



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**



**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**AVALIAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DE TALUDE INSTÁVEL NA  
ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE OURO PRETO – MG**

Arthur Campos Palhares

**MONOGRAFIA n°518**

Ouro Preto, agosto de 2024



**AVALIAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DE TALUDE INSTÁVEL  
NA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE OURO PRETO – MG**

---





## **FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**

### **Reitora**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cláudia Aparecida Marlière de Lima

### **Vice-Reitor**

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

### **Pró-Reitora de Graduação**

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Tânia Rossi Garbin

### **ESCOLA DE MINAS**

#### *Diretor*

Prof. Dr. José Alberto Naves Cocota Junior

#### *Vice-Diretor*

Prof. Dr. Cláudio Eduardo Lana

### **DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

#### *Chefe*

Geraldo Magela Santos Sampaio



**MONOGRAFIA**

**Nº518**

**AVALIAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DE TALUDE  
INSTÁVEL NA ÁREA URBANA DO MUNICÍPIO DE OURO  
PRETO – MG**

**Arthur Campos Palhares**

*Orientador*

**Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar**

*Coorientador*

**Prof. Dr. Lucas Pereira Leão**

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2024/1.

**OURO PRETO**

**2024**

---

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

P161a Palhares, Arthur Campos.

Avaliação geológica-geotécnica de talude instável na área urbana do município de Ouro Preto - MG. [manuscrito] / Arthur Campos Palhares. - 2024.

117 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar.

Coorientador: Prof. Dr. Lucas Pereira Leão.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Geotecnia. 2. Solos - Rastejo. 3. Talude (Mecânica do solo) - Estabilidade. 4. Filito. I. Bacellar, Luis de Almeida Prado. II. Leão, Lucas Pereira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.137

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**Arthur Campos Palhares**

### **Avaliação Geológica-Geotécnica de Talude Instável na Área Urbana do Município de Ouro Preto - MG**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo

Aprovada em 21 de agosto de 2024

#### Membros da banca

Prof. Dr Luis de Almeida Prado Bacellar - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto  
Profa. MSc Lais de Carvalho Faria Lima Lopes - Universidade Federal de Ouro Preto  
Dr Luiz Henrique Cardoso - Universidade Federal de Ouro Preto

Luis de Almeida Prado Bacellar, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 29/08/2024



Documento assinado eletronicamente por **Luis de Almeida Prado Bacellar, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/08/2024, às 12:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0768835** e o código CRC **D54254F8**.



## **Agradecimentos**

---

Primeiramente agradeço à minha mãe, Maria Elizabeth, e ao meu pai, Eduardo, que me guiaram, apoiaram e orientaram a minha jornada. Aos meus avós, Carmelita, Francisco e a família Palhares, por serem a minha base sólida. A minha companheira de vida, Ana Luisa, que ao longo da minha jornada sempre esteve comigo, nos momentos de alegria e adversidades.

As Empresas Pattrol e Intertechne pelas oportunidades profissionais, contribuindo significativamente para meu desenvolvimento e aprimoramento. A Geoconsultoria Jr. e o PET Engenharia Geológica, por proporcionarem grandes vivências acadêmicas durante a graduação.

Aos grandes amigos que fiz ao longo da minha trajetória, desde Igarapé, Betim, Belo Horizonte e Ouro Preto. À Geologia 17.1, em especial, Paulista, Fevin, 13, K-rinhoso, Caçado e Diego Victor.

Agradeço ao Departamento de Geologia, à Escola de Minas, à Universidade Federal de Ouro Preto e todos os professores da graduação, em especial Cláudio Lana e Luís Bacellar, pela tutoria, incentivos e ensino de qualidade. Agradecimento especial também à FAPEMIG, que através do processo APQ-016013-22, possibilitou o desenvolvimento da pesquisa.

# SUMÁRIO

---

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>viii</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>xii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
1.1 APRESENTAÇÃO .....	23
1.2 OBJETIVO .....	24
1.3 JUSTIFICATIVA .....	25
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	25
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>28</b>
2.1 HISTÓRICO DE OCUPAÇÃO DO MUNICÍPIO DE OURO PRETO .....	28
2.2 MOVIMENTOS DE MASSA.....	30
2.2.1 CONDICIONANTES CLIMÁTICOS.....	32
2.2.2 RASTEJOS .....	33
2.3 CONCEITOS IMPORTANTES.....	37
2.3.1 FATOR DE SEGURANÇA .....	37
2.3.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO .....	39
2.3.3 MÉTODO DO EQUÍLIBRIO LIMITE .....	41
2.4 INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS E INSTRUMENTAÇÃO.....	48
2.5 ELETRORRESISTIVIDADE .....	50
2.5.1 ARRANJOS.....	51
<b>3 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	<b>54</b>
3.1 LOCALIZAÇÃO.....	54
3.2 GEOLOGIA REGIONAL.....	54
3.3 GEOLOGIA LOCAL .....	58
3.4 CLIMA .....	59
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>62</b>
4.1 RECONHECIMENTO DE CAMPO .....	62
4.2 ANÁLISE TEMPORAL DE IMAGENS E FOTOS AÉREAS .....	63
4.3 LEVANTAMENTOS DE ELETRORRESISTIVIDADE .....	63
4.4 SONDAGENS.....	66
4.4.1 SONDAGEM A TRADO .....	66

4.4.2	SONDAGEM A PERCUSSÃO.....	69
4.5	INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO.....	72
5	RESULTADOS E DISCUSÕES .....	76
5.1	LEVANTAMENTOS DE ELETRORRESISTIVIDADE .....	79
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E SONDAGENS.....	82
5.3	MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO .....	86
5.4	TOPOGRAFIA.....	87
5.5	SEÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA.....	89
5.6	ANÁLISES DE ESTABILIDADE .....	90
6	CONCLUSÕES .....	94
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	96
	APÊNDICES .....	106

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1 – Ocupação urbana em Ouro Preto (MG) entre 1698 e 1940, adaptado de IGA (1995b). .....	30
Figura 2 – Classificação de Varnes (1978) sintetizada.....	31
Figura 3 - Gráfico da correlação entre chuva e deslizamento elaborado para o município de Cubatão-SP. ....	32
Figura 4 – Figura esquemática de uma região de rastejo, com indícios superficiais....	34
Figura 5 – Figura esquemática do mecanismo de deslizamento, em taludes em filito, agravado por trincas remontantes. ....	35
Figura 6 – Envoltória de ruptura de Mohr Coulomb .....	40
Figura 7 – Determinação da envoltória de ruptura, segundo o método de Mohr-Coulomb. ....	40
Figura 8 – Seção transversal ilustrado a divisão em fatias. ....	41
Figura 9 – Decomposição de forças na fatia, de acordo com o método de Bishop. ....	42
Figura 10 – Geometria do método de Janbu simplificado. ....	44
Figura 11 – Forças atuantes nas fatias infinitesimais de acordo com o método de Morgenstern e Price.....	45
Figura 12 – Método de Spencer.....	47
Figura 13 – Desenho esquemático de tripé utilizado na sondagem SPT.....	49
Figura 14 – Piezômetro de Casagrande. ....	49
Figura 15 – Três tipos de arranjo mais usualmente utilizados em levantamentos de eletrorresistividade.....	52
Figura 16 – Disposição dos eletrodos e sentido de caminhamento em levantamentos utilizando o arranjo Dipolo-Dipolo. ....	53
Figura 17 – Mapa de localização da área de estudo, no município de Ouro Preto/ MG. ....	54
Figura 18 – Compartimentação geotectônica da Plataforma Sul-Americana.....	55

Figura 19 – Representação simplificada do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero. .....	56
Figura 20 – Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. ....	57
Figura 21 – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, com a área de estudo delimitada em vermelho. ....	58
Figura 22 – Índices pluviométricos ao longo dos meses no município de Ouro Preto, com base na série de 1995 a 2012. ....	60
Figura 23 – Relações entre chuvas e movimentos de massa para algumas cidades brasileiras.....	61
Figura 24 – Fluxograma ilustrativo das etapas de desenvolvimento do trabalho.....	62
Figura 25 - Foto do município de Ouro Preto de agosto de 1969, em destaque (vermelho) o terreno da área de estudo. ....	63
Figura 26 – Mapa de localização das linhas de levantamento de eletrorresistividade realizados. ....	64
Figura 27 – Eletrodos cravados para realização da linha 1 de eletrorresistividade. ....	65
Figura 28 - Composição de trado mecanizado em execução de furo na área de estudo. .....	67
Figura 29 - Localização das sondagens à trado executadas na área. ....	68
Figura 30 - Acondicionamento das amostras coletadas nas sondagens à trado, em sacos plásticos. ....	69
Figura 31 - a) Montagem do tripé utilizado na realização da sondagem à percussão e ensaios SPT. b) Amostrador utilizado na sondagem à percussão. c) Martelo padrão (65 kg) utilizado nos ensaios acima das hastes. ....	70
Figura 32 - Localização das sondagens à percussão (SPT) executadas na área de estudo. .....	71
Figura 33 – Localização do furo de sondagem realizado pela empresa Fonntes em abril de 2014. ....	72
Figura 34 – Localização dos Piezômetros instalados. ....	73

Figura 35 - a) Tubo de PVC com a porção ranhurada envolta em <i>geotêxtil (bidim)</i> . b) Procedimento de inserção de areia no furo, no entorno da porção ranhurada. c) Procedimento de compactação da camada de areia e bentonita. d) Piezômetro finalizado e selado.....	74
Figura 36 – a) Marco superficial confeccionado pela empresa <i>Soil Solutions &amp; Services</i> . b) Procedimento para medição do nível de água no piezômetro.....	75
Figura 37 – a) Testemunho de sondagem do filito prateado da Formação Cercadinho, na sua porção predominantemente micácea. b) Afloramento de filito prateado, próximo da área de estudo. c) Porção mais arenosa do filito, obtido em sondagem à trado.....	76
Figura 38 - a) Abertura entre as vigas do prédio da escola, indicando movimentação relativa. b) Inclinação de árvore nas proximidades da escola, próximas a escola. c) Embarrigamento de muro de contenção (gabião) próximo ao sopé do terreno investigado, localizado na rua Padre Rolim. d) Trinca de tração na edificação da escola. ....	77
Figura 39 - a) Degraus de abatimento resultantes do movimento de rastejo. b) Degraus de abatimento, dispostos ao longo de grande parte do terreno.....	78
Figura 40 - a) Detalhe de ortofoto evidenciando a área de estudo em agosto de 1969. b) Imagem de satélite indicando em tracejado vermelho os degraus de abatimento-na área.....	78
Figura 41 - a) Imagem de satélite da área em setembro de 2011. b) Imagem de satélite da área em junho de 2023, evidenciando algumas movimentações ocorridas, indicadas pelas linhas tracejadas e setas e o avanço dos degraus de abatimento indicado pelo círculo vermelho. ....	79
Figura 42 – Seção invertida referente linha 1 de eletrorresistividade.....	80
Figura 43 - Seção invertida referente linha 2 de eletrorresistividade. ....	81
Figura 44 – Linha 2 de eletrorresistividade contendo interpretação das zonas de resistividade associadas com material. ....	81
Figura 45 – Estado de compacidade e consistência dos solos. ....	83
Figura 46 – Amostras coletadas no trado a) Solo residual de Filito. b) Saprólito de filito mais intemperizado. c) Saprólito de filito menos intemperizado. d) Fragmento de filito preservado no saprólito. e) Filito prateado da Formação Cercadinho. f) Testemunho de filito prateado retirado em campo. ....	86

Figura 47 - a) Médias semestrais de precipitação do período chuvoso (outubro a março) e seco (abril a setembro) para a cidade de Ouro Preto (dados da Defesa Civil de Ouro Preto). Os números de 1 a 23 na abcissa representam os anos dos finais da estação úmida (2012 a 2022). Notar que as maiores acumuladas de chuva ocorreram nas estações úmidas de 2011/2012 e 2021/2022; b) Dados piezométricos e de precipitação diária. As setas indicam a primeira data de medida em que o nível d'água foi inicialmente identificado nos piezômetros. Os valores de datas anteriores representam a base dos piezômetros que se encontravam secos, indicando uma possível altura máxima o nível d'água ..... 87

Figura 48 – a) Detalhe do filito prateado; b) afloramento do filito em processo inicial empastilhamento; c) muro de gabião tombado pelo processo de rastejo; d) afloramento de filito exposto em degrau de abatimento. e) Degrau de abatimento com mais de 1 m de amplitude; f) Foto oblíqua do talude, onde se observa a escola Padre Carmélio fundada em aterro (delimitado pela linha tracejada vermelha). Observar degraus de abatimento, indicadores de deformação retrogressiva, que são mais abundantes a montante de grandes cortes na base do talude..... 88

Figura 49 – a) Ortofoto tirada por drone na área. b) Curvas de nível obtidas resultantes do levantamento aéreo contendo a seção crítica da área. .... 89

Figura 50 – a) Topografia levantada por drone inserida no Autodesk Civil 3D contendo a seção crítica (Seção A), sondagens e instrumentos realizados. b) Seção topográfica com as sondagens rebatidas, indicando profundidade máxima, descrição, nível de água e SPT, quando aplicável. C) Ilustração das sondagens utilizadas na confecção da seção. .... 89

Figura 51 – Seção geológica interpretada de acordo com as sondagens e piezômetros. .... 90

Figura 52 – Resultados das análises de determinação de fator de segurança por equilíbrio-limite com o método de busca *auto-refine* (*Spencer*) para diversas situações do manto inconsolidado: a) seco; b) nível d'água máximo medido no verão 2023/2024; c) nível d'água máximo possível. .... 92

Figura 53 – Resultados das análises de determinação de fator de segurança por equilíbrio-limite com o método de busca *auto-refine* (*GLE*) para diversas situações do manto inconsolidado: a) seco; b) nível d'água máximo medido no verão 2023/2024; c) nível d'água máximo possível. .... 92

Figura 54 – Resultados das análises de determinação de fator de segurança por equilíbrio-limite com o método de busca *auto-refine (Janbu)* para diversas situações do manto inconsolidado: a) seco; b) nível d'água máximo medido no verão 2023/2024; c) nível d'água máximo possível.....93

## ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 2.1 - Classificação de fenômenos que podem causar aumento da tensão cisalhante. ....	38
Tabela 2.2 – Classificação dos fenômenos que podem causar redução da resistência ao cisalhamento. ....	39
Tabela 4.1 – Localização dos levantamentos de eletrorresistividade. ....	66
Tabela 4.2 – Coordenadas e profundidade das sondagens a trado. ....	67
Tabela 4.3 - Sondagens à percussão e as respectivas coordenadas, realizadas na área de estudo.....	70
Tabela 4.4 – Dados de monitoramento dos piezômetros instalados.....	72
Tabela 5.1 – Frações granulométricas e suas respectivas nomenclaturas, de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 2022).....	83
Tabela 5.2 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento (Hidros, 2017). ....	91
Tabela 5.3 – Resultados dos Fatores de Segurança. ....	91



## Resumo

---

Desde o final do século XVII, a região de Ouro Preto, sudeste do Quadrilátero Ferrífero (MG), tem sido progressivamente ocupada, inclusive em áreas muito suscetíveis a movimentos de massa. Os movimentos de massa têm desempenhado um papel significativo na vida cotidiana da cidade, causando instabilidade em encostas, que afetam diretamente benfeitorias e as vidas dos habitantes. Este estudo se concentra nos movimentos de massa categorizados como "rastejos" (*creep*), caracterizados pela baixa velocidade e pela grande magnitude. Esses movimentos são sazonais, influenciados pela precipitação pluviométrica, e são desencadeados por condições geológico-geotécnicas específicas, além de serem afetados por atividades antrópicas, como cortes e aterros. Portanto, este trabalho teve como objetivo aprofundar o entendimento desses movimentos em Ouro Preto, tendo como modelo um talude localizado no bairro São Cristóvão, onde se situa a escola municipal Padre Carmélio, que foi interditada em decorrência do elevado grau de instabilidade estrutural. Trata-se de talude com filitos da Formação Cercadinho, Grupo Piracicaba, Supergrupo Minas. Para atingir esse objetivo foram utilizadas ferramentas de caracterização geológica, estrutural, geotécnica e hidrológica, por meio de investigações geológicas, incluindo a interpretação de imagens e fotos aéreas multitemporais, sondagens a trado e a percussão SPT, métodos indiretos geofísicos (eletrorresistividade) e instrumentação (piezômetros e marcos topográficos). Fatores importantes foram utilizados para interpretação e análise dos dados, entre eles, a declividade média do talude, a espessura e a resistência ao cisalhamento do solo e da rocha alterada, a influência da água subsuperficial e a dimensão do talude. As informações obtidas nas investigações geológicas-geotécnicas, foram responsáveis por subsidiar modelos em duas dimensões, da área de estudo, onde os materiais foram caracterizados e representados, assim como os níveis de água, encontrados através dos dados piezométricos foram inseridos e, por fim, as análises de estabilidade por equilíbrio-limite que indicaram fatores de segurança próximos a 1,0 na situação mais crítica. O foco principal foi aumentar a compreensão dos movimentos de rastejo, ainda pouco estudados na região, visando melhorar a previsibilidade, reduzir os impactos e propor metodologias eficazes de intervenção.

**Palavras-chave:** Rastejo; Caracterização Geológica-Geotécnica; Investigações Geológicas; Análise de estabilidade; Filito.



## Abstract

---

Since the late 17th century, the Ouro Preto region, located in the southeast of the Quadrilátero Ferrífero (MG), has been progressively occupied, including areas highly susceptible to mass movements. These mass movements have played a significant role in the daily life of the city, causing instability on slopes that directly affect infrastructure and the lives of residents. This study focuses on mass movements categorized as "creep," characterized by low speed and large magnitude. These movements are seasonal, influenced by rainfall, and triggered by specific geological and geotechnical conditions, as well as being affected by anthropogenic activities such as cuts and fills. Therefore, this work aimed to deepen the understanding of these movements in Ouro Preto, using a slope located in the São Cristóvão neighborhood as a model, where the municipal school Padre Carmélio is situated, which was closed due to the high degree of structural instability. This slope consists of phyllites from the Cercadinho Formation, Piracicaba Group, Minas Supergroup. To achieve this objective, tools for geological, structural, geotechnical, and hydrological characterization were used, through geological investigations, including the interpretation of multitemporal images and aerial photos, auger and SPT percussion drilling, indirect geophysical methods (electrical resistivity), and instrumentation (piezometers and topographic markers). Important factors were used for data interpretation and analysis, including the average slope inclination, the thickness and shear strength of the soil and weathered rock, the influence of subsurface water, and the slope dimensions. The information obtained from geological-geotechnical investigations supported the development of two-dimensional models of the study area, where materials were characterized and represented, as well as water levels identified through piezometric data, and finally, stability analyses using limit equilibrium methods, which indicated safety factors close to 1.0 in the most critical situation. The main focus was to increase the understanding of creep movements, still little studied in the region, aiming to improve predictability, reduce impacts, and propose effective intervention methodologies.

**Keywords:** Creep; Geological-Geotechnical Characterization; Geological Investigations; Stability Analysis; Phyllite.



# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

---

### 1.1 APRESENTAÇÃO

A região de Ouro Preto, sudeste do Quadrilátero Ferrífero (MG), é uma área de grande importância histórica e cultural, mas também é uma região de alta suscetibilidade a movimentos de massa. Esses movimentos têm causado danos significativos à infraestrutura e à população local, e representam um risco constante para a segurança da região. Na área de estudo, além dos condicionantes geológicos e geomorfológicos, determinantes, é notório também o agravante antrópico, o qual sofreu ampla influência de atividades minerárias e de ocupação territorial desenfreada (Sobreira & Fonseca, 2001).

A expansão das manchas urbanas geralmente proporciona os mais diversos potencializadores de problemas relacionados a movimentos de massa e estabilidade de encostas. Tais intervenções humanas são responsáveis por alterar o regime de tensões e de estabilidade locais de maneira abrupta, promovendo alterações na paisagem em elevada velocidade, quando comparada com as alterações por meios naturais. Sendo assim, por exemplo, ao se realizar um corte de um talude as tensões tendem a se reequilibrarem podendo favorecer rupturas, desencadeando movimentos.

Os movimentos de massa podem ser classificados em diversos tipos, de acordo com suas características. Neste trabalho, o foco será nos movimentos de rastejo, que segundo Augusto Filho (1992), são caracterizados por velocidades muito baixas, na ordem de centímetros ao ano e decrescentes com a profundidade. Esses movimentos estão associados principalmente a materiais argilosos, que têm baixa resistência ao cisalhamento. Diversos fatores influenciam esses movimentos, incluindo a declividade do terreno, responsável por elevar a susceptibilidade a movimentos de massa.

De acordo com Augusto Filho (1992), as características do material também desempenham um papel significativo no desenvolvimento de rastejos, como é o caso de solos de alteração, solos *in situ* e corpos de talus. Brasil (2007) também os descreve como sendo movimentos lentos, mas que envolvem grandes massas de materiais, atuando sobre os horizontes superficiais do solo, horizontes de transição solo/ rocha e em alguns casos até mesmo em rochas, em maiores profundidades. Presença de água é outro fator crucial, pois ela pode reduzir a resistência ao cisalhamento do material, facilitando o movimento de rastejo. Atividades humanas, como

cortes e aterros, também podem modificar a estabilidade dos taludes, aumentando ainda mais o risco desses movimentos.

Segundo Cruden & Varnes (1996), eventos climáticos, como chuvas intensas, frequentemente desencadeiam movimentos de rastejo. A infiltração de água no solo ou na rocha aumenta a pressão intersticial e reduz a resistência ao cisalhamento do material, iniciando o movimento, que se propaga gradualmente ao longo do tempo. Esses movimentos representam ameaças significativas para estruturas, infraestruturas e a segurança pública, destacando a importância de compreender os fatores que os condicionam para desenvolver estratégias eficazes de prevenção e mitigação de riscos associados a eles.

## **1.2 OBJETIVO**

O objetivo deste trabalho foi aprofundar o entendimento dos movimentos de rastejo na região de Ouro Preto, tendo como modelo um talude localizado no bairro São Cristóvão. Este talude apresenta relativo grau de instabilidade estrutural, e foi indicado pela Defesa Civil Municipal, como alvo interessante para investigações.

Para atingir esse objetivo, foram utilizadas ferramentas de caracterização geológica, estrutural, geotécnica e hidrológica. As investigações geológicas incluíram a interpretação de imagens e fotos aéreas multitemporais, sondagens a trado e a percussão, métodos indiretos geofísicos (eletrorresistividade) e instrumentação (piezômetros e marcos topográficos).

O entendimento atual sobre os movimentos de rastejo no município não são tão difundidos e abordados, uma vez que a maioria dos movimentos estudados, localmente, estão relacionados com escorregamentos planares e/ou em cunha. Ao final deste estudo tem-se como objetivo elucidar os principais deflagradores e subsidiar o entendimento e novos estudos relativos aos rastejos, levando-se em conta os objetivos subsequentes:

- Caracterização Geológica-Geotécnica;
- Determinação dos mecanismos condicionantes, deflagradores e catalisadores destes movimentos de massa;
- Determinação do Fator de Segurança para o talude;
- Melhorar a previsibilidade, reduzir os impactos e propor metodologias eficazes de intervenção.

### **1.3 JUSTIFICATIVA**

O estudo e compreensão dos movimentos de rastejo são de suma importância devido à sua natureza potencialmente destrutiva e aos riscos associados a esses movimentos. A justificativa para a realização deste trabalho se baseia na necessidade premente de desenvolver estratégias eficazes de prevenção e mitigação desses movimentos, que apresentam baixa velocidade, mas grande magnitude, podendo atingir dezenas de metros de espessura ao longo do tempo.

A base para essa pesquisa é a constatação de que os movimentos de rastejo estão intrinsecamente ligados a fatores geomorfológicos e geotécnicos, como a declividade do terreno e as características geotécnicas do material envolvido. A influência direta de eventos climáticos, como chuvas intensas e acumuladas destaca-se como um desencadeador comum desses movimentos. Bigarella (2007) ressalta que precipitações intensas sobre um solo saturado, pode ocasionar casos mais frequentes de movimentos de massa, evidenciando a correlação com o acumulado de chuvas ao longo dos dias.

O conhecimento dos condicionantes desses movimentos permite uma abordagem mais proativa na identificação de áreas de risco, na implementação de medidas preventivas e na elaboração de estratégias de gestão de desastres.

Por fim, a justificativa para este trabalho reside na necessidade de proteger a segurança pública, infraestruturas e comunidades contra os danos significativos que os movimentos de rastejo podem causar. Destaca-se também o aumento do conhecimento sobre tais eventos, presentes no município, entretanto ainda com poucas abordagens bibliográficas. Ao compreender os fatores desencadeadores e influenciadores desses fenômenos, será possível dimensionar medidas preventivas eficientes, reduzindo os impactos negativos associados e promovendo a resiliência em face desses eventos naturais.

### **1.4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Visando determinar a melhor região para estudo, foi utilizado o conhecimento prévio da Defesa Civil Municipal relativo a áreas de risco com ocorrência do movimento de massa objeto de estudo, juntamente com uma visita de campo com suas equipes. Ao final, selecionou-se o talude localizado nas proximidades da rua Padre Rolim, número 1565.

Sendo assim, os estudos foram guiados através de uma organização prévia das atividades a serem desempenhadas, sendo elas: revisão bibliográfica preliminar, acerca dos principais temas envolvidos no estudo, juntamente com um inventário dos materiais; investigações geológicas-geotécnicas de campo, através de duas campanhas de sondagem distintas, a primeira utilizando trado helicoidal, e a segunda sondagem percussiva, ambas aliadas com instrumentação geotécnica nos furos realizados; ensaios de laboratório e classificação dos materiais coletados; levantamentos geofísicos de eletrorresistividade, ao longo da área de estudo; análise temporal de imagens de satélite e ortofotos; análise global dos resultados e interpretação dos dados tratados. Por fim, também foi estabelecida uma dinâmica de monitoramento dos instrumentos instalados.

Na primeira etapa de trabalho foram revisadas as principais referências bibliográficas relativas aos temas de movimentos de massa do tipo rastejo na região, de maneira geral e demais temas correlatos, com o objetivo de direcionar as investigações e elucidar possíveis interpretações, tendo em vista a necessidade de estabelecimento de um estudo relativamente inédito na região, por se tratar principalmente de movimentos de massa em material inconsolidado.

Em sequência, os dados de estudo foram efetivamente coletados, tratados e iniciados, através do tratamento dos dados topográficos disponibilizados, análise temporal das imagens disponíveis da região de estudo, por meio de ortofotos e imagens de satélite do *Google Earth Pro*, além da identificação da geologia local e regional na área de estudo, em publicações e tratamento em ambiente *GIS* (Sistema de Informação Geográfica) de bases cartográficas.

Na terceira fase, foi realizado um mapeamento geológico para simples reconhecimento da área, permitindo o reconhecimento inicial de campo das litologias aflorantes, solos, drenagens, possíveis registros de movimentação no terreno, dentre outras informações preliminares.

A fase subsequente foi realizada em trabalhos de campo, com dois levantamentos de eletrorresistividade ao longo da seção tipo estabelecida, com o objetivo de se obter indicativos de nível d'água e/ou material úmido. Com estes levantamentos foi possível definir de maneira mais assertiva a locação das sondagens a serem desenvolvidas posteriormente.

Completando a fase de campo, supracitada, foram desenvolvidas duas campanhas de sondagem, sendo a primeira com trado helicoidal e a segunda a percussão, por meio de tripé. Ambas as campanhas forneceram amostras deformadas para posterior classificação e ensaios em laboratório, além de ensaios de campo realizados na segunda campanha, com SPT, a cada

metro, nos furos realizados. Além disso, as campanhas de investigação geológica-geotécnica também subsidiaram a instalação de instrumentos ao longo da área de estudo, contando com piezômetros e marcos superficiais para monitoramento.

As amostras deformadas coletadas, além de descritas em campo, de acordo com suas características litológicas, texturais, granulométricas e de proveniência, foram destinadas a escritório e posteriormente para laboratório, de maneira a serem classificadas e ensaiadas. Foram realizados assim caracterização granulométrica, limites de plasticidade, peso específico, teor de umidade e porosidade.

Vale ressaltar as normas utilizadas para desenvolvimento do projeto, sendo elas: NBR9603:2015, referente à realização das sondagens a trado; NBR6484:2001, referente a sondagens de simples reconhecimento com SPT; NBR 7181:1984, referente à análise granulométrica de solos; NBR 7180:2016, referente aos limites de plasticidade e NBR 6459:2017, referente aos limites de liquidez.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

Neste capítulo serão abordados temas e premissas relevantes para o desenvolvimento do projeto, de maneira a fornecerem embasamento teórico nas discussões, além de introduzir temáticas técnicas imprescindíveis para que se alcance os objetivos propostos.

#### 2.1 HISTÓRICO DE OCUPAÇÃO DO MUNICÍPIO DE OURO PRETO

De acordo com Sobreira & Fonseca (2001), o início da ocupação de onde hoje se localiza o município de Ouro Preto ocorreu a partir dos primórdios do século XVII e foi intensificada ao desenvolver dos séculos XVII e XVIII, guiada com o descobrimento e extração de ouro na região. A chegada dos primeiros moradores na localidade se deu por aventureiros, grupos organizados e representantes da corte portuguesa no Brasil. Inicialmente, segundo os autores, a ocupação se desenvolveu ao longo das margens dos rios, onde extraía-se o ouro de aluvião e posteriormente, das encostas, aliada com o desenvolvimento das minerações em galerias. A dinâmica de uso e ocupação do solo era intensamente guiada através da exaustão de depósitos e conseqüente migração dos assentamentos.

Pinheiro *et. al.* (2003) relatam que nesta segunda fase de evolução, quando as encostas foram massivamente ocupadas, ocorreram desmatamentos generalizados, além de desmontes hidráulicos. O material, proveniente da exploração eram remobilizados e dispostos em outros locais. Além disso, diversas galerias subterrâneas foram desenvolvidas, guiadas pelos veios mineralizados, com a utilização de explosivos.

Nas décadas de 1720 e 1730 a região era consolidada nos aspectos culturais e políticos e se desenvolveu uma fase de grande intensificação da urbanização. De acordo com Santana (2012), a maioria das pontes e chafarizes da localidade datam desta época. Posteriormente, já no início do século XIX, Vila Rica foi elevada à capital da província de Minas Gerais e sede da comarca de Ouro Preto, seguida pela denominação de cidade, em 1825. A partir daí diversas instituições educacionais foram fundadas na região como é o caso da Escola de Farmácia e Bioquímica

(1839) e a Escola de Minas (1876). Desta forma, como abordado por Salgado (2010), entre os anos de 1878 e 1890 a população teve um acréscimo de 40%.

Entretanto, ao final do século XIX Ouro Preto experimentou uma queda em sua economia, perda de influência política e diminuição da população, impactada pela migração da capital de Minas Gerais para Belo Horizonte. Um considerável esvaziamento da população, principalmente nas áreas de periferia foi observado, no entanto, como salienta Sobreira *et. al.* (2014), o conjunto de elementos da atividade extrativa de minérios foi mantido, mas não contou com nenhuma ação de proteção, assim como prédios históricos e instalações urbanas.

Costa (2011) identifica através de suas análises que a na década de 1970 as principais atividades responsáveis por guiar a ocupação no município se deviam as atividades educacionais e turísticas, além da atividade industrial, que tinha papel importante nos costumes e infraestrutura da localidade.

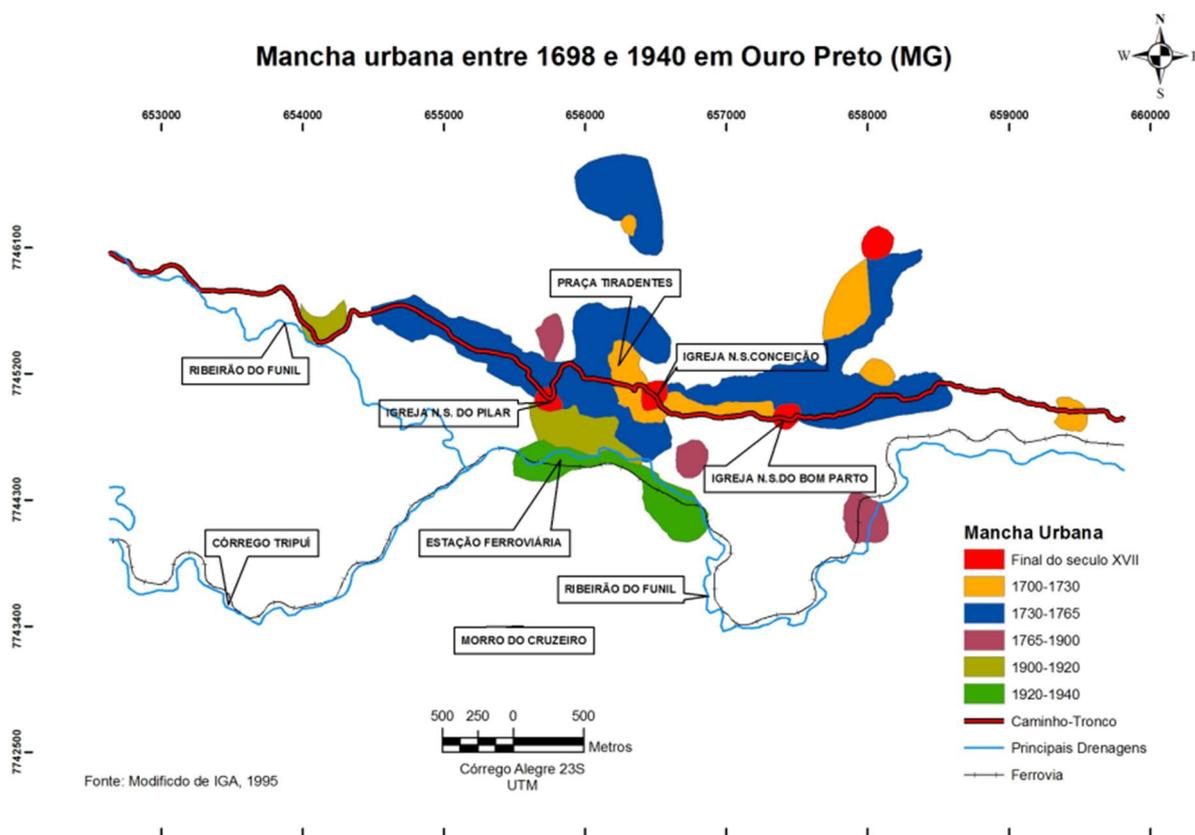
Sobreira *et. al.* (2014) defendem que, seguindo a tendência nacional, Ouro Preto apresentou uma expansão desordenada do tecido urbano ao final do século XX e desenvolver do século XXI. Tal evento foi precedido pelo crescimento da indústria metalúrgica, atividade turística e instituições educacionais. Oliveira (2010) ressalta um acréscimo de 21% no crescimento da área urbana entre os anos de 1986 e 2004. Em adição, Fontes (2011) relata a ocupação de áreas com características morfológicas e geotécnicas desfavoráveis, como é o caso de encostas íngremes e áreas de antiga exploração mineral.

Por fim, aliada à expansão urbana e o aumento populacional supracitado, observa-se um núcleo urbano cada vez mais adensado. Sobreira & Fonseca (2001) descrevem a ocupação de terrenos com fortes declives, zonas de passagem de águas pluviais e locais de estabilidade duvidosa como os principais problemas relacionados ao meio físico. Além disso, os autores ainda descrevem mais três fatores associados ao uso e ocupação do solo, sendo o segundo a utilização predatória do meio físico, como por exemplo a implantação de cortes e taludes ousados, a disposição aleatória e sem controle de material mobilizado, a interrupção de drenagens e a progressiva remoção da vegetação. O terceiro fator defendido, se baseia aos processos ativos relacionados a geodinâmica superficial, como é o caso de processos erosivos acelerados, podendo ser naturais ou acelerados pela ação humana. Por fim, outro fator de grande relevância está associado ao padrão construtivo das casas e falta de aderência aos critérios técnicos mínimos para construção delas, que se encontram susceptíveis a riscos geológicos e, portanto,

com elevado grau de vulnerabilidade. Tal situação é potencializada pela economia irresponsável de obras e materiais, desconhecimento técnico, vulnerabilidade financeira e ausência do poder público.

Oliveira (2010) resume e ilustra a evolução das manchas urbanas no município de Ouro Preto de acordo com IGA (1995), no período de 1698 a 1940 (Figura 2.1).

Figura 1 – Ocupação urbana em Ouro Preto (MG) entre 1698 e 1940, adaptado de IGA (1995b).



Fonte: Oliveira (2010)

## 2.2 MOVIMENTOS DE MASSA

O tema abordado nesse capítulo, denominado movimentos de massa, é amplamente difundido e discutido no âmbito acadêmico, entre os mais diversos autores. Desta forma, será abordado no presente estudo de maneira a tentar sintetizar os principais conceitos, com o objetivo de fundamentar os estudos posteriores. Cruden (1991) propõe a correção literal do termo

“*landslide*” (escorregamento de terra), muito usado em inglês, por movimentos de massa, abrangendo movimentos mistos e de rochas.

Tendo em vista a complexidade e ampla abordagem do tema, diversos autores também sugerem, além de uma definição, classificações diversas acerca do tema, sendo que uma das mais aceitas e utilizadas se trata da proposta por Varnes (1978), sintetizada na Figura 2. Nesta proposta, parte-se do ponto que um movimento de massa se trata de um deslocamento de um determinado volume de material, seja ele, solo, rocha ou detritos. Varnes (1978) subdivide os movimentos entre queda, tombamento, escorregamento, expansão lateral, escoamento e complexo.

Figura 2 – Classificação de Varnes (1978) sintetizada.

TIPO DE MOVIMENTO			TIPO DE MATERIAL		
			Rocha	Solo (engenharia)	
				Grosseiro	Fino
Quedas			De rocha	De detritos	De terra
Tombamentos			De rocha	De detritos	De terra
Escorregamento	Rotacional	Poucas unidades	Abatimento de rocha	Abatimento de detritos	Abatimento de terra
	Translacional	Muitas unidades	De blocos rochosos	De blocos de detritos	De blocos de terra
Expansões laterais			De rocha	De detritos	De terra
Corridas/escoamentos			De rocha (rastejo profundo)	De detritos	De terra
(Rastejo de solo)					
Complexos: combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos					

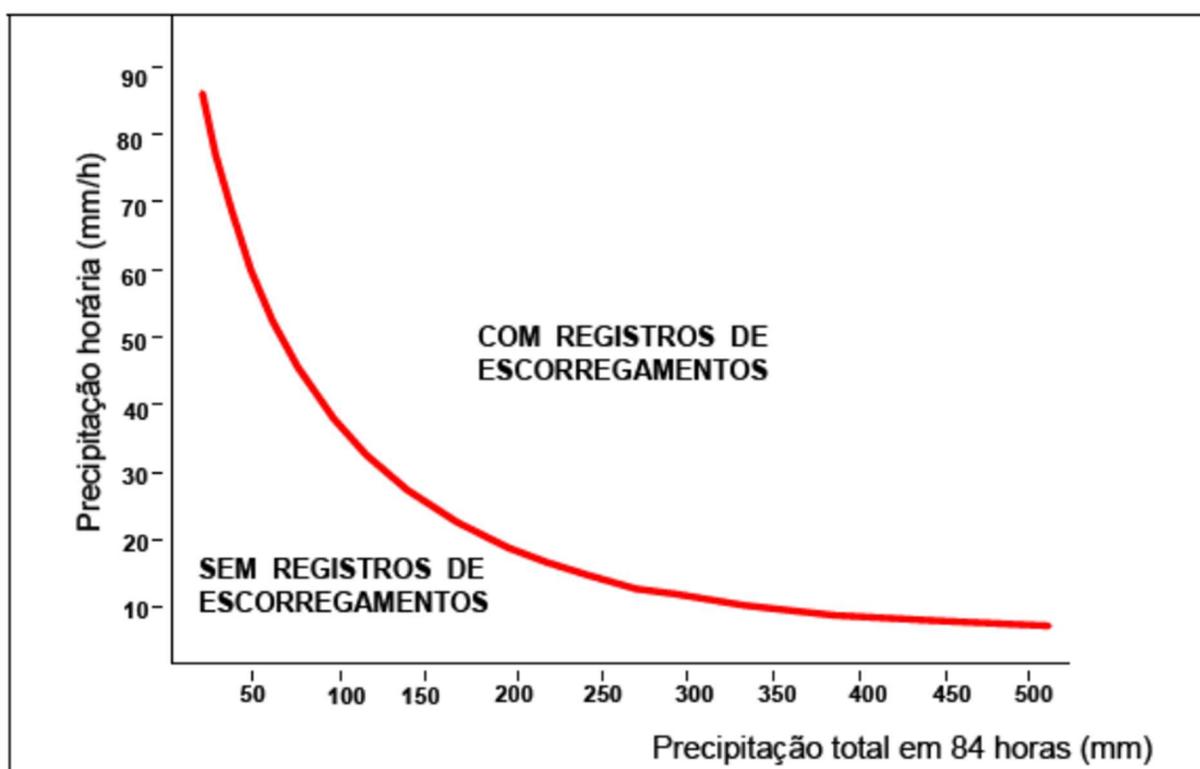
Fonte: Gerscovich (2016).

Augusto Filho (1992), baseado nas conclusões de Varnes (1978), interpretou e propôs ajustes a sua proposta, baseada na adaptação dos condicionantes para as características da dinâmica ambiental brasileira. Desta forma, destaca-se um agrupamento entre os principais grupos de movimentos de massa, sendo eles, rastejos (*creeps*), escorregamento (*slides*) e fluxos (*flows*).

## 2.2.1 CONDICIONANTES CLIMÁTICOS

De acordo com Augusto Filho & Virgili (1998), as características climáticas são um dos principais fatores condicionantes para os movimentos de massa, na dinâmica ambiental, principalmente o regime pluviométrico. Outro fator determinante está relacionado com a influência da quantidade e a distribuição temporal da precipitação (Figura 3). Tatizana (1987) e Delmonaco et al. (1995) defendem que as ações das precipitações nas encostas envolvem diversos fatores, entre eles, a alteração dos parâmetros de resistência dos materiais, como a diminuição da coesão aparente, a eliminação das tensões capilares (poropressões negativas) e a dissolução da cimentação; também ocorre aumento da sollicitação externa, por meio do aumento do peso específico dos materiais que compõem o maciço; avanço da frente de saturação, favorecendo o desenvolvimento de poropressões positivas, subpressões nas descontinuidades e percolação e por fim erosão nas encostas.

Figura 3 - Gráfico da correlação entre chuva e deslizamento elaborado para o município de Cubatão-SP.



Fonte: Tatizana *et al.* (1987).

Lacerda (1997) aborda que um número considerável de movimentos de massa ocorre durante as estações chuvosas, associados a chuvas intensas, precedidas ou não de precipitações antecedentes, sendo que a movimentação pode ocorrer dias após o evento chuvoso. No entanto, a propensão se mostra em mais elevado grau, ao final dos períodos, quando o solo já saturado passa por um novo estresse hídrico. Fato esse que leva a sugerir uma hipótese que os movimentos de massa apresentam efetiva correlação com os impactos gerados por meio da percolação no maciço, além de influência do dinamismo do lençol freático.

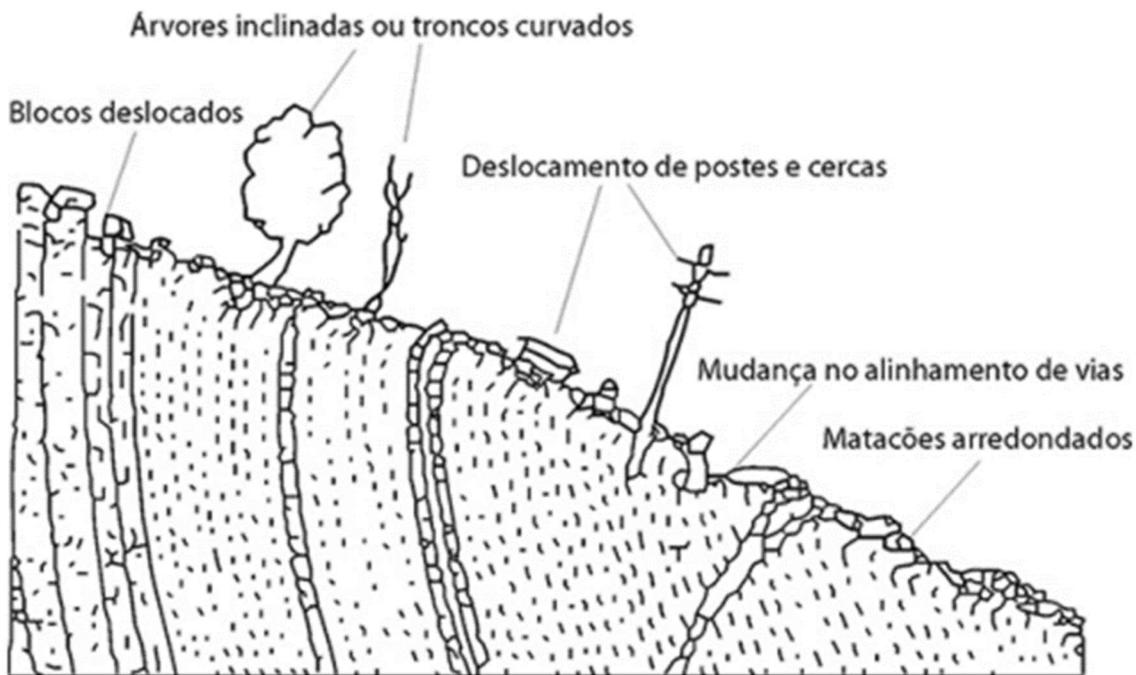
### **2.2.2 RASTEJOS**

Objeto de análise do presente trabalho, os rastejos ou fluência, foram definidos por Augusto Filho (1992) como movimentos constantes, sazonais ou intermitentes que ocorrem em solos, depósitos, rochas alteradas e sua geometria é indefinida. Outra característica é a presença de vários planos de deslocamentos internos com velocidades muito baixas, na ordem de centímetros ao ano e decrescentes com a profundidade.

Nessa classe de movimentos, a superfície de deslocamento pode ser definida ou não, devido à complexidade do material. O rastejo pode ser diferenciado do movimento denominado corrida pela sua velocidade de fluidez, ou seja, se trata de um movimento lento, enquanto a corrida é rápida, além da superfície de ruptura, que no caso da corrida é definida. Um fator preponderante associado a ocorrência de tais movimentos é o clima, para Tominaga (2012), aliada à gravidade, às variações de temperatura e umidade, fatores que em confluência corroboram para aumentar a propensão dos movimentos. A justificativa para tais deflagrações, de acordo com a autora se deve ao processo de expansão e contração da massa de material, devido à variação térmica, provocando o movimento, vertente abaixo.

Brasil (2007) ressalta que esse tipo de movimento de massa não necessariamente apresenta apenas uma superfície de ruptura, portanto as evidências observadas em campo são baseadas em outras feições, como as descritas por Highland e Bobrowsky (2008), como: árvores inclinadas, cercas fora de alinhamento, trincas ao longo do terreno, degraus de abatimento, deslocamento de vias, postes e demais obras de infraestrutura. (Figura 4).

Figura 4 – Figura esquemática de uma região de rastejo, com indícios superficiais.



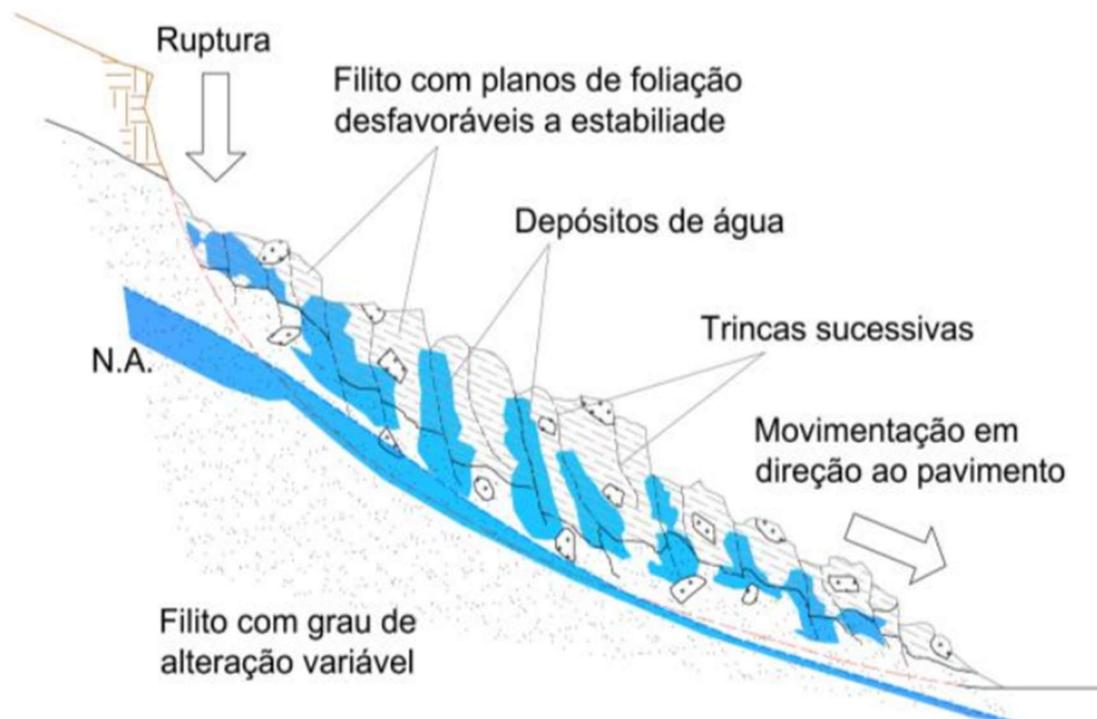
Fonte: Sharpe (1938, *apud* Guidicini e Nieble, 1983).

Varnes (1978) propõe a divisão dos mecanismos deflagradores de uma ruptura em dois grupos, sendo eles, o aumento da sollicitação e a redução da resistência ao cisalhamento. O primeiro deles está atrelado a quatro fatores: remoção de massa, seja ela lateral ou da base; sobrecarga, por construções, peso da água, etc.; sollicitações dinâmicas, como terremotos ou explosões e pressões laterais, como presença de material expansivo ou dilatação térmica da água em fissuras. Em sequência, os fatores relacionados com a redução da resistência ao cisalhamento são dois: o primeiro, as características prévias do material, como é o caso da geometria, foliações reliquiares, descontinuidades etc.; e mudanças ou sazonalidade, como por exemplo intemperismo, deformações, variação de poropressão, elevação do lençol freático, dentre outras.

Silva et al (2018) evidenciam através de um estudo de caso os fatores condicionantes para rastejo em materiais similares ao encontrado na área do presente trabalho, ou seja, de filitos com foliação subparalela ao caimento do talude. O autor salienta a presença de trincas remontantes no maciço (Figura 5), que durante o período chuvoso são responsáveis por garantir a infiltração de água no maciço. Tal dinâmica de infiltração é responsável por reduzir a

resistência ao cisalhamento do filito alterado, além de mobilizar as pressões de água nas trincas. Outro fator agravante faz referência a elevação do lençol freático, responsável por agravar a condição de equilíbrio, quando ele atinge a superfície de ruptura.

Figura 5 – Figura esquemática do mecanismo de deslizamento, em taludes em filito, agravado por trincas remontantes.



Fonte: Movimentação de Rastejo e Proposta de Estabilização de um Depósito de Solo Residual de Filito, (Silva et al, 2018).

A presença de material com elevada susceptibilidade a alteração, como é o caso dos filitos, possibilita a saturação de bolsões que, portanto, intensificam ainda mais a alteração do material. Sendo assim, a água presente no maciço corrobora com a movimentação das massas, uma vez que por meio de uma frente de saturação poropressões aparecem, além da eliminação da sucção no maciço.

A água intersticial é um agravante muito significativo para que ocorram movimentos de massa. Basicamente sua presença atua no maciço aumentando o peso específico, uma vez que água infiltrada é retida no maciço, desenvolvendo poropressões, que podem ser cíclicas, e, portanto, um dos principais mecanismos de instabilidade em solos saprolíticos (Lacerda, 2007). Tais

poropressões reduzem as tensões efetivas, eliminando a coesão aparente em solos que não estejam saturados além de uma força de percolação na direção de fluxo, favorecendo o cisalhamento.

Lacerda (1989) observou que diversos movimentos de massa podem ser deflagrados durante eventos chuvosos de menor intensidade do que eventos anteriores, e definiu que tal fato ocorre devido a sucessivos eventos de fadiga, devido a variação cíclica da pressão dos poros. Os ciclos descritos induzem deformações de cisalhamento que se acumulam, auxiliando na quebra das ligações ou intertravamentos, responsáveis pela coesão efetiva. Desta forma a envoltória de resistência de Mohr é diminuída, rompendo, portanto, com uma menor poropressão do que a prevista. Em resumo o solo pode falhar sob um estado de tensões efetivas abaixo dos determinados por testes de resistência ao cisalhamento realizados em solos intactos. Lacerda (2007) defende também que os solos saturados de colúvio são comuns em áreas tropicais, sendo que seu comportamento frágil é limitado a tensões confinantes inferiores a 50 kPa e apresentam uma relação de tensão e deformação de rigidez por deformação, favorecendo o deslizamento. Ehrlich *et. al.* (2018) identificaram a ocorrência de rastejo em massas coluviais. Para o autor tais massas apresentam estabilidade cominuída, muito susceptíveis a deflagrações, tendo como gatilhos, por exemplo, uma escavação na base do maciço (Lacerda e Sandroni, 1985). Ehrlich *et. al.*, (2018) correlacionam a movimentação das massas com a sazonalidade do nível freático.

Ehrlich *et al.*, (2018) consideram o fator de segurança das encostas naturais sendo geralmente baixos, atrelados a evolução geomorfológica e ao estado de tensões efetivas, que buscam o equilíbrio, mediante a alterações na conformidade, seja natural, através de erosões, ou antrópicos, como é o caso de escavações, por exemplo. Segundo os autores, o nível de água e os padrões de circulação hídrica nas massas coluviais, apesar de serem comumente simplificados como um fluxo paralelo à superfície, são amplamente complexos e heterogêneos, relativamente em pequena profundidade. Além disso, é possível observar também que a elevação do nível de água é responsável por reduzir as tensões efetivas.

De acordo com Lacerda (2004), os principais processos de ativação e reativação de movimentos em encostas coluviais podem ser subdivididos entre aqueles sob interferência humana, como a sobrecarga no topo ou a escavação no pé, e aqueles de causas naturais, sendo eles: elevação da superfície freática; diques impermeáveis que causam elevação da superfície freática com artesianismo sob colúvio; recarga do aquífero por fraturas permeáveis e zonas alteradas de rocha; aumento de peso localizado no meio da encosta devido ao acúmulo de colúvio; e carga

súbita por queda de blocos. Ehrlich *et al.* (2018) preconizam que normalmente a superfície de escorregamento encontra-se situada na fronteira entre o colúvio e o solo residual, ou em casos que não se desenvolve solo residual diretamente sobre a rocha. A partir das observações, de acordo com Guidicini e Nieble (1983), se torna possível diferenciar esse conjunto de condicionantes, sendo as características prévias no material como agentes predisponentes, a pluviosidade e o aumento no nível freático como agentes efetivos preparatórios e o período chuvoso como agente efetivo imediato.

## 2.3 CONCEITOS IMPORTANTES

Neste capítulo serão abordados conceitos fundamentais para análise científica deste projeto. Tais conceitos foram discutidos por diversos autores, subsidiando o conhecimento e contribuindo de maneira efetiva para o tema abordado.

### 2.3.1 FATOR DE SEGURANÇA

Terzaghi (1943) descreve o fator de segurança como sendo uma relação entre a resistência ao cisalhamento de solo e rocha e as tensões de cisalhamento atuantes. Portanto, para o autor, o fator de segurança se trata de uma medida de estabilidade do talude, onde o valor deve ser superior a 1 para garantir a estabilidade. Portanto, a instabilidade de taludes é ocasionada quando as tensões cisalhantes mobilizadas se igualam com a resistência ao cisalhamento. De maneira que o fator de segurança se iguala ao valor supracitado, como pode ser visto na equação 1.

$$\frac{\tau_f}{\tau_{mob}} = FS = 1$$

(equação 1)

Onde:

$\tau_f$  = Resistência ao cisalhamento

$\tau_{mob}$  = Tensões cisalhantes mobilizadas

$FS$  = Fator de segurança

Portanto, entende-se que uma ruptura pode ser condicionada pelo aumento das tensões cisalhantes ou pela redução da resistência ao cisalhamento. Possíveis causas que podem afetar estes dois fatores encontram-se listados nas Tabela 2.1 e Tabela 2.2.

Tabela 2.1 - Classificação de fenômenos que podem causar aumento da tensão cisalhante.

Ação	Fatores	Fenômenos Geológicos/ Antrópicos
Aumento da solicitação	Remoção da massa lateral ou da base	Erosão Escorregamentos Cortes
	Sobrecarga	Peso da água da chuva, acúmulo natural de material, peso da vegetação, construção de estruturas, aterros.
	Solicitações dinâmicas	Terremotos, ondas, vulcões etc Explosões, tráfego
	Pressões laterais	Água em trincas Congelamento Material expansivo

Fonte: Adaptada de Varnes (1978, *apud* Gerscovich, 2016).

Tabela 2.2 – Classificação dos fenômenos que podem causar redução da resistência ao cisalhamento.

Ação	Fatores	Fenômenos Geológicos/ Antrópicos
Redução da resistência ao cisalhamento	Característica do material, como geometria, estrutura etc	Características geomecânicas do material
	Mudanças ou fatores variáveis	Intemperismo: alterações físico-químicas Variação das poropressões Elevação do lençol freático Infiltração de água

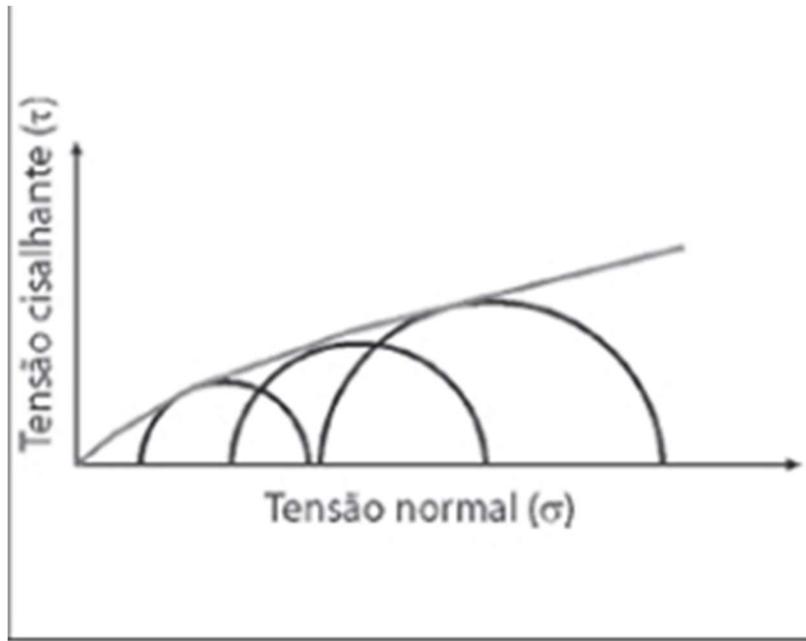
Fonte: Adaptada de Varnes (1978, *apud* Gerscovich, 2016)

### 2.3.2 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

O critério de tensão de Mohr-Coulomb preconiza que a resistência ao cisalhamento é definida pelo ângulo de atrito ( $\phi$ ) e coesão ( $c$ ). De acordo com Vargas (1977), a coesão descreve a resistência pela qual o solo se mantém coeso, em forma de torrões ou blocos, ou quando tomada uma nova conformidade a tendência de manter essa nova geometria estável.

O método mais utilizado em geotecnia para definição dos critérios de ruptura, para solos saturados é o critério de Mohr-Coulomb, que se utiliza da linearização da envoltória de Mohr (Figura 6), permitindo a definição da envoltória de resistência.

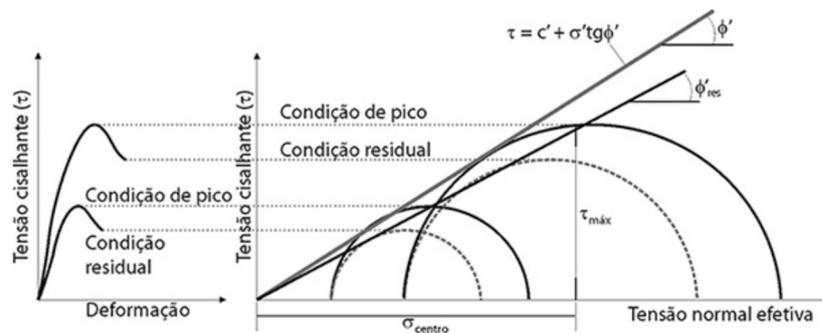
Figura 6 – Envoltória de ruptura de Mohr Coulomb



Fonte: Modificado de Gerscovich (2016).

De acordo com Gerscovich (2016), a partir de determinações experimentais a envoltória é determinada ajustando a melhor reta que envolvem as tensões de ruptura (Figura 7), por ensaios, como o de cisalhamento direto e ensaios triaxiais. Vale ressaltar, no entanto, que os valores de ângulo de atrito e coesão variam de acordo com: as condições de drenagem; a velocidade do ensaio, no caso de argilas; a direção do ensaio, no caso de solos anisotrópicos; a trajetória das tensões e a compacidade da amostra.

Figura 7 – Determinação da envoltória de ruptura, segundo o método de Mohr-Coulomb.



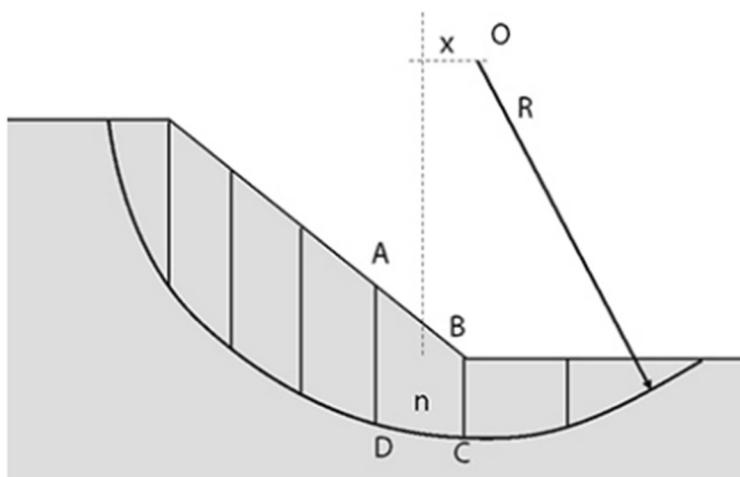
Fonte: Gerscovich (2016).

## 2.3.3 MÉTODO DO EQUÍLIBRIO LIMITE

### 2.3.3.1 Método Fellenius

Também denominado método das fatias, de acordo com Fiori (2015), e desenvolvido inicialmente por Fellenius (1936), faz referência a um método de análise estática do volume de material apoiado acima de uma superfície, com propensão a instabilidade e potencial escorregamento em seção circular, subdividido em fatias (Figura 8).

Figura 8 – Seção transversal ilustrado a divisão em fatias.



Fonte: Gerscovich (2016)

Entre os Métodos de Equilíbrio Limite, o método de Fellenius destaca-se por sua simplicidade, uma vez que utiliza uma equação linear para determinar o fator de segurança, dispensando processos iterativos. Este método assume que as forças de interação entre as fatias são paralelas à base. No entanto, essa simplificação não reflete a realidade, pois as forças resultantes, que segundo o método são paralelas à base, não podem ter a mesma inclinação em todas as fatias. À medida que se avança para a próxima fatia na análise, a inclinação dessas forças muda, contrariando o princípio de ação e reação de Newton (Fredlund, 1977).

Conforme apontado por Gerscovich (2016), o método de Fellenius possui várias características notáveis. É considerado um método conservativo, tendendo a fornecer valores baixos para o fator de segurança (FS). Em situações envolvendo círculos muito profundos e altos valores de

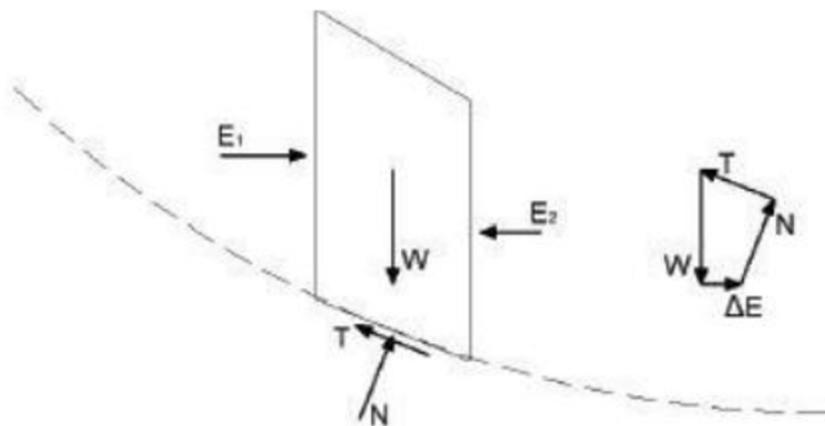
poropressão, os resultados obtidos pelo método podem ser questionáveis. Além disso, para as lamelas localizadas na região estabilizante, o valor de  $\alpha$  é negativo, o que gera uma parcela negativa relativa à tensão efetiva, sendo recomendado que este termo seja anulado.

### 2.3.3.2 Método Bishop

O método de Bishop, inicialmente desenvolvido para a análise de superfícies circulares, teve sua aplicação expandida ao longo do tempo para incluir superfícies não circulares. Este método desconsidera as forças de corte entre as fatias, calculando o fator de segurança com base apenas no equilíbrio de momentos. A ausência das forças de corte na equação do fator de segurança não implica que elas sejam nulas, mas sim que um dos termos dessa equação é zero. A reação normal na base é obtida pelo equilíbrio de forças na direção vertical (Zhu, 2008).

De acordo com Gerscovich (2016), o método de Bishop realiza o equilíbrio de forças em cada fatia nas direções vertical e horizontal, determinando assim a força normal. No que se refere às forças entre as lamelas, o método elimina as componentes tangenciais e desconsidera as componentes horizontais das forças entre as lamelas ao calcular o fator de segurança. A configuração das forças segundo o método de Bishop é mostrada na Figura 9, evidenciando que apenas o equilíbrio do somatório de momentos é satisfeito. Este método leva em conta as forças normais entre as fatias, mas ignora as forças de cisalhamento entre elas, e utiliza o equilíbrio de força vertical para determinar a força normal efetiva na base (Abramson *et al.*, 2002).

Figura 9 – Decomposição de forças na fatia, de acordo com o método de Bishop.



Segundo Fiori (2015), o método de Bishop (1955) aborda a estabilidade de um talude segmentando a cunha de escorregamento em várias fatias. Esta abordagem é uma modificação do método de Fellenius, incorporando as reações entre as fatias vizinhas.

A formulação matemática do método é baseada em três premissas, sendo elas: fator de segurança (FS) que é determinado com base no equilíbrio de momentos em relação ao centro da superfície de ruptura; as forças normais entre as fatias são consideradas, mas as forças de cisalhamento são ignoradas, simplificando os cálculos sem comprometer significativamente a precisão; a reação normal na base de cada fatia é calculada a partir do equilíbrio de forças verticais.

A equação do fator de segurança (equação 2) no método de Bishop é expressa como:

$$FS = \frac{\sum \left( \frac{c' l + (W \cos \alpha - ul) \tan \phi'}{W \sin \alpha} \right)}{1 + \frac{\tan \phi'}{FS} \sum \left( \frac{W \cos \alpha - ul}{W \sin \alpha} \right)} \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

- $c'$  é a coesão efetiva.
- $\phi'$  é o ângulo de atrito interno efetivo.
- $l$  é o comprimento da base da fatia.
- $W$  é o peso da fatia.
- $\alpha$  é o ângulo da base da fatia em relação à horizontal.
- $u$  é a pressão de poro na base da fatia.

### 2.3.3.3 Método de Janbu

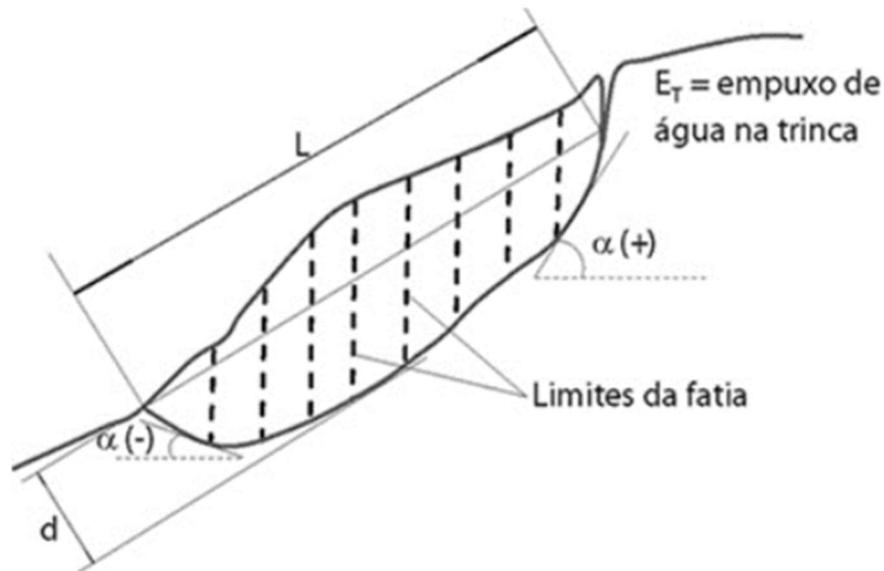
O método de Janbu (1973) é uma técnica eficaz na análise de estabilidade de taludes, especialmente quando as superfícies de escorregamento não são necessariamente circulares. Este método é útil para casos em que as formas geométricas das superfícies de ruptura são mais complexas.

O método de Janbu se distingue pelo fato de que o fator de segurança (FS) obtido é ajustado por um fator de correção  $f_0$  (equação 3). Esse fator de correção depende da geometria da superfície de escorregamento, bem como dos parâmetros de coesão ( $c$ ) e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ) do solo, além de considerar a influência das forças verticais entre as fatias.

$$FS_{\text{final}} = FS_{\text{horizontal}} \times f_0 \quad (\text{equação 3})$$

Segundo Gerscovich (2016), o método simplificado de Janbu foi desenvolvido com o objetivo de reduzir o esforço computacional exigido pelo método rigoroso. Isso possibilitou a obtenção do fator de segurança (FS) através de cálculos mais simples e rápidos (Figura 10). O método é especialmente aplicável para a análise de taludes homogêneos, mas pode não fornecer resultados de alta qualidade para superfícies de ruptura em formato de cunha.

Figura 10 – Geometria do método de Janbu simplificado.



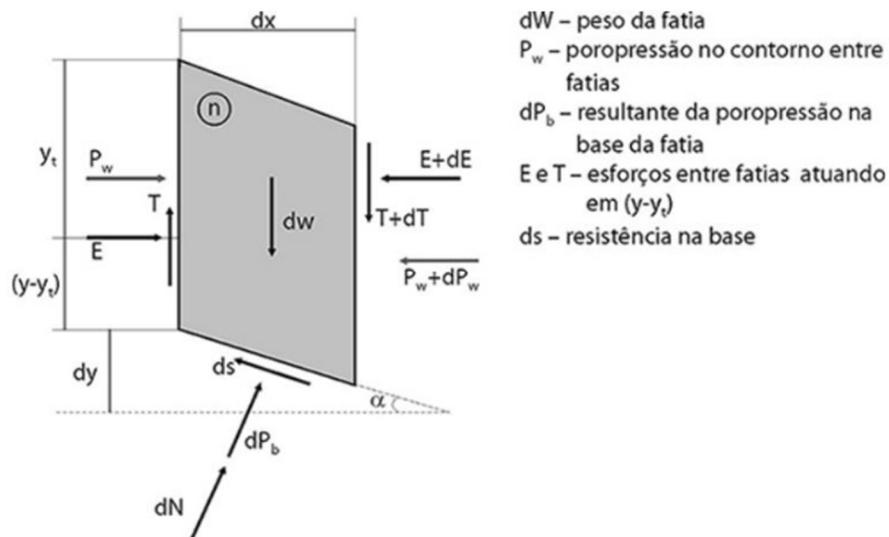
Fonte: Gerscovich (2016)

#### 2.3.3.4 Método de Morgenstern-Price (GLE)

O método de Morgenstern e Price, desenvolvido em 1965, é considerado o mais abrangente entre os métodos de equilíbrio limite para a análise de superfícies de ruptura arbitrárias. Este método é amplamente valorizado por sua capacidade de lidar com superfícies complexas e diversos tipos de terrenos, proporcionando uma análise detalhada e precisa da estabilidade de taludes.

Segundo Gerscovich (2016), o método de Morgenstern e Price se destaca por sua abordagem geral na análise de superfícies de escorregamento. A técnica envolve a consideração de esforços atuantes em fatias infinitesimais (Figura 11). Este método é caracterizado por sua natureza iterativa, exigindo a definição prévia da função de distribuição de forças entre as fatias.

Figura 11 – Forças atuantes nas fatias infinitesimais de acordo com o método de Morgenstern e Price.



Fonte: Gerscovich (2016)

O procedimento de cálculo do método de Morgenstern e Price é iterativo e envolve várias etapas cruciais: Definição da função de distribuição de forças, definida entre as fatias, de maneira a influenciar diretamente o cálculo dos esforços internos e a interação entre as fatias; Assunção de valores para o fator de segurança, assumindo valores iniciais para FS, que serão ajustados iterativamente ao longo do processo de cálculo; Cálculo dos empuxos horizontais, calculados para cada fatia, representando as forças atuantes na direção horizontal entre as fatias adjacentes; Cálculo dos momentos, que atuam em cada fatia, levando em consideração as forças internas e externas, incluindo o peso da fatia, a coesão do solo e a pressão de poro; Por fim, a iteração para ajuste do FS, onde o fator de segurança é ajustado iterativamente, recalculando-se os empuxos e momentos até que os valores converjam para um resultado preciso.

Gerscovich (2016) aborda que, ao contrário de outros métodos rigorosos que estipulam uma relação constante entre as forças interlamelares, Morgenstern e Price assumem que a inclinação da resultante ( $\theta$ ) varia, segundo uma função, ao longo da superfície de ruptura com o intuito de tornar o problema estaticamente determinado, conforme as equações 4 e 5.

$$\tau = \lambda f(x)E$$

ou

$$tg\theta = \frac{T}{E} = \lambda f(x)$$

Onde:

- $\lambda$  = é um parâmetro escalar obtido através da solução de cálculo do fator de segurança
- $f(x)$  = é uma função arbitrária. Sendo que para a escolha da função  $f(x)$  é necessário um julgamento prévio de como a inclinação das forças entre as lamelas varia no talude. Quando  $f(x) = 0$ , o resultado de FS se iguala ao do método de Bishop, e quando  $f(x) = \text{constante}$ , o resultado se iguala ao método de Spencer.

### 2.3.3.5 Método de Spencer

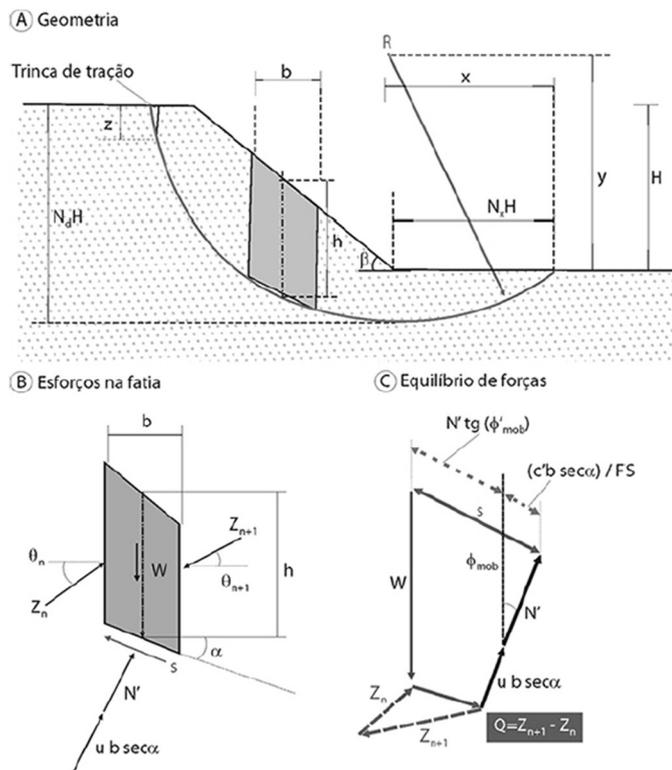
O método de Spencer (1967), é amplamente utilizado na análise de estabilidade de taludes devido à sua precisão e capacidade de fornecer uma solução rigorosa para problemas complexos (Figura 12). De acordo com Gerscovich (2016), este método de equilíbrio limite considera tanto o equilíbrio de forças horizontais e verticais quanto o equilíbrio de momentos em cada fatia de um talude, o que permite uma análise mais detalhada e precisa.

Segundo Gerscovich (2016), ele assume que as forças de interação entre fatias são horizontais, simplificando os cálculos e permitindo a consideração de superfícies de ruptura circulares e não circulares. A superfície de ruptura é predefinida, podendo ser ajustada para representar diferentes condições geotécnicas. Também considera a existência de trincas de tração e representa as forças interlamelares ( $X$  e  $E$ ) por suas resultantes ( $Z_n$  e  $Z_{n+1}$ ), cuja soma é a força  $Q$  inclinada em um ângulo  $\theta$ . A força  $Q$  inclui a parcela efetiva e a pressão da água na face da fatia. Assumindo uma inclinação constante para as forças interlamelares, pode-se estabelecer

que, para o equilíbrio, a resultante  $Q$  passa pelo ponto de intersecção das forças atuantes na fatia ( $W$ ,  $N$  e  $S$ ).

As equações de equilíbrio de forças paralelas e normais à base da fatia permitem calcular a magnitude de  $Q$ , que depende das características geométricas e parâmetros geotécnicos de cada fatia, além da inclinação das forças interlamelares ( $\theta$ ). Incorporando a razão de poropressão ( $ru$ ), a expressão para  $Q$  também inclui o FS. Similar ao método de Bishop, um processo iterativo é necessário para calcular o FS final. Para garantir o equilíbrio global, a soma das componentes horizontal e vertical das forças interlamelares deve ser nula (Gerscovich, 2016). Spencer resolveu o problema de desequilíbrio entre o número de equações e incógnitas adotando um valor constante de  $\theta$  para todas as fatias, resultando na igualdade das forças interlamelares.

Figura 12 – Método de Spencer.



Fonte: Gerscovich (2016)

O método é reconhecido por sua precisão ao satisfazer simultaneamente o equilíbrio de forças e momentos em cada fatia de um talude, assumindo forças de interação horizontais entre as fatias. Em contraste, o Método Generalizado de Equilíbrio de Limites (GLE), proposto por Fredlund e Krahn (1977), que oferece maior flexibilidade ao permitir um ajuste na ponderação entre o equilíbrio de forças e momentos através do parâmetro  $\lambda$ , possibilitando a adaptação a diferentes métodos de análise dentro de um único *framework*. Enquanto o método de Spencer é rigoroso em sua abordagem, garantindo resultados precisos, o GLE se destaca por sua capacidade de englobar múltiplos métodos de equilíbrio limite, incluindo o próprio método de Spencer, proporcionando uma ferramenta versátil e adaptável para a análise de estabilidade de taludes (Gerscovich, 2008).

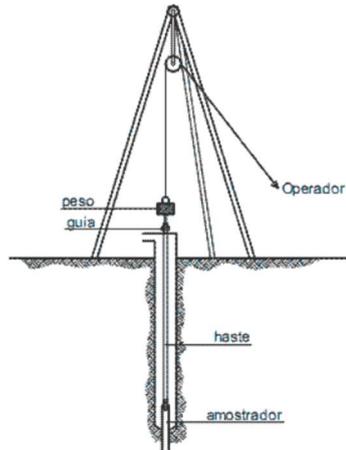
## **2.4 INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS E INSTRUMENTAÇÃO**

De acordo com Carvalho (1991), existem casos em que as informações disponíveis de um talude ou região podem não ser suficientes para o entendimento de um problema, sendo necessárias investigações complementares, como por exemplo sondagens, ensaios de campo e ensaios de laboratório.

A investigação em subsuperfície é representada por uma série de métodos diretos e indiretos que visam suprir de informações acerca de uma determinada área, de maneira a subsidiar estudos de análise de estabilidade. Métodos indiretos, como é o caso da geofísica, fornecem dados prévios que podem subsidiar a locação de métodos diretos na área a ser investigada, promovendo a identificação e caracterização dos materiais que compõem um talude, por exemplo.

A partir da utilização de métodos indiretos é possível determinar pontos alvos para realização de métodos diretos, como é o caso da sondagem a percussão, técnica amplamente empregada na geotecnia (Figura 13) e amparado pela norma brasileira NBR 6484:(2020). Envolve a utilização de uma composição de hastes e amostrador que é posicionada no solo e golpeada com um martelo de peso conhecido acoplada a um suporte (tripé), contando-se o número de golpes necessários para avanço, obtendo dados de ensaio  $N_{spt}$ . A partir da realização deste tipo de sondagem é possível correlacionar dados de resistência a penetração do martelo assim como a obtenção de amostras diretas em um perfil vertical.

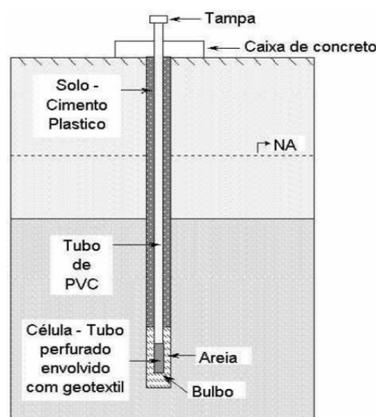
Figura 13 – Desenho esquemático de tripé utilizado na sondagem SPT.



Fonte: Adaptado de Godoy (1971) por HG (2011)

A partir da realização de sondagens, se torna possível a utilização dos furos criados para a instalação de instrumentos de monitoramento, que permitem avaliar ao longo do tempo as condições para que foram destinados. Dentre os diversos piezômetros existentes, destaca-se o desenvolvido por Arthur Casagrande, o piezômetro de Casagrande (Figura 14), que é um instrumento utilizado na geotecnia para medir a pressão de poros (poropressão) da água. O piezômetro consiste em um tubo, com a extremidade inferior ranhurada (filtro), envolto em pré-filtro de material granular e isolado acima por material impermeável, que pode ser de argila bentonítica ou solo-cimento.

Figura 14 – Piezômetro de Casagrande.



Fonte: Fonseca (2003)

## 2.5 ELETORRESISTIVIDADE

Segundo Kearey *et al.* (2009), a Geofísica investiga os variados sistemas da superfície terrestre por meio das propriedades e respostas físicas das rochas. As análises geofísicas utilizam-se muitas vezes da variação de propriedades físicas dos materiais, identificando contrastes e se baseando em anomalias em relação a valores de fundo para correlacionar com as propriedades a serem estudadas.

No caso da Eletorresistividade a propriedade física analisada se baseia no conceito da condutividade eletrônica ou eletrolítica, sendo que devido a facilitadores matemáticos a propriedade utilizada é a resistividade, ou seja, o inverso da condutividade.

A diferença entre os dois conceitos supracitados se baseia no fato de que, segundo Braga (2006), no caso da eletrônica a condutividade está ligada ao transporte de elétrons na matriz rochosa, característica presente em metais e semicondutores. No entanto, no caso da eletrolítica a condutividade se deve ao transporte através de íons presentes na água, que podem estar dispostos nos poros, fraturas ou matriz dos substratos.

O fundamento da eletorresistividade é baseado na lei de Ohm (Equação 2) onde a diferença de potencial elétrico ( $V$ , em volts) é dada por um fator de resistência do meio ( $R$ , em Ohm –  $\Omega$ ) pela intensidade da corrente elétrica ( $I$ , em Ampere).

(Equação 2)

$$V = RI$$

Fisicamente a resistividade do meio se dá por uma constante de proporcionalidade (Equação 3), que em resumo está associada à dificuldade da corrente elétrica em atravessar este meio cilíndrico de comprimento  $L$  e área de seção transversal  $S$ .

(Equação 3)

$$R = \rho \frac{L}{S} (\Omega)$$

No entanto, no contexto das investigações geofísicas, especificamente no método de eletorresistividade, não é a resistividade do material que é diretamente medida em campo, mas sim a resistividade aparente ( $\rho_a$ ). De acordo com Reynolds (2011), a resistividade aparente é um valor integrado que reflete a resistividade média de todas as camadas geológicas que a

corrente elétrica atravessa, e é influenciada pela configuração do arranjo de eletrodos e pelas propriedades heterogêneas do subsolo. A resistividade aparente (Equação 4) é adaptada conforme a configuração específica dos eletrodos:

(Equação 4)

$$\rho_a = K \cdot \frac{V}{I}$$

Onde:

- $\rho_a$  = é a resistividade aparente (em ohms. metro,  $\Omega.m$ )
- $K$  = é o fator geométrico, que depende da disposição e espaçamento dos eletrodos (m).
- $V$  = é a diferença de potencial medida entre os eletrodos (volts, V),
- $I$  = é a corrente elétrica injetada (ampères, A)

Segundo Loke (2004), o fator geométrico  $K$  é calculado com base nas distâncias entre os eletrodos de corrente e de potencial, e é específico para cada arranjo de eletrodos. Desta forma, se ajusta a resistência medida para refletir a geometria do campo elétrico no subsolo, permitindo que a resistividade aparente seja utilizada como uma estimativa da resistividade real das camadas geológicas investigadas.

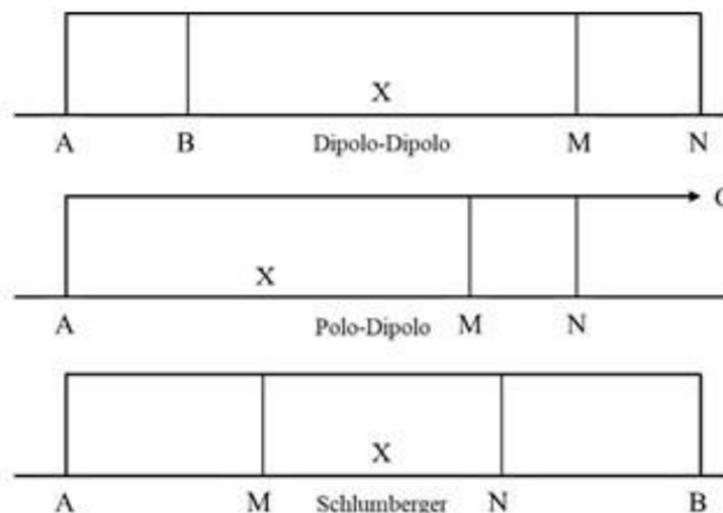
Assim, a resistividade aparente é essencialmente uma medida indireta que, através de interpretações e inversões matemáticas apropriadas, pode fornecer estimativas das resistividades reais das diferentes camadas geológicas presentes no subsolo. Estas informações são cruciais para a caracterização geológica e geotécnica de um local, permitindo a identificação de diferentes materiais e suas propriedades físicas (Gerscovich, 2008).

### 2.5.1 ARRANJOS

Os arranjos são basicamente a configuração de posição entre os eletrodos utilizados em cada tipo de levantamento de eletrorresistividade. De acordo com Braga (2016), nos levantamentos

mais usuais, são utilizados dois eletrodos para injeção de corrente, denominados A e B e dois eletrodos para leitura da diferença de potencial, denominados M e N (Figura 15).

Figura 15 – Três tipos de arranjo mais usualmente utilizados em levantamentos de eletrorresistividade.



Fonte: Kearey *et al.* (2009)

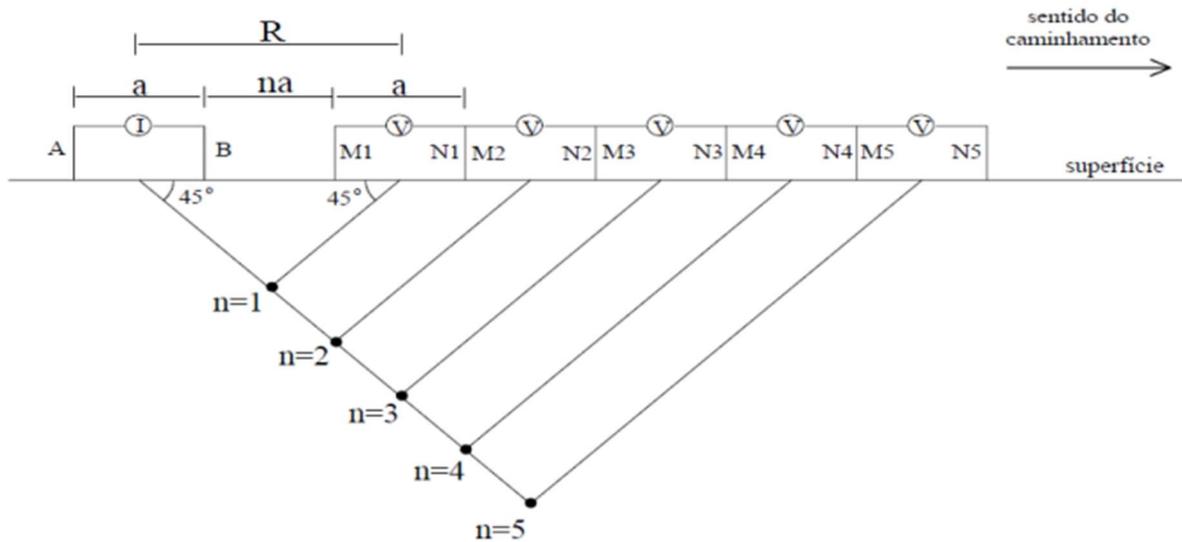
Existem diversos tipos de levantamentos com o método geofísico de eletrorresistividade dentre eles, três citados por Braga (2016), sendo eles, sondagem elétrica vertical (SEV), perfilagem elétrica de poços e o que será utilizado no presente estudo, denominado caminhamento elétrico, realizado através de medidas superficiais por meio de determinados espaçamentos entre os eletrodos.

Apesar de uma enorme gama de arranjos teorizados, alguns se destacam, como sendo os mais utilizados, devido principalmente a suas propriedades de resolução, acurácia e aplicações específicas. Moreira *et al.* (2016) defendem por exemplo a utilização do arranjo dipolo-dipolo em maciços rochosos saturados. De acordo com Dahlin & Zhou (2004), apesar do arranjo dipolo-dipolo ser mais susceptível a ruídos do que o arranjo Wenner- $\alpha$ , por exemplo, sua capacidade de retornar anomalias mais precisas é evidente, e, portanto, é amplamente utilizado.

De acordo com Gandolfo (2007), o arranjo do tipo Dipolo-Dipolo é realizado através de um par de eletrodos AB separados a mesma distância (a) do espaçamento do par de eletrodos MN, como ilustrado na Figura 16. À medida que o levantamento é realizado o espaçamento entre os

eletrodos é mantido, no entanto a distância entre os dipolos AB e MN aumenta progressivamente ( $na$ ), dando origem aos diferentes níveis de investigação ( $n$ ).

Figura 16 – Disposição dos eletrodos e sentido de caminhamento em levantamentos utilizando o arranjo Dipolo-Dipolo.



Fonte: Gandolfo (2007)

De acordo com Bortolozo (2016) o arranjo do tipo Dipolo-Dipolo apresenta limitações referentes a profundidade, ou seja, com valores altos de “ $n$ ”, no entanto, performa muito bem em profundidades mais rasas. Entende-se, portanto, que uma maior distância entre MN e AB ( $na$ ) induzirá uma menor medida de diferença de potencial elétrico, sendo recomendável assim levantamentos em até seis níveis ( $n$ ), de acordo com Gandolfo (2007).

As seções de eletrorresistividade obtidas em pseudo-profundidade ( $n$ ) podem ser convertidas em seções com profundidade real com programas de inversão matemática, como, por exemplo, o Res2DInv (Geotomo Software, 2011).

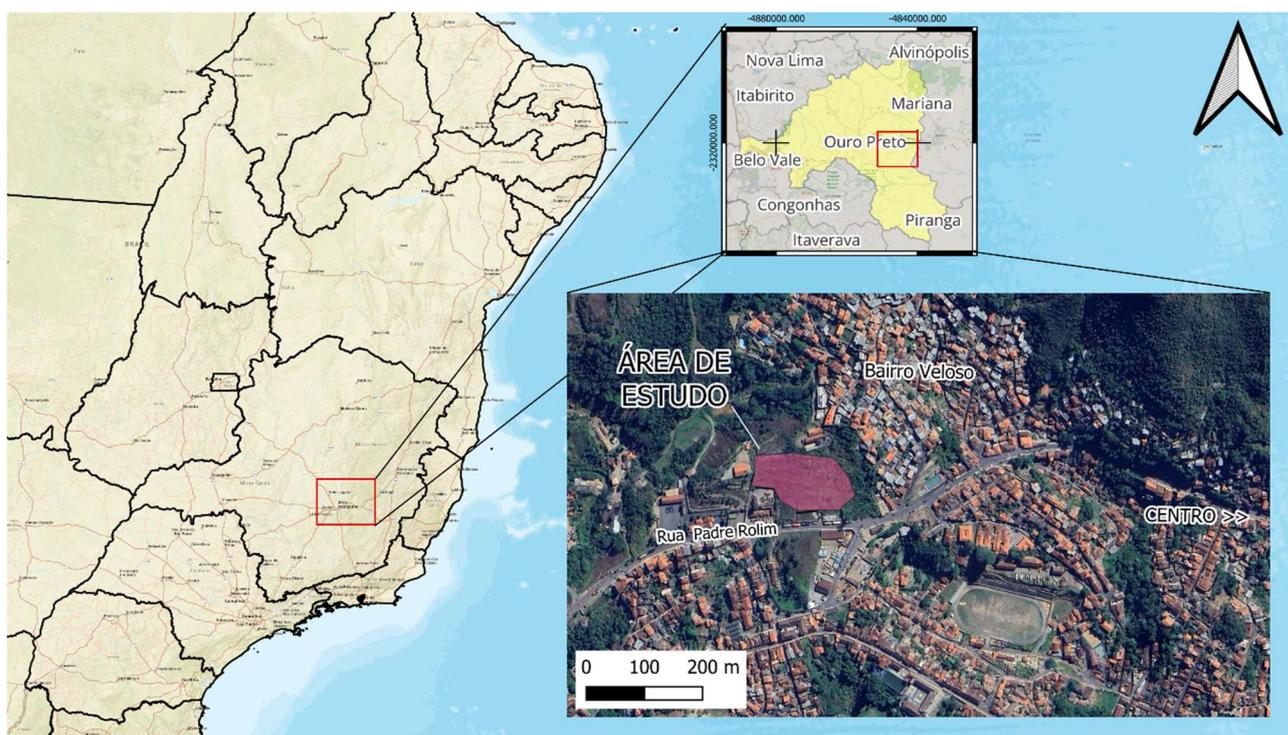
### CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO

---

#### 3.1 LOCALIZAÇÃO

O talude estudado se situa na zona urbana do município de Ouro Preto, a sudeste da capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte. O talude se localiza na rua Padre Rolim, aproximadamente na altura no número 1650, entre as coordenadas UTM E 654.675/ N 7.745.908 (Zona 23 K), conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17 – Mapa de localização da área de estudo, no município de Ouro Preto/ MG.



Fonte: Autor/ Google Earth.

#### 3.2 GEOLOGIA REGIONAL

Em um contexto macrorregional, o município de Ouro Preto está inserido na província mineral denominada Quadrilátero Ferrífero (QFe), que por sua vez encontra-se na borda sudoeste da

plataforma sul-americana. De acordo com Almeida (1977), a plataforma sul-americana forma o núcleo continental da América do Sul (Figura 18), recobrimo uma vasta área, a qual aproximadamente 40% perfazem três escudos cristalinos de idade pré-cambriana, sendo eles, Guiana, Brasil-Central e Atlântico. Segundo este autor (Almeida, *op. cit*), tais terrenos remontam uma longa evolução crustal, com um espaço temporal evolutivo Arqueano até o Paleoproterozóico, quando os núcleos crustais relativamente estáveis ao final do ciclo orogénético Transamazônico (2100-1800Ma). Sendo assim, entende-se que a conformação final destes escudos pré-cambrianos, se deu através do processo de amalgamação de unidades supracrustais adjacentes a tais núcleos, durante a orogênese Brasiliana (750-530Ma).

Figura 18 – Compartimentação geotectônica da Plataforma Sul-Americana.



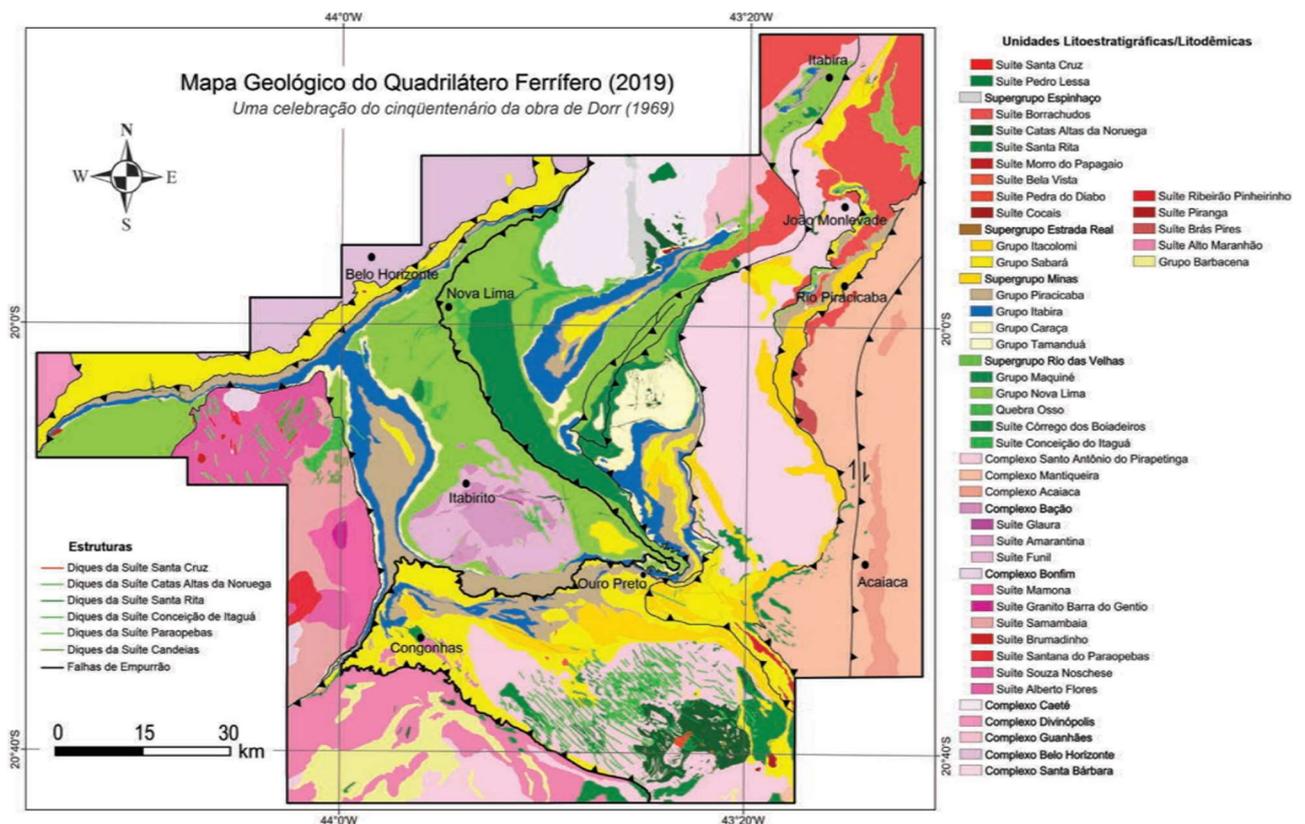
Fonte: Almeida *et al.* (1977).

Mais precisamente o QFe está localizado nas adjacências sudoeste do Cráton São Francisco. Cráton esse, que por ser um núcleo antigo, assume características de uma crosta continental espessa e fria, de acordo com Hasuí (2012), dominada por terrenos TTG's, tonalitos,

troughjemitos e granodioritos, assim como *greenstone belts* de idade arqueana, plútons e sequências supracrustais, nas mais diversas fácies metamórficas.

Carregando o título de uma das mais importantes províncias minerais do mundo, essa região, delimitada por feições serranas depositadas e deformadas ao longo do período geológico, o QFe apresenta uma vasta complexidade lito-estrutural (Figura 19). De maneira geral, observa-se nas unidades basais uma sequência meso-arqueana, composta por terrenos granito-gnáissicos de alto grau metamórfico, sobrepostos por sequências metavulcanossedimentares (*greenstone belts*) do Supergrupo Rio das Velhas (Dorr, 1969).

Figura 19 – Representação simplificada do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero.

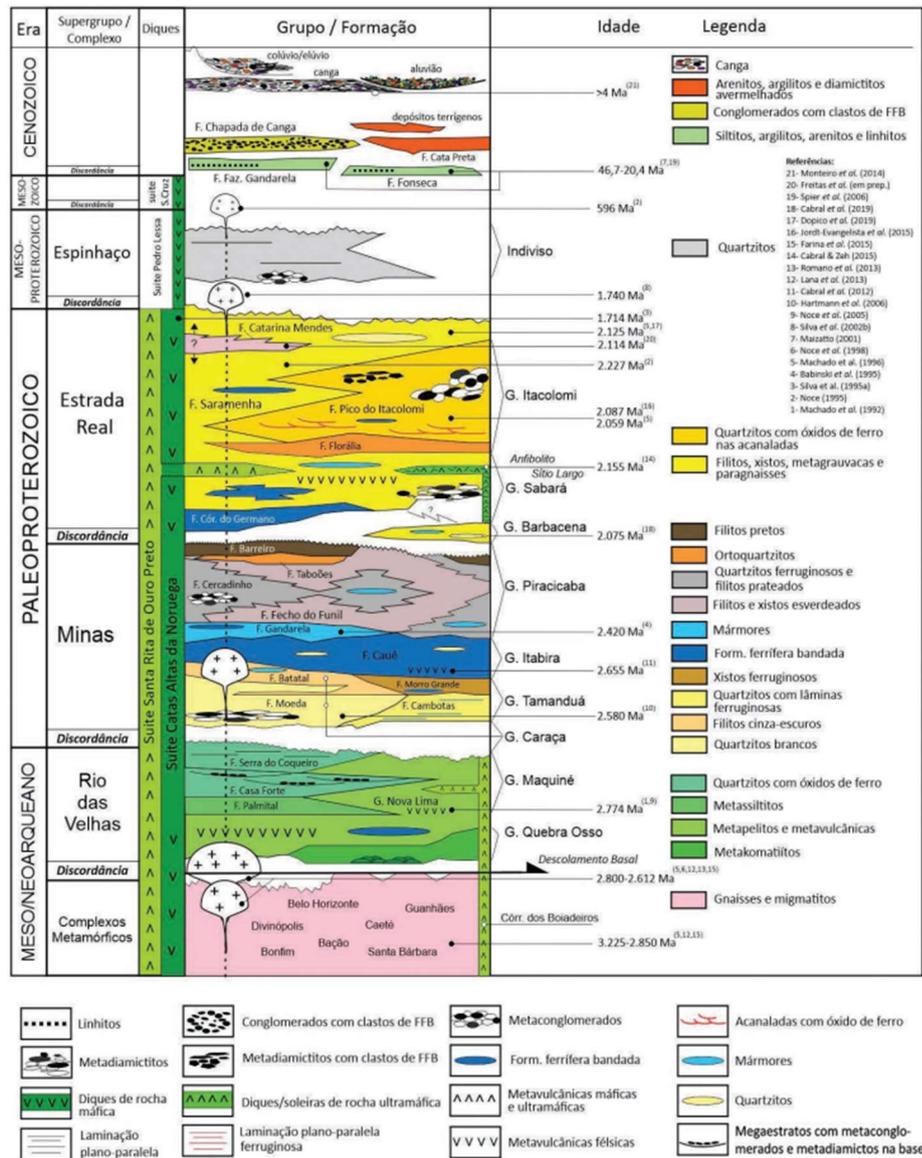


Fonte: Endo *et al.* (2019b).

Sobreposto na coluna estratigráfica (Figura 20), de idade paleoproterozóica, há o Supergrupo Minas (Dorr, 1969), caracterizado por uma sequência metassedimentar, depositada na Paleobacia Minas, sin-orogênica. Os ambientes deposicionais variam, sendo eles, predominantemente marinhos, com variações de marinhos rasos, profundos, leques submarinos,

aluviais, etc. Este supergrupo abrange o Grupo Tamanduá, Grupo Itabira e Grupo Piracicaba. Também de idade Paleoproterozóica apresentam-se as unidades do Supergrupo Estrada Real (Almeida, 2005), representados pelos Grupos Sabará e Itacolomi.

Figura 20 – Coluna Estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.



Fonte: Endo *et al.* (2019b).

O Supergrupo Espinhaço, de idade Meso-proterozóica, também se faz presente, assim como unidades cenozoicas, predominantemente formadas por depósitos de cangas, aluviões, colúvios

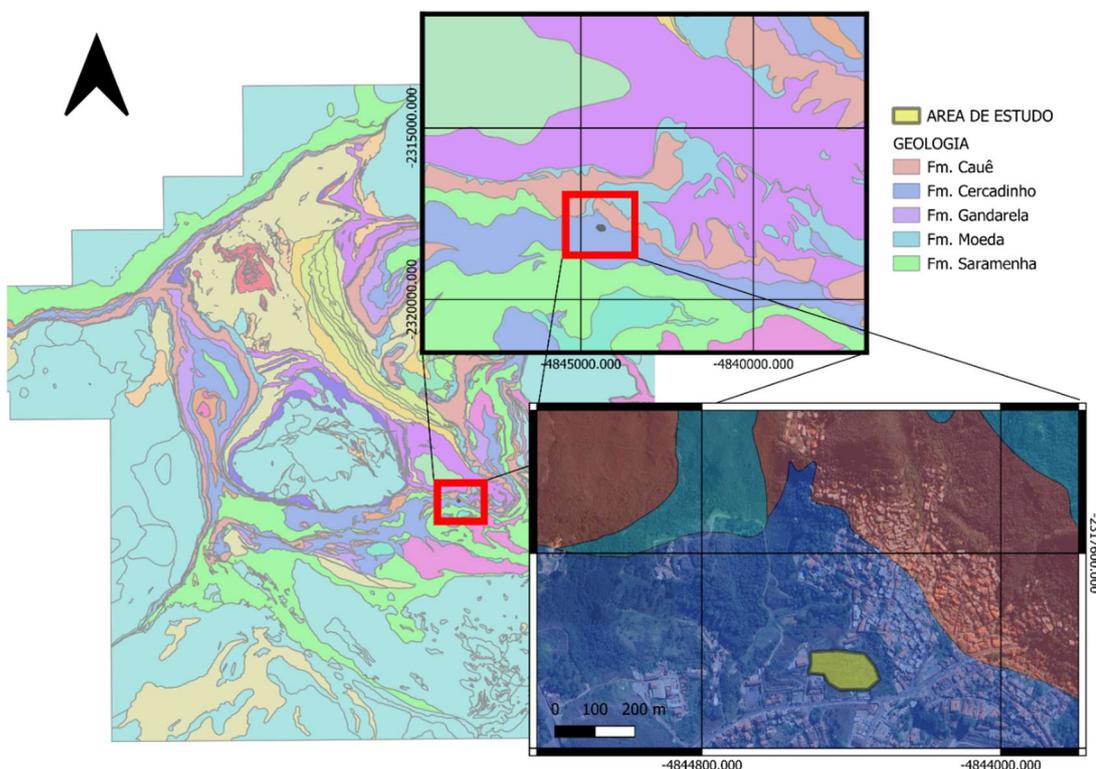
e elúvios. Além disso, diversas unidades intrusivas também permeiam rochas encaixantes, como é o caso das Suítes Santa Rita de Ouro Preto e Catas Altas da Noruega, por exemplo.

Através de uma abordagem geotectônica é possível salientar a presença de diversas influências deformacionais ao longo das unidades do QF. Entre elas, pode-se destacar, aquelas pelas quais, de maneira regional, foram influenciadas por eventos da Orogenia Transamazônica e Orogenia Brasileira, responsáveis por deixarem registros fractais nas rochas existentes.

### 3.3 GEOLOGIA LOCAL

Localmente a região da área de estudo, está localizada no flanco sul do Anticlinal de Mariana, ao longo da serra de Ouro Preto (Figura 21). Essa estrutura regional, de acordo com Endo (2019), faz parte do sistema de Nappes Ouro Preto, com vergência para SSW. De acordo com a estruturação da serra de Ouro Preto, orientada na direção leste/ oeste, apresenta mergulhos gerais para sul na ordem de 30° (Sobreira & Fonseca, 2001).

Figura 21 – Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, com a área de estudo delimitada em vermelho.



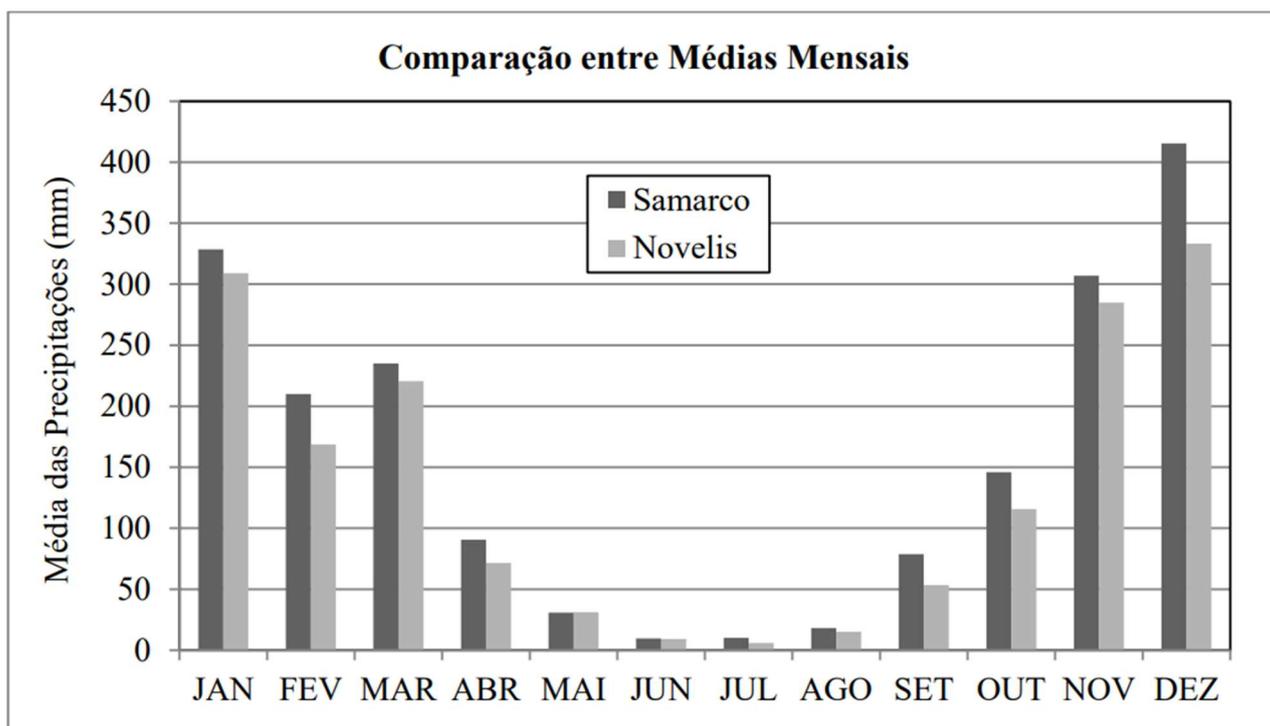
Fonte: Autor, Modificado de Endo *et al.* (2019b).

Sobreira (1992) define algumas das litologias presentes no município de Ouro Preto, associando-as com comportamentos geotécnicos e vulnerabilidade a problemas ambientais. Dentre estes, o autor destaca: os xistos do Grupo Nova Lima, com alto grau de alteração, tendência a ravinamentos e escorregamentos superficiais, ocorrendo no Bairro São Sebastião e na encosta aos fundos da Santa Casa de Misericórdia; os filitos da Formação Batatal, com baixa resistência ao cisalhamento e baixa permeabilidade, favorecendo o solapamento de blocos de itabirito e canga, dando origem a depósitos de meia encosta, pressões de percolação e descalçamento de blocos; o quartzito ferruginoso e o filito cinzento da Formação Cercadinho, com elevada erodibilidade e baixa resistência a processos denudacionais, sendo que diversos bairros de Ouro Preto se instalaram nessa unidade, como Cabeças, Rosário, Antônio Dias, Santa Efigênia e Praça Tiradentes; por fim, Quartzitos da Formação Barreiro, os quais ocorrem de forma descontínua, amplamente alterados e de baixa resistência, apesar de coesos, favorecendo ravinamentos, com ocorrências na Vila São José, Novo Horizonte e Jardim Alvorada.

### **3.4 CLIMA**

Carvalho (1982) define o clima de Ouro Preto como clima tropical de montanha, em que a baixa latitude é compensada pela altitude e conformação orográfica regional. Sendo assim, tem-se características de verões suaves e invernos brandos, com baixas temperaturas e elevada umidade atmosférica (Gomes *et al.*, 1998). As temperaturas mais quentes do município coincidem com o período de maior precipitação atmosférica, e ocorrem em seu ápice no mês de janeiro, em contrapartida o mês mais frio e seco é o de julho. De maneira geral a pluviosidade no município concentra-se entre outubro e março, que corresponde a mais de 80% da precipitação anual (Figura 22), com base na série de 1995 a 2012.

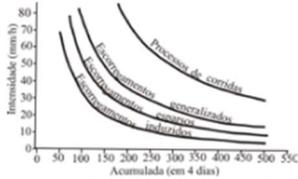
Figura 22 – Índices pluviométricos ao longo dos meses no município de Ouro Preto, com base na série de 1995 a 2012.



Fonte:Silva (2015)

Chuvas excepcionais não são os únicos ou mais importantes condicionantes para deflagração de movimentos de massa, deve-se levar em conta também o tempo de duração das precipitações, a condutividade hidráulica dos solos e a variação do grau de saturação. Segundo Bigarella (2007), quando uma chuva forte precipita sobre um solo já saturado, irá ocasionar casos mais frequentes de movimento de massa. Na Figura 23 encontram-se algumas correlações entre chuvas e os movimentos de massa para Ouro Preto e outras cidades, elaborada por Parizzi (2004) e Cajazeiro (2007).

Figura 23 – Relações entre chuvas e movimentos de massa para algumas cidades brasileiras.

Cidade ou Região Brasileira	Correlação entre chuvas e Movimentos de Massa	Autores										
Serra do Mar, SP	Desenvolveram a equação para a região paulista: $I(Ac) = KAc^{-0,933}$ Onde, $I(Ac)$ = intensidade diária de chuva, $Ac$ = o acumulado de chuva durante 4 dias antes do evento. O fator $K$ é dependente do evento e assume valores iguais a $K = 2603$ para escorregamentos induzidos, $K=3579$ para escorregamentos esparsos, $K = 5466$ para escorregamentos generalizados e $K= 10646$ para corridas. Os resultados estão representados no gráfico abaixo:  Correlação entre chuva e movimentos de massa para a Serra do Mar, São Paulo.	Tatizana <i>et al.</i> (1987a e 1987b)										
Petrópolis, RJ	Foi avaliado que, com relação ao período de chuva acumulada o melhor período foi o de 4 dias, o único a não apresentar incoerência. Estabelecem a relação entre pluviosidade acumulada e eventos de escorregamentos: <table border="1" data-bbox="609 750 1056 896"> <thead> <tr> <th>mm</th> <th>no escorregamentos</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30</td> <td>1 a 5 (somente em encostas muito perturbadas)</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>6 a 15 (eventos de maior porte)</td> </tr> <tr> <td>90</td> <td>16 a 30 (eventos de alta magnitude)</td> </tr> <tr> <td>150</td> <td>Acima de 30 (generalizados)</td> </tr> </tbody> </table>	mm	no escorregamentos	30	1 a 5 (somente em encostas muito perturbadas)	40	6 a 15 (eventos de maior porte)	90	16 a 30 (eventos de alta magnitude)	150	Acima de 30 (generalizados)	Almeida <i>et al.</i> (1993)
mm	no escorregamentos											
30	1 a 5 (somente em encostas muito perturbadas)											
40	6 a 15 (eventos de maior porte)											
90	16 a 30 (eventos de alta magnitude)											
150	Acima de 30 (generalizados)											
Salvador, BA	Considera chuvas diárias a partir de 20mm e acumuladas de 4 dias com valores maiores que 120 mm há predominância de escorregamentos.	Elbachá <i>et al.</i> (1992)										
Macció, AL	Estabelecem fatores probabilísticos de pluviosidade considerando o coeficiente de ciclo móvel (CCM) que é a relação entre o registro pluviométrico acumulado e o acumulado normal de chuva até a data do episódio. $CCM > 1$ sinaliza um período pluviométrico superior à média.	Anjos <i>et al.</i> (1997)										
Olinda, PE	Introdução do parâmetro R (valor representativo do movimento iminente, igual a $600 \text{ mm}^2$ ). $R = P_{ac} \cdot I$ $P_{ac}$ = intensidade de chuva acumulada até o episódio $I$ = chuva de intensidade mínima até o episódio. Ex: Se a chuva acumulada ( $P_{ac}$ ) é de 60 mm, basta uma chuva de 10 mm para a desestabilização do maciço.	Gusmão Filho (1997)										
Rio de Janeiro, RJ	Consideram as médias 30mm/h, 70mm/24h e 100mm/96h das precipitações pluviométricas para que ocorra um acidente.	Feijó <i>et al.</i> (2001)										
Belo Horizonte, MG	escorregamentos generalizados em todas as litologias ocorrem durante chuva de grande intensidade (altos índices pluviométricos em poucas horas).	Parizzi (2004)										
Campinas, SP	Áreas do embasamento possuem maior susceptibilidade a escorregamentos a partir de 78mm/7 dias. Para as áreas sedimentares as relações não foram satisfatórias.	IDE, Fernanda (2005)										
Ouro Preto, MG	Chuvas acumuladas de cinco dias são as que mais influenciam na instabilização de encostas. Precipitações de 22mm/5 dias podem desencadear eventos. Acima de 128mm/5dias há maior probabilidade de escorregamentos severos.	CASTRO, Jeanne (2006)										

Fonte: Parizzi (2004) e Cajazeiro (2007).

De acordo com os estudos de Castro (2006), a maior correlação observada no município de Ouro Preto é de movimentos de massa com o acumulado de cinco dias antecedentes de chuvas. Este estudo mostrou que precipitações de 22mm ao longo de 5 dias podem desencadear tais eventos, enquanto precipitações acima de 128mm ao longo do mesmo período aumentam a probabilidade de escorregamentos severos.

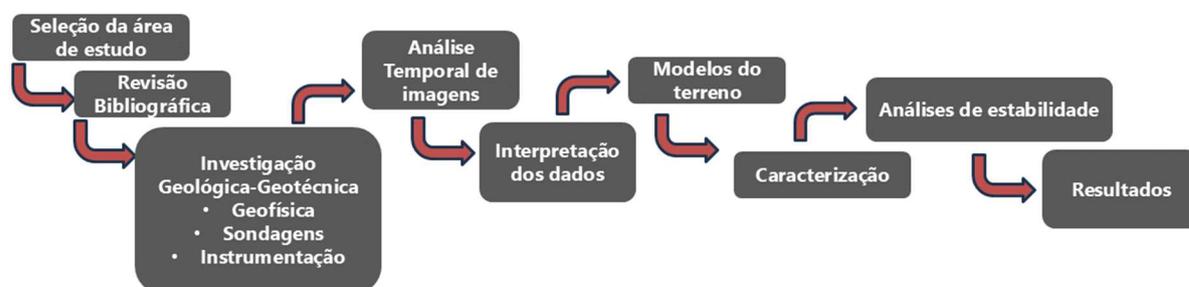
## CAPÍTULO 4

### METODOLOGIA

---

Neste capítulo serão abordadas as metodologias utilizadas para realização do estudo de análise de estabilidade na área de estudo, com base nas etapas de trabalho (Figura 24). Estarão presentes as etapas de desenvolvimento em campo e em escritório relativas ao desenvolvimento do presente estudo.

Figura 24 – Fluxograma ilustrativo das etapas de desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autor.

#### 4.1 RECONHECIMENTO DE CAMPO

Foi realizada em parceria com a equipe da Defesa Civil do município de Ouro Preto, visita a pontos específicos, com ocorrência e/ou propensão a movimentos de massa, do tipo rastejo, nas proximidades da sede do município, com o objetivo de definir a melhor área para investigações. Sendo assim, definiu-se que os estudos seriam direcionados para o talude próximo da antiga Escola Padre Carmélio, tendo em vista principalmente os indícios observados em campo, que elevaram a suspeita de ocorrência do movimento de rastejo e o possível impacto social para o município, pois no caso de avanço nas movimentações observadas uma possível obstrução da rua Padre Rolim poderia impactar diretamente a mobilidade urbana local e o turismo a cidade histórica de Ouro Preto.

Sendo assim, iniciaram-se os trabalhos relativos ao reconhecimento de campo, no caráter de uma inspeção geológica-geotécnica prévia, onde foram investigados possíveis indícios de

movimentação de massa, característicos de rastejo, além de uma identificação das litologias aflorantes na área investigada.

#### 4.2 ANÁLISE TEMPORAL DE IMAGENS E FOTOS AÉREAS

Com o objetivo de identificar e entender a evolução de deslocamento de massas na área de estudo utilizou-se a ferramenta de imagens temporais do *software* de imageamento por satélite *Google Earth Pro* e ortofotos obtidas pela Força Aérea Brasileira em 16 de agosto de 1969, a uma altura de voo de 5 mil metros na escala de 1:10000 (Figura 25).

Figura 25 - Foto do município de Ouro Preto de agosto de 1969, em destaque (vermelho) o terreno da área de estudo.



Fonte: Ministério da Aeronáutica e Força Aérea Brasileira, agosto de 1969.

#### 4.3 LEVANTAMENTOS DE ELETRORRESISTIVIDADE

Realizaram-se anteriormente às sondagens dois levantamentos geofísicos pelo método de eletrorresistividade, com o objetivo de identificar o nível freático, regiões com ocorrência de material variavelmente saturado, possível topo rochoso e guiar as campanhas de sondagem

subsequentes. Sendo assim, foram realizados os levantamentos paralelos entre si com o método de caminhamento elétrico, utilizando-se o arranjo Dipolo-Dipolo (Figura 26). O arranjo Dipolo-Dipolo foi adotado devido a sua ampla recomendação e utilização por profissionais e pesquisadores na área (Gandolfo 2007).

Figura 26 – Mapa de localização das linhas de levantamento de eletrorresistividade realizados.



Fonte: Autor, QGIS.

Para obtenção dos dados empregou-se o resistivímetro *Lippmann D-94571 Schaufling*, de alta precisão, configurado no modo multieletrodo. A configuração do sistema é baseada na emissão e medição de corrente elétrica de maneira automática, por meio de um cabo *flat* acoplado ao dispositivo que emite a corrente, que é posteriormente transferida à conexão de cobre em cada um dos eletrodos de aço dispostos no terreno, para posterior leitura (Figura 27). O diferencial deste equipamento é permitir aquisição automática dos dados de eletrorresistividade, sem a necessidade de selecionar manualmente os eletrodos a serem trabalhados, otimizando o tempo e minimizando os erros dos levantamentos.

Figura 27 – Eletrodos cravados para realização da linha 1 de eletrorresistividade.



Fonte: Autor

Na aquisição dos dados é importante ressaltar que a medição da diferença de potencial é medida entre os eletrodos M e N, que são utilizados para detectar as variações no campo elétrico gerado pela corrente injetada nos eletrodos A e B. Também vale pontuar que os dados de resistividade são integrados com informações topográficas, melhorando a interpretação em subsuperfície e produzindo modelos geofísicos mais precisos, considerando a topografia do terreno, essencial para avaliar a estabilidade dos taludes.

O espaçamento intereletrodos para a linha 1 foi de 4 metros e para a linha 2 de 2 metros, totalizando seções de 76 metros nos dois casos. O resistímetro foi conectada a um notebook e a programação de níveis de investigação foi programada no *software Geotest*. A seção bruta em pseudo-profundidade gerada neste software foi posteriormente tratada no *software* de inversão RES2Dinv (Geotomo Software, 2011). A Tabela 4.1 indica a localização das duas linhas de eletrorresistividade.

Tabela 4.1 – Localização dos levantamentos de eletrorresistividade.

<b>LEVANTAMENTOS DE ELETRORRESISTIVIDADE</b>		
<b>LINHAS</b>	<b>COORDENADAS (SIRGAS 2000 - 23K)</b>	
	<b>X</b>	<b>Y</b>
INÍCIO (LINHA 1)	654678.152	7745892.515
FINAL (LINHA 1)	654662.356	7745966.875
INÍCIO (LINHA 2)	654694.532	7745894.473
FINAL (LINHA 2)	654678.736	7745968.834

Fonte: Autor

#### **4.4 SONDAGENS**

A partir dos dados tratados e interpretados dos levantamentos de eletrorresistividade, foi possível determinar os principais alvos para as campanhas de sondagem, tendo com objetivo caracterizar o material de acordo com suas características geológicas e comportamento geotécnico, assim como a instalação de instrumentos de monitoramento, como os indicadores de nível de água.

##### **4.4.1 SONDAGEM A TRADO**

A primeira campanha de sondagem foi realizada através da utilização de um trado mecanizado. O trado mecanizado consiste em um conjunto composto por um motor acoplado a um suporte que transfere a rotação gerada a um sistema de hastes por meio de uma cruzeta, contendo um trado helicoidal na extremidade inferior, em contato com o terreno, que ao rotacionar a ferramenta de corte promove a recuperação do material, permitindo assim o avanço em profundidade (Figura 28).

Figura 28 - Composição de trado mecanizado em execução de furo na área de estudo.



Fonte: Autor.

A campanha foi realizada por equipe contratada no mês de junho de 2023 e contou com acompanhamento técnico do início ao fim. Foi adotado como critério de paralização dos furos quando se atingiu o impenetrável, ou seja, quando não foi mais possível o avanço em profundidade. Foram no total oito furos de trado, sendo que dois foram deslocados pelo fato de atingir o impenetrável em baixas profundidades (Tabela 4.2 e Figura 29).

Tabela 4.2 – Coordenadas e profundidade das sondagens a trado.

SONDAGENS À TRADO				
SONDAGEM	COORDENADAS (SIRGAS 2000 - 23K)			PROFUNDIDADE (m)
	X	Y	ELEVAÇÃO (m)	
ST-01	654678	7745913	1182.59	8.10
ST-02	654679	7745888	1176.85	1.00
ST-02A	654679	7745888	1176.40	1.00
ST-02B	654679	7745888	1176.66	1.00
ST-03	654676	7745900	1179.61	2.00
ST-04	654693	7745903	1178.48	3.60
ST-05	654691	7745890	1175.78	1.60
ST-06	654699	7745892	1174.67	5.25

Fonte: Autor.

Figura 29 - Localização das sondagens à trado executadas na área.



Fonte: Autor, QGIS.

As amostras deformadas coletadas, foram descritas em campo e acondicionadas em sacos plásticos, em volume satisfatório, representativos de cada manobra, para futura caracterização em laboratório (Figura 30). Além disso, alguns furos foram aproveitados para posterior instrumentação.

Figura 30 - Acondicionamento das amostras coletadas nas sondagens à trado, em sacos plásticos.



Fonte: Autor.

As descrições das referidas amostras se basearam nas determinações da NBR 7250 (ABNT, 1982), contemplando aspectos de granulometria, plasticidade, cor, origem, e consistência, no caso de solos finos. Também foi utilizada a NBR 6502 (ABNT, 2022), que preconiza os principais aspectos de rochas e solos e a NBR 9603 (ABNT, 2015), que estabelece as diretrizes para execução de sondagem a trado.

#### 4.4.2 SONDAGEM A PERCUSSÃO

Em adição a campanha de sondagem à trado foi conduzida uma nova campanha composta por sondagens à percussão. O objetivo principal desta campanha consistiu na obtenção de mais dados relativos à geologia e a realização de ensaios de resistência a penetração. Conforme descrita pela norma brasileira NBR 6484 (ABNT, 2020), a sondagem a percussão é uma técnica de investigação geotécnica que utiliza o método SPT (*Standard Penetration Test*) e visa obter informações sobre as características do material investigado. Nesse procedimento, um amostrador, acoplado a um determinado conjunto de hastes, de acordo com a profundidade, é

cravado no solo por meio de golpes de um martelo padrão, com massa de 65kg, que cai de uma altura de 75cm. O número de golpes necessários para avanço em três trechos de 15 centímetros é registrado, de maneira que se completem 45cm, contabilizando os dos dois últimos trechos de maneira a determinar o N<sub>spt</sub>. O ensaio foi realizado com o auxílio de um tripé (Figura 31).

Figura 31 - a) Montagem do tripé utilizado na realização da sondagem à percussão e ensaios SPT. b) Amostrador utilizado na sondagem à percussão. c) Martelo padrão (65 kg) utilizado nos ensaios acima das hastes.



Fonte: Autor.

As coordenadas de cada sondagem, assim como sua elevação e profundidade encontram-se dispostas na Tabela 4.3 e ilustradas na Figura 32.

Tabela 4.3 - Sondagens à percussão e as respectivas coordenadas, realizadas na área de estudo.

SONDAGENS À PERCUSSÃO (SPT)					
SONDAGEM	COORDENADAS (SIRGAS 2000 - 23K)			PROFUNDIDADE (m)	DATA
	X	Y	ELEVAÇÃO (m)		
SP-01	654692	7745917	1181.4	5.07	23/11/2023
SP-02	654705	7745910	1177.6	4.23	23/11/2023
SP-03	654679	7745930	1175.3	2.45	24/11/2023
SP-08 (FONNTES)	654646	7746003	1175.3	2.45	11/04/2014

Fonte: Autor.

Figura 32 - Localização das sondagens à percussão (SPT) executadas na área de estudo.



Fonte: Autor, QGIS.

As sondagens à percussão visaram a obtenção de informações referentes a resistência geomecânica dos materiais em subsuperfície. Sendo assim, além da caracterização geológica das unidades foi possível atribuir valores de resistência, imprescindíveis para as análises de estabilidade posteriores.

Além destas sondagens foi utilizada também uma sondagem realizada pela empresa Fonntes Geotécnica (2014) (Figura 33) no âmbito do estudo de estabilidade para a Escola Padre Carmélio, contratado pela Prefeitura Municipal de Ouro Preto em parceria com o Instituto Geotécnico (IGEO).

Figura 33 – Localização do furo de sondagem realizado pela empresa Fonntes em abril de 2014.



Fonte: Relatório empresa Fonntes.

#### 4.5 INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO

Em alguns furos de sondagem foram instalados piezômetros de Casagrande, com o objetivo de monitorar uma provável variação do nível de água em períodos chuvosos. Na tabela 4.4 encontram-se as coordenadas de cada instrumento (Figura 34), sendo dois instalados nos furos realizados por sondagem à trado e três nos furos de sondagem a percussão.

Tabela 4.4 – Dados de monitoramento dos piezômetros instalados.

INSTRUMENTO	PIEZOMÊTROS			PROFUNDIDADE (m)	SONDAGEM CORRESPONDENTE
	COORDENADAS (SIRGAS 2000 - 23K)				
	X	Y	ELEVAÇÃO		
PZ-01	654679	7745930	1175.30	2.32	SP-03
PZ-02	654692	7745917	1181.40	5.07	SP-01
PZ-03	654705	7745910	1177.60	4.23	SP-02
PZ-04	654699	7745892	1174.67	5.25	ST-06
PZ-05	654678	7745913	1182.59	8.10	ST-01

Fonte: Autor.

Figura 34 – Localização dos Piezômetros instalados.



Fonte: Autor.

Os piezômetros de Casagrande foram confeccionados de acordo com as boas práticas: tubo de PVC de 2' com a extremidade inferior ranhurada, envolto em um elemento filtrante, denominado “*bidim geotêxtil*” e inserido no furo previamente disposto com areia no fundo (cama); mais areia foi depositada funcionando como pré-filtro até a posição acima das ranhuras. Posteriormente a câmara piezométrica foi selada com bentonita, assim como a boca do furo, que foi tampada com uma conexão. O procedimento encontra-se ilustrado na Figura 35.

Figura 35 - a) Tubo de PVC com a porção ranhurada envolta em *geotêxtil (bidim)*. b) Procedimento de inserção de areia no furo, no entorno da porção ranhurada. c) Procedimento de compactação da camada de areia e bentonita. d) Piezômetro finalizado e selado.



Fonte: Autor.

O monitoramento está sendo feito, na medida do possível, com periodicidade semanal, ao menos no período chuvoso. Além da instalação de piezômetros também foram confeccionados marcos superficiais em pontos estratégicos (Figura 36), onde espera-se que ocorra futuras movimentações, de maneira a permitir um constante monitoramento por meio de levantamentos topográficos periódicos.

Figura 36 – a) Marco superficial confeccionado pela empresa *Soil Solutions & Services*. b) Procedimento para medição do nível de água no piezômetro.



Fonte: Autor.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS E DISCUSÕES

---

Os trabalhos preliminares de campo evidenciaram que na área ocorrem filitos prateados, que são atribuídos nas inspeções geológicas, como pertencentes à Formação Cercadinho (Figura 37). Predominam porções predominantemente mais micáceas, sedosas ao toque, com algumas intercalações mais arenosas (Figura 5.1). Trata-se de rocha branda, muito foliada, que se encontra mais alterada (saprólito) próxima à superfície. Devido suas características, o fenômeno de empastilhamento é comum nesta rocha. A foliação se encontra suavemente dobrada, mas predominam os mergulhos concordantes com o mergulho do talude, para sul.

Em alguns casos, devido ao movimento de rastejo, o saprólito apresenta indícios de remobilização com deposição nas porções mais baixas e de meia encosta, onde podem ser descritos como colúvio.

Figura 37 – a) Testemunho de sondagem do filito prateado da Formação Cercadinho, na sua porção predominantemente micáceea. b) Afloramento de filito prateado, próximo da área de estudo. c) Porção mais arenosa do filito, obtido em sondagem à trado.



Fonte: Autor.

Também foram observados diversos indícios da ocorrência de rastejo nas edificações próximas a área investigada, como por exemplo, trincas de tração na escola Padre Carmélio situada no

alto do talude, e movimentação relativa entre os prédios, como os identificados pela CPRM em junho de 2016 (Figura 38). Os acessos as imediações da escola encontram-se restritos devido ao comprometimento da estabilidade das construções e, portanto, utilizaram-se imagens obtidas pela CPRM durante inspeção realizada

Figura 38 - a) Abertura entre as vigas do prédio da escola, indicando movimentação relativa. b) Inclinação de árvore nas proximidades da escola, próximas a escola. c) Embarrigamento de muro de contenção (gabião) próximo ao sopé do terreno investigado, localizado na rua Padre Rolim. d) Trinca de tração na edificação da escola.



Fonte: Imagens fornecidas pela CPRM durante inspeção realizada em junho de 2016.

As evidências observadas nas fotos supracitadas corroboram para a existência de um movimento de rastejo no local. Adicionalmente, também são observados no terreno de estudo diversos degraus de abatimento resultantes da movimentação de rastejo (Figura 39).

Figura 39 - a) Degraus de abatimento resultantes do movimento de rastejo. b) Degraus de abatimento, dispostos ao longo de grande parte do terreno.



Fonte: Autor.

Na análise temporal das fotos e imagens de satélite é possível observar em um primeiro momento, quando comparada a imagem de 1969 com a imagem de satélite mais antiga disponível no Google Earth Pro, datada de maio de 2008, o aparecimento de degraus de abatimento ao longo de toda área investigada (Figura 40).

Figura 40 - a) Detalhe de ortofoto evidenciando a área de estudo em agosto de 1969. b) Imagem de satélite indicando em tracejado vermelho os degraus de abatimento-na área.



Fonte: a) Ministério da Aeronáutica e Força Aérea Brasileira, agosto de 1969. b) *Google Earth Pro*, maio de 2008.

Além do aparecimento de degraus de abatimento, ao se realizar a comparação das imagens é possível observar na imagem de 1969 a presença de feições erosivas no terreno, que se assemelham a pequenos sulcos que podem ter contribuído para o desconfinamento e

instabilização do talude. Também é possível observar quando comparadas imagens de satélite de diferentes anos a evolução da massa instável pelo solapamento dos degraus de abatimento, como é o caso das imagens de setembro de 2011 e junho de 2023 (Figura 41).

Figura 41 - a) Imagem de satélite da área em setembro de 2011. b) Imagem de satélite da área em junho de 2023, evidenciando algumas movimentações ocorridas, indicadas pelas linhas tracejadas e setas e o avanço dos degraus de abatimento indicado pelo círculo vermelho.

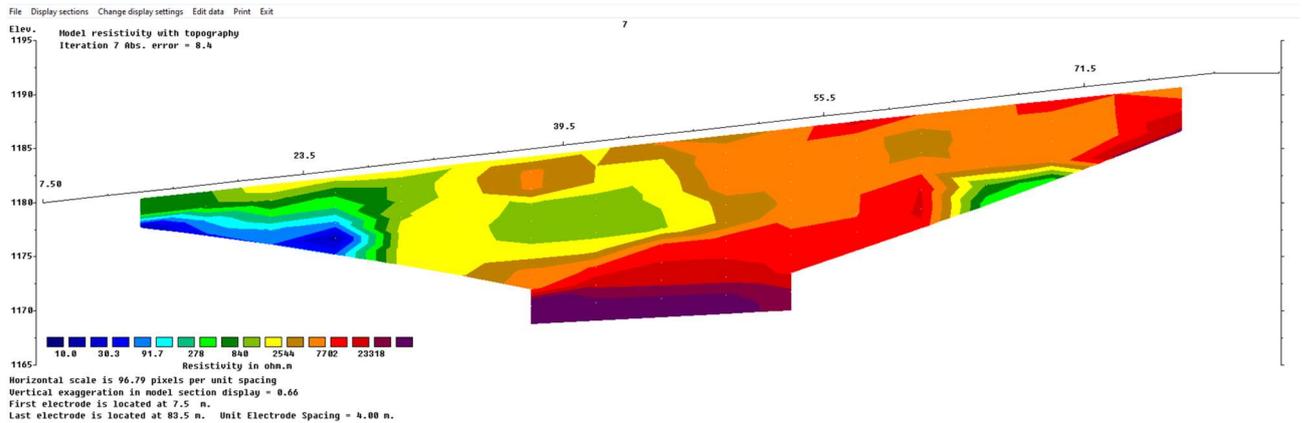


Fonte: *Google Earth Pro*.

## 5.1 LEVANTAMENTOS DE ELETRORRESISTIVIDADE

Os dois caminhamentos elétricos foram tratados e invertidos de maneira a produzir as seções geolétricas ilustradas na Figura 42 e Figura 43, respectivamente. Com a distância intereletrodos adotadas e com os cinco níveis de investigação (n), atingiu-se profundidade máxima de cerca de 16 metros nas porções centrais das seções.

Figura 42 – Seção invertida referente linha 1 de eletroresistividade.

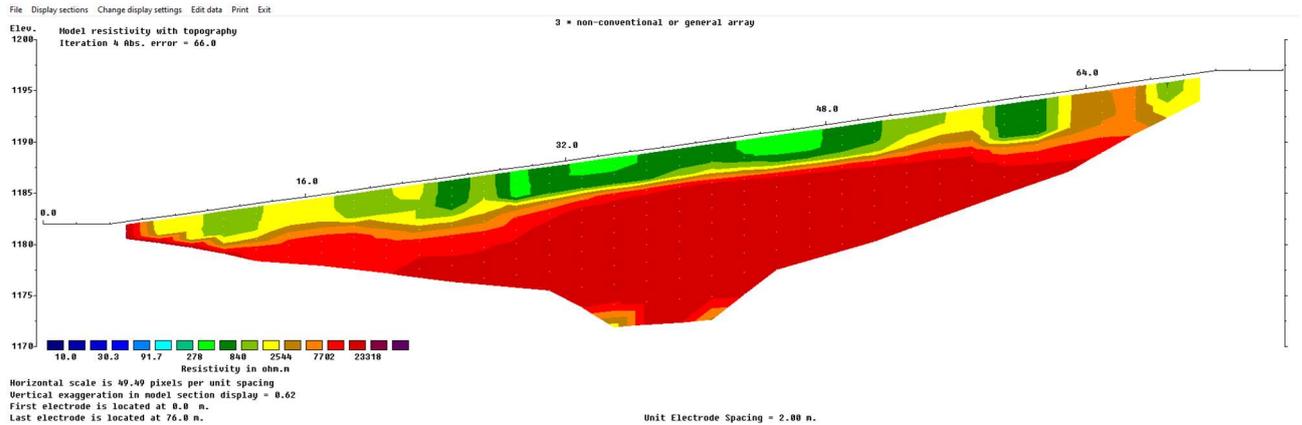


Fonte: Autor, RES2DINV.

As seções de resistividade foram confeccionadas com escalas de cores de maneira a abranger melhor os valores de resistividade aparente obtidos. Sendo assim, tem-se, o entendimento de valores de baixa resistividade aqueles compreendidos até 278 ohm/ m, nos tons de azul e verde claro, valores intermediários de 278 ohm/ m até 2544 ohm/ m, ilustrados nos tons de verde a amarelo e valores acima de 2544 ohm/ m, nas cores de laranja a roxo, considerados altamente resistivos.

Na primeira seção, foi possível observar na porção menos elevada, abaixo da estaca 23.5, uma zona de baixa resistividade, provavelmente em função da existência de umidade e/ ou saturação. Durante as sondagens, identificou-se uma laje de concreto neste trecho, cobertas por colúvio transportado por rastejo, abaixo da qual a umidade se preserva. Há duas outras zonas de baixa resistividade, uma localizada na porção central, próxima à estaca 39.5, e outra em maior profundidade, na porção mais elevada, próxima à estaca 71.5.

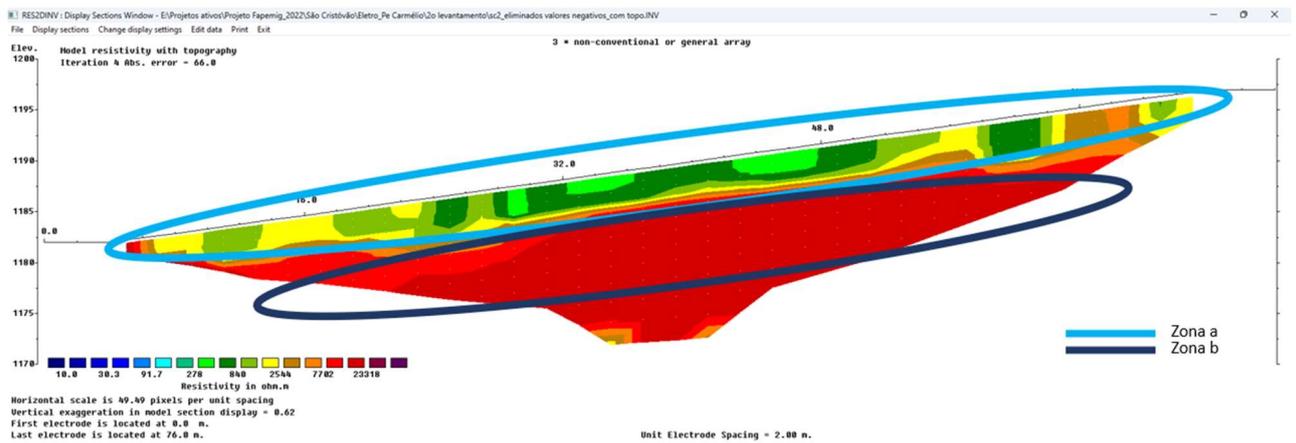
Figura 43 - Seção invertida referente linha 2 de eletrorresistividade.



Fonte: Autor, RES2DINV.

Em paralelo a seção 1, foi realizada uma segunda seção, a uma distância lateral de cerca de 16 metros na direção ENE. Nesta seção, foi possível interpretar de maneira preliminar, dois domínios de alteração, indicados pela resistividade (Figura 44).

Figura 44 – Linha 2 de eletrorresistividade contendo interpretação das zonas de resistividade associadas com material.



Fonte: Autor, RES2DINV.

A correlação com os dados de sondagens evidencia que a zona “a” da linha 2 corresponde a um material que está sendo remobilizado, pela movimentação das massas de acordo a existência de um rastejo na região, se assemelhando a um colúvio. Já a zona “b”, de acordo com a

interpretação realizada, condiz com uma zona de menor grau de alteração, menos correlacionada com a movimentação de material.

As duas seções de eletrorresistividade, subparalelas entre si, ilustram duas situações muito distintas do talude, pois foram levantadas em datas diferentes, a seção 1, em junho de 2023, e a seção 2, em novembro de 2023. Contudo, em ambas é possível identificar resistividades superiores a 7.783 Ohm.m, que possivelmente representam o filito são (impenetrável à sondagem à percussão) e aqueles com resistividade inferior a 2.544 Ohm.m, que possivelmente delimitam o manto inconsolidado. Na seção 1, há uma zona em subsuperfície, abaixo da estaca de posição 23.5m, com resistividade inferior a 91,7 Ohm.m. Esta zona encontra-se saturada em água, por estar protegida da evapotranspiração pela laje de concreto coberta atualmente pelo material rastejante. Esta anomalia de baixa resistividade certamente interferiu nos valores de resistividade entre as estacas 23.5 e 39.5, que ficaram inferiores ao esperado. Esta interpretação é corroborada quando se analisa a seção 2, subparalela à primeira, mas levantada fora da área de laje soterrada. Como esta seção foi adquirida no início do período chuvoso, aqui a resistividade torna-se bem contrastante entre aquela superior a 7.783 Ohm.m no filito e inferior a 2.544 Ohm.m no manto inconsolidado, onde a resistividade encontra-se reduzida pela saturação parcial pelas águas infiltrantes. Cabe destacar que quando a seção 2 foi levantada, os piezômetros ainda não registravam água subterrânea neste material.

## **5.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E SONDAJENS**

As duas campanhas de sondagem desenvolvidas, sendo a primeira utilizando trado e a segunda utilizando a técnica de sondagem percussão, foram responsáveis por subsidiar a aquisição de amostras da área de estudo, possibilitando desta forma a caracterização do subsolo de maneira direta, além de fornecerem amostras deformadas imprescindíveis para a realização de análises mais complexas posteriormente. Neste primeiro momento, no âmbito do estudo atual, a caracterização se baseou principalmente na descrição táctil visual, além das interpretações de resistência oriundas dos ensaios de penetração, amplamente difundidos e normatizados.

As faixas granulométricas caracterizadas de acordo com a normativa vigente encontram-se na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Frações granulométricas e suas respectivas nomenclaturas, de acordo com a NBR 6502 (ABNT, 2022).

FRAÇÕES GRANULOMÉTRICAS (NBR 6502/ 1995)	
FRAÇÃO	DIÂMETRO
ARGILA	até 0,002 mm
SILTE	0,002 mm - 0,06 mm
AREIA FINA	0,06 mm – 0,20 mm
AREIA MÉDIA	0,20 mm – 0,60 mm
AREIA GROSSA	0,60 mm – 2,00 mm
PEDREGULHO	2,00 mm – 60,0 mm
CALHAU	60 mm – 200mm
MATAÇÃO	200 mm – 1 m

Fonte: Modificado da ABNT NBR 6502/2022

Os trechos amostrados também foram caracterizados, seguindo as determinações na NBR 6484/2020, de acordo com sua cor, sua plasticidade e a origem do material, seja ele transportado, como é o caso de colúvios, solos residuais ou aterros. Foram considerados também os estados de compactidade e consistência de cada um dos trechos, quando realizado ensaios de  $N_{spt}$ , como ilustrado na Figura 45.

Figura 45 – Estado de compactidade e consistência dos solos.

Solo	Índice de resistência à penetração $N$	Designação <sup>a</sup>
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa(o)
	5 a 8	Pouco compacta(o)
	9 a 18	Medianamente compacta(o)
	19 a 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média(o)
	11 a 19	Rija(o)
	20 a 30	Muito rija(o)
	> 30	Dura(o)

<sup>a</sup> As expressões empregadas para a designação da compactidade das areias (fofa, compacta etc.) são referências à deformabilidade e à resistência destes solos, sob o ponto de vista de fundações, e não podem ser confundidas com as mesmas denominações empregadas para a designação da compactidade relativa das areias ou para a situação perante o índice de vazios críticos, definidos na mecânica dos solos.

Fonte: ABNT NBR 6484/2020

Todas as sondagens seguiram as normas vigentes de descrição com o objetivo de serem caracterizadas para utilização na confecção de seções geológicas representativas da área de estudo. As descrições se encontram no Apêndice 1, no caso das sondagens a trado; Apêndice

2, 3 e 4 para as sondagens a percussão realizadas pela empresa Soil e Apêndice 5 referente a sondagem realizada previamente pela empresa Fonntes.

No que tange a litologia aflorante na área investigada, foram identificados os filitos prateados da Formação Cercadinho, disposto em porções predominantemente mais micáceas, sedosas ao toque, com algumas intercalações mais arenosas. De maneira geral se apresenta muito brando, sendo que majoritariamente, na área de estudo, são observadas maiores abrangências de solos residuais e saprólitos que fazem referência a essa litologia. Em alguns casos, devido a presença do movimento de rastejo, o saprólito apresenta indícios de remobilização a jusante com deposição nas porções mais baixas e de meia encosta, onde podem ser descritos como colúvio.

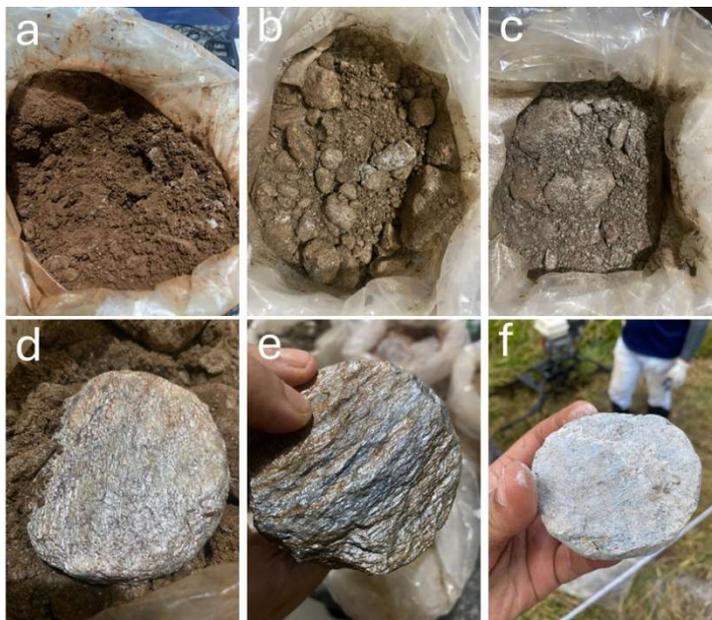
Também foram observados diversos indícios da ocorrência de rastejo nas edificações próximas a área investigada, como por exemplo, trincas de tração na escola e movimentação relativa entre os prédios, como os identificados pela CPRM em junho de 2016. O acesso as imediações da escola encontram-se restritos devidos ao comprometimento da estabilidade do das construções e, portanto, utilizaram-se imagens obtidas pela CPRM durante inspeção realizada previamente.

De acordo com os resultados obtidos nas sondagens, foi possível distinguir os materiais, que se apresentam como produto de alteração de filito prateado, com porfiroblastos de magnetita e alguns veios de quartzo.

As classificações permitiram dividi-los em solo residual maduro e saprólito (residual jovem), de acordo com o seu grau de alteração, que localmente mostraram algumas porções com feições de remobilização provocada pela movimentação de rastejo. No entanto, por se tratar de um estudo inicial, com a execução de furos pontuais, optou-se por não separar o colúvio do solo residual.

Sendo assim, caracterizou-se o solo residual maduro de filito, como um solo residual predominantemente silto-argiloso a silto-arenoso, de coloração castanho a castanho acinzentado, pouco plástico, sedoso, de consistência mole a média (Figura 46a). O saprólito de filito (Figura 46b,c,d) foi caracterizado, como predominantemente siltoso a silto-arenoso, de coloração castanho acinzentado, nas porções mais alteradas e cinza nas porções mais preservadas, além de se diferenciar do solo residual maduro por possuir estruturas reliquias, da foliação, bem preservadas. Como característica foi possível observar porções de variado intemperismo, onde preservam-se núcleos menos alterados (Figura 46e,f) envoltos em frações mais alteradas. Por fim, observa-se também uma elevação nos índices de Nspt no saprólito, que variam de 20 a 37, enquanto o solo residual apresentou índice Nspt abaixo de 10 golpes. O topo rochoso foi identificado pelo impenetrável ao amostrador SPT.

Figura 46 – Amostras coletadas no trado a) Solo residual de Filito. b) Saprólito de filito mais intemperizado. c) Saprólito de filito menos intemperizado. d) Fragmento de filito preservado no saprólito. e) Filito prateado da Formação Cercadinho. f) Testemunho de filito prateado retirado em campo.



Fonte: Autor.

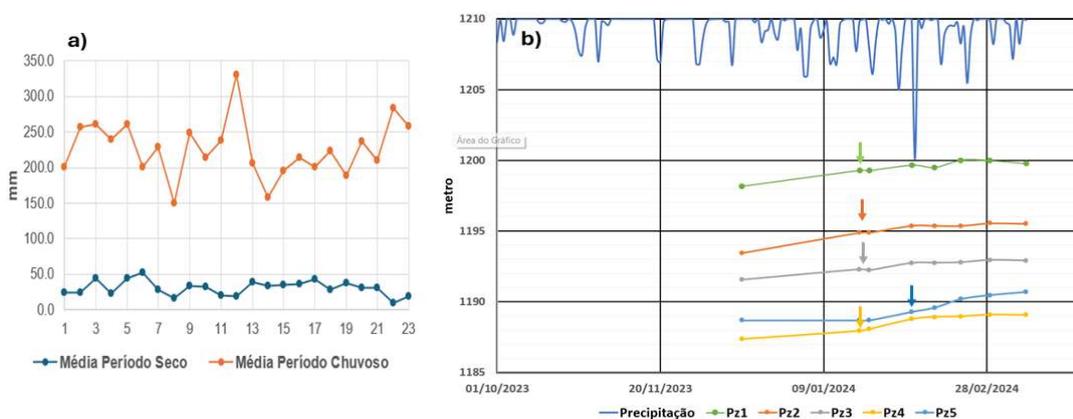
### 5.3 MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO

Ao longo do desenvolvimento do projeto, o entendimento foi guiado para a existência de um nível de água, próximo a superfície, que tivesse papel fundamental na propagação do movimento de rastejo. O nível de água é um fator determinante na instabilização de encostas à medida que pode ocasionar uma elevação da poropressão e a consequente diminuição das tensões efetivas no maciço, reduzindo assim o fator de segurança.

No entanto, durante a realização das campanhas de sondagem, não foram identificados níveis de água nos furos executados. Mesmo assim, partindo do princípio de que as sondagens foram executadas no período de seca, tendo em vista uma possível variação freática em estações chuvosas, foram instalados piezômetros de Casagrande nos furos próximos a base do saprólito. O monitoramento do nível d'água nestes piezômetros se iniciou em janeiro de 2024, conforme consta no Apêndice 6 ao Apêndice 10.

Segundo a Defesa Civil de Ouro Preto, o talude da área de estudo se instabilizou de forma mais intensa nos verões de 2011/2012 e 2021/2022, períodos que coincidem com o máximo de precipitação na estação chuvosa (Figura 47a). Os furos de sondagem a trado e percussão feitos entre junho e a primeira quinzena de dezembro de 2023 não identificaram água subterrânea. Quatro dos cinco piezômetros de Casagrande instalados na base do saprólito de alguns destes furos possibilitaram o registro de água no dia 20/01/24 (Figura 47b), data quando as mensurações foram retomadas em 2024. Por dificuldades logísticas, não foram feitas mensurações entre 15/12/23 (piezômetros ainda secos) e esta data, impossibilitando estabelecer quando a água subterrânea apareceu em cada instrumento. Mas como as chuvas aumentaram de frequência e intensidade a partir de 21 de dezembro (Figura 47b), é possível que a água tenha surgido no manto inconsolidado a partir desta data.

Figura 47 - a) Médias semestrais de precipitação do período chuvoso (outubro a março) e seco (abril a setembro) para a cidade de Ouro Preto (dados da Defesa Civil de Ouro Preto). Os números de 1 a 23 na abcissa representam os anos dos finais da estação úmida (2012 a 2022). Notar que as maiores acumuladas de chuva ocorreram nas estações úmidas de 2011/2012 e 2021/2022; b) Dados piezométricos e de precipitação diária. As setas indicam a primeira data de medida em que o nível d'água foi inicialmente identificado nos piezômetros. Os valores de datas anteriores representam a base dos piezômetros que se encontravam secos, indicando uma possível altura máxima o nível d'água



Fonte: Autor e dados da Defesa Civil do município de Ouro Preto.

## 5.4 TOPOGRAFIA

Foi realizado um levantamento aéreo com drone para obter o modelo digital do terreno com resolução de 0,3 m. Sendo assim, aproveitaram-se das imagens obtidas para elucidar de maneira espacial a ocorrência da movimentação do terreno, com as feições inspecionadas em campo,

entre elas o empastilhamento do filito (Figura 48b), embarrigamento de contenções (Figura 48c) e os degraus de abatimento (Figura 48d e Figura 48e).

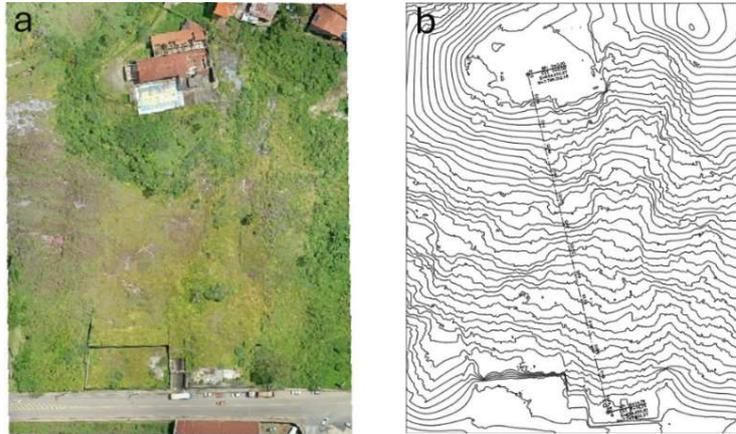
Figura 48 – a) Detalhe do filito prateado; b) afloramento do filito em processo inicial empastilhamento; c) muro de gabião tombado pelo processo de rastejo; d) afloramento de filito exposto em degrau de abatimento. e) Degrau de abatimento com mais de 1 m de amplitude; f) Foto oblíqua do talude, onde se observa a escola Padre Carmélio fundada em aterro (delimitado pela linha tracejada vermelha). Observar degraus de abatimento, indicadores de deformação retrogressiva, que são mais abundantes a montante de grandes cortes na base do talude.



Fonte: Levantamento aerofotográfico de drone, Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar.

Além das correlações do aerolevantamento com as feições vistas em campo, foi fundamental para o avanço do estudo a obtenção do modelo digital de elevação com a devida resolução, permitindo dessa forma a posterior confecção dos perfis topográficos da área, a fim de determinar a seção em um trecho avaliado como instável, denominado seção crítica, onde foram feitas as análises de estabilidade. Para tratamento dos dados foi utilizado o *software Autodesk Civil 3D* onde as curvas de nível foram inseridas, permitindo a projeção das sondagens e da seção crítica no terreno (Figura 49).

Figura 49 – a) Ortofoto tirada por drone na área. b) Curvas de nível obtidas resultantes do levantamento aéreo contendo a seção crítica da área.

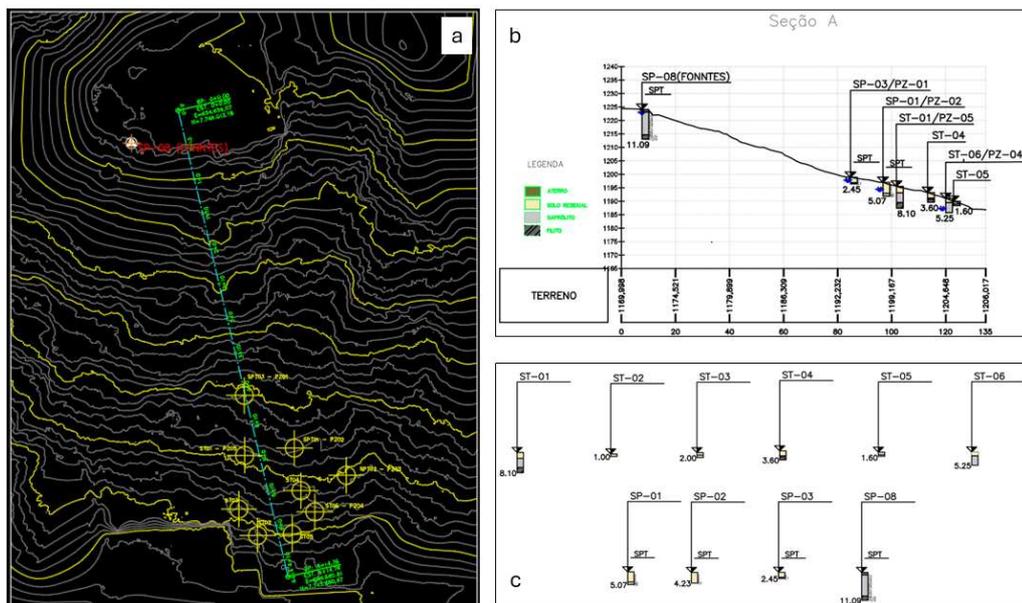


Fonte: Aerolevantamento de drone.

## 5.5 SEÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA

A seção geológico-geotécnica foi gerada com as sondagens e piezômetros adjacentes rebatidos (Figura 50).

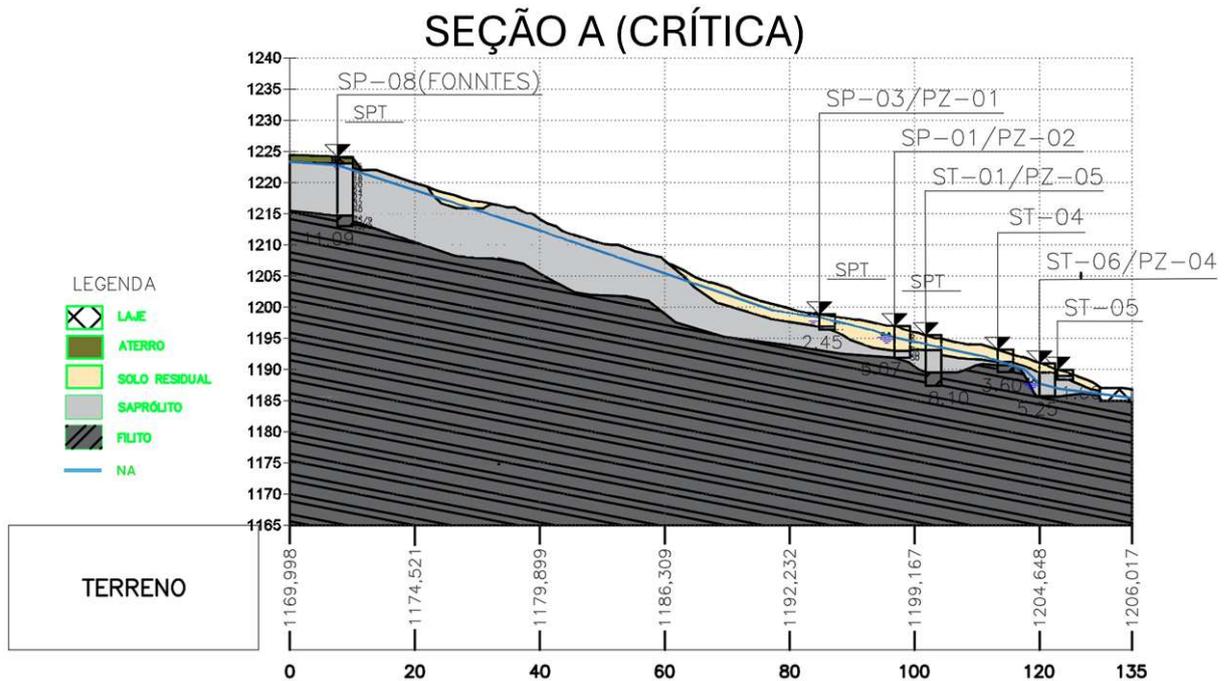
Figura 50 – a) Topografia levantada por drone inserida no Autodesk Civil 3D contendo a seção crítica (Seção A), sondagens e instrumentos realizados. b) Seção topográfica com as sondagens rebatidas, indicando profundidade máxima, descrição, nível de água e SPT, quando aplicável. c) Ilustração das sondagens utilizadas na confecção da seção.



Fonte: Autor, software Autodesk Civil 3D.

Após a confecção da seção topográfica foi realizada a interpretação geológica com os dados de sondagem e de levantamento de campo (Figura 51).

Figura 51 – Seção geológica interpretada de acordo com as sondagens e piezômetros.



Fonte: Autor, software Autodesk AutoCAD.

O nível de água utilizado na representação da seção acima foi o mais próximo da superfície que se obteve leitura dos instrumentos. O topo rochoso na área foi representado pelo filito prateado da Formação Cercadinho, identificado através das sondagens a trado e correlacionado com os trechos impenetráveis. Acima do filito foi identificada uma camada de saprólito que mantém características do protólito, como a foliação reliquiar. Compondo o trecho final do perfil de alteração do filito foi identificada a camada de solo residual, onde as estruturas reliquias são ausentes. Outras unidades são representadas na seção, como o aterro, onde a Escola Padre Carmélio está construída, e a laje de concreto na porção mais baixa da seção.

## 5.6 ANÁLISES DE ESTABILIDADE

Assumindo-se que o rastejo pode evoluir até desencadear um escorregamento (Chang *et al.*, 2008), optou-se por analisar a estabilidade deste talude com o método do equilíbrio-limite,

utilizando o *software Slide2*. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento já adotados para os filitos da Formação Cercadinho no relatório da empresa Fonntes (Tabela 5.2), foram utilizados nas interpretações. Analisou-se a estabilidade com três soluções clássicas (*Janbu*, *Spencer* e *GLE*) para três situações distintas de campo (Tabela 5.3, Figura 52, Figura 53 e Figura 54): (i) cobertura inconsolidada seca; (ii) cobertura inconsolidada com o nível piezométrico máximo medido no verão 2023/2024; (iii) e com nível piezométrico máximo possível, na superfície, em períodos de chuva acumulada mais intensa. Para a escola Padre Carmélio, construída sobre o aterro no topo do talude, foi imposta uma sobrecarga linear de 30kN/m<sup>2</sup>, seguindo recomendação da Hidros (2007).

Tabela 5.2 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento (Hidros, 2017).

	$\Psi$ (Kn/m3)	Coesão (kPa)	$\phi$ (°)
Aterro	16	9	32
Solo residual	19	6	23
Saprólito	20	10	25
Filito	23	150	35

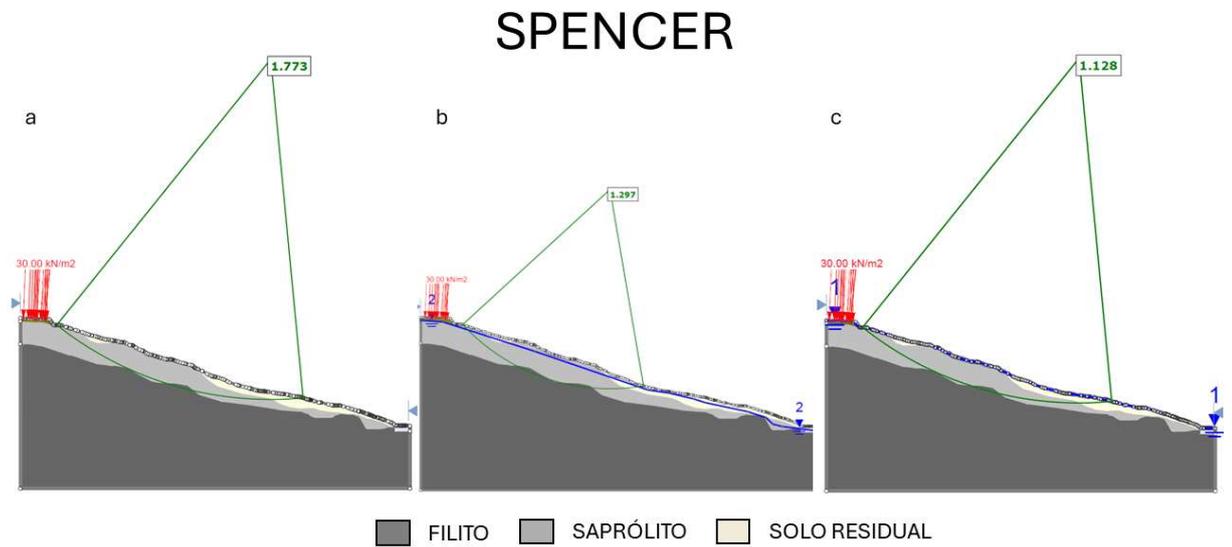
Fonte: Hidros, 2017.

Tabela 5.3 – Resultados dos Fatores de Segurança.

Fatores de Segurança			
Método	Seco	NA medido	NA máximo
Spencer	1.773	1.297	1.128
GLE	1.773	1.297	1.125
Janbu	1.728	1.215	1.097

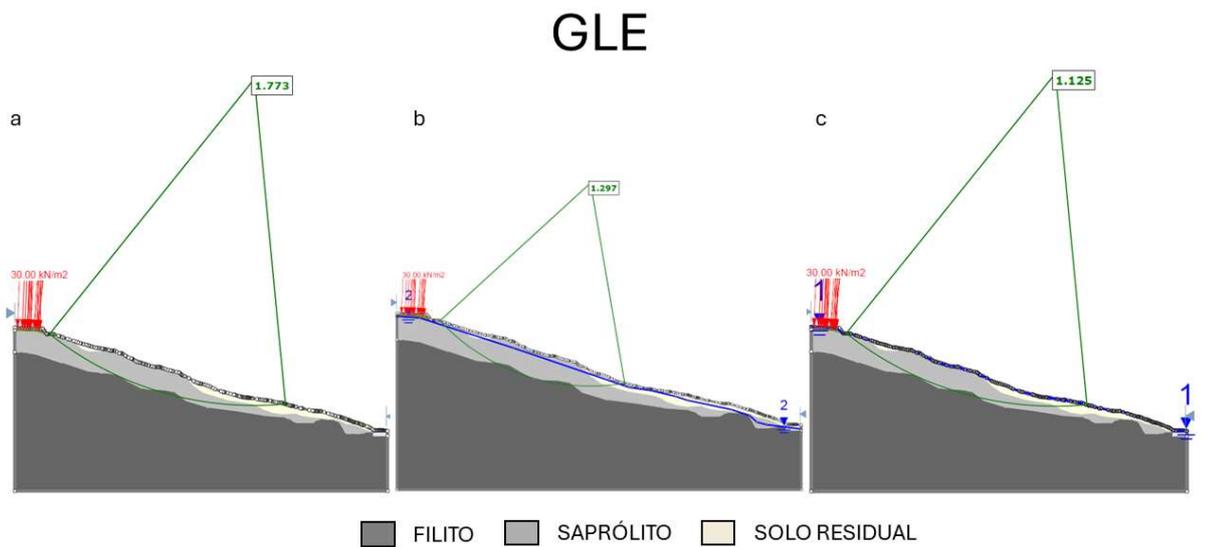
Fonte: Autor, *software Slide2*.

Figura 52 – Resultados das análises de determinação de fator de segurança por equilíbrio-limite com o método de busca *auto-refine* (*Spencer*) para diversas situações do manto inconsolidado: a) seco; b) nível d'água máximo medido no verão 2023/2024; c) nível d'água máximo possível.



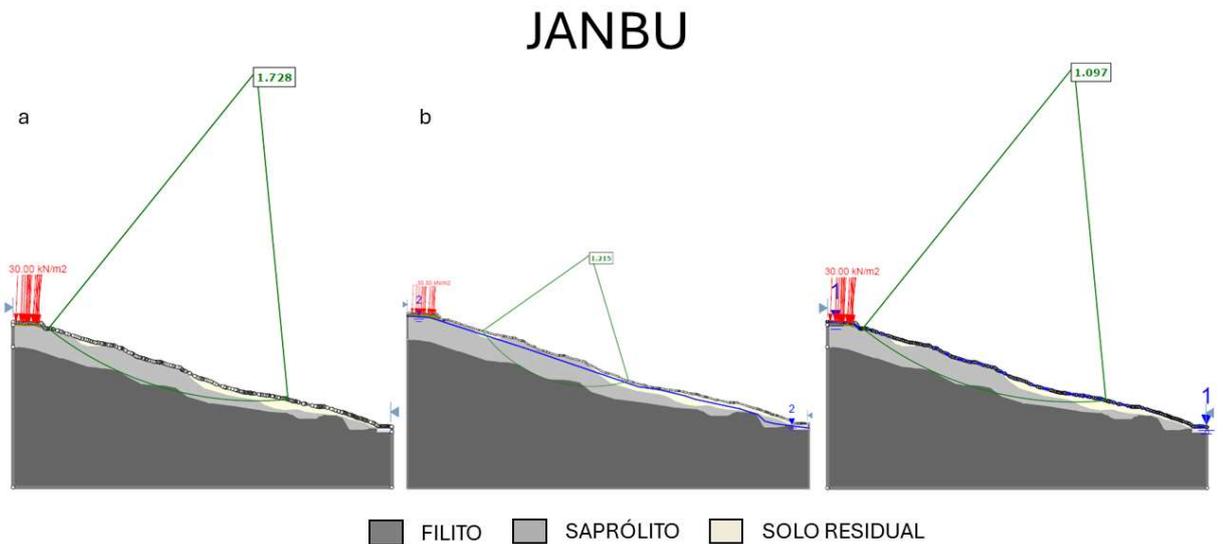
Fonte: Autor, *software Slide2*.

Figura 53 – Resultados das análises de determinação de fator de segurança por equilíbrio-limite com o método de busca *auto-refine* (*GLE*) para diversas situações do manto inconsolidado: a) seco; b) nível d'água máximo medido no verão 2023/2024; c) nível d'água máximo possível.



Fonte: Autor, *software Slide2*.

Figura 54 – Resultados das análises de determinação de fator de segurança por equilíbrio-limite com o método de busca *auto-refine* (*Janbu*) para diversas situações do manto inconsolidado: a) seco; b) nível d'água máximo medido no verão 2023/2024; c) nível d'água máximo possível.



Fonte: Autor, *software Slide2*.

Os resultados mostram que o fator de segurança se reduz até próximo de 1,0 para as três soluções consideradas na situação limite, com nível piezométrico na superfície. Isto comprova que o talude pode ser considerado de alto risco, suscetível do rastejo e desencadear um escorregamento de grandes proporções e considerável dano social e econômico. Uma possível ação mitigadora, a ser futuramente avaliada, é a adoção de drenos horizontais profundos para impedir a subida do nível d'água. Contudo, é importante destacar que pairam muitas dúvidas quanto à acurácia dos parâmetros de resistência adotados nesta análise. O ideal seria desenvolver a análise de estabilidade com parâmetros de resistência determinados em laboratório para amostras indeformadas coletadas em campo. Contudo, deve-se considerar que os parâmetros de resistência para aceleração do rastejo, que ocorre sob tensões aplicadas num intervalo de tempo maior, tendem a ser inferior a resistência de pico e maior que a resistência residual determinada em ensaios laboratoriais (Chang *et al*, 2008). Faz parte da continuidade do projeto prosseguir com a determinação destes parâmetros bem como adensar o volume de dados em subsuperfície (sondagens e levantamentos de eletrorresistividade) para incrementar o modelo conceitual para obter resultados mais assertivos.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

---

O presente trabalho de conclusão de curso visou avaliar a estabilidade de um talude na área urbana do município de Ouro Preto, MG, levando em consideração a geologia local, características geotécnicas e metodologias para cálculos de fatores de segurança associados a diferentes condições de saturação dos maciços. Para realização dos estudos foram desenvolvidas diversas técnicas de investigação geológica, entre elas fotointerpretações, sondagens, levantamentos geofísicos e instalação de instrumentos.

De acordo com a caracterização geológica e geotécnica, o talude em estudo é composto predominantemente por filitos da Formação Cercadinho, que apresentam variações de intemperismo e espessuras significativas de saprólito. Através das análises realizadas por meio de sondagens e trabalhos de escritório, confirmou-se a heterogeneidade do material, essencial para compreender o comportamento mecânico do talude. Uma das principais feições identificadas está relacionada com as trincas e descontinuidades presentes no material alterado dos filitos, que favorecem a infiltração de água.

A investigação do nível d'água foi fundamental para entender sua influência na estabilidade do talude. Durante o período de seca, os níveis de água não foram detectados nas sondagens, porém, com a instalação de piezômetros, foi possível observar a presença de água próximo à superfície durante a estação chuvosa. Este fator contribui para a redução das tensões efetivas e do fator de segurança, aumentando o risco de instabilidade do talude.

As análises de estabilidade utilizando os métodos de equilíbrio limite (Spencer, GLE e Janbu) revelaram que o fator de segurança se reduz significativamente em condições de máxima saturação, indicando que o talude pode ser considerado de alto risco, suscetível a rastejos e escorregamentos de grandes proporções.

Entre as ações mitigadoras sugeridas, destaca-se a implementação de drenos horizontais profundos para controlar a elevação do nível d'água, mitigando o risco de instabilidade. No entanto, a acurácia dos parâmetros de resistência adotados nas análises deve ser melhorada, idealmente com a determinação de parâmetros em laboratório para amostras indeformadas.

A continuidade dos estudos é essencial para aumentar a precisão dos modelos conceituais e dos resultados de estabilidade. Investigações adicionais, como sondagens complementares e levantamentos de eletrorresistividade, são recomendadas para adensar o volume de dados em subsuperfície e aprimorar o entendimento da dinâmica do talude.

De acordo com os resultados obtidos, foi possível concluir que os movimentos de rastejo na região de Ouro Preto são influenciados principalmente pela infiltração de água, condicionada pela pluviosidade, que aumenta a pressão de poros, reduz a resistência ao cisalhamento e aumenta o peso específico do maciço, levando à instabilidade dos taludes. Solos argilosos, como o do filito, mostram-se particularmente vulneráveis. Atividades antrópicas, como cortes e aterros, agravam essa instabilidade, destacando a importância de se considerar fatores geológicos, geotécnicos e climáticos na análise desses movimentos.

Este estudo contribui para a geotecnia urbana ao fornecer uma análise detalhada de um talude em área urbana, destacando a importância do monitoramento contínuo e da implementação de medidas preventivas. Os resultados obtidos reforçam a necessidade de estratégias integradas de gestão de riscos geológicos em áreas urbanas suscetíveis a movimentos de massa. Em resumo, a investigação geológico-geotécnica do talude em Ouro Preto revelou a complexidade dos fatores que influenciam sua estabilidade, sendo que, as recomendações fornecidas visam não apenas mitigar os riscos atuais, mas também orientar futuras intervenções para garantir a segurança e sustentabilidade da ocupação urbana na região.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABRAMSON, L. W.; LEE, T. S.; SHARMA, S.; BOYCE, G. M. *Slope stability and stabilizations methods*. Nova York: John Wiley & Sons, 1996.

ALMEIDA, L. G.; CASTRO, P. de T. A.; ENDO, I.; FONSECA, M. A. O Grupo Sabará no sinclinal Dom Bosco, Quadrilátero Ferrífero: uma revisão estratigráfica. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 35, n. 2, p. 177-186, 2005.

ALMEIDA, F. F. M. de. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 7, p. 439-463, 1977.

AUGUSTO FILHO, O. Carta de risco de escorregamentos quantificada em ambiente de SIG como subsídio para planos de seguro em áreas urbanas: um ensaio em Caraguatatuba, SP. 2001. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE/UNESP), Rio Claro, 2001. 196 p.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas, 1., 1992, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ABMS/ABGE/PUCRJ, 1992, v. 2, p. 721-733.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de taludes. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (Org.). *Geologia de Engenharia*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. Cap. 15, p. 243-269.

BIGARELLA, J. J. *Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais*. 2. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. 552 p.

BORTOLOZO, C. A. Inversão conjunta 1D e 2D de dados de Eletrorresistividade e TDEM aplicados em estudos de hidrogeologia na Bacia do Paraná. 2016. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. 293 p.

BRAGA, A. C. O. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática. 2006. Tese (Livre-docência) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 121 p.

BRAGA, A. C. O. B. *Geofísica Aplicada: Métodos geoeletricos em Hidrogeologia*. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 160 p.

BRASIL. CELSO SANTOS CARVALHO (Org.). *Mapeamento de Risco em Encostas e em Margem de Rios*. Brasília: Ministério das Cidades/Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2007. 176 p.

CAJAZEIRO, J. M. D.; PARIZZI, M. G.; NOGUEIRA, C. A.; ABREU, M. L. de; VIANNA, C. S. Chuvas e escorregamentos em Belo Horizonte. In: SIBRADEN - Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais e Tecnológicos, 2., 2007, Santos. Anais do 2 SIBRADEN. São Paulo: ABGE, 2007. p. 1-12.

CARVALHO, E. T. Carta geotécnica de Ouro Preto. 1982. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nova de Lisboa, 95 p.

CARVALHO, P. A. S. de. *Manual de Geotecnia: Taludes e Rodovias: Orientação para Diagnóstico e Soluções de Seus Problemas*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991. (Publicação IPT; n. 1843).

CASTRO, J. M. G. Pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de Ouro Preto. *Revista Brasileira de Geociências*, p. 9-44, 2006.

COSTA, E. B. da. Totalidade urbana e totalidade-mundo. As cidades coloniais barrocas face à patrimonialização global. 2011. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, 2011.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. In: TURNER, A.; SCHUSTER, R. L. (Org.). *Landslides: investigation and mitigation*. Washington, DC: Transportation Research Board, 1996. v. 2, p. 36-75.

CRUDEN, D. M. A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, v. 43, p. 27-29, 1991.

DAHLIN, T.; ZHOU, B. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, v. 52, p. 379-398, 2004.

DELMONACO, G.; IPPOLITO, F.; MARGOTTINI, C. The CEC Project. Meteorological Factors influencing slope stability and slope movement type: evaluation of hazard prone areas. In: Review Meeting of Hydrological and Hidrogeological Risks, 1., 1995, Brussels. Proceedings... Brussels, 1995. p. 259-283. Editado por R. Casale, Official Publications of European Communities.

DORR II, J. V. N. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington: US Geol. Surv., 1969. 110 p. (Prof. Pap. 641-A).

EHRlich, M.; COSTA, D. P.; SILVA, R. C. Behavior of a Colluvial Slope Located in Southeastern Brazil. *Landslides Journal*, Springer Berlin Heidelberg, 2018. 19 p.

ENDO, I.; GALBIATTI, H. F.; DELGADO, C. E. R.; OLIVEIRA, M. M. F. de; ZAPPAROLI, A. de C.; MOURA, L. G. B. de; PERES, G. G.; OLIVEIRA, A. H. de; ZAVAGLIA, G.; DANDERFER Fº, A.; GOMES, C. J. S.; CARNEIRO, M. A.; NALINI Jr., H. A.; CASTRO, P. de T. A.; SUITA, M. T. de F.; TAZAVA, E.; LANA, C. de C.; MARTINS-NETO, M. A.; MARTINS, M. de S.; FERREIRA Fº, F. A.; FRANCO, A. P.; ALMEIDA, L. G.; ROSSI, D. Q.; ANGELI, G.; MADEIRA, T. J. A.; PIASSA, L. R. A.; MARIANO, D. F.; CARLOS, D. U. Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000: Uma celebração do cinquentenário da obra de Dorr (1969). Ouro Preto: Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero, 2019a.

ENDO, I.; DELGADO, C. E. R.; OLIVEIRA, M. M. F. de; ZAPPAROLI, A. de C.; CARLOS, D. U.; GALBIATTI, H. F.; CASTRO, P. de T. A.; SUITA, M. T. de F.; BARBOSA, M. S. C.; LANA, C. E.; MOURA, L. G. B. de. Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. Ouro Preto: Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero, 2019b.

FELLENIUS, W. Calculation of stability of earth dams. In: CONGRESS ON LARGE DAMS, 2., 1936, Washington. Proceedings... Washington, 1936. v. 4, p. 445-463.

FIORI, A. P. *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes*. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 71 p.

FONSECA, A. R. Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica - Estudo de caso das barragens da UHE São Simão. 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.

FONSECA, M. A. da; SOBREIRA, F. G. Impactos físicos e sociais de antigas atividades de mineração em Ouro Preto, Brasil. *Geotecnia*, Lisboa, v. 92, p. 5-28, 2001.

FONTES, M. M. Contribuição para o desenvolvimento da metodologia de análise, gestão e controle de riscos geotécnicos para a área urbana da cidade de Ouro Preto. 2011. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

FREDLUND, D. G.; KRAHN, J. Comparison of slope stability methods. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 14, p. 429-439, 1977.

FREDLUND, D. G.; MORGENSTERN, N. R. Stress state variables for unsaturated soils. *Journal Geotechnical Div., ASCE*, v. 103, 1977.

GANDOLFO, O. C. B. Um estudo de imageamento geoeletrico na investigação rasa. 2007. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 215 p.

GEOTOMO SOFTWARE. Res2DINV ver. 4.00. Disponível em: <<https://www.geotomosoft.com/downloads.php>>. Acesso em: 5 nov. 2019.

GERSCOVICH, D. M. S. *Estabilidade de Taludes: Princípios e Aplicações*. Elsevier, 2008.

GERSCOVICH, D. M. S. *Estabilidade de taludes*. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GOMES, R. C.; ARAÚJO, L. G.; BONUCCELLI, T.; SOBREIRA, F. G. Condicionantes Geotécnicos do Espaço Urbano de Ouro Preto / MG. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 11., 1998, Brasília. Anais... Brasília: ABMS, 1998. p. 363-370.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo: Edgard Blucher, 1983.

HASUI, Y.; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M.; BARTORELLI, A. (Org.). *Geologia do Brasil*. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 2012.

HG, E. Execução da sondagem. *Construção Civil*, 2011. Disponível em: <<http://www.construcaocivil.com.br>>. Acesso em: 3 jan. 2024.

HIGHLAND, L.; BOBROWSKY, P. Serviço Geológico dos Estados Unidos (Org.). *O Manual do Deslizamento: Um Guia para a Compreensão do Deslizamento*. Reston, Virgínia: USGS (U.S. Geological Survey), 2008. 156 p.

IGA. Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. Desenvolvimento ambiental de Ouro Preto – Microbacia do Ribeirão do Funil. Belo Horizonte: CETEC - Minas Gerais, 1995.

JANBU, N. Stability analysis of slopes with dimensionless parameters. 1954. Thesis for the Doctor of Science in the Field of Civil Engineering, Harvard University Soil Mechanics Series, No. 46.

KEAREY, P.; BROOKS, M.; HILL, I. *Geofísica de exploração*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. 438 p.

LACERDA, W. A. Fatigue of residual soils due to cyclic pore pressure variation. In: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 12., 1989, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: ISSMFE, 1989. p. 3085-3087.

LACERDA, W. A.; SANDRONI, S. S. Movimento de Massas Colúvias. *Anais da Mesa Redonda sobre Aspectos Geotécnicos de Encostas*, v. 3, p. 1-19, 1985.

LACERDA, W. A. Stability of Natural Slopes along the Tropical Coast of Brazil. In: Symposium on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, 1997, Rio de Janeiro. Proceedings... Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 1997. p. 17-40.

LACERDA, W. A. The Behavior of Colluvial Slopes in a Tropical Environment. *Landslides – Advances in Evaluation and Stabilization: Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides*, v. 2, p. 1315-1342, 2004.

LACERDA, W. A. Landslide initiation in saprolite and colluvium in southern Brazil: Field and laboratory observations. *Geomorphology*, v. 87, n. 3, p. 104-119, 15 jun. 2007.

LOKE, M. H. *Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*. Geotomo Software, 2004.

MOREIRA, C. A.; BRAGA, A. C. de O.; HANSEN, M. A. F. Estimativa do tempo de produção de chorume em aterro controlado por meio de medidas de resistividade elétrica. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 41, p. 549-557, 2016.

MORGENSTERN, N. R.; PRICE, V. E. The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, v. 15, n. 1, p. 77-93, 1965.

OLIVEIRA, L. D. Ocupação urbana de Ouro Preto de 1950 a 2004 e atuais tendências. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

PARIZZI, M. G. Condicionantes e mecanismos de ruptura em taludes da região Metropolitana de Belo Horizonte, MG. 2004. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 213 p.

PINHEIRO, A. L.; SOBREIRA, F. G.; LANA, M. S. Influência da expansão urbana nos movimentos em encostas na cidade de Ouro Preto, MG. *Revista Escola de Minas*, v. 56, n. 3, p. 169-174, 2003.

REYNOLDS, J. M. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley & Sons, 2011.

SALGADO, M. Ouro Preto: Paisagem em transformação. 2010. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SANTANA, M. M. As bordas da cidade colonial: Um estudo da paisagem tombada de Ouro Preto-MG. 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012. 129 p.

SHARPE, C. F. S. Landslides during earthquakes due to liquefaction. *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, v. 94, n. SM5, p. 1055-1122, 1938.

SILVA, J. P. M. Os métodos de equilíbrio-limite e dos elementos finitos na análise de estabilidade de taludes. 2011. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 173 p.

SILVA, R.; PEREIRA DA COSTA, D.; EHRLICH, M. Movimentação de rastejo e proposta de estabilização de um depósito de solo residual de filito. *COBRAMSEG*, 2018.

SILVA, Naiara de Lima. Correlação entre pluviosidade e movimentos gravitacionais de massa no Alto Ribeirão do Carmo/MG. 2015. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

SOBREIRA, F. G. et al. Divulgação do acervo arqueológico de mineração no período colonial em Ouro Preto e Mariana. *Revista Ciência em Extensão*, v. 10, n. 1, p. 17-36, 2014.

SOBREIRA, F. G.; FONSECA, M. A. Impactos físicos e sociais de antigas atividades de mineração em Ouro Preto, Brasil. *Revista Portuguesa de Geotecnia*, n. 92, p. 5-28, 2001.

SOBREIRA, F. G. Urban landslide as a consequence of old mining in Ouro Preto, Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM OF LANDSLIDES, 6., 1992, Christchurch. Proceedings... Christchurch: IAEG, 1992. p. 1419-1422.

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. E. S.; ROCHA, M. C. M. Análise de Correlação entre Chuvas e Escorregamentos – Serra do Mar, Município de Cubatão. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5., 1987, São Paulo. Anais... São Paulo: ABGE, 1987. v. 2, p. 225-236.

TOMINAGA, L. K.; PEJON, O. J.; BASTOS, C. A. (Coord.). Diagnóstico preliminar da cartografia geotécnica e geoambiental no Brasil. In: PEJON, O.; ZUQUETTE, L. (Org.). *Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental*, 5., 2004, São Carlos. Anais... São Carlos: UFSCar, 2004. p. 01-20.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Org.). *Desastres Naturais: Conhecer para prevenir*. 2. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2012. 196 p.

TERZAGHI, K. *Theoretical Soil Mechanics*. New York: John Wiley & Sons, 1943.

VARNES, D. J. *Landslide Hazard Zonation: Review of Principles and Practice*. Paris: UNESCO Press, 1984. 56 p.

VARNES, D. J. Landslides Types and Processes. In: ECKEL, E. B. (Org.). *Landslides and Engineering Practice*. Special Report n° 29, Highway Research Board, p. 20-47, 1978.

ZHU, D. Y. Investigations on the accuracy of the simplified Bishop method. In: CHEN, Z.; et al. (Org.). *Landslides and Engineered Slopes*. London: Taylor & Francis Group, 2008. p. 1055-1057.

## APÊNDICES

Apêndice 1 – Descrição das sondagens à trado, executadas na área de estudo.

DESCRIÇÃO DE SONDAGENS A TRADO (SIRGAS 2000 UTM 23S)						
Furo: ST-01		UTM X: 654678	UTM Y: 7745913	Nível de água: Seco	Data:14/06/2023	Profundidade: 8.10
Profundidade (m)		Camada (m)	Descrição			Geologia
0.00	1.50	SR	Solo residual, silto arenoso, com areia muito fina, castanho acinzentado, silto-arenoso, com fragmentos de filito.pouco plástico			Fm. CERCADINHO
1.50	2.00		Solo residual areno-siltoso, castanho avermelhado, sem plasticidade, fragmentos de rocha. Muito arenoso. Fragmentos de poções mais arenosas.			
2.00	2.40		Solo residual, castanho escuro (avermelhado) silto-arenoso, alguns fragmentos de filito, pouco plástico.			
2.40	2.70	SP	Saprólito de filito prateado, cor cinza acastanhado, siltoso.			
2.70	5.00		Saprólito de filito prateado, com foliações bem marcadas, clivagem de crenulação, pórfiroblastos de granada.			
5.00	5.80		Saprólito, castanho escuro, silto-arenoso, diversos fragmentos			
5.80	6.00		Saprólito, castanho escuro, silto-arenoso, diversos fragmentos, mais quartzozo			
6.00	8.10	FL	Filito prateado, com foliação e clivagem de crenulação bem marcadas. Bandas mais quartzozas e micáceas alternadas			
8.10	-	<b>8.10 metros - FIM DO FURO</b> <b>OBS: Impenetrável ao trado</b>				

Furo: ST-02		Norte: 654679	Leste: 7745888	Nível de água: Seco	Data: 21/06/2023	Profundidade: 1.00
Profundidade (m)		Camada (m)	Descrição			Geologia
0.00	0.50	SR	Solo residual, silto-arenoso, com fragmentos de filito prateado, cor cinza acastanhado, pouco plástico.			Fm. CERCADINHO
0.50	1.00		Solo residual, silto-argiloso, com fragmentos de filito, cor castanho acinzentado, medianamente plástico, sedoso.			
1.00	-	<b>1.00 metro - FIM DO FURO</b> <b>OBS: Impenetrável ao trado. Ocorrência de material resistente (provavelmente laje, não recuperado)</b>				
Furo: ST-03		Norte: 654676	Leste: 7745900	Nível de água: Seco	Data: 22/06/2023	Profundidade: 2.00
Profundidade (m)		Camada (m)	Descrição			Geologia
0.00	0.70	SR	Solo residual de filito, silto-arenoso, com fragmentos de filito, cor castanho, pouco plástico, sedoso.			Fm. CERCADINHO
0.70	1.00		Solo residual de filito, silto-argiloso, com fragmentos de filito, cor castanho, pouco plástico, sedoso, muito siltoso (pouca argila)			
1.00	2.00	SP	Saprólito de filito, marrom acastanhado, fragmentos mais frequentes, (menos solo, mais saprólito), filito prateado com níveis mais quartzosos.			
2.00	-	<b>2.00 metros - FIM DO FURO</b> <b>OBS: Impenetrável ao trado</b>				

Furo: ST-04		Norte: 654693	Leste: 7745903	Nível de água: Seco	Data: 26/06/2023	Profundidade: 3.60	
Profundidade (m)	Camada (m)	Descrição				Geologia	
0.00	1.00	SR	Solo residual, castanho, siltoso, pouco plástico.				Fm. CERCADINHO
1.00	1.70		Solo residual maduro, marrom acastanhado, com alguns quartzos preservados, silto-arenoso.				
1.70	2.00		Solo residual, marrom acastanhado, com alguns fragmentos de filito. Silto arenoso.				
2.00	2.50	SP	Saprólito de filito, cinza, cor marrom acastanhado. Estruturas reliquiares presentes. Silto- arenoso.				
2.50	3.60	FL	Filito prateado, com foliação e clivagem de crenulação bem marcada. Pórfiroblastos de granada.				
3.60	-	<b>3.60 metros - FIM DO FURO</b> <b>OBS: Impenetrável ao trado</b>					
Furo: ST-05		Norte: 654691	Leste: 7745890	Nível de água: Seco	Data: 28/06/2023	Profundidade: 1.60	
Profundidade (m)	Camada (m)	Descrição				Geologia	
0.00	1.00	SR	Solo residual de filito, silto-arenoso, com fragmentos de filito, cor castanho, pouco plástico, sedoso.				Fm. CERCADINHO
1.00	1.60	SP	Saprólito de filito prateado, cor castanho acinzentado, silto-arenoso, pouco plástico, muito sedoso.				
1.60	-	<b>1.60 metros - FIM DO FURO</b> <b>OBS: Impenetrável ao trado</b>					

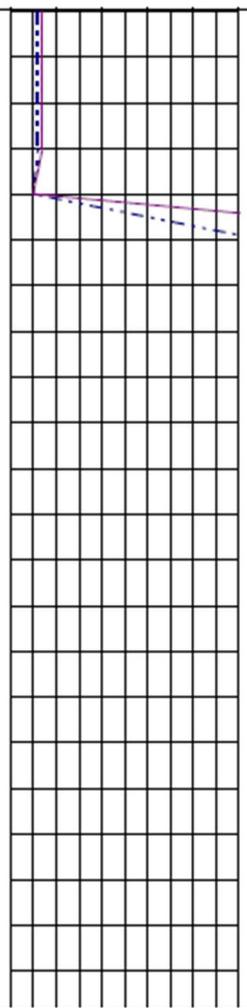
Furo: ST-06		Norte: 654699	Leste: 7745892	Nível de água: Seco	Data: 30/06/2023	Profundidade: 5.25
Profundidade (m)		Camada (m)	Descrição			Geologia
0.00	1.00	SR	Solo residual de filito, castanho escuro acinzentado, silto-arenoso, pouco plástico,			Fm. CERCADINHO
1.00	1.50		Solo residual de filito prateado, com porções mais quartzosas, textura silto-arenosa, cor castanho acinzentado, núcleos do protólito bem preservado.			
1.50	2.00	SP	Saprólito de filito prateado, textura silto-arenosa, cor castanho claro, núcleos do protólito bem preservado, estruturas bem preservadas.			
2.00	3.00		Saprólito de filito, muito fragmentado, bastante alterado, castanho escuro. Silto-arenoso.			
3.00	4.00		Saprólito de filito, bastante intemperizado, castanho acinzentado, silto-argiloso, medianamente plástico.			
4.00	5.25		Saprólito de filito, bastante intemperizado, castanho escuro, com núcleos de filito, silto-argiloso.			
5.25	-	<b>5.25 metros - FIM DO FURO</b> <b>OBS: Impenetrável ao trado</b>				

SR = Solo Residual. SP = Saprólito. FL = Filito.

Fonte: Autor.

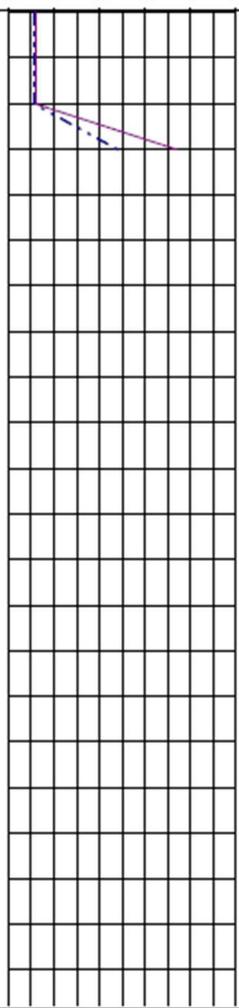


Apêndice 3 – Boletim de sondagem, referente a sondagem a percussão SP-02

		RCHP.044/23		<b>CLIENTE:</b> 								
Tel / Fax: (31) 3281-6033 / 3377-1180 / 99167-2146 E-mail: soll.engconsult@gmail.com www.sollengconsult.com.br		<b>OBRA:</b> RUA PADRE ROLIM B. SÃO CRISTOVÃO OURO PRETO - MG										
SONDAGEM DE SIMPLES RECONHECIMENTO SPT Ø 2 1/2" - NBR-6484/2020			COORDENADAS E: 654.713,00      N: 7.745.910,00		COTA: 1.177,60							
PROFUNDIDADE M	PERFIL AMOSTRA	NÍVEL D'ÁGUA	CAMADA M	CLASSIFICAÇÃO  SP - 02	GRÁFICO / 30 cm			Nº DE GOLPES / 15 cm				
					1º	2º	3º	SPT				
5,00	01 02 03 04	Não Foi Encontrado em 23/11/2023.	4,23	Silte argiloso, filito (xistoso), pouco arenoso, consistência mole a dura, cor cinza.  NOTA: Furo paralisado conforme descrito no item 5.2.4.2 da norma NBR 6484:2020 - Solo - Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT.  Impenetrável á percussão. Provável Matacão / Rocha.  Limite do furo - 4,23 m.	3	3	4					
10,00					12	30/08	—					
15,00												
20,00												
MARTELO 86 kg      REVESTIMENTO = 2,00 m QUEDA 76 cm      AMOSTRADOR = Ø 1.3/8" Ø 2"						SPT - - - - - I (INICIAL) ——— F (FINAL)						
ASSINATURA: ENGª NÚBIA RESENDE CÂMARA MARQUES CREA: MG-72285/D				N.A. (INICIAL) = N. F. E.      DES. CHP N.A. (FINAL) = N. F. E.      FL. 02/03		DATA: INÍCIO: 23/11/2023 TÉRM.: 23/11/2023						

Fonte: Empresa Soil.

Apêndice 4 – Boletim de sondagem, referente a sondagem a percussão SP-03

		RCHP.044/23	<b>CLIENTE:</b> 									
Tel / Fax: (31) 3281-6033 / 3377-1180 / 99167-2146 E-mail: soll.engconsult@gmail.com www.sollengconsult.com.br			<b>OBRA:</b> RUA PADRE ROLIM B. SÃO CRISTOVÃO OURO PRETO - MG									
SONDAGEM DE SIMPLES RECONHECIMENTO SPT Ø 2 1/2" - NBR-6484/2020			COORDENADAS E: 654.690,00      N: 7.745.916,00		COTA: 1.175,30							
PROFUNDIDADE M	PERFIL AMOSTRA	NÍVEL D'ÁGUA	CAMADA M	CLASSIFICAÇÃO  SP - 03	GRÁFICO / 30 cm			Nº DE GOLPES / 15 cm				
					1º	2º	3º	SPT				
			2,45	Silte argiloso, filito (xistoso), pouco arenoso, consistência média a dura, cor cinza.  NOTA: Furo paralisado conforme descrito no item 5.2.4.2 da norma NBR 6484:2020 - Solo - Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT.  Impenetrável á percussão. Provável Matacão / Rocha.  Limite do furo - 2,45 m.	3	3	3					
5,00		Não Foi Encontrado em 24/11/2023.			11	13	24					
10,00												
15,00												
20,00												
MARTELO 86 kg QUEDA 76 cm		REVESTIMENTO = 2,00 m AMOSTRADOR = Ø 1.3/8" Ø 2"		SPT - - - - - I (INICIAL) - - - - - F (FINAL)								
ASSINATURA: 				N.A. (INICIAL) = N. F. E.		DES. CHP FL. 03/03		DATA: INÍCIO: 24/11/2023 TÉRM.: 24/11/2023				
ENGª NÚBIA RESENDE CÂMARA MARQUES CREA: MG-72285/D				N.A. (FINAL) = N. F. E.								

Fonte: Empresa Soil.



Apêndice 6 – Dados de monitoramento do PZ-01

<b>PZ-01 (SP-03)</b>				
<b>Data</b>	<b>Leitura do Instrumento</b>	<b>Cota de Base</b>	<b>Cota de topo</b>	<b>Leitura manual (m)</b>
20/01/24	1199.29	1198.18	1200.5	1.21
23/01/24	1199.28	1198.18	1200.5	1.22
05/02/24	1199.66	1198.18	1200.5	0.84
12/02/24	1199.50	1198.18	1200.5	1.00
20/02/24	1200.00	1198.18	1200.5	0.50
29/02/24	1199.98	1198.18	1200.5	0.52
11/03/24	1199.77	1198.18	1200.5	0.73

Fonte: Autor.

Apêndice 7 – Dados de monitoramento do PZ-02

<b>PZ-02 (SP-01)</b>				
<b>Data</b>	<b>Leitura do Instrumento</b>	<b>Cota Base</b>	<b>Cota de topo</b>	<b>Leitura manual (m)</b>
20/01/24	1194.88	1193.44	1197.38	2.50
23/01/24	1194.88	1193.44	1197.38	2.50
05/02/24	1195.37	1193.44	1197.38	2.01
12/02/24	1195.37	1193.44	1197.38	2.01
20/02/24	1195.36	1193.44	1197.38	2.02
29/02/24	1195.54	1193.44	1197.38	1.84
11/03/24	1195.51	1193.44	1197.38	1.87

Fonte: Autor.

Apêndice 8 – Dados de monitoramento do PZ-03

<b>PZ-03 (SP-02)</b>				
<b>Data</b>	<b>Leitura do Instrumento</b>	<b>Cota de Base</b>	<b>Cota de topo</b>	<b>Leitura manual (m)</b>
20/01/24	1192.28	1191.55	1195	2.72
23/01/24	1192.22	1191.55	1195	2.78
05/02/24	1192.73	1191.55	1195	2.27
12/02/24	1192.75	1191.55	1195	2.25
20/02/24	1192.78	1191.55	1195	2.22
29/02/24	1192.94	1191.55	1195	2.06
11/03/24	1192.90	1191.55	1195	2.10

Fonte: Autor.

Apêndice 9 – Dados de monitoramento do PZ-04

<b>PZ-04 (ST-03)</b>				
<b>Data</b>	<b>Leitura do Instrumento</b>	<b>Cota de Base</b>	<b>Cota de topo</b>	<b>Leitura manual (m)</b>
20/01/24	1187.93	1187.35	1192.34	4.41
23/01/24	1188.06	1187.35	1192.34	4.28
05/02/24	1188.76	1187.35	1192.34	3.58
12/02/24	1188.92	1187.35	1192.34	3.42
20/02/24	1188.96	1187.35	1192.34	3.38
29/02/24	1189.08	1187.35	1192.34	3.26
11/03/24	1189.06	1187.35	1192.34	3.28

Fonte: Autor.

Apêndice 10 – Dados de monitoramento do PZ-05

<b>PZ-05 (ST-01)</b>				
<b>Data</b>	<b>Leitura do Instrumento</b>	<b>Cota de Base</b>	<b>Cota de topo</b>	<b>Leitura manual (m)</b>
20/01/24	-	1188.68	1196.81	-
23/01/24	-	1188.68	1196.81	-
05/02/24	1189.27	1188.68	1196.81	7.54
12/02/24	1189.57	1188.68	1196.81	7.24
20/02/24	1190.17	1188.68	1196.81	6.64
29/02/24	1190.45	1188.68	1196.81	6.36
11/03/24	1190.67	1188.68	1196.81	6.14

Fonte: Autor.