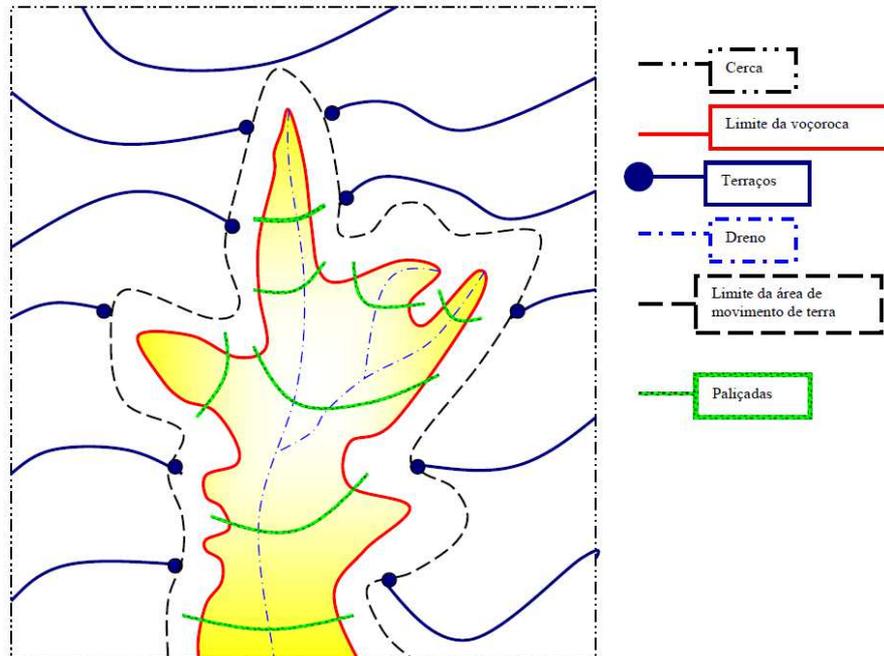
a) Isolamento da área

Primeiramente, deve ser feito o isolamento da área de contribuição para evitar tráfego de pessoas, maquinários ou animais e eliminar os fatores que influenciam na concentração de água, fazendo cercamento de arame e aceiros contra queimadas (MACHADO *et al.*, 2006). Se necessário, pode ser feito o plantio de espécies arbustivas e arbóreas agressivas para aumentar o controle de acesso ao local (TAVARES *et al.*, 2008).

b) Drenagem superficial e controle de erosão

Para controle da erosão, disciplinamento e desvio das águas superficiais, utiliza-se de práticas mecânicas e vegetativas à montante e nas laterais da voçoroca, como sistemas de terraceamento, bacias de captação, barraginhas, canais escoadouros, paliçadas, plantio em nível, cordões vegetados e cobertura vegetal (TAVARES *et al.*, 2008). Na Figura 35 pode ser observada a alocação de alguns desses elementos para recuperação de uma voçoroca.

Figura 35 - Esquema de controle de erosão em uma voçoroca

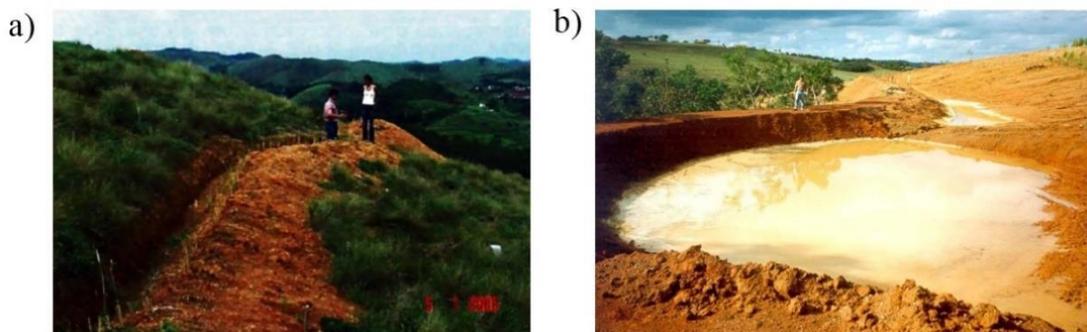


Fonte: Tavares *et al.* (2008)

A construção de terraços e bacias de retenção visa ordenar e armazenar a enxurrada na parte superior da voçoroca. Para reter os sedimentos em seu interior, utiliza-se as barreiras.

Os terraços (Figura 36-a) podem ser feitos de forma manual ou com tração animal, trator de pneu ou esteira, retroescavadeiras, entre outros. Os terraços em nível possuem extremidades bloqueadas, tem a função de acumular e infiltrar a água e são indicados para áreas com boa permeabilidade e declividade de até 12% (7°). Para taludes com inclinações superiores e/ou baixa permeabilidade, recomenda-se os terraços em desnível, que conduzem a água para as laterais. Neste caso, utiliza-se bacias de retenção nas extremidades (Figura 36-b) para realizar o armazenamento da água (MACHADO *et al.*, 2006). O dimensionamento dos terraços e bacias depende do tipo de solo, tamanho da área de contribuição, declividade do terreno, extensão do declive, intensidade da precipitação e tipo de cobertura vegetal (TAVARES *et al.*, 2008).

Figura 36 - Terraços (a) e bacia de retenção (b) para voçorocas



Fonte: Machado (2006) e Tavares *et al.* (2008)

As barreiras no interior da voçoroca podem ser naturais e/ou artificiais, funcionando como pequenas barragens. Os principais materiais utilizados são bambus, pedras, sacos de terra, madeira, galhos e troncos de árvores (TAVARES *et al.*, 2008).

c) Drenagem subsuperficial

Ainda segundo o mesmo autor, além do sistema de drenagem superficial, a drenagem das águas subterrâneas (Figura 37) pode ser necessária nos casos em que se atinge o lençol freático. Esta água deve ser captada e conduzida para fora da voçoroca até um leito de drenagem estável, com drenos de pedra, feixes de bambu ou outros materiais.

Figura 37 - Drenagem interna da voçoroca com sacos de solo cimento



Fonte: Ferreira (2015)

d) Estabilização e contenção do talude

Para estabilização dos taludes, pode ser necessária a etapa de retaludamento e obras de contenção, que serão descritas no tópico seguinte.

Para melhorar as condições de estabilidade e reforço em voçorocas, é comum a utilização de estruturas mais simples e econômicas para o interior das voçorocas, como a implantação de cortinas de estacas justapostas. São formadas por uma sucessão de estacas posicionadas próximas umas das outras, também conhecidas como paliçadas (Figura 38-a), associadas aos retentores de sedimentos (Figura 38-b) (FERREIRA, 2015), técnica que será abordada no tópico 2.6.4.3, sobre engenharia natural.

Figura 38 - Paliçadas (a) e retentores de sedimentos (b) em uma voçoroca



Fonte: Ferreira (2015)

e) Adubação e calagem do solo

Os solos de voçorocas, em geral, sofrem de baixa fertilidade devido à elevada declividade, riscos de deslizamentos, dificuldade de aderência dos propágulos, exposição de horizontes B, C e de rochas, além da baixa retenção de umidade e disponibilidade de nutrientes. Por isso, é importante realizar a etapa de preparo do solo com adubação e calagem, a fim de aumentar sua fertilidade, diminuir sua acidez e permitir o crescimento da vegetação. A revegetação busca formar uma camada orgânica (horizonte A), introduzindo plantas, nutrientes e biota (MACHADO *et al.*, 2006). A quantidade de nutrientes a ser utilizada em voçorocas com predominância de saprólito (rocha parcialmente alterada) é indicada no Quadro 20, conforme Ferreira (2015).

Quadro 20 - Recomendação de nutrientes para solo de voçorocas

Elemento	kg/ha	Elemento	kg/ha
Nitrogênio (N)	60	Boro (B)	1,2
Fósforo (P ₂ O ₅)	100	Cobre (Cu)	0,3
Potássio (K ₂ O)	100	Manganês (Mn)	0,8
Cálcio (Ca)	2,9	Molibdênio (Mo)	0,05
Enxofre (S)	2,3	Zinco (Zn)	3,6

Fonte: Ferreira (2015)

Outro tipo de estrutura para auxiliar na fertilidade do solo e permitir o crescimento rápido das espécies no interior das voçorocas é conhecida como travesseiro ou almofada, que consiste em sacos com solo adubado sobre o qual são plantadas ou semeadas as espécies vegetais (TAVARES *et al.*, 2008).

Algumas áreas permitem o fechamento de sulcos e voçorocas com movimentação de terra. Nesse caso, uma vez recuperada, a voçoroca pode se tornar uma área produtiva para pastagens ou com espécies arbóreas para produção de madeira ou fruticultura, ou ainda com vegetação nativa para funcionar como um ambiente natural para a fauna. Quando não é possível realizar esse fechamento da área, utiliza-se o recobrimento vegetal (TAVARES *et al.*, 2008), que será exposto a seguir.

f) Revegetação

Além da regulação do escoamento superficial, é importante aplicar medidas para combater o impacto das gotas de chuva no solo. Para isto, sugere-se a cobertura ao redor e dentro da voçoroca com gramíneas, leguminosas, herbáceas, arbustivas e arbóreas, principalmente espécies que se adaptam as condições edafoclimáticas do local (TAVARES *et*

al., 2008). Além disso, podem ser utilizadas técnicas de revegetação semelhante à de taludes, como o uso de mantas na parede ou lateral das voçorocas, por exemplo (MARTINS, 2013).

Como vegetação pioneira, recomenda-se a utilização de leguminosas, pois associadas a bactérias e fungos, estas permitem a melhoria na absorção dos nutrientes e da água (TAVARES *et al.*, 2008). As leguminosas, como ingás, aroeirinha, sangra-d'água, embaúba, e até mesmo espécies de bambus podem ser plantadas também no fundo das voçorocas, conforme Martins (2013). Machado *et al.* (2006) destacaram algumas leguminosas dos gêneros *Mimosa*, *Acacia*, *Albizia* e *Enterolobium* que obtiveram bons resultados na revegetação de áreas degradadas da região sudeste.

A escolha das espécies depende das dimensões da voçoroca (largura e profundidade), bem como da viabilidade econômica (TAVARES *et al.*, 2008). Após testar as espécies, deve-se optar, preferencialmente, por aquelas que ocorrem naturalmente no local, conforme Machado *et al.* (2006).

As gramíneas são versáteis e baratas, possuem estabelecimento rápido e elevada densidade de cobertura (FERNANDES; FREITAS, 2011). Algumas espécies recomendadas para recobrimento no interior e nas bordas das voçorocas, conforme Ferreira (2015) são: capim gordura (*Melinis minutiflora*), feijão de porco (*Canavalia ensiformis*), milho (*Pennisetum americanum*), feijão guandu (*Cajanus cajan*), aveia preta (*Avena strigosa*) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus*).

Para enriquecimento florístico e incentivo à regeneração natural, a etapa final consiste na introdução de espécies arbóreas, arbustivas e frutíferas, se possível de forma bem diversificada. Sugere-se a proporção 50% de espécies pioneiras, 45% de espécies secundárias e climáticas e 5% de árvores frutíferas. Os estágios precedentes ao plantio são a obtenção das mudas e devidos cuidados, combate às formigas cortadeiras, limpeza e preparo do terreno, definição do espaçamento, coveamento (Figura 39) e adubação (FERREIRA, 2015).

Figura 39 - Coveamento e plantio nos taludes internos da voçoroca



Fonte: Ferreira (2015)

Na Figura 40 pode-se observar o procedimento de recuperação de uma voçoroca. Cabe ressaltar a importância do monitoramento da voçoroca recuperada, verificando periodicamente o estado geral do talude, das paliçadas, da vegetação e dos sistemas de drenagem. Ao detectar qualquer irregularidade, devem ser feitas ações de manutenção e, se necessário, as técnicas devem ser aplicadas novamente (MARTINS, 2013; FERREIRA, 2015).

Figura 40 - Recuperação de uma voçoroca



Fonte: Ferreira (2015)

2.6.3.2 Técnicas de recuperação em taludes

Para utilização dos processos corretivos mais adequados, deve-se ter, inicialmente, um bom entendimento dos mecanismos de instabilidade dos taludes, observando os principais condicionantes por meio de estudos de investigação e análises de estabilidade, conforme visto no tópico 2.5. A princípio, deve ser feito o isolamento da área para evitar trânsito ou invasão de pessoas e animais durante o processo de recuperação, por meio de cercamento (MACHADO *et al.*, 2006).

a) Retaludamento

A primeira etapa da recuperação de um talude consiste em sua sistematização ou reconformação. Também chamada de retaludamento, pode ser definido como uma obra de mudança da inclinação e/ou altura de um talude, objetivando melhorar suas condições de

estabilidade (ABNT, 2009), para isso deve-se identificar qual a inclinação mais segura para o talude.

Consultando a literatura, é possível observar diferentes inclinações utilizadas para o retaludamento, por vezes adotando padrões estabelecidos empiricamente, como colocado por Oliveira (2015). O Quadro 21 apresenta um resumo de algumas inclinações admitidas em diferentes tipos de talude.

Quadro 21 - Algumas inclinações utilizadas em retaludamento

Referência	Inclinação utilizada		Justificativa	Situação
	V:H	Ângulo		
Silva <i>et al.</i> (2018)	1:2	~ 27°	Recomendado pela literatura	Mineração
CGM (2012)	1:2	~ 27°	Não informado	Mineração
Bitar (1997)	1:1,5	~ 34°	Não informado	Mineração
Machado <i>et al.</i> (2006)	1:1	45°	Não informado	Voçoroca em área rural
Ferreira (2015)	1:0,8	50°	Ângulo de talude natural	Voçoroca de grande porte
Oliveira (2015)	1:0,4	70°	Ângulo de talude natural. Recomendou fazer ensaio de cisalhamento.	Voçoroca com escorregamento
SEMA (2014)	1:2	~ 27°	Recomendado pela literatura para obras de terraplanagem	Talude de aterro
	1:1,5	~ 34°		Talude de corte
Almeida (2016a)	1:2,4 a 1:1,4	23° a 35°	Não informado	Rodovia
Vertical Green do Brasil (2018)	1:1	45°	Não informado	Área adjacente de ferrovia
Neves (2019)	1:1,7 a 1:1,4	30° a 35°	A partir dos resultados do ensaio de cisalhamento direto	Área adjacente de ferrovia

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Keller e Sherar (2013 *apud* MARQUES, 2015) indicaram os valores mais usuais de inclinação estável a partir das condições do material constituinte do talude (rocha ou solo), conforme apresentado no Quadro 22, mas sem trazer uma justificativa geotécnica.

Quadro 22 - Inclinações mais comuns de estabilidade de taludes para os diferentes tipos de solo e rocha

Condição de solo/rocha	Inclinação do corte	
	(H:V)	Ângulo correspondente
Maioria das rochas	½:1 a ¼:1	~ 63° a 76°
Solos muito bem cimentados	½:1 a ¼:1	~ 63° a 76°
Solos <i>in situ</i>	1:1 a ¾:1	~ 45° a 53°
Rocha muito fraturada	1½:1 a 1:1	~ 34° a 45°
Solos com granulação grosseira	1½:1	~ 34°
Solos argilosos pesados	3:1 a 2:1	~ 18° a 27°
Zonas ricas em argila mole ou áreas com percolação de água	3:1 a 2:1	~ 18° a 27°
Aterros para a maioria dos solos	2:1 a 1½:1	~ 27° a 34°

Aterros de blocos de rocha dura, angulosos	1 1/3:1	~ 37°
Cortes e aterros baixos (<2-3m de altura)	2:1 ou mais abatidos (para revegetação)	~ 27°

Fonte: Keller e Sherar (2013 *apud* MARQUES, 2015) (Adaptado pela autora)

A alteração geométrica do talude é realizada por obras de escavação (ou terraplanagem), como pode ser observado na Figura 41, por meio de cortes ou aterros. Constitui-se de uma intervenção simples, barata, de fácil execução e eficiente para os casos menos complexos, que não exigem obras de contenção (CARVALHO, 1991).

Figura 41 - Retaludamento mecânico com escavadeira hidráulica

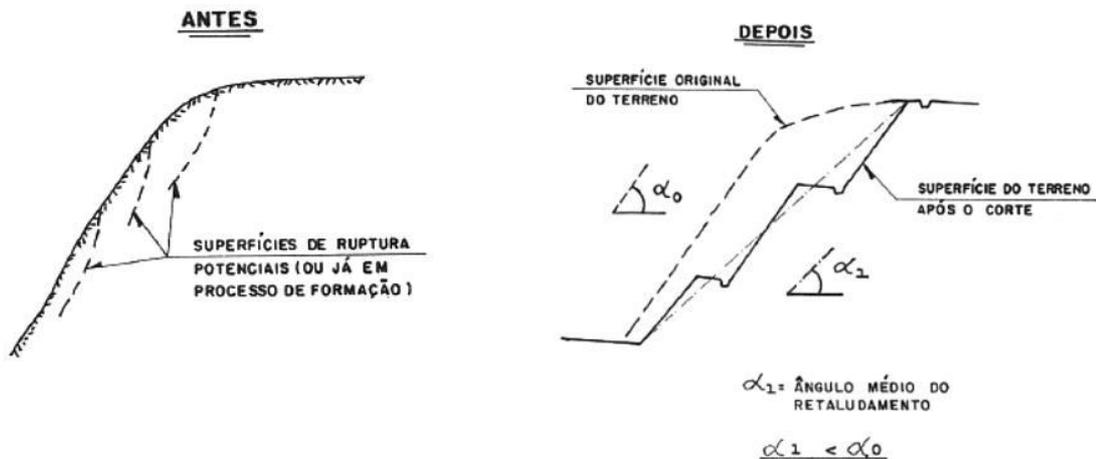


Fonte: Ferreira (2015)

Além da redução do ângulo de inclinação ou da altura do talude, também podem ser removidos os materiais potencialmente instáveis, ou ainda ser necessária a divisão do talude em patamares (banquetas ou bermas) (MARQUES, 2015). As bermas devem ser dimensionadas corretamente quanto a sua largura e inclinação. É recomendado que a inclinação longitudinal da berma não ultrapasse 2%, permitindo que funcione como terraço que redireciona a água pluvial para os canais de drenagem (IBAMA, 1990).

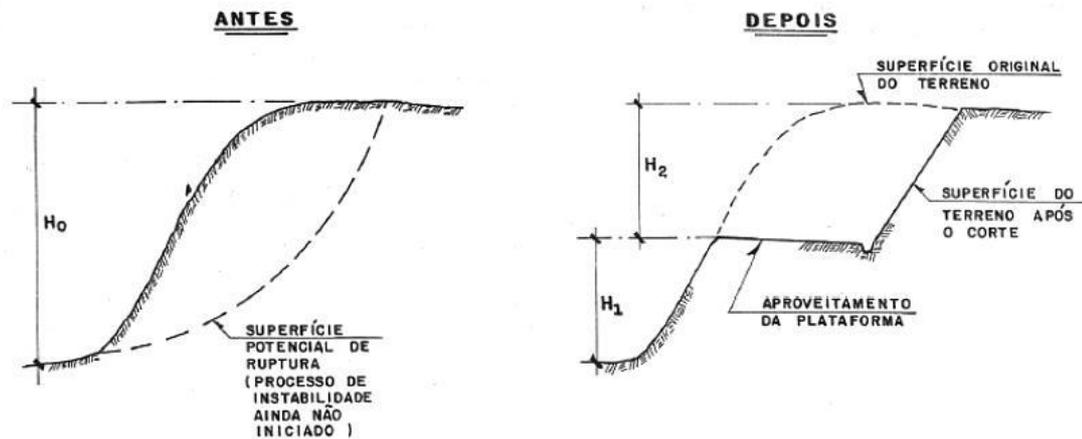
A Figura 42 indica o retaludamento feito com corte no terreno e suavização do ângulo de inclinação, com utilização de bermas. A Figura 43, também feita em cortes, indica o retaludamento mantendo a inclinação, mas reduzindo a altura. Já a Figura 44 indica um retaludamento feito com aterro em sua base (CARVALHO, 1991).

Figura 42 - Retaludamento com redução da inclinação média do talude



Fonte: Carvalho (1991)

Figura 43 - Retaludamento com redução da altura do talude



Fonte: Carvalho (1991)

Figura 44 - Retaludamento por meio de aterro na base do talude



Fonte: Carvalho (1991)

Em geral, o retaludamento associa-se a sistemas de drenagem (superficial e/ou subsuperficial) e ao sistema de proteção superficial (com materiais naturais ou artificiais), que serão vistos a seguir, visando a redução da infiltração de água no terreno e a regularização do

fluxo superficial, e deste modo atenuando ou, até mesmo, eliminando os processos erosivos (MARQUES, 2015).

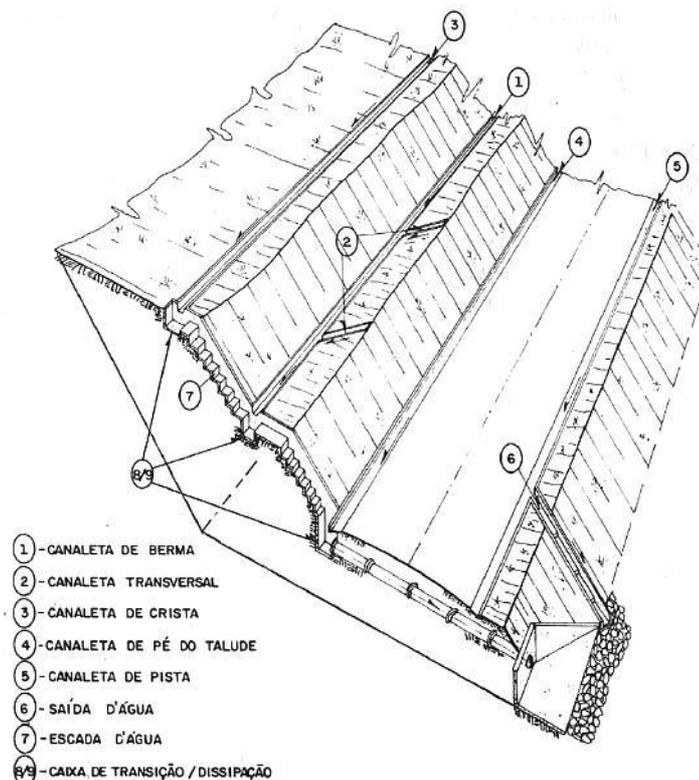
Em alguns casos, pode ser necessária a utilização de outros métodos para aumentar a estabilidade de taludes, como estaqueamento no pé do talude, muros de arrimo, chumbamento, obstrução de fissuras, injeções, entre outros (FERREIRA, 2015).

b) Drenagem

As obras de drenagem visam captar e redirecionar as águas de escoamento superficial e subsuperficial de forma correta, visto que a água exerce influência fundamental na instabilidade e na erosão de um talude. Pode ser utilizado como único recurso ou como um recurso adicional às técnicas de recuperação, sendo considerado um dos procedimentos mais importantes e eficazes (CARVALHO, 1991).

A drenagem superficial consiste na captação da água e disposição em um local mais adequado à jusante da área afetada, por meio de dispositivos como canaletas (de crista, de pé ou de berma), valetas, trincheiras, sarjetas, escadas e descidas d'água e caixas de passagem, de dissipação ou de transição, que podem ser observados na Figura 45. O material constituinte pode ser concreto, blocos de pedra ou geotêxteis, mantas vegetais e compostas (MARQUES, 2015).

Figura 45 - Dispositivos para drenagem em talude



Fonte: Carvalho (1991)

Para retirada de parte da água que percola no interior do talude, a drenagem subsuperficial (ou subterrânea/profundo) utiliza drenos horizontais profundos (DPH) ou barbacãs, poços de alívio (com ou sem bombeamento), ponteiros, galerias e trincheiras drenantes (CARVALHO, 1991).

c) Proteção superficial

Esta etapa evita que o talude fique exposto às intempéries, impedindo a formação de processos erosivos e diminuindo a infiltração da água no solo. Pode ser feita com materiais artificiais (concreto projetado, solo-cimento, imprimação asfáltica, entre outros) ou naturais, conforme será visto.

Como alternativa natural, tem-se a revegetação, que pode objetivar a contenção do solo (controle da erosão), a proteção de corpos d'água e áreas habitadas, a restauração da biodiversidade e o efeito estético (tapete verde). Cabe ressaltar que nem sempre é possível ou viável obter todos estes efeitos, sendo que o estético costuma ser o mais fácil e a restauração da biodiversidade o mais difícil (MARTINS, 2013).

A parte aérea das plantas oferece proteção para o solo exposto aos agentes erosivos, ao impacto das gotas de chuva e ao escoamento superficial. Ao mesmo tempo, o sistema radicular contribui para infiltração profunda das águas e pode funcionar como um reforço estrutural à medida que as raízes se entrelaçam, armam e estabilizam o terreno (BIFULCO, 2013).

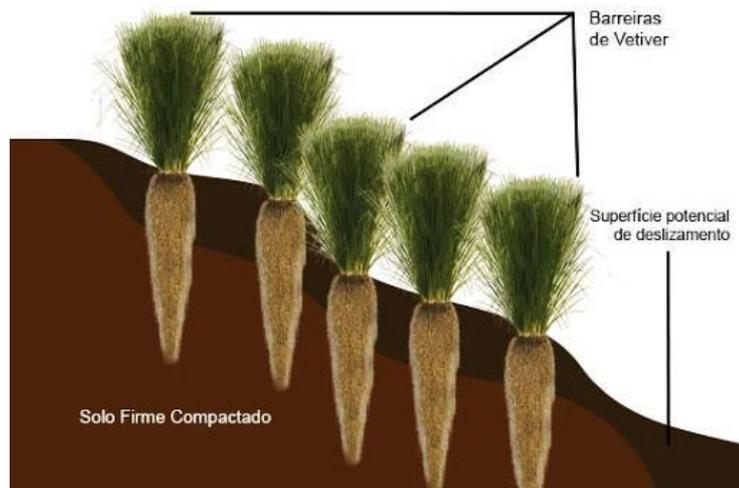
Como a camada superficial geralmente é removida antes ou durante a etapa de sistematização do talude, deve-se priorizar meios que fertilizem o solo, tornando-o apto a receber espécies mais exigentes adiante. Geralmente, a melhor opção para revegetação tem sido a mistura de espécies, simultâneas ou escalonadas, como por exemplo a associação de leguminosas e gramíneas. Este tipo de cobertura permite uma proteção densa e homogênea, diminuindo o escoamento de água diretamente sobre o solo (CARVALHO, 1991).

O plantio de leguminosas em taludes é sempre recomendado, devido a sua decomposição fácil e rápida, que permite maior fertilidade do solo e disponibilidade de matéria orgânica e substâncias estabilizadoras. Elas podem ser herbáceas, arbustivas ou arbóreas de pequeno porte, de preferência capazes de formar simbiose com *Rhizobium* e fixar nitrogênio do ar. As gramíneas, por sua vez, possuem decomposição mais lenta, melhorando a estabilidade dos agregados com efeito mais duradouro, além de promoverem maior cobertura e proteção do talude (MARTINS, 2013).

Dentre as gramíneas, destaca-se o capim vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), observado na Figura 46, como uma alternativa de baixo custo e rápida implantação, apresentando uma

série de vantagens. O vetiver é perene; forma cerca viva densa; possui sistema radicular profundo, podendo chegar até 5 m de profundidade; não se dissemina como invasora; é pouco atacado pelo gado; resiste a doenças e se adapta a mais diversas condições de solo e clima (MACHADO *et al.*, 2006; DEFLOR, [201?]b).

Figura 46 - Capim vetiver na proteção de taludes



Fonte: DEFLOR ([201?]b)

Para cobertura de taludes, recomenda-se que as espécies sejam pouco exigentes quanto às condições físico-químicas do solo; com cobertura rápida, sistema radicular profundo e crescimento vigoroso; não sejam frágeis ou produzam frutos grandes e pesados. Além disso, deve-se priorizar espécies adaptáveis às condições climáticas do local e de fácil obtenção (MARTINS, 2013). O mesmo autor ressalta que a escolha das espécies e da técnica de aplicação varia de acordo com o tipo de solo, inclinação do talude, condições locais, disponibilidade de mudas, sementes e recursos financeiros.

Outra forma de proteger a superfície dos taludes e conter os processos erosivos é por meio da utilização de mantas (ou esteiras), que podem ser sintéticas ou naturais. Estas e outras técnicas de proteção superficial serão comentadas no próximo item, sobre engenharia natural.

2.6.3.3 Técnicas de engenharia natural

A engenharia natural, também chamada de bioengenharia, consiste em um conjunto de métodos e técnicas que se caracterizam por utilizar, como principal material de construção, as plantas. A aplicação de técnicas de engenharia natural visa a recuperação e estabilização do solo, bem como a prevenção de deslizamentos de terra (BIFULCO, 2013). É utilizada como substituto, mas principalmente como complemento útil e necessário das técnicas clássicas da

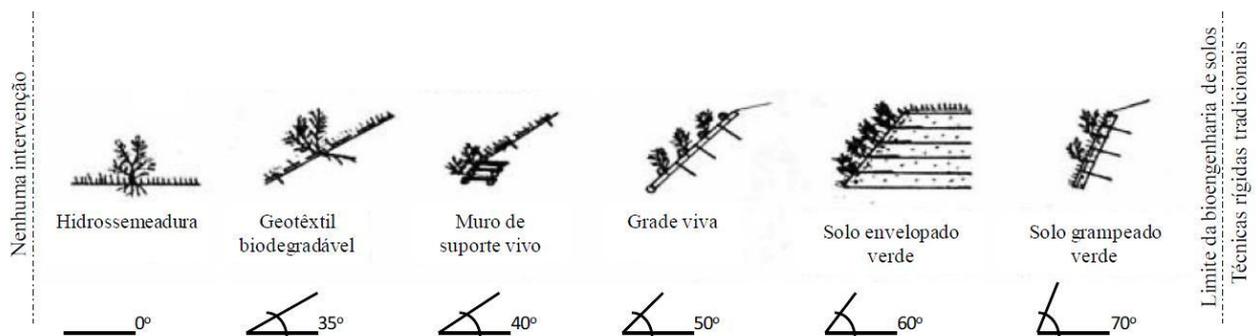
Engenharia Civil, podendo apresentar diferentes funções técnicas, ecológicas, paisagísticas e até mesmo ganhos econômicos (FERNANDES; FREITAS, 2011; HOTTA, 2009).

Segundo Bifulco (2013), os principais parâmetros para definir qual a técnica mais eficaz a ser utilizada são o ângulo de declive da encosta, a profundidade máxima atingida pelas raízes e as condições de coesão do terreno.

Os tipos de material utilizados pela engenharia natural dividem-se em vivos e inertes. Os materiais vivos consistem em sementes, principalmente para o caso de espécies herbáceas; estacas vivas de espécies arbustivas ou arbóreas com alta capacidade de propagação; partes de plantas e associações vegetais. Os materiais inertes (ou mortos) são madeiras, ramos secos, pedras de mão, tecidos de fibra vegetal, pregos, grampos, arame e outros materiais sintéticos, como tecidos, redes e grelhas, que permitem efeitos imediatos (BIFULCO, 2013; FERNANDES; FREITAS, 2011).

A Figura 47 apresenta as técnicas de engenharia natural recomendadas de acordo com a inclinação do talude, segundo Sauli *et al.*, (2005 *apud* OLIVEIRA, 2015).

Figura 47 - Técnicas de engenharia natural associadas à inclinação do local



Fonte: Oliveira (2015)

As técnicas serão apresentadas seguindo a divisão pelo objetivo funcional, conforme Bifulco (2013), a saber: revestimento superficial, estabilização superficial e consolidação.

a) Revestimento superficial

As técnicas com esta finalidade apresentam uma cobertura do solo mais rápida e econômica, utilizando principalmente herbáceas.

O plantio de mudas pode ser feito em casos de inclinações brandas (de até 27°), revestindo a superfície do terreno com uma camada de solo fértil ("terra vegetal") (CARVALHO, 1991). A semeadura consiste no espalho a lanço, ou com maquinário específico, de uma mistura de sementes de espécies herbáceas adequadas ao local. Possui uma execução

simples e de rápido revestimento e pode ser observada na Figura 48 (FERNANDES; FREITAS, 2011).

Figura 48 - Semeadura a lanço

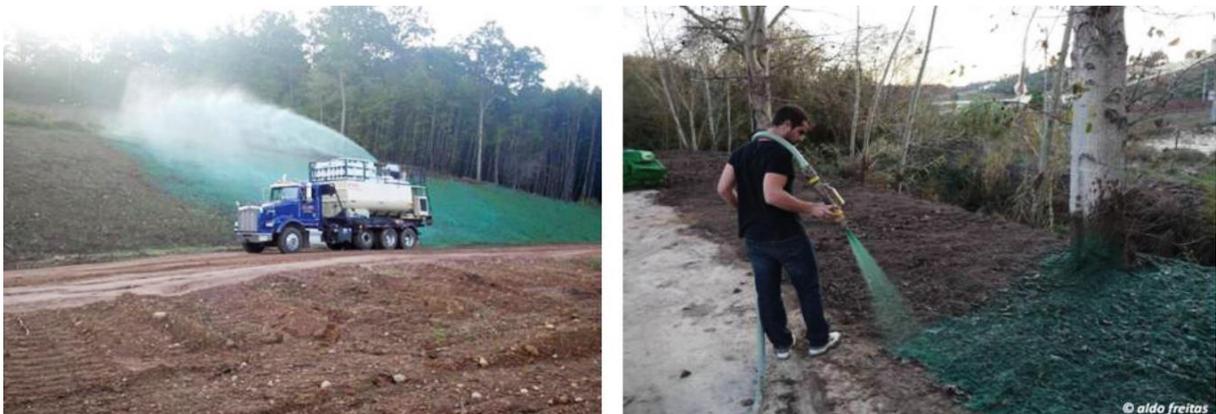


Fonte: Fernandes e Freitas (2011)

A hidrossemeadura consiste no lançamento de uma mistura de água, sementes, fertilizantes e materiais adesivos por meio de caminhões-pipa, apresentando como vantagens a rapidez, o baixo custo, e o alcance a áreas de difícil acesso (Figura 49). Cabe ressaltar a importância de adicionar à mistura elementos que favorecem a aderência das sementes ao talude, como adubos químicos ou orgânicos, e realizar a escarificação na camada superficial do solo antes do lançamento. É recomendado o emprego de gramíneas nativas associadas a leguminosas arbustivas também nativas. Como desvantagens, podem ocorrer falhas e perdas de sementes necessitando de sucessivas manutenções (MARTINS, 2013; BIFULCO, 2004).

Para taludes distantes de residências e rodovias, como aqueles no interior de áreas protegidas, como parques e reservas, recomenda-se a substituição das sementes de gramíneas por sementes de espécies arbustivo-arbóreas nativas, visando à restauração da diversidade (MARTINS, 2013, p. 202).

Figura 49 - Aplicação da hidrossemeadura



Fonte: Fernandes e Freitas (2011)

As mantas permitem o revestimento imediato do solo, podendo incorporar ou não sementes (BIFULCO, 2013) e utilizar diferentes materiais.

As mantas sintéticas são formadas por geotêxtil, também chamadas de geomantas, sendo permeáveis e de difícil degradação, oferecendo proteção rápida e permanente aos taludes íngremes, com rápida cobertura vegetal de gramíneas. Como não são biodegradáveis, o material não é incorporado ao solo e há dificuldade de propagação de espécies maiores, comprometendo a diversidade vegetal (MARTINS, 2013).

Pode-se citar diferentes tipos de geossintéticos, tais como geotêxtil, geogrelha, geocomposto, geomembrana e geocélula, que podem ser observados na Figura 50. Suas principais funções variam entre: drenagem, impermeabilização, filtração, proteção, separação, reforço, contenção e revestimento (GEOFOCO, [201?]).

Figura 50 - Alguns tipos de mantas sintéticas



Fonte: GEOFOCO ([201?]) e Vertical Green do Brasil (2015) (Adaptado pela autora)

Já as mantas naturais, também conhecidas por biomantas, podem ser feitas de diversos materiais, como palha de capim napier, taquara ou taboa e fibras naturais. Sua principal vantagem é ser biodegradável, pois desta forma são incorporadas pelo solo e ainda o beneficiam por meio de nutrientes e material orgânico, favorecendo a diversidade vegetal (SANTOS, 2015a). Como pode ser observado na Figura 51, a aplicação das biomantas deve ser iniciada no topo do talude, desenrolando a bobina e realizando o grampeamento para ancoragem superior e inferior, além da fixação ao longo do talude.

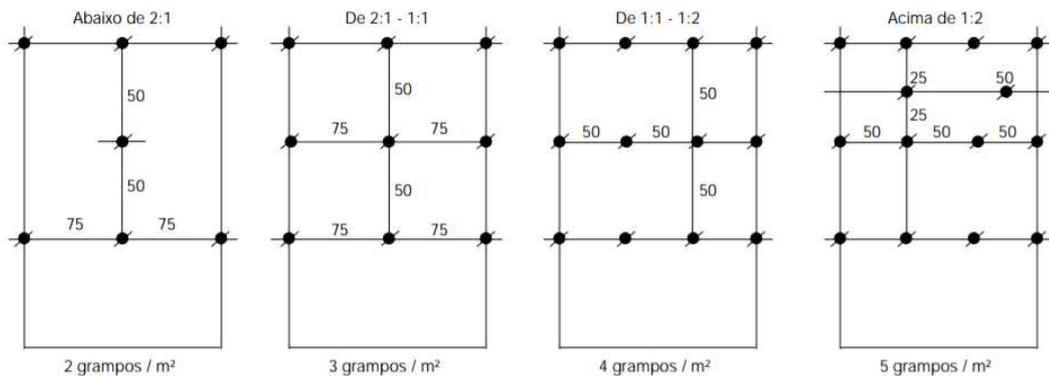
Figura 51 - Bobinas de biomantas e sua aplicação em taludes



Fonte: DEFLOR Bioengenharia ([201?]a)

O número de grampos varia de acordo com a inclinação do talude, a suscetibilidade à erosão, tipo do material, segurança requerida para o local e regularização da área. Cabe colocar que taludes parcialmente regularizados, sem regularização, de grande inclinação ou com grande suscetibilidade à erosão, devem utilizar um maior número de grampos por área, destacando que em solos não coesos e arenosos devem ser utilizados grampos mais compridos (DEFLOR, [201?]a). A Figura 52 indica o número e a disposição dos grampos recomendados para diferentes declividades.

Figura 52 - Fixação adequada dos grampos para biomantas em diferentes inclinações (H:V)



Fonte: DEFLOR Bioengenharia ([201?]a)

Após a fixação das mantas no talude, aplica-se o substrato formado por sementes, fertilizantes, matéria orgânica e solo. Também é possível fazer a semeadura em covas antes da fixação das mantas, evitando perdas do substrato devido a fortes chuvas, por exemplo (MARTINS, 2013).

É importante destacar que as mantas sejam colocadas sobre superfícies sem sulcos ou irregularidades, pois não havendo aderência entre as mantas e o terreno, a água pode se mover por baixo, mantendo os processos erosivos. Além disso, as plântulas morrem, pois ficam impedidas de enraizar (BIFULCO, 2013).

A composição material das mantas é determinante no seu desempenho, aplicação e durabilidade. O Quadro 23 apresenta as inclinações indicadas para uso de diferentes tipos de manta, com base em informações da DEFLOR ([201?]a) e GEOFOCO ([201?]).

Quadro 23 – Inclinações máximas recomendadas por empresas de bioengenharia para uso das biomantas e geomantas

Material das mantas	Inclinações máximas recomendadas		Suscetibilidade à erosão
	(H:V)	Ângulo	
Biomanta de fibra de palha agrícola	De 1:1 a 1:1,5	De 45° a 56°	baixa/média
Biomanta de fibra mista	De 1:1 a 1:2	De 45° a 63°	média/alta
Biomanta de fibra de coco	De 1:1,5 a 1:2	De 56° a 63°	média/alta
Fibras e redes de polipropileno	> 1:2	> 63°	alta
Geomanta reforçada	1:2 a 1:4	De 63° a 76°	alta

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Silva e Filho (2018) apontaram as principais características a serem observadas para determinação do procedimento mais adequado para proteção superficial dos taludes, conforme indicado no Quadro 24. Entretanto, cabe ressaltar que não se fez menção ao perfil geológico-geotécnico levantado para estes taludes.

Quadro 24 - Critérios importantes na escolha da técnica de revestimento de taludes

Variável	Fator de segurança do talude (FS)				
	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00
Inclinação da área	Plana	Até 30°	30° - 45°	45° - 60°	> 60°
Tipo de material	Solo	Arenoso/siltoso	Estéril	Pedregoso	Material solto
Preparo do solo	Excelente	Razoável	Curva de nível / bermas	Irregular	Sem preparo
Técnica de proteção	Biomanta reforçada	Biomanta simples	Hidrossemeadura ou mulching	Hidrossemeadura	Semeio natural
Altura do Talude	Até 5 m	5 m a 8 m	8 m a 15 m	15 m a 30 m	> 30 m
Drenagem	Sistema ok	Crista e bermas	Crista	Bermas	Inexistente
Época do plantio	Início das chuvas	Meio das chuvas	Fim das chuvas	Fim da seca	Início da seca

Fonte: Silva e Filho (2018)

b) Estabilização superficial

Uma técnica conhecida desde a antiguidade são os entrançados vivos, que podem ser vistos na Figura 53, para estabilização de taludes ou proteção de margens fluviais. Consiste em entrelaçar ramos de espécies lenhosas (como o salgueiro), de forma horizontal ou diagonal, em torno de estacas (que podem também ser vivas) cravadas no solo. Essas estruturas são colocadas em curva de nível e criam uma barreira de 20 cm a 30 cm de altura ao longo da linha de cota (FERNANDES; FREITAS, 2011).

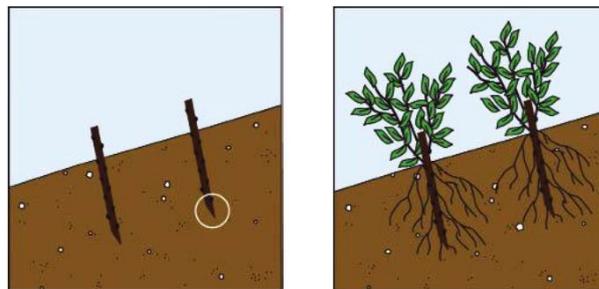
Figura 53 - Entrançados vivos



Fonte: Fernandes; Freitas (2011)

As estacas vivas podem ser formadas por ramos ou galhos, sem folhas ou ramificações, que serão desenvolvidas posteriormente, conforme ilustrado na Figura 54. Quando inseridas no solo de forma correta são capazes de desenvolver uma rede de raízes que contribuem na sustentação do talude (OLIVEIRA, 2015).

Figura 54 - Estacas vivas na implantação e após o crescimento dos ramos e raízes



Fonte: Oliveira (2015)

Outra forma conhecida são as paliçadas vivas. As paliçadas quebram a força da enxurrada e retêm os sedimentos no interior das voçorocas, diminuindo o assoreamento. São construídas com materiais facilmente disponíveis e de baixo custo, como bambus, pneus usados, sacos de rafia, mourões de eucalipto, troncos, galhos, etc. A quantidade de paliçadas é determinada de acordo com o tamanho da voçoroca e, havendo mais de uma, pode-se plantar gramíneas, arbustos e arvoretas entre elas. Existem tabelas na literatura que indicam espécies nativas que já foram utilizadas para recuperação em voçorocas e podem servir de base para outros projetos. Deve-se também fazer canaletas tanto nas paredes laterais quanto no leito da voçoroca, deixando-a bem encaixada para não ocorrer a passagem de água (MACHADO *et al.*, 2006; MARTINS, 2013).

As paliçadas de bambu (Figura 55), por exemplo, permitem a contenção das paredes verticais da voçoroca, além da redução da velocidade do escoamento superficial. Para proteção dessas paredes, as paliçadas devem ser escoradas com toras de eucalipto (ou outra madeira) e pode-se utilizar como reforço amarras de arame de aço. As estacas de bambu podem ser

dispostas na horizontal ou vertical e ficam na frente da paliçada, em seguida ficam as escoras de madeira com retentores de sedimentos e, por último, sacos de terra, pedra, pneus ou entulhos para receber a água que, porventura, atravesse a paliçada (FERREIRA, 2015; TAVARES *et al.*, 2008).

Figura 55 - Paliçada de bambu em voçoroca



Paliçada de bambu



Água retida na paliçada

Fonte: Tavares *et al.* (2008)

Uma alternativa que tem sido utilizada para absorção de água e retenção de sedimentos na recuperação de taludes, ravinas e voçorocas são os biorrolos (Figura 56), devendo ser instalados seguindo a curva de nível. Também conhecidos como Bermalongas®, são constituídos de fibras naturais, de coco ou palha, que são desidratadas e prensadas, formando um cilindro flexível e muito resistente. Geralmente, absorvem cerca de cinco vezes o seu peso em água, possuem diâmetro de 20 cm a 50 cm e seu comprimento usual é de 1,60 m, mas pode chegar a até 10 m (OLIVEIRA, 2015; DEFLOR BIOENGENHARIA, [201?]a).

Figura 56 - Biorrolos e sua aplicação em taludes



Fonte: DEFLOR Bioengenharia ([201?]a) e Oliveira (2015)

As faixas vegetativas consistem em dividir o talude por meio da escavação de trincheiras longitudinais, ao longo das curvas de nível, onde se realiza o plantio de vegetação (Figura 57). A técnica é recomendada para taludes de até 5 m de comprimento e de inclinação inferior a 35°. As trincheiras devem ser feitas a cada 1,5 m em solos pouco coesivos e a cada 2m em solos

coesivos (HOTTA, 2009). De acordo com Bifulco (2013), esta é a técnica mais eficiente e eficaz de estabilização superficial.

Figura 57 - Implantação e resultado das faixas vegetativas



Fonte: Silva (2012)

c) Consolidação

Essas técnicas são utilizadas como obras de suporte para terrenos com profundidade superior a 2 m, em que as plantas e estacas são associadas a materiais inertes que proporcionam maior sustentação (BIFULCO, 2013).

Os muros vivos de suporte são formados por troncos de madeira dispostos perpendicularmente, formando uma estrutura em forma de caixa (Figura 58). Os troncos utilizados podem ter diâmetro de 10 cm a 40 cm, são fixados por cavilhas de ferro ou estacas, e seu interior é preenchido com pedras, ramos com capacidade vegetativa ou plantas enraizadas. São indicados para taludes com inclinação de 40° a 50° (FERNANDES; FREITAS, 2011; SILVA, 2012).

Figura 58 - Muros de suporte vivos



Fonte: Fernandes e Freitas (2011)

De forma semelhante, as grades vivas também são formadas pela disposição de troncos de forma perpendicular, formando uma estrutura reticulada de madeira. Os troncos podem ter de 12 cm a 20 cm de diâmetro, de modo que a estrutura seja fixada a troncos verticais de 8 cm

a 10 cm de diâmetro, cravados a aproximadamente 80 cm do solo. No interior dos retângulos devem ser plantadas estacas vivas para recobrimento do solo, conforme pode ser visto na

Figura 59 (HOTTA, 2009). As grades vivas são indicadas para estabilizar taludes com inclinação entre 45° e 55° (FERNANDES; FREITAS, 2011) e podem ser associados a outras técnicas, como na Figura 60, onde é aplicado juntamente com o muro de suporte vivo.

Figura 59 - Grade viva associada e estacas vivas



Fonte: Hotta (2009)

Figura 60 - Implantação de grade viva e muro vivo



Fonte: Bifulco (2013)

Os gabiões vivos consistem em uma estrutura em formato de caixa retangular, feita com rede de malha hexagonal com arame galvanizado reforçado, dentro do qual são colocadas pedras não friáveis ou estacas vivas (Figura 61). Possuem elevada flexibilidade e permeabilidade, sendo indicados para taludes com declives muito acentuados, conforme Fernandes e Freitas (2011).

Figura 61 - Aplicação de gabiões vivos e resultado



Fonte: Fernandes e Freitas (2011)

Uma técnica indicada para taludes com inclinação de até 60° é o solo envelopado verde. Este método consiste na utilização de geotêxtil ou biomanta de alta resistência, seguida da aplicação de camadas de solo compactado até atingir uma altura entre 50 cm e 60 cm. A parte excedente da manta é envolvida sobre o solo compactado, processo que se repete até recobrir todo o talude. Entre as camadas de solo envelopado podem ser dispostas estacas vivas para auxiliar na ancoragem, como observa-se na Figura 62. Por fim, são lançadas sementes de espécies vegetais (SANTOS, 2015a; HOTTA, 2009).

Figura 62 - Esquema e execução de solo envelopado verde



Fonte: Couto (2010 *apud* SANTOS, 2015a) e Hotta (2009)

O solo grampeado verde pode ser aplicado em taludes de corte ou encostas, podendo ser visualizado na Figura 63. Consiste na técnica convencional de instalação de barras de aço

(chumbadores ou grampos) seguida da injeção de calda de cimento sob pressão. A diferença está em finalizar o processo aplicando biomantas ou grama para revestimento superficial (SOLOTRAT, [201?]).

Figura 63 - Solo grampeado verde



Fonte: SOLOTRAT ([201?])

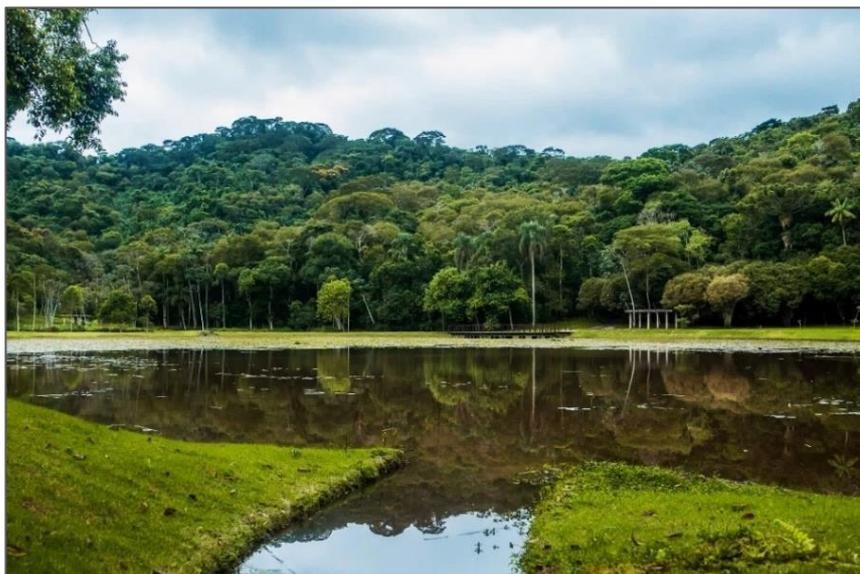
Cabe colocar que nem todos os projetos podem ser atendidos apenas por obras de engenharia natural (HOTTA, 2009). Em casos mais complexos, a solução necessária pode ser por meio de obras de contenção convencionais, como muros de arrimo (ou de gravidade) de pedra, concreto armado, sacos de solo-cimento, gabiões ou *crib walls*; ou ainda, intervenções especiais, como uso de tirantes e chumbadores, concreto projetado e cortinas atirantadas (SILVA, 2012).

2.7 JARDIM BOTÂNICO DA UFJF

2.7.1 Breve histórico e contextualização

O Jardim Botânico da UFJF (JB-UFJF) (Figura 64) integra a Mata do Krambeck, um dos maiores remanescentes de Floresta Atlântica em área urbana do país. É um espaço público de preservação e conservação da sociobiodiversidade, reservando mais de 500 espécies vegetais (dentre plantas nativas, ornamentais, populações raras ou em extinção, como pau-brasil e ipê roxo) e também sendo um importante abrigo para a fauna local, além de possuir nascentes e contribuir para a regulação do microclima da região (UFJF, [201?]). São aproximadamente 82 hectares de mata preservada (equivalentes a 119 campos de futebol), que têm sido alvo de diversas pesquisas científicas e ainda permite a participação da comunidade em geral, através de visitas, roteiros, trilhas e orientações educativas.

Figura 64 - Jardim Botânico da UFJF



Fonte: UFJF ([201?])

No início do século XX, a família Krambeck, de origem alemã, adquiriu três propriedades rurais, pertencentes à antiga Fazenda da Tapera, a saber: Sítio Malícia, Retiro Novo e Retiro Velho, que formam a atual “Mata do Krambeck”, totalizando um extenso fragmento florestal de 373 hectares (CRUZ, 2016). Os dois últimos sítios, inclusive, são considerados Área de Proteção Ambiental (APA) estadual desde 1993, pela Lei nº 11.336 (IEF, 2020), que pode ser vista na Figura 65. Segundo o IDE-Sistema ([201?]), a Mata do Krambeck é uma área prioritária para conservação de biodiversidade, com classificação de prioridade muito alta.

Figura 65 - Mata do Krambeck: Área protegida, Unidade de Conservação Estadual



Fonte: IDE-Sistema ([201?])

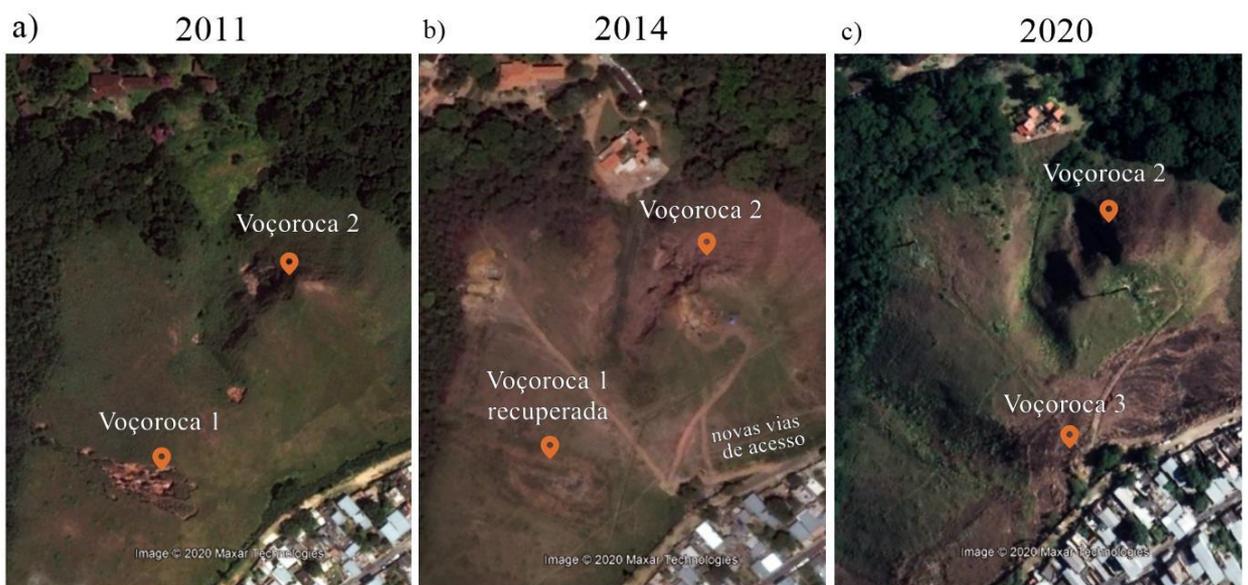
O JB-UFJF corresponde à fração do Sítio Malícia, que outrora já foi utilizado para fins pecuários, plantio de café e extração de lenha. Em meados da década de 1930, o sítio passou por processos de preservação, adaptações e obras paisagísticas, como a inserção de lagos artificiais, pomares, jardins e alamedas (CRUZ, 2016).

Porém, no final da década de 1990, a área foi comprada por um grupo de empresários que iniciaram um processo de licenciamento ambiental para construção de um condomínio luxuoso no local, em 2003. Diante disso, ao enfrentar diversas oposições por organizações públicas, civis, não-governamentais, órgãos ambientalistas e a população em geral, em 2007, a UFJF comunicou em audiência pública o interesse em adquirir a área para transformá-la em Jardim Botânico (UFJF, [201?]).

O acordo foi assinado em 2010, dando início ao projeto de implantação do JB-UFJF que, desde então, tem contribuído em diversas atividades relacionadas ao ensino, pesquisa e extensão da universidade. A Casa-Sede foi reformada e foram construídos o Centro de Pesquisa, o Laboratório Casa Sustentável, o Centro de Educação Ambiental e a sede administrativa. As obras foram concluídas em abril de 2019, quando também foram abertas às visitas para o público.

Algumas feições erosivas podem ser observadas na região de estudo, conforme observado na Figura 66, a partir de imagens históricas obtidas no Google Earth, sendo que a voçoroca 3 é o alvo desta pesquisa (Figura 66-c).

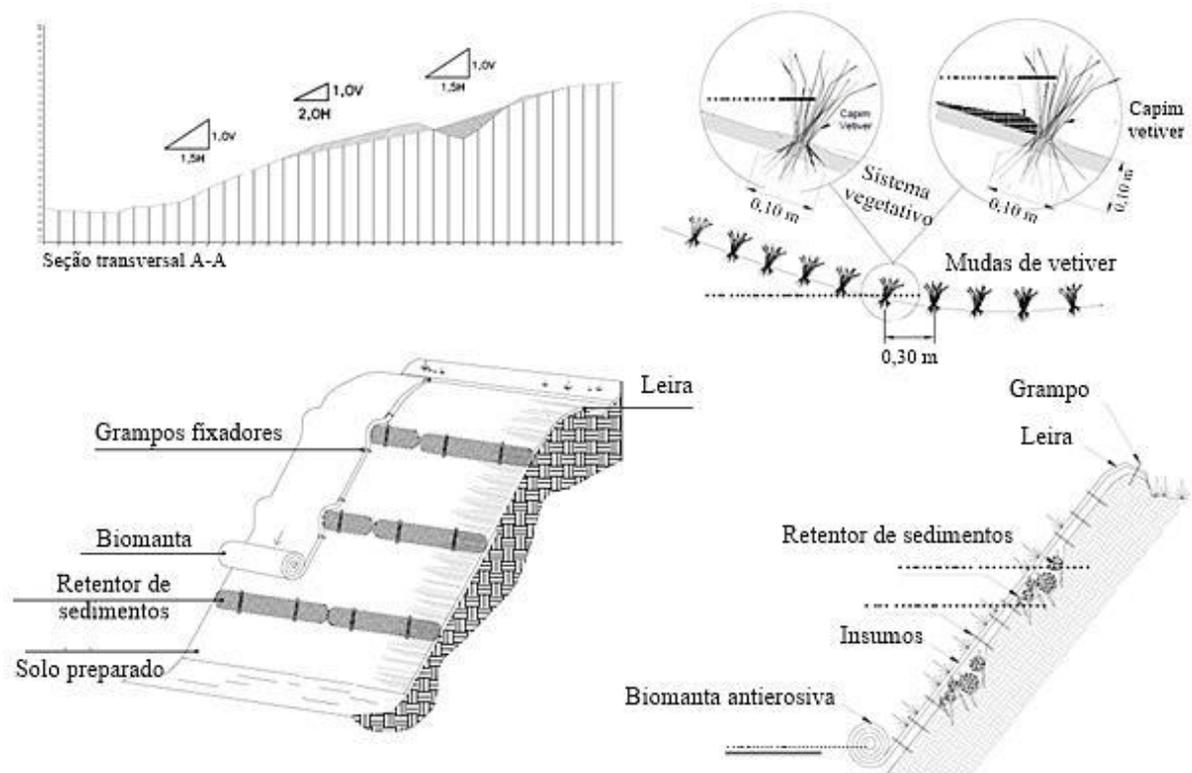
Figura 66 - Voçorocas no JB-UFJF ao longo dos anos utilizando imagens do Google Earth



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Destaca-se que a voçoroca 1 (Figura 66-a) foi recuperada em 2013, e pode ser observada na Figura 66-b após as intervenções de recuperação. Algumas das técnicas utilizadas podem ser visualizadas em detalhes do projeto apresentados na Figura 67.

Figura 67 - Alguns detalhes e técnicas utilizadas no projeto de recuperação da voçoroca 1 do JB-UFJF



Fonte: ENGETA (2012) (Adaptado pela autora)

Dentre elas, pode-se citar a reconformação manual e mecânica do talude, removendo as arestas, suavizando os contornos e eliminando os sulcos. As inclinações utilizadas correspondem a, aproximadamente, 27° e 34° . Além disso, foi feito uso do Bermalonga® como preenchimento de focos erosivos e como bermas artificiais (ou leiras) e da biomanta de fibras de palha, fibras de coco e redes de polipropileno para revestimento. Realizou-se o preparo do solo, coveamento, semeio manual e hidrossemeadura de espécies de gramíneas e leguminosas, destacando as barreiras vivas de capim vetiver. Também foram construídas canaletas em pedra argamassada e gabiões do tipo-caixa (ENGETA, 2012).

De acordo com informações da Pró-Reitoria de Infraestrutura e Gestão (Proinfra) da UFJF, a identificação da voçoroca 3 ocorreu em meados de 2018. Ao que tudo indica, o processo erosivo teve origem a partir das obras do teleférico do Jardim Botânico, em 2014 (Figura 66-b), quando foi feita uma via de acesso para passagem de caminhões e transporte de insumos como materiais de construção (CARVALHO, 2020).

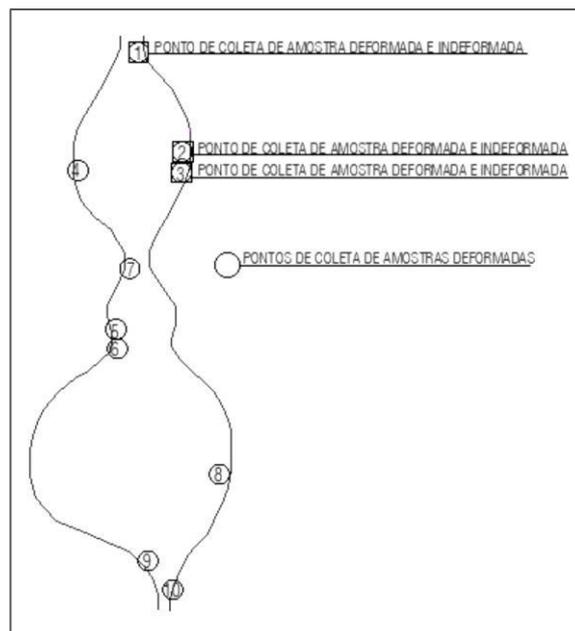
Juntamente com a via, foi feita uma valeta verde sem recobrimento para promover a drenagem da estrada, recolhendo as águas provenientes à montante da crista do talude. Durante a obra, foi realizado um alteamento da guia do meio-fio da rua para redirecionamento das águas, porém não foram elaborados para o local quaisquer projetos de construção da via, de drenagem ou de recobrimento (SALERMO, 2020).

A falta de manutenção e a ineficiência do sistema de drenagem da via intensificou o processo de erosão hídrica, ocasionando a formação e evolução das feições erosivas que atualmente caracterizam a área degradada em estudo. Além disso, Carvalho (2020) apontou a falta de vegetação nativa e a exposição do solo como fatores condicionantes que mantêm o processo erosivo ativo.

2.7.2 Informações geotécnicas de trabalhos anteriores

Carvalho (2020), em estudo da mesma feição erosiva do presente trabalho, coletou dez amostras deformadas de solo para realizar os ensaios de caracterização física, em maio de 2019, dentre eles a análise granulométrica (peneiramento grosso, peneiramento fino e sedimentação) conforme a NBR 7181 (ABNT, 2018); determinação do teor de umidade, conforme o ME213 (DNER, 1994b) e densidade real dos grãos, conforme o ME093 (DNER, 1994a). O posicionamento dos pontos de coleta pode ser observado na Figura 68. No Quadro 25 estão os valores obtidos de densidade real dos grãos para as 10 amostras de solo.

Figura 68 - Croqui dos pontos de coleta de amostras



Fonte: Carvalho (2020)

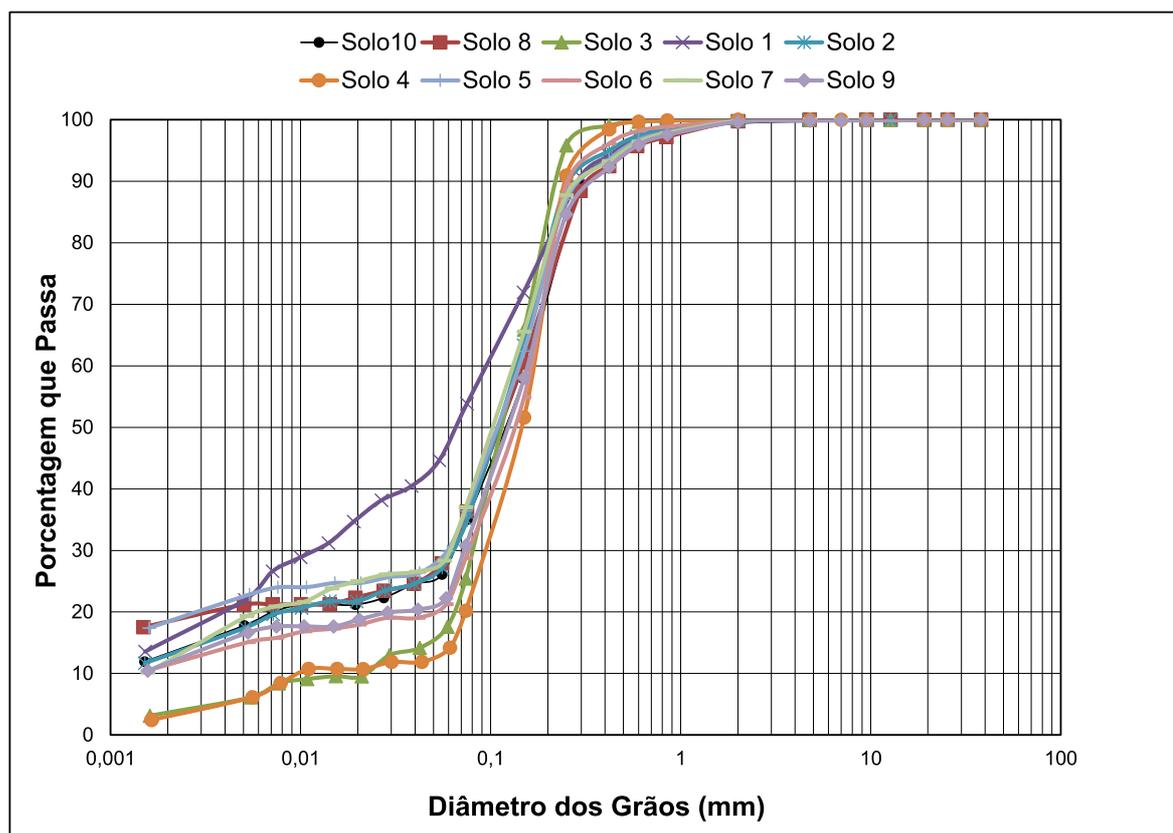
Quadro 25 - Resultados do ensaio de densidade real dos grãos

Amostra de solo	SL 1	SL 2	SL 3	SL 4	SL 5	SL 6	SL 7	SL 8	SL 9	SL 10
Densidade real dos grãos (g/cm ³)	2,627	2,655	2,65	2,583	2,559	2,658	2,666	2,668	2,666	2,678

Fonte: Carvalho (2020)

Com os valores obtidos no ensaio de granulometria, foram feitas as curvas granulométricas das dez amostras, que podem ser observadas no Gráfico 1. Em seguida, os valores da distribuição granulométrica, em porcentagem, estão dispostos no Quadro 26, juntamente com sua respectiva classificação. Carvalho (2020) identificou três conjuntos de curvas, que representam os três tipos de solo encontrados, sendo o solo 1 do tipo areia silto-argilosa, os solos 3 e 4 do tipo areia siltosa e os demais solos do tipo areia com silte e argila.

Gráfico 1 - Curva granulométrica



Fonte: Carvalho (2020)

Quadro 26 - Classificação quanto à granulometria

Amostras		Distribuição granulométrica (%)									
		SL 1	SL 2	SL 3	SL 4	SL 5	SL 6	SL 7	SL 8	SL 9	SL 10
PEDREGULHO		0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
AREIA	GROSSA	3	3	0	0	3	2	3	43	4	3
	MÉDIA	17	19	17	26	20	24	18	23	23	25
	FINA	33	50	65	60	46	53	49	4	50	44
SILTE		31	15	14	11	12	10	17	11	11	15
ARGILA		16	13	4	3	18	12	12	18	12	13
Classificação		Areia silto-argilosa	Areia c/ silte e argila	Areia siltosa	Areia siltosa	Areia c/argila e silte					

Fonte: Carvalho (2020)

Devido a esta configuração, Carvalho (2020) optou por coletar as amostras indeformadas desses três tipos de solo, representados pelos pontos 1, 2 e 3. A composição granulométrica de cada solo está resumida no Quadro 27.

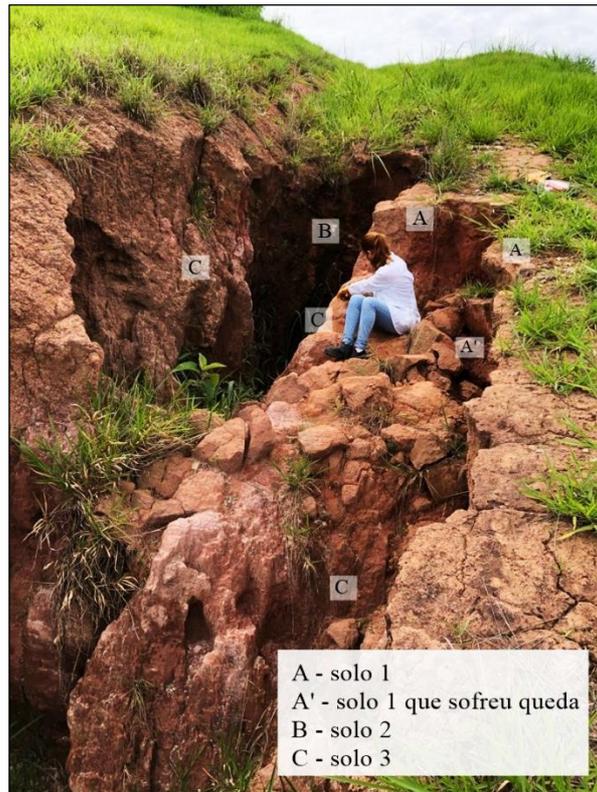
Quadro 27 - Distribuição granulométrica dos solos 1, 2 e 3

Solo	Areia	Silte	Argila
1	53%	31%	16%
2	72%	15%	13%
3	82%	14%	4%

Fonte: Carvalho (2020)

Os estudos de Carvalho (2020) indicaram que a feição erosiva apresenta mais de um tipo de solo, não sendo homogêneo. No entanto, a inspeção visual das paredes expostas da voçoroca mostrou que o solo 1 está presente apenas em uma camada superficial com espessura variável entre 0 e 50 cm e que o restante é composto por solos similares ao solo 2 e 3, que são areias com poucos finos, como pode ser observado na Figura 69.

Figura 69 - Posição dos solos nas paredes da voçoroca



Fonte: Acervo pessoal (2021)

De modo simplificado, foi possível considerar para efeitos de trabalho acadêmico, que a parede da voçoroca é composta pelos solos arenosos, podendo ser assumida como uma camada uniforme. Ressalta-se que para confirmação do perfil geológico-geotécnico assumido seriam necessárias investigações complementares como sondagem à percussão.

Os locais de coleta podem ser observados na Figura 70, que indica os horizontes dos solos 1, 2 e 3, respectivamente. Cabe colocar que os solos 2 e 3 foram retirados de um mesmo eixo transversal, porém o solo 2 a 1 m da base da feição erosiva e o solo 3 a 1,20 m da superfície (CARVALHO, 2020).

Figura 70 - Locais de coleta das amostras indeformadas dos solos 1, 2 e 3



Fonte: Carvalho (2020)

A partir dessas amostras, foram realizados o ensaio de desagregação, conforme Holmgren e Flanagan (1977 *apud* MASCARENHA *et al.*, 2015) e o ensaio de dispersão, conforme a NBR 13601 (ABNT, 1996a) para avaliação da erodibilidade dos solos. Os resultados dos ensaios são apresentados no Quadro 28.

Quadro 28 - Resultados do ensaio de desagregação e dispersão

Amostras	Desagregação	Dispersão
Solo 1	Colapso com predomínio de abatimento	Grau 2 - Levemente dispersivo
Solo 2	Sem resposta (tamanho e forma mantidos)	Não dispersivo
Solo 3	Colapso por fraturamento	Grau 3 - Moderadamente dispersivo

Fonte: Carvalho (2020)

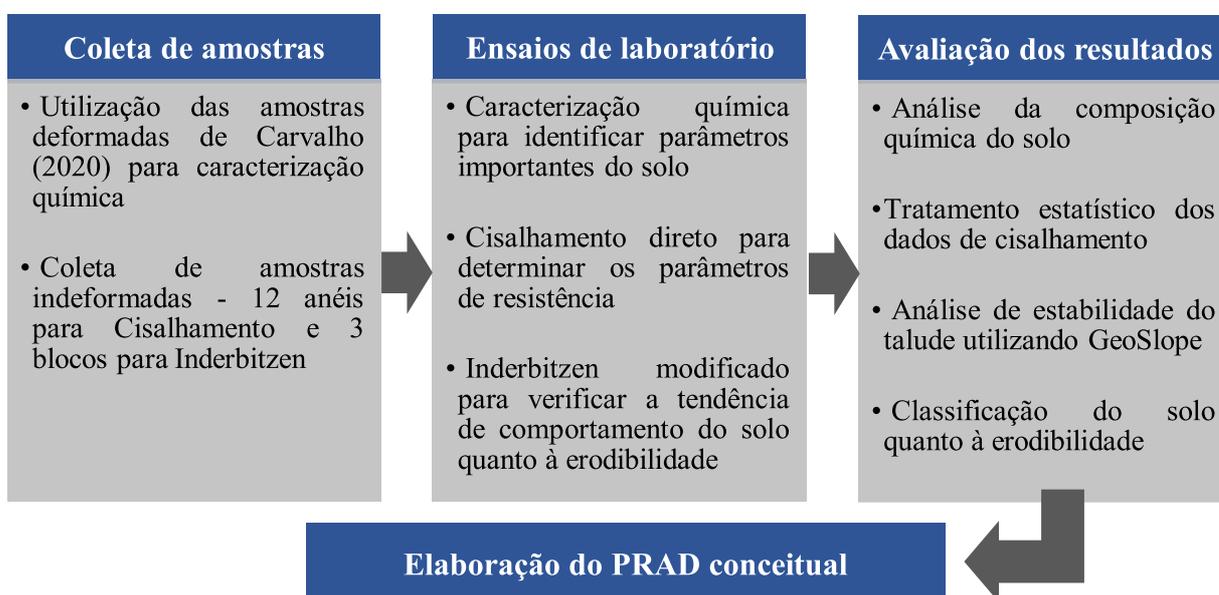
Apesar do teor de argila ser maior no solo 1, foi o solo 2 que se mostrou mais coeso, visto que não apresentou desagregação nem dispersão, indicando que possui coesão verdadeira. Porém, o mesmo apresenta instabilidade em campo pois apoia-se sobre os solos 1 e 3, que são instáveis e caracterizam-se pelo comportamento dispersivo, por abatimento e fraturamento, provocando o carregamento de partículas quando em contato com a água e, assim, promovendo o surgimento das fissuras que dão origem às feições erosivas. Portanto, os solos 1 e 3 são suscetíveis à erosão, sendo o solo 3 o mais crítico (areia siltosa, menos coeso e moderadamente dispersivo). Segundo Carvalho (2020), os resultados dos ensaios justificam o formato da voçoroca em estudo, marcado por fissuras estreitas na superfície e que se tornam maiores com o aumento da profundidade.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada numa área degradada localizada no Jardim Botânico da UFJF, situado no bairro Santa Terezinha da cidade de Juiz de Fora – Minas Gerais, no período de novembro de 2020 a junho de 2021, em continuidade ao estudo iniciado por Carvalho (2020) e em parceria com a Proinfra da UFJF.

Após a revisão bibliográfica dos temas pertinentes e dos trabalhos quanto à erodibilidade do solo já realizados no local de estudo, as etapas subsequentes seguiram conforme apresentado no esquema da Figura 71.

Figura 71 - Etapas de execução do trabalho



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

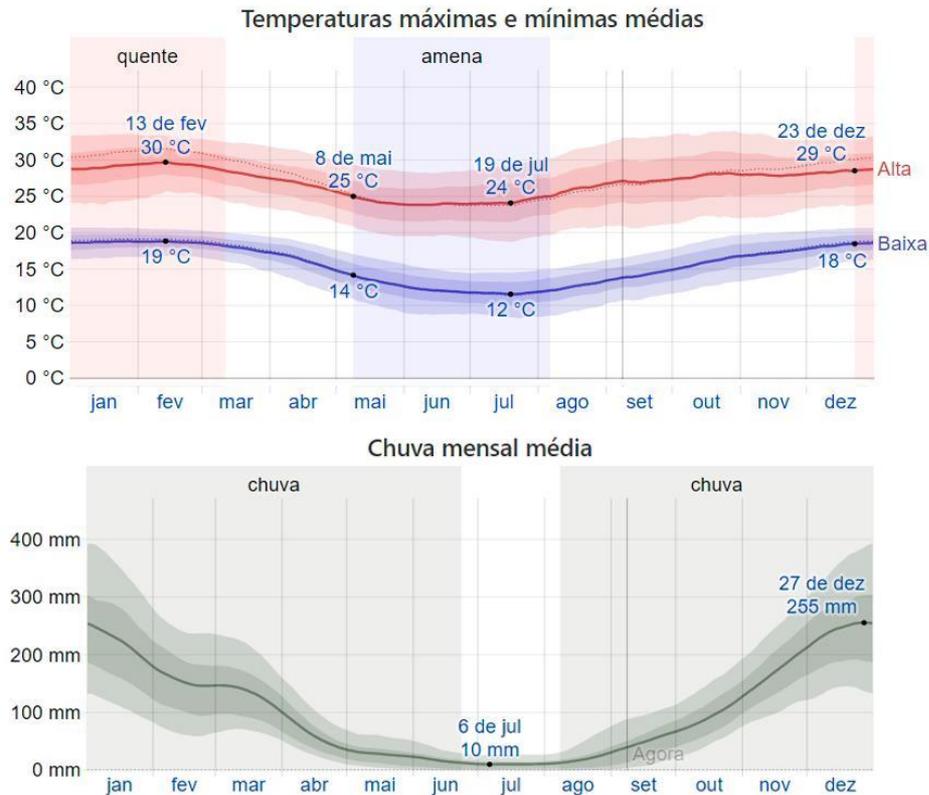
3.1 CARACTERÍSTICAS DA REGIÃO

3.1.1 O município de Juiz de Fora

O município de Juiz de Fora possui uma área de 1.435 km². A população atual estimada é de 573.285 habitantes (IBGE, 2020). Está situada geomorfologicamente na Unidade Serrana da Zona da Mata, incluída na Região Mantiqueira Setentrional e o bioma corresponde à Mata Atlântica (SIMGEO, 2016).

Possui o clima tropical de altitude, com dois períodos distintos: quente e chuvoso, de outubro a abril, e frio e seco, de maio a setembro (PJF, 2004). Segundo a classificação de Köppen, o clima da cidade é Cwa (mesotérmico, verão chuvoso e quente). As médias mensais de temperatura e pluviosidade podem ser observadas na Figura 72, geradas com base em análises estatísticas de relatórios históricos da cidade, de janeiro de 1980 a dezembro de 2016.

Figura 72 - Médias mensais de temperatura e chuva em Juiz de Fora



Fonte: Weather Spark ([201?])

Cerca de 2% do território juiz-forano é plano, 13% é constituído de serras e 83% por mares de morro (SIMGEO, 2016). Deste modo, possui um relevo acidentado, com altitude média de 800 metros e forte tendência à orientação estrutural. Suas litologias caracterizam-se por coberturas de solos espessos e exposições rochosas, principalmente na região sul (ROCHA *et al.*, 2003).

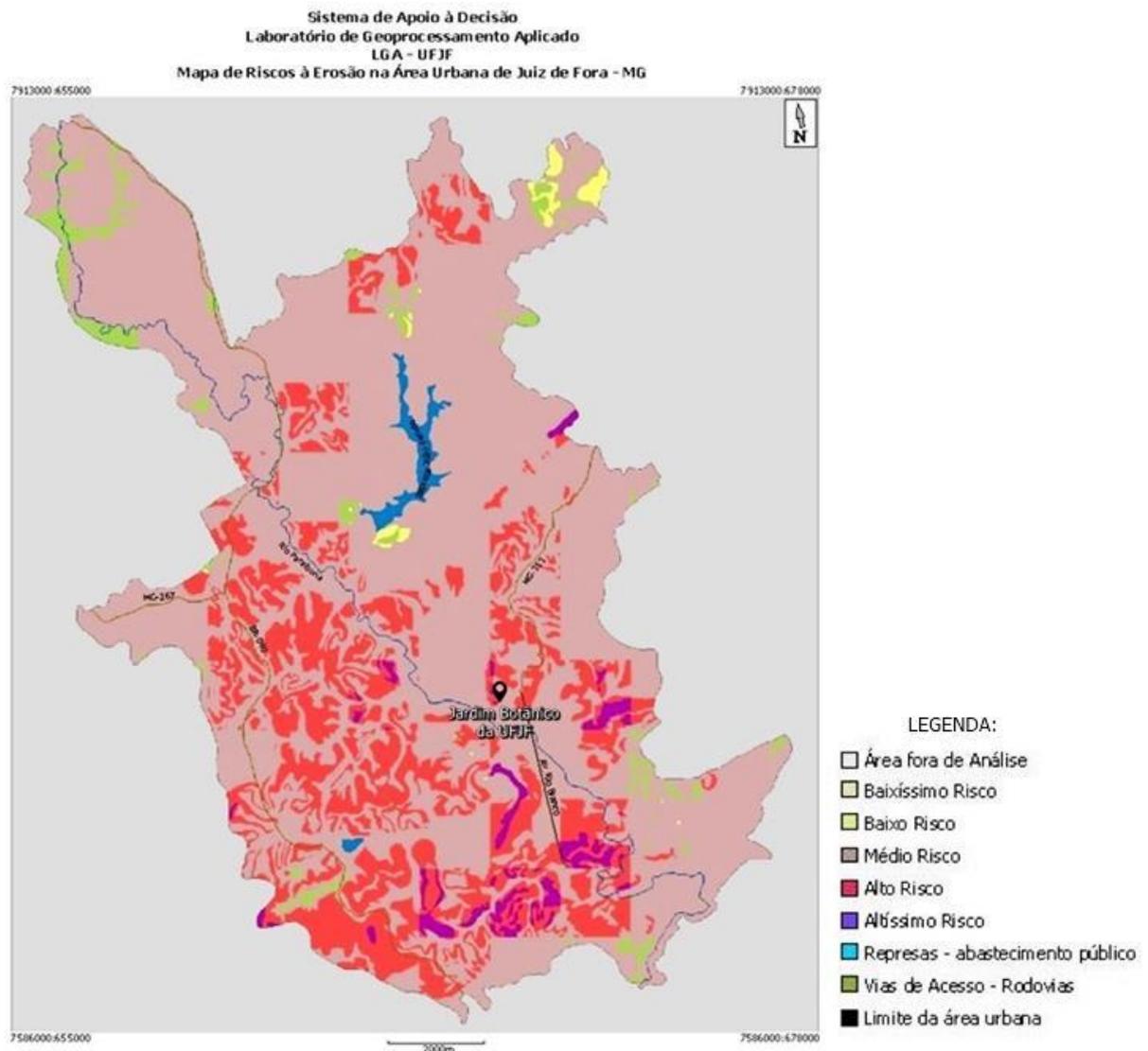
São encontrados dois grandes compartimentos geomorfológicos que se individualizam, principalmente em função dos aspectos geológicos: ao norte, os terrenos ocupados pelo Gnaiss Piedade, com predominância de migmatitos, e ao sul, pelas rochas antigas do Complexo Juiz de Fora, com charnockitos e kinsigitos. O município pertence à bacia do Médio Paraibuna, que faz parte da bacia do rio Paraíba do Sul. A declividade média do rio Paraíba no município, numa extensão aproximada de 61km, é de 4m/km (PDDU-JF, 2000).

O município possui uma dinâmica superficial intensa devido à presença de vales profundos associados a encostas com elevadas declividades, além do relevo ser constituído predominantemente por morros, que ficam ainda mais sujeitos à erosão e movimentação de massa durante o período chuvoso (PDDU-JF, 2000). Os principais problemas de cunho ambiental na cidade, segundo Rocha *et al.* (2003), são constantes processos erosivos em

encostas, degradação da qualidade dos recursos hídricos, apropriação em depósitos de resíduos sólidos e os escorregamentos ou movimentos de massa em encostas, devido à fragilidade da estrutura física da região, desmatamento e ocupação irregular.

O Núcleo de Pesquisa em Zoneamento e Risco Ambiental (ZONERISC, 2002) identificou erosão do tipo acelerada na cidade, com problemas relacionados à perda de solo fértil, altos níveis de erosão linear, assoreamento e inundação, principalmente devido à atuação antrópica e fragilidade do meio físico da região. Baseado em informações geológicas, o tipo de solo, relevo, vegetação e ocupação do terreno, gerou-se o Mapa de Riscos à Erosão Urbana da cidade, conforme a Figura 73.

Figura 73 - Mapa de riscos à erosão em Juiz de Fora - MG



Fonte: ZONERISC (2002) (Adaptado pela autora)

A localização aproximada do JB-UFJF foi adicionada pela autora para ter uma ideia melhor de onde se encontra o foco do presente trabalho. Cabe destacar que não existe o risco

zero, isto é, todas as áreas da cidade estão sujeitas a algum tipo de erosão, sendo que a região sul é a mais preocupante, pois apresenta níveis de risco altíssimo e também possui a maior densidade populacional.

De acordo com os cartogramas gerados por Rocha *et al.* (2003), as categorias de declive na cidade de Juiz de Fora são, em sua maioria, acima de 12% e, principalmente, acima de 30% (corresponde a, aproximadamente, 17°), indicando áreas impróprias para ocupação e edificações. Alguns dados do mapeamento de riscos a escorregamentos podem ser observados no Quadro 29 destacando-se a predominância de áreas com médio risco.

Quadro 29 - Áreas com riscos a escorregamentos em Juiz de Fora

Risco	Baixíssimo	Baixo	Médio	Alto	Altíssimo
Declividade	0 - 12%		12% - 50%	> 50%	
Área (ha)	5.478,50	6.878,60	14.173,20	897,20	107,30

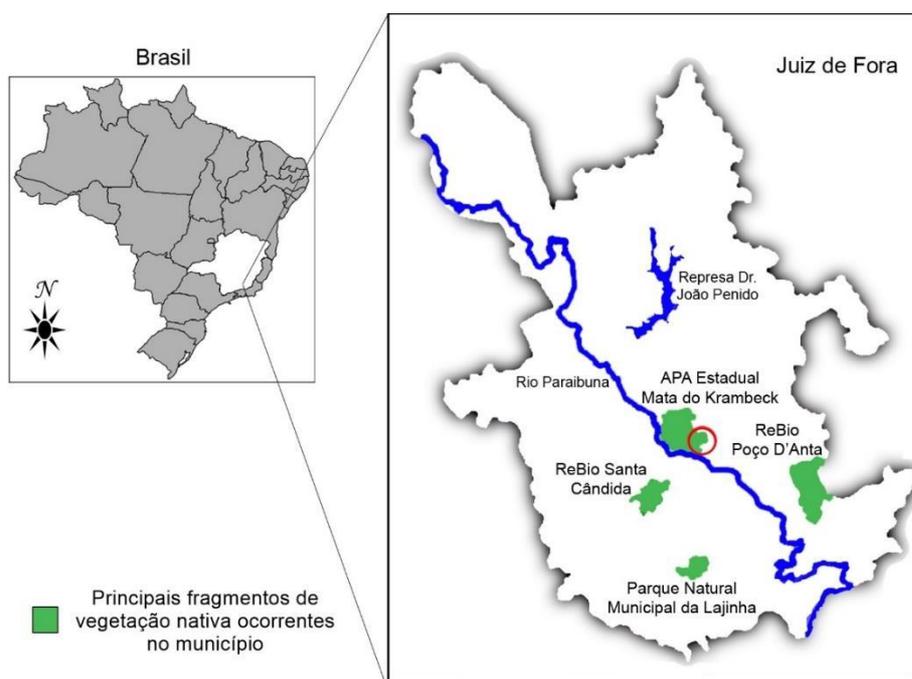
Fonte: Rocha *et al.* (2003) (Adaptado pela autora)

Os principais movimentos de massa ocorrentes na cidade, segundo o PDDU-JF (2000), são escorregamentos em solos residuais, corridas de terra, queda de blocos rochosos, deslocamentos de depósitos de tálus (avalanche de detritos), queda de matacões e escorregamentos a partir da superfície de contato solo/rocha.

3.1.2 Local de estudo

Na Figura 74 é apresentado um mapa com os principais fragmentos de vegetação nativa no município, dentre eles a Mata do Krambeck, onde localiza-se o JB-UFJF (circulado em vermelho). A vegetação remanescente no local é classificada como Floresta Estacional Semidecidual Montana (IBGE, 2012). Há predominância de rochas do tipo gnaisse e granito, muito antigas, recobertas por uma camada originada pelo processo de sedimentação e solo do tipo latossolo vermelho amarelo distrófico (FEAM, 2011). O latossolo em estudo classifica-se quanto à origem como solo residual.

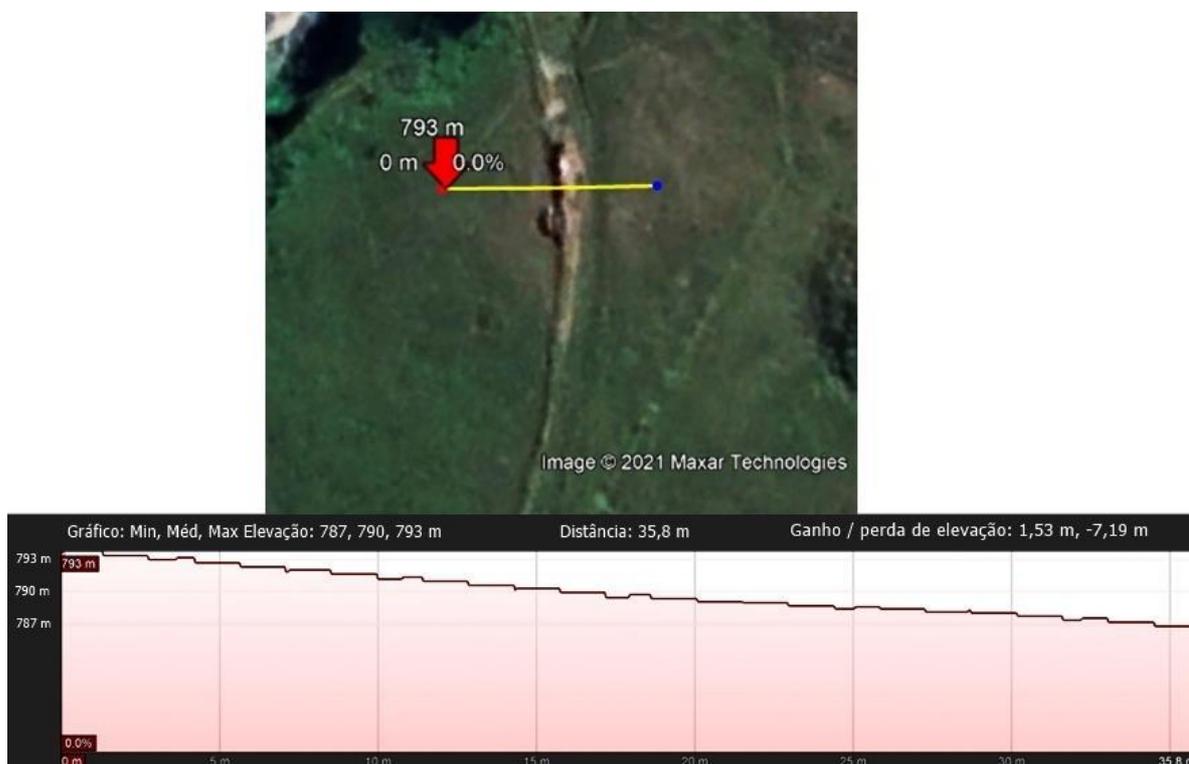
Figura 74 - Localização do JB-UFJF em Juiz de Fora



Fonte: Silva *et al.* (2020) (Adaptado pela autora)

Para complementar a compreensão do relevo da área em estudo, foram gerados perfis de elevação por meio das imagens do Google Earth, sendo a Figura 75 o perfil transversal (sem mostrar a voçoroca) e a Figura 76 o perfil longitudinal.

Figura 75 - Perfil de elevação transversal



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

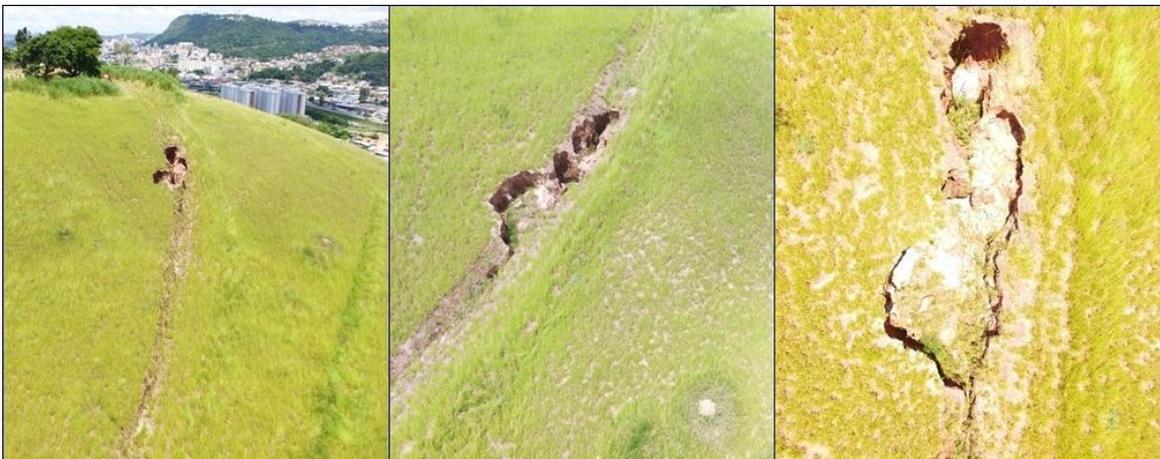
Figura 76 - Perfil de elevação longitudinal



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

No dia 20 de fevereiro de 2020, com a participação do professor e coordenador do Núcleo de Engenharia Pública da UFJF, Jordan Henrique de Souza, foi feita uma visita em campo para realizar o aerolevanteamento da voçoroca, utilizando o drone *Phanton 3 Professional*. Algumas fotos obtidas da voçoroca por fotogrametria e voo livre podem ser observadas na Figura 77. A partir desse levantamento, foram gerados mapas que possibilitaram o conhecimento da delimitação e altimetria em maiores detalhes da região e da voçoroca em estudo (CARVALHO, 2020).

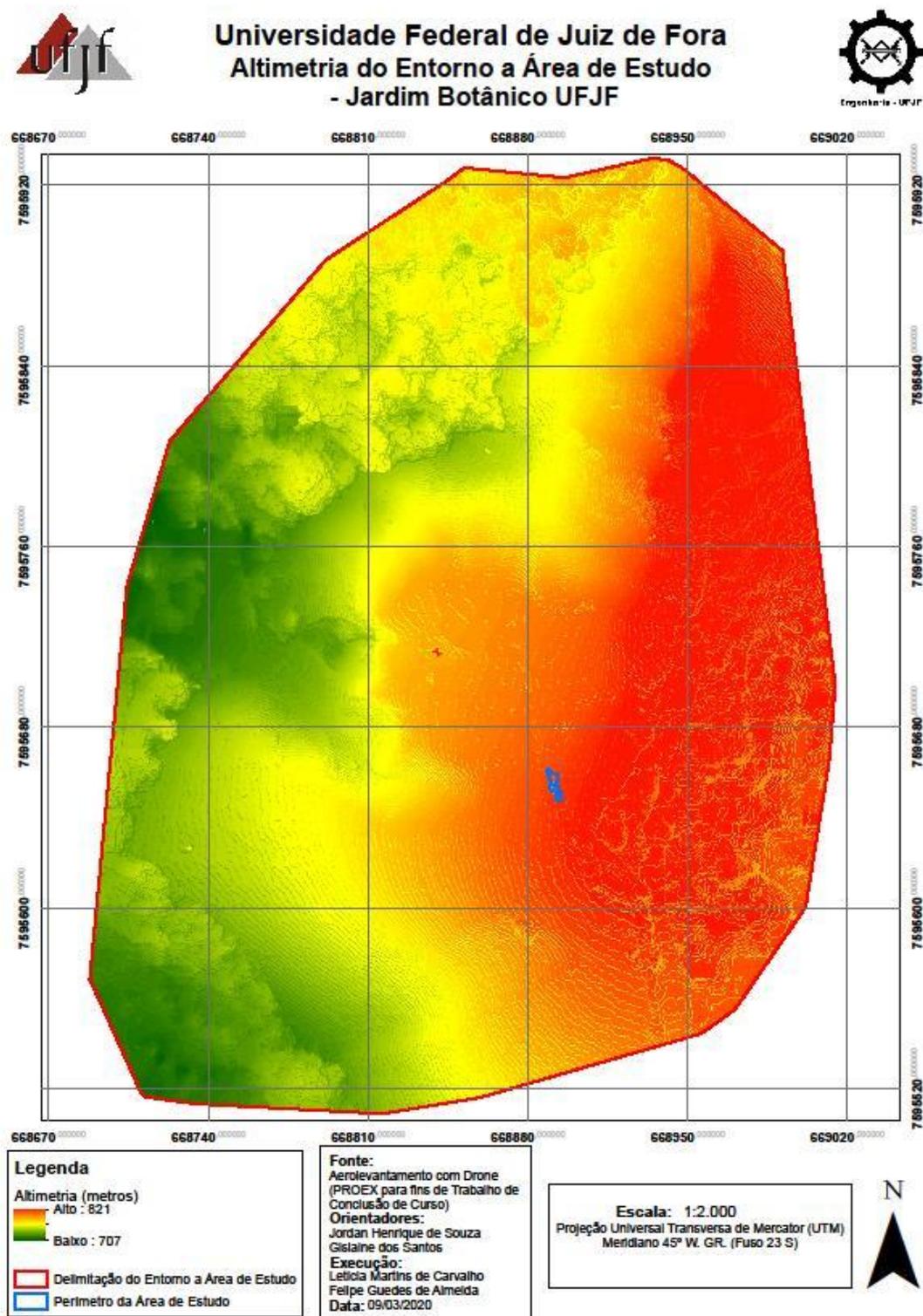
Figura 77 - Fotografia aérea da voçoroca do JB-UFJF



Fonte: Acervo pessoal (2020)

O entorno da região da área degradada em estudo varia de 707 m a 821 m de altitude e pode ser observado na Figura 78. Já a voçoroca, em específico, está delimitada em azul na mesma figura e compreende as altitudes entre 782 m e 786 m, conforme Carvalho (2020).

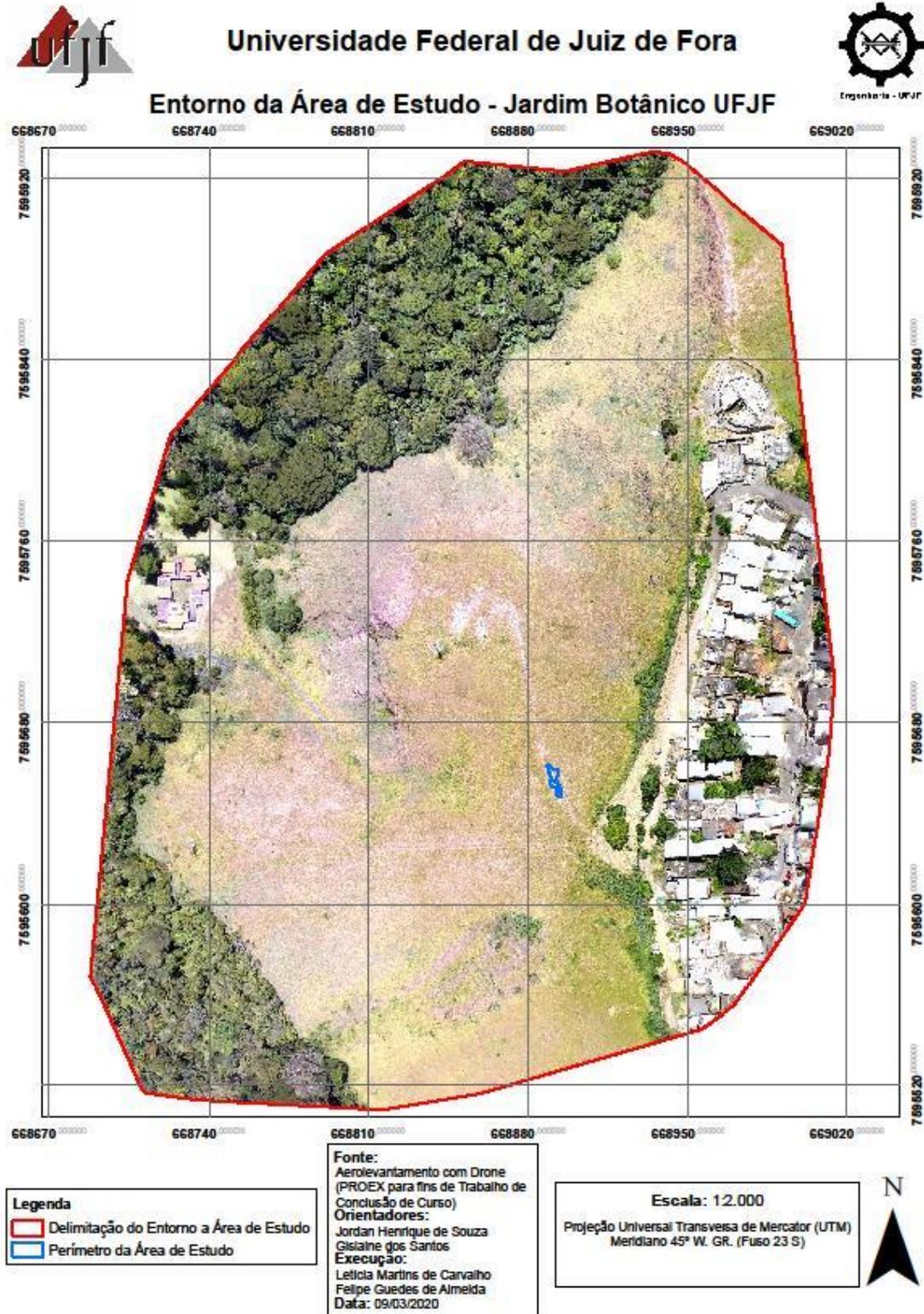
Figura 78 - Altimetria da região em estudo



Fonte: Carvalho e Guedes (2020 apud CARVALHO, 2020)

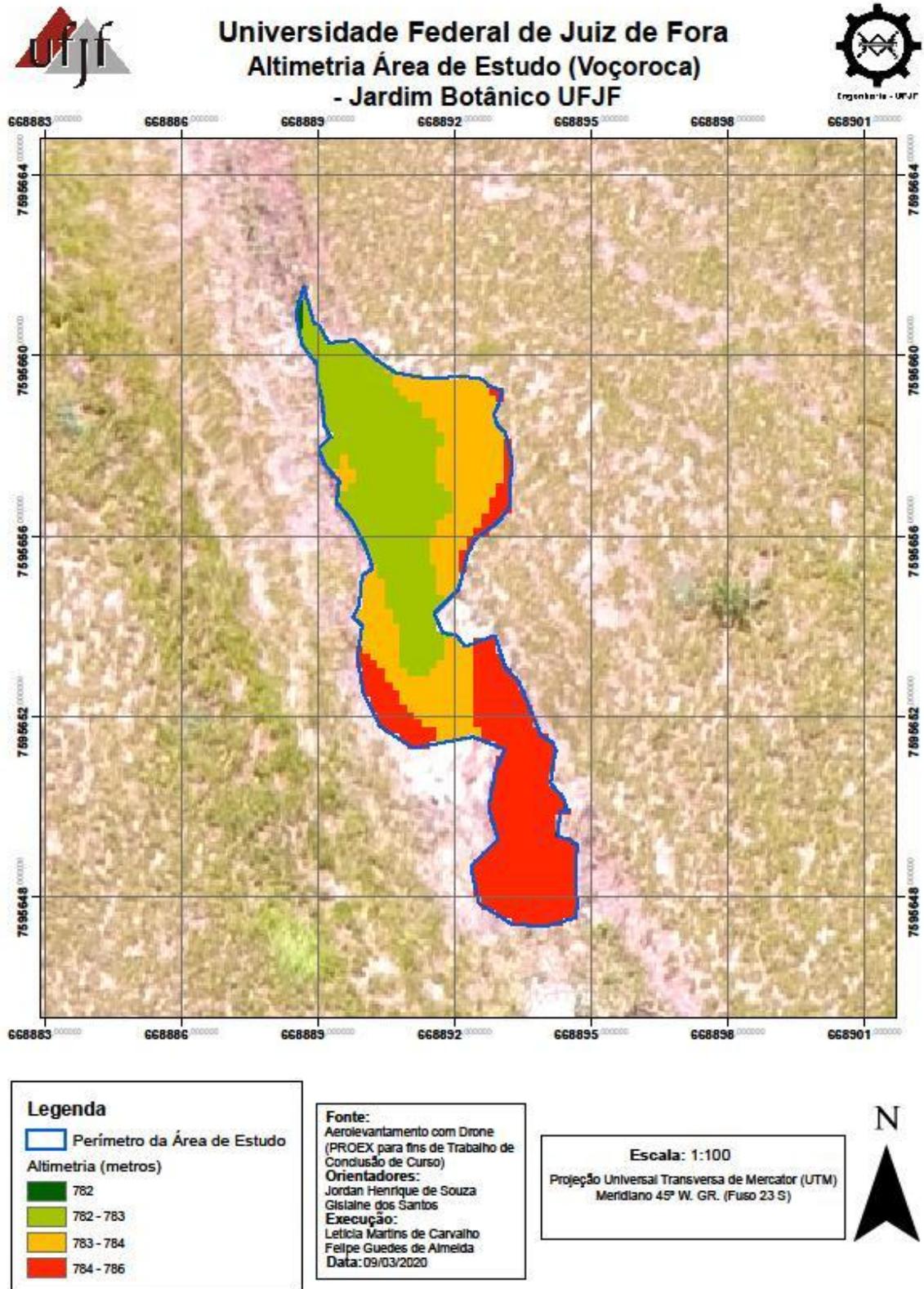
Na Figura 79, pode-se observar a delimitação da voçoroca e sua localização em relação ao acesso pela Rua Adelaide Maria da Conceição, no bairro Eldorado. Já o mapa da Figura 80 apresenta o levantamento altimétrico da voçoroca.

Figura 79 - Delimitação da região ao entorno da voçoroca



Fonte: Carvalho e Guedes (2020 *apud* CARVALHO, 2020)

Figura 80 - Altimetria da voçoroca



Fonte: Carvalho e Guedes (2020 *apud* CARVALHO, 2020)

Os autores constataram que a erosão possuía, no dia do levantamento, uma profundidade máxima de, aproximadamente, 4 m; extensão longitudinal máxima de, aproximadamente, 16,5

m; e extensão transversal variando de 0,5 m a 4,5 m. O perímetro foi calculado em 40,08 m e a área (em projeção horizontal) de 36,9 m², caracterizando-se como uma voçoroca de pequeno porte e média profundidade, conforme classificação de Tavares *et al.* (2008) visto no Quadro 3. Cabe ressaltar que a feição erosiva se encontra em estágio expansivo e está alongando-se na parte inferior na forma de ravinas e sulcos.

3.2 COLETA DE AMOSTRAS INDEFORMADAS

Optou-se por realizar as coletas no solo 3 do Quadro 27, classificado como areia siltosa, pois este apresentou comportamento moderadamente dispersivo, sendo mais suscetível à erosão que o solo 1 (levemente dispersivo) e o solo 2 (não dispersivo), conforme visto no tópico 2.7.2. Como pode-se observar na Figura 81, a coleta foi feita na mesma direção das cavas para coleta de amostras deformadas do solo 3 realizadas por Carvalho (2020).

Figura 81 - Localização da coleta de amostras indeformadas (seta vermelha) em comparação à coleta de amostras deformadas (setas azuis) de Carvalho (2020)



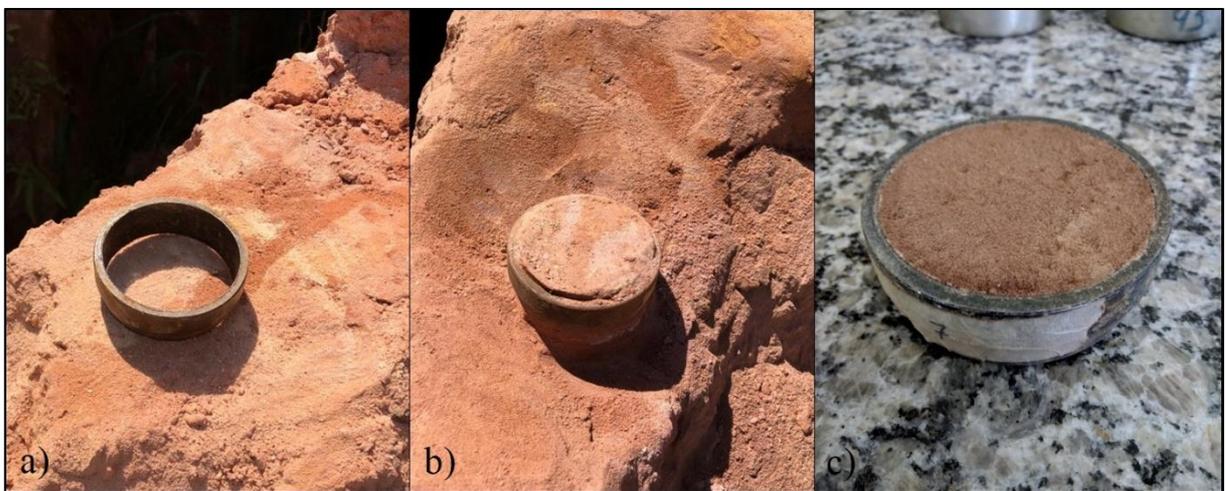
Fonte: Acervo pessoal (2020)

Para obtenção das amostras indeformadas é necessário haver o mínimo de perturbação, procurando manter a estrutura original do solo e suas condições de umidade e compactação ou consistência naturais. Os instrumentos utilizados para esse tipo de coleta foram: pá de jardinagem, facão, espátula, faquinha de serra, luvas, papel filme PVC, saco plástico e etiqueta de identificação.

Para o ensaio de cisalhamento direto, foram coletadas 16 amostras indeformadas de solo entre 30 de novembro de 2020 e 22 de fevereiro de 2021, utilizando anéis metálicos de 6 cm de diâmetro e 2 cm de altura (Figura 82-a). O procedimento consiste em abrir uma cava com

superfície horizontal de forma que o anel caiba em seu interior. O anel deve ser cravado lentamente, de forma que a estrutura do solo não seja comprometida, e durante este processo deve haver o desconfinamento lateral, até que o solo preencha todo o seu espaço, conforme observa-se na Figura 82-b. Em seguida, a parte inferior do corpo de prova é talhada com a faca, a amostra é envolvida no papel filme com identificação, colocada dentro de um saco plástico para proteção durante o transporte e, por fim, levada ao laboratório, onde é rasada e preparada para o ensaio (Figura 82-c).

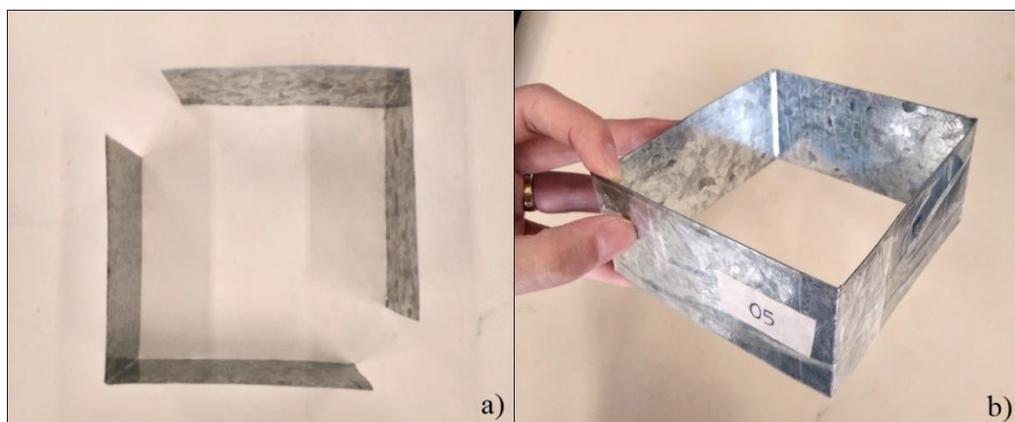
Figura 82 - Anel de cisalhamento para ser cravado no solo (a), obtenção da amostra indeformada (b) e corpo de prova pronto para ser ensaiado no laboratório (c)



Fonte: Acervo pessoal (2020)

Para o ensaio de Inderbitzen modificado, foram coletados 5 blocos indeformados de solo de acordo com a NBR 9604 (ABNT, 2016c), em março de 2021. Para auxiliar a coleta, foram utilizados moldes de chapa metálica em formato de L e unidos com fita adesiva (Figura 83). Esses moldes foram cravados no solo a fim de obter blocos de aresta de 10 cm e altura 5 cm.

Figura 83 - Chapas metálicas em formato de L (a) e o molde para coleta (b)



Fonte: Acervo pessoal (2021)

As etapas consistem em: abrir a cava no terreno, nivelar a superfície e cravar o molde metálico aos poucos, realizando a escavação lateral para desconfinamento (Figura 84-a). Após o solo ocupar todo o molde, é feito o corte da base e a amostra é envolvida no papel filme com identificação, para ser levada ao laboratório (Figura 84-b). No momento do ensaio, para retirar a amostra, basta remover a fita adesiva e abrir o molde sem deformar o solo (Figura 84-c e Figura 84-d).

Figura 84 - Coleta da amostra em campo (a), bloco coletado e protegido (b), abertura do molde (c) e corpo de prova pronto para ser ensaiado (d)



Fonte: Acervo pessoal (2021)

3.3 ENSAIOS GEOTÉCNICOS

3.3.1 Caracterização química

Para fazer a caracterização química dos solos 1, 2 e 3 (Quadro 27), encaminhou-se uma amostra deformada de cada tipo de solo para o Laboratório de Rotina do Departamento de Solos da UFV. A caracterização química foi feita a partir da análise dos seguintes parâmetros: matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica efetiva (CTC_t) e potencial (CTC_T), soma de bases (SB), saturação por alumínio (m) e por bases (V), teores trocáveis de Ca, K, Mg e disponível de P. Os ensaios foram realizados conforme o Manual de Métodos de Análises de Solo (EMBRAPA, 2017), em dezembro de 2020.

3.3.2 Ensaio de cisalhamento direto

O ensaio de cisalhamento direto é um dos procedimentos mais antigos e simples para determinação da resistência ao cisalhamento e baseia-se diretamente no critério de Mohr-Coulomb. Aplica-se uma tensão normal em uma amostra de solo e verifica-se a tensão cisalhante que provoca a ruptura. Com os resultados obtidos a partir de distintas tensões, é possível traçar a envoltória de resistência e, assim, determinar os parâmetros de interesse:

intercepto coesivo (c) e ângulo de atrito (ϕ). O ensaio foi feito com base na norma americana D3080-98 (ASTM, 1998), entre os meses de dezembro de 2020 e março de 2021. O equipamento para realização do ensaio pode ser observado na Figura 85.

Figura 85 - Equipamento do ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Acervo pessoal (2020)

O corpo de prova (CP) é colocado parcialmente numa caixa de cisalhamento bipartida, onde a parte inferior se desloca enquanto a parte superior é impedida pela célula de carga, conforme a Figura 86, gerando a superfície horizontal de ruptura.

Figura 86 - Caixa bipartida do aparelho de cisalhamento

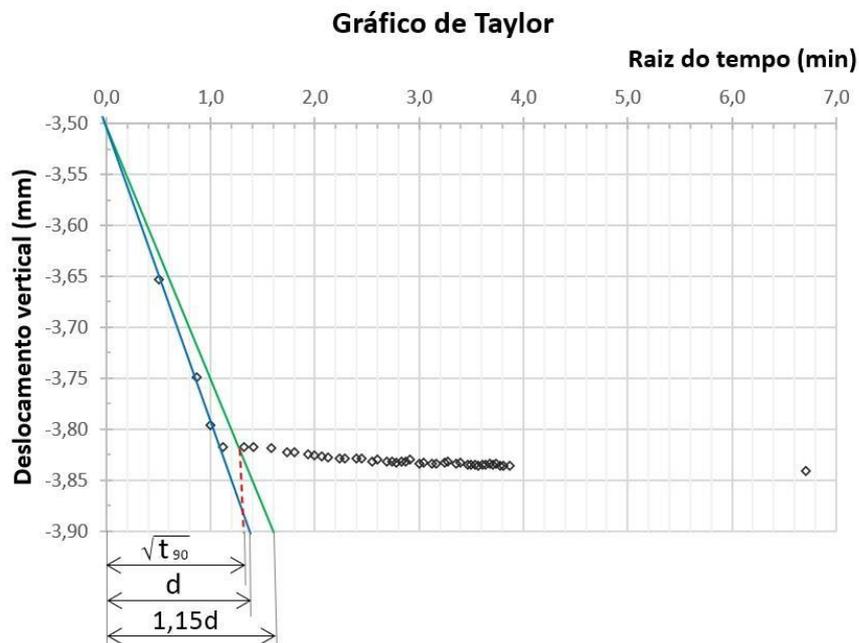


Fonte: Acervo pessoal (2020)

A primeira etapa consiste na saturação do solo, em que se deve deixar o CP inundado por, pelo menos, 24 horas. A segunda etapa consiste no adensamento do solo, onde aplica-se uma carga que resulte na tensão normal desejada para o ensaio e que também deve-se aguardar, no mínimo, 24 horas. A partir dos resultados desta fase, estima-se a velocidade para a etapa seguinte, que é o cisalhamento do solo.

Para o cálculo da velocidade, é gerado um Gráfico de Taylor com os dados da raiz do tempo em minutos pelo deslocamento vertical (mm), como mostrado no Gráfico 2. Inicialmente, traça-se uma reta que liga os primeiros pontos da queda da curva, estendendo-a para os dois eixos (em azul), e obtendo uma abscissa d . Acrescentando 15% no valor de d , deve-se marcar a nova abscissa e fazer uma nova reta partindo desse ponto até o ponto em que a primeira interceptou o eixo y (em verde). A interseção desta nova reta com o gráfico de Taylor, marca um ponto cuja abscissa (tracejada em vermelho) corresponde à raiz do t_{90} . Elevando este valor ao quadrado, obtém-se, então, o valor do tempo necessário para alcançar 90% do adensamento, em minutos.

Gráfico 2 - Gráfico de Taylor com dados do adensamento



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A partir do t_{90} , calcula-se o t_{50} , pela Equação 23, que é o tempo necessário para a amostra alcançar 50% do adensamento. Em seguida, deve-se encontrar o valor de t_r , que é a estimativa total do tempo decorrido até a ruptura, por meio da Equação 24, com base na norma D3080-98 (ASTM, 1998). Por fim, é calculada a velocidade máxima de cisalhamento (d_r), pela Equação

25, onde d_f foi considerado 5 mm (indicado para solo fino) e 9 mm (estimativa de deslocamento horizontal máximo na falha).

$$t_{50} = \frac{t_{90}}{4,28} \quad (23)$$

Onde:

t_{50} = tempo correspondente a 50% do adensamento, min;

t_{90} = tempo correspondente a 90% do adensamento, m.

$$t_f = 50 \times t_{50} \quad (24)$$

Onde:

t_f = estimativa total do tempo decorrido até a falha, min;

t_{50} = tempo correspondente a 50% do adensamento, min.

$$d_r = \frac{d_f}{t_f} \quad (25)$$

Onde:

d_r = velocidade de cisalhamento, mm/min;

d_f = estimativa do deslocamento horizontal na falha, mm;

t_f = estimativa do tempo decorrido até a falha, min.

Por fim, a etapa de cisalhamento, consiste em aplicar esta velocidade constante de deslocamento na parte inferior da caixa. Para cada valor de tensão normal aplicada, obtém-se um valor de tensão cisalhante na ruptura. O ensaio pode ser finalizado quando o deslocamento horizontal atinge entre 8 mm e 9 mm, que é o limite de deslocamento da caixa.

Para obter a envoltória de resistência do solo deve-se realizar pelo menos três ensaios com diferentes valores de tensão normal. Tais valores são definidos com base na faixa de tensões atuantes no campo. Considerando a profundidade da voçoroca de 4 m e a sobrecarga de 10 kPa no topo do talude, conforme a NBR 11682 (ABNT, 2009), adotou-se os valores de 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa, que compreende a faixa de tensões para o solo em estudo, com três repetições cada.

A leitura dos dados obtidos (força tangencial, deslocamento vertical e horizontal) foi feita por meio do *software* CDREV, desenvolvido pelo engenheiro Ricardo Gil da COPPE/UFRJ. A tensão cisalhante é obtida dividindo-se a força tangencial pela área que resiste ao cisalhamento. Esta área, contudo, não é a mesma do corpo de prova, visto que ela se reduz ao longo do ensaio, devido ao deslocamento. Sendo assim, a área utilizada é calculada por meio da Equação 26, desenvolvida por Santos (2014).

$$A_c = \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \left\{ \pi - 2 \sin^{-1} \left(\frac{dh}{D} \right) - \sin \left[\pi - 2 \sin^{-1} \left(\frac{dh}{D} \right) \right] \right\} \quad (26)$$

Onde:

A_c = área corrigida, m²

D = diâmetro, m;

dh = deslocamento horizontal, m.

Para este trabalho foram utilizados dois critérios de ruptura, a fim de fazer uma comparação entre seus resultados e identificar qual seria o mais adequado para o solo em questão. O critério 1 é obtido a partir do maior valor da razão entre tensão cisalhante e tensão normal (τ/σ máximo), já o critério 2 considera a deformação limite ou deslocamento horizontal máximo (Dh máximo). A escolha final do critério depende do tipo de obra e do rigor que deve ser considerado, como o nível de deformação esperado na obra.

3.3.3 Ensaio de Inderbitzen modificado

O ensaio de Inderbitzen permite avaliar a erosão superficial do solo, a partir da simulação do escoamento a diferentes inclinações. Com o resultado em valores de perdas de solo, é possível estimar o fator de erodibilidade. O ensaio seguiu o procedimento sugerido por Grandó (2011), por isso chamado de “modificado”, sendo realizado nos meses de maio e junho de 2021. O equipamento, montado por Mateus Lino Leite e utilizado em Vieira (2017), é formado por uma fonte de gotejamento (chuveiro), estruturado com tubos de PVC, uma rampa gradeada e recipientes para coleta, conforme mostrado na Figura 87.

Figura 87 - Equipamento do ensaio de Inderbitzen modificado



Fonte: Acervo pessoal (2021)

Cabe colocar que, inicialmente, este ensaio seria feito utilizando o ângulo definido pelos ensaios geotécnicos e os ângulos máximos citados pela literatura a fim de comparar os valores de perdas de solo e avaliar a erodibilidade para as diferentes situações, realizando o ensaio com um número de repetições suficiente para fazer o tratamento estatístico dos dados. Porém, não foi possível realizar desta maneira em razão da pandemia do Covid-19, que impossibilitou os acessos.

Em virtude disso, optou-se por verificar a tendência de comportamento do solo quanto à erosão utilizando apenas um ângulo e três repetições. A inclinação da rampa foi escolhida a partir da análise de estabilidade do talude em estudo, que considera os parâmetros de resistência resultantes do ensaio de cisalhamento direto. A distância entre a origem de gotejamento e a amostra foi de, aproximadamente, 20 cm e a vazão foi de 50 ml/s.

As coletas devem ser feitas nos tempos de 1, 3, 5, 9, 15 e 30 minutos. Cada recipiente é deixado em repouso para haver sedimentação das partículas (Figura 88-a) e, em seguida, o excesso de água é retirado por sifonamento. Então, o material de solo é transferido para vasilhas, como na Figura 88-b, que são colocadas em estufa para secagem por 24 horas. Após este período, é possível obter a massa de solo seco (Figura 88-c), para realização dos cálculos seguintes.

Figura 88 - Recipientes em repouso (a), material que foi para estufa (b) e após secagem (c)



Fonte: Acervo pessoal (2021)

A relação entre a massa de solo erodido e a área superficial da amostra em contato com o gotejamento permite uma classificação do solo quanto à erodibilidade, divididas em: faixa A (mais resistente à erosão), B e C (menos resistente à erosão). O Quadro 30 indica os valores definidos para cada faixa segundo diferentes autores (DNER, 1979 *apud* VIEIRA, 2017; FRAGASSI, 2001), sendo que Vieira (2017) fez uma interpolação dos dois primeiros, relacionando com o valor da vazão de gotejamento, a qual foi a mesma utilizada neste trabalho.

Quadro 30 - Faixas de classificação de erodibilidade

Referência	Vazão (cm ³ /s)	Faixas de classificação (g/cm ² /h)		
		A	B	C
DNER (1979) <i>apud</i> Vieira (2017)	314	0 - 7,0	7,0 - 50,0	> 50,0
Fragassi (2001)	25	0 - 0,8	0,8 - 25,0	> 25,0
Vieira (2017)	50	0 - 1,35	1,35 - 27,0	> 27,0

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

3.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

Segundo a NBR 11682 (ABNT, 2009), devem ser realizados no mínimo 12 ensaios de cisalhamento direto, contemplando três tensões de ensaio e quatro repetições, ou quatro tensões e três repetições, requisito que foi atendido no trabalho. Os pontos resultantes dos ensaios foram plotados em um único gráfico, calculando-se, por regressão linear, o intercepto coesivo médio e a tangente do ângulo de atrito médio. Tais parâmetros são utilizados na Equação 27, resultando na resistência ao cisalhamento média, por regressão linear.

$$\tau_{i,m} = \sigma_i \tan \varphi_m + c_m \quad (27)$$

Onde:

$\tau_{i,m}$ = tensão de cisalhamento média, kPa;

σ_i = tensão normal, kPa;

c_m = intercepto coesivo médio, kPa;

$\tan \varphi_m$ = tangente do ângulo de atrito média, adimensional.

A tensão normal média é dada pela média aritmética das tensões obtidas nos ensaios, conforme a Equação 28.

$$\sigma_m = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i}{N} \quad (28)$$

Onde:

σ_m = tensão normal média, kPa;

σ_i = tensão normal em cada ensaio, kPa;

N = número de determinações experimentais, adimensional.

Além disso, foi utilizado o método semi-probabilístico para obter os parâmetros finais de interesse. O erro médio quadrático é calculado pela Equação 29 para analisar a variabilidade da resistência ao cisalhamento, sendo também aplicado em outras fórmulas que serão citadas.

$$EMQ = \frac{\sum_{i=1}^N (\tau_i - \tau_{i,m})^2}{N - 2} \quad (29)$$

Onde:

EMQ = erro médio quadrático, kPa²;

τ_i = tensão cisalhante de ruptura medida em cada ensaio, kPa;

$\tau_{i,m}$ = tensão cisalhante média, kPa;

N = número de determinações experimentais, adimensional;

Conforme a ABNT (2009), a margem de erro considerada deve ser de $\alpha = 5\%$ (sendo 2,5% para cada cauda da distribuição), delimitando uma faixa de 95% de probabilidade de que os pontos individuais se agrupem. O termo $t(N-2)$ é obtido pela tabela T-Student com margem de erro $\alpha/2$ (metade do erro para cada cauda de distribuição) e (N-2) graus de liberdade, representando o número de desvios-padrão acima e abaixo da reta média de regressão. O desvio-padrão da tensão cisalhante é dado pela equação 30.

$$DP(\tau_{i,m}) = \sqrt{EMQ \times \left[1 + \frac{1}{N} + \frac{(\sigma_i - \sigma_m)^2}{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \sigma_m)^2} \right]} \quad (30)$$

Onde:

DP($\tau_{i,m}$) = desvio padrão da tensão cisalhante média, kPa;

EMQ = erro médio quadrático, kPa²;

N = número de determinações experimentais, adimensional;

σ_i = tensão normal em cada ensaio, kPa;

σ_m = tensão normal média, kPa.

A partir desses dados, calcula-se os limites de confiança, obtidos ponto a ponto (Equações 31 e 32), conforme a ABNT (2009). Desta forma, obtém-se uma linha superior e inferior à reta média, definindo a faixa de aceitação dos pontos na análise de regressão. Os pontos que se encontrarem fora da região limitada devem ser expurgados, permanecendo pelo menos 10 pontos após o expurgo.

$$\tau_{i,m\acute{a}x} = \tau_{i,m} + t(N - 2) \times DP(\tau_{i,m}) \quad (31)$$

$$\tau_{i,m\acute{i}n} = \tau_{i,m} - t(N - 2) \times DP(\tau_{i,m}) \quad (32)$$

Onde:

$\tau_{i,m\acute{i}n}$ = limite de confiança mínimo da tensão cisalhante, kPa;

$\tau_{i,m\acute{a}x}$ = limite de confiança máximo da tensão cisalhante, kPa;

$\tau_{i,m}$ = tensão cisalhante média, kPa;

$t(N-2)$ = obtido do inverso da distribuição t de Student com margem de erro $\alpha/2$ (metade do erro para cada cauda de distribuição) e $(N-2)$ graus de liberdade, adimensional;

$DP(\tau_{i,m})$ = desvio padrão da tensão cisalhante, kPa;

O ângulo de atrito de projeto (φ_{proj}) equivale ao ângulo de atrito da reta média de regressão. Já o intercepto coesivo de projeto é obtido pela Equação 33.

$$c_{proj} = c_m - t(N - 2) \times DP(c) \quad (33)$$

Onde:

c_{proj} = intercepto coesivo de projeto, kPa;

c_m = intercepto coesivo médio, kPa;

$t(N-2)$ = obtido do inverso da distribuição t de Student com margem de erro $\alpha/2$ (metade do erro para cada cauda de distribuição) e $(N-2)$ graus de liberdade, adimensional;

$DP(c)$ = desvio padrão do intercepto coesivo, kPa.

No Quadro 31 estão dispostas outras equações para os cálculos de variância, desvio padrão, coeficiente de variação e coeficiente de correlação da reta, que fazem parte da análise estatística.

Quadro 31 - Equações para análise estatística probabilística

Grandeza	Equação
Variância do intercepto de coesão	$V(c) = EMQ \times \left[\frac{1}{N} + \frac{\sigma_m^2}{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \sigma_m)^2} \right]$ (34)
Variância da tangente do ângulo de atrito interno	$V(\tan \varphi) = \frac{EMQ}{\sum_{i=1}^N (\sigma_i - \sigma_m)^2}$ (35)
Desvio padrão do intercepto coesivo	$DP(c) = \sqrt{V(c)}$ (36)
Desvio padrão da tangente do ângulo de atrito	$DP(\tan \varphi) = \sqrt{V(\tan \varphi)}$ (37)
Desvio padrão do ângulo de atrito	$DP(\varphi) = DP(\tan \varphi) \times (\cos \varphi)^2$ (38)
Coeficiente de variação	$CV = \frac{DP}{x_m} \times 100(\%)$ (39)
Coeficiente de correlação	$r = \sqrt{R^2}$ (40)
<p>Onde:</p> <p>σ_i = tensão normal em cada ensaio, kPa;</p> <p>σ_m = tensão normal média, kPa;</p> <p>EMQ = erro médio quadrático, kPa²;</p> <p>N = número de determinações experimentais, adimensional;</p> <p>φ = ângulo de atrito, rad;</p>	

DP = desvio padrão da variável em questão, mesma unidade da variável;
 x_m = parâmetro médio obtido pela reta de regressão, mesma unidade da variável;
 R^2 = coeficiente de determinação, entre 0 e 1, adimensional.

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A classificação do coeficiente de variação é dada no Quadro 32, de acordo com Fonseca e Martins (1996) e a interpretação do coeficiente de correlação no Quadro 33, conforme Tomassetti (2012).

Quadro 32 - Classificação do coeficiente de variação (CV)

Valor do CV	Classificação
Inferior a 10%	Baixo
Entre 10% e 20%	Médio
Superior a 20%	Grande

Fonte: Fonseca e Martins (1996)

Quadro 33 - Interpretação do coeficiente de correlação (r)

Valor de r	Interpretação
1,00	Correlação perfeita
Entre 0,80 e 1,0	Muito alta
Entre 0,60 e 0,80	Alta
Entre 0,40 e 0,60	Moderada
Entre 0,20 e 0,40	Baixa
Entre 0 e 0,20	Muito baixa
0	Nula

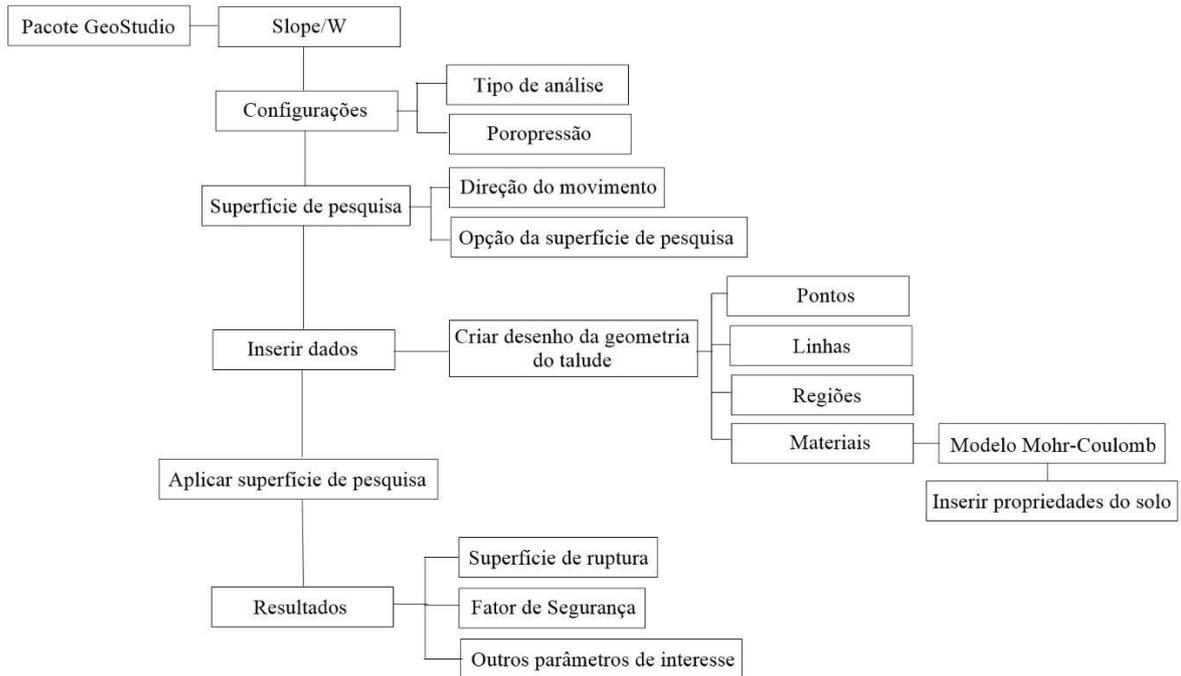
Fonte: Tomassetti (2012)

3.5 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE

Para análise de estabilidade do talude foi utilizado o programa SLOPE/W, produzido e comercializado pela GEO-SLOPE *Internacional*, que faz parte do pacote GeoStudio 2021. Este foi o *software* escolhido pois possui uma versão gratuita (*student licence*) que permite o estudo de taludes com diferentes geometrias, materiais e nível d'água.

Os principais passos necessários para realização da análise de estabilidade foram dispostos no fluxograma da Figura 89, que também serão descritos adiante.

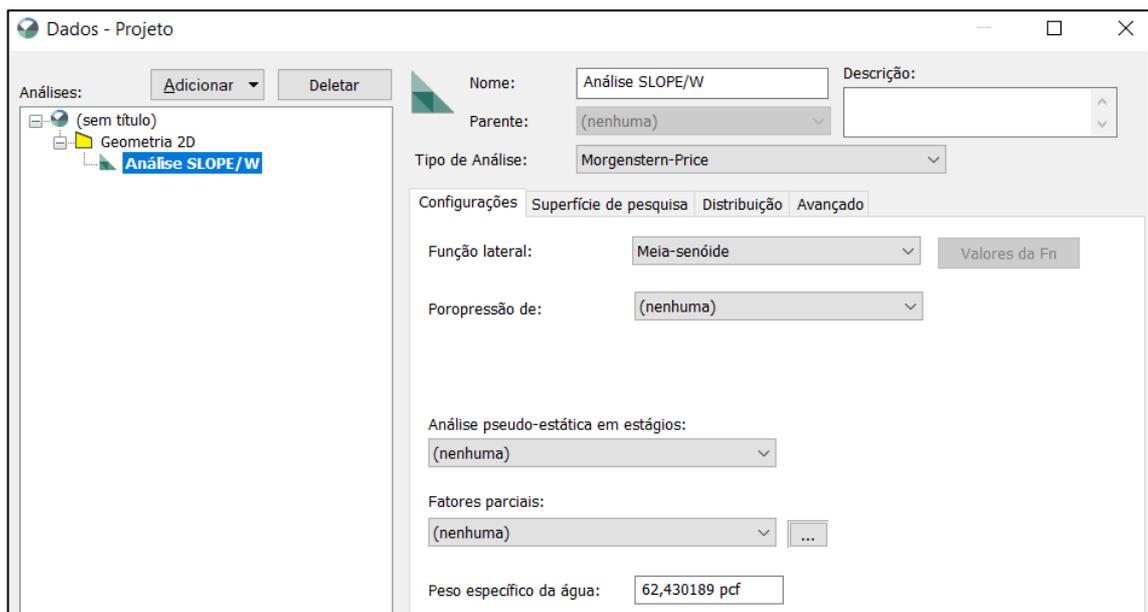
Figura 89 - Passo a passo para realizar análise de estabilidade utilizando o Geo-Slope



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Primeiramente, é escolhido o método de análise de estabilidade que será utilizado e dados sobre a linha piezométrica, conforme indicado na Figura 90. Neste trabalho foi utilizado o Método Morgenstern e Price, pois permite uma análise mais detalhada sobre qualquer tipo de superfície de ruptura. Neste caso, como não há presença de nível d'água no local, não foi definido o contorno da poropressão.

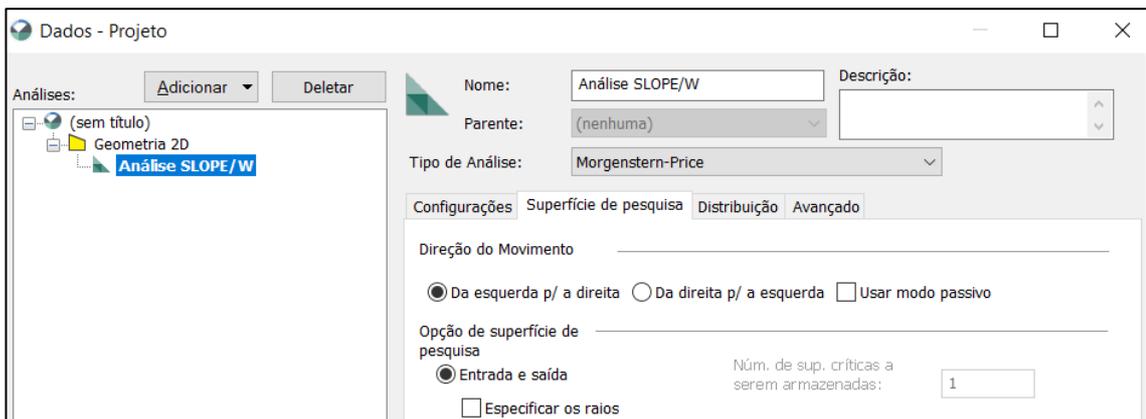
Figura 90 - Página inicial do Geo-Slope



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Em seguida, determina-se a direção do movimento (da esquerda para direita) e a opção de superfície de pesquisa (entrada e saída), conforme a Figura 91. É importante colocar que se deve alterar as unidades bases para unidades do Sistema Internacional, na opção Visualizar, seguido de Unidades.

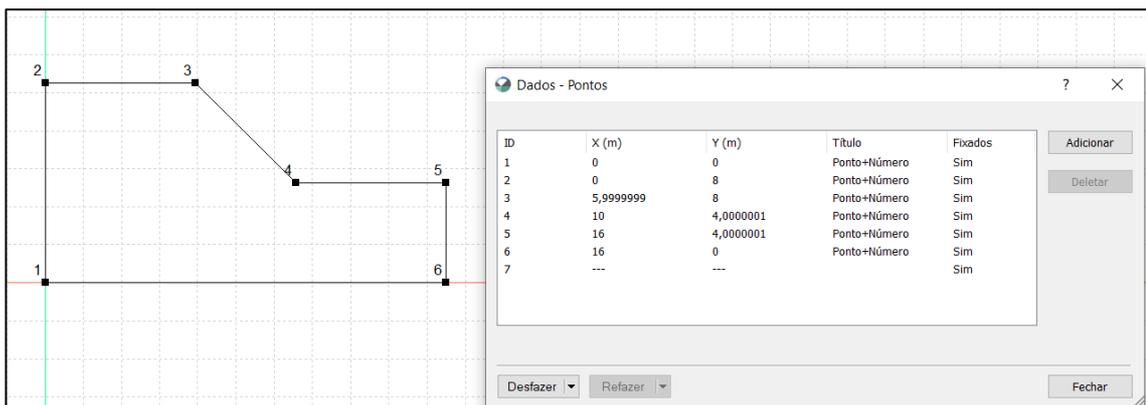
Figura 91 - Inserindo dados iniciais no Geo-Slope



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A etapa seguinte consiste em inserir o desenho da geometria do talude, usando pontos e linhas, a partir de dados do levantamento topográfico (Figura 92), criar a região e inserir as propriedades dos materiais, a saber: o peso específico do solo, o intercepto coesivo e o ângulo de atrito.

Figura 92 - Desenho da geometria do talude no Geo-Slope



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Após a inserção dos dados, aplica-se o intervalo de entrada e saída da superfície de pesquisa e inicia-se os resultados. É possível visualizar graficamente a linha de ruptura, obter o fator de segurança e outros parâmetros de interesse do solo.

Como não há edificações nem movimentação de pessoas, veículos ou animais nas proximidades do talude em estudo, é desejado um baixo nível de segurança contra perda de

vidas humanas e também contra danos materiais e ambientais, o que corresponde ao fator de segurança de 1,2, conforme visto no Quadro 18.

Dessa forma, foi feita uma análise de estabilidade fixando o FS em 1,2 e utilizando os parâmetros obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto, para identificar qual deve ser o ângulo máximo de inclinação do talude. Em seguida, também foi feita uma análise utilizando os ângulos máximos indicados pela literatura para retaludamento, a fim de verificar o FS correspondente. Esses ângulos são: 45° para solos *in situ*, conforme visto no Quadro 22; e 63°, inclinação máxima indicada pelas fabricantes de biomanta, conforme o Quadro 23.

3.6 PLANO CONCEITUAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREA DEGRADADA (PRAD)

O PRAD conceitual foi elaborado seguindo os capítulos X, XI e XII do Termo de Referência contido na Instrução Normativa nº 4 (IBAMA, 2011), que abordam as técnicas de implantação, manutenção e monitoramento do projeto de recuperação. No Quadro 34 apresenta-se a descrição detalhada desses capítulos, conforme Ibama (2011).

Quadro 34 - Descrição dos capítulos X, XI e XII do Termo de Referência para elaboração do PRAD

CAPÍTULO X: DA IMPLANTAÇÃO	Medidas de contenção de erosão, de preparo e recuperação do solo, de revegetação da área degradada incluindo espécies rasteiras, arbustivas e arbóreas
	Métodos e técnicas de recuperação da área degradada ou alterada e respectivas justificativas
	Mensuramento e mapeamento das atividades propostas
	Listagem das espécies vegetais e identificação por família, nome científico e nome vulgar
CAPÍTULO XI: DA MANUTENÇÃO	Medidas de manutenção da área objeto da recuperação, detalhando-se todos os tratamentos culturais e intervenções necessárias durante o processo de recuperação
CAPÍTULO XII: DO MONITORAMENTO	Detalhar os métodos e critérios que serão utilizados no monitoramento para avaliação do processo de recuperação

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIO DE CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

No Quadro 35 estão apresentados os resultados da análise do pH das amostras e sua classificação química e agrônômica. Pode-se dizer, portanto, que o solo 1 apresenta boa condição de acidez, enquanto os solos 2 e 3 possuem acidez elevada, devido ao baixo pH. Em geral, em solos ácidos, a disponibilidade dos macronutrientes é menor, enquanto a concentração de metais livres e elementos tóxicos é maior, prejudicando a fertilidade do solo e o desenvolvimento vegetativo.

Quadro 35 - Resultados e classificação do pH

Amostra	pH (H ₂ O)	Classificação química	Classificação agrônômica
Solo 1	5,93	Acidez média	Bom
Solo 2	4,77	Acidez elevada	Baixo
Solo 3	4,72	Acidez elevada	Baixo

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Resultados semelhantes foram observados por estudos similares ao presente trabalho. Gomide *et al.* (2011) também analisaram solos do tipo latossolo vermelho amarelo, porém de textura argilo-arenosa, em voçorocas localizadas em Lavras (MG). O pH das amostras variou entre 4,6 e 5,6, caracterizando acidez elevada do solo. Por sua vez, Pereira *et al.* (2016), em estudo de áreas degradadas da Mata Atlântica em Ubatuba (SP), encontraram solos do tipo areno-siltoso com argila, cujo pH também foi baixo, no valor de 5,1. Segundo os autores, mesmo em encostas de baixa declividade (3° a 5°), foram observadas perdas de solo superficial, relacionadas à baixa drenagem e perda de resistência do solo devido a sua acidez. Esta acidez pode estar relacionada à natureza do material de origem, ou ainda, aos processos de intemperismo ou ao manejo incorreto do solo.

A análise dos resultados foi feita com base nas classes de interpretação do Quadro 36, em consulta ao manual de adubação do solo para o estado de Minas Gerais (RIBEIRO *et al.*, 1999). Os resultados foram apresentados no Quadro 37, e classificados segundo Ribeiro *et al.* (1999) em: muito baixo (vermelho), baixo (laranja), médio (amarelo), alto (verde) e muito alto (azul).

Quadro 36 - Classes de interpretação dos componentes do solo em Minas Gerais

Característica	Classificação					
	Unidade	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
Potássio disponível (K)	mg/dm ³	≤ 15,0	16 - 40	41 - 70	71 - 120	> 120
Matéria orgânica (MO)	dag/kg	≤ 0,70	0,71 - 2,00	2,01 - 4,00	4,01 - 7,00	> 7,00
Cálcio trocável (Ca ²⁺)	cmolc/dm ³	≤ 0,40	0,41 - 1,20	1,21 - 2,40	2,41 - 4,00	> 4,00
Magnésio Trocável (Mg ²⁺)	cmolc/dm ³	≤ 0,15	0,16 - 0,45	0,46 - 0,90	0,91 - 1,50	> 1,50
Acidez trocável (Al ³⁺)	cmolc/dm ³	≤ 0,20	0,21 - 0,50	0,51 - 1,00	1,01 - 2,00	> 2,00
Acidez potencial (H + Al)	cmolc/dm ³	≤ 1,00	1,01 - 2,50	2,51 - 5,00	5,01 - 9,00	> 9,00
Soma de Bases (SB)	cmolc/dm ³	≤ 0,60	0,61 - 1,80	1,81 - 3,60	3,61 - 6,00	> 6,00
CTC efetiva (t)	cmolc/dm ³	≤ 0,80	0,81 - 2,30	2,31 - 4,60	4,61 - 8,00	> 8,00
CTC potencial (T)	cmolc/dm ³	≤ 1,60	1,61 - 4,30	4,31 - 8,60	8,61 - 15,00	> 15,00
Saturação por alumínio (m)	%	≤ 15,0	15,1 - 30,0	30,1 - 50,0	50,1 - 75,0	> 75,0
Saturação por bases (V)	%	≤ 20,0	20,1 - 40,0	40,1 - 60,0	60,1 - 80,0	> 80,0
Zinco disponível (Zn)	mg/dm ³	≤ 0,40	0,5 - 0,9	1,0 - 1,5	1,6 - 2,2	> 2,2
Manganês disponível (Mn)	mg/dm ³	≤ 2,00	3,0 - 5,0	6,0 - 8,0	9,0 - 12,0	> 12,0
Ferro disponível (Fe)	mg/dm ³	≤ 8,00	9,0 - 18,0	19,0 - 30,0	31,0 - 45,0	> 45,0
Cobre disponível (Cu)	mg/dm ³	≤ 0,30	0,4 - 0,7	0,8 - 1,2	1,3 - 1,8	> 1,8

Fonte: Ribeiro *et al.* (1999) (Adaptado pela autora)

Quadro 37 - Resultados da análise química do solo com classificação em cores

Característica	Unidade	Solo 1	Solo 2	Solo 3
Matéria orgânica (MO)	dag/kg	0,13	0,27	0,13
Cálcio trocável (Ca ²⁺)	cmol _c /dm ³	0,28	0,18	0,14
Magnésio trocável (Mg ²⁺)	cmol _c /dm ³	0,10	0,08	0,07
Acidez trocável (Al ³⁺)	cmol _c /dm ³	0,39	0,59	0,30
Acidez potencial (H + Al)	cmol _c /dm ³	1,00	1,30	0,80
Soma de Bases (SB)	cmol _c /dm ³	0,38	0,26	0,21
CTC efetiva (t)	cmol _c /dm ³	0,77	0,85	0,51
CTC potencial (T)	cmol _c /dm ³	1,38	1,56	1,01
Saturação por alumínio (m)	%	50,60	69,40	58,80
Saturação por bases (V)	%	27,50	16,70	20,80
Potássio disponível (K)	mg/dm ³	0,00	0,00	0,00
Zinco disponível (Zn)	mg/dm ³	0,25	1,12	0,68
Manganês disponível (Mn)	mg/dm ³	1,00	0,60	0,40
Ferro disponível (Fe)	mg/dm ³	17,00	13,20	7,00
Cobre disponível (Cu)	mg/dm ³	0,38	0,39	0,40

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Dados os resultados, observa-se que há valores muito baixos de Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ para os três solos. A disponibilidade desses elementos, que é importante para nutrição das plantas, não depende somente de sua concentração na solução do solo, mas principalmente da capacidade do solo em mantê-la, conforme Melo *et al.* (2009). O teor de Ca, Mg e K na solução pode diminuir pela remoção dos elementos pelas plantas ou por lixiviação. Conforme Gaia-Gomes *et al.* (2020), as perdas significativas dos atributos aumentam à medida que o solo fica mais exposto.

O Ca e Mg são importantes na formação de carbonatos que melhoram o pH dos solos, formando minerais como a calcita (CaCO_3) e a dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), que são os principais componentes dos calcários utilizados como corretivos da acidez dos solos (MELLO; PEREZ, 2009). O K solução constitui a forma mais prontamente disponível às plantas, mas é também facilmente lixiviável, especialmente em solos arenosos e com baixa CTC (MELO *et al.*, 2009).

Sendo assim, os baixos teores encontrados nos resultados indicam uma incapacidade do solo de fazer trocas catiônicas com as bases trocáveis, que são elementos importantes para sua fertilidade. Em consequência disso, a SB e a CTC efetiva dos solos também são baixas, mesmo no solo 1 que apresentou um pH bom, segundo a classificação agrônômica, de acidez média.

Ao mesmo tempo, os valores de acidez trocável foram de baixo a médio, como esperado em solos ácidos. A saturação por alumínio atingiu valores altos, o que é prejudicial ao solo, pois há um alto índice de Al^{3+} em relação ao total de cátions no complexo de troca e este elemento, quando em concentrações altas nos solos, torna-se tóxico às plantas (MELLO; PEREZ, 2009). Um dos fatores determinantes para esses índices é a cobertura vegetal, que não é observada na voçoroca em estudo. Segundo Gaia-Gomes *et al.* (2020), a falta de vegetação reduz a fertilidade do solo e aumenta os índices de Al^{3+} e (H + Al).

Conforme Mello e Perez (2009), o Al é liberado de minerais primários durante processos de intemperismo, precipitando e formando minerais secundários, como aluminossilicatos e óxidos de Al. Essas reações são importantes no estudo da nutrição vegetal, pois o Al trocável que, inicialmente, é uma consequência da acidificação dos solos, com o tempo passa a ser uma das principais causas potenciais de acidez ativa do solo. Em consequência da alta saturação por alumínio, a saturação por bases atingiu valores baixos e muito baixos, confirmando que os solos em questão são classificados como distróficos.

Gomide *et al.* (2011), citados anteriormente, identificaram que a erosão hídrica foi responsável por um decréscimo acentuado na fertilidade do solo, aumentando os teores de Al^{3+} , H + Al e saturação por alumínio, além de diminuir os índices de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , P e matéria orgânica, com resultados semelhantes ao presente trabalho. O efeito da baixa fertilidade também foi observado por Silva *et al.* (2008), que analisaram solos de áreas degradadas de pastagens abandonadas em Itaboraí (RJ). Segundo os autores, a baixa fertilidade está associada ao manejo sem reposição de nutrientes e à queima anual, que aumentam a velocidade da mineralização. As amostras também apresentaram altos índices de saturação por alumínio e baixos valores de SB e V, além de um pH ainda mais baixo, com valores de 4,08 a 4,3.

O teor de matéria orgânica foi classificado como muito baixo para os três solos em estudo, o que já era esperado pelo resultado dos outros índices, e por se tratar de solos arenosos

e ácidos. Conforme Dick *et al.* (2009), solos argilosos tendem a possuir maiores estoques de MO que solos arenosos, devido à textura e mineralogia da fração argila, que permite, por exemplo, uma maior superfície específica e quantidade de cargas, possibilitando mais interações organominerais. Além disso, a atividade dos microrganismos responsáveis pela mineralização da MO e liberação dos nutrientes às plantas é inibida ou diminuída em ambientes de acidez excessiva. Gomide *et al.* (2011) também observaram uma redução da biomassa microbiana nas regiões de voçorocas sem cobertura vegetal.

A biomassa microbiana é essencial nos processos de decomposição de resíduos, na estabilização dos agregados e no fornecimento de nutrientes à vegetação, como nitrogênio, fósforo e enxofre. A MO é uma grande fonte de N, uma fonte secundária de P, se comparado com a quantidade fornecida pela fração mineral, e a principal fonte de S para as plantas. A maioria desses componentes tende a ser reciclado rapidamente pela biota do solo, porém, parte desse material pode ser protegida nos agregados do solo e nas substâncias húmicas, sendo preservada da decomposição microbiana (MALAVOLTA, 1980; DICK *et al.*, 2009).

Além da mineralização por fungos e bactérias, a erosão do solo pode ser outra importante causa da perda de MO, tanto na fase de desagregação quanto na fase de transporte, conforme mencionou Dick *et al.* (2009). O impacto das gotas de chuva expõe o material orgânico protegido fisicamente, estimulando, portanto, a decomposição e mineralização do mesmo, já o transporte pelo escoamento superficial exerce ação direta e imediata, removendo fisicamente o material orgânico da área.

Além disso, os micronutrientes Mn, Fe, Zn e Cu também apresentaram valores de baixo a muito baixo, com exceção do Zn para o solo 2, que obteve valor médio. O Zn e Cu podem se tornar tóxicos às plantas quando em excesso no solo, e o Mn é um bom indicador de contaminação ambiental, pois denuncia condições propícias à mobilidade de outros metais pesados, considerados mais tóxicos. A presença dos óxidos de Fe também é de grande importância para o manejo do solo, pois constituem matrizes de adsorção de fosfatos e outros elementos de importância ambiental, estão envolvidos na formação de agregados estáveis e, quando em altas concentrações, esse micronutriente pode ser tóxico às plantas (MELLO; PEREZ, 2009).

O teor de fósforo disponível (P) foi classificado com base no valor de fósforo remanescente (P-rem), conforme indicado em Ribeiro *et al.* (1999). Os resultados são apresentados no Quadro 38, e todos classificaram-se como muito baixos. Os baixos teores de P disponível são comuns em solos de regiões tropicais e subtropicais, como o Brasil. As perdas de P geralmente ocorrem devido à erosão, e a ausência deste elemento impede ou mesmo

dificulta o crescimento das plantas. Para o fósforo, não há alternativa: nenhum outro elemento pode substituí-lo nas funções que exerce na vida das plantas, por isso os adubos fosfatados estão entre os mais consumidos do país (MALAVOLTA, 1980).

Quadro 38 - Resultados da análise de fósforo no solo

Característica	Unidade	Solo 1	Solo 2	Solo 3
P-rem	mg/L	26,40	27,20	42,70
P	mg/dm ³	0,40	0,10	0,10

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Os principais mecanismos envolvidos nas reações para neutralização da acidez do solo consistem em processos de intemperização de minerais. Nutrientes como P, K, Ca, Mg e Fe são liberados pelo intemperismo e influem na fertilidade dos solos, na produtividade das culturas, na ciclagem global do carbono de compostos orgânicos e até na regulação dos processos hidrológicos. Dentre os mecanismos, destaca-se o tamponamento por cátions trocáveis de caráter básico, pela dissolução de minerais carbonatados e silicatados (MCBRIDE, 1994 *apud* KÄMP; CURI; MARQUES, 2009).

Para corrigir a fertilidade dos solos estudados, portanto, convém aumentar o pH do solo, que reduz a atividade do Al³⁺ na solução, como colocado por Mello e Perez (2009). Para isso, pode ser feita uma calagem com calcário dolomítico, que é uma solução ao mesmo tempo simples e viável. Além de diminuir os valores de Al³⁺ e aumentar o pH, também eleva os teores de Ca²⁺ e Mg²⁺, melhora as propriedades físicas do solo por meio da agregação, permitindo o desenvolvimento de raízes, aumentando a aeração e circulação de água. Ao mesmo tempo, a calagem ainda melhora as condições para os microrganismos que decompõem a matéria orgânica e organismos responsáveis pela nitrificação e fixação simbiótica do N₂, segundo Malavolta (1980). Moreira *et al.* (2005) analisaram solos do tipo latossolo vermelho distrófico provenientes de áreas de pastagem degradada e recuperada com calcário dolomítico, em Goiânia (GO). A área recuperada apresentou maiores valores de pH, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, P, Zn e matéria orgânica.

Além disso, outra recomendação é a incorporação de matéria orgânica ao solo, para melhorar as condições químicas, físicas e biológicas do mesmo, atuando positivamente no processo de recuperação. Como exemplo, a MO pode melhorar o pH de solos ácidos, quando ricos em Ca e Mg; fornece nutrientes a partir da mineralização e atua como reservatório de N, P e S e micronutrientes; aumenta a superfície específica e o poder tampão; aumenta a CTC, SB e V; melhora a estruturação, aeração, retenção de água, permeabilidade e agregação (BONINI *et al.*, 2015), dentre outros benefícios já citados anteriormente. A MO tem importância

significativa na acidez do solo e é considerada o principal componente na determinação da necessidade de calagem, sendo também o principal componente no controle da atividade do Al^{3+} em solução, conforme Motta e Melo (2009). Como complemento, podem ser adicionados adubos ricos em K e P, se necessário.

Alguns estudos têm sido feitos a fim de avaliar o uso de resíduos industriais na recuperação da qualidade química de solos degradados. No processo de tratamento e desinfecção do lodo, geralmente incorpora-se cal ou calcário, que tende a aumentar o pH. Como por exemplo, tem-se o estudo de Bonini *et al.* (2015), sobre a utilização de lodo de esgoto associado à adubação mineral para recuperar atributos químicos de um latossolo vermelho distrófico em área degradada do cerrado, em Selvíria (MS). Ao longo de 4 anos de aplicação, observou-se um aumento o teor de P, Ca, Mg, K, assim como o pH, a CTC, a SB e a MO do solo, melhorando significativamente sua qualidade.

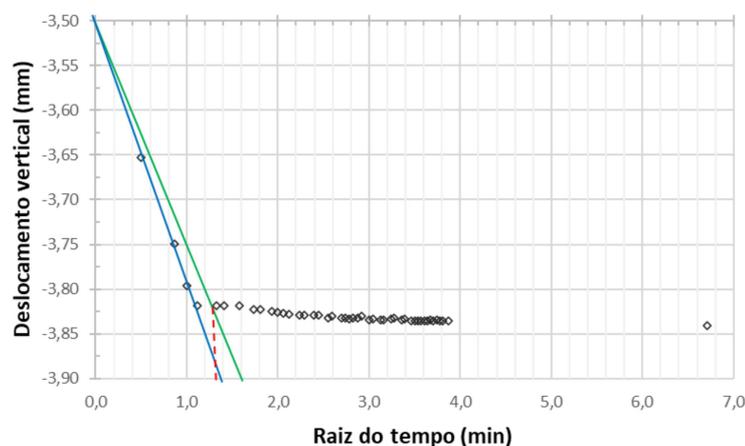
4.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

4.2.1 Cálculo da velocidade de cisalhamento

O ensaio foi realizado com as amostras na condição saturada. Para o cálculo da velocidade de cisalhamento, foram considerados os dados do adensamento para a primeira amostra ensaiada (CP09), que recebeu a carga correspondente à tensão de 50 kPa, valor intermediário entre as tensões que foram aplicadas.

O Gráfico de Taylor do CP09 pode ser observado no Gráfico 3, onde é possível identificar a primeira reta traçada, marcando a abscissa de, aproximadamente, 1,4; a abscissa acrescida de 15%, que corresponde a 1,61, traçando a segunda reta; e a abscissa do ponto de interseção entre essa reta e o gráfico (a raiz de t_{90}), que se deu em, aproximadamente, 1,35.

Gráfico 3 - Gráfico de Taylor para o CP09



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Após os cálculos citados no tópico 3.3.3, os resultados obtidos foram colocados no Quadro 39, destacando a velocidade máxima de cisalhamento de 0,23 mm/min para o CP09.

Quadro 39 - Resultados para o cálculo da velocidade de cisalhamento

Parâmetro	CP09	
t_{90} (min)	1,82	
t_{50} (min)	0,43	
t_f (min)	21,5	
d_f (mm)	5	9
d_r (mm/min)	0,23	0,41

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Assim, foi adotada a velocidade de 0,1 mm/min para realização da etapa de cisalhamento. Como o deslocamento da caixa bipartida chega entre 8 mm e 9 mm, o tempo médio de duração desta etapa foi de 1h30min.

4.2.2 Gráficos e interpretação

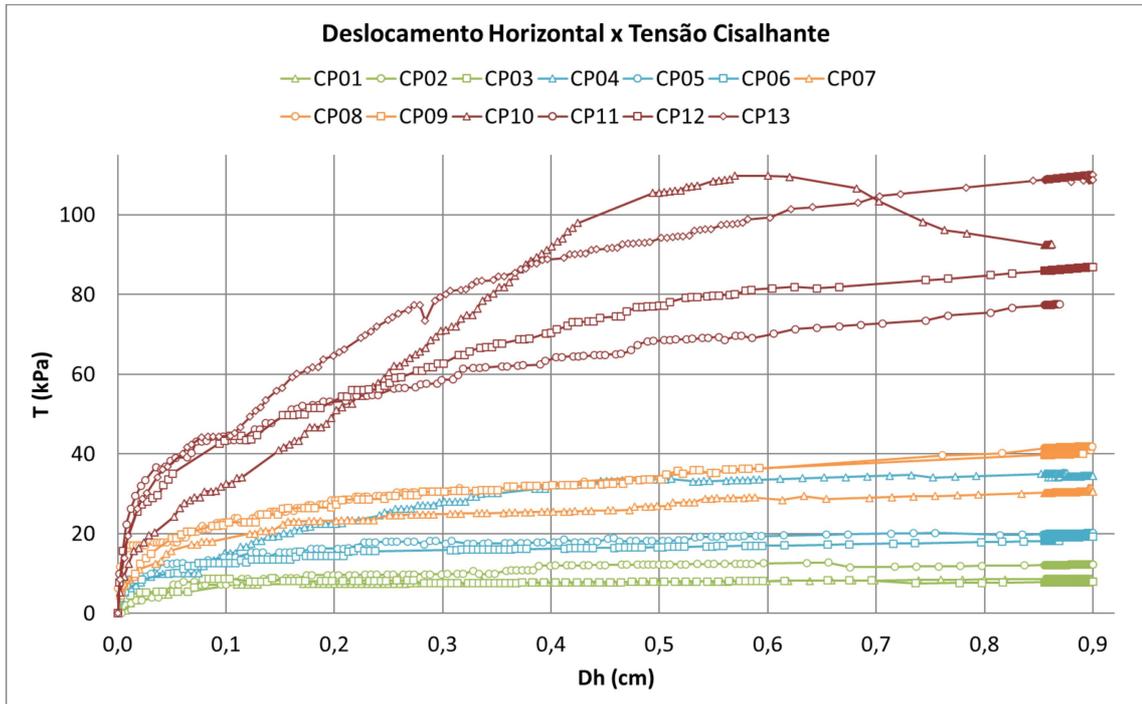
Dentre as 16 amostras que foram coletadas, 13 foram aptas para o ensaio. A distribuição das tensões aplicadas, os respectivos corpos de prova e a cor correspondente nos gráficos está disposta no Quadro 40.

Quadro 40 - Distribuição dos corpos de prova quanto à tensão aplicada

Tensão (kPa)	Amostras	Cor do gráfico
12,5	CP01, CP02, CP03	Verde
25	CP04, CP05, CP06	Azul
50	CP07, CP08, CP09	Laranja
100	CP10, CP11, CP12, CP13	Vermelho

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

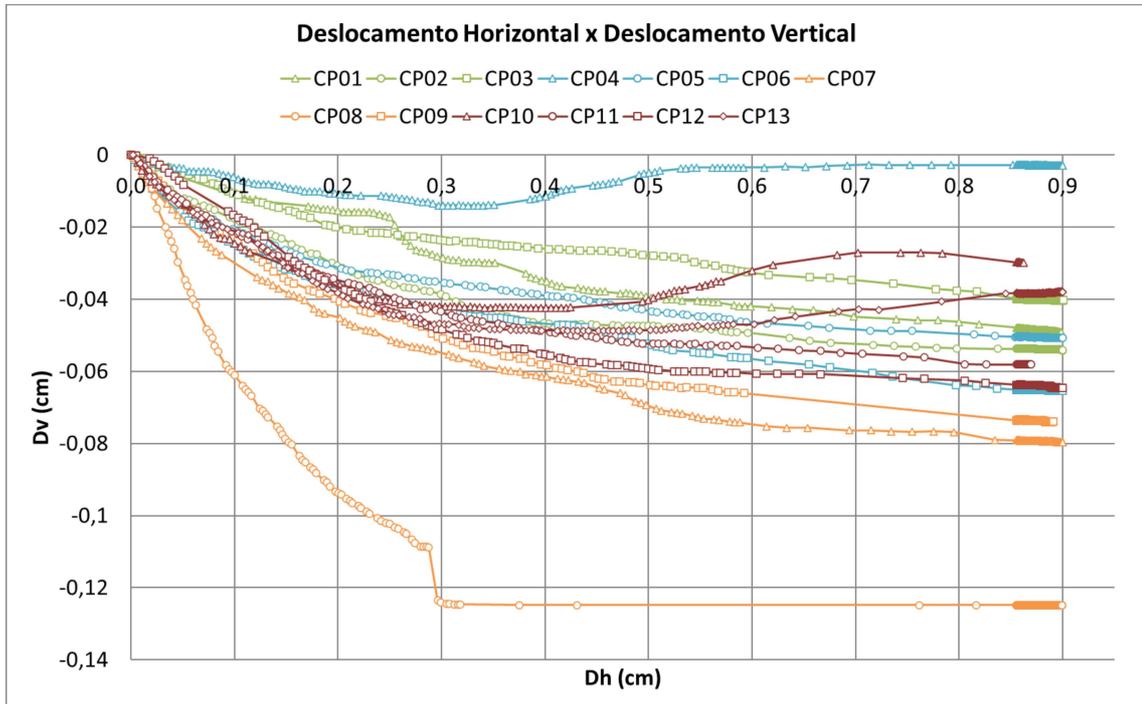
O gráfico do deslocamento horizontal pela tensão cisalhante é apresentado no Gráfico 4. Pode-se observar um comportamento semelhante de tensão crescente entre a maioria dos CP's, exceto pelo CP04 e CP10, que apresentaram um pico no gráfico, que corresponde a uma tensão máxima de cisalhamento. Essa distinção se deve à variabilidade que um mesmo solo pode ter, demonstrando que o número de amostras foi capaz de representar os diferentes comportamentos deste solo.

Gráfico 4 - Deslocamento Horizontal *versus* Tensão Cisalhante

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Analisando cada grupo de amostras com a mesma tensão normal aplicada, verifica-se um comportamento muito semelhante entre o CP01, CP02 e CP03, com tensão cisalhante variando entre 7 kPa e 12 kPa. O CP05 e CP06 apresentaram gráficos semelhantes, com valores de tensão cisalhante entre 16 kPa e 20 kPa, em contradição ao CP04, que chegou a tensões de 34 kPa. O CP08 e CP09 resultaram em gráficos muito similares, com tensões cisalhantes de até 40 kPa, enquanto o CP07 apresentou valores um pouco inferiores, até 29 kPa. Já no último grupo, o CP11 e CP12 chegaram a tensões cisalhantes entre 75 kPa e 87 kPa, ao passo que o CP10 e o CP13 atingiram o valor de tensão de aproximadamente 109 kPa.

O gráfico que mostra o deslocamento vertical ao longo do deslocamento horizontal pode ser observado no Gráfico 5. Para a maior parte das amostras, em consequência do gráfico crescente de tensão cisalhante, o gráfico do deslocamento vertical tem um comportamento contínuo e decrescente. Apenas o CP04, o CP10 e o CP13 manifestaram comportamento diferente, apresentando tendência de dilatação, ou seja, aumento de volume observado pelo aumento do deslocamento vertical. De forma geral, o solo apresentou comportamento compressivo durante o cisalhamento. Esse comportamento é comum em solos residuais devido à estrutura.

Gráfico 5 - Deslocamento Horizontal *versus* Deslocamento Vertical

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

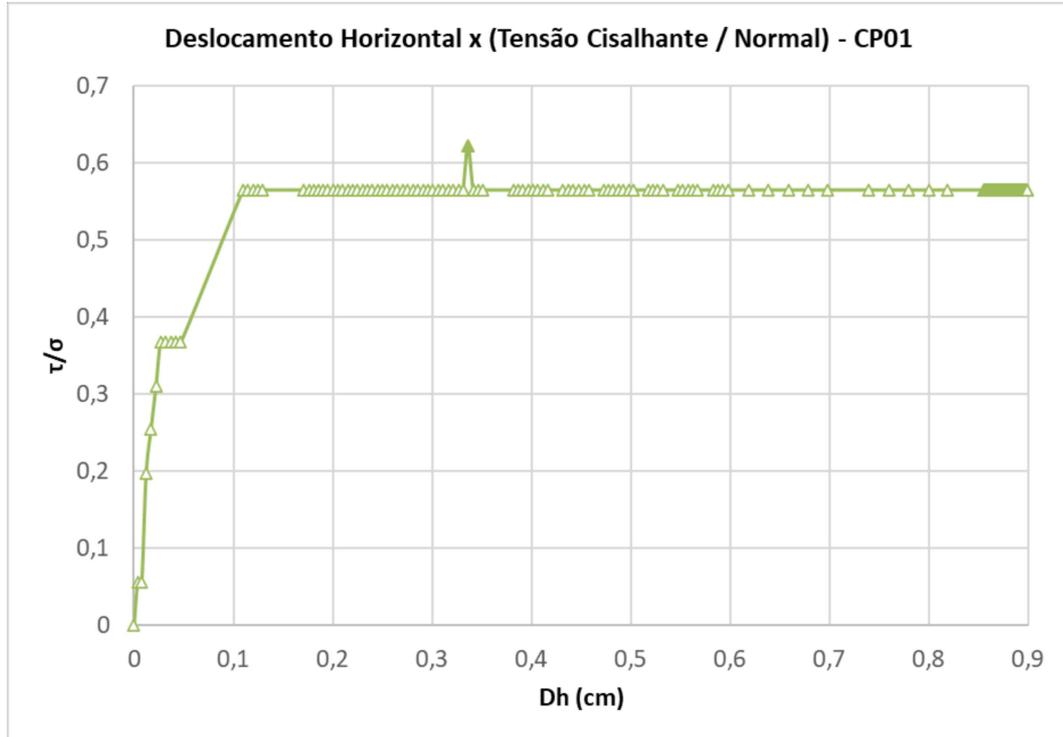
Em análise por grupo de tensão normal aplicada, o CP01, CP02 e CP03 tiveram comportamentos semelhantes, variando o deslocamento entre -0,04 cm e -0,055 cm. O CP03 e CP05 alcançaram deslocamentos verticais entre -0,05 cm e -0,065 cm; o CP04, em contrapartida, apresentou um deslocamento vertical máximo de -0,015 cm. O CP07 e CP09 obtiveram valores bem próximos de deslocamento vertical, em torno de -0,08 cm; já o CP08 foi o que demonstrou o comportamento mais destoante dos demais, atingindo -0,12 cm de deslocamento vertical, que pode ser explicado por folga na fixação do transdutor vertical de deslocamento (LVDT). Como esperado, o CP11 e CP12 tiveram comportamento similar, com deslocamento aproximado de -0,06 cm; bem como o CP10 e CP13, que chegaram ao deslocamento máximo entre -0,04 cm e -0,05 cm.

Como não houve tensão cisalhante máxima na maioria dos resultados, o critério de ruptura adotado foi o de τ/σ máximo, que consiste no primeiro valor de τ/σ antes de haver uma queda. Para auxiliar na visualização deste valor, foram feitos os gráficos de τ/σ máximo em função do deslocamento horizontal, que são dispostos a seguir.

No CP01, o τ/σ máximo foi de 0,622, no deslocamento horizontal de 0,33 cm (Gráfico 6). No CP02, o τ/σ máximo foi de 0,877, no deslocamento de 0,39 cm (Gráfico 7) Cabe colocar que os dois primeiros pontos destacados podem ter ocorrido em função da estrutura ou de algum pedregulho na amostra do solo residual, não sendo considerados para o critério de ruptura. Já

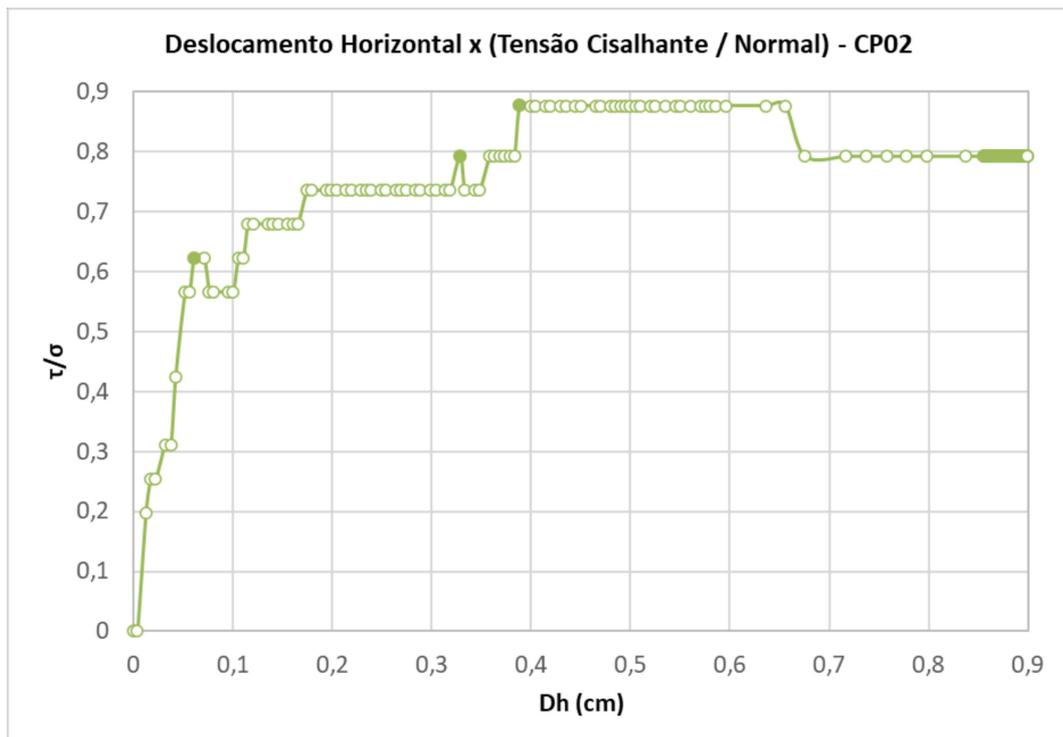
no CP03, o ponto de τ/σ máximo, de 0,679, se deu logo no início do ensaio, com 0,08 cm de deslocamento (Gráfico 8).

Gráfico 6 - Deslocamento Horizontal *versus* Tensão Cisalhante/Normal para o CP01

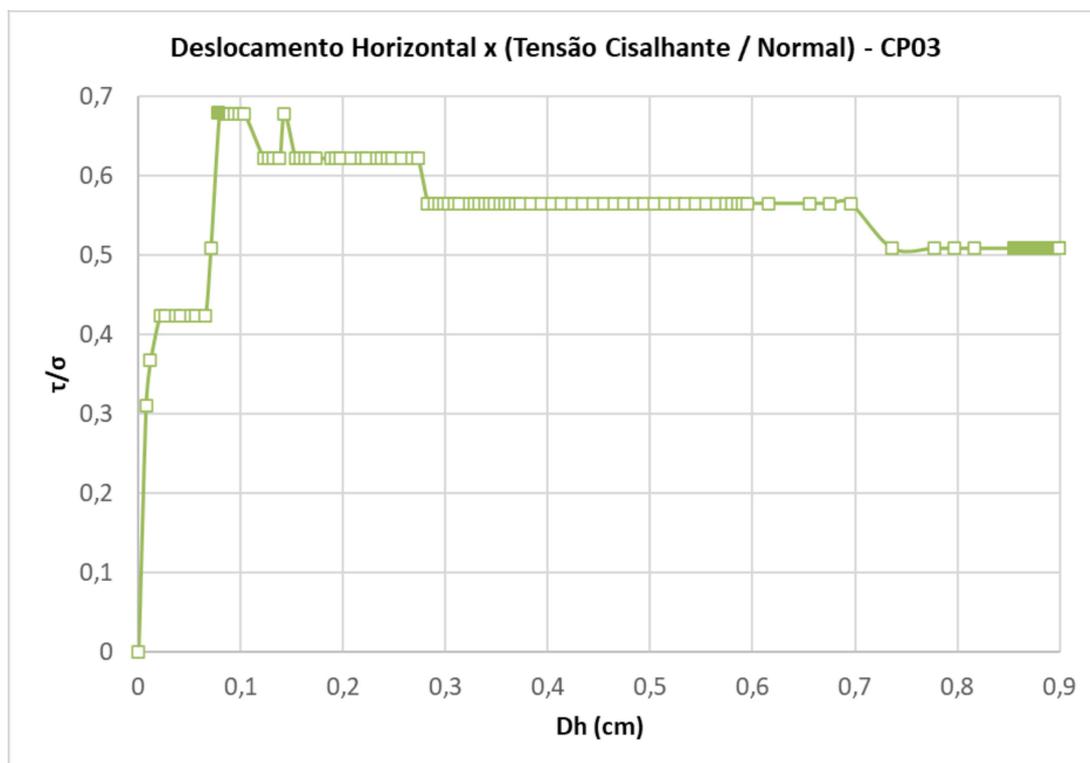


Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Gráfico 7 - Deslocamento Horizontal *versus* Tensão Cisalhante/Normal para o CP02

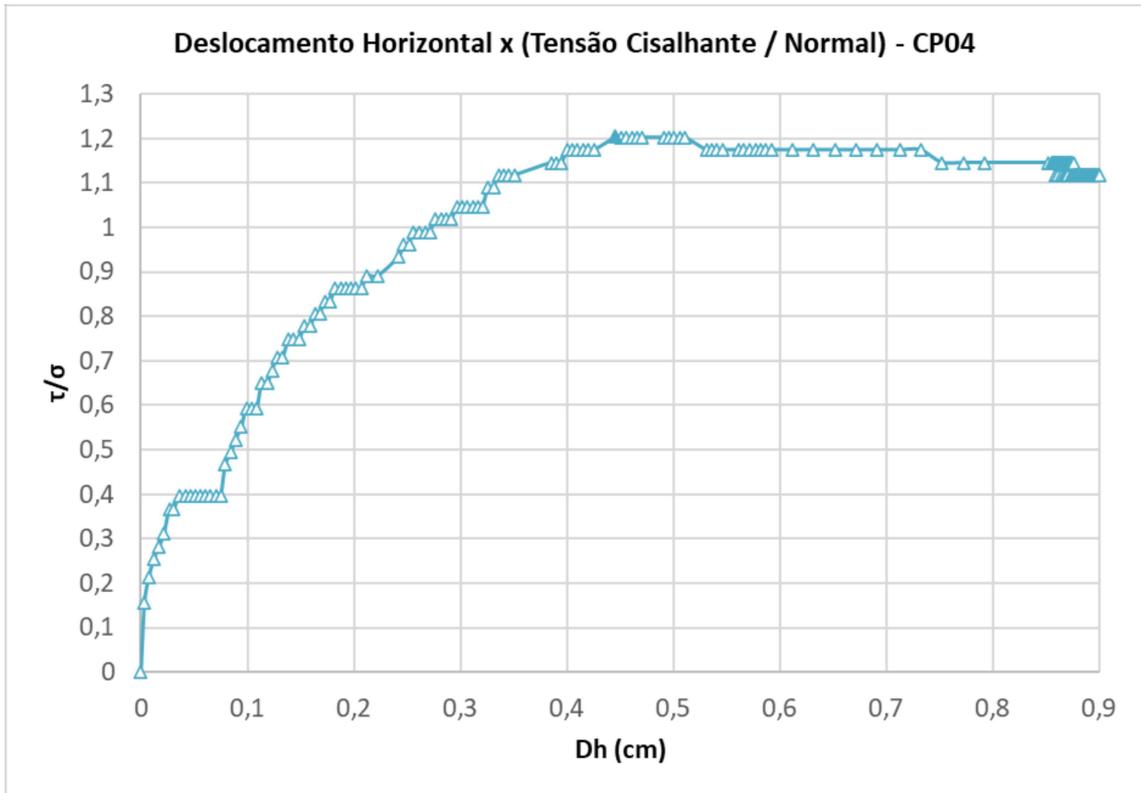


Fonte: Elaborado pela autora (2021)

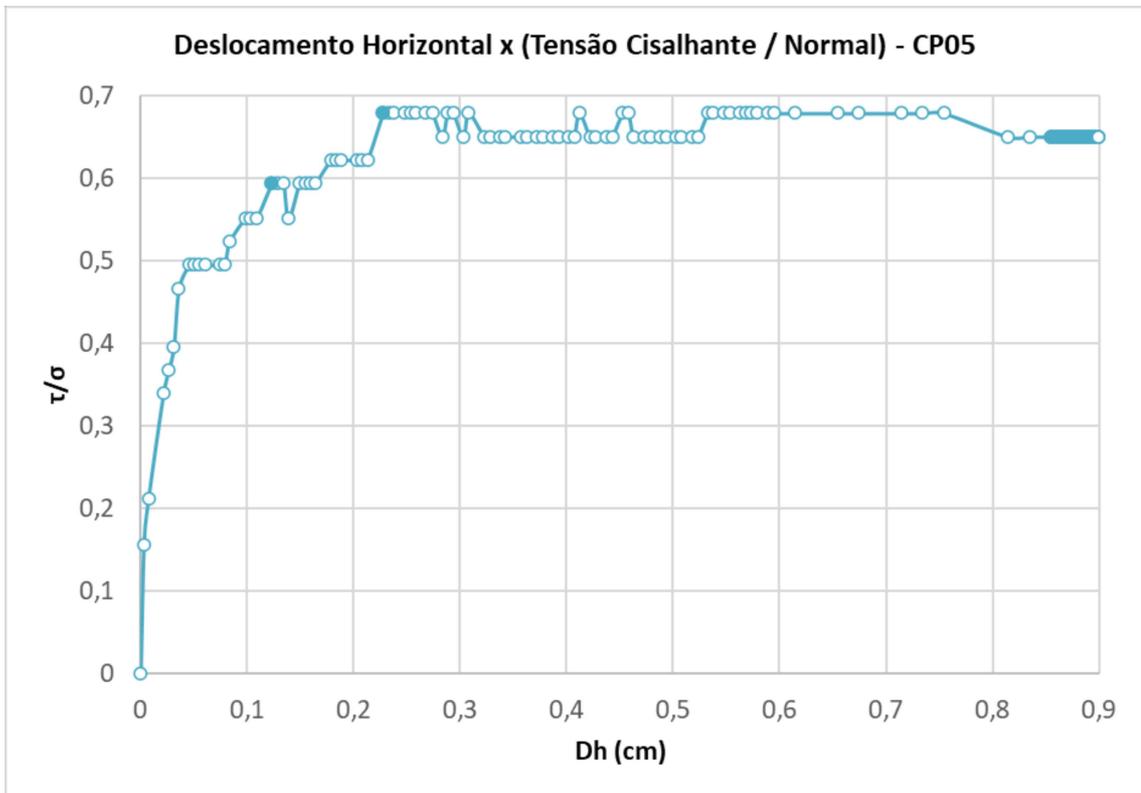
Gráfico 8 - Deslocamento Horizontal *versus* Tensão Cisalhante/Normal para o CP03

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

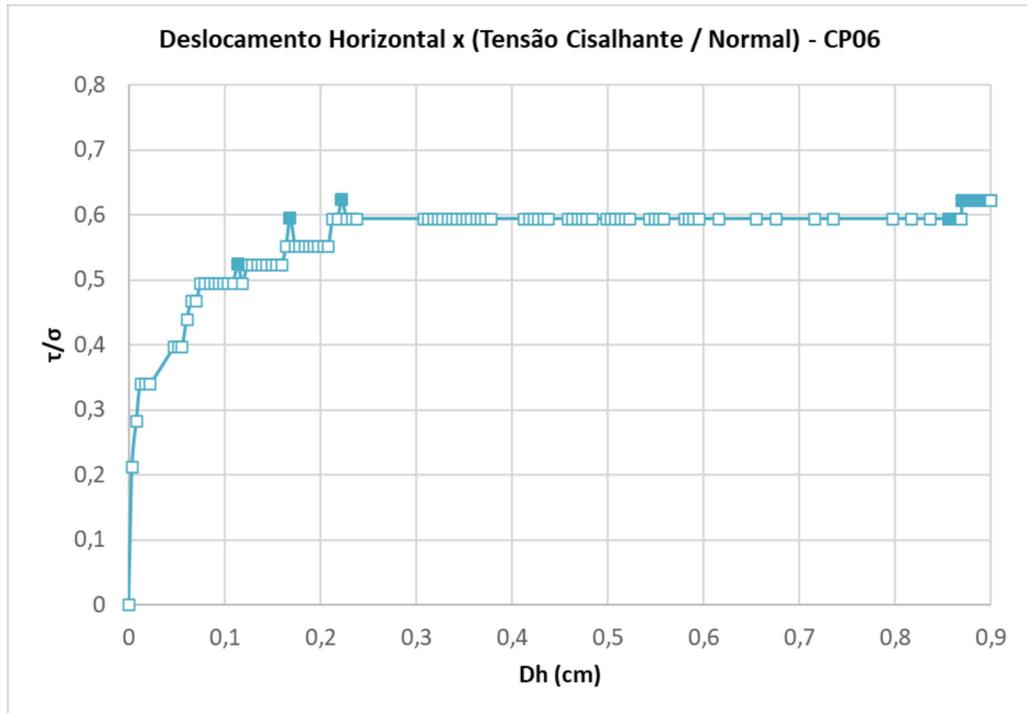
Como visto anteriormente, o CP04 apresentou uma tensão cisalhante máxima, que foi também o ponto de τ/σ máximo, no valor de 1,202, no deslocamento de 0,45 cm (Gráfico 9). Cabe destacar que este foi o único ensaio em que a tensão cisalhante superou a tensão normal. O CP05 teve τ/σ máximo de 0,679 em 0,22 cm de deslocamento (Gráfico 10), sendo que o outro ponto destacado pode ter ocorrido pela mesma explicação dada ao CP02. Da mesma forma, considerou-se o terceiro ponto de pico do CP06, onde τ/σ máximo foi de 0,622, na posição de 0,22 cm de deslocamento (Gráfico 11).

Gráfico 9 - Deslocamento Horizontal *versus* Tensão Cisalhante/Normal para o CP04

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

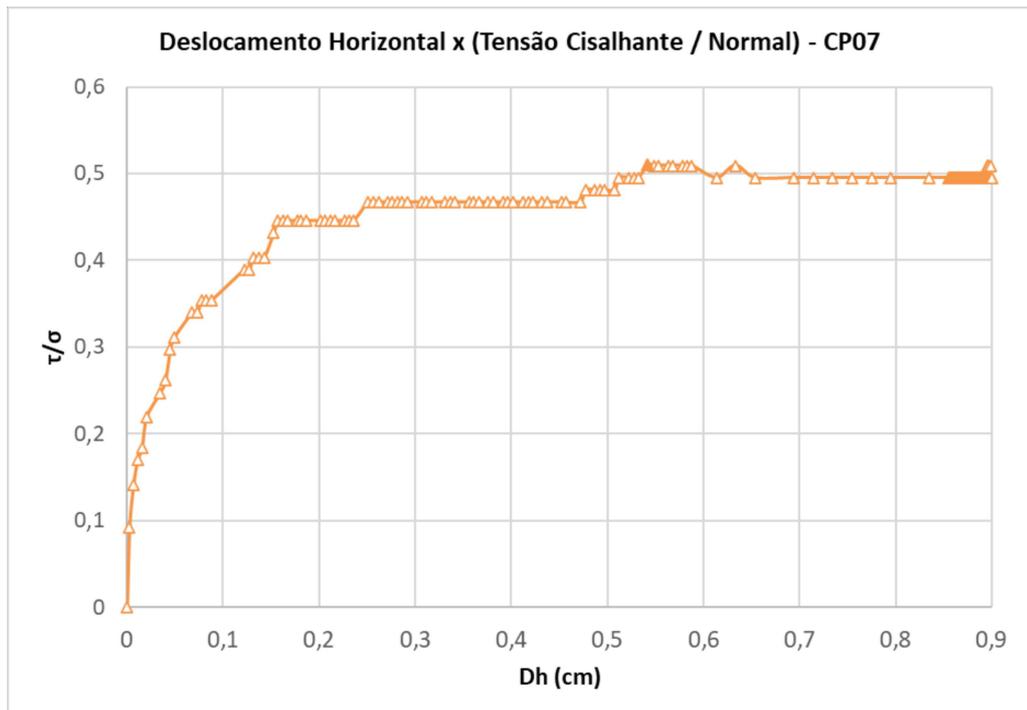
Gráfico 10 - Deslocamento Horizontal *versus* Tensão Cisalhante/Normal para o CP05

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

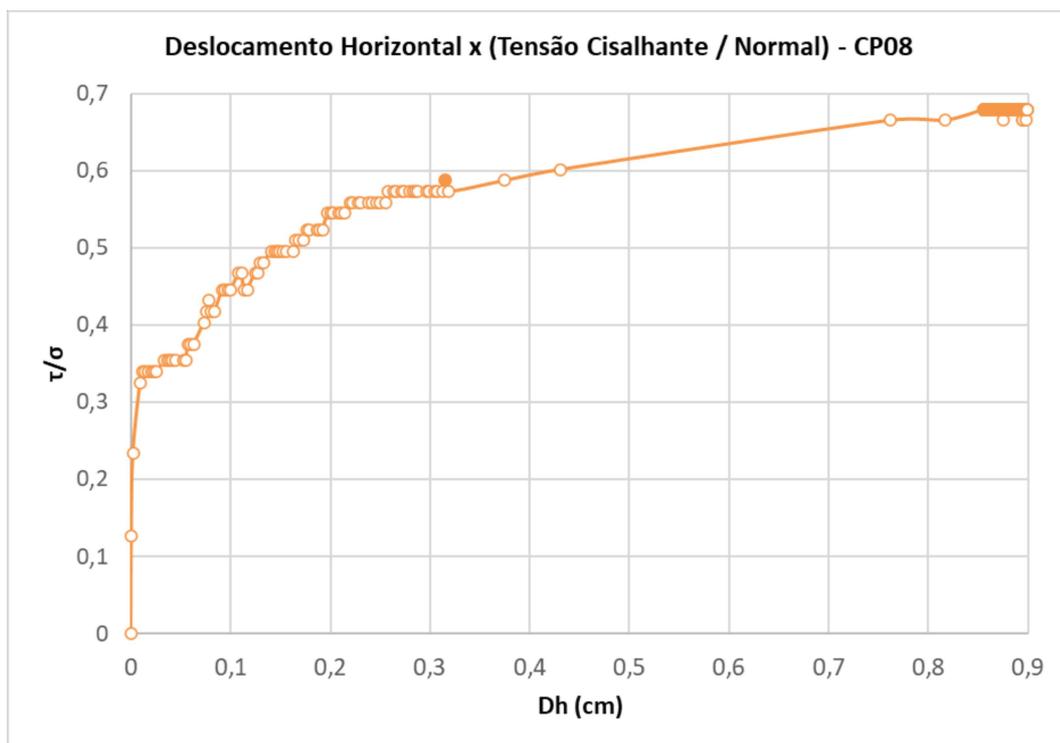
Gráfico 11 - Deslocamento Horizontal *versus* Tensão Cisalhante/Normal para o CP06

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

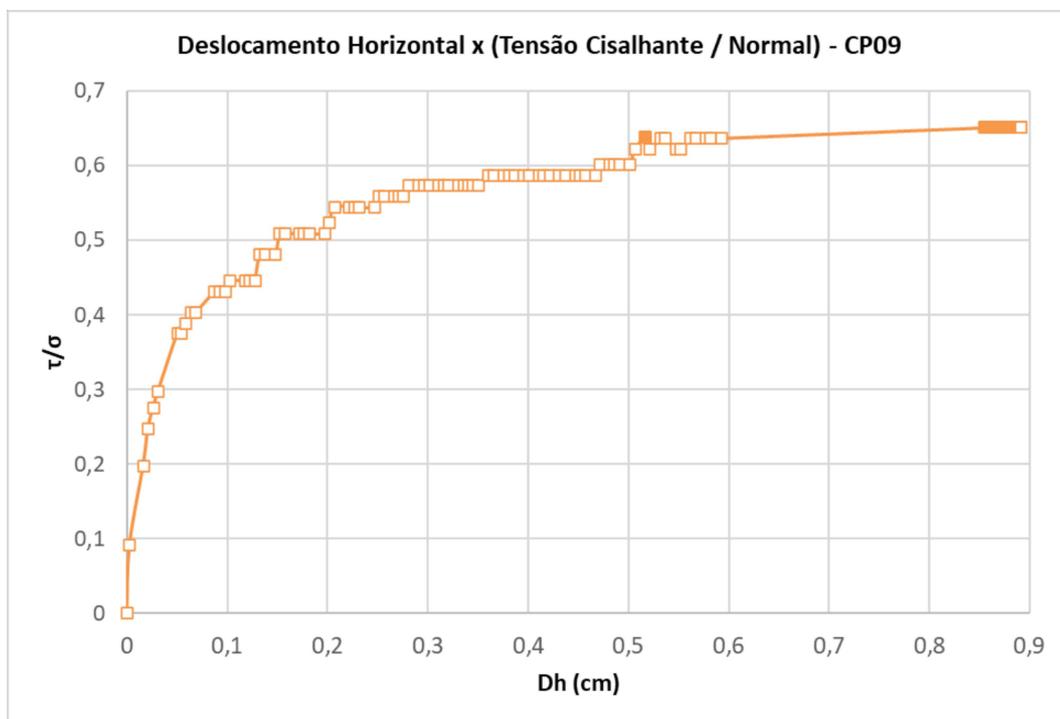
O CP07 obteve τ/σ máximo de 0,506, no deslocamento de 0,54 cm (Gráfico 12); o CP08 apresentou τ/σ máximo de 0,587, em 0,32 cm de deslocamento (Gráfico 13); já o τ/σ máximo do CP09 foi de 0,637, na posição de 0,52 cm (Gráfico 14).

Gráfico 12 - Deslocamento Horizontal *versus* Tensão Cisalhante/Normal para o CP07

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Gráfico 13 - Deslocamento Horizontal *versus* Tensão Cisalhante/Normal para o CP08

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

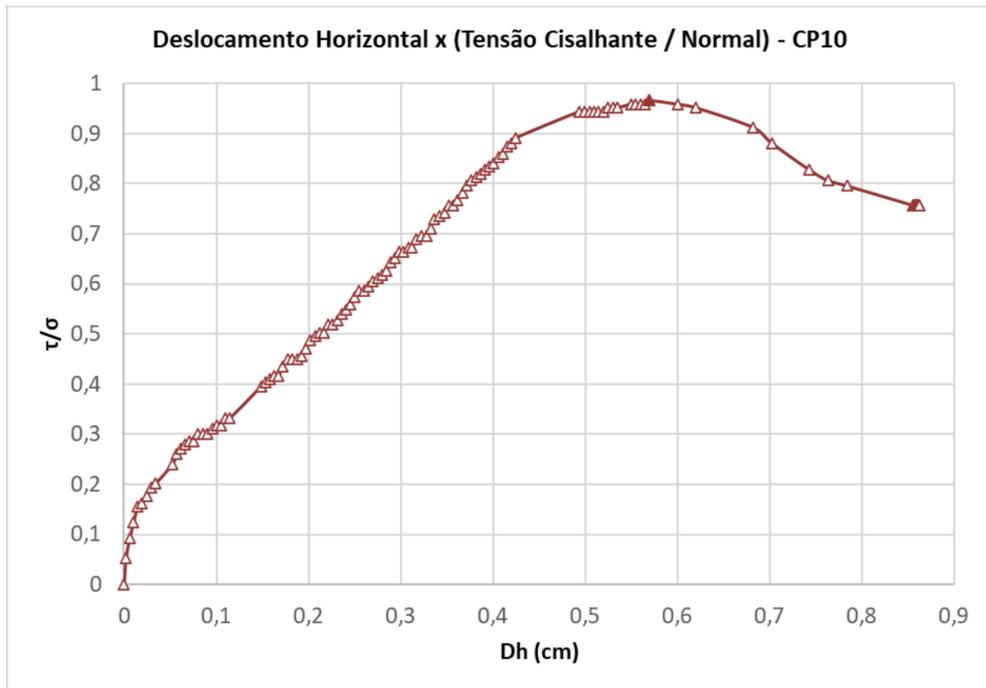
Gráfico 14 - Deslocamento Horizontal *versus* Tensão Cisalhante/Normal para o CP09

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

O CP10 teve ponto de τ/σ máximo de 0,966 na posição correspondente à sua tensão cisalhante máxima, em 0,57 cm (Gráfico 15). Os CP11, CP12 e CP13 tiveram um primeiro

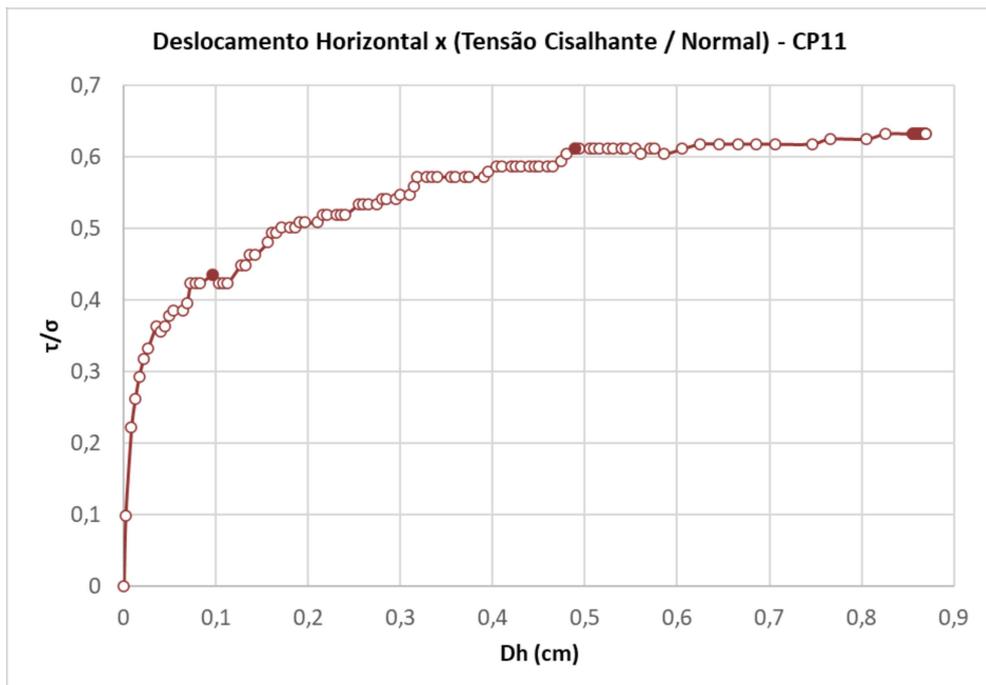
ponto de τ/σ máximo, como aconteceu no CP02 e, por isso, foram considerados os pontos próximos pontos destacados. No CP11, o τ/σ máximo foi de 0,612 e 0,49 cm de deslocamento (Gráfico 16); no CP12, o τ/σ máximo foi de 0,711 e 0,58 cm de deslocamento (Gráfico 17); no CP13 o τ/σ máximo foi de 0,891 e 0,7 cm de deslocamento (Gráfico 18).

Gráfico 15 - Deslocamento Horizontal *versus* Tensão Cisalhante/Normal para o CP10

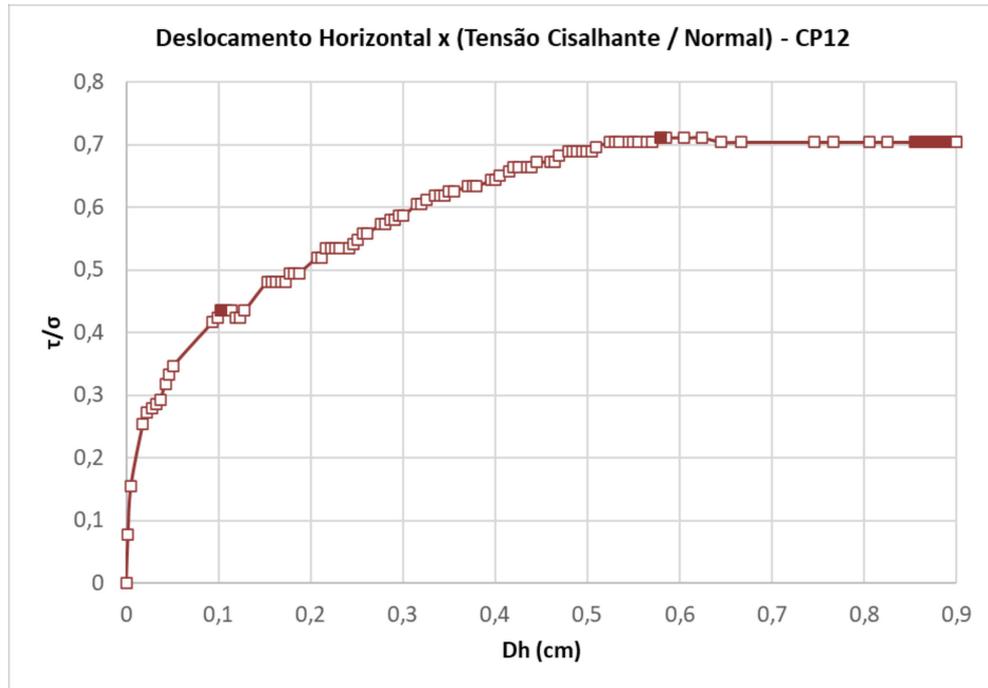


Fonte: Elaborado pela autora (2021)

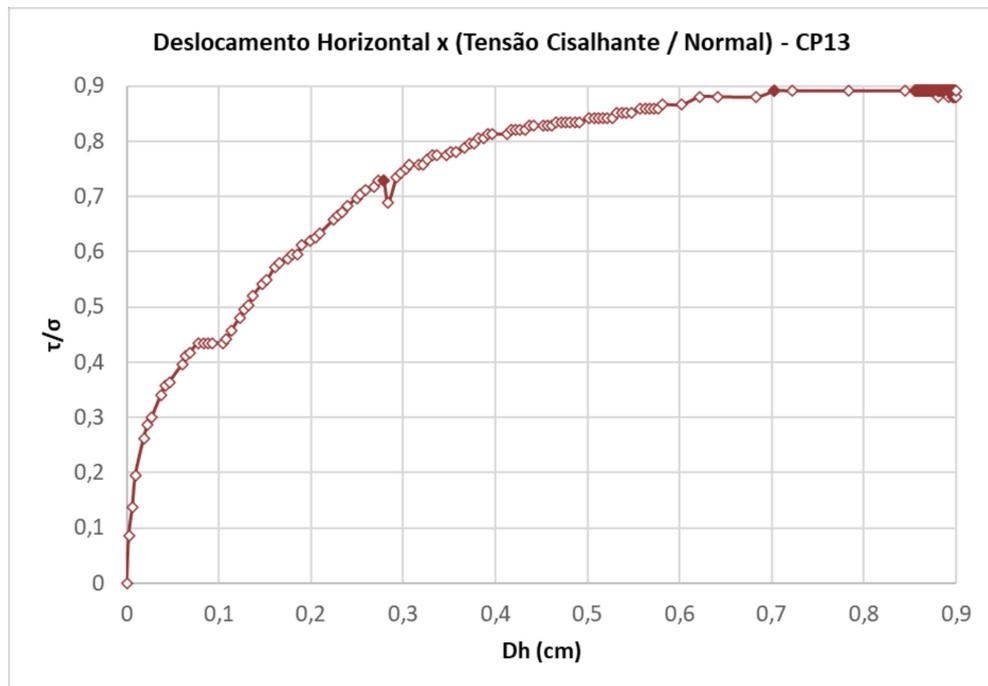
Gráfico 16 - Deslocamento Horizontal *versus* Tensão Cisalhante/Normal para o CP11



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Gráfico 17 - Deslocamento Horizontal *versus* Tensão Cisalhante/Normal para o CP12

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Gráfico 18 - Deslocamento Horizontal *versus* Tensão Cisalhante/Normal para o CP13

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Considerando este critério de ruptura, foram listados os valores de tensão normal e tensão cisalhante, que pode ser visto no Quadro 41, para plotar o gráfico da envoltória de resistência e obter os parâmetros médios c e ϕ , citados no item 3.3.3.

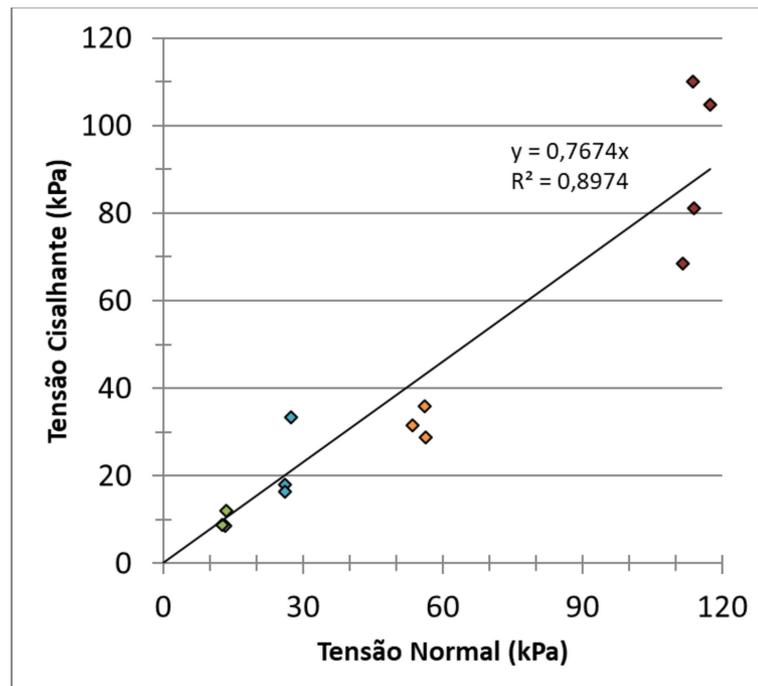
Quadro 41 - Valores de tensão normal e tensão cisalhante para o critério de ruptura 1

Amostra	τ/σ máx.	σ (kPa)	τ (kPa)
CP01	0,622	13,459	8,378
CP02	0,877	13,622	11,948
CP03	0,679	12,713	8,633
CP04	1,203	27,610	33,201
CP05	0,679	26,270	17,839
CP06	0,622	26,239	16,333
CP07	0,509	56,491	28,771
CP08	0,587	53,587	31,461
CP09	0,637	56,152	35,747
CP10	0,966	113,731	109,812
CP11	0,612	111,572	68,267
CP12	0,711	114,002	81,043
CP13	0,891	117,487	104,712

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Inicialmente, pela regressão linear, o coeficiente linear da reta (que corresponde ao intercepto coesivo) indicou um valor negativo, o que não tem sentido teórico. Como o solo é areno-siltoso (não argiloso), pode-se forçar o intercepto coesivo nulo. Isto foi feito por meio do ajuste da reta, utilizando o recurso de formatar linha de tendência e definindo uma interseção no ponto (0,0), resultando no Gráfico 19. Com a reta ajustada, o valor do coeficiente angular foi de 0,7674, que corresponde ao ângulo de atrito de 37,5°.

Gráfico 19 - Envoltória de resistência considerando o critério de ruptura 1



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

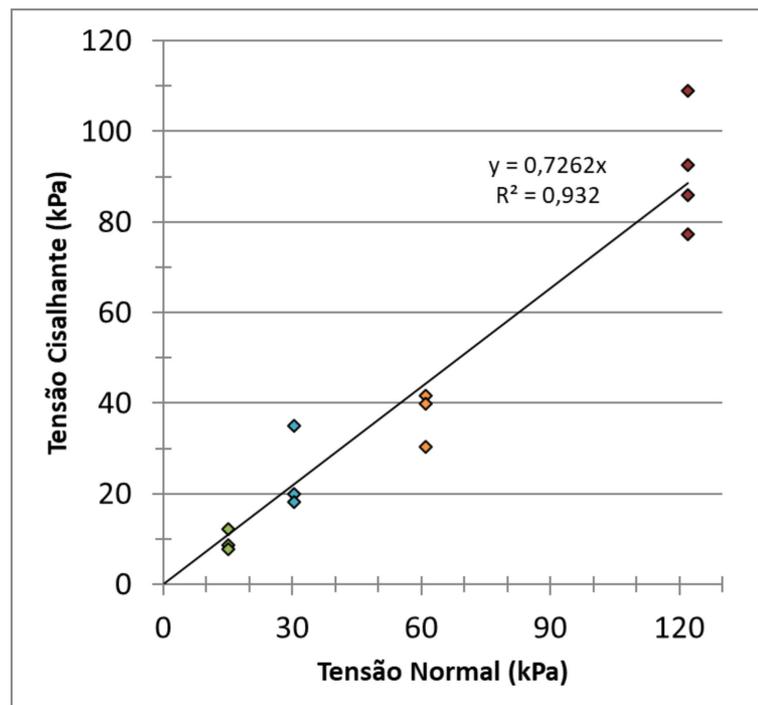
Como houve uma certa dificuldade em identificar o τ/σ máximo nos resultados dos ensaios, também foi considerado um segundo critério de ruptura para comparar com os valores encontrados. Este segundo critério utiliza a deformação limite, em que o deslocamento horizontal máximo foi definido em 0,85 cm. Os valores de tensão normal e cisalhante para este deslocamento, em cada CP, foram listados no Quadro 42 e plotados no gráfico da envoltória (Gráfico 20).

Quadro 42 - Valores de tensão normal e tensão cisalhante para o critério de ruptura 2

Amostra	Dh máx.	σ (kPa)	τ (kPa)
CP01	0,855	15,260	8,635
CP02	0,855	15,261	12,090
CP03	0,855	15,261	7,772
CP04	0,855	30,521	34,975
CP05	0,855	30,521	19,862
CP06	0,855	30,521	18,135
CP07	0,855	61,043	30,225
CP08	0,855	61,043	41,452
CP09	0,855	61,043	39,725
CP10	0,855	122,086	92,403
CP11	0,856	122,095	77,296
CP12	0,855	122,086	85,926
CP13	0,855	122,086	108,811

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Gráfico 20 - Envoltória de resistência considerando o critério de ruptura 2



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Da mesma forma que anteriormente, foi feito o ajuste da reta para substituir o valor negativo do coeficiente linear (intercepto coesivo) por zero, por meio da interseção da reta com o ponto (0,0). Como pode-se observar no Gráfico 20, o coeficiente angular da reta ajustada foi de 0,7262, o que significa um ângulo de atrito de 36,0°. Dessa forma, o critério 2 mostrou-se um pouco mais conservador que o primeiro. Porém, pode-se dizer que ambos os critérios são aplicáveis ao solo em estudo, visto que a diferença entre os ângulos de atrito foi de apenas 1,5°.

4.2.3 Tratamento estatístico dos dados

4.2.3.1 Critério 1 de ruptura

Para o critério 1 de ruptura, os principais resultados dos cálculos referentes ao método semi-probabilístico encontram-se no Quadro 43, com destaque para os valores de tensão normal média (σ_m), tensões de cisalhamento médias ($\tau_{i,m}$) e EMQ.

Quadro 43 - Parâmetros dos cálculos estatísticos para o critério 1

σ_i	$(\sigma_i - \sigma_m)^2$	τ_i	$\tau_{i,m}$	$(\tau_i - \tau_{i,m})^2$
13,459	1908,803	8,378	10,328	3,804
13,622	1894,586	11,948	10,454	2,233
12,713	1974,544	8,633	9,756	1,261
27,610	872,543	33,201	21,188	144,314
26,270	953,503	17,839	20,160	5,385
26,239	955,419	16,333	20,136	14,461
56,491	0,433	28,771	43,351	212,582
53,587	12,687	31,461	41,123	93,348
56,152	0,994	35,747	43,091	53,935
113,731	3201,540	109,812	87,277	507,819
111,572	2961,880	68,267	85,620	301,139
114,002	3232,281	81,043	87,485	41,501
117,487	3640,693	104,712	90,160	211,775
σ_m	$\sum(\sigma_i - \sigma_m)^2$	N-2	EMQ	$\sum(\tau_i - \tau_{i,m})^2$
57,149	21609,906	11	144,869	1593,557

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Em consulta à tabela T-Student, o termo $t(N-2)$, considerando 11 graus de liberdade e $\alpha=0,025$, foi de 2,201. Os valores de desvio-padrão da tensão cisalhante média e os limites de confiança máximo e mínimo são indicados no Quadro 44.

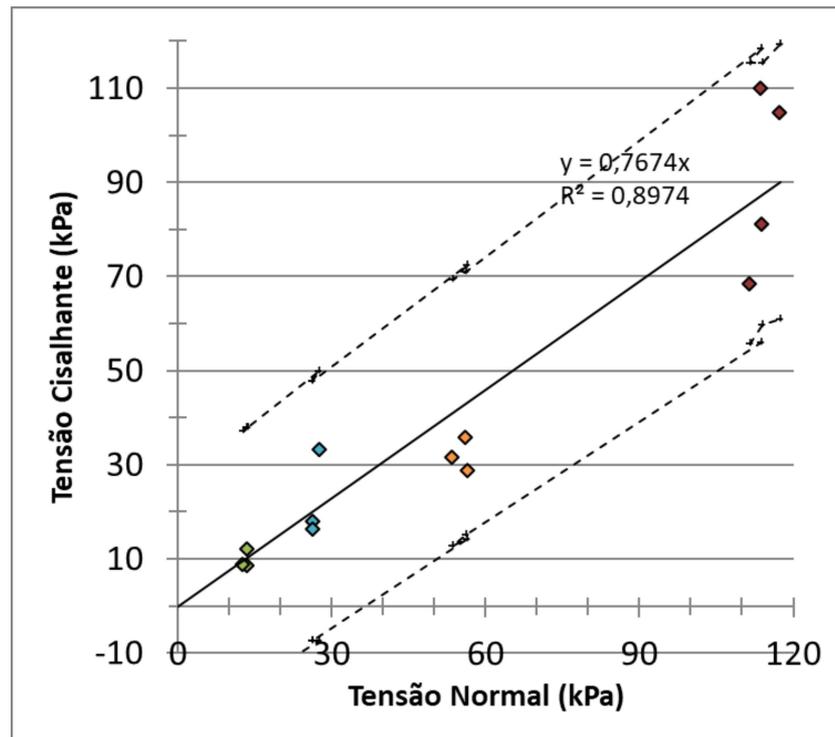
Os limites de confiança foram plotados no Gráfico 21, definindo as linhas tracejadas superior e inferior, que delimitam a região de aceitação dos pontos dos ensaios. Observa-se que nenhum ponto precisou ser expurgado, portanto, os 13 pontos foram aceitos e, com isso, mantiveram-se os coeficientes linear e angular da reta média. Logo, o ângulo de atrito médio permanece 37,5° e o intercepto coesivo nulo.

Quadro 44 - Desvios-padrão e limites de confiança da tensão cisalhante para o critério 1

DP($\tau_{i,m}$)	$\tau_{i,m\acute{a}x}$	$\tau_{i,m\acute{i}n}$
12,504	37,850	-17,194
12,499	37,963	-17,056
12,495	37,258	-17,746
13,005	49,812	-7,436
12,510	47,694	-7,375
12,543	47,743	-7,471
13,242	72,496	14,207
12,826	69,352	12,893
12,685	71,011	15,171
14,219	118,573	55,981
13,542	115,427	55,814
12,641	115,307	59,663
13,239	119,298	61,021

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Gráfico 21 - Faixa de aceitação dos pontos na análise de regressão para o critério 1



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Desta forma, o ângulo de atrito de projeto, é $37,5^\circ$ e o intercepto coesivo de projeto é zero, pois não pode apresentar valor negativo.

Os resultados da análise estatística foram inseridos no Quadro 45. De acordo com Fonseca e Martins (1996), como visto no Quadro 32, o $CV(\varphi)$ foi classificado como baixo e

CV($\tan(\varphi)$) como médio. Como o R^2 da reta de regressão foi 0,8974, o r é 0,947, recebendo a classificação de correlação muito alta conforme Tomassetti (2012) (Quadro 33).

Quadro 45 - Resultados da análise estatística para os parâmetros do critério 1

Parâmetro	Valor médio	Variância	Desvio Padrão	CV (%)
c	0	33,038	5,748	-
φ	37,5°	-	0,052	7,874
$\tan(\varphi)$	0,7674	0,007	0,082	10,669

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.2.3.2 Critério 2 de ruptura

No Quadro 46, estão os principais resultados para análise semi-probabilística para o critério 2.

Quadro 46 - Parâmetros dos cálculos estatísticos para o critério 2

σ_i	$(\sigma_i - \sigma_m)^2$	τ_i	$\tau_{i,m}$	$(\tau_i - \tau_{i,m})^2$
15,26	2205,003	8,635	11,081	5,986
15,261	2204,909	12,09	11,082	1,014
15,261	2204,909	7,772	11,082	10,959
30,521	1004,666	34,975	22,164	164,112
30,521	1004,666	19,862	22,164	5,300
30,521	1004,666	18,135	22,164	16,235
61,043	1,37936	30,225	44,329	198,934
61,043	1,37936	41,452	44,329	8,279
61,043	1,37936	39,725	44,329	21,200
122,086	3584,242	92,403	88,658	14,018
122,095	3585,32	77,296	88,665	129,263
122,086	3584,242	85,926	88,658	7,468
122,086	3584,242	108,811	88,658	406,109
σ_m	$\sum(\sigma_i - \sigma_m)^2$	N-2	EMQ	$\sum(\tau_i - \tau_{i,m})^2$
62,2175	23971	11	89,898	988,885

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Da mesma forma, foi utilizado o $t(N-2)$ de 2,201. No Quadro 47, encontram-se os valores de desvio-padrão e os limites de confiança da tensão cisalhante.

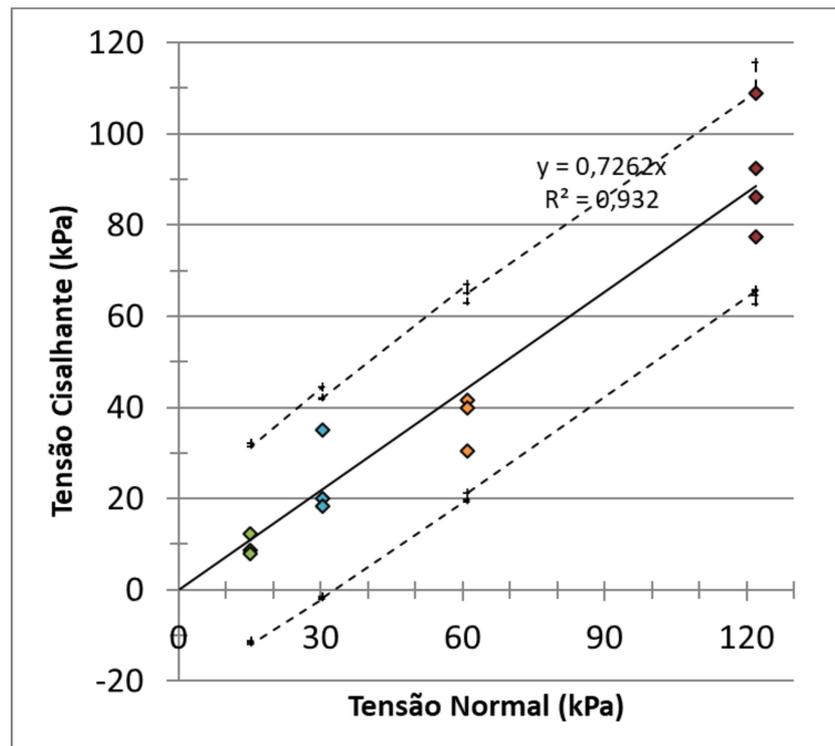
O gráfico com os limites de confiança e a faixa de aceitação pode ser observado no Gráfico 22. Neste caso, também, todos os pontos encontraram-se dentro da região limitante e nenhum precisou ser expurgado. Assim sendo, o ângulo de atrito manteve-se 36,0° e o intercepto coesivo nulo. Da mesma forma que citado anteriormente, estes valores correspondem, portanto, ao ângulo de atrito de projeto e ao intercepto coesivo de projeto.

Quadro 47 - Desvios-padrão e limites de confiança da tensão cisalhante para o critério 2

DP($\tau_{i,m}$)	$\tau_{i,m\acute{a}x}$	$\tau_{i,m\acute{i}n}$
9,867	32,046	-11,389
9,844	32,120	-11,213
9,890	31,524	-12,012
10,570	44,453	-2,078
9,864	41,870	-1,551
9,914	41,957	-1,685
10,719	66,944	19,758
9,878	62,863	19,382
9,937	64,962	21,220
9,904	109,076	65,479
10,419	108,554	62,687
9,874	109,217	65,753
11,564	115,613	64,707

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Gráfico 22 - Faixa de aceitação dos pontos na análise de regressão para o critério 2



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

O Quadro 48 contém os resultados da análise estatística. Observa-se que os dois coeficientes de variação recebem a classificação como baixo, conforme o Quadro 32. O R^2 da reta de regressão foi 0,932, logo o coeficiente de correlação é 0,965 (correlação muito alta, como visto no Quadro 33).

Quadro 48 - Resultados da análise estatística para os parâmetros do critério 2

Parâmetro	Valor médio	Variância	Desvio Padrão	CV (%)
c	0	21,433	4,630	-
φ	36°	-	0,040	6,386
tg φ	0,7262	0,004	0,061	8,433

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.3 ANÁLISE DE ESTABILIDADE DO TALUDE

Após os procedimentos iniciais citados no tópico 3.5, foram inseridos os dados do material constituinte do talude para os dois critérios de ruptura utilizados no ensaio de cisalhamento direto. Conforme indicado na Figura 93, para ambos os critérios, utilizou-se o intercepto coesivo nulo e o peso específico do solo de 14,5 kN/m³, que corresponde à média aritmética dos valores obtidos nas 12 amostras. Já a média do ângulo de atrito, foi de 37,5° para o critério 1 e 36° para o critério 2.

Figura 93 - Propriedades do material do talude no Geo-Slope

The figure displays two screenshots of the 'Dados - Materiais' window in Geo-Slope software. Both screenshots show the 'Estabilidade de Taludes' section with the 'Modelo do Material' set to 'Mohr-Coulomb'. The 'Básico' tab is active, showing the following parameters:

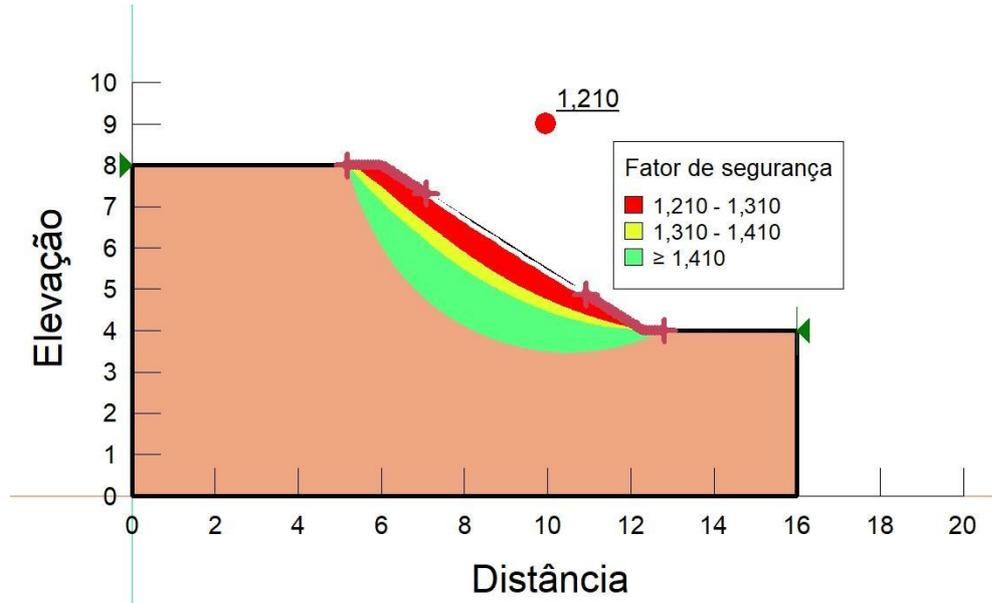
- Peso Específico: 14,5 kN/m³
- Coesão Efetiva (C'): 0 kPa
- Phi: 37,5 ° (top screenshot) and 36 ° (bottom screenshot)

The material list at the top of each window includes 'Solo areia siltosa (critério 1)' and 'Solo areia siltosa (critério 2)', both with an orange color selection.

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

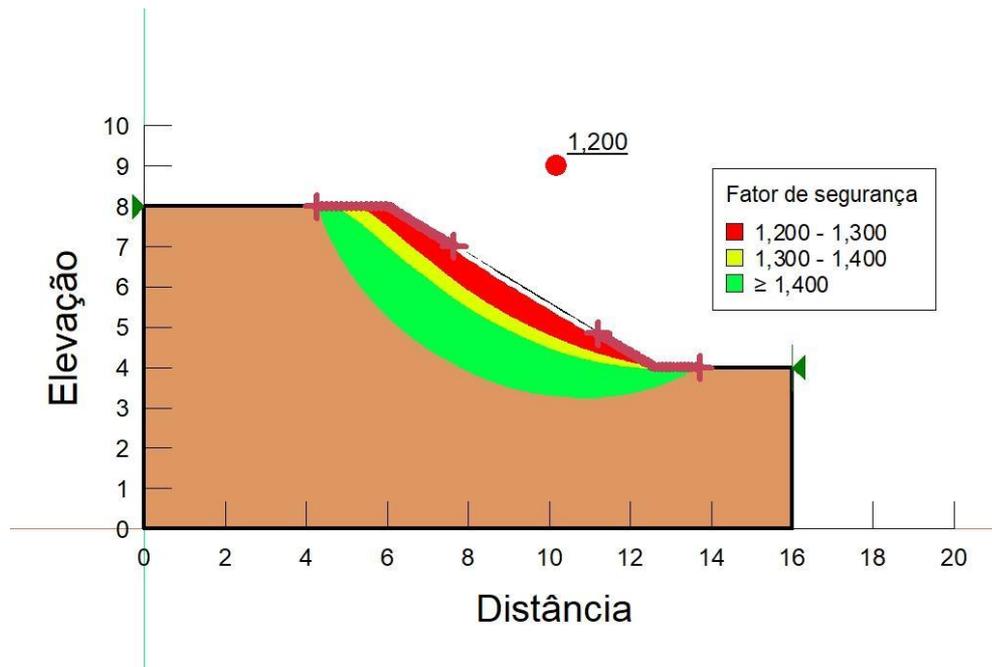
As primeiras análises foram realizadas a fim de obter o fator de segurança mínimo de 1,2, como desejado, e encontrar qual o ângulo correspondente do talude. A Figura 94 representa a análise de estabilidade para o critério 1 e a Figura 95 para o critério 2. Ambas apresentaram uma superfície de ruptura em forma de uma linha branca na face do talude, que significa que a ruptura é superficial, como esperado para solos arenosos sem coesão.

Figura 94 - Análise de estabilidade 1 (FS=1,21 para o critério 1)



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

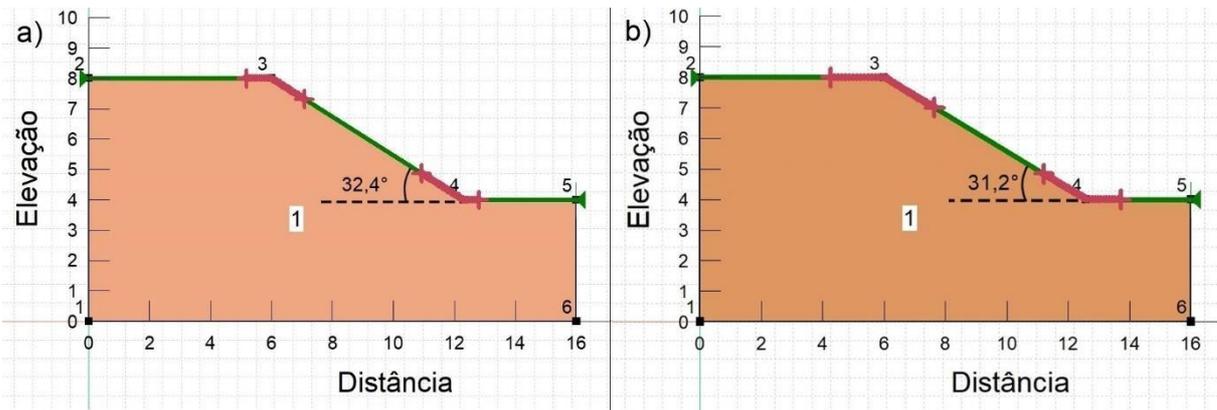
Figura 95 - Análise de estabilidade 2 (FS=1,2 para o critério 2)



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Os ângulos de estabilidade do talude foram obtidos geometricamente, sendo de $32,4^\circ$ para o critério 1 e $31,2^\circ$ para o critério 2, conforme indicado na Figura 96. Como os resultados são bem próximos, ambos poderiam ser usados para este tipo de solo. Com base nisso, a inclinação escolhida para ser utilizada no ensaio de Inderbitzen modificado foi de 32° .

Figura 96 - Ângulos de estabilidade para o talude no critério 1 (a) e critério 2 (b)



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Cabe colocar que Florencio (2021) realizou uma análise probabilística dos dados para avaliar a probabilidade de ruptura do talude, utilizando esta inclinação. Pelo Método das Estimativas Pontuais, o talude apresentou uma probabilidade de ruptura de 7%, enquanto pelas 2.000 simulações Monte Carlo, a probabilidade foi de 5,45%, indicando nível de performance entre o “pobre” e o “não satisfatório”. Segundo a autora, esses valores podem estar associados a ausência de coesão verdadeira, visto que o intercepto coesivo do solo é nulo.

É importante ressaltar que os parâmetros de resistência do solo foram obtidos para a situação mais crítica, isto é, na condição saturada. Em campo, o solo está em condição não saturada, apresentando coesão aparente que aumenta a resistência ao cisalhamento e o FS, conforme explicado no item 2.3. Sendo assim, sugere-se que sejam feitos ensaios para identificar o comportamento do solo na condição não saturada, determinando a curva característica para avaliação da coesão aparente. É pertinente dizer que pode haver uma certa dificuldade de fazer um projeto considerando esta condição, visto que a coesão aparente se altera com a variação de umidade provocada pelas condições climáticas.

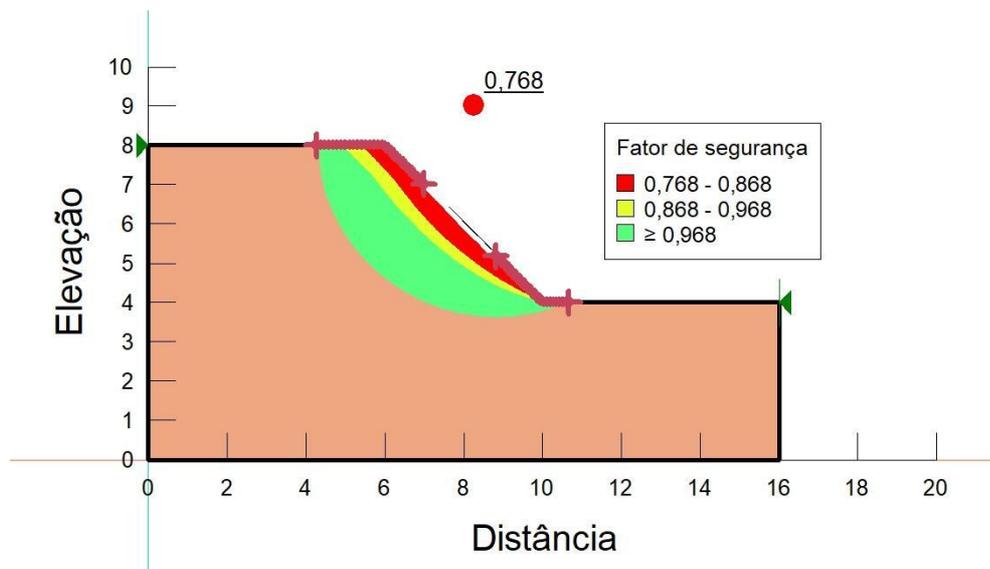
As técnicas de proteção superficial que serão utilizadas para recuperação da área irão proporcionar um aumento na resistência do solo e, conseqüentemente, no fator de segurança, devido ao reforço de resistência promovido pelas raízes do capim vetiver, como foi observado por Barbosa e Lima (2012) e Gomes *et al.* (2020).

Não foram encontrados os parâmetros de resistência para acrescentar esses materiais na análise de estabilidade. Com isso, sugere-se que após a aplicação da biomanta e do crescimento da vegetação, entre elas o capim vetiver, sejam feitas novas coletas de solo para realizar o ensaio de cisalhamento novamente e observar as alterações nos parâmetros de resistência, bem como o fator de segurança obtido.

As análises seguintes (Figura 97 a Figura 100) consideraram os ângulos propostos pela literatura, com o objetivo de fazer uma análise comparativa dos fatores de segurança e os riscos envolvidos na utilização desses ângulos.

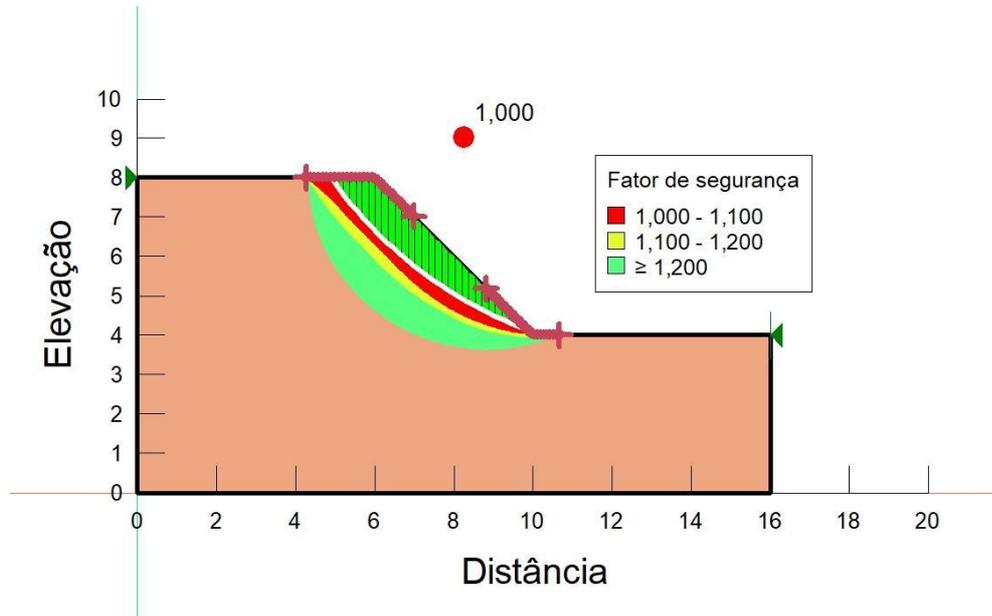
Para o ângulo de 45° , com o critério 1, o FS foi de 0,768 na opção Todas as Superfícies de Pesquisa (TSP) e apresentou uma tendência de ruptura superficial (Figura 97). Já a Figura 98, indica a superfície de ruptura na opção Intervalo da Zona Potencial (IZP), em que o FS foi de 1,0. Nas duas situações o FS não atendeu ao requisito mínimo de segurança, portanto o ângulo de 45° apresenta-se instável para o talude em questão.

Figura 97 - Análise de estabilidade 3 (ângulo de 45° para o critério 1, TSP)



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

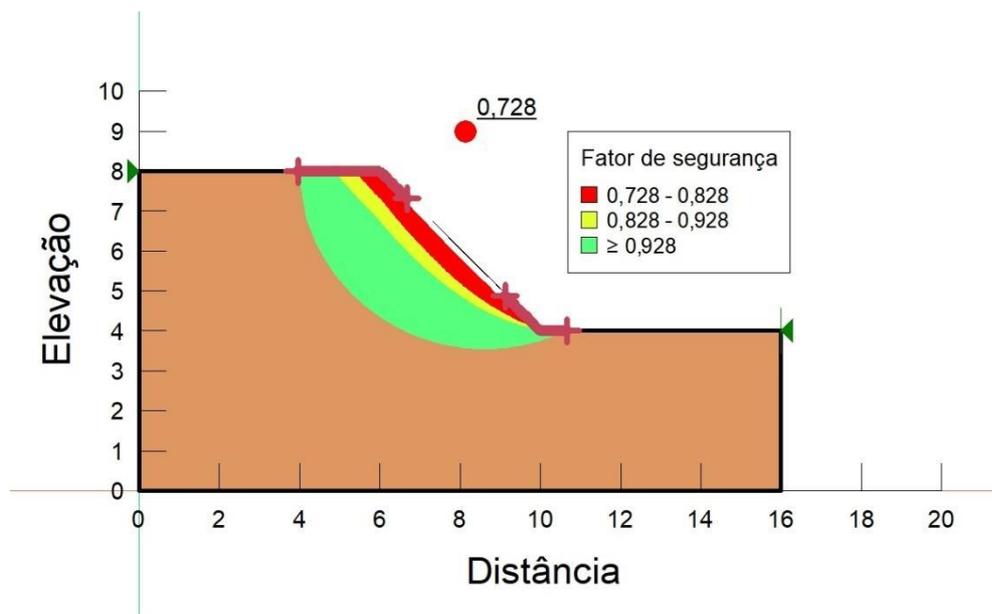
Figura 98 - Análise de estabilidade 3 (ângulo de 45° para o critério 1, IZP)



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

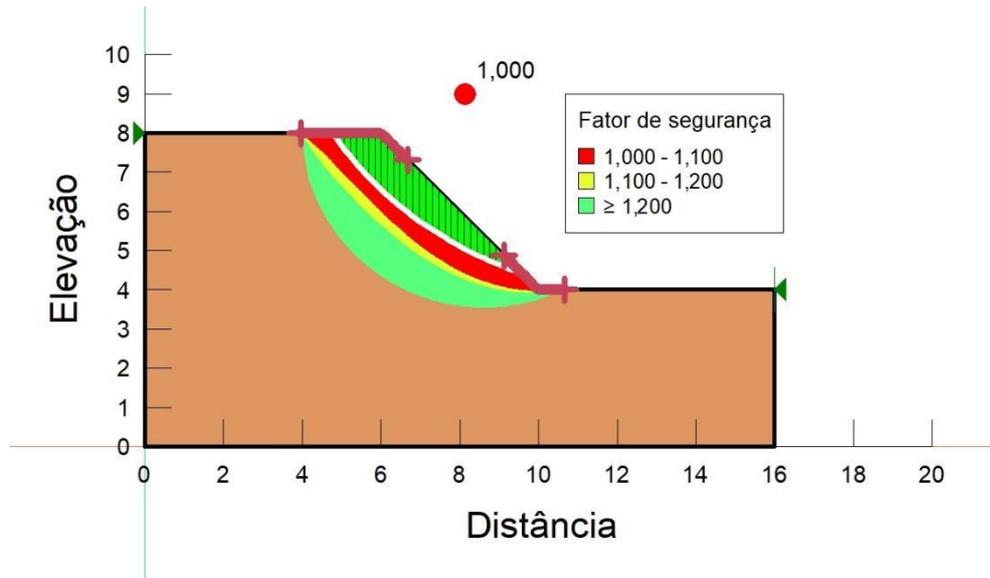
Ainda para o ângulo de 45°, mas utilizando os parâmetros do critério 2, o talude apresentou FS de 0,728 para TSP, com ruptura em camada superficial (Figura 99) e FS de 1,0 para IZP, com superfície de ruptura indicada na Figura 100. Novamente, o ângulo de 45° pode ser considerado instável, visto que o FS foi menor que 1,2. Como o ângulo de 45° já foi considerado instável para o talude, não foi necessário fazer a análise de estabilidade para o terceiro ângulo em estudo, que seria o de 63°.

Figura 99 - Análise de estabilidade 4 (ângulo de 45° para o critério 2, TSP)



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Figura 100 - Análise de estabilidade 4 (ângulo de 45° para o critério 2, IZP)



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Cabe, pois, concluir que, neste caso, se o retaludamento fosse feito seguindo o ângulo de 45° ou de 63° (proposto pela literatura e por empresas de bioengenharia), o talude ficaria instável, podendo gerar riscos de ruptura e movimentos de massa, como escorregamentos. Mesmo após as aplicações das técnicas de recuperação, o talude poderia continuar instável, sendo que somente os ensaios geotécnicos possibilitariam confirmar suas condições de resistência e estabilidade.

Como foi visto no Quadro 21, há diversos trabalhos e PRAD's recomendando inclinações que vão de 23° a 70°, por exemplo, porém sem fundamentação geotécnica. Enquanto isso, inclinações de 18° a 76° são recomendadas pela literatura, como colocado no Quadro 22, fazendo uma generalização de acordo com o material constituinte de solo ou rocha. E, ainda, as inclinações máximas recomendadas pelas fabricantes de mantas antierosivas variam de 45° a 76° (Quadro 23), conforme o tipo de material.

Assim sendo, são diversas possibilidades de aplicação sem um direcionamento específico, que podem implicar em grandes riscos para o talude e prejudicar o processo de recuperação das áreas degradadas, uma vez que não há justificativa geotécnica nessas recomendações. Além disso, desta forma pode ser feita uma superestimativa do corte, tornando a etapa de retaludamento mais onerosa que o necessário.

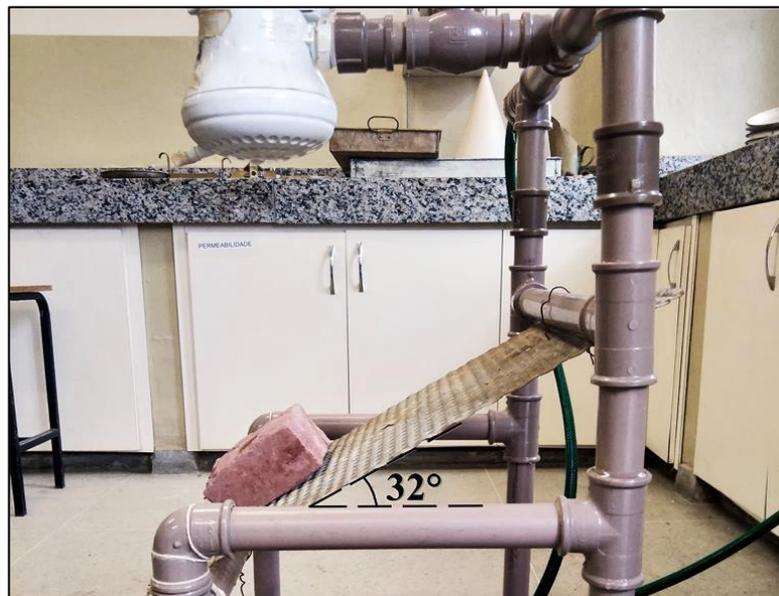
Por tudo isso, torna-se evidente a importância da realização dos ensaios de resistência ao cisalhamento para obter os parâmetros de resistência do solo, fazer as análises de estabilidade e encontrar o ângulo máximo que atende ao fator de segurança exigido pelo talude para a etapa

de retaludamento de um PRAD. Além disso, ressalta-se a importância da realização de sondagens para conhecer o perfil geológico-geotécnico do solo. Dada a relevância desses procedimentos quanto às questões ambientais, de segurança e até mesmo econômicas, propõe-se que seja feita uma revisão nas normas de PRAD, como a Instrução Normativa nº 4 do IBAMA (2011) e nº 11 da ICMBIO (2014), a fim de acrescentar essas informações e orientações quanto à realização dos ensaios e análises geotécnicas.

4.4 ENSAIO DE INDERBITZEN MODIFICADO

Das cinco amostras coletadas, três foram aptas para realização do ensaio. Após retirar cada bloco do molde, cada corpo de prova foi colocado na rampa inclinada à 32° , como indicado na Figura 101. Dado o início do ensaio, foi ativado o cronômetro para realizar as coletas nos tempos definidos.

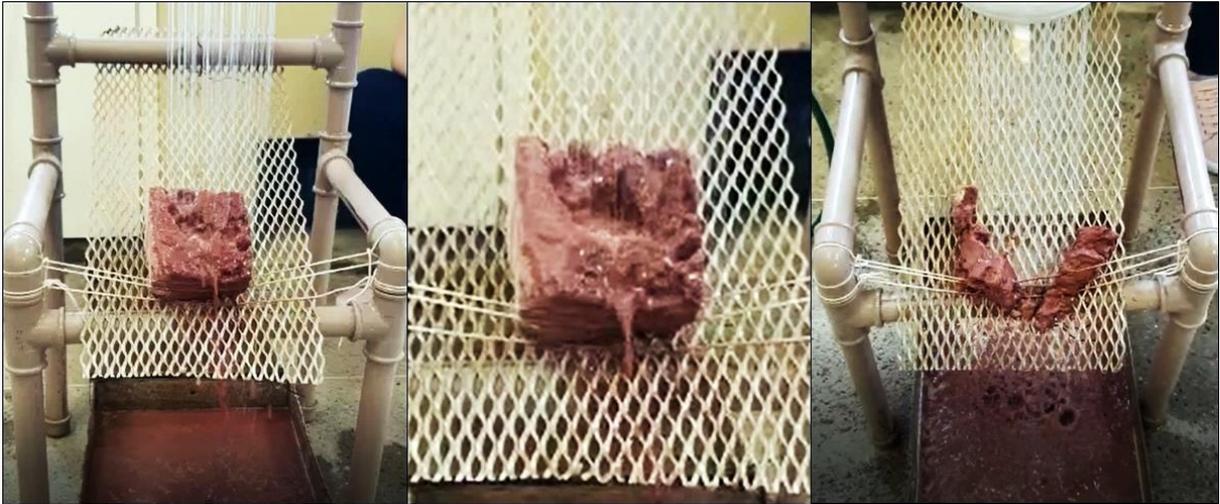
Figura 101 - Inclinação da rampa no ensaio de Inderbitzen modificado



Fonte: Acervo pessoal (2021)

Na Figura 102, pode-se ver o comportamento da amostra 1 durante o ensaio. Observou-se uma perda de solo muito rápida logo no primeiro minuto, com formação de caminho preferencial para passagem da água até o rompimento do bloco ao meio, sendo totalmente carregado e chegando ao final do ensaio com apenas 2 minutos e 47 segundos. Desta forma, houveram apenas 2 recipientes de coleta, correspondentes aos estágios de 1 minuto e 3 minutos.

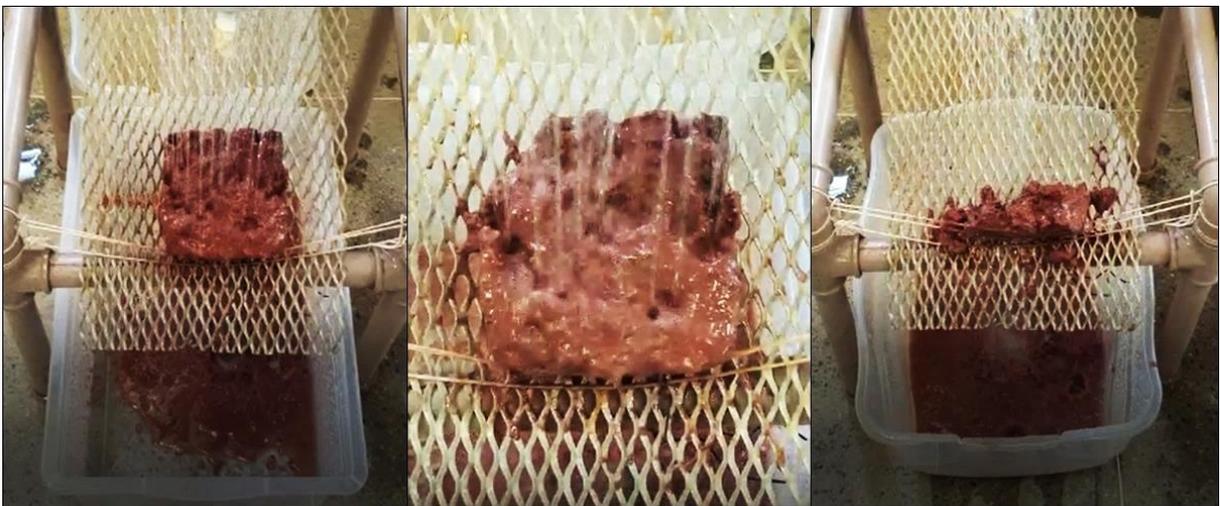
Figura 102 - Comportamento da amostra 1 no ensaio de Inderbitzen modificado



Fonte: Acervo pessoal (2021)

A Figura 103, por sua vez, representa o comportamento da amostra 2 durante o ensaio. Desta vez, pode-se dizer que a erosão foi distribuída de forma mais uniforme sobre a superfície de contato com a água e com alta velocidade no processo erosivo, semelhante ao anterior. A massa de solo foi completamente erodida em apenas 2 minutos e 18 segundos, resultando novamente em apenas 2 estágios de coleta.

Figura 103 - Comportamento da amostra 2 no ensaio de Inderbitzen modificado



Fonte: Acervo pessoal (2021)

Por fim, na Figura 104, tem-se o comportamento da amostra 3 durante o ensaio, que ocorreu de forma parecida com os anteriores. A duração total do ensaio foi de 2 minutos e 21 segundos, observando-se que uma grande parte da massa de solo foi erodida já no primeiro minuto.

Figura 104 - Comportamento da amostra 3 no ensaio de Inderbitzen modificado



Fonte: Acervo pessoal (2021)

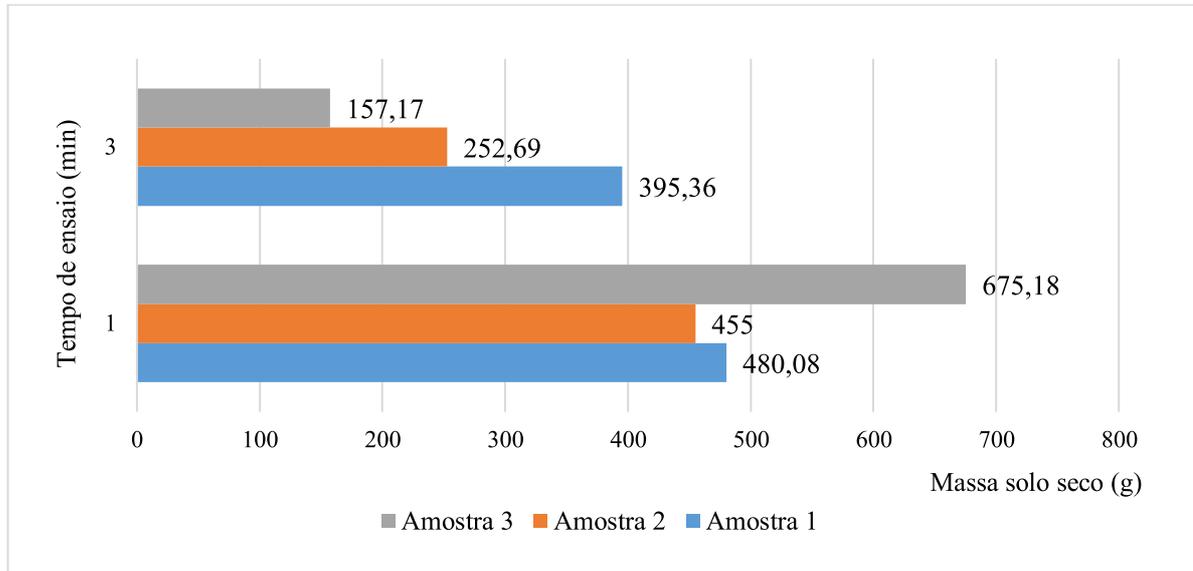
Após a retirada do excesso de água dos recipientes coletados, o material foi levado para estufa. Após a secagem, foram feitas as pesagens para os respectivos cálculos, em que os resultados estão dispostos no Quadro 49 e nos gráficos 23, 24, 25 e 26.

Quadro 49 - Resultados do ensaio de Inderbitzen modificado

Amostra	Tempo (min)	Massa de solo seco (g)	Massa total (g)	% da massa de solo perdida	E (g/cm ²)	E acumulado (g/cm ²)	Ve (g/cm ² /h)
1	1	480,08	875,44	54,84	4,80	4,80	288,05
	3	395,36		45,16	3,95	8,75	175,09
2	1	455	707,69	64,29	4,55	4,55	273,00
	3	252,69		35,71	2,53	7,08	141,54
3	1	675,18	832,35	81,12	6,75	6,75	405,11
	3	157,17		18,88	1,57	8,32	166,47

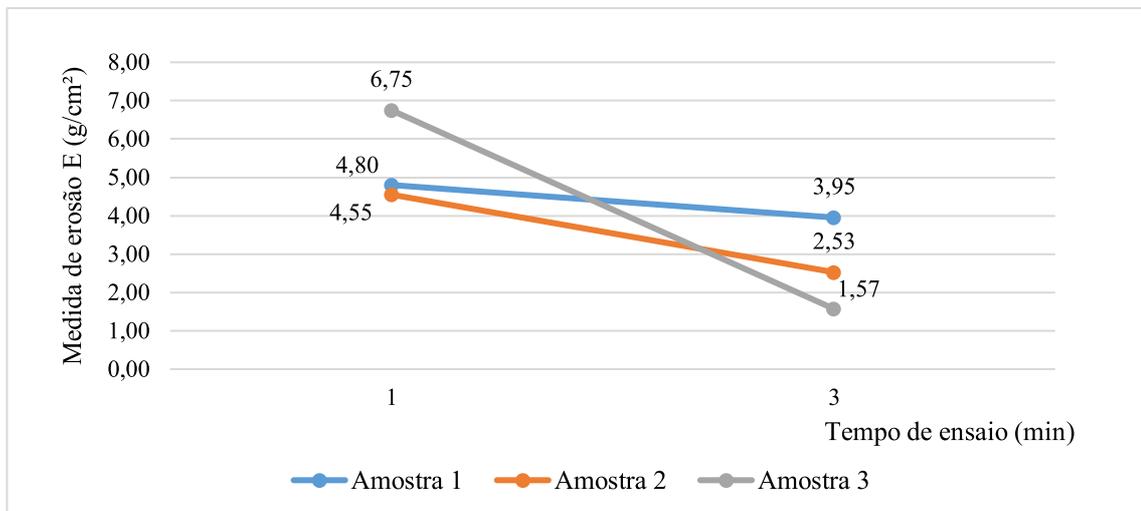
Fonte: Autora (2021)

As perdas de solo nos respectivos tempos de ensaio podem ser observadas no Gráfico 23, onde nas três situações a maior perda de solo ocorreu no minuto 1. Em termos percentuais, aproximadamente 54% do total da massa de solo da amostra 1 foi perdida no primeiro minuto, enquanto na amostra 2 e 3 foram, respectivamente, 64% e 81%. Isso mostra que este solo tem uma tendência de ser erodido numa velocidade muito alta, logo nos primeiros instantes de gotejamento.

Gráfico 23 - Perdas de solo *versus* tempo de ensaio

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

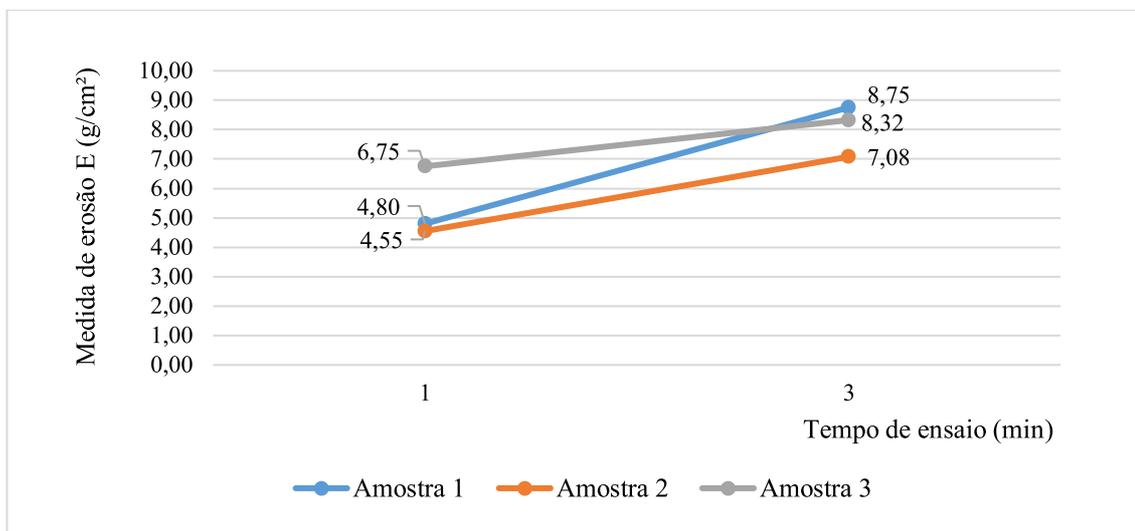
A medida de erosão (E) é calculada pela razão entre a massa de solo seco pela área da superfície de contato com o gotejamento (neste caso, 100 cm²). Conforme indicado no Gráfico 24, as amostras 1 e 2 apresentaram valores de E muito semelhantes, de 4,80 g/cm² e 4,55 g/cm², respectivamente, no minuto 1; 3,95 g/cm² e 2,53 g/cm², respectivamente, no minuto 3. A amostra 3 apresentou um valor maior de 6,75 g/cm² no primeiro minuto, o que já era esperado pela observação do ensaio. Esta diferença pode ter ocorrido devido a uma pequena falta de solo no canto direito do corpo de prova desde o início do ensaio ou, ainda, devido ao posicionamento mais centralizado da amostra na rampa.

Gráfico 24 - Medida de erosão E *versus* tempo de ensaio

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

É importante obter também o fator E acumulado, isto é, somado ao longo do tempo, para que seja feito o cálculo da velocidade de erosão. No Gráfico 25, pode-se observar que o E acumulado nos 3 minutos foi semelhante nas três amostras, de aproximadamente 8 g/cm². A partir dessa semelhança, pode-se estimar uma tendência de comportamento deste solo.

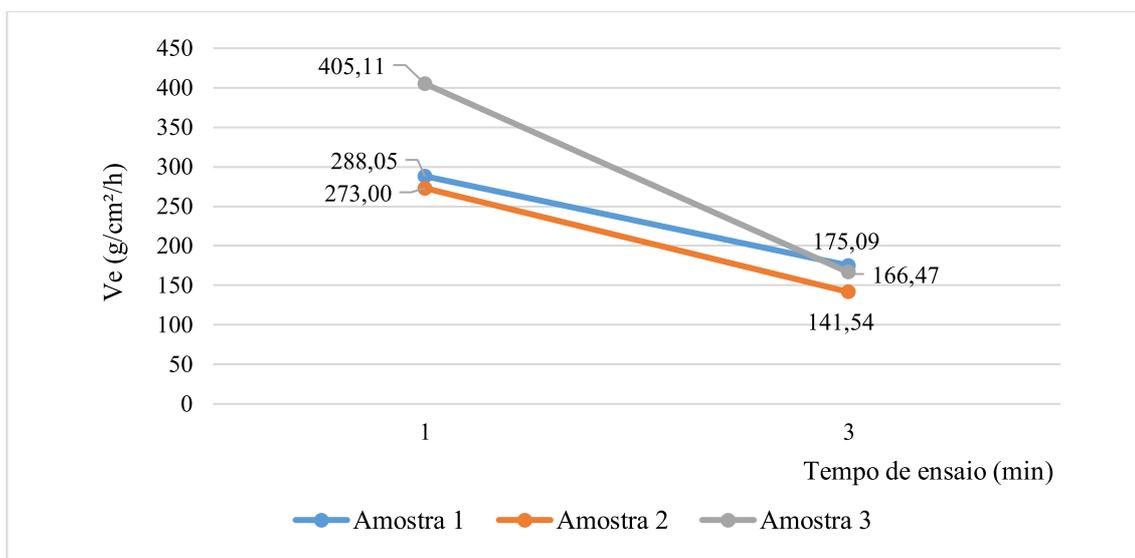
Gráfico 25 - Medida de erosão E acumulado *versus* tempo de ensaio



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

A velocidade de erosão (V_e) é obtida a partir do E acumulado referente à unidade da hora. Isto é, para calcular a velocidade de erosão nos 3 minutos, o E acumulado neste tempo foi multiplicado por 20, correspondendo à 1 hora. As respectivas velocidades das amostras podem ser observadas no Gráfico 26.

Gráfico 26 - Velocidade de erosão *versus* tempo de ensaio

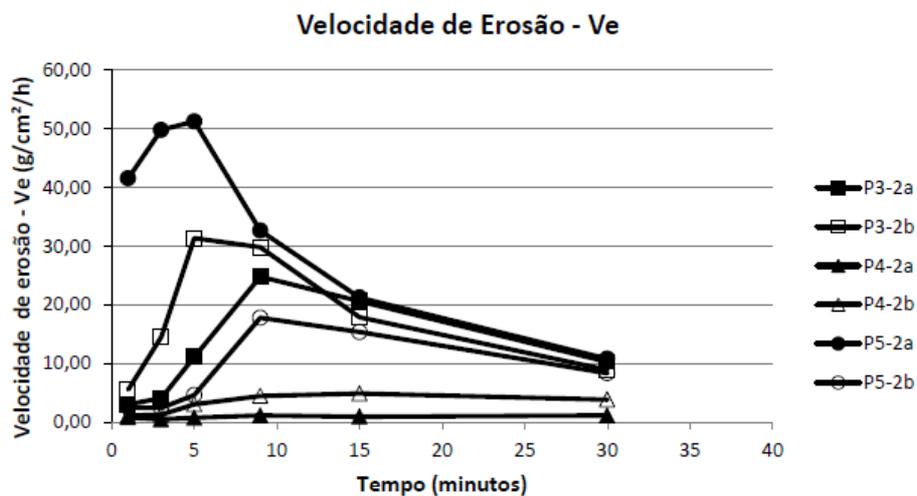


Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Conforme esperado, as velocidades atingiram valores muito altos, com picos no primeiro minuto variando entre 273 g/cm²/h (amostra 2) e 405 g/cm²/h (amostra 3). A velocidade final, aos 3 minutos de ensaio, variou de 141 g/cm²/h (amostra 2) a 175 g/cm²/h (amostra 1), que ainda são velocidades muito altas. De acordo com o Quadro 31, solos com velocidades de erosão maiores que 27 g/cm²/h já são classificados na faixa C, a menos resistente à erosão. Logo, todas as três amostras indicaram a classificação do solo na faixa C, conforme o esperado. Cabe colocar que esses resultados ocorreram para a inclinação de 32°. Sendo assim, a utilização de inclinações superiores poderia ter gerado velocidades ainda maiores de erosão, acelerando a formação de feições erosivas na prática e comprometendo ainda mais o solo. Vale ressaltar que não foi possível realizar o ensaio com outras inclinações devido às restrições impostas pela pandemia do Covid-19.

Em comparação ao estudo de Vieira (2017), que realizou o ensaio em duas direções diferentes de foliação (paralela ou perpendicular à grade de apoio), os valores encontrados para a medida de erosão E oscilaram de 0,59 g/cm² a 5,16 g/cm², demonstrando a influência das estruturas reliquias. Para as amostras classificadas como areia siltosa (P5-2a e P5-2b), o ensaio durou os 30 minutos, sendo que parte delas ainda se manteve sobre a grade de apoio ao final. A amostra P5-2a foi a que apresentou o maior pico de velocidade de erosão (51,2 g/cm²/h), conforme a Figura 105, sendo classificada na Faixa C. Já a amostra P5-2b teve velocidade máxima inferior a 20 g/cm²/h, recebendo a classificação na faixa B.

Figura 105 - Velocidade de erosão pelo tempo no estudo de Vieira (2017)



Fonte: Vieira (2017)

4.5 PRAD CONCEITUAL

4.5.1 Implantação

Considerando os resultados das análises físicas (tópico 2.7.2), químicas, de erodibilidade e resistência ao cisalhamento (tópicos 4.1 a 4.4) realizadas em laboratório, pode-se iniciar a definição das intervenções a serem feitas, na época de estiagem, no talude e na voçoroca para recuperação da área.

- **Isolamento da área, aceiros e combate a formigas**

A primeira etapa consiste no isolamento da área. Considerando que existe um portão de acesso pela Rua Adelaide Maria da Conceição, que permite a entrada eventual de pessoas para depositar lixo e atear fogo no local, é importante que seja feito o cercamento de arame na área de contribuição e aceiros contra queimadas. Também deve ser realizado o controle de formigas, desde a roçada para limpeza da área até a formação do plantio. Além disso, é válido que sejam realizadas ações preventivas de educação ambiental para conscientizar os moradores próximos sobre os comportamentos benéficos e prejudiciais à natureza, de modo a evitar novos danos durante e após a intervenção.

- **Limpeza do terreno**

A etapa seguinte consiste na limpeza da área e eventual destocamento (corte, remoção e destinação final dos restos vegetativos) nos locais onde posteriormente serão feitos os trabalhos de terraplanagem e de drenagem. Para este serviço, é indicada a utilização de foices e roçadeiras, de modo a preparar o terreno para receber as atividades seguintes. Deve-se remover as obstruções naturais ou artificiais existentes, como vegetação, tocos, raízes, entulhos, etc.

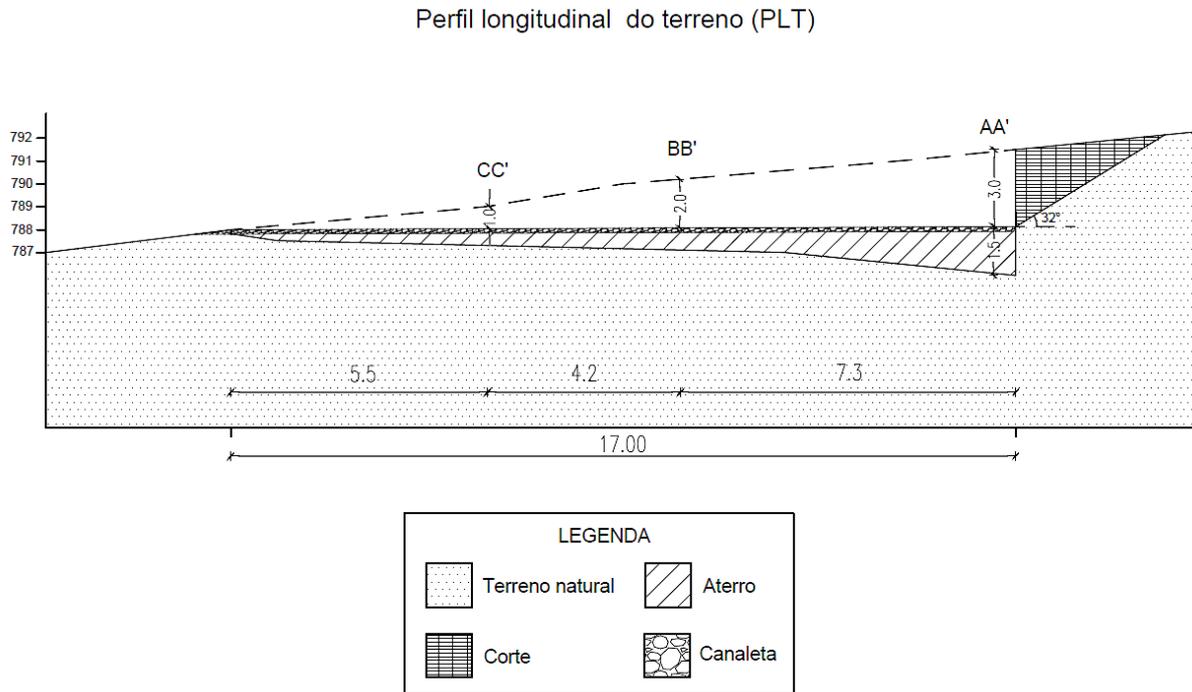
- **Terraplanagem**

As operações de terraplanagem (corte e aterro) deverão ser realizadas com equipamentos mecanizados, como o trator esteira ou escavadeira hidráulica, com eventual uso de ferramentas manuais, como enxada, enxadão e pá. A reconformação do terreno deve atender a inclinação do talude de no máximo 32° , para garantir o fator de segurança mínimo de 1,2, conforme o resultado da análise de estabilidade do talude. Deve-se também eliminar as arestas e negatividades, remover ou minimizar os sulcos erosivos, preencher os espaços vazios e suavizar os contornos. Esse procedimento é feito de forma manual a fim de obter uma superfície adequada para receber as biomantas.

Na Figura 106, pode-se observar uma ilustração do perfil longitudinal do terreno e as áreas de corte e aterro, com valores aproximados. Neste caso, optou-se por ser feito um platô

com solo compactado, nivelando o terreno, que receberá uma canaleta com declividade de até 10%. Desta forma, a altura máxima das paredes da voçoroca foi reduzida para aproximadamente 3 metros, não sendo necessária a divisão do talude em patamares (bermas). Além disso, a redução da altura implica em um ganho no FS, visto que será mantida a inclinação máxima de 32° e, ainda, diminui as áreas de corte necessárias, como serão dispostas a seguir.

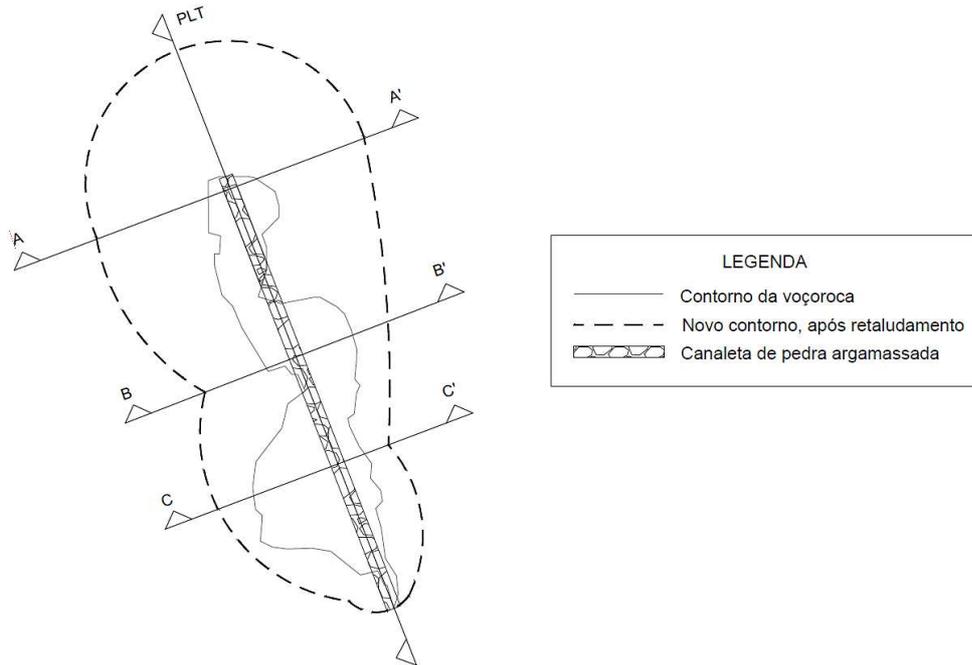
Figura 106 - Croqui do perfil longitudinal do terreno e áreas de corte e aterro



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

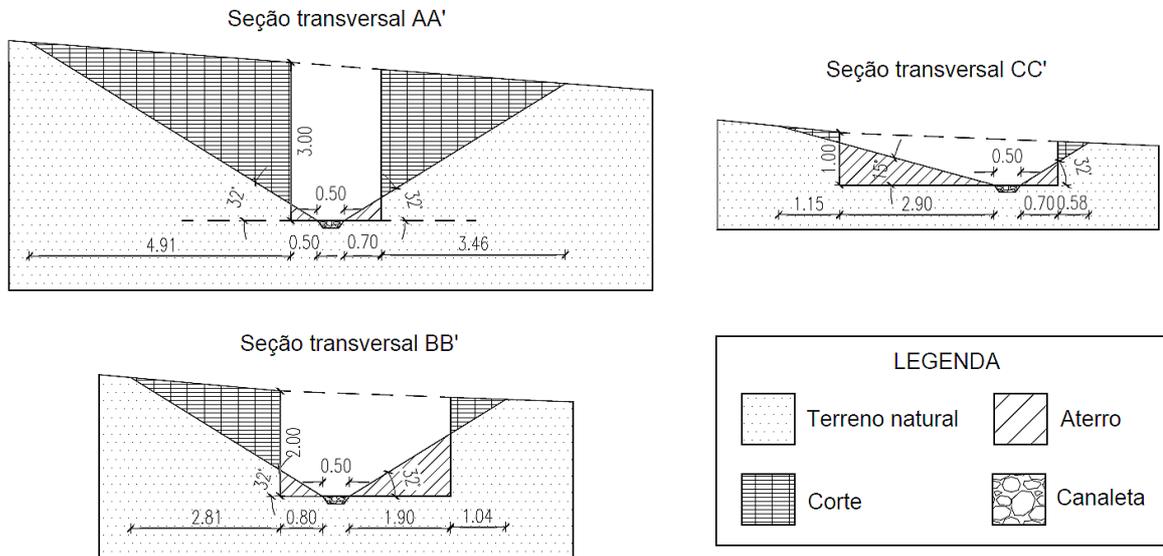
A partir dessas informações, traçou-se um novo contorno, ilustrado na Figura 107, em que a voçoroca recuperada forma uma concavidade no terreno. Na Figura 108, tem-se o croqui das seções AA', BB' e CC', onde pode-se observar a canaleta com largura de 50 cm e as respectivas áreas de corte e aterro, para atender ao ângulo máximo de 32°. Todos os valores indicados são apenas aproximações, o correto dimensionamento e volume de material devem ser feitos com mais detalhes pelo projeto executivo.

Figura 107 - Croqui do novo contorno após o retaludamento



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Figura 108 - Croqui dos perfis transversais AA', BB' e CC'



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

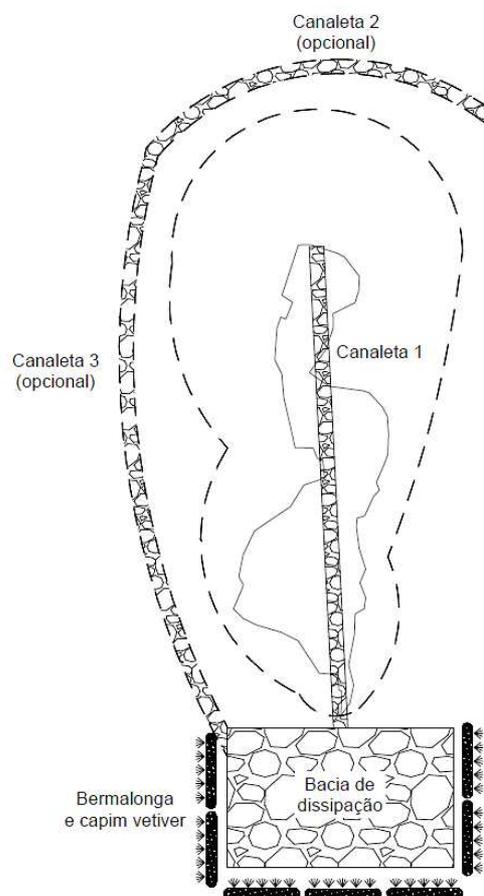
De preferência, deve-se buscar ao máximo que o material removido no corte seja reaproveitado nos aterros. Observando os perfis da Figura 108, o volume de corte, aparentemente, será maior que o de aterro, por isso a realização do platô no nivelamento do terreno é mais uma forma de poder reaproveitar este material. Sugere-se também que seja realizado o ensaio de compactação, para estudo e controle de qualidade dos aterros. As

orientações para realização dessa etapa podem ser observadas na norma DNIT 106 (DNIT, 2009a) para cortes e norma DNIT 108 (DNIT, 2009b) para aterros.

- **Operações de drenagem**

Após os procedimentos do retaludamento, deve-se iniciar as obras de drenagem no interior e no entorno da voçoroca, que tem fundamental importância na captação e desvio das águas de escoamento superficial da região a ser tratada. Na Figura 109 está representada uma ilustração dos dispositivos de drenagem sugeridos para a área.

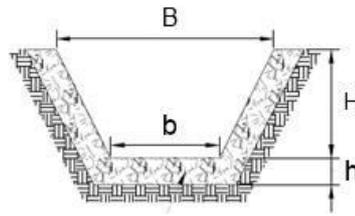
Figura 109 - Croqui com os dispositivos de drenagem



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Primeiramente, para drenagem no interior da voçoroca, recomenda-se a construção de uma canaleta ao fundo do talude (Canaleta 1), que irá receber e direcionar a água que, eventualmente, passar pela feição erosiva. Conforme DNIT (2006), as canaletas com formato trapezoidal, conforme a Figura 110, são mais recomendáveis por apresentarem maior eficiência hidráulica.

Figura 110 - Seção transversal de uma canaleta trapezoidal de pedra argamassada



Fonte: ENGETA (2012) (Adaptado pela autora)

Sugere-se que o revestimento seja feito com pedra argamassada (ou similar), aproveitando os materiais disponíveis no local. Para isso, deve-se abrir a valeta, auxiliado por gabaritos de madeira (ou similar), lançar e assentar as pedras selecionadas. Conforme observado em alguns projetos de recuperação de voçorocas, as pedras de mão devem possuir diâmetro entre 15 cm e 25 cm, serem provenientes de rocha sã ou pouco alterada e resistentes a processos físico-químicos, além de não possuir frações finas nem material pulverulento. Deve-se ajustar as pedras de modo a formar o mínimo de vazios e aplicar argamassa de cimento-areia no traço 1:4, segundo DNIT (2006). Sugere-se que a largura da canaleta seja de até 50 cm, sendo que os maiores detalhes do dimensionamento devem ser feitos pelo projeto executivo.

Como uma alternativa conservadora a ser avaliada pelo projeto executivo, sugere-se a construção de uma canaleta de crista à montante da voçoroca (Canaleta 2), revestida com pedra argamassada, para reduzir ainda mais o fluxo de água na região erodida. A Canaleta 2 ainda poderia ser ligada a uma canaleta lateral (Canaleta 3) que atuaria como uma descida d'água. A Canaleta 3 seria colocada à esquerda da voçoroca, pois o caimento da água da chuva ocorre da esquerda para a direita. Esses dispositivos foram colocados como opcionais pois a área de contribuição é pequena e, conseqüentemente a lâmina escoada também.

Para revestimento da descida d'água, pode-se fazer uma ecocalha (Figura 111), que é constituída por duas laterais em solo vegetado, com utilização de geossintéticos e assoalho em pedras, conferindo também um ótimo aspecto visual e ambiental.

Figura 111 - Ecocalha



Fonte: Vertical Green (2015)

Como à jusante da voçoroca foi observado um princípio de formação de sulcos e até possíveis ravinamentos, é importante colocar dispositivos de drenagem nesta região para evitar o desenvolvimento de novos processos erosivos. Sendo assim, as canaletas 1 e 3 serão conectadas, por fim, a uma bacia de dissipação, que amortece os deságues pluviais. Esta pode ser executada por meio de técnicas de engenharia natural, com o uso de tocos de madeira e pedras locais, como indicado na Figura 112, cujo dimensionamento deve ser calculado pelo projeto executivo.

Figura 112 - Bacia de dissipação com madeira e pedras



Fonte: Vertical Green (2015)

Após o dissipador, ainda recomenda-se fazer uma barreira viva de capim vetiver associada aos biorretentores Bermalonga® para evitar que o escoamento da água contribua para novas erosões após o dissipador, como indicado na Figura 113.

Figura 113 - Barreira de capim vetiver ao entorno do dissipador de energia



Fonte: Lucena (2009)

Conforme indicado na Figura 114, há um possível canal verde nas proximidades da voçoroca. Sugere-se que seja feita uma revitalização deste canal, para que seja mais um dispositivo de drenagem a contribuir na proteção do talude.

Figura 114 - Canal verde a ser revitalizado



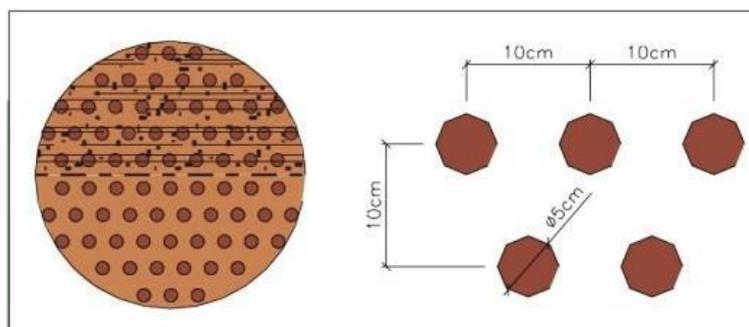
Fonte: Acervo pessoal (2020)

As demais conexões e direcionamentos da água após a bacia de dissipação deverão fazer parte de outros trabalhos envolvendo as questões de drenagem naquela região do Jardim Botânico de forma mais detalhada e integrada.

- **Revegetação**

Após as operações de drenagem, inicia-se as etapas de coveamento, adubação e plantio no talude, de preferência na estação chuvosa. O microcoveamento do talude consiste no procedimento de abertura de pequenas covas que contribuem para o aumento da rugosidade do terreno e para retenção dos insumos que serão aplicados. Geralmente, as covas tem um diâmetro aproximado de 5 cm, com profundidade entre 3 cm e 5 cm, sendo dispostas seguindo o sistema quincôncio e com espaçamento entre elas de 10 cm, conforme a Figura 115.

Figura 115 - Detalhes do microcoveamento



Fonte: ENGETA (2012)

A etapa seguinte consiste no preparo do solo com adubação e calagem, de forma a reduzir sua acidez e aumentar sua fertilidade para permitir o desenvolvimento da vegetação. Para calagem, recomenda-se o uso de calcário dolomítico, sendo feita, geralmente, três meses antes do plantio. O calcário deve ser distribuído a lanço e incorporado uniformemente ao solo. Existem vários métodos para calcular o quantitativo necessário de calcário, sendo os mais comuns no Brasil o método da saturação por bases ou o método baseado nos teores de Al e (Ca + Mg) trocáveis.

No Quadro 50 apresenta-se os insumos e seus respectivos quantitativos que foram aplicados na recuperação da voçoroca 1 do Jardim Botânico, citada no tópico 2.7.1, podendo também servir de base para o caso em questão. Além disso, cabe destacar a importância da incorporação de matéria orgânica para melhoria das condições físicas e químicas do solo, conforme visto no tópico 4.1.

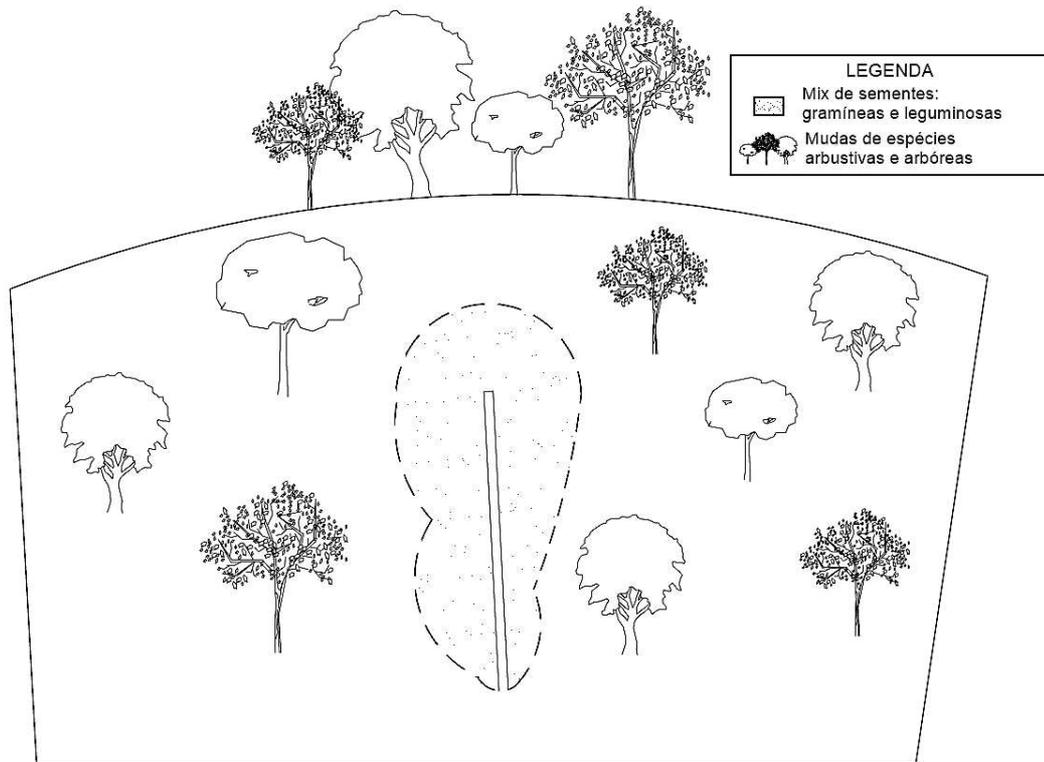
Quadro 50 - Quantidades dos insumos a serem aplicados

Insumos básicos	Quantidade (kg/ha)
1. Sementes	150 - 300
2. Fertilizantes	1000 - 1500
2.1 Adubo NPK 4-14-8	500 - 750
2.2 Fosfato Natural	500 - 750
3. Adubação de cobertura	
3.1 Sulfato de amônia	80 - 250
3.2 Superfosfato Simples	80 - 250
4. Mulch de fibra de madeira	1000 - 1500
5. Adesivo Orgânico	150 - 300
6. Composto Orgânico	2000 - 5000
Obs.: A mistura a ser aplicada é dimensionada para 5000 litros de água, correspondente à carga de aplicação para 1000 m ² de superfície de talude, por via aquosa (hidrossemeadura). A adubação de cobertura deverá ser realizada de 45 a 60 dias após a germinação, mediante avaliação técnica.	

Fonte: ENGETA (2012) (Adapato pela autora)

A próxima etapa consiste no plantio das sementes e mudas. A Figura 116 representa um esquema para revegetação da área, demonstrando de forma ilustrativa a localização dos diferentes grupos de espécies.

Figura 116 - Croqui das regiões de plantio e respectivos grupos



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Primeiramente, realiza-se a semeadura do mix de sementes que, em geral, contempla de 6 a 8 espécies, de preferência uma associação entre gramíneas e leguminosas. Essa associação permite o aumento da ciclagem de nutrientes, melhora a resistência a pragas e a eficiência de recobrimento em relação ao solo. Além disso, a variedade de espécies implica em diferentes tamanhos das raízes e partes aéreas das plantas, diminuindo a chance de um plano de ruptura bem definido e melhorando a estabilização laminar, de modo que aumenta a rugosidade da superfície do talude e diminui a velocidade de escoamento da água.

A seleção das espécies deve basear-se em critérios de adaptabilidade edafoclimática, rusticidade, capacidade de reprodução e perfilhamento, velocidade de crescimento e facilidade de obtenção de sementes. No Quadro 51 e o Quadro 52 são apresentados, respectivamente, as espécies de gramíneas e leguminosas recomendadas por Pereira (2006a) para recuperação de áreas degradadas e controle de erosão.

Quadro 51 - Espécies de gramíneas para recuperação de áreas degradadas e controle de erosão

Família	Nome científico	Nome popular
Poaceae	<i>Andropogon gayanus</i>	Andropogon
Poaceae	<i>Avena strigosa</i>	Aveia preta
Poaceae	<i>Lolium multiflorum</i>	Azevém anual
Poaceae	<i>Brachiaria brizantha</i>	Braquiarião
Poaceae	<i>Brachiaria decumbens</i>	Braquiária Decumbens
Poaceae	<i>Brachiaria humidicola</i>	Capim Agulha
Poaceae	<i>Cenchrus ciliaris</i>	Capim Búfalo
Poaceae	<i>Panicum maximum</i>	Capim Colonião
Poaceae	<i>Pennisetum purpureum</i>	Capim Elefante
Poaceae	<i>Melinis minutiflora</i>	Capim Gordura
Poaceae	<i>Hyparrhenia rufa</i>	Capim Jaraguá
Poaceae	<i>Brachiaria plantaginea</i>	Capim Marmelada
Poaceae	<i>Eraglotis ciliaris</i>	Capim Mimoso
Poaceae	<i>Eragrostis pilosa</i>	Capim Orvalho
Poaceae	<i>Chrysopogon zizanioides</i>	Capim Vetiver
Poaceae	<i>Pennisetum americanum</i>	Milheto

Fonte: Pereira (2006a) (Adaptado pela autora)

Quadro 52 - Espécies de leguminosas para recuperação de áreas degradadas e controle de erosão

Família	Nome científico	Nome popular
Fabaceae	<i>Medicago sativa</i>	Alfafa
Fabaceae	<i>Arachis pintoi</i>	Amendoim Forrageiro
Fabaceae	<i>Centrosema pubescens</i>	Centrosema
Fabaceae	<i>Crotalaria spectabilis</i>	Crotalária
Fabaceae	<i>Stylosanthes guianensis</i>	Estilosante
Fabaceae	<i>Canavalia ensiformis</i>	Feijão de porco
Fabaceae	<i>Cajanus cajan</i>	Feijão Guandu
Fabaceae	<i>Dolichos lablab</i>	Lab-lab
Fabaceae	<i>Leucaena leucocephala</i>	Leucena
Fabaceae	<i>Mucuna aterrima</i>	Mucuma preta
Brassicaceae	<i>Raphanus sativus</i>	Nabo forrageiro
Fabaceae	<i>Pueraria phaseoloides</i>	Puerária
Fabaceae	<i>Sesbania virgata</i>	Sesbânia
Fabaceae	<i>Trifolium repens</i>	Trevo branco

Fonte: Pereira (2006a) (Adaptado pela autora)

Além disso, recomenda-se o plantio de espécies arbóreas e arbustivas, tanto na região à montante da voçoroca, formando uma barreira vegetativa, como no seu entorno, ao longo da face do talude, a fim de promover o reflorestamento da área. Indica-se a proporção de 50% de espécies pioneiras, 45% de espécies secundárias e climáticas, e 5% de espécies frutíferas

(FERREIRA, 2015). As principais características dos grupos ecológicos estão dispostas no Quadro 53.

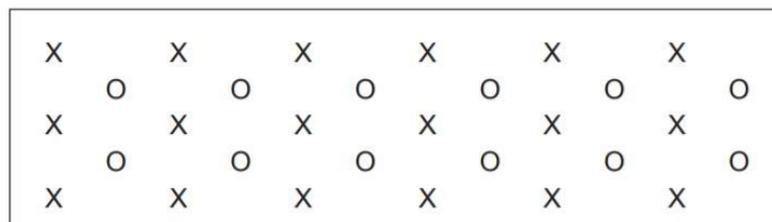
Quadro 53 - Características das espécies arbóreas do Brasil, que compõem os diferentes grupos ecológicos

Grupo ecológico				
Características	Pioneiras	Secundárias iniciais	Secundárias tardias	Clímax
Crescimento	Muito rápido	Rápido	Médio	Lento ou muito lento
Madeira	Muito leve	Leve	Mediamente dura	Dura e pesada
Tolerância à sombra	Muito intolerante	Intolerante	Tolerante no estágio juvenil	Tolerante
Altura das árvores (m)	4 a 10	20	20 a 30	30 a 45 (alguns até 60)
Tamanho de frutos e sementes	Pequeno	Médio	Pequeno à médio, mas leve	Grande e pesado
Tempo de vida (anos)	Muito curto (menos de 10)	Curto (10 a 25)	Longo (25 a 100)	Muito longo (mais de 20)

Fonte: Martins (2001) (Adaptado pela autora)

O plantio das espécies pode seguir o modelo de linhas alternadas, como exemplificado na Figura 117, favorecendo a estabilização e diversificação das espécies, bem como catalisa o processo de recuperação da área. O espaçamento entre as mudas pode ser de 3 x 3 m, conforme sugerido por Martins (2013).

Figura 117 - Esquema do modelo de linhas alternadas



X: espécies pioneiras

O: espécies secundárias iniciais, tardias e clímax

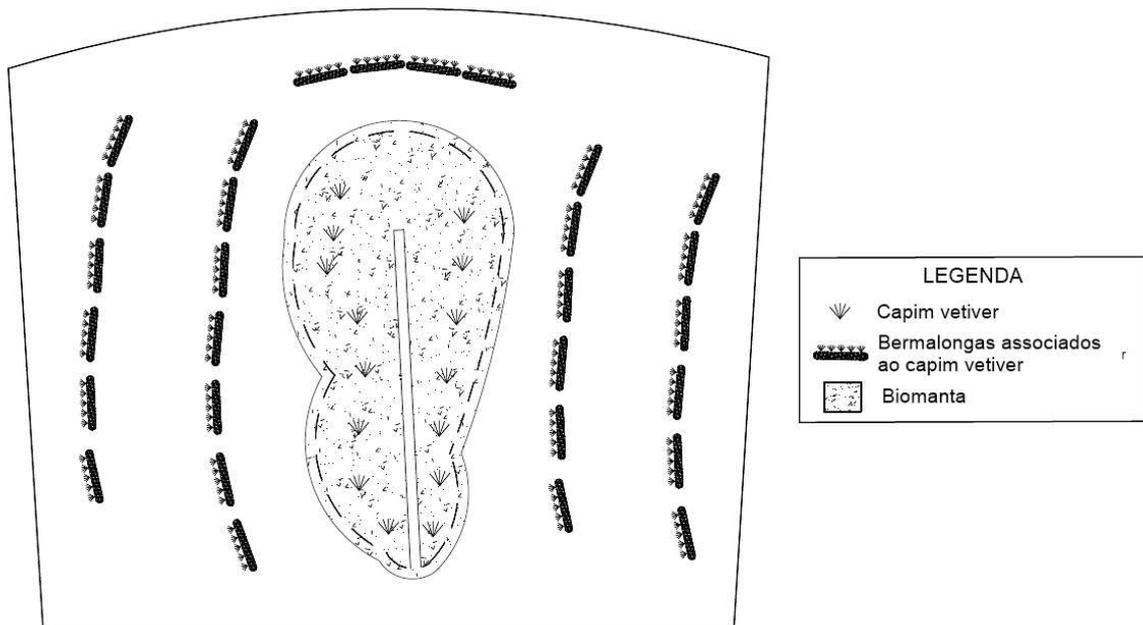
Fonte: Almeida (2016d)

Além de reduzir o impacto das gotas de chuva sobre o solo, a vegetação diminui o volume de água do escoamento superficial, bem como a sua velocidade. As espécies arbustivas e arbóreas encontradas no Jardim Botânico da UFJF foram colocadas, respectivamente, no Anexo A e Anexo B, segundo levantamento de Silva *et al.* (2020).

- **Proteção superficial**

Enquanto as espécies não se desenvolvem, recomenda-se a utilização de biorretentores de sedimentos do tipo Bermalonga® associados ao capim vetiver, e a colocação de biomanta para proteção imediata do talude. Na Figura 118 apresenta-se um esquema apenas ilustrativo desses elementos, sendo importante frisar que os biorretentores devem ser dispostos seguindo as curvas de nível do local.

Figura 118 - Croqui dos elementos de proteção superficial do talude



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Os biorretentores atuam como pequenas bermas artificiais, com o objetivo de reter sedimentos e insumos, reduzir o coeficiente de *runoff* (escoamento superficial) e facilitar o desenvolvimento da vegetação. O Quadro 54 apresenta algumas informações técnicas dos diferentes modelos.

Quadro 54 - Informações técnicas sobre os diferentes modelos de Bermalonga®

Diâmetro (cm)	Peso (kg)	Resistência (média)			Deformação (mm)	Volume (L/m)
		Tração (kgf/cm ²)		Compressão (kgf/m)		
		Longitudinal	Transversal			
20	4	120	55	1.500	60	35
30	7	250	120	3.200	130	70
40	13	550	200	5.400	220	130
50	20	660	320	8.550	335	200

Fonte: DEFLOR ([201?])

Esses biorretentores devem ser colocados à montante da voçoroca e nas laterais, ao longo da face do talude seguindo as curvas de nível. Recomenda-se que essas linhas do biorretentor sejam dispostas a cada 2 m de desnível e sejam fixadas com estacas de bambu ou madeira. É necessário preparar berços com altura correspondente à metade do diâmetro do Bermalonga® para o seu assentamento, aplicando-os antes da colocação da biomanta e fixando-os com estacas de bambu ou de madeira.

Em associação ao biorretentor, deve-se realizar o plantio de mudas de capim vetiver, formando barreiras vivas (Figura 119). O vetiver é uma espécie exótica, porém controlável, pois se reproduz por mudas e não por sementes. Devido ao biotactismo positivo, possui um crescimento denso e rápido, formando barreiras que reduzem significativamente a energia potencial do escoamento superficial e também contribuem na retenção de sedimentos. Podem ser plantadas de 6 a 20 mudas por metro, conforme o projeto.

Figura 119 - Associação de bermalongas e vetiver, antes e depois



Fonte: Lucena (2009)

O capim vetiver também deve ser utilizado para cobrir o talude da voçoroca. O plantio deve ser em nível, formando barreiras verdes a cada 2 m de desnível. Assim sendo, suas raízes profundas conferem uma resistência adicional ao solo. De acordo com Hengchaovanich (1998), as raízes do vetiver apresentam resistência à tração de 75 MPa e oferecem grande aumento na resistência ao cisalhamento, em média de 6 kPa a 10 kPa por quilo de raiz por m³ de solo. Pereira (2006b) acrescenta que a força de tração das raízes pode variar entre 40 MPa e 120 MPa de acordo com o diâmetro das mesmas, que pode ser de 0,2 mm a 2,2 mm.

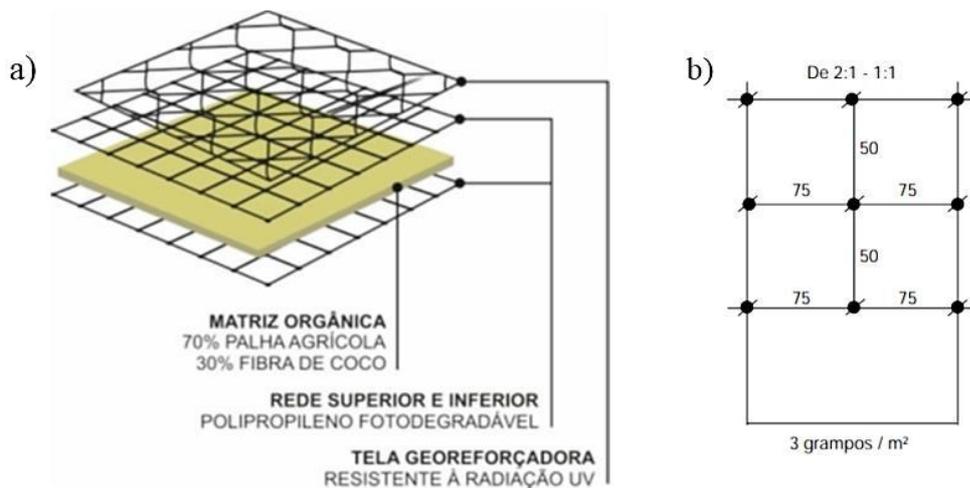
Também pode-se citar como vantagens uma grande adaptabilidade a condições edafoclimáticas extremas, sendo capaz de suportar grande período de estiagem, além do baixo

custo de manutenção, sem necessidade de podas periódicas, adubação ou irrigação, dada sua rusticidade e tolerância à seca, ao fogo, ao alagamento, etc.

A etapa seguinte consiste, então, na aplicação da biomanta. As biomantas conferem uma cobertura protetiva imediata à superfície do solo, promovem a ancoragem e proteção das sementes e insumos, favorecem a infiltração de água no solo e possuem uma degradação em tempo determinado.

Como trata-se de uma região com alta susceptibilidade à erosão, indica-se a biomanta antierosiva tridimensional mista (70% palha agrícola e 30% fibra de coco), modelo Tela Sintemax 500TM (Figura 120-a), que possui longevidade permanente e resistência à tração de 660 kgf/m². Essas biomantas possuem 1,50 m de largura e 33,40 m de comprimento, devendo ser aplicadas de cima para baixo sobre a face do talude, realizando a fixação indicada para a inclinação de 32°, conforme mostrado na Figura 120-b.

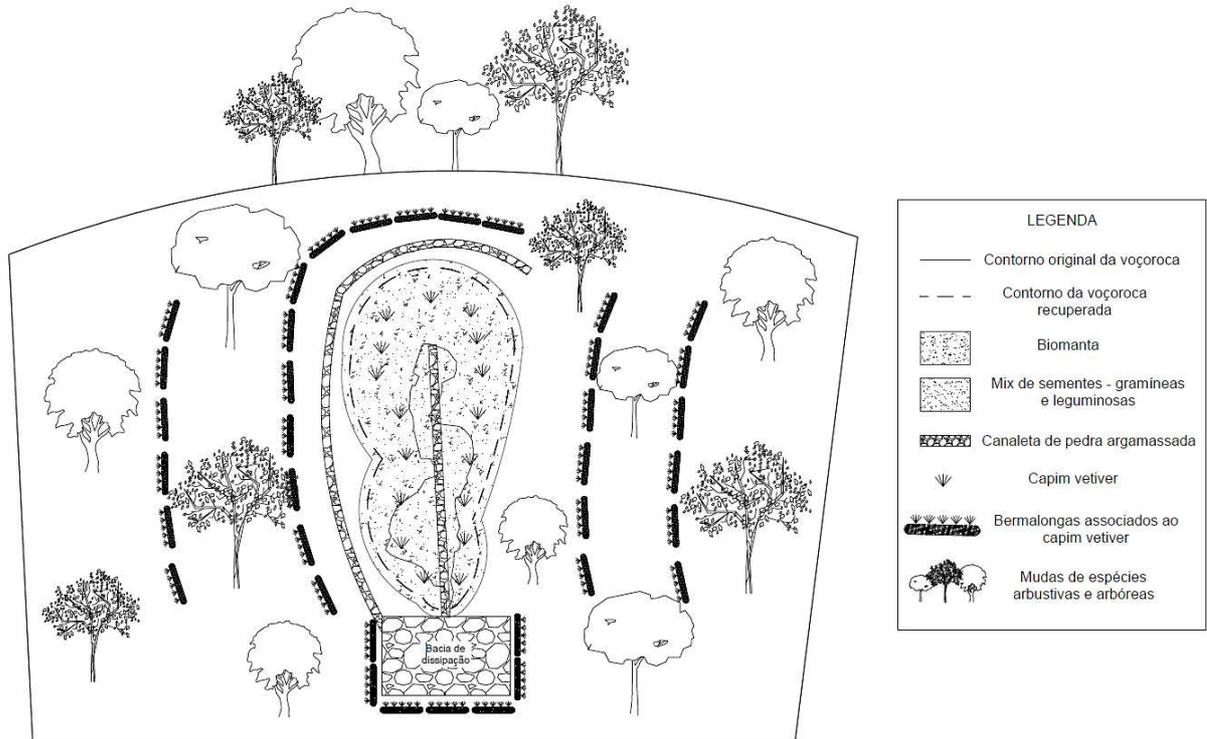
Figura 120 - Modelo da biomanta mista (a) e do grampeamento indicado (b)



Fonte: DEFLOR Bioengenharia ([201?]a)

Por fim, na Figura 121 apresenta-se, ilustrativamente, o plano conceitual com as técnicas escolhidas para o presente projeto de recuperação.

Figura 121 - Croqui com as técnicas de recuperação escolhidas



Fonte: Elaborado pela autora (2021)

Cabe colocar que algumas técnicas não foram escolhidas para recuperação da área por não serem as mais adequadas para o caso em questão. Essas técnicas e as respectivas justificativas estão dispostas no Quadro 55.

Quadro 55 - Justificativas de algumas técnicas que não foram escolhidas

Função	Técnica	Justificativa
Drenagem	Canaletas verdes	Além da possibilidade de queimada devido às práticas da população adjacente, esta técnica também possui algumas limitações para o uso, como: velocidade de escoamento máxima de aproximadamente 1,5 m/s; a maioria das espécies não é resistente ao sombreamento; e é necessária um canal com seção relativamente grande devido ao alto fator de rugosidade.
Proteção superficial	Proteção asfáltica ou Concreto projetado	Não seria apropriado por se tratar de uma área localizada em um Jardim Botânico, sendo mais conveniente utilizar técnicas de bioengenharia, que são menos agressivas e mais integradas ao meio ambiente.
	Revegetação com grama em placa	Cobrir o talude com apenas uma espécie pode ser prejudicial, pois o comprimento semelhante das raízes pode gerar um plano de ruptura bem definido.

	Biomanta do tipo fibratêxtil, biotêxtil ou fibrax	Possuem longevidade determinada, variando de 18 a 60 meses. Os valores de resistência à tração estão entre 38 e 70 kgf/m. A maioria é indicada para solos com susceptibilidade média à erosão.
--	---	--

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.5.2 Manutenção

A manutenção é uma das etapas mais importantes para garantir a eficácia de um projeto de recuperação de áreas degradadas. As principais atividades envolvidas no processo de manutenção estão descritas no Quadro 56, baseadas nos trabalhos de Neves (2019) e Almeida (2016c).

Quadro 56 - Descrição das principais atividades na fase de manutenção

Atividades	Descrição
Irrigação	Deve ser feita em caso de plantio fora do período chuvoso, logo após o semeio. Pode ser feita mais vezes, em caso de murcha das plantas.
Controle de espécies invasoras	Deve ser feita a retirada de espécies competidoras de 30 a 40 dias após o plantio. Recomenda-se fazer de 4 a 5 manutenções.
Adubação de cobertura	Deve ser feita de 45 a 60 dias após o plantio, para suprir as deficiências nutricionais. Se necessário, pode ser realizada mais vezes.
Limpeza dos aceiros	Eliminar plantas daninhas, palhas, folhas, resíduos, entulho ou qualquer material que possa ser combustível.
Combate a formigas cortadeiras	Aplicar medidas de controle: controle de cultura, mecânico ou químico, sendo o último o mais eficaz.
Coroamento	Limpeza ao redor das mudas por meio de herbicidas ou capina manual.
Replântio	Ressemeio manual durante o primeiro ano de estabelecimento da vegetação, a ser realizado de 2 a 3 vezes após a implantação, no primeiro ano.
Reparos	Observar as condições do cercamento, e dos dispositivos de drenagem. Se necessário, fazer reparos para correções.

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.5.3 Monitoramento

A avaliação e o monitoramento de áreas em processo de recuperação são etapas fundamentais, decisivas e requeridas pelas instruções normativas, embora não sejam rotineiramente incorporadas à maioria dos projetos em andamento no Brasil. Consiste na coleta

de dados e informações sobre a recuperação em andamento, por meio de indicadores qualitativos e/ou quantitativos, que permitem determinar o nível de sucesso do trabalho e identificar o que precisa ser revisto e alterado, de forma que os problemas encontrados sejam corrigidos antes que tomem grandes proporções.

Uma das formas de fazer o monitoramento é de acordo com a época da avaliação, por exemplo. De acordo com Brancalion *et al.* (2013), na fase de implantação (1 a 12 meses), deve-se fazer avaliações mensais durante os três primeiros meses, que exigem rápida tomada de decisão, e depois de trimestrais. Já na fase pós-implantação (1 a 3 anos), as avaliações podem ser semestrais. Na fase de vegetação formada (4 ou mais anos), a avaliação pode ser anual.

Brancalion *et al.* (2013) apresentaram um método de avaliação de áreas em recuperação desenvolvido por pesquisadores do Laboratório de Ecologia e Restauração Florestal da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros (Esalq/USP) para áreas em floresta estacional semidecidual, que é a vegetação do Jardim Botânico da UFJF. Os principais indicadores avaliados e o respectivo grau de importância são dispostos no Quadro 57. Estes critérios podem auxiliar o monitoramento em relação à fase de reflorestamento da área, sugerida neste PRAD.

Quadro 57 - Grau de importância dos principais indicadores na fase de monitoramento

Grau de importância	Indicadores	Critério
Alto	Riqueza de espécies, diversidade (H'), cobertura de copa, cobertura de gramíneas, mortalidade das mudas plantadas, presença de espécies exóticas invasoras e distribuição ordenada das mudas no campo a partir de grupos de plantio.	Podem comprometer todo o plantio da área restaurada a curto prazo e são de difícil correção
Médio	Presença de espécies exóticas não invasoras e altura das mudas plantadas	Podem comprometer o plantio da área restaurada a médio prazo e podem ser corrigidos.
Baixo	Presença de espécies incluídas em algum nível de ameaça de extinção	Não comprometem o plantio, mas são indicadores positivos e, por isso, devem ser valorizados.

Fonte: Brancalion *et al.* (2013)

Ainda podem ser utilizados outros indicadores para monitorar os parâmetros ecológicos, como banco e chuva de sementes, altura e diâmetro das plantas, regeneração natural, características dos microrganismos, propriedades físicas e químicas do solo. Os métodos, indicadores e critérios avaliados são escolhidos de acordo com os objetivos e metas do projeto de recuperação.

Com base no que foi apresentado acima, recomenda-se que para o PRAD em questão sejam avaliadas as condições de conservação da biomanta e os sedimentos retidos nos biorretentores associados ao capim vetiver, nas canaletas e no dissipador de energia. Como se trata de uma área com forte tendência erosiva, deve ser feita uma visita *in loco* a cada 6 meses para verificar visualmente se a erosão está sob controle ou se há novas áreas em processo de erosão. Se necessário, devem ser tomadas novas medidas para contenção dos processos erosivos. Além disso, é importante verificar as mudas de capim vetiver e das espécies arbóreas e arbustivas, bem como o seu crescimento (altura e circunferência à altura do peito) e se houve inserção de novas espécies.

O Quadro 58 apresenta uma sugestão de cronograma, com as principais operações das etapas de implantação, manutenção e monitoramento, descritas anteriormente.

Quadro 58 - Cronograma físico do PRAD

Etapa	Atividade	1º ano				2º ano				3º ano			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
IMPLANTAÇÃO	Isolamento, aceiros e combate as formigas	■											
	Ações de educação ambiental		■										
	Limpeza do terreno	■											
	Operações de terraplanagem	■	■										
	Operações de drenagem		■	■									
	Microcoveamento			■									
	Adubação e calagem			■									
	Plantio do mix de sementes e mudas			■									
	Biorretentores e capim vetiver			■									
	Aplicação da biomanta			■									
MANUTENÇÃO	Irrigação			■									
	Controle de espécies invasoras			■		■		■		■		■	
	Adubação de cobertura			■		■		■		■		■	
	Limpeza dos aceiros			■		■		■		■		■	
	Combate a formigas cortadeiras			■		■		■		■		■	
	Coroamento			■		■		■		■		■	
	Replanteio			■		■		■		■		■	
	Reparos			■		■		■		■		■	
MONIT.	Estado de conservação da biomanta				■		■		■		■		■
	Sedimentos nos biorretentores				■		■		■		■		■
	Condições das canaletas e dissipador				■		■		■		■		■
	Sobrevivência das plantas			■			■		■		■		■
	Desenvolvimento das plantas				■		■		■		■		■

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise química mostrou-se relevante para caracterizar a qualidade do solo, identificando os teores de nutrientes importantes para o desenvolvimento da vegetação. Desse modo, foi possível identificar quais as formas mais propícias para corrigir a fertilidade do solo, de forma que esteja bem preparado para, posteriormente, receber a cobertura vegetal.

Pelo ensaio de cisalhamento direto, pôde-se constatar que as análises realizadas em laboratório são fundamentais para determinar como deve ser feito o retaludamento de forma correta e específica para cada caso, tornando possível a escolha das técnicas mais adequadas para proteção do talude e recuperação da voçoroca. As análises de estabilidade de taludes devem ser pautadas em bom levantamento topográfico, perfil geológico-geotécnico e determinação de propriedades e parâmetros de resistência do solo. Quando essa análise não é feita e utiliza-se um ângulo qualquer, pode acontecer do fator de segurança mínimo não ser atendido, gerando um talude instável e com riscos de movimentação.

Pelo ensaio de Inderbitzen modificado, verificou-se a importância de realizar ensaios que identifiquem a erodibilidade do solo, a fim de entender melhor o seu comportamento e propor medidas eficazes para conter os processos erosivos envolvidos. Uma sugestão para trabalhos futuros é fazer este ensaio com um número maior de amostras, capaz de permitir a realização de uma análise estatística dos resultados.

Havendo disponibilidade para uma compreensão mais acurada da erodibilidade do solo, ainda poderiam ser realizados outros ensaios diretos ou indiretos, como o ensaio de compressão diametral e ensaio de permeabilidade, entre outros citados no tópico 2.4.2, com o intuito de comparar os resultados e verificar a importância de cada um. Recomenda-se também que sejam feitas outras pesquisas relacionadas à questão da drenagem no entorno daquela região do Jardim Botânico da UFJF, para que os problemas relacionados ao fluxo de água pluvial sejam solucionados de forma mais completa.

Além disso, a pesquisa também gera contribuições para futuros PRAD's, que podem utilizar a metodologia apresentada, coletando amostras de solo e realizando os ensaios e análises para propor medidas de recuperação mais seguras. O trabalho apresenta uma série de técnicas disponíveis, especialmente de bioengenharia, que podem trazer diversos benefícios ambientais e até mesmo econômicos. Cabe aos projetistas avaliarem quais os procedimentos mais apropriados para os diferentes casos. Como sugestão, podem ser feitas pesquisas que comparem os custos envolvidos em um PRAD elaborado sem a utilização dos ensaios geotécnicos e um PRAD elaborado a partir do resultado dos ensaios e das técnicas de bioengenharia.

Por fim, dada a importância da realização dos ensaios geotécnicos na elaboração de um PRAD, sugere-se uma alteração das instruções normativas, que devem nortear a concepção dos projetos de recuperação. Para tanto, as normas devem conter essas informações de forma detalhada, orientando sobre os ensaios que devem ser feitos para avaliar a estabilidade dos taludes nos casos de retaludamento e a erodibilidade dos solos antes de propor as medidas de recuperação.

5 CONCLUSÃO

A partir desta pesquisa, observou-se que a realização dos ensaios geotécnicos propostos tem grande relevância na compreensão de características importantes do solo, como sua qualidade química e seu comportamento quanto à resistência ao cisalhamento e erodibilidade, contribuindo de forma significativa no melhor entendimento dos processos erosivos envolvidos e na busca de soluções mais assertivas para recuperar a área degradada.

Pelo ensaio de caracterização química, identificou-se uma acidez elevada do solo, baixos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e, principalmente, de matéria orgânica, além do alto índice de saturação por alumínio. A correção dessas deficiências poderá ser feita por meio de um tratamento do solo com calagem e adubação, propostas no PRAD, que vão prepará-lo para receber a revegetação.

Pelo ensaio de cisalhamento direto, foi possível identificar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, a saber: intercepto coesivo nulo e ângulo de atrito entre 36° e $37,5^\circ$, validando os resultados por meio de análise estatística semi-probabilística. A partir disso, foi possível realizar a análise de estabilidade e identificar a inclinação máxima de 32° que corresponde ao fator de segurança necessário, de 1,2. Utilizando outras inclinações recomendadas (sem justificativa geotécnica) por projetos, empresas ou pela literatura, observou-se que o fator de segurança mínimo não seria atendido.

O ângulo de 32° foi a inclinação utilizada no ensaio de Inderbitzen modificado, para avaliar diretamente a erodibilidade do solo, identificando uma tendência de comportamento do solo altamente erodível.

Desta forma, por meio desses ensaios foi possível elaborar um PRAD conceitual bem fundamentado, direcionado e tecnicamente viável à recuperação da voçoroca do Jardim Botânico da UFJF, além de propor medidas para reflorestar aquela área e evitar que novas feições erosivas possam surgir no local.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682** – Estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, BR. 2009. 33 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13292** – Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Granulares à Carga Constante. Rio de Janeiro, BR. 1995. 8 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13601** - Solo - Avaliação da Dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio de torrão (crumbtest). Rio de Janeiro, BR. 1996a. 2p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13602** - Solo - Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio sedimentométrico comparativo - Ensaio de dispersão SCS. Rio de Janeiro, BR. 1996b. 5 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14114** - Solo - Solos argilosos dispersivos - Identificação e classificação por meio do ensaio de furo de agulha (pinhole test). Rio de Janeiro, BR. 1998. 8 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14545** - Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos à Carga Variável. Rio de Janeiro, BR. 2000. 12 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457** - Amostras de Solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de Caracterização. Rio de Janeiro, BR. 2016a. 8 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502** - Rochas e Solos. Rio de Janeiro, BR. 1995. 18 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181** - Solo Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, BR. 2018. 12 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9604** - Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento. Rio de Janeiro, BR. 2016c. 9 p.

AGÊNCIA EFE. **Erosão do solo pode reduzir rendimento de plantações pela metade, diz ONU.** G1, 15 mai. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/natureza/noticia/2019/05/15/erosao-do-solo-pode-reduzir-rendimento-de-plantacoes-pela-metade-diz-onu.ghtml>>. Acesso em: 01 set. 2020.

ALCÂNTARA, M. **Aspectos geotécnicos da erodibilidade de solos.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia). São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos (USP), 1997. 128 p.

ALMEIDA, A. **Propostas para estabilização de talude na rodovia BR-230, km 19.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). João Pessoa: UFPB, 2016a. 102 p.

ALMEIDA, D. Legislação básica aplicada à recuperação ambiental. **Recuperação ambiental da Mata Atlântica** [online]. 3ª ed. Ilhéus, BA: Editus, 2016b, p. 32-39. Disponível em: <<http://books.scielo.org/id/8xvf4/pdf/almeida-9788574554402-04.pdf>>. Acesso em: 17 mar. 2020.

ALMEIDA, D. Manutenção de projetos de recuperação ambiental. In: **Recuperação ambiental da Mata Atlântica** [online]. 3ª ed. Ilhéus, BA: Editus, 2016c, p. 160-168.

ALMEIDA, D. Modelos de recuperação ambiental. **Recuperação ambiental da Mata Atlântica** [online]. 3ª ed. Ilhéus, BA: Editus, 2016d, p. 100-137. Disponível em: <<http://books.scielo.org/id/8xvf4/pdf/almeida-9788574554402-09.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2021.

ÁLVARES, D. **A dura sina do caminhoneiro**: 86% das estradas brasileiras não têm asfalto. *Gazeta do Povo*, Brasília, 04 jun. 2018. Disponível em: <<https://www.gazetadopovo.com.br/politica/republica/a-dura-sina-do-caminhoneiro-86-das-estradas-brasileiras-nao-tem-asfalto-6lmcdns8al40z7fz3na565b5q/>>. Acesso em: 30 jul. 2020.

AMORIM, R. *et al.* **Principais modelos para estimar as perdas de solo em áreas agrícolas**. In: Pruski (Orgs.), *Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle de erosão hídrica*. 2. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2009. Capítulo 4, p. 74-107.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. DC Washington – Total Solids Dried at 103-105°C. 2540 B, Washington D.C., USA, Ed. American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation., 21th ed., 2005. 256 p.

ARAÚJO, R.; CAMPOS, T. Uso dos ensaios de penetração de cone, desagregação, sucção e resistência à tração para avaliar a erodibilidade. **Geotecnia**, n. 128, 2013. p. 67-85.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 3080 – 98**. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.08, 1998. 6 p.

AUGUSTO FILHO, O. **Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas**: uma proposta metodológica. Rio de Janeiro: I COBRAE, ABMS, v. 2, 1992. p. 721-733.

AYRES, T. *et al.* Variação dos Fatores de Segurança para Taludes nas Condições Seca e Saturada. In: SIMPÓSIO DA PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA NA REGIÃO CENTRO-OESTE, 4., 2017, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ABMS, 2017. 7 p.

BARBOSA, M. **Recomposição florestal de área de preservação permanente no bairro Grama em Juiz de Fora – MG**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária). Juiz de Fora: UFJF, 2017. 146 p.

BARBOSA, M; LIMA, H. Resistência ao cisalhamento de solos e taludes vegetados com capim vetiver. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 37, 2012. p. 113-120.

BARNES, G. **Mecânica dos solos**: princípios e práticas. 1. ed. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2016. 576 p.

BASTOS, C. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Tese de Doutorado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999, 303 p.

BASTOS, C. *et al.* Proposta metodológica para avaliação geotécnica da erodibilidade de solos residuais não saturados. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROÇÃO, 7., 2001, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ABGE, 2001. 9 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 1990. 355 p.

BIFULCO, C. Engenharia natural na reabilitação de taludes e vertentes. In: CONGRESSO RODOVIÁRIO PORTUGUÊS, 7., 2013, Lisboa. **Anais...** Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 2013. p. 1-11.

BITAR, O. **Avaliação da recuperação de áreas degradadas por mineração na região metropolitana de São Paulo**. Tese (Doutorado em Engenharia). São Paulo: USP, 1997. 193 p.

BONINI, C. *et al.* Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, 2015. p. 388-393.

BRAIDA, J. *et al.* Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo franco arenoso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.6, 2007. p. 1646-1653.

BRANCALION, P. *et al.* **Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração**. In: Martins (Ed.), Restauração ecológica de ecossistemas degradados. Viçosa: UFV, 2013. Capítulo 9, p. 262-293.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Art. 225. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 05 out. 1988. Disponível em: <https://www.senado.leg.br/atividade/const/con1988/con1988_26.06.2019/art_225_.asp>. Acesso em: 17 mar. 2020.

BRASIL. Decreto nº 3.420, de 20 de abril de 2000. Dispõe sobre a criação do Programa Nacional de Florestas - PNF, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 20 abr. 2000a. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/D3420.htm>. Acesso em: 18 mar. 2020.

BRASIL. Decreto nº 6.660, de 21 de novembro de 2008. Regulamenta dispositivos da Lei no 11.428, de 22 de dezembro de 2006, que dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 21 nov. 2008. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2008/decreto/d6660.htm>. Acesso em: 18 mar. 2020.

BRASIL. Decreto nº 97.632, de 10 de abril de 1989. Dispõe sobre a regulamentação do artigo 2º, inciso VIII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 10 abr. 1989. Disponível em:

<<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1989/decreto-97632-10-abril-1989-448270-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 17 mar. 2020.

BRASIL. Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 22 dez. 2006. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2006/Lei/L11428.htm>. Acesso em: 19 mar. 2020.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 28 mai. 2012. Disponível em: <<http://www.botuvera.sc.gov.br/wp-content/uploads/2014/09/lei-12651-2012-codigo-florestal.pdf>>. Acesso em 19 mar. 2020.

BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 31 ago. 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm>. Acesso em: 17 mar. 2020.

BRASIL. Lei nº 601, de 18 de setembro de 1850. Dispõe sobre as terras devolutas do Império. **Secretaria de Estado dos Negócios do Império**, Rio de Janeiro, RJ, 18 set. 1850. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L0601-1850.htm>. Acesso em: 17 mar. 2020.

BRASIL. Lei nº 7.347, de 24 de julho de 1985. Disciplina a ação civil pública de responsabilidade por danos causados ao meio-ambiente, ao consumidor, a bens e direitos de valor artístico, estético, histórico, turístico e paisagístico (VETADO) e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 24 jul. 1985. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7347orig.htm>. Acesso em: 17 mar. 2020.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 12 fev. 1998. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm>. Acesso em: 17 mar. 2020.

BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, § 1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 18 jul. 2000b. Disponível em: <www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19985.htm>. Acesso em: 19 mar. 2020.

BURGOS, P.; CONCIANI, W. **Índices físicos, textura, consistência e classificação de solos**. In: Camapum de Carvalho *et al.* (Orgs.), Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. Capítulo 8, p. 181-204.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. *et al.* **Propriedades químicas, mineralógicas e estruturais de solos naturais e compactados.** In: Camapum de Carvalho *et al.* (Orgs.), Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. Capítulo 3, p. 39-78.

CAMPOS, T.; MOTTA, M. **Resistência ao cisalhamento de solos não saturados.** In: Camapum de Carvalho *et al.* (Orgs.), Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. Capítulo 17, p. 465-498.

CAPECHE, C. **Noções sobre tipos de estrutura do solo e sua importância para o manejo conservacionista.** Embrapa Solos: Comunicado Técnico, 51. ISSN 1517-5685, Rio de Janeiro, dez. 2008.

CAPUTO, H. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** v. 1. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2015. 252 p.

CARVALHO, L. **Estudo da erodibilidade da voçoroca do Jardim Botânico – Juiz de Fora/Minas Gerais.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Juiz de Fora: UFJF, 2020. 76 p.

CARVALHO, P. **Manual de geotecnia:** Taludes de rodovias - orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. São Paulo: Departamento de Estradas e Rodagens do Estado de São Paulo, Instituto de Pesquisa Tecnológicas, 1991. 388 p.

CARVALHO, W. *et al.* Rural school transportation in emerging countries: The Brazilian case. **Research in Transportation Economics**, v. 30, 2010. p. 1-9.

CASTRO FILHO, C. *et al.* Estabilidade dos Agregados e sua Relação com o Teor de Carbono Orgânico num Latossolo Roxo Distrófico, em Função de Sistemas de Plantio, Rotações de Culturas e Métodos de Preparo das Amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 220, 1998. p. 527-538.

CGM – CASA GRANDE MINERAÇÃO. **Plano de recuperação de áreas degradadas.** In: EIA – Estudo de Impacto Ambiental – Atividade de extração de minério de ferro. São Mamede, Paraíba, 2012. p. 513-551.

CHUQUIPIONDO, I. **Avaliação da estimativa do potencial de erodibilidade de solos nas margens de cursos de água:** estudo de caso trecho de vazão reduzida capim branco | Araguari Minas Gerais. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. 185 p.

COLLINS, K.; MCGOWN, A. The form and function of microfabric features in a variety of natural soils. **Geotechnique**, 24, n. 2, 1974. p. 223-254.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 429, de 28 de fevereiro de 2011.** Dispõe sobre a metodologia de recuperação das Áreas de Preservação Permanente – APPs. DOU nº 43, 02/03/2011, p. 76. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=644>>. Acesso em: 19 mar. 2020.

CONNELL, J.; SLATYER, R. Mechanisms of succession in natural communities and their role in community stability and organization. **American Naturalist**, v. 111, 1977. p. 1119-1144.

COUTO, B. **Análise de erodibilidade em taludes com horizontes resistentes e suscetíveis aos processos erosivos**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia). Ouro Preto: UFOP, 2015. 124 p.

COUTO, L. *et al.* **Técnicas de bioengenharia para revegetação de taludes no Brasil**. Boletim técnico CBCN, nº 001, 2010.

CROKE, J. *et al.* Relative contributions of runoff and sediment from sources within a road prism and implications for total sediment delivery. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, n. 4, 2006. p. 457- 468.

CRUZ, L. **Áreas verdes e espaço urbano: a Mata do Krambeck e a cidade de Juiz de Fora em Minas Gerais**. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído). Juiz de Fora: UFJF, 2016. 113 p. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/ambienteconstruido/files/2016/07/%C3%81REAS-VERDES-E-ESPA%C3%87O-URBANO-A-Mata-do-Krambeck-e-a-cidade.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

DE MARIA, J. Erosão e terraços em plantio direto. **Boletim informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 1, 1999. p. 17-21.

DEFLOR BIOENGENHARIA. **Guia de instalação de biomantas antierosivas, retentores de sedimentos e hidrossemeio**. [201?]a, 11p . Disponível em: <http://www.deflor.com.br/pdf/guia_de_instalacao_biomantas_retentores.pdf>. Acesso em: 26 out. 2020.

DEFLOR BIOENGENHARIA. **Vetiver**. [201?]b. Disponível em: <<http://deflor.com.br/vetiver/>>. Acesso em: 10 out. 2020.

DENARDIN, J. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz, 1990. 81 p.

DIAS, C. **Estudo revela que 30% dos solos do mundo estão degradados**. Embrapa, 12 jul. 2016. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/14343883/estudo-revela-que-30-dos-solos-do-mundo-estao-degradados>>. Acesso em: 16 ago. 2020.

DICK, D. *et al.* Química da matéria orgânica do solo. In: MELO, V.; ALLEONI, L. (Ed.). **Química e mineralogia do Solo – Parte II: Aplicações**. Viçosa: SBCS, 2009. p. 1-68.

DIDONET, A. **Áreas Degradadas: Causas, Prevenção & Recuperação**. Embrapa: Folders, 2014.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Pesquisa de Estabilidade de Taludes: Recomendação Para Proteção de Taludes Contra Erosão**. Rio de Janeiro, 1979.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **ME093**. Solos - Determinação da Densidade Real. 1994a. 4 p.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **ME213**. Solos - Determinação do Teor de Umidade. 1994b. 3 p.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de drenagem de rodovias**. Rio de Janeiro: IPR 724, 2ª ed., 2006. 333 p.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 108** – Terraplenagem – Aterros – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2009a. 13 p.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Norma DNIT 106** – Terraplenagem – Cortes – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2009b. 13 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. Ed., rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2017. 574 p.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF, 2018. 356 p.

ENGETA – ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL LTDA. **Serviços de conformação, revegetação e drenagem em erosões no Jardim Botânico de Juiz de Fora, MG**. Proposta 61.789, UFJF – FADEP – Jardim Botânico de Juiz de Fora, set. 2012. 31 p.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **A importância da conservação dos solos para a produção de alimentos no mundo**. Brasília, 12 abr. 2018. Disponível em: <<http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/en/c/1116677/#:~:text=%E2%80%9C33%25%20dos%20solos%20no%20mundo,20%25%20do%20seu%20territ%C3%B3rio%20degradado.>>. Acesso em: 16 ago. 2020.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Mapa de solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente, 2011. Disponível em <<http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-deminas-gerais>>. Acesso em: 25 out. 2020.

FERNANDES, J.; FREITAS, A. **Introdução à engenharia natural**. v. 2. Lisboa: Empresa Portuguesa de Águas Livres. 2011. 107 p.

FERREIRA, D. **Sisvar**: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v. 35, n. 6, 2011. p. 1039-1042.

FERREIRA, M. O estudo dos taludes e da sua estabilidade. *Ciências Geológicas: Ensino, Investigação e sua História*. **Geologia Aplicada**, v. 2, cap. 3, 2010. p. 305-315.

FERREIRA, R. Recuperação de voçorocas de grande porte. In: ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE RAVINAS, VOÇOROCAS, EROÇÃO HÍDRICA DO SOLO E MOVIMENTOS DE MASSA, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 2015. 30 p.

FLORENCIO, L. **Determinação da probabilidade de ruptura de talude de corte e talude de aterro através de métodos probabilísticos**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Juiz de Fora: UFJF, 2021. 95 p.

FONSECA, J.; MARTINS, G. **Curso de Estatística**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 1996. 320 p.

FRAGASSI, P. **Estudo da Erodibilidade dos solos Residuais de Gnaise da Serra de São Geraldo e de Viçosa (MG)**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Viçosa: UFV, 2001. 136 p.

FREDLUND, D. *et al.* The shear strength of unsaturated soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 15, n. 3, 1978. p. 313-321.

FREDLUND, D.; MORGENSTERN, N. Stress state variables for unsaturated soils. **Journal of Geotechnical Engineering Division**, ASCE, v. 103, n. GT5, 1977. p. 447-466.

FREDLUND, D.; RAHADJO, H. **Soil Mechanics for unsaturated soils**. John Wiley & Sons, Inc, 1993. 517 p.

FREIRE, E. Ensaio de Inderbitzen Modificado: um novo modelo para avaliação do grau de erodibilidade do solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROÇÃO, 7., 2001, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ABGE, 2001.

GAIA-GOMES, J. *et al.* Atributos físicos e químicos do solo de voçorocas com diferentes tempos de formação. In: SILVA-MATOS, R. *et al.* (Orgs.). **Ciências Agrárias: Conhecimentos Científicos e Técnicos e Difusão de Tecnologias 4**. Ponta Grossa: Atena, 2020. p. 33-49.

GALLEGO, E. *et al.* Valuation of low volume roads in Spain. Part 1: Methodology development. **Biosystems Engineering**, v. 101, n. 1, 2008. p. 123-134.

GEOFOCO. **Biomanta Geofoco** – Especificações técnicas. [201?], 4 p. Disponível em: <<http://geofoco.com.br/wp-content/uploads/2012/09/biomanta.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2020.
GEORIO. Fundação Instituto de Geotecnia do Município do Rio de Janeiro. **Manual Técnico de Encostas**. GeoRio, Rio de Janeiro, 1999.

GERCSOVICH, D. **Estabilidade de taludes**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 166 p.

GITIRANA JÚNIOR, G. *et al.* **A curva de retenção de água de materiais porosos**. In: Camapum de Carvalho *et al.* (Orgs.), Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. Capítulo 9, p. 205-230.

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

GOMIDE, P. *et al.* Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, 2011. p. 567-577.

GONÇALVES, J. **Influência de condicionantes para a deflagração de movimento de massa**: estudo de caso no campus da UFJF. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Juiz de Fora: UFJF, 2017. 78 p.

GRANDO, A. **Monitoramento e modelagem hidrossedimentológica em uma microbacia hidrográfica experimental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2011, 175 p.

GRAY, D.; LEISER, A. **Biotechnical Slope Protection**: Erosion Control. Robert E. Krieger Publishing Co., Malabar, FL, 1989. 271 p.

GREENWAY, D. **Vegetation and slope stability**. In: Anderson, M.; Richards, K. (Ed.) *Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology*. Chichester: J. Wiley, 1987. p. 187-230.

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

HERNANI, L. *et al.* A erosão e seu impacto. In: Manzatto, C.; Freitas, J.; Peres, J. **Uso agrícola dos solos brasileiros**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2002. p. 47-60.

HOLMGREN, G; FLANAGAN, C. Factors affecting spontaneous dispersion of soil materials as evidenced by the crumb test. **ASTM Special Technical Publication**, Philadelphia, n. 623, 1977. p. 218-239.

HOTTA, M. **Análise de alternativas para o projeto de recuperação e estabilização de margens de rios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes). Rio de Janeiro: IME, 2009. 154 p.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Instrução Normativa nº 4, de 13-04-2011**. Procedimentos para elaboração de Projeto de Recuperação de Área Degradada - PRAD ou Área Alterada, para fins de cumprimento da legislação ambiental. DOU 14-04-2011. Disponível em: <www.ctpconsultoria.com.br/pdf/Instrucao-Normativa-IBAMA-04-de-13-04-2011.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2020.

IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração**. Brasília: IBAMA, 1990. 96 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Juiz de Fora**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/juiz-de-fora/panorama>>. Acesso em: 04 set. 2020.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres,

técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 275 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico de Pedologia**. Rio de Janeiro: Manuais Técnicos em Geociências n. 4., 2. ed., 2007. 316 p.

ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Instrução Normativa nº 11, de 11 de dezembro de 2014**. Estabelecer procedimentos para elaboração, análise, aprovação e acompanhamento da execução de Projeto de Recuperação de Área Degradada ou Perturbada - PRAD, para fins de cumprimento da legislação ambiental. DOU 12/12/2014. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Instrucao_normativa/2014/in_icmbio_11_2014_estabelece_procedimentos_prad.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2020.

IDE-SISTEMA. **Unidades de Conservação Estaduais**. Áreas Protegidas (IEF/ICMBio). [201?]. Disponível em: <<http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>>. Acesso em: 02 mai. 2020.

IEF – INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS. **Unidades de Conservação - Uso Sustentável**. 2020. Disponível em: <<http://www.ief.mg.gov.br/unidades-de-conservacao/uso-sustentavel>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

INPE – INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **SOS Mata Atlântica e INPE lançam novos dados do Atlas do bioma**. INPE, 23 mai. 2019. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=5115>. Acesso em: 15 ago. 2020.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margens de Rios**. Celso Santos Carvalho, Eduardo Soares de Macedo, Agostinho Tadashi Ogura (Orgs). Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2007. 176 p.

JACOMINE, P. **A nova classificação brasileira de solos**. Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica, Recife, vol. 5 e 6. 2008. p. 161-179.

KÄMPF, N.; CURI, N.; MARQUES, J. Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: MELO, V.; ALLEONI, L. (Ed.). **Química e mineralogia do Solo – Parte I: Conceitos Básicos**. Viçosa: SBCS, 2009. p. 333-380.

KRISHNAYYA, A.; EINSENSTEIN, Z. Brazilian tensile test for soils. **Canadian Geotech**, n. 11, 1974. p. 632-642.

LEITE, M. *et al.* Erodibilidade de solos residuais do Cultural – Juiz de Fora. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: ABMS, 2016. 8 p.

LEPSCH, I. **Formação e conservação dos solos**. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 216 p.

LIMA, A.; RODRIGUES, R. **Terminologia e simbologia**. In: Camapum de Carvalho *et al.* (Orgs.), Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. Capítulo 1, p. 1-20.

LIMA, P. *et al.* **Princípios de erodibilidade do solo**. Belo Horizonte: Informe Agropecuário, v. 16, n. 176, 1992.

LUCENA, L. **Bioengenharia de solos em recuperação de áreas degradadas**. CPESC, DEFLOR Bioengenharia, 2009.

MACHADO, D. **Comportamento geomecânico de estruturas reliquias de um solo residual de gnaiss da AHE Simpício**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, 2012. 63 p.

MACHADO, R. *et al.* **Recuperação de voçorocas em áreas rurais**. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2006. 63 p.

MACHADO, S.; VILAR, O. **Potenciais da água no solo**. In: Camapum de Carvalho *et al.* (Orgs.), Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. Capítulo 4, p.79-96.

MAGALHÃES, R. Erosão: definições tipos e formas de controle. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 7., 2001, Goiânia. **Anais...** Goiânia: ABGE, 2001. 11 p.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MARINHO, F. **Os Solos Não Saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados**. Texto apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o concurso de Livre-Docência na especialidade “Geomecânica” do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo, 2005. 200 p.

MARQUES, E. **Engenharia e bioengenharia aplicadas à recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: Curso de Pós-Graduação lato sensu em Recuperação de Áreas Degradadas, 2015. 40 p.

MARTINS, S. **Recuperação de áreas degradadas: como recuperar áreas de preservação permanente, voçorocas, taludes rodoviários e áreas de mineração**. 3. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2013. 264 p.

MARTINS, S. **Recuperação de Matas Ciliares**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2001. 146 p.

MASCARENHA, M. *et al.* **Erosão**. In: Camapum de Carvalho *et al.* (Orgs.), Solos não saturados no contexto geotécnico. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015. Capítulo 21, p. 581-612.

MASSAD, F. **Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. 170 p.

MDEP – MASSACHUSETTS DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION. **Unpaved Roads: BMP Manual**, 2001. Disponível em: <<https://www.mass.gov/doc/unpaved-roads-bmp-manual/download>>. Acesso em: 30 jul. 2020.

MELLO, J.; PEREZ, D. Equilíbrio químico das reações no solo. In: MELO, V.; ALLEONI, L. (Ed.). **Química e mineralogia do Solo – Parte I: Conceitos Básicos**. Viçosa: SBCS, 2009. p. 151-250.

MELO, V. *et al.* Reserva mineral do solo. In: MELO, V.; ALLEONI, L. (Ed.). **Química e mineralogia do Solo – Parte I: Conceitos Básicos**. Viçosa: SBCS, 2009. p. 251-332.

MENDES, C. **Erosão em encosta íngreme sob cultivo perene e com pouso no município de Bom Jardim – RJ**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: UFRJ, 2006. 237 p.

MENDONÇA, M. **Relatório da FAO com participação da Embrapa revela que 33% dos solos do mundo estão degradados**. Embrapa, 07 dez. 2015. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/8104410/relatorio-da-fao-com-participacao-da-embrapa-revela-que-33-dos-solos-do-mundo-estao-degradados#:~:text=Brasil%2C%20Alan%20Bojanic,-,Somente%20a%20eros%C3%A3o%20elimina%2025%20a%2040%20bilh%C3%B5es%20e%20toneladas,milh%C3%B5es%20de%20toneladas%20por%20ano>>. Acesso em: 01 set. 2020.

MICHEL, G. **Modelagem de estabilidade de encostas com consideração do efeito da vegetação**. Tese (Pós Graduação em Engenharia Ambiental). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2013. 152 p.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Recuperação de Áreas Degradadas**. Programa Nacional de Florestas, 2012. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/areas-verdes-urbanas/item/8705-recupera%C3%A7%C3%A3o-de-%C3%A1reas-degradadas.html>>. Acesso em: 18 ago. 2020.

MORATO, R. *et al.* **O geoprocessamento como subsídio ao estudo da fragilidade ambiental**. X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Rio de Janeiro: GEO UERJ, n. 1, 1997. p. 709- 719.

MOREIRA, J. *et al.* Atributos químicos e físicos de um latossolo vermelho distrófico sob pastagens recuperada e degradada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 35, n. 3, 2005. p. 155-161.

MOREIRA, R; POLIVANOV, H. Potencial erosivo de perfil de solo de talude de corte através de ensaios de Inderbitzen. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, n. 32, 2018. 13 p.

MOTA, J. **Caracterização física, química e mineralógica, como suporte para o manejo, dos principais solos explorados com a cultura do melão na chapada do Apodi – RN**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2004. 115 p.

MOTTA, A.; MELO, V. Química dos solos ácidos. In: MELO, V.; ALLEONI, L. (Ed.). **Química e mineralogia do Solo – Parte II: Aplicações**. Viçosa: SBCS, 2009. p. 313-380.

MURRIETA, P. **Mecânica dos solos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018. 376 p.

NACINOVIC, M. **Estudo de erosão pela análise de sucção e escoamento superficial na Bacia do Córrego Sujo (Teresópolis-RJ)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009. 167 p.

NEVES, S. **Passivo ambiental da implantação da Ferrovia do Aço: Origem e projeto conceitual de recuperação de área degradada**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária). Juiz de Fora: UFJF, 2019. 165 p.

NOGAMI, J.; VILLIBOR, D. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**. São Paulo: Editora Villibor, 1995. Capítulo 7, p.169-196.

NOGAMI, J.; VILLIBOR, D. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. *Bulletin of Engineering. Geology and the Environment*, n. 19, 1979. p. 196-199.

NOGAMI, J.; VILLIBOR, D. Uma nova classificação de solos para finalidades rodoviárias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS TROPICAIS, 1., 1981, Rio de Janeiro/RJ. **Anais...** Rio de Janeiro: COPPE/ABMS, 1981. p. 30-40.

OLIVEIRA, M. **Caracterização geológico-geotécnica e propostas de intervenção para estabilização de taludes na boçoroca do Córrego do Cravo – Nazareno/MG**. Dissertação (Mestrado em Ciências). São Carlos: USP, 2015. 143 p.

OLIVEIRA, N. **Estudo da influência da resistência à tração do solo no fenômeno de erodibilidade**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Juiz de Fora: UFJF, 2018. 77 p.

OLIVEIRA, V. *et al.* CLIMABR: modelo para a geração de séries sintéticas de precipitação - Parte I. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, 2005. p. 356-363.

ONU BRASIL - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Agricultura e usos do solo representam 23% das emissões de gases do efeito estufa, diz ONU**. ONU Brasil, 15 ago. 2019. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/agricultura-e-usos-do-solo-representam-23-das-emissoes-de-gases-do-efeito-estufa-diz-onu/>>. Acesso em: 02 set. 2020.

PDDU-JF – PLANO DIRETOR DE DESENVOLVIMENTO URBANO DE JUIZ DE FORA. **Hidrografia em Juiz de Fora**. Cesama, 2000. Disponível em: <[PEREIRA, A. **Como selecionar plantas para áreas degradadas e controle de erosão**. Embrapa Solos: 2006a. 88 p.](http://www.cesama.com.br/pesquisa-escolar/hidrografia-em-juiz-de-fora#:~:text=1%2D%20Hidrografia,sub%2Dbacias%20de%20diversas%20dimens%C3%B5es.>http://www.cesama.com.br/pesquisa-escolar/hidrografia-em-juiz-de-fora#:~:text=1%2D%20Hidrografia,sub%2Dbacias%20de%20diversas%20dimens%C3%B5es.>>. Acesso em: 05 set. 2020.</p>
</div>
<div data-bbox=)

PEREIRA, A. **Uso do vetiver na estabilização de taludes e encostas**. Boletim Técnico nº 3, DEFLOR Bioengenharia, 2006b. 20 p.

PEREIRA, L. *et al.* Processos hidro-erosivos em solos degradados em relevo de baixa declividade. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 2, 2016. p. 299-316.

PITTELKOW, G. **Erosão em estrada de terra no Campo de Instrução de Santa Maria (CISM)**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2013. 115 p.

PJF – PREFEITURA DE JUIZ DE FORA. **Clima de Juiz de Fora**. Laboratório de Climatologia e Análise Ambiental – Departamento de Geociências – UFJF, 2004. Disponível em:
<<http://web.archive.org/web/20060706184912/http://www.pjf.mg.gov.br/cidade/clima.php>>.
Acesso em: 04 set 2020.

PRANDEL, L. **Integração de métodos de caracterização mineralógica de solos caulíníticos**. Tese (Doutorado em Ciências). Ponta Grossa: Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2015. 139 p.

PRUSKI, F. **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2009. 279 p.

RIBEIRO, A. *et al.* **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais: Viçosa, 1999. 359 p.

ROCHA, G. *et al.* Mapeamento de riscos ambientais à escorregamentos na área urbana de Juiz de Fora, MG. **Geografia**, v. 12, 2003. p. 509-516.

SALERMO, L. **Entrevista via google Meet**. Entrevistadores: Leticia M. de Carvalho; Tatiana Rodriguez. Juiz de Fora, arquivo de vídeo em mp4, 15 set. 2020.

SALOMÃO, F. Controle e prevenção dos processos erosivos. In: **Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, temas e aplicações**. GUERRA, A. (Orgs). Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, 1999. p 229-267.

SANTOS, I. **Proposta de emprego de solo compactado para a estabilização de taludes – estudo de caso**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Juiz de Fora: UFJF, 2014, 59 p.

SANTOS, L. **Erosão em taludes de corte - métodos de proteção e estabilização**. Trabalho final de curso (Graduação em Engenharia Civil). Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2015a. 73 p.

SANTOS, M. *et al.* O fenômeno da histerese nas curvas de retenção da água no solo e no manejo da irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 25., 2015, São Cristóvão. **Anais...** São Cristóvão: UFS, 2015b. 6 p.

SAULI, G. *et al.* **Manuale di Ingegneria Naturalistica**. Regione Lazio (Roma): Sistemazione dei versanti, v. 3., 2005. 866 p.

SÉGUIN, E.; CARRERA, F. **Lei de crimes ambientais**. Rio de Janeiro: Ed. Esplanada, 1999. SEMA - SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **IN 06** – Terraplanagem. Prefeitura de Joinville, out. 2014. 7 p.

SENADO FEDERAL. **Código florestal de 1934**. Em discussão! Revista de audiências públicas do Senado Federal. Ano 2, nº 9, dezembro de 2011a. Disponível em: <<https://www.senado.gov.br/noticias/Jornal/emdiscussao/codigo-florestal/senado-oferece-um-projeto-equilibrado-para-o-novo-codigo-florestal-brasileiro/codigo-florestal-de-1934.aspx>>. Acesso em: 05 set. 2020.

SENADO FEDERAL. **Código florestal de 1965**. Em discussão! Revista de audiências públicas do Senado Federal. Ano 2, nº 9, dezembro de 2011b. Disponível em: <<https://www.senado.gov.br/noticias/Jornal/emdiscussao/codigo-florestal/senado-oferece-um-projeto-equilibrado-para-o-novo-codigo-florestal-brasileiro/codigo-florestal-de-1965.aspx>>. Acesso em: 05 set. 2020.

SILVA, A. *et al.* Influência da forma e posição da encosta nas características do solo e na regeneração natural em áreas de pastagem abandonadas. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, 2018. p. 1239-1252.

SILVA, C. *et al.* **Flora fanerogâmica do Jardim Botânico da Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil**. Rio de Janeiro: Rodriguésia, v. 71, 2020. 11 p.

SILVA, D. **Modelo para dimensionamento de sistemas de drenagem de superfície em estradas não pavimentadas**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2011, 111 p.

SILVA, I. *et al.* **Recuperação de áreas degradadas por mineração**: uma revisão de métodos recomendados para garimpos. *Pesquisas em Geociências*, v. 45, 2018. 22 p.

SILVA, J.; FILHO, J. Estudo comparativo entre técnicas de proteção superficial de taludes situados na rodovia SP-563: biomanta, hidrossemeadura e grama em placa. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE GESTÃO DE PROJETOS, INOVAÇÃO E SUSTENTABILIDADE, VII. **Anais...** São Paulo: SINGEP, out. 2018.

SILVA, R. **Aplicação da engenharia natural na estabilização de taludes**. Tese (Mestrado em Engenharia Civil). Funchal (Portugal): Universidade da Madeira, 2012. 102 p.

SIMGEO – SIMPÓSIO MINEIRO DE GEOGRAFIA: GEOGRAFIA E CONTEMPORANEIDADES. **A cidade de Juiz de Fora**. Juiz de Fora: Seminário de Pós-Graduação em Geografia, UFJF, 2016. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/simgeo/local/>>. Acesso em: 18 out. 2020.

SOLOTRAT. **Solo grampeado verde**. [201?]. Disponível em: <<http://www.solotrat.com.br/solo-grampeado-verde>>. Acesso em: 26 out. 2020.

SOUSA PINTO, C. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

SOUZA, J. *et al.* **Mapeamento de áreas de risco com o aplicativo Álea**. Juiz de Fora: UFJF, 2018. 84 p.

SPITZCOVSKY, D. **Áreas degradadas no Brasil equivalem a duas França**s. Exame, 12 jul. 2012. Disponível em: < <https://exame.com/mundo/areas-degradadas-no-brasil-equivalem-a-duas-francas/#:~:text=S%C3%A3o%20Paulo%20%E2%80%93%20O%20Brasil%20possui,9%C2%BA%20Simp%C3%B3sio%20Nacional%20de%20Recupera%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 15 ago. 2020.

STEPHAN, A. **Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaios de Inderbitzen**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Viçosa: UFV, 2010. 192 p.

TAVARES, S. *et al.* **Curso de recuperação de áreas degradadas: a visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008. 228 p.

TOMASSETTI, S. **Variabilidade dos parâmetros de resistência do solo laterítico saturado**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Paraná: Universidade Estadual de Londrina, 2012. 72 p.

UFJF - UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. **Jardim Botânico**. [201?]. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/jardimbotanico/>>. Acesso em: 14 mar. 2020.

VARNES, D. Slope movement types and processes. Schuster R. & Krizek R. (Ed.), **Landslides, analysis and control. Transportation Research Board**, n. 176, Nat. Acad. of Sciences, 1978. p. 11-33.

VERTAMATTI, E.; ARAÚJO, F. Critério para previsão do potencial erosivo de solos tropicais. REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 24., Belém/PA. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, v.1, 1990. p. 328-348.

VERTAMATTI, E.; ARAÚJO, F. Elaboração de ábaco de erodibilidade de solos tropicais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 11., 1998, Brasília/DF. **Anais...** Brasília/DF: ABMS. v.1, 1998. p. 573–579.

VERTICAL GREEN DO BRASIL. **Relatório de Obra - Programa de identificação e controle de passivos ambientais: Licença de operação da malha (LO 988/2010) nº 001**. Quatis/RJ: MRS Logística, 2018. 41 p.

VERTICAL GREEN DO BRASIL. **Tecnologias controle de erosão - Geocélula Webflex®**. 2015. Disponível em: < <http://verticalgreen.com.br/tecnologias/controle-de-erosao/geocelula-webflex/>>. Acesso em: 25 out. 2020.

VERTICAL GREEN. **Tecnologias – Drenagem e captação de água**. 2015. Disponível em: <<https://verticalgreen.com.br/tecnologias/drenagem-e-captacao-de-agua/>>. Acesso em: 06 set. 2021.

VIEIRA, L. *et al.* Influência da erosão na estabilidade de talude rodoviário. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 12., 2017, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABMS, 2017. 8 p.

VIEIRA, L. *et al.* Influência das Estruturas Reliquiarias em Ensaio de Erodibilidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 19., 2018, Salvador. **Anais...** Salvador: ABMS, 2018. 8 p.

WEATHER SPARK. **Condições meteorológicas médias de Juiz de Fora.** [201?]. Disponível em: <<https://pt.weatherspark.com/y/30589/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Juiz-de-Fora-Brasil-durante-o-ano>>. Acesso em: 05 set. 2020.

ZONERISC - NÚCLEO DE PESQUISA EM ZONEAMENTO E RISCO AMBIENTAL. **Mapa de risco à erosão em Juiz de Fora – MG.** Produção Científica. Juiz de Fora: UFJF, 2002. Disponível em:<<https://www.ufjf.br/zonerisc/publicacoes/mapa-de-risco-a-erosao-em-juiz-de-fora-mg/>>. Acesso em: 03 set. 2020.

**ANEXO A – LISTA DE ESPÉCIES ARBUSTIVAS ENCONTRADAS NO JARDIM
BOTÂNICO DA UFJF**

Família	Nome científico	Nome popular	Origem
Acanthaceae	<i>Aphelandra schottiana</i>	Anil-bravo	Nativa
Acanthaceae	<i>Ruellia brevifolia</i>	Pingo-de-sangue	Nativa
Araceae	<i>Anthurium andraeanum</i>	Antúrio	Exótica
Araliaceae	<i>Schefflera longipetiolata</i>	Carobão	Nativa
Asparagaceae	<i>Dracaena fragrans</i>	Pau d'água	Exótica
Asteraceae	<i>Ageratum fastigiatum</i>	Matapasto	Nativa
Asteraceae	<i>Baccharis rufidula</i>	Alecrim	Nativa
Asteraceae	<i>Chromolaena maximiliani</i>	Mata-pasto	Nativa
Asteraceae	<i>Conyza sumatrensis</i>	Avoadinha-marfim	Nativa
Asteraceae	<i>Morithamnus ganophyllus</i>	Arnica	Nativa
Cannabaceae	<i>Celtis pubescens</i>	Esporão-de-galo	Nativa
Ericaceae	<i>Rhododendron simsii</i>	Azaleia	Exótica
Fabaceae	<i>Desmodium tortuosum</i>	Carrapicho	Nativa
Fabaceae	<i>Mimosa velloziana</i>	Guarucuia	Nativa
Malvaceae	<i>Callianthe striata</i>	Lanterna-japonesa	Nativa
Malvaceae	<i>Luehea paniculata</i>	Açoita-cavalo	Nativa
Malvaceae	<i>Peltaea obsita</i>	Avenca-do-cerrado	Nativa
Malvaceae	<i>Urena lobata</i>	Aguaxima	Nativa
Melastomataceae	<i>Clidemia dentata</i>	Clidemia	Nativa
Melastomataceae	<i>Clidemia hirta</i>	Caiuia	Nativa
Melastomataceae	<i>Leandra hirta</i>	Pixirica	Nativa
Melastomataceae	<i>Leandra nianga</i>	Pixirica	Nativa
Melastomataceae	<i>Miconia sp.1</i>	Canela-de-velho	Nativa
Melastomataceae	<i>Miconia racemifera</i>	Pixirica	Nativa
Myrtaceae	<i>Myrcia multiflora</i>	Pedra-hune-caá	Nativa
Myrtaceae	<i>Myrcia reticulata</i>	Cambuizinho-vermelho	Nativa
Myrtaceae	<i>Myrciaria glazioviana</i>	Cabeludinha	Nativa
Ochnaceae	<i>Ouratea parviflora</i>	Canela-de-veado	Nativa
Onagraceae	<i>Ludwigia lagunae</i>	Aguapé-mirim	Nativa
Phyllanthaceae	<i>Phyllanthus tenellus</i>	Quebra-pedra	Nativa
Piperaceae	<i>Piper arboreum</i>	Fruto de morcego	Nativa
Rosaceae	<i>Rubus brasiliensis</i>	Amora-do-mato	Nativa
Rubiaceae	<i>Borreria verticillata</i>	Cordão-de-frade	Nativa
Rubiaceae	<i>Coffea arabica</i>	Cafeeiro	Naturalizada
Rubiaceae	<i>Galianthe brasiliensis</i>	Poaia-do-campo	Nativa
Rubiaceae	<i>Palicourea marcgravii</i>	Cafezinho	Nativa
Rubiaceae	<i>Psychotria deflexa</i>	Erva-de-rato	Nativa
Rubiaceae	<i>Psychotria spathicalyx</i>	Cravo-negro	Nativa
Rubiaceae	<i>Psychotria stachyoides</i>	Castanha-de-macaco	Nativa
Rubiaceae	<i>Psychotria vellosiana</i>	Jasmim-verdadeiro	Nativa
Solanaceae	<i>Aureliana velutina</i>	Baga-de-morcego	Nativa
Solanaceae	<i>Cestrum bracteatum</i>	Coerena	Nativa

Solanaceae	<i>Solanum paniculatum</i>	Jurubeba	Nativa
Solanaceae	<i>Solanum piluliferum</i>	Fruta-de-lobo	Nativa
Urticaceae	<i>Boehmeria caudata</i>	Urtiga mansa	Nativa
Verbenaceae	<i>Lippia brasiliensis</i>	Erva-cidreira-brasileira	Nativa

Fonte: Silva *et al.* (2020) (Adaptado pela autora)

**ANEXO B – LISTA DE ESPÉCIES ARBÓREAS ENCONTRADAS NO JARDIM
BOTÂNICO DA UFJF**

Família	Nome científico	Nome popular	Origem
Anacardiaceae	<i>Anacardium humile</i>	Caju-do-cerrado	Cultivada
Anacardiaceae	<i>Anacardium occidentale</i>	Cajueiro	Cultivada
Annonaceae	<i>Tapirira guianensis</i>	Pau-pombo	Nativa
Annonaceae	<i>Annona cacans</i>	Araticum-cagão	Nativa
Annonaceae	<i>Annona dolabripetala</i>	Biribá do mato	Nativa
Annonaceae	<i>Annona glabra</i>	Araticum-do-brejo	Nativa
Annonaceae	<i>Duguetia lanceolata</i>	Pindaíba	Nativa
Annonaceae	<i>Guatteria sellowiana</i>	Embira	Nativa
Annonaceae	<i>Xylopia aromatica</i>	Pimenta-de-macaco	Nativa
Annonaceae	<i>Xylopia brasiliensis</i>	Pimenta de mato	Nativa
Annonaceae	<i>Xylopia sericea</i>	Pindaíba-vermelha	Nativa
Apocynaceae	<i>Aspidosperma olivaceum</i>	Peroba-rosa	Nativa
Apocynaceae	<i>Himatanthus bracteatus</i>	Banana-de-papagaio	Nativa
Apocynaceae	<i>Tabernaemontana laeta</i>	Pau-de-colher	Nativa
Aquifoliaceae	<i>Ilex cerasifolia</i>	Congonha	Nativa
Araliaceae	<i>Schefflera morototoni</i>	Mandioqueira	Nativa
Araucariaceae	<i>Araucaria angustifolia</i>	Araucária	Nativa
Arecaceae	<i>Euterpe edulis</i>	Içara	Nativa
Arecaceae	<i>Syagrus romanzoffiana</i>	Jerivá	Nativa
Asteraceae	<i>Austrocritonia velutina</i>	Vassoura-cambará	Nativa
Asteraceae	<i>Piptocarpha axillaris</i>	Vassourão-graúdo	Nativa
Asteraceae	<i>Piptocarpha macropoda</i>	Cambará preto	Nativa
Asteraceae	<i>Vernonanthura discolor</i>	Cambará-guaçú	Nativa
Asteraceae	<i>Vernonanthura divaricata</i>	Vassourão preto	Nativa
Bignoniaceae	<i>Cybistax antisyphilitica</i>	Ipê-verde	Nativa
Bignoniaceae	<i>Handroanthus albus</i>	Ipê-amarelo	Nativa
Bignoniaceae	<i>Handroanthus chrysotrichus</i>	Ipê-do-morro	Nativa
Bignoniaceae	<i>Handroanthus impetiginosus</i>	Ipê-roxo	Nativa
Bignoniaceae	<i>Jacaranda macrantha</i>	Caroba	Nativa
Bignoniaceae	<i>Jacaranda micrantha</i>	Carobão	Nativa
Bignoniaceae	<i>Sparattosperma leucanthum</i>	Caroba-branca	Nativa
Boraginaceae	<i>Cordia ecalyculata</i>	Porangaba	Nativa
Boraginaceae	<i>Cordia sellowiana</i>	Baba-de-boi	Nativa
Burseraceae	<i>Protium heptaphyllum</i>	Almecegueira	Nativa
Cactaceae	<i>Pereskia grandifolia</i>	Rosa-madeira	Nativa
Cannabaceae	<i>Celtis iguanaea</i>	Esporão-de-galo	Nativa
Cannabaceae	<i>Trema micrantha</i>	Pau pólvora	Nativa
Celastraceae	<i>Montevertia gonoclada</i>	Café-de-jacu	Nativa
Chrysobalanaceae	<i>Hirtella hebeclada</i>	Cinzeiro	Nativa
Chrysobalanaceae	<i>Licania kunthiana</i>	Fruta-de-morcego	Nativa
Combretaceae	<i>Buchenavia tomentosa</i>	Tarumarana	Nativa
Cunoniaceae	<i>Lamanonia ternata</i>	Guaraperê	Nativa

Cupressaceae	<i>Cunninghamia lanceolata</i>	Pinhão chinês	Exótica
Elaeocarpaceae	<i>Sloanea guianensis</i>	Laranjeira-do-mato	Nativa
Erythroxylaceae	<i>Erythroxylum citrifolium</i>	Pimentinha	Nativa
Erythroxylaceae	<i>Erythroxylum deciduum</i>	Cocão	Nativa
Erythroxylaceae	<i>Erythroxylum pelleterianum</i>	Fruta-de-pomba	Nativa
Euphorbiaceae	<i>Alchornea glandulosa</i>	Tamanqueiro	Nativa
Euphorbiaceae	<i>Alchornea triplinervia</i>	Tanheiro	Nativa
Euphorbiaceae	<i>Aparisthmium cordatum</i>	Ariquena Queimosa	Nativa
Euphorbiaceae	<i>Croton floribundus</i>	Capixingui	Nativa
Euphorbiaceae	<i>Croton urucurana</i>	Sangra d'água	Nativa
Euphorbiaceae	<i>Maprounea guianensis</i>	Cascudinho	Nativa
Fabaceae	<i>Anadenanthera colubrina</i>	Angico-branco	Nativa
Fabaceae	<i>Apuleia leiocarpa</i>	Garapa	Nativa
Fabaceae	<i>Cassia ferruginea</i>	Chuva-de-ouro	Nativa
Fabaceae	<i>Cenostigma pluviosum</i>	Sibipiruna	Cultivada
Fabaceae	<i>Dalbergia nigra</i>	Jacarandá-da-baía	Nativa
Fabaceae	<i>Dalbergia villosa</i>	Jacarandá	Nativa
Fabaceae	<i>Holocalyx balansae</i>	Alecrim-de-campinas	Nativa
Fabaceae	<i>Hymenolobium janeirense</i>	Guaracuí	Nativa
Fabaceae	<i>Inga cylindrica</i>	Ingá cilindro	Nativa
Fabaceae	<i>Inga vera</i>	Ingá cipó	Nativa
Fabaceae	<i>Machaerium acutifolium</i>	Jacarandá-do-campo	Nativa
Fabaceae	<i>Machaerium brasiliense</i>	Jacarandá bico-de-pato	Nativa
Fabaceae	<i>Machaerium nyctitans</i>	Guaximbé	Nativa
Fabaceae	<i>Melanoxylon brauna</i>	Árvore-da-chuva	Nativa
Fabaceae	<i>Paubrasil echinata</i>	Pau-brasil	Cultivada
Fabaceae	<i>Peltophorum dubium</i>	Cássia-amarela	Nativa
Fabaceae	<i>Piptadenia gonoacantha</i>	Pau-jacaré	Nativa
Fabaceae	<i>Platypodium elegans</i>	Amendoim-do-campo	Nativa
Fabaceae	<i>Pseudopiptadenia contorta</i>	Angico	Nativa
Fabaceae	<i>Schizolobium parahyba</i>	Guapuruvu	Cultivada
Fabaceae	<i>Senna macranthera</i>	Pau-fava	Nativa
Fabaceae	<i>Senna multijuga</i>	Cigarreira	Nativa
Fabaceae	<i>Stryphnodendron polyphyllum</i>	Barbatimão	Nativa
Fabaceae	<i>Tachigali rugosa</i>	Jataíba	Nativa
Humiriaceae	<i>Vantanea compacta</i>	Massuarã	Nativa
Hypericaceae	<i>Vismia guianensis</i>	Iacre-branco	Nativa
Lacistemataceae	<i>Lacistema pubescens</i>	Espeto-vermelho	Nativa
Lamiaceae	<i>Aegiphila integrifolia</i>	Tamanqueiro	Nativa
Lamiaceae	<i>Hyptidendron asperrimum</i>	Salva-do-campo	Nativa
Lauraceae	<i>Endlicheria paniculata</i>	Canela-frade	Nativa
Lauraceae	<i>Nectandra oppositifolia</i>	Canela-ferrugem	Nativa
Lauraceae	<i>Ocotea corymbosa</i>	Canela-fedida	Nativa
Lauraceae	<i>Ocotea diospyrifolia</i>	Canela-amarela	Nativa
Lauraceae	<i>Ocotea odorifera</i>	Canela-sassafrás	Nativa
Lauraceae	<i>Ocotea puberula</i>	Canela guaica	Nativa

Lauraceae	<i>Ocotea velloziana</i>	Canela-babosa	Nativa
Lauraceae	<i>Ocotea villosa</i>	Canela-sabão	Nativa
Lauraceae	<i>Persea americana</i>	Abacateira	Cultivada
Lecythydaceae	<i>Lecythis pisonis</i>	Sapucaia	Cultivada
Loganiaceae	<i>Antonia ovata</i>	Quina-do-campo	Nativa
Malvaceae	<i>Ceiba speciosa</i>	Paineira-rosa	Nativa
Malvaceae	<i>Dombeya wallichii</i>	Astrapeia	Exótica
Malvaceae	<i>Luehea divaricata</i>	Acoite-cavalo	Nativa
Malvaceae	<i>Luehea grandiflora</i>	Açoita-cavalo	Nativa
Malvaceae	<i>Pseudobombax grandiflorum</i>	Embiruçu	Nativa
Melastomataceae	<i>Leandra sp.2</i>	Pixirica	Nativa
Melastomataceae	<i>Leandra aurea</i>	Caraxingui	Nativa
Melastomataceae	<i>Miconia sp.3</i>	Quaresmeira-de-flor-branca	Nativa
Melastomataceae	<i>Miconia cinnamomifolia</i>	Jacatirão-açu	Nativa
Melastomataceae	<i>Miconia latecrenata</i>	Pixiricão	Nativa
Melastomataceae	<i>Miconia splendens</i>	Canela-de-velho	Nativa
Melastomataceae	<i>Miconia theizans</i>	Pixirica-rosa	Nativa
Melastomataceae	<i>Pleroma granulosa</i>	Flor-da-quaresma	Nativa
Melastomataceae	<i>Pleroma mutabilis</i>	Manacá-da-serra	Nativa
Meliaceae	<i>Cabralea canjerana</i>	Canherana	Nativa
Meliaceae	<i>Cedrela fissilis</i>	Cedro-rosa	Nativa
Meliaceae	<i>Cedrela odorata</i>	Cedro do brejo	Nativa
Meliaceae	<i>Guarea guidonia</i>	Carrapeta-verdadeira	Nativa
Meliaceae	<i>Guarea macrophylla</i>	Saco-de-gambá	Nativa
Meliaceae	<i>Trichilia catigua</i>	Catiguá-vermelho	Nativa
Meliaceae	<i>Trichilia lepidota</i>	Cedro	Nativa
Menispermaceae	<i>Abuta selloana</i>	Baga-de-caboclo	Nativa
Monimiaceae	<i>Mollinedia argyrogyna</i>	Corticeira	Nativa
Monimiaceae	<i>Mollinedia schottiana</i>	Capixim	Nativa
Moraceae	<i>Brosimum guianense</i>	Leiteira-vermelha	Nativa
Moraceae	<i>Ficus adhatodifolia</i>	Figueira	Nativa
Moraceae	<i>Ficus auriculata</i>	Figueira-de-jardim	Cultivada
Moraceae	<i>Ficus citrifolia</i>	Figueira-branca	Nativa
Moraceae	<i>Sorocea guilleminiana</i>	Bainha-de-espada	Nativa
Musaceae	<i>Musa balbisiana</i>	Banana-flor	Exótica
Myrtaceae	<i>Campomanesia guazumifolia</i>	Sete-capotes	Nativa
Myrtaceae	<i>Campomanesia laurifolia</i>	Guabiroba rugosa	Nativa
Myrtaceae	<i>Campomanesia phaea</i>	Cambuci	Cultivada
Myrtaceae	<i>Eugenia brasiliensis</i>	Grumichameira	Cultivada
Myrtaceae	<i>Eugenia candolleana</i>	Cambuí-roxo	Nativa
Myrtaceae	<i>Eugenia florida</i>	Pitanga-preta	Nativa
Myrtaceae	<i>Eugenia sprengelii</i>	Murta	Nativa
Myrtaceae	<i>Eugenia uniflora</i>	Pitangueira	Cultivada
Myrtaceae	<i>Myrcia guianensis</i>	Araçazinho	Nativa
Myrtaceae	<i>Myrcia splendens</i>	Guamirim-miudo	Nativa
Myrtaceae	<i>Plinia cauliflora</i>	Jabuticabeira-preta	Cultivada

Myrtaceae	<i>Syzygium cumini</i>	Jambolão	Cultivada
Myrtaceae	<i>Syzygium jambos</i>	Jamboeiro	Cultivada
Ochnaceae	<i>Ouratea salicifolia</i>	Caju-bravo	Nativa
Ochnaceae	<i>Ouratea spectabilis</i>	Batiputá	Nativa
Peraceae	<i>Pera glabrata</i>	Cabeluda-do-mato	Nativa
Piperaceae	<i>Piper crassinervium</i>	Pariparoba	Nativa
Piperaceae	<i>Piper cubataonum</i>	Erva-de-vidro	Nativa
Piperaceae	<i>Piper gaudichaudianum</i>	Murta	Nativa
Piperaceae	<i>Piper lagoense</i>	Pariparoba	Nativa
Piperaceae	<i>Piper mollicomum</i>	Jaguarandi	Nativa
Piperaceae	<i>Piper vicosanum</i>	Jaborandi	Nativa
Polygalaceae	<i>Bredemeyera laurifolia</i>	Guiné-do-campo	Nativa
Polygalaceae	<i>Diclidanthera laurifolia</i>	Abutua-grande	Nativa
Polygonaceae	<i>Coccoloba warmingii</i>	Racha-ligeiro	Nativa
Primulaceae	<i>Myrsine coriacea</i>	Capororoca vermelha	Nativa
Primulaceae	<i>Myrsine umbellata</i>	Pororocão	Nativa
Proteaceae	<i>Roupala montana</i>	Carvalho-brasileiro	Nativa
Rosaceae	<i>Prunus myrtifolia</i>	Pessegueiro-bravo	Nativa
Rubiaceae	<i>Amaioua guianensis</i>	Goiaba de peixe	Nativa
Rubiaceae	<i>Amaioua intermedia</i>	Carvoeiro	Nativa
Rubiaceae	<i>Bathysa australis</i>	Fumão	Nativa
Rubiaceae	<i>Coutarea hexandra</i>	Murta-do-mato	Nativa
Rubiaceae	<i>Ixora brevifolia</i>	Café-de-bugre	Nativa
Rubiaceae	<i>Margaritopsis cephalantha</i>	Canela-de-veado	Nativa
Rubiaceae	<i>Margaritopsis chaenotricha</i>	Tarumã	Nativa
Rubiaceae	<i>Psychotria sp.1</i>	Quina-mole	Nativa
Rubiaceae	<i>Psychotria carthagenensis</i>	Erva de rato branca	Nativa
Rubiaceae	<i>Rudgea sp.1</i>	Poaia	Nativa
Rubiaceae	<i>Schizocalyx cuspidatus</i>	Quina-do-mato	Nativa
Rutaceae	<i>Dictyoloma vandellianum</i>	Tinguí	Nativa
Rutaceae	<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>	Mamica-de-cadela	Nativa
Salicaceae	<i>Casearia arborea</i>	Guaçatunga-cafezeiro	Nativa
Salicaceae	<i>Casearia decandra</i>	Guaçatunga-branca	Nativa
Salicaceae	<i>Casearia obliqua</i>	Guaçatunga-vermelha	Nativa
Salicaceae	<i>Casearia sylvestris</i>	Guaçatunga-preto	Nativa
Sapindaceae	<i>Allophylus edulis</i>	Chal-chal	Nativa
Sapindaceae	<i>Cupania ludowigii</i>	Cucum	Nativa
Sapindaceae	<i>Cupania oblongifolia</i>	Camboatá	Nativa
Sapindaceae	<i>Cupania vernalis</i>	Cuvatã	Nativa
Sapindaceae	<i>Matayba elaeagnoides</i>	Mataíba branco	Nativa
Sapotaceae	<i>Pouteria guianensis</i>	Andiroba	Nativa
Siparunaceae	<i>Siparuna brasiliensis</i>	Limoeiro-bravo	Nativa
Siparunaceae	<i>Siparuna guianensis</i>	Negramina	Nativa
Solanaceae	<i>Acnistus arborescens</i>	Fruta-do-sabiá	Nativa
Solanaceae	<i>Brugmansia suaveolens</i>	Trombeteira	Nativa
Solanaceae	<i>Brunfelsia uniflora</i>	Manacá-de-cheiro	Nativa

Solanaceae	<i>Cestrum sp.3</i>	Coerana	Nativa
Solanaceae	<i>Solanum cernuum</i>	Panaceia	Nativa
Solanaceae	<i>Solanum granulosoleprosum</i>	Falso tabaco	Nativa
Symplocaceae	<i>Symplocos nitens</i>	Congonha	Nativa
Urticaceae	<i>Cecropia pachystachya</i>	Embaúba	Nativa
Urticaceae	<i>Urera caracasana</i>	Urtigão	Nativa
Vochysiaceae	<i>Qualea sp.1</i>	Tapicuru	Nativa
Vochysiaceae	<i>Vochysia magnifica</i>	Guaricica	Nativa

Fonte: Silva *et al.* (2020) (Adaptado pela autora)