



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Urbana
Curso de Graduação em Engenharia Urbana



Vinícius Eleutério Rodrigues

**ESTUDO DE MOVIMENTO DE MASSA
GRAVITACIONAL DO TIPO RASTEJO NA ÁREA
URBANA DE CACHOEIRA DO BRUMADO,
MARIANA/MG**

Ouro Preto

2024

Estudo de movimento de massa gravitacional do tipo rastejo na área urbana de
Cachoeira do Brumado, Mariana/MG

Vinícius Eleutério Rodrigues

Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Urbana na Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 21/02/2024

Áreas de concentração: Geotecnia/Planejamento Urbano e Gestão Pública

Orientador: Prof^ª. D.Sc. Iraydes Tálita de Sena Nola – UFOP

Coorientador: Prof. D.Sc. Luis de Almeida Prado Bacellar – UFOP

Ouro Preto

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R696e Rodrigues, Vinicius Eleuterio.

Estudo de movimento de massa gravitacional do tipo rastejo na área urbana de Cachoeira do Brumado, Mariana/MG. [manuscrito] / Vinicius Eleuterio Rodrigues. - 2024.

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

Orientadora: Profa. Dra. Iraydes Talita de Sena Nola.

Coorientador: Prof. Dr. Luís de Almeida Prado Barcellar.

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

1. Ondas gravitacionais. 2. Mecânica do solo. 3. Geotecnia. 4. Geofísica. 5. Avaliação de riscos. I. Nola, Iraydes Talita de Sena. II. Barcellar, Luís de Almeida Prado. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 62:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



FOLHA DE APROVAÇÃO

Vinícius Eleutério Rodrigues

Estudo de movimento de massa gravitacional do tipo rastejo na área urbana de Cachoeira do Brumado, Mariana/MG

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Urbana

Aprovada em 21 de fevereiro de 2024

Membros da banca

Dra. Iraydes Tálita de Sena Nola - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Luis de Almeida Prado Bacellar - Coorientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Luiz Henrique Cardoso - (Universidade Federal de Ouro Preto)
M.Sc. Mateus Oliveira Xavier - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Profª Iraydes Tálita de Sena Nola, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/03/2024



Documento assinado eletronicamente por **Iraydes Talita de Sena Nola, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/03/2024, às 09:27, 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, informando o código verificador **0671747** e o código CRC **5115E4B0**.

Agradecimentos

Primeiramente venho agradecer a Deus, pela oportunidade de estar hoje concluindo uma etapa tão importante na minha vida, a sonhada graduação. Foi n'Ele que encontrei forças nos momentos difíceis e a Ele declaro toda honra e glória pela minha conquista.

Um agradecimento mais que especial aos meus pais e minhas irmãs, que nunca mediram esforços para me ajudar e sempre me incentivaram a realizar esse sonho.

Agradeço também a minha companheira de vida e hoje minha noiva, que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos, sejam eles felizes ou difíceis, mas que sempre me motivou a continuar, não importa o que aconteça.

De coração aberto e repleto de alegria eu agradeço hoje a todo o Departamento de Engenharia Urbana (DEURB), que está sempre buscando melhorias para o curso, alunos e professores. Um carinho especial por aqueles professores que marcaram minha vida de alguma maneira, em especial a orientadora desse trabalho, Professora Tálita, que me apoiou grandiosamente nessa conclusão do curso.

Agradeço também aquelas pessoas que contribuíram de alguma maneira para o desenvolver desse projeto, como o doutorando Yesser, que me auxiliou nos ensaios laboratoriais e de campo, além do meu coorientador, Professor Bacellar, sempre ajudando e buscando novas alternativas e pesquisas para continuar o trabalho. Agradeço a UFOP e a Fundação Gorceix, que me proporcionaram uma graduação de qualidade e de graça. Também agradeço à Fapemig (Processo APQ-01613-22) pela ajuda financeira essencial para o decorrer do projeto.

Por fim, obrigado Ouro Preto, pelas histórias que nunca vou esquecer, pelas pessoas que vão sempre ficar guardadas no peito, pelas oportunidades criadas e sonhos realizados.

Viva a Escola de Minas!!!

“Equilibrado num barranco um cômodo mal acabado e sujo, porém seu único lar, seu bem e seu refúgio”.

(Homem na estrada – Racionais MC's)

Resumo

Movimentos de massa gravitacionais são mundialmente conhecidos pelo seu grande poder de destruição e como uma das principais causas de desastres urbanos, principalmente no Brasil. Dentre os diversos tipos de movimentos, destaca-se o rastejo: movimento cujas principais características são: ser contínuo e lento. Por isso é dificilmente reconhecido e visualizado pela maioria da população, assim, acaba sendo negligenciado pela própria população e pelas autoridades competentes. Diante desse escopo é apresentada a área de estudo, localizada no distrito de Cachoeira do Brumado em Mariana, Minas Gerais, onde ocorre uma movimentação histórica característica de rastejo. Essa área foi identificada por indícios indiretos como postes e cercas inclinadas, trincas e recalques nas edificações e muros, e abatimento das vias próximas. O objetivo do presente trabalho é estudar, caracterizar e entender os princípios geotécnicos causadores do movimento de massa do tipo rastejo. Para isso, utilizou-se de ensaios de caracterização de solos (granulometria conjunta, limites de Atterberg, índices físicos, porosidade), boletins de sondagens SPT (Standard Penetration Test), além da utilização da geofísica pelo método do caminhamento elétrico para identificação do comportamento do nível d'água (NA) no subsolo. Obteve-se como resultado um solo apresentando seus grãos de tamanho argila formando grumos da dimensão de silte e de areia fina, dessa maneira, o solo natural, sem defloculante, é classificado como areia siltosa, enquanto sua granulometria se caracteriza como uma argila arenosa. O solo apresenta-se altamente poroso, com um índice de vazios alto, e alta permeabilidade, além do nível d'água encontrar-se próximo à superfície. A combinação desses fatores contribui de maneira conjunta para uma situação de risco iminente. Dessa forma, dentre as medidas a serem tomadas para diminuição dos impactos causados pelo movimento é a restrição construtiva, definindo diretrizes urbanísticas que proteja a área do crescimento populacional e a inclua no mapeamento das áreas de risco.

Palavras-chave: rastejo, caracterização geotécnica, eletrorresistividade, carta de risco

Abstract

Landslides are known worldwide for their destructive capability and as one of the main causes of urban disasters, mainly in Brazil. Among the different types of movements, creep stands out, whose main characteristics are being continuous and slow. For this reason, it is difficult to recognize and visualize by the majority of the population; thus, it neglected by the population itself and by government authorities. In light of this, the study area is presented, located in the district of Cachoeira do Brumado in Mariana, Minas Gerais, where a historical creep movement occurs. This creep was indicated by bent posts and fences, cracks in buildings and walls, and the collapse of nearby roads. The objective of this work is to investigate, characterize, and understand the geotechnical principles that cause creep. For this, soil characterization tests were used (granulometric analysis, Atterberg limits, physical indices, porosity), SPT (Standard Penetration Test) survey bulletins, in addition to the use of geophysics through the electric resistivity method to identify the water level underground. The result was a soil with clay-sized grains forming clumps the size of silt and fine sand. In this way, the natural soil, without a deflocculant, is classified as silty sand, while its grain size is characterized as sandy clay. A soil with geomechanical properties that represent a considerable danger stands out. The soil is highly porous, with a high void ratio and high permeability, in addition to the water level underground close to the surface. The combination of these factors collectively contributes to an imminent risk situation. Therefore, among the measures to be taken to reduce the impacts caused by the movement is construction restriction, defining urban guidelines that protect the area from population growth and include it in the mapping of risk areas.

Keywords: creep, geotechnical characterization, electric resistivity, risk map

Sumário

1. Introdução.....	9
1.1. Justificativa.....	10
1.2. Objetivos.....	11
2. Movimentos de massa gravitacionais	12
2.1. Classificação dos movimentos de massa	12
2.1.1. Quedas.....	12
2.1.2. Tombamentos	13
2.1.3. Escorregamentos	14
2.1.4. Escoamentos.....	16
2.2. Rastejo e suas consequências	17
2.3. Agentes e causas de instabilização	22
3. Caracterização geotécnica do movimento	24
3.1. Caracterização dos solos.....	25
3.1.1. Análise granulométrica conjunta.....	27
3.1.2. Limites de Atterberg.....	28
3.1.3. Massa específica dos grãos	30
3.1.4. Outros índices físicos	31
3.1.5. Permeabilidade	31
3.2. Investigações geotécnicas.....	33

3.2.1. Sondagem à percussão (SPT - <i>Standard Penetration Test</i>).....	33
3.2.2. Método de Eletrorresistividade	34
4. Caracterização da área de estudo.....	37
5. Materiais e métodos.....	50
5.1. Ensaio de caracterização geotécnica.....	52
5.2. Investigações Geotécnicas.....	64
6. Resultados e discussões	71
6.1. Análise granulométrica	71
6.2. Limite de Atterberg	72
6.3. Índices físicos e classificação do solo.....	72
6.4. Caracterização geotécnica	76
6.5. Seções geofísicas.....	78
6.6. Carta de risco geotécnico	82
7. Conclusão	85
8. Referências	87

1. Introdução

Movimentos de massa gravitacionais são mundialmente conhecidos pelo seu grande poder de destruição e como uma das principais causas de desastres urbanos, principalmente no Brasil. Esse processo geodinâmico é produto das modificações do terreno ao longo do tempo provocados por agentes como a chuva, os ventos, as ondas, os rios e etc (Oliveira e Monticeli, 2018). Em lugares onde a geomorfologia manifesta-se por relevos acidentados e a pluviosidade é alta, esses movimentos se tornam muito comuns.

Os movimentos de massa têm se tornado cada vez mais comuns em meios urbanos, isso porque as cidades passaram por uma crescente intensificação da ocupação urbana devido ao aumento populacional e à falta de planejamento e ordenamento territorial. Em consequência, muitas famílias passaram a habitar precariamente locais com maior suscetibilidade a esses movimentos.

As populações que habitam as áreas de risco são, principalmente, de baixa renda e negra. Habitam essas áreas não por opção, mas em resultado à falta de políticas e ações do poder público que garantam o acesso à terra e moradia em condições adequadas. Como nos explica Ermínia Maricato (2001), esse processo de urbanização excludente tem raízes lá no período pré-republicano, desde a Lei de Terras de 1850 (que garante o acesso à terra apenas por meio da compra) e a Lei Áurea de 1888, fala da abolição da escravatura, que não foi acompanhada de políticas e ações para garantir o acesso à terra, moradia, educação, saúde (etc.) à população então escravizada. Como consequência então, as encostas, várzeas de rios, mangues (áreas de risco de forma geral) são ocupados pela população de baixa renda e negra como resultado do racismo ambiental. E é importante destacar isso, porque uma das primeiras ações do Poder Público, para além de mapear as áreas de risco, é desenvolver um cadastramento socioeconômico dos grupos sociais em risco para identificar as situações de realocação dentro de programas e políticas de habitação de interesse social, para as famílias de baixa renda.

Dentre os diversos tipos de movimentos que ocorrem no Brasil, destaca-se o rastejo: movimento cujas principais características são: ser contínuo e lento (poucos centímetros por ano). Por isso é dificilmente reconhecido e visualizado pela maioria da população,

assim, acaba sendo negligenciado pela própria população e pelas autoridades competentes.

Diante desse escopo é apresentada a área de estudo, localizada no distrito de Cachoeira do Brumado em Mariana, Minas Gerais, onde ocorre uma movimentação histórica característica de rastejo. Essa área foi identificada por indícios indiretos como postes e cercas inclinadas, trincas e recalques nas edificações e muros, e abatimento das vias próximas.

O contexto geológico-geotécnico do local apresenta uma problemática urbana com diversos agravantes, visto que afeta diretamente as residências que estão construídas sobre e adjacentes ao rastejo, forçando as famílias a deixarem o local, causando prejuízos financeiros e sociais, além da desvalorização imobiliária.

1.1. Justificativa

A ocupação urbana em áreas de risco geológico-geotécnico é uma questão preocupante no que tange o ordenamento territorial e o planejamento urbano das cidades. Os desastres urbanos causados pelos movimentos de massa gravitacionais nessas áreas afetam diversas cidades brasileiras causando perdas de vida além de danos materiais, sociais e econômicos. De acordo com o Serviço Geológico do Brasil – CPRM (2024), mais de 582 mil pessoas vivem em áreas de risco geológico em Minas Gerais. Ademais, os movimentos de massa do tipo rastejo que são caracterizados por serem lentos, com deslocamentos sazonais e de geometria indefinida, geram consequências graduais ao longo do tempo, o que provoca uma falsa impressão de segurança. Segundo Gonçalves (2014), estudar este movimento é importante, pois compreender sua dinâmica contribui para avaliar os eventuais riscos aos quais a população ao redor se encontra, uma vez que os rastejos, de modo geral, podem evoluir para processos erosivos mais complexos.

Tendo em vista o crescimento da ocupação urbana desordenada e as soluções geotécnicas desafiadoras quando se trata da estabilidade de rastejos, faz-se necessário uma caracterização adequada do movimento para entender os princípios que o desencadeia e suas principais propriedades, a fim subsidiar a tomada de decisão do poder público quanto à ocupação desta área de risco e suas consequências sociais, econômicas e territoriais.

Esta caracterização contribui para a definição futura de quais seriam as melhores políticas públicas para a região estudada buscando a produção de um ambiente urbano de qualidade e a garantia de segurança da população e de suas propriedades urbanas.

1.2. Objetivos

O objetivo do presente trabalho é estudar, caracterizar e entender os princípios geotécnicos causadores do movimento de massa do tipo rastejo que acontece no centro do distrito de Cachoeira do Brumado (Mariana/MG), fornecendo subsídios para a identificação do risco geológico-geotécnico da área e para proposição políticas públicas de planejamento e controle do uso e ocupação do solo urbano.

Pretende-se alcançar o objetivo geral a partir dos seguintes objetivos específicos:

- Realizar ensaios laboratoriais e investigações geotécnicas para caracterização do movimento;
- Delimitar a área de influência do movimento e definir os seus fatores condicionantes e seus agentes deflagradores;
- Analisar a influência do nível d'água subterrâneo no processo de movimentação do solo;
- Identificar e definir o risco geológico-geotécnico da área estudada.

2. Movimentos de massa gravitacionais

Movimentos de massa podem ser classificados como processos superficiais que deslocam um determinado volume de solo, rocha e/ou material, caracterizando-se como um dos maiores processos de alteração e de desenvolvimento de encostas (Guidicini e Nieble, 1984; Highland e Bobrowsky, 2008). Seu deslocamento possui sentido para baixo e para fora da encosta, sob influência direta da gravidade (Varnes, 1978). São processos atuantes na evolução de paisagens, mas que, ao mesmo tempo, podem causar perdas sociais e econômicas significativas (Záruba & Mencl, 1969; Selby, 1993).

A literatura apresenta diversas classificações de movimentos de massa gravitacionais, como a de Varnes (1978), que classifica os movimentos em: a) queda; b) tombamento; c) escorregamento; d) espalhamento; e) fluxo e f) deformação da encosta. A classificação de Varnes (1978) é uma das mais utilizadas, servindo como base de estudos e instruções para organizações internacionais ligadas ao assunto (Nola, 2015).

No Brasil, as classificações mais utilizadas são: Guidicini e Nieble (1984), IPT (1991) e Augusto Filho, 1992. Guidicini e Nieble (1984) tomaram como base o trabalho de Freire (1965) e definiram as classificações de movimentos de massa em 4 tipos: a) Escoamentos: rastejos e corridas; b) Escorregamentos: rotacionais, translacionais, queda de blocos e queda de detritos; c) Subsidências: subsidências, recalques e desabamentos; e d) Formas de Transição: movimentos complexos.

2.1. Classificação dos movimentos de massa

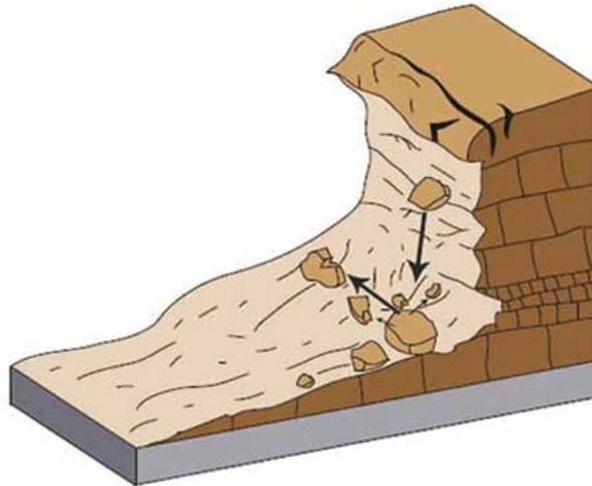
2.1.1. Quedas

São movimentos que ocorrem em penhascos verticais, ou taludes muito íngremes, no qual fragmentos de material gerados pelo intemperismo, geralmente rochosos, caem, de forma repentina, por ação da gravidade (Guidicini e Nieble, 1984; Augusto Filho, 1992). Segundo Guidicini e Nieble (1984), a movimentação pode ser definida por ação de queda livre a partir de uma elevação, sem que haja uma superfície por meio da qual o bloco se desloca.

De acordo com Guidicini e Nieble (1984), as quedas de blocos podem ser ocasionadas pela ação alternada de congelamento e degelo ao longo de fraturas e juntas, pelo

resfriamento e aquecimento dos materiais rochosos, por perda de apoio de blocos causados pela ação erosiva da água, por alívio de tensões de origem tectônica, mesmo em obras subterrâneas, por vibrações, por empuxo hidrostático ou, então, por combinação desses processos. A Figura 1 mostra a representação de uma encosta onde se desenvolve queda de bloco.

Figura 1 - Queda de bloco

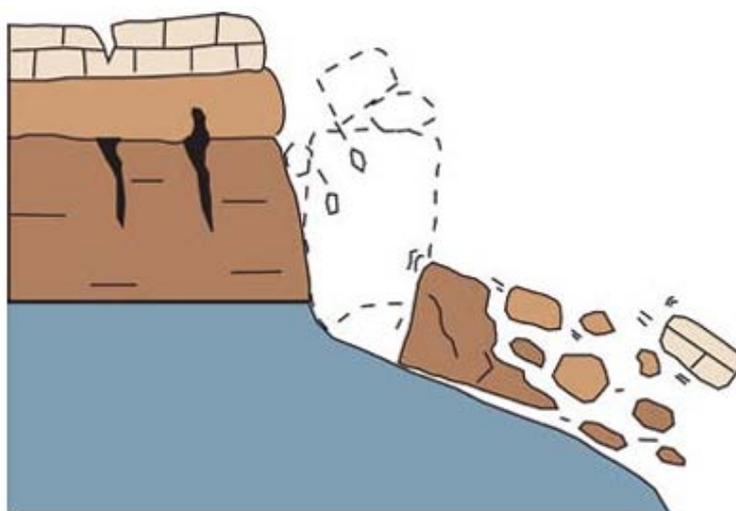


Fonte: Highland e Bobrowsky, 2008

2.1.2. Tombamentos

Um tombamento é caracterizado por uma rotação frontal de uma massa de solo ou rocha em torno de um ponto ou eixo localizado abaixo do centro de gravidade da massa deslocada (Figura 2). Esses movimentos são provocados pela ação da gravidade, que age sobre o peso do material na parte superior da massa deslocada. Os tombamentos podem deslocar rochas, detritos ou terra. Em alguns casos, a presença de água ou gelo nas fissuras da massa pode ser um fator contribuinte para o movimento. (Highland e Bobrowsky, 2008).

Figura 2 – Esquema de tombamento



Fonte: Highland e Bobrowsky, 2008

2.1.3. Escorregamentos

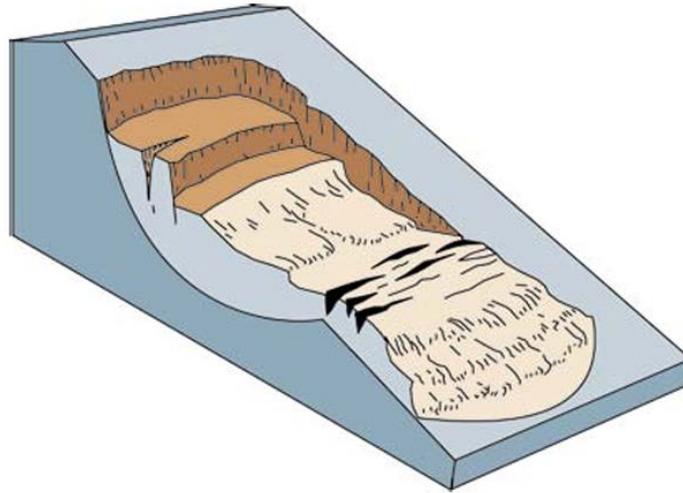
São movimentos de massa de solo ou rocha (ou uma combinação desses) que ocorrem sobre superfícies de ruptura causadas por deformação cisalhante. Tem como características: a duração relativamente curta, a ocorrência rápida e volumes de massa muito bem definidos (Guidicini e Nieble, 1984; Highland e Bobrowsky, 2008; Augusto Filho, 1992).

Os escorregamentos podem ser do tipo rotacional ou translacional:

Rotacional

O escorregamento rotacional é um tipo de movimento de massa em encostas em que a superfície de ruptura é curvada para cima, assemelhando-se a uma colher, e o deslocamento da massa é aproximadamente rotatório em torno de um eixo perpendicular ao contorno do talude (ver Figura 3). Esse tipo de movimento ocorre principalmente em materiais homogêneos, sendo comum em aterros. (Highland e Bobrowsky, 2008)

Figura 3 – Escorregamento rotacional



Fonte: Highland e Bobrowsky, 2008

Ele pode ser desencadeado por chuvas intensas e contínuas, degelo rápido, aumento do volume de água subterrânea devido ao enchimento de represas ou aumento do nível de rios e lagos. Terremotos também podem induzir esse tipo de escorregamento. Esses movimentos podem ser perigosos e fornecer monitoramento e medidas de prevenção para garantir a segurança das áreas próximas a encostas semelhantes a essas características. (Highland e Bobrowsky, 2008)

Em rochas, o escorregamento rotacional ocorre somente nas de baixa resistência, e muitas vezes acontece devido à sobrecarga de uma camada de rocha mais resistente. (Hungar, Leroueuill e Picarelli; Nola, 2015)

Translacional

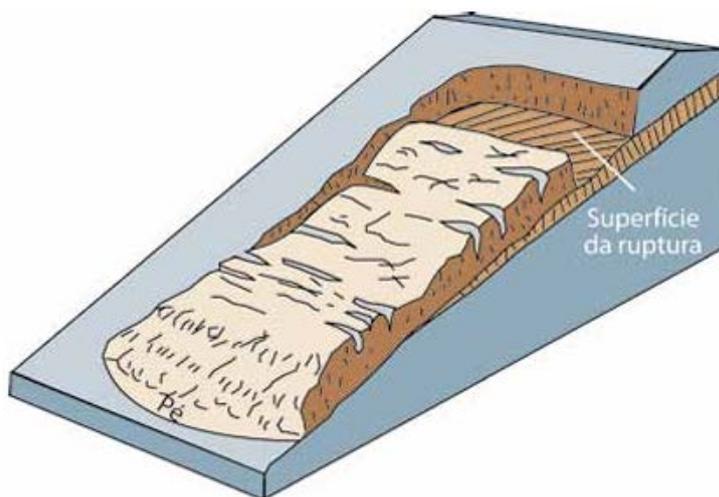
Os escorregamentos translacionais são um tipo de movimento de massa que se desloca ao longo de uma superfície relativamente plana, com pouco movimento rotacional ou inclinação para trás (Figura 4). Diferentemente dos movimentos rotacionais, que tendem a restabelecer o equilíbrio do deslizamento, os escorregamentos translacionais podem avançar por longas distâncias, se a superfície de ruptura for suficientemente inclinada. O material deslocado pode variar de solo solto e não adensado até grandes placas de rochas, ou a combinação desses. (Highland e Bobrowsky, 2008)

Highland e Bobrowsky (2008) diz que escorregamentos translacionais comumente ocorrem ao longo de descontinuidades geológicas tais como falhas, junções, descontinuidades, estratificações, ou o plano de contato entre rocha e solo.

Os escorregamentos translacionais se desenvolvem ao longo de superfícies planas que geralmente já existiam e foram condicionadas por características do substrato rochoso. A massa que desliza geralmente apresenta uma forma tabular. Os escorregamentos translacionais são caracterizados por serem de curta duração, com alta velocidade e grande poder de destruição (Guidicini e Nieble, 1984).

Segundo Guidicini e Nieble (1984), enquanto os escorregamentos rotacionais ocorrem, em geral, em taludes mais íngremes e têm extensão relativamente limitada, os escorregamentos translacionais podem ocorrer em taludes mais suaves e tendem a ser extensos.

Figura 4 – Esquema de escorregamento translacional.



Fonte: Highland e Bobrowsky, 2008

2.1.4. Escoamentos

É o movimento espacialmente contínuo nos quais os componentes de velocidade de massa que se desloca são semelhantes à de um líquido viscoso. Frequentemente, há uma mudança gradativa de escorregamentos para escoamentos, dependendo da quantidade de água presente, da mobilidade e evolução do movimento. (Highland e Bobrowsky, 2008)

De acordo com Highland e Bobrowsky (2008), os escoamentos se dividem nas seguintes categorias: Fluxo de detritos, Fluxo de Detritos Vulcânicos (*Lahars*), Avalanche de Detritos, Fluxo de Terra, Escoamentos em Subsolos Permanentemente Gelados e Rastejos (Creep).

Guidicini e Nieble (1984) classificam os escoamentos como corrida ou rastejo, diferenciando-se pela sua velocidade, sendo que corridas são formas rápidas de escoamento, de caráter essencialmente hidrodinâmico, ocasionado pela perda de atrito interno, em virtude da destruição da estrutura, em presença de excesso de água.

O rastejo, como é o tema principal desse trabalho, reservou-se o subitem a seguir para sua definição.

2.2. Rastejo e suas consequências

Guidicini e Nieble (1984) apresentam rastejos como movimentos lentos e contínuos de material de encostas com limites, via de regra, indefinidos. Podem envolver grandes massas de solo, como, por exemplo, os taludes de uma grande área, sem que haja, na área interessada, diferenciação entre material em movimento e material estacionário. Essa movimentação é provocada pela ação da gravidade com influência das variações de temperatura e umidade.

De acordo com Highland e Bobrowsky (2008), rastejo é o nome informal dado ao fluxo lento de terra e consiste em um movimento vagaroso, imperceptível e contínuo, causado por tensão de cisalhamento interna suficiente para provocar deformação, mas insuficiente para causar rupturas.

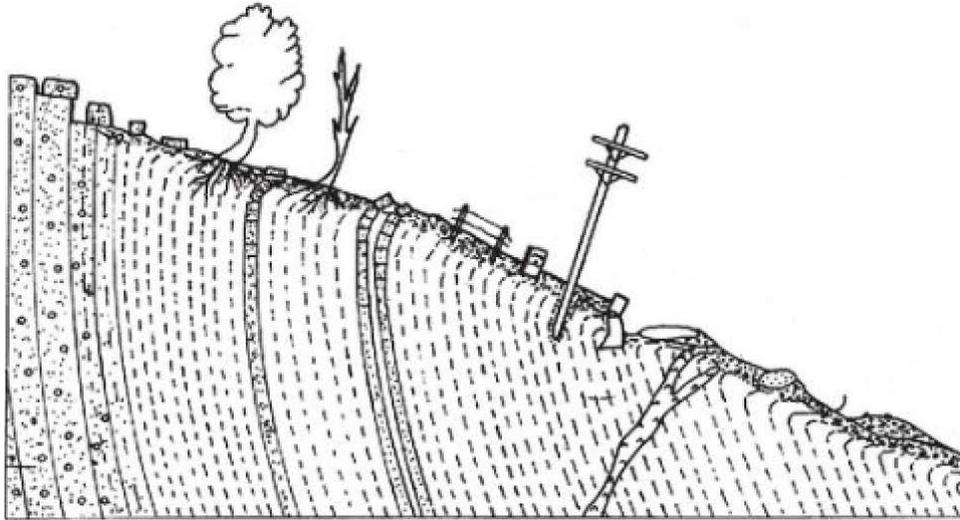
Highland e Bobrowsky (2008) mostram que geralmente existem três tipos de rastejo:

(1) sazonal, no qual o movimento ocorre no interior e no fundo do solo afetado por alterações sazonais, em sua mistura e temperatura; (2) contínuo, no qual a tensão de cisalhamento contínua excede a resistência do material; e (3) progressivo, no qual os taludes atingem o ponto de ruptura gerando outros tipos de movimentação do terreno.

O rastejo se evidencia, em superfície, por mudança na verticalidade de postes, cercas, muros, por árvores inclinadas e com troncos curvados, por trincas e rupturas em elementos rígidos, como muretas e paredes, como apresentado pela Figura 5. Esse

movimento pode ainda ter comportamento complexo, com velocidade não uniforme, aos pulsos, ou posteriormente se transformar em escorregamentos. (Guidicini e Nieble, 1984)

Figura 5 – Sinais que evidenciam a presença de rastejo, como troncos de árvores curvados e postes inclinados.



Fonte: Guidicini e Nieble, 1984

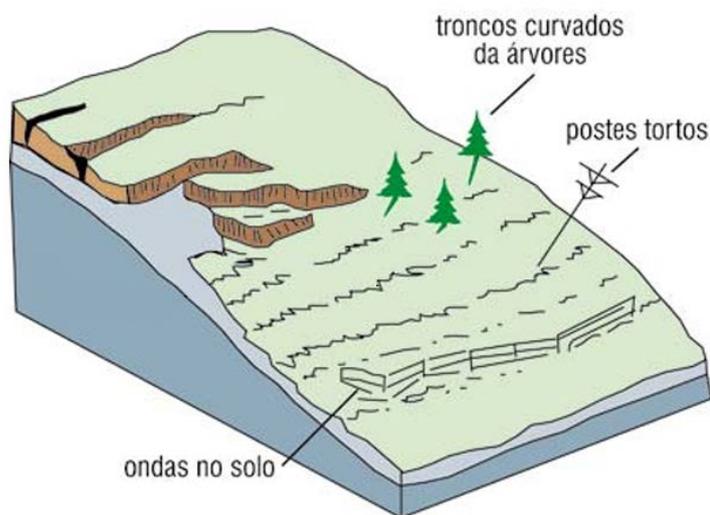
O processo de movimentação pode ser iniciado a partir de mudanças no teor de água em determinado volume de material, visto que essa mudança pode deslocar o centro de gravidade da massa. De maneira análoga, os rastejos podem cessar na estação seca (Guidicini e Nieble, 1984)

Difícilmente é possível definir os limites de um rastejo porque, por ser um movimento lento, dificilmente aparecem na superfície feições que representem deformações perceptíveis (Guidicini e Nieble, 1984).

Como mecanismos desencadeadores de rastejo, são citados por Highland e Bobrowsky (2008): a chuva e o degelo para rastejos sazonais; para os outros tipos pode haver inúmeras causas, como por exemplo condições climáticas, químicas ou físicas, vazamento de tubulações, drenagem ineficiente, tipos de construções desestabilizadoras etc.

A Figura 6 abaixo representa um esquema de rastejo.

Figura 6 – Esquema de rastejo



Fonte: Highland e Bobrowsky, 2008

Rastejos são comumente encontrados em áreas rurais, mas também está presente no meio urbano. Esse tipo de movimento se torna problemático nas áreas urbanas, visto que a sua estabilização é complexa e demanda um vasto estudo geotécnico. Por se tratar de um movimento lento e as vezes não uniforme, pode gerar recalque em vias e edificações, aparecendo trincas que podem afetar a estrutura das residências e condenando-as, obrigando os moradores a deixarem suas moradias. (Gonçalves, 2014)

Algumas pesquisas se dedicam a estudar os rastejos em encostas brasileiras do ponto de vista da caracterização do movimento e/ou da análise de estabilidade. Pode-se citar os trabalhos de Gonçalves (2014) que estudou um rastejo que ocorreu no Morro do Benjamin, em São José/SC e, Silva (2019) que realizou uma retroanálise de um movimento que se desenvolveu inicialmente por um rastejo no Morro da Praia Mole também em Santa Catarina.

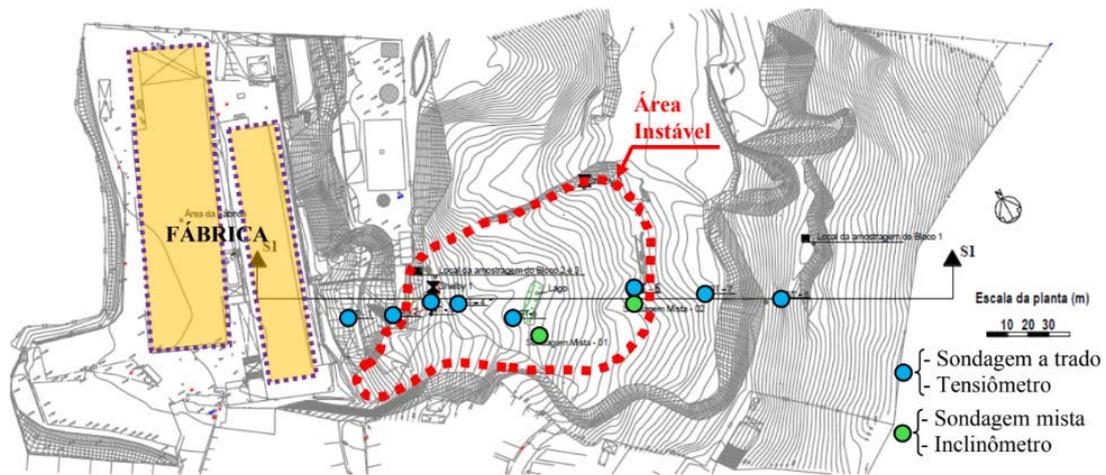
Outro estudo de rastejo encontrado na literatura é movimento citado por Issa (2019), que apresentou as manifestações patológicas na estrutura de concreto da Escola Básica Anísio Teixeira, em Florianópolis – SC. Por meio de sua pesquisa, constatou-se que as trincas e aberturas na estrutura da escola ocorrem devido a um rastejo que causa recalque no solo. Issa (2019) explica que o rastejo acontece pela presença de água no solo e apontou como

solução melhorias de drenagem e rebaixamento do nível d'água, com a utilização de drenos profundos, além da impermeabilização da área da encosta a montante da escola, diminuindo a influência das ações nocivas que a água causa.

Além desses exemplos, destaca-se também a movimentação de uma encosta na zona norte de São Paulo, devido ao rastejo. Um estudo feito por Ito, Godois e Futai (2012) apresentam a influência do nível d'água nessa movimentação. A encosta, localizada na Serra da Cantareira, passou por diversas intervenções antrópicas que desencadearam o rastejo. No início da década de 50, uma pedreira sondou a área visando exploração de rocha granítica, sem sucesso. Na década de 60, instalou-se uma fábrica no pé do talude. Na década de 70, a urbanização desordenada resultou em diversas famílias ocupando a área com risco geotécnico. Já na década de 80, ocorreu uma elevação no índice pluviométrico na região, desestabilizando as contenções construídas no local, sendo realizadas algumas obras a partir desse momento a fim de resolver o problema, sendo elas retaludamento, muro de arrimo e utilização de DHPs (drenos sub-horizontais profundos). Entretanto, essas obras estabilizaram apenas a parte próxima ao pé da encosta, sendo que a montante foi observado resquícios de DHPs destruídos por escorregamentos, o que indica forte influência do nível d'água.

Como consequência dessa situação, no ano de 2006, a prefeitura municipal de São Paulo retirou os moradores que ocupavam a área devido ao risco geotécnico associado. Não foi informado o número de pessoas retiradas. (Ito, Godois e Futai, 2012). O estudo comprovou que o nível d'água influenciou significativamente no fator de segurança (FS) do talude, mostrando que em período mais secos o FS chegou a 1,14, e que em períodos mais chuvosos chegou próximos de 1, indicando a estabilidade da encosta não é considerada satisfatória com base na norma brasileira NBR 11682/2009. (Ito, Godois e Futai, 2012). A Figura 7 demonstra a área instável de estudo e a localização da instrumentação utilizada para seus estudos.

Figura 7 – Planta topográfica da área de estudo



Fonte: Ito; Godois; Futai, 2012

Como visto, esses movimentos afetam o meio urbano em várias partes do Brasil, como por exemplo o clássico movimento de rastejo que acontece nos bairros Taquaral e Piedade em Ouro Preto/MG. Com base nas informações disponibilizadas pela Defesa Civil de Ouro Preto, o bairro está inserido em uma região com níveis altos de suscetibilidade ao risco geotécnico, nos quais apresentam movimento de massa do tipo deslizamentos, quedas, tombamentos de blocos e o movimento de rastejo (Cabral, 2023).

O Serviço Geológico do Brasil (CPRM), realiza o mapeamento, a descrição e a classificação de áreas de risco geológico alto e muito alto em vários municípios do país, desde 2011 (Cabral, 2023). Em Ouro Preto/MG, o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) realizou a caracterização do local e classificou-o como Setor de Risco 10 (Figura 8), onde foram identificadas evidências características do rastejo, como por exemplo: trincas verticais e horizontais em escadarias, trincas nas paredes, postes inclinados, árvores com curvaturas e trincas no terreno. Além disso, o relatório também destaca que algumas residências foram abandonadas pelos moradores e outras ainda estão ocupadas, mesmo existindo o risco de o movimento evoluir para um deslizamento (CPRM, 2016).

Figura 8 – Prancha do Setor de Risco nº10 nos bairros Piedade e Taquaral, Ouro Preto, MG



Fonte: CPRM, 2016

Ainda de acordo com o relatório da CPRM (2016) foi feito um levantamento no ano de 2016 que constatou 46 imóveis inseridos nesse setor, totalizando 200 pessoas afetadas. Porém, em estudo realizado por Cabral (2023), constatou-se que houve um acréscimo de cerca de 12 edificações entre o período de 2016 e 2022, totalizando 58 imóveis situados na área de risco. Ainda segundo o autor, considerando que cada imóvel possua um núcleo familiar de 4 pessoas, em média, estima-se que o total de pessoas em situação de risco suba para 232.

2.3. Agentes e causas de instabilização

Muitos autores listam diversos agentes deflagradores das instabilidades em taludes. Segundo Augusto Filho e Carlos Virgili (1998), os agentes deflagradores são subdivididos em agentes predisponentes (conjunto de características naturais intrínsecas dos terrenos, onde os movimentos vão acontecer) e agentes efetivos (estão diretamente relacionados com o desencadeamento das instabilizações). A partir das definições descritas por

Augusto Filho e Carlos Virgili (1998), foi elaborado o Quadro 1 abaixo com os principais agentes condicionantes dos movimentos de massa.

Quadro 1 – Principais agentes condicionantes dos movimentos de massa

Características dos fatores condicionantes	Exemplos
Características climáticas	Regime pluviométrico
Características e distribuição dos materiais que compõe o substrato	Solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas (xistosidade, fraturas etc.)
Características geomorfológicas	Inclinação, amplitude e forma do perfil nas encostas
Regime das águas de superfície e subsuperfície	Drenagens (artificiais ou naturais), elevação do NA
Características do uso e ocupação do solo	Inclui cobertura vegetal, intervenções antrópicas nas encostas (cortes, aterros, concentração de água pluvial e servida etc.)

Fonte: Adaptado de Augusto Filho e Virgili, 1998

É de se destacar que, em grande maioria dos processos de movimentação de encostas e taludes, nota-se a influência e atuação de mais de um fator condicionante. (Augusto Filho; Virgili, 1998).

As águas são principais agentes deflagradores que atuam efetivamente na instabilidade de encostas, sendo tanto as águas superficiais ou subsuperficiais. As águas de subsuperfície atuam no aumento das solicitações de força exercida através da poropressão, quanto na redução da resistência dos terrenos. As águas subsuperficiais atuam de acordo com alguns mecanismos que desencadeiam processos de instabilização, como por exemplo: a diminuição da coesão aparente, a variação do nível piezométrico e a elevação da coluna d'água em descontinuidade. Outro destaque são os taludes formados em terrenos permeáveis, onde alteamentos bruscos no nível d'água resultam saturações e elevações rápidas no nível piezométrico no terreno, gerando rupturas. (Augusto Filho; Virgili, 1998).

As alterações geradas pelas águas superficiais e subsuperficiais estão diretamente relacionadas com as chuvas, dessa forma, torna-se a chuva um fator condicionante altamente perigoso para a deflagração dos movimentos. Chuvas intensas são mais suscetíveis para movimentos em rochas, entretanto, para movimentos de solo, é necessário índices pluviométricos acumulados. A chuva é o principal agente deflagrador

não-antrópico para movimentos gravitacionais no Brasil, sendo que as maiores tragédias relacionadas a esses movimentos ocorreram em épocas chuvosas. (Augusto Filho; Virgili, 1998).

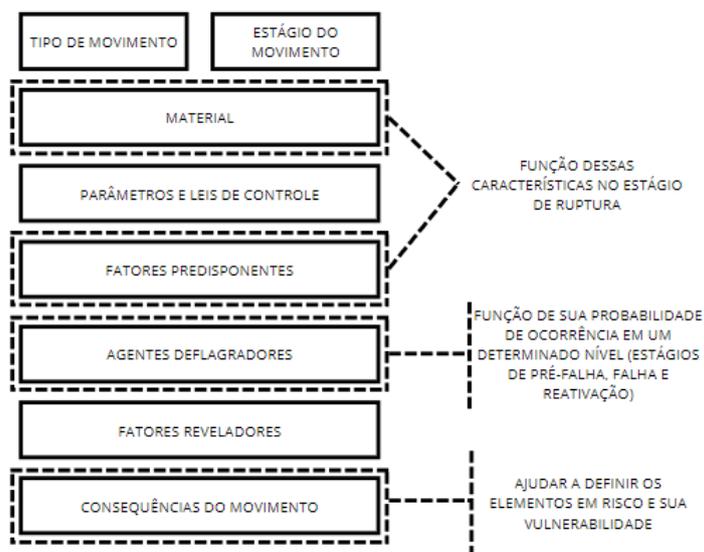
3. Caracterização geotécnica do movimento

Caracterizar um movimento de massa é tão importante como identificá-lo. Leroueil e Locat (1998) dizem que a caracterização geotécnica é uma ferramenta que pode ser usada para sintetizar os conhecimentos do movimento em diversos contextos geológicos e climáticos e, também para avaliar o risco local. Além disso, a caracterização possibilita os estudos dos diferentes fatores que influenciam no movimento, o que ajuda na proposição de soluções de engenharia a partir do entendimento da situação e suas consequências (Leroueil e Locat, 1998).

Para estudar o risco geotécnico de um movimento, o perigo e a vulnerabilidade dos elementos em Leroueil e Locat (1998) propõem a caracterização geotécnica a partir de um conjunto de itens a serem caracterização, a saber: o tipo de movimento; o estágio do movimento; o material; os parâmetros e as leis de controle; os fatores predisponentes; os agentes deflagradores; os fatores reveladores e as consequências do movimento (Figura 9).

O processo de movimento passa inicialmente pela fase de pré-falha, em que a massa do solo permanece essencialmente intacta e contínua. Esse estágio é predominantemente influenciado por fenômenos de falha progressiva e fluência. A ruptura se inicia com a formação de uma superfície de cisalhamento contínua que atravessa todo o solo ou maciço rochoso. A etapa pós-rompimento abrange o deslocamento do solo ou da massa rochosa envolvida no deslizamento, desde o momento imediatamente após o rompimento até que esse movimento essencialmente cesse.

Figura 9 – Caracterização geotécnica e os elementos para estudar o risco, o perigo e a vulnerabilidade de um movimento de massa.



Adaptado de Leroueil e Locat, 1998

A investigação geotécnica é essencial no processo de caracterização do movimento, e podem ser feitas de diversos tipos, como por exemplo as sondagens a percussão, sondagens rotativas, ensaios in situ e em laboratórios. Destaca-se como principal ensaio a percussão a sondagem SPT (*Standard Penetration Test*) e possui principal vantagem o seu custo-benefício, pois envolve a coleta de amostras do solo, proporciona dados sobre a resistência e a estratigrafia do subsolo. (Reis, 2022)

Os ensaios de caracterização geotécnica realizados tanto in loco quanto em laboratórios possuem as vantagens de serem precisos e obtém diversos resultados que auxiliam na identificação e classificação do solo, sendo os principais ensaios os de granulometria, limites de Atterberg, massa e peso específicos e de índices físicos. (Bastos, 1999)

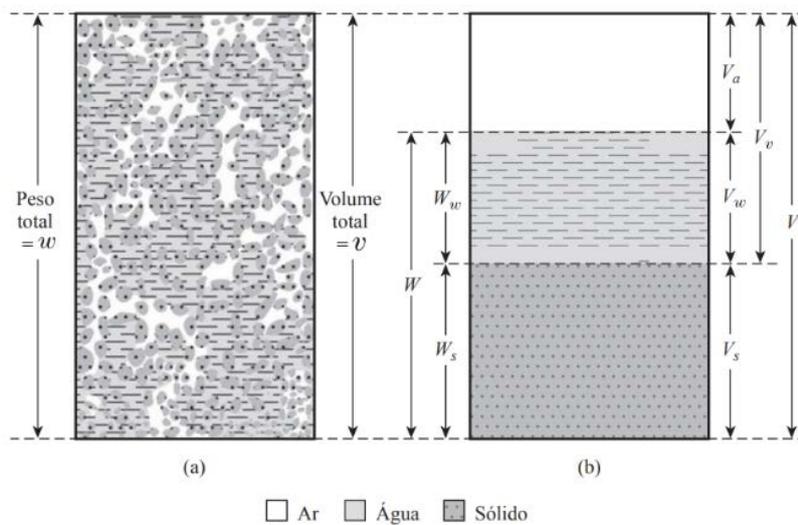
3.1. Caracterização dos solos

Como apresentado, um dos pontos importantes a serem caracterização do material, dos parâmetros e das leis de controle. Melo Neto (2005) aplicou em seu trabalho a metodologia de caracterização geotécnica proposta por Leroueil e Locat (1998) e ressalta que os tipos de materiais devem refletir o comportamento mecânico específico de acordo com as condições in situ. Desta forma, os primeiros passos são caracterizar e classificar o solo através de ensaios laboratoriais, e definir os parâmetros geotécnicos a serem

estudados com foco no movimento de massa, como por exemplo: a granulométrica do material, os limites de consistência, a massa específica, o peso específico natural, a umidade, a porosidade, o índice de vazios e a permeabilidade.

Deve-se reconhecer que o solo é composto de três fases: partículas sólidas, água e ar (Figura 10) e seu comportamento depende da quantidade relativa de cada uma delas. Se os espaços vazios não contêm água, o solo é considerado seco. Se todo o espaço vazio estiver preenchido com água, é um solo saturado. No entanto, se o espaço for parcialmente preenchido com água, é um solo úmido. Por isso, é fundamental estabelecer relações entre o peso e o volume em uma determinada massa de solo em todos os trabalhos de engenharia geotécnica. Dessa maneira, para a sua devida caracterização, utiliza-se de ensaios laboratoriais na determinação de parâmetros e índices físicos de acordo com cada fase e para o solo como um todo. (Sousa Pinto, 2006; Braja, 2019)

Figura 10 – (a) Solo em estado natural; (b) três fases do solo.



Fonte: Braja, 2019

Para a identificação e caracterização dos solos a partir das partículas sólidas são empregados os ensaios: análise granulométrica conjunta e os índices de consistência (ou Limites de Atterberg), determinação da massa específica e porosidade; com esses parâmetros encontrados, consegue-se obter outros índices físicos a partir de correlações matemáticas. (Sousa Pinto, 2006).

Após a obtenção desses parâmetros do solo, é possível realizar a sua caracterização de acordo com alguns métodos encontrados pela literatura. Um dos principais tipos de classificação é o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS). Idealizado por Arthur Casagrande, é oriundo da Airfield Classification System, usado inicialmente para a classificação de solos para construção de pista em aeroportos (Queiroz, 2016). Expandiu-se a outras utilizações e foi normatizado pela ASTM – American Society for Testing and Materials. Utiliza-se a característica granulométrica como parâmetro mais representativo para as porções grossas e os limites de consistência para a fração fina. (Queiroz, 2016)

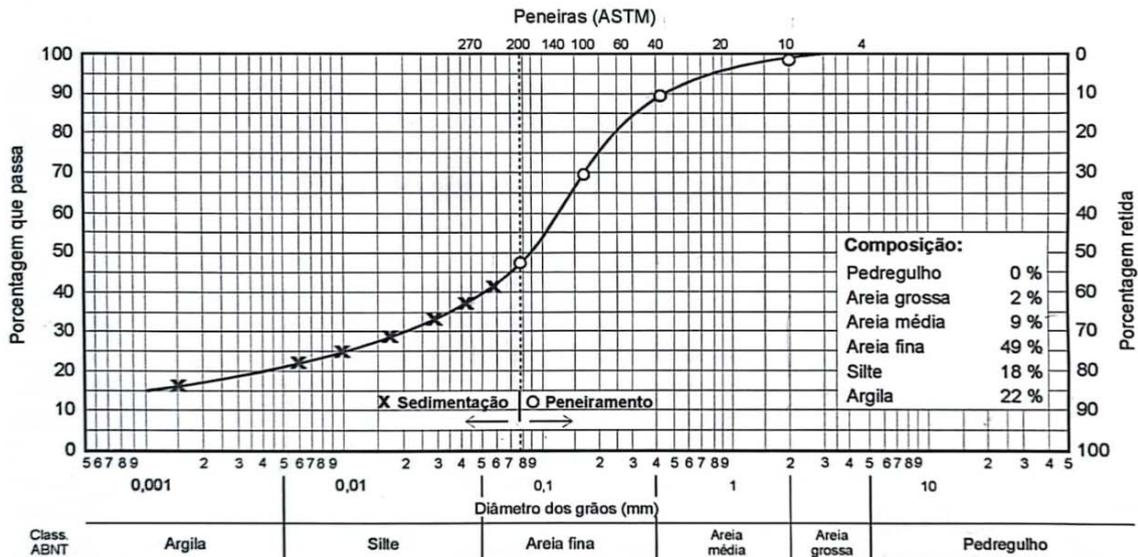
Para estudos a respeito de rastejos Suzuki, Lacerda e Futai (2005) avaliaram o comportamento dos solos a partir de um amplo estudo geotécnico da encosta no município de Morretes/PR, incluindo análise granulométrica conjunta, a fim de caracterizar as amostras representativas do solo que compõe a encosta instável. Adicionalmente, um rastejo localizado na Serra da Cantareira em São Paulo foi estudado por Ito, Godois e Futai [s.d.], e foram utilizados ensaios laboratoriais para caracterização geotécnica do solo como: limites de Atterberg e análise granulométrica conjunta.

3.1.1. Análise granulométrica conjunta

De acordo com Braja (2019), a análise granulométrica é a determinação do tamanho das partículas presentes em um solo, expressa como uma porcentagem do peso seco total onde, geralmente são utilizados dois métodos para encontrar a distribuição granulométrica do solo: (1) ensaio de peneiramento – para partículas com diâmetros maiores que 0,075 mm; (2) ensaio de sedimentação – para partículas com diâmetros menores que 0,075 mm.

No ensaio de peneiramento, o material que passa em cada peneira é pesado e considerado como “porcentagem que passa”, representado graficamente em função da abertura da peneira, em escala logarítmica, como mostrado na Figura 11. Considera-se que o diâmetro da partícula é igual a abertura nominal da peneira. Entretanto, trata-se de um diâmetro equivalente, pois as partículas não são esféricas. (Sousa Pinto, 2006)

Figura 11 – Exemplo de curva granulométrica.



Fonte: Sousa Pinto, 2006

A limitação do peneiramento é a abertura da malha, que não pode ser tão pequena quanto o diâmetro de interesse. Dessa forma, a menor peneira normalmente utilizada é a de número 200, a qual a abertura é de 0,075mm. (Sousa Pinto, 2006)

De forma a complementar a análise granulométrica é utilizado o ensaio de sedimentação, que tem como base o princípio da sedimentação dos grãos de solo na água. Presumindo que todas as partículas são esféricas, utiliza-se da Lei de Stoke, na qual a velocidade de queda de partícula num fluido atinge um valor limite que depende do peso específico do material da esfera (γ_s), do peso específico do fluido (γ_w), da viscosidade do fluido (μ), e do diâmetro da esfera (D), conforme equação 1. (Sousa Pinto, 2006; Braja 2019)

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18 \cdot \mu} \cdot D^2 \quad (1)$$

3.1.2. Limites de Atterberg

Somente a distribuição granulométrica não caracteriza bem o comportamento dos solos, sabendo que a fração fina tem uma importância muito grande nesse comportamento. À procura de uma forma mais prática de identificar a influência das partículas argilosas, a engenharia baseia-se no comportamento do solo na presença de água para uma análise

indireta do solo. Para isto, emprega-se então os ensaios propostos pelo engenheiro químico Atterberg, pesquisador do comportamento dos solos sob o aspecto agrônomo, adaptados e padronizados pelo professor de Mecânica dos Solos, Arthur Casagrande. (Sousa Pinto, 2006)

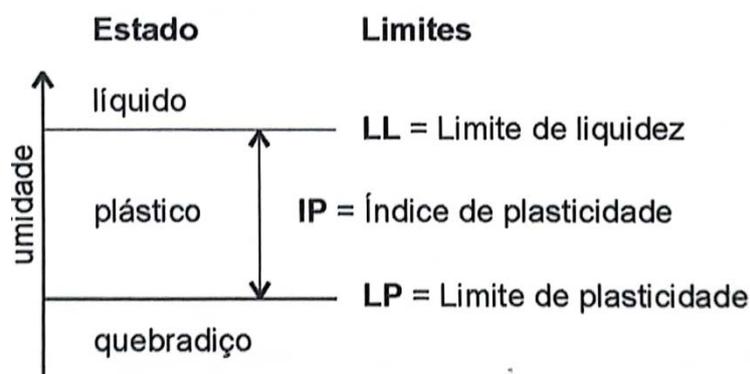
Segundo Sousa Pinto (2006) os limites de Atterberg baseiam-se na constatação de um solo argiloso ocorre com aspectos bem distintos conforme seu teor de umidade, sendo que quando muito úmido, ele se comporta como líquido; quando perde parte de sua água, fica plástico; e quando mais seco, torna-se quebradiço.

De acordo com Sousa Pinto (2006):

Os teores de umidade correspondentes às mudanças de estado são: Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) dos solos. A diferença entre esses dois limites, que indica a faixa de valores em que solo se apresenta plástico, é definida como o Índice de Plasticidade (IP) do solo. Em condições normais, só são apresentados os valores de LL e do IP como índices de consistência do solo. O LP é empregado apenas para determinação do IP.

A Figura 12 a seguir mostra a separação do estado do material de acordo como seu teor de umidade com destaque aos limites.

Figura 12 – Limites de Atterberg dos solos.



Fonte: Sousa Pinto, 2006

Outro importante parâmetro determinado a partir dos limites de Atterberg é o Índice de Consistência (IC), o qual indica a posição relativa da umidade aos limites de mudanças de estado (LL e LP). (Sousa Pinto, 2006)

3.1.3. Massa específica dos grãos

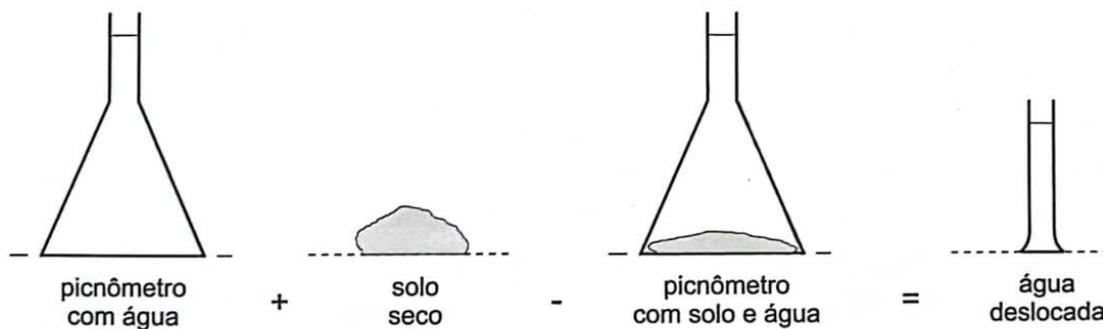
Denomina-se massa específica a relação entre quantidade de matéria (massa) e o volume. Em laboratório, determinam-se massas, e as normas vigentes demonstram como obter as massas específicas. Todavia, usualmente na engenharia utilizar o peso específico, visto que os índices físicos são apresentados nesses termos. O peso específico nada mais é do que o produto da massa específica com o valor da aceleração da gravidade. (Sousa Pinto, 2006)

A determinação da massa específica pode ser determinada através de alguns ensaios, dentre eles o ensaio do peso específico dos grãos, utilizando o picnômetro e regido pela ABNT NBR 6508/1984, e a determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, através do método da balança hidrostática, sendo esse ensaio regido pela ABNT NBR 16867/2020.

Para determinação do peso específico dos grãos através do picnômetro, Sousa Pinto (2006) diz:

Coloca-se um peso seco conhecido do solo num picnômetro e, completando-se com água, determina-se o peso total. O peso do picnômetro completado só com água, mais o peso do solo, menos o peso do picnômetro com solo e água, é o peso da água que foi substituída pelo solo, como se mostra na Figura 13. Desse peso, calcula-se o volume de água que foi substituído pelo solo e que é o volume do solo. Com o peso e o volume, tem-se o peso específico.

Figura 13 – Esquema da determinação do volume dos sólidos pelo peso da água deslocada, no ensaio de peso específico dos grãos



Fonte: Sousa Pinto, 2006

3.1.4. Outros índices físicos

Teixeira et al. (2017) definiu porosidade total do solo como fração do volume total em um determinado volume de solo passível de ser ocupada por água e/ou ar. Além disso, apresenta que o conhecimento da porosidade total é importante para se entender o movimento e a retenção de água, ar e solutos no solo, entre outros aspectos.

Segundo Sousa Pinto (2006), a porosidade é dada pela relação entre o volume de vazios e o volume total, sendo que seus valores geralmente são entre 30 e 70%.

A umidade é outro índice físico importante na caracterização dos solos, dada pela relação entre o peso da água e o peso dos sólidos, expressada pela letra “w” e dado em porcentagem. É determinada a partir da pesagem do solo natural úmido e a mesma porção de solo seco, após secagem em estufa. (Sousa Pinto, 2006)

O índice de vazios é um índice físico que representa a relação entre volume de vazios e o volume total das partículas sólidas. Possui valores típicos entre 0,5 e 1,5, é expresso pela letra “e” e não se determina de forma direta, é calculado a partir de outros índices. (Sousa Pinto, 2006)

O peso específico natural (γ_n) é a relação entre o peso total do solo e seu volume total, determinado a partir da moldagem em um cilindro cujas medidas são conhecidas ou a partir de corpos irregulares, obtendo-se o volume por meio do peso imerso em água, nesse caso, o solo deve ser envolto em parafina. Normalmente, os valores ficam em torno de 19 a 20 kN/m³. (Sousa Pinto, 2006)

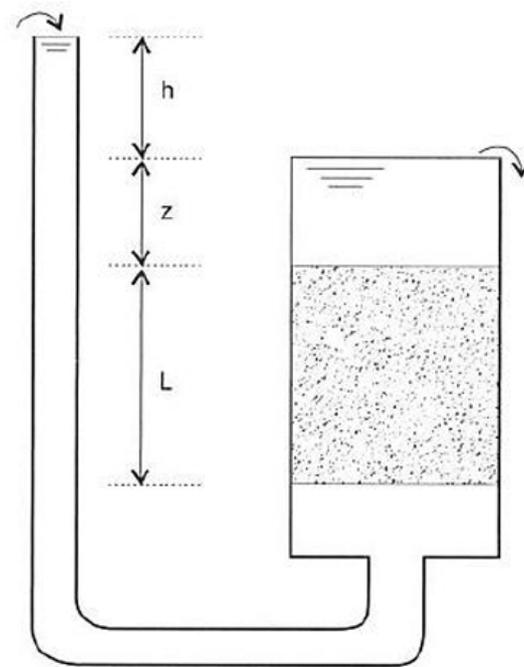
Todos esses índices citados são de extrema importância na caracterização dos solos, isso porque o conjunto de características atribuídas de acordo com esses índices que vão dizer o comportamento do solo mediante as condições em que se encontra o material e como vai se comportar com alterações, como por exemplo a presença de água.

3.1.5. Permeabilidade

A permeabilidade é a percolação da água nos solos, e seu estudo é de grande importância porque está relacionado a diversos problemas práticos de geotecnia, tais como no cálculo das vazões, em análise de recalques e no estudo da estabilidade de taludes. É quantificada

a partir do coeficiente de permeabilidade que se calcula a partir da lei de Darcy, representada pela equação 1, de acordo com a percolação da água em um permeômetro (Figura 14):

Figura 14 – Água percolando num permeômetro.



Fonte: Sousa Pinto, 2006

$$Q = k \cdot i \cdot A \quad (1)$$

Onde:

Q = vazão;

A = área do permeômetro

k = constante para cada solo (coeficiente de permeabilidade)

i = relação entre h (carga que se dissipa na percolação) por L (distância ao longo da qual a carga se dissipa)

O valor do coeficiente é normalmente expresso em m/s, e por serem valores muito baixos, é expresso pelo produto de um número inferior a 10 por uma potência de 10. (Sousa Pinto, 2006)

Alguns valores típicos de coeficientes de permeabilidade por tipo de solo são expressos por Sousa Pinto (2006), e podem ser observados na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Valores típicos de coeficientes de permeabilidade.

Solos	Coefficiente de permeabilidade
Argilas	$< 10^{-9} \text{ m/s}$
Siltos	$10^{-6} \text{ a } 10^{-9} \text{ m/s}$
Areias argilosas	10^{-7} m/s
Areias finas	10^{-5} m/s
Areias médias	10^{-4} m/s
Areias grossas	10^{-3} m/s

Fonte: Sousa Pinto, 2006

3.2. Investigações geotécnicas

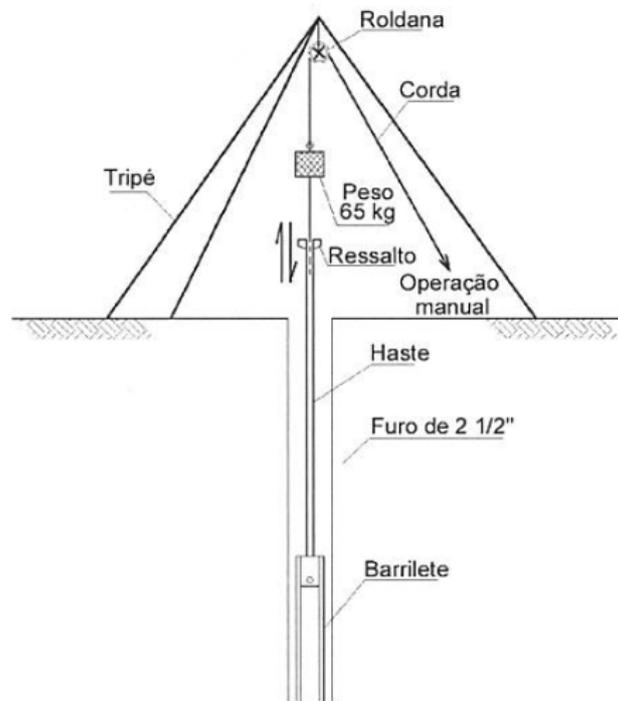
3.2.1. Sondagem à percussão (SPT - *Standard Penetration Test*)

A sondagem SPT consiste em um dos ensaios geotécnicos mais populares e comuns em obras de engenharia e estudos de caso. Isso se deve ao seu ótimo custo-benefício e facilidade de execução (Reis, 2022). A execução do ensaio segue a NBR 6484 (2020), e segundo ela, o método consiste em uma perfuração inicial a trado e circulação de água, seguido por cravação dinâmica de um amostrador a cada metro através da queda de um martelo, cuja massa padronizada é de 65 kg, a uma altura de 75 cm, também padronizada pela norma. A Figura 15 mostra um exemplo esquemático do funcionamento de um equipamento de sondagem SPT. A cada metro são coletadas amostras, com exceção do primeiro metro, através do amostrador e é realizada uma análise tátil-visual do material coletado. O amostrador é cravado nos 45 cm iniciais de cada metro, onde são anotados os números de golpes necessários para cravação de cada 15 cm, entretanto, o valor N do SPT é obtido somando os 30 cm finais. No término da cravação do amostrador, realiza-se a perfuração até alcançar a próxima cota para realizar o próximo ensaio, esse processo é

chamado de avanço. Identifica-se as camadas dos perfis do subsolo através do número de golpes necessários e das análises tátil-visual das amostras.

A sondagem a percussão (SPT) possui três objetivos principais, os quais baseiam-se a caracterização geotécnica por meio desse tipo de investigação, a saber: a obtenção do Índice de Resistência do Solo; a medida do nível d'água e a realização da estratigrafia do substrato terroso (Oliveira e Monticeli, 2018).

Figura 15 – Esquema de sondagem SPT



Fonte: Sousa Pinto, 2006

A sondagem SPT torna-se interessante quanto as pesquisas relacionadas aos movimentos de massa. Um estudo realizado por Bricalli (2015), utilizou-se as sondagens SPTs para a criação de perfis estratigráficos e associados a outras metodologias como os ensaios laboratoriais e caracterização do solo, conseguiu-se estabelecer os fatores de instabilidade do talude e identificar a superfície de ruptura do movimento.

3.2.2. Método de Eletorresistividade

A eletorresistividade é um método de investigação geotécnica por meio da geofísica e baseia-se na determinação da resistividade elétrica dos materiais (Borges, 2002). De

acordo com Kearey, Brooks e Hill (2002), a ciência da geofísica aplica os princípios da física ao estudo da Terra, envolvendo medidas em sua superfície ou próximo a ela, que são influenciadas pela distribuição interna das propriedades físicas do solo ou rocha, as quais podem ser analisadas, revelando como essas propriedades variam verticalmente e lateralmente no interior da Terra.

Segundo Kearey, Brooks e Hill (2002), os métodos geofísicos podem ser divididos em:

- a) Sísmico: medem os tempos de percurso de ondas sísmicas refletidas/refratadas;
- b) Gravitacional: medem as variações da força do campo gravitacional da Terra;
- c) Magnético: medem as variações do campo geomagnético;
- d) Elétrico: medem a resistência da Terra, voltagens de polarização ou resistência do solo dependendo da frequência, potenciais elétricos, resposta às radiações eletromagnéticas e tempo de percurso de pulsos de radar refletidos.

O método de eletrorresistividade (*resistivity method*), é utilizado no estudo de descontinuidade horizontais e verticais nas propriedades elétricas do solo, além de ser utilizado para detecção de corpos tridimensionais de condutividade elétrica anômala. Esse método é rotineiramente utilizado pela engenharia e hidrogeologia para investigar a geologia de subsuperfície rasa. Para esse método, são introduzidas no solo correntes elétricas geradas artificialmente, e as diferenças de potencial resultantes são medidas na superfície. (Kearey, Brooks e Hill, 2002)

O método de eletrorresistividade oferece várias técnicas de levantamentos em campo, e dividem-se basicamente em sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico, onde essas apresentam uma grande variedade de arranjos de eletrodos, mostrando a versatilidade do método. (Borges, 2002)

A sondagem elétrica vertical – SEV (*vertical electrical sounding – VES*), é usada no estudo de interfaces horizontais ou quase horizontais, no qual a corrente e os eletrodos de potencial são mantidos no mesmo espaçamento relativo, e o arranjo todo é expandido progressivamente ao redor de um ponto fixo central. As leituras são tomadas enquanto as

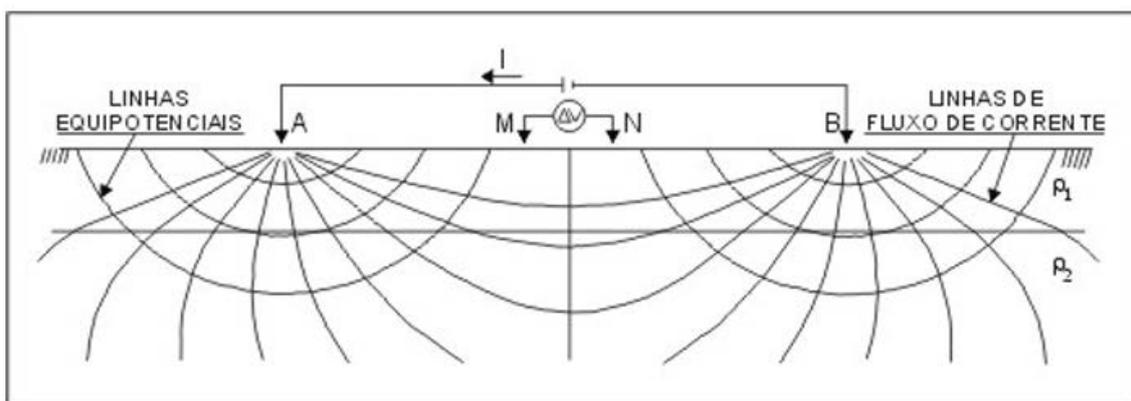
correntes atingem progressivamente maiores profundidades. Essa técnica é usualmente utilizada para determinar espessura de sobrecarga e na hidrogeologia, na definição de zonas horizontais de estratos porosos. (Kearey, Brooks e Hill, 2002)

O outro tipo de procedimento empregado nos levantamentos é o caminhamento de separação constante (*constant separation traversing – CST*), usado para determinar variações verticais de resistividade. Nessa técnica, a corrente e os eletrodos de potencial são mantidos a uma separação fixa e progressivamente movidos ao longo do perfil. É utilizado em levantamentos geotécnicos para determinar variações na profundidade do embasamento e a presença de descontinuidades abruptas. (Kearey, Brooks e Hill, 2002)

Para a medida de resistividade, os dispositivos consistem em um sistema de quatro eletrodos, onde dois deles usados para enviar corrente elétrica (I) no solo (eletrodos A e B), e outros dois (eletrodos M e N) usados para aferir a diferença de potencial (ΔV). (Borges, 2002).

Para as SEV's, usualmente usa-se o arranjo Schlumberger, onde os quatro eletrodos são dispostos em linha, no qual os eletrodos de potencial (MN) são colocados entre os de corrente (AB) e distribuídos simetricamente, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Arranjo de eletrodos Schlumberger

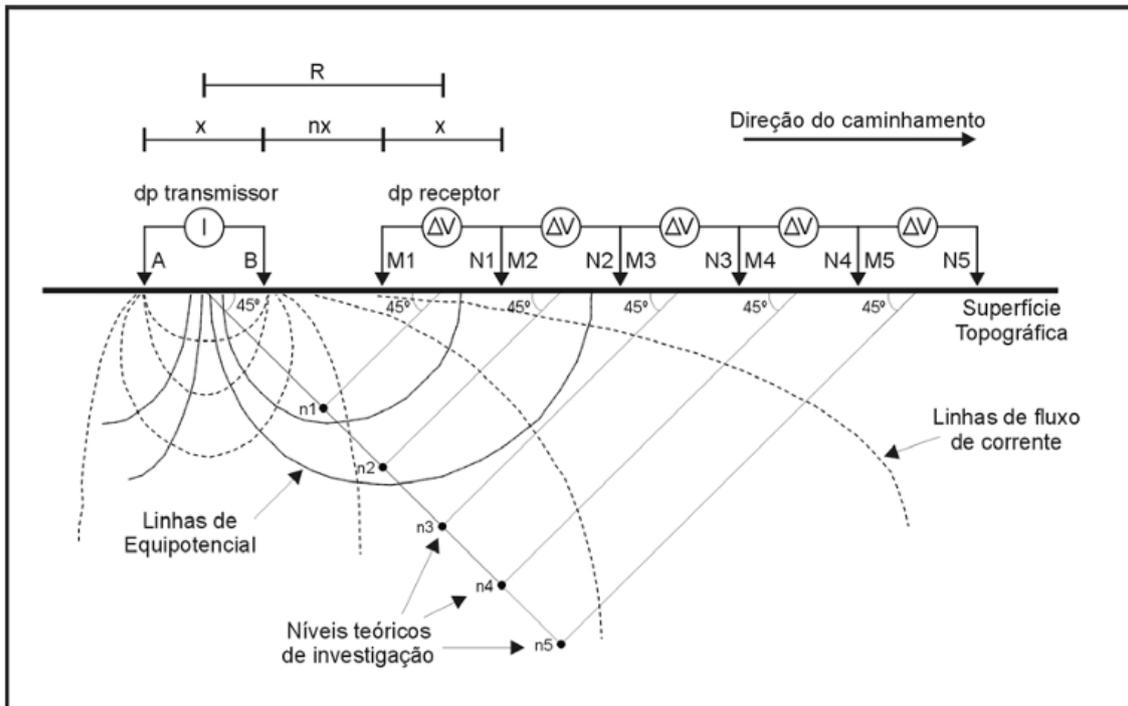


Fonte: Borges, 2002

Para a técnica do Caminhamento Elétrico (CE), o arranjo Dipolo-Dipolo é muito utilizado. Nesse modelo de arranjo, os eletrodos AB de injeção de corrente e MN de potencial são dispostos segundo uma linha e define-se o arranjo pelos espaçamentos entre

eletrodos $X=AB=MN$. A profundidade de investigação cresce de acordo com a distância entre os eletrodos MN. São realizadas medidas em várias profundidades de investigação (n), onde $n = 1,2,3,4,5\dots$, é o ponto de intersecção entre uma linha que parte do centro do arranjo AB e outra que parte do centro de arranjo MN, com ângulos de 45° . A técnica de CE é demonstrada pela Figura 17. (Borges, 2002)

Figura 17 – Arranjo Dipolo-Dipolo para caminhamento elétrico.

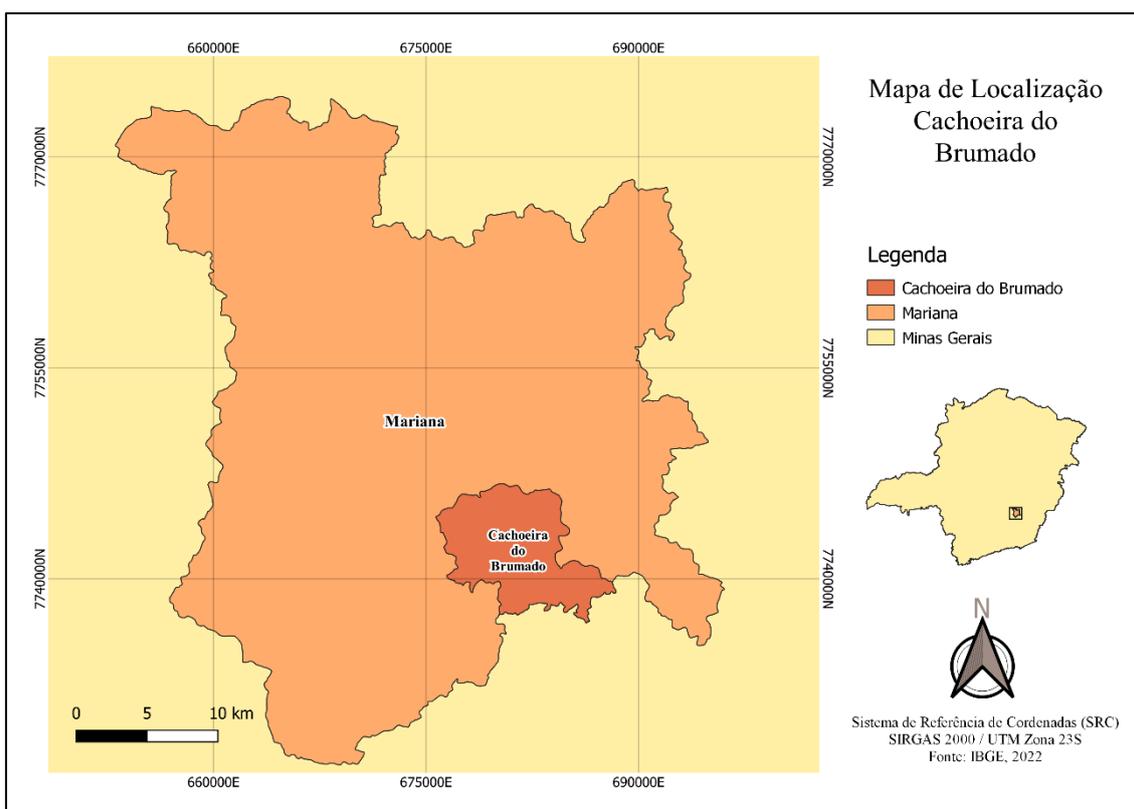


Fonte: Borges, 2002

4. Caracterização da área de estudo

Cachoeira do Brumado é um distrito da cidade de Mariana, no estado de Minas Gerais (Figura 18). Localiza-se cerca de 26 km do distrito sede de Mariana e a aproximadamente 140km da capital mineira, Belo Horizonte. É conhecida por possuir uma linda cachoeira que atrai os turistas e fomenta a economia do distrito. Além disso, outra atração é o artesanato, dos quais se destacam a panela de pedra-sabão e o tapete de sisal. Esses artesanatos são fabricados no distrito e vendidos em diversas regiões do país.

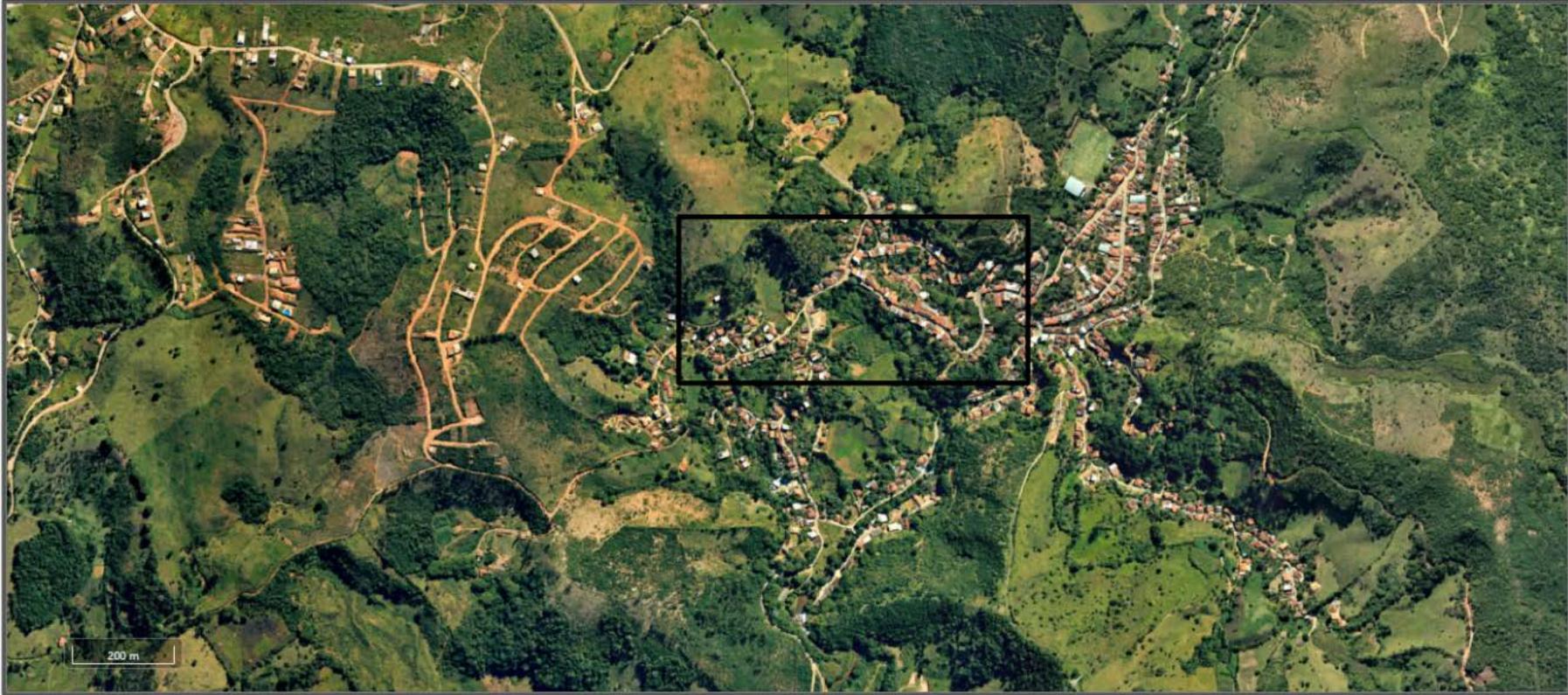
Figura 18 – Localização de Cachoeira do Brumado.



Fonte: Autor, 2023

A área de estudo situa-se na área urbana do distrito, próximo à Rua Tombadouro na altura do número 41, como pode-se ver através da Figura 19 e Figura 20. A área apresenta diversas evidências da movimentação do tipo rastejo (Figura 21 à Figura 30), as quais destacam-se trincas diagonais nas paredes das residências, postes e cercas inclinadas, recalque nas vias do entorno. Todas essas características foram evoluindo gradativamente e alguns moradores relatam que o movimento ocorre já há algumas décadas, sendo que outros moradores tiveram que abandonar suas residências devido ao risco de ruptura da encosta.

Figura 19 – Localização da área de estudo no distrito.



Fonte: Topocart, adaptado pelo autor, 2023

Figura 20 – Localização da área de rastejo



Fonte: Topocart, adaptado pelo autor, 2023

Figura 21 – Poste inclinado



(Fonte: Autor, 2023)

Figura 22 – Trincas na residência



Fonte: Autor, 2023

Figura 23 – Poste inclinado e recalque na via



Fonte: Autor, 2023

Figura 24 – Recalque na via



Fonte: autor, 2023

Figura 25 – Trinca no muro



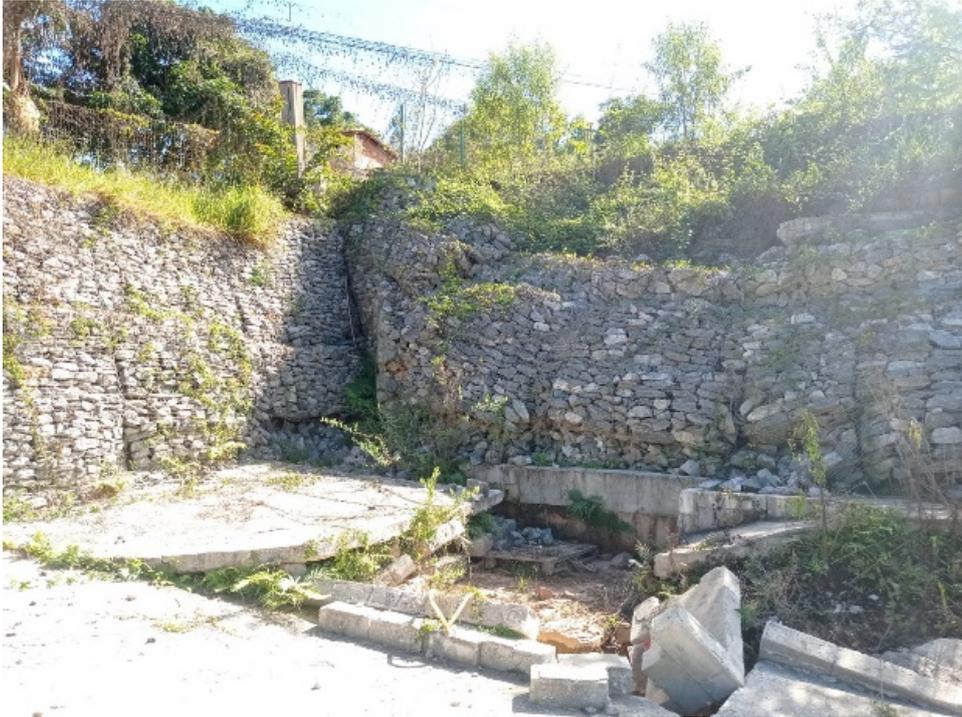
Fonte: Autor, 2023

Figura 26 – Trincas na parede



Fonte: autor, 2023

Figura 27 – Muro de contenção destruído devido a movimentação



Fonte: Autor, 2023

Figura 28 – Muro de contenção destruído devido a movimentação



Fonte: Autor, 2023

Figura 29 – Árvore com curvatura típica de rastejo



Fonte: Autor, 2023

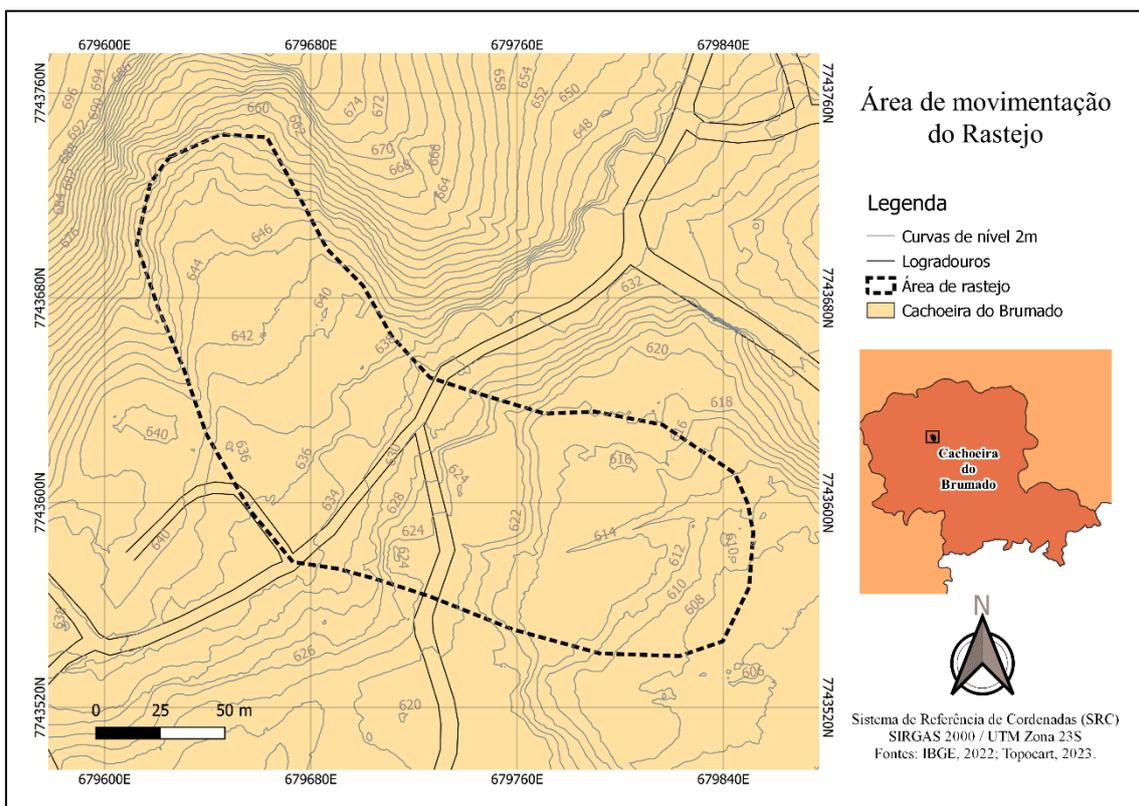
Figura 30 – Trincas nas residências



Fonte: autor, 2023

É difícil calcular com exatidão a extensão de um rastejo, pois seus limites não são bem definidos e podem variar de acordo com o tempo. Entretanto, apresenta-se abaixo, através do Figura 31 a representatividade de abrangência do rastejo, cuja área é de aproximadamente 2 ha. Foi usado para essa delimitação as manifestações geotécnicas do local, principalmente por meio da visualização dos níveis de deformação presentes nas vias.

Figura 31 – Delimitação da área de rastejo em estudo.

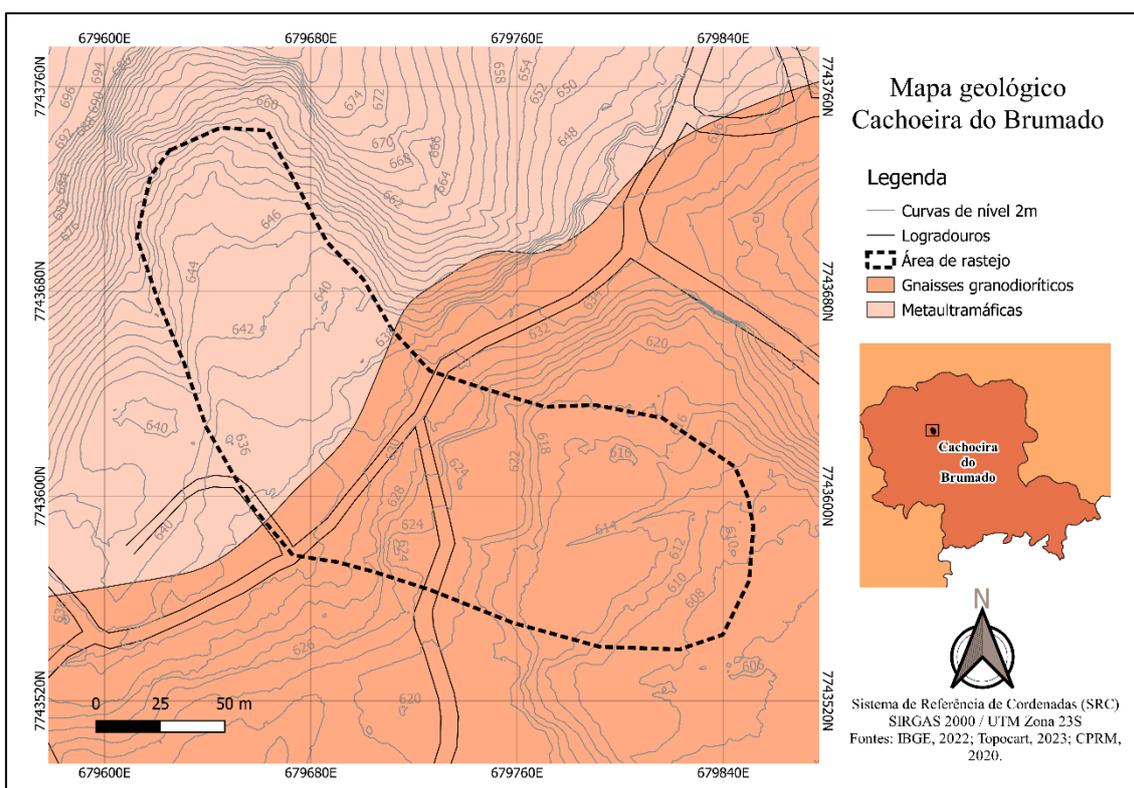


Fonte: autor, 2023

Partindo das informações de localização e da área de abrangência do rastejo, foi elaborado o Figura 32, correspondente a formação geológica da região, e foi constatada a presença de duas litologias diferentes: Metaultramáficas e Gnaisses Granodioríticos.

As rochas metaultramáficas tem por característica elevada resistência mecânica quando pouco intemperizadas, entretanto são altamente suscetíveis ao intemperismo, e tem como produto de sua alteração, solos argilosos e bem coesos (Reis e Parizzi, 2018). Além disso, as principais rochas metaultramáficas são pedra-sabão, muito explorada na região e matéria prima dos artesanatos fabricados no distrito (Jordt-Evangelista e Silva, 2005).

Figura 32 – Geologia da área em estudo



Fonte: autor, 2023

Por estar inserida na área urbana do distrito, inevitavelmente a área de estudo está propícia à ocupação urbana, como a construção de residências e infraestrutura. Ao todo, foram contabilizados 6 imóveis no local, sendo que em pelo menos 3 deles não há moradores devido ao risco associado, e outro é utilizado como loja, e não como moradia. Isso mostra que os moradores estão cientes de que a região não é apta a construção, e infelizmente os que ainda ocupam o local são por falta de opção.

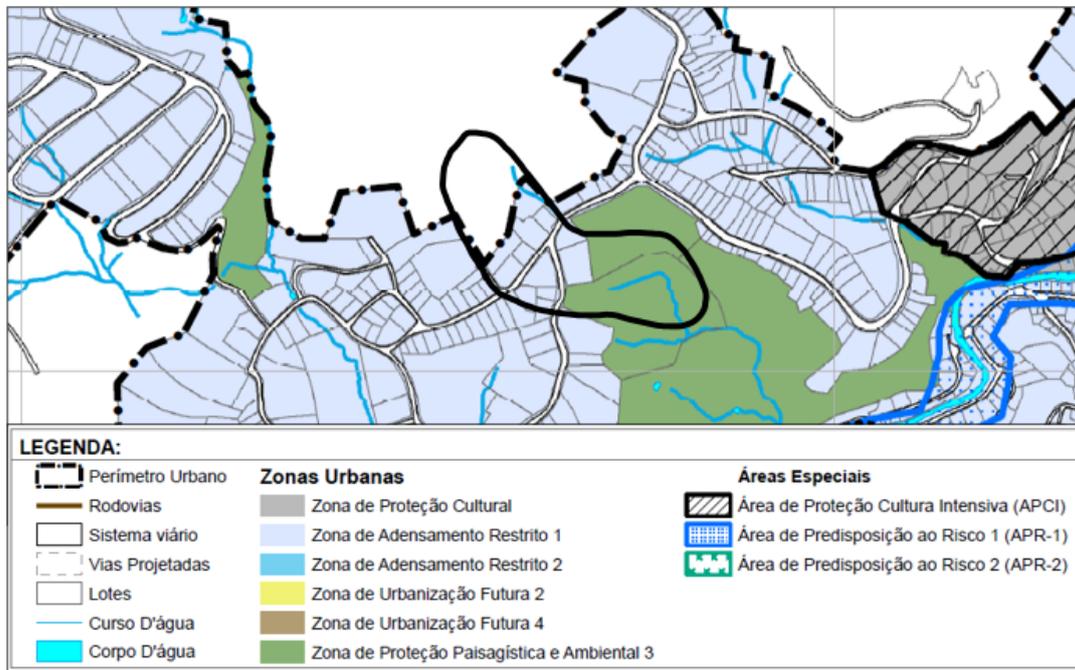
De acordo com o plano diretor de Mariana, instituído pela Lei Complementar N° 228, de dezembro de 2022, a área de estudo está inserida em dois zoneamentos, conforme Figura 33, sendo ZAR 1 (Zona de Adensamento Restrito – 1) e ZPPA (Zona de Proteção Paisagística e Ambiental), e são definidas da seguinte maneira:

A ZAR é o conjunto das áreas internas ao Perímetro Urbano destinadas ao controle de adensamento para preservação da ambiência e proteção da paisagem urbana histórica bem como em função da estrutura urbana existente.

ZPPA é o conjunto das áreas internas ao Perímetro Urbano destinadas prioritariamente à preservação ambiental, manutenção da qualidade ambiental,

proteção da paisagem natural e histórica bem como transição entre o ambiente urbano e o rural.

Figura 33 – Zoneamento urbano da área de estudo



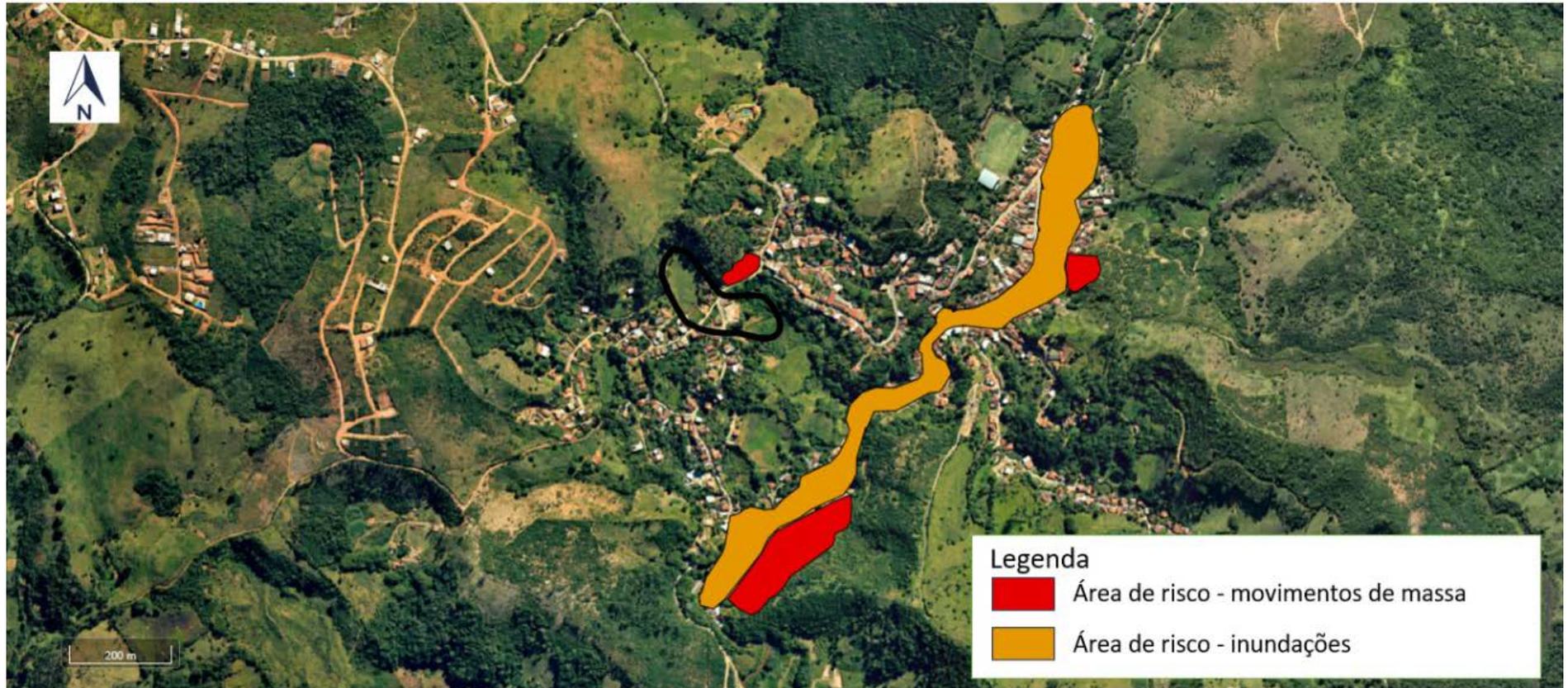
Fonte: Plano Diretor de Mariana, adaptado pelo autor, 2023

Entretanto, destaca-se que o local onde se inicia o rastejo não está inserido no perímetro urbano, e de acordo com o anexo 3 do Plano Diretor, essa área está inserida no zoneamento rural, correspondendo a ZCA (Zona de Controle Ambiental), definida como:

Conjunto de áreas com predominância de atividades econômicas que podem já apresentar elevado índice de degradação ambiental, sendo destinadas a: I - Recuperação ambiental das porções já degradadas; II - Controle, proteção e promoção das atividades econômicas de forma sustentável; III - Incentivo à transição para práticas agroflorestais e agroecológicas.

Outro objeto de estudo é o mapeamento das áreas de risco da Defesa Civil de Mariana, o qual é representado pela Figura 34, elaborada através do Software Topocart Mariana, com dados da própria ferramenta. O mapeamento demonstra que não há nenhuma demarcação de áreas de risco na área em estudo. Dessa forma, destaca-se que a base de informações com relação a esse movimento de rastejo se encontra desatualizada. A falta de diretrizes urbanísticas nessa área pode acarretar graves problemas urbanos e sociais na região.

Figura 34 – Mapeamento das áreas de risco Cachoeira do Brumado.

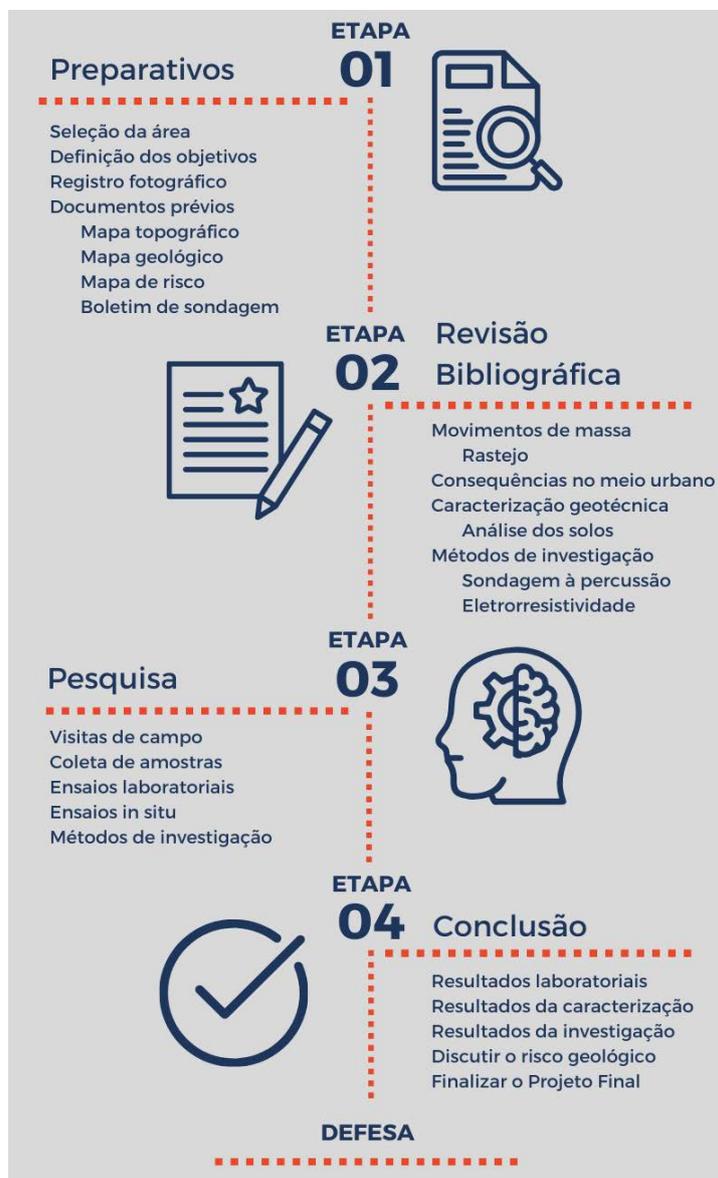


Fonte: Autor com dados da Defesa Civil, 2023

5. Materiais e métodos

A pesquisa foi iniciada pela escolha da área potencial para o estudo de movimentos de massa. Os objetivos da pesquisa começaram a ser traçados e foram levantados alguns documentos preliminares junto à Prefeitura de Mariana e Defesa Civil de Mariana, disponibilizados diretamente no Topocart (Mapa topográfico e Mapa de Risco). Abaixo é apresentado pela Figura 35 o fluxograma referente a metodologia adotada para realização do presente trabalho.

Figura 35 – Fluxograma explicativo

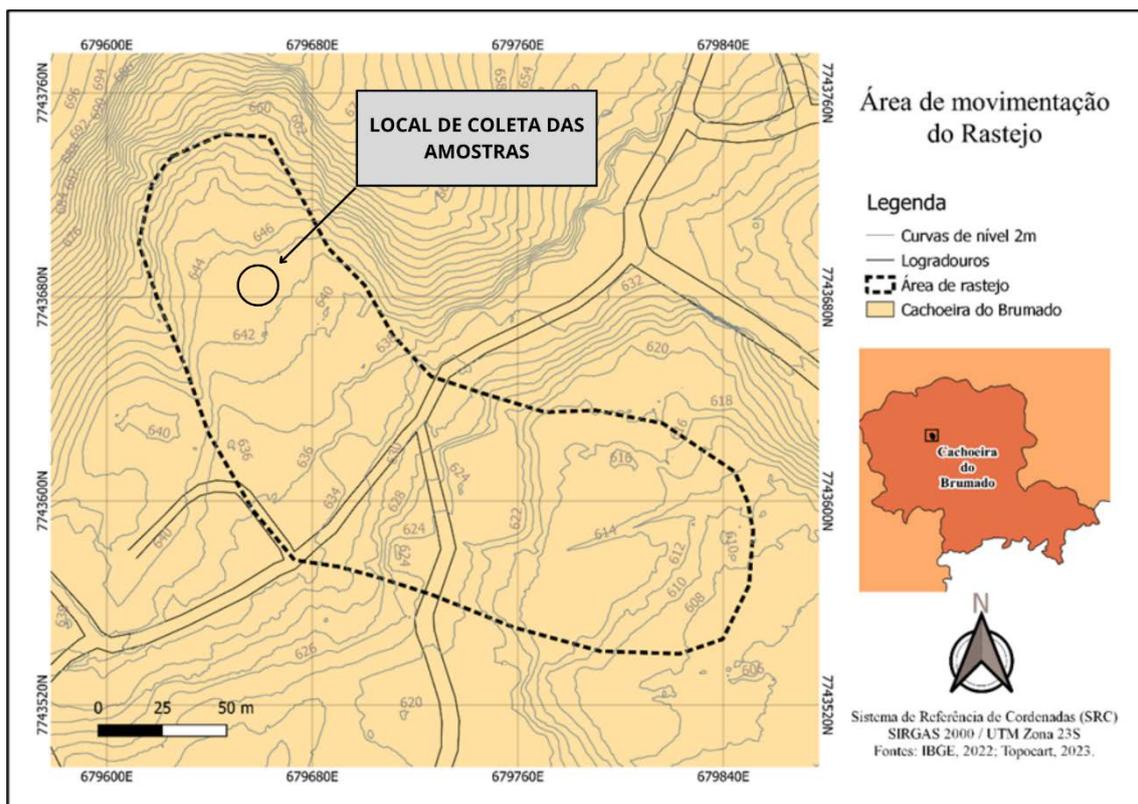


Fonte: Autor, 2023

Concomitantemente com a etapa anterior foi iniciada a revisão bibliográfica sobre os temas abordados na pesquisa: movimentos de massa gravitacionais com um detalhamento sobre o tipo rastejo. Além dos métodos de análise dos solos e, a caracterização e investigação geotécnica.

O desenvolvimento da pesquisa se deu por meio de visitas de campo para identificação no movimento e o registro fotográfico dos indícios da movimentação. Durante as visitas de campo também foram realizados ensaios “in situ” e investigação geotécnica por meio do método de eletrorresistividade a fim de analisar a distribuição da água em subsuperfície. Além disso, realizou-se os ensaios laboratoriais para caracterização geotécnica do solo com amostras retiradas na região mais a montante da área de movimentação (Figura 36), com uma profundidade de aproximadamente 60cm de um solo residual maduro ou um colúvio.

Figura 36 – Local de coleta das amostras



Fonte: Autor, 2023

Na etapa final, analisaram-se os resultados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa e finalizou-se o relatório com as discussões sobre a temática, conclusão dos objetivos propostos e sugestões para trabalhos futuros.

5.1. Ensaios de caracterização geotécnica

A preparação das amostras para os ensaios de caracterização dos solos foi baseada na Norma Brasileira ABNT NBR 6457.

- Análise granulométrica conjunta

O ensaio de granulometria foi realizado de acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 7181 que estabelece o método para análise granulométrica de solos, realizada por uma combinação de sedimentação e peneiramento.

Para iniciar o ensaio é necessário deixar a amostra secar ao ar, até próximo da umidade hidrocópica, e após isso desmanchar os torrões utilizando o almofariz e mão de gral, até que o material fique uniforme (Figura 37 e Figura 38).

Figura 37 – Amostra com torrões.



Figura 38 – Amostra sem torrões



Fonte: Autor, 2023

De acordo com a norma, após esse processo, pesa-se 1000g desse material e passa-o pela peneira de 2mm (Figura 39 e Figura 40), o material retido será utilizado para o peneiramento grosso e o material passante será utilizado para peneiramento fino, sedimentação e outros ensaios.

Figura 39 – Pesagem do material



Figura 40 – Peneira de 2mm



Fonte: Autor, 2023

Do material passante, utiliza-se 70g para realização do ensaio por sedimentação. Realiza-se esse procedimento para duas amostras, uma será preenchida apenas com água destilada e outra será utilizado o defloculante hexametáfosfato de sódio. A utilização do defloculante garante a eliminação de grumos de argilas, as quais podem se aglomerar, formando grãos maiores, de dimensões de siltes e areias. Coloca-se então o material em um béquer e mede-se a sua massa, após isso, preenche-se o béquer com água destilada para a primeira amostra e defloculante para a segunda. Agita-se a amostras e deixe-a em repouso por no mínimo 12hrs. A Figura 41 apresenta a amostra antes do repouso e a Figura 42 após esse período.

Figura 41 – Amostra antes do período de repouso



Figura 42 – Amostra após do período de repouso



Fonte: Autor, 2023

A próxima etapa da sedimentação é verter a mistura no copo dispersor, e preencher com água destilada até 5cm da borda do copo. Deixar agitar por 15 minutos. Após isso, toda mistura é colocada em uma proveta e completada com água destilada até 1000ml. Agita-

se toda essa mistura por 1 minuto, como descrito na NBR 7181, e no instante que se termina a agitação, deve-se anotar o horário exato de início da sedimentação. Insere-se também o decímetro na proveta e anota-se as leituras nos instantes de tempo (t) de 30s, 1min e 2 min. Repete-se essas três primeiras medidas e continua-se o ensaio aferindo medições nos instantes de tempo (t) de 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1h, 2h, 4h, 8h e 24h ou até o densímetro zerar, implicando que todo o material sedimentou. A Figura 43 abaixo representa a amostra após sair do copo dispersor e a Figura 44 apresenta a realização do ensaio de sedimentação.

Figura 43 –Amostra após dispersor



Figura 44 – Ensaio de sedimentação



Fonte: Autor, 2023

O material que foi sedimentado é passado pela peneira de 0,075mm e levado em estufa para ser utilizado no peneiramento fino, como apresentado na Figura 45 e na Figura 46.

Figura 45 – Material sedimentado passado pela peneira 0,075mm



Figura 46 – Material seco em estufa



Fonte: Autor, 2023

O peneiramento fino consiste em passar essa amostra pelas peneiras de 1,2mm, 0,6mm, 0,42mm, 0,25mm, 0,15mm e 0,075mm com o auxílio do agitador mecânico (Figura 47). Anota-se então a massa retida em cada peneira.

Figura 47 – Peneiramento fino



Fonte: autor, 2023

Para o peneiramento grosso, utiliza-se o material retido na peneira de 2mm, e com auxílio do agitador mecânico, passa-se o material pelas peneiras 50 mm, 38 mm, 25 mm, 19 mm, 9,5 mm e 4,8 mm e anota-se as massas retidas em cada uma delas.

- Limites de Atterberg

Para os ensaios de determinação dos limites de Atterberg, foi utilizado como referência as normas ABNT vigentes para cada ensaio, sendo a NBR 6459/2016 para o Limite de Liquidez e a NBR 7180/2016 para o Limite de Plasticidade.

O ensaio do Limite de Liquidez, inicia-se com a inspeção e conferência das calibrações da aparelhagem a ser utilizada. Para a execução do ensaio, usa-se uma porção da mesma amostra passante na peneira de 2mm, e mistura-se com água destilada até que se obtenha consistência tal que sejam necessários da ordem de 35 golpes para fechar a ranhura. O tempo de homogeneização da amostra é de no mínimo 15 minutos.

Dessa mistura, é transferida para a concha material suficiente para ocupar 2/3 de sua área, de maneira que a espessura na parte central seja em torno de 10 mm (Figura 48). Após, com o auxílio do cinzel, divide-se a massa em duas partes iguais, de modo a criar uma ranhura no meio (Figura 49). A partir disso, coloca-se cuidadosamente a concha no aparelho de Casagrande e começa a golpeá-la contra a base, deixando-a cair em queda livre, girando a manivela cerca de dois golpes por segundo. Anota-se o número de golpes necessários para que as bordas inferiores da ranhura se unam cerca de 1,3cm, aproximadamente (Figura 50). Coleta-se, imediatamente, uma pequena porção de material, justamente na parte onde houve contato das bordas para determinação da umidade.

Figura 48 – Material ocupando 2/3 da concha



Figura 49 – Ranhura feita com cinzel



Figura 50 – Ranhura com as bordas inferiores encontradas cerca de 1,3 cm após os golpes



Fonte: Autor, 2023

Após o término da operação, adiciona-se água destilada à amostra e homogeneiza por cerca de 3 min, e refaz-se a operação. Para a execução do ensaio, são necessárias 5 operações, variando o número de golpes entre 35 e 15.

No ensaio do Limite de Plasticidade, também se utiliza uma porção da amostra passante na peneira de 2mm. Prepara-se o material adicionando água destilada aos poucos e homogeneizando-o por pelo menos 15 minutos. A partir disso, toma-se uma pequena porção de material e forma-se uma bola (Figura 51), que é rolada em uma placa de vidro, com a palma da mão, até que atinja o diâmetro de 3mm e comprimento de 100mm. Para o auxílio do operador, utiliza-se um gabarito em metal com essas dimensões, como é possível notar na Figura 52.

Figura 51 – Amostra em formato de bola pronta para ser rolada



Figura 52 – Amostra fissurada nas dimensões do gabarito



(Fonte: Autor, 2023)

Caso a amostra fragmente-se antes de alcançar as dimensões do gabarito, adiciona-se mais água e mistura-se por 3 min. Caso a amostra alcance as dimensões sem se fraturar, volta-se o material para o recipiente e mistura-se a fim de perder um pouco de umidade, se necessário adicionar mais material, a norma orienta a homogeneização por mais 15 minutos.

Após o processo do ensaio, coleta-se a amostra e leva-a para estufa, para a medição do teor de umidade. São necessários para validação do ensaio três valores de umidade.

- Massa específica dos grãos

Foi utilizado a NBR 6508/1984 para determinação da massa específica dos grãos e a NBR 16867/2020 para determinação da massa específica aparente de amostra indeformada.

O primeiro método citado, consiste na determinação da massa específica dos grãos por meio do picnômetro. A amostra utilizada para esse ensaio consiste no material passante na peneira de 2mm, assim como em alguns ensaios já citados anteriormente. Em um béquer foi pesado 70g de material, e adicionada água destilada até sua completa saturação. O material é agitado e deve ser decantado por no mínimo 12 h (Figura 53). após esse período, transfere-se o material para o copo dispersor e acrescenta-se água até metade do copo, o qual é dispersado por 15 min.

Figura 53 – Amostra saturada após 12 horas



Figura 54 – Transferindo material para o picnômetro



(Fonte: Autor, 2023)

Todo material é transferido para o picnômetro (Figura 54) e adiciona-se água destilada até metade (Figura 55). A seguir, o conjunto é levado a bomba de vácuo, como mostrado na Figura 56, e fica ali a uma pressão de no mínimo 88 kPa, por cerca de 15 minutos, sendo que durante esse processo, o picnômetro é agitado algumas vezes. O intuito da bomba de vácuo é justamente remover o ar da mistura, sendo assim, os espaços vazios entre os grãos serem ocupados apenas por água.

Figura 55 – Conjunto água e solo até a metade do picnômetro



Figura 56 – Conjunto ligado na bomba de vácuo



(Fonte: Autor, 2023)

Após esse período, é adicionada água destilada até aproximadamente 1cm abaixo da base do gargalo, como demonstrado na Figura 57, e o processo se repete por mais 15 minutos

na mesma pressão. No término desse procedimento, adiciona-se água destilada até a marca de referência do picnômetro seja atingida e por fim, leva-se o conjunto picnômetro + água + solo à balança e sua medida é aferida (Figura 58), a partir desse valor, é possível calcular e determinar a massa específica dos grãos utilizando a equação 2.

Figura 57 - Conjunto água e solo até 1 cm abaixo do gargalo do picnômetro



Figura 58 – Pesagem conjunto picnômetro + água + solo



(Fonte: Autor, 2023)

$$\delta = \frac{M1 \times 100 / (100 + h)}{\left[M1 \times \frac{100}{100 + h} \right] + M3 - M2} \times \delta_w \quad (2)$$

Onde:

δ é a massa específica dos grãos do solo (g/cm^3);

M1 é a massa do solo úmido (g);

M2 é a massa do picnômetro + solo + água (g);

M3 é a massa do picnômetro cheio de água até a marca de referência (g);

h é a umidade inicial da amostra;

δ_w é a massa específica da água.

O método de determinação da massa específica natural de amostra indeformada consiste em primeiramente talhar um corpo de prova com uma faca até que se obtenha uma

conformação aproximadamente esférica e com diâmetro de aproximadamente 5 cm. Vale ressaltar que após a coleta, a amostra deve ser armazenada hermeticamente para evitar a perda de água. Determina-se então sua massa (M_u).

Após, deve-se preencher eventuais vazios superficiais da amostra com parafina derretida em banho maria. Próximo passo consiste em amarrar uma linha na amostra e recobri-la por completo imergindo-a na parafina derretida. Aguardar secar totalmente a parafina e determina-se a massa do corpo de prova parafinado (M_p) (Figura 59).

Figura 59 – Determinação massa do corpo de prova parafinado (M_p).

Fonte: autor, 2023

Próxima etapa consiste na fixação do corpo de prova parafinado na moldura acoplada ao prato da balança, imergindo-o totalmente em água, como representado pela Figura 60. Determina-se então a massa do corpo de prova parafinado imerso em água (M_{pi}).

Figura 60 – Determinação da massa corpo de prova parafinado imerso (M_{pi})

Fonte: autor, 2023

Com esses valores é possível calcular o volume do corpo de prova seco através da equação 3.

$$V_{cp} = \frac{(M_p - M_{pi})}{\rho_w} - \frac{(M_p - M_u)}{\rho_{paraf}} \quad (3)$$

Onde:

V_{cp} é o volume do corpo de prova (cm^3);

M_p é a massa do corpo de prova parafinado (g);

M_{pi} é a massa do corpo de prova parafinado e imerso (g);

M_u é a massa do corpo de prova (g);

ρ_{paraf} é a massa específica aparente da parafina (g/cm^3), lembrando que esse valor é conhecido em laboratório;

ρ_w é a massa específica da água (considera-se 1g/cm³)

A partir do valor encontrado do volume do corpo de prova, a massa específica aparente natural da amostra é calculada utilizando a equação 4:

$$\rho_{nat} = \frac{Mu}{V_{cp}} \quad (4)$$

Onde:

ρ_{nat} é a massa específica aparente natural (g/cm³);

Mu é a massa do corpo de prova (g);

V_{cp} é o volume do corpo de prova (cm³).

- Porosidade

A porosidade foi encontrada a partir do ensaio de permeabilidade de solos argilosos à carga variável, regido pela ABNT NBR 14545 de 2021, sendo utilizado o método A para encontrar os resultados.

- Índice de vazios

O índice de vazios foi encontrado de forma indireta, a partir da equação 5 a seguir, dada pela relação entre os pesos específicos dos sólidos e o peso específico aparente seco

$$e = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_d} \right) - 1 \quad (5)$$

Onde:

e = Índice de vazios;

γ_s = Peso específico dos sólidos;

γ_d = Peso específico aparente seco.

- Peso específico natural

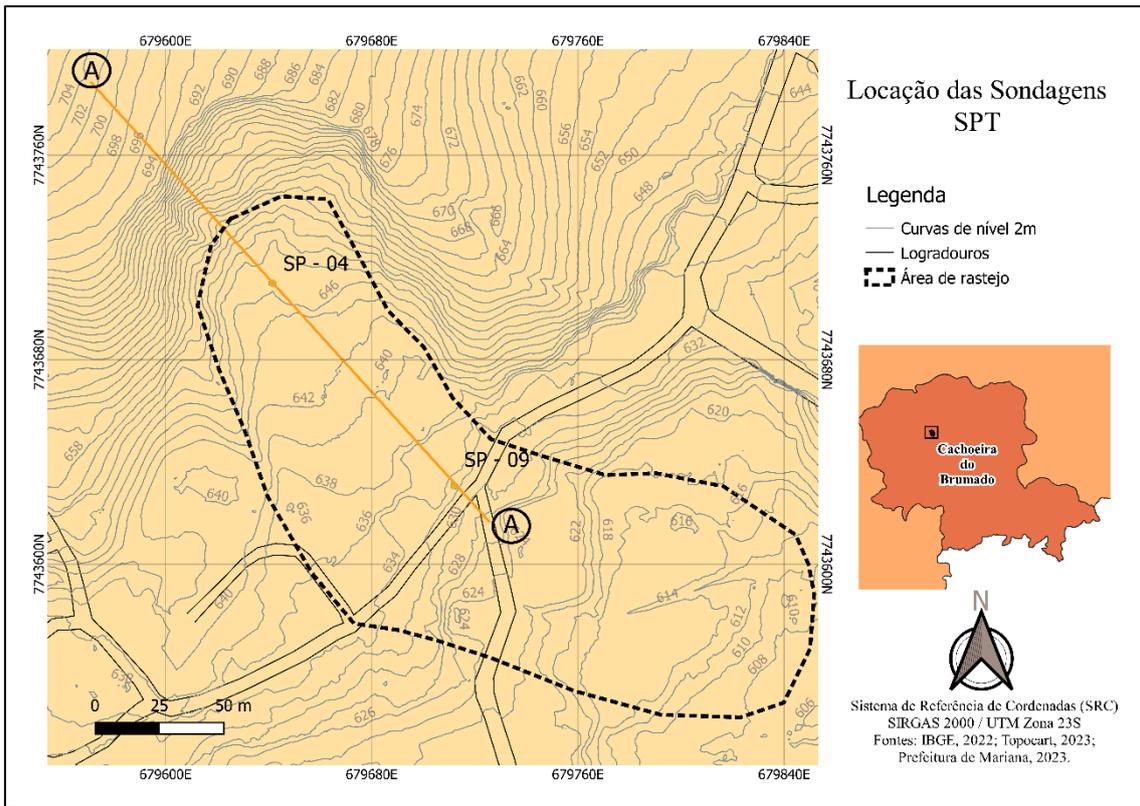
A partir dos resultados obtidos da massa específica natural, para encontrar o seu peso específico natural basta multiplicá-lo pela aceleração da gravidade, que para ensaios laboratoriais utiliza-se 10m/s^2 .

5.2. Investigações Geotécnicas

- Sondagens à percussão (SPT)

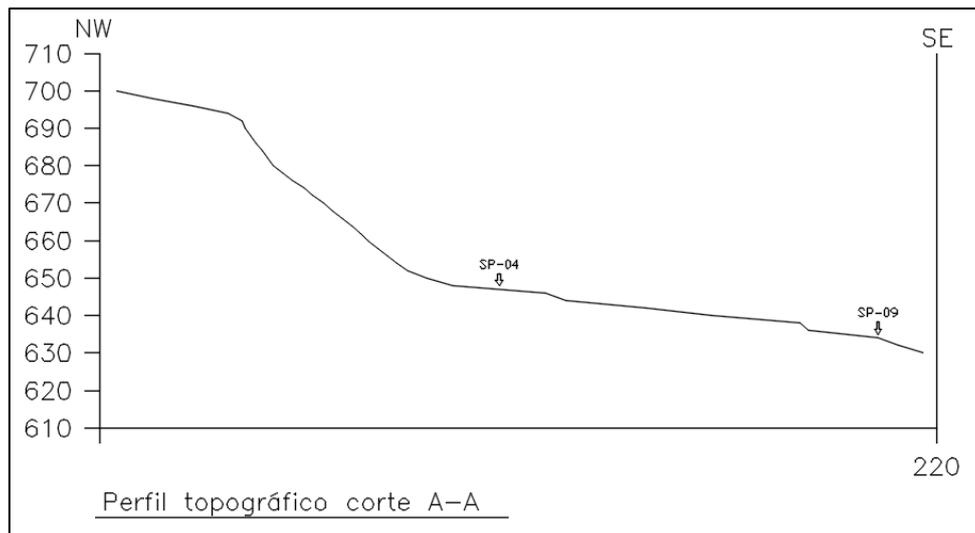
Foram definidos dois perfis de investigação por eletrorresistividade a partir dos boletins de sondagem à percussão (SPT) que se encontram no Anexo A. As sondagens à percussão foram executadas antes do início do presente trabalho e seus boletins foram disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Mariana. A Figura 61 apresenta onde foram executadas as sondagens SPT e do posicionamento desses furos. Com os dados topográficos, traçou-se um perfil topográfico longitudinal por onde foram feitas as sondagens SP 04 e SP 09, representado pela Figura 62. Com o perfil topográfico traçado e com os boletins de sondagem em mãos, elaborou-se o perfil estratigráfico do solo (Figura 63). Esse perfil foi crucial para a escolha dos locais de implantação da linha de caminhamento elétrico do método de eletrorresistividade.

Figura 61 – Mapa de localização dos poços de sondagem



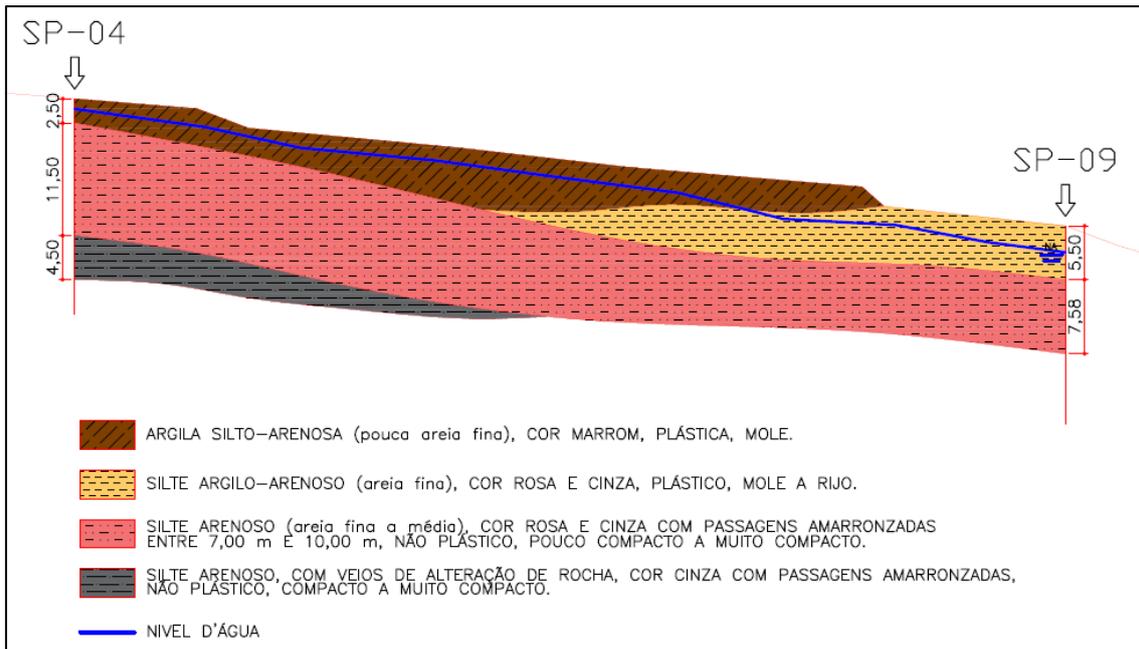
Fonte: Autor, 2023

Figura 62 – Perfil topográfico da área de estudo



Fonte: Autor, 2023

Figura 63 – Perfil estratigráfico de solo da área de estudo



Fonte: Autor, 2023

- Método de eletrorresistividade

A investigação por eletrorresistividade foi realizada no dia 17 de julho de 2023, pelo aluno, orientadora e coorientador do presente trabalho e para tal, foi o realizado o método de medição Caminhamento Elétrico (CE), com os eletrodos posicionados de acordo com o arranjo Dipolo-Dipolo. Ao todo foram 5 caminhamentos realizados longitudinalmente e transversalmente ao perfil ao sentido de movimentação do rastejo, como pode ser observado nas figuras 63, 64 e 65.

Figura 64 – Instalação de eletrodos



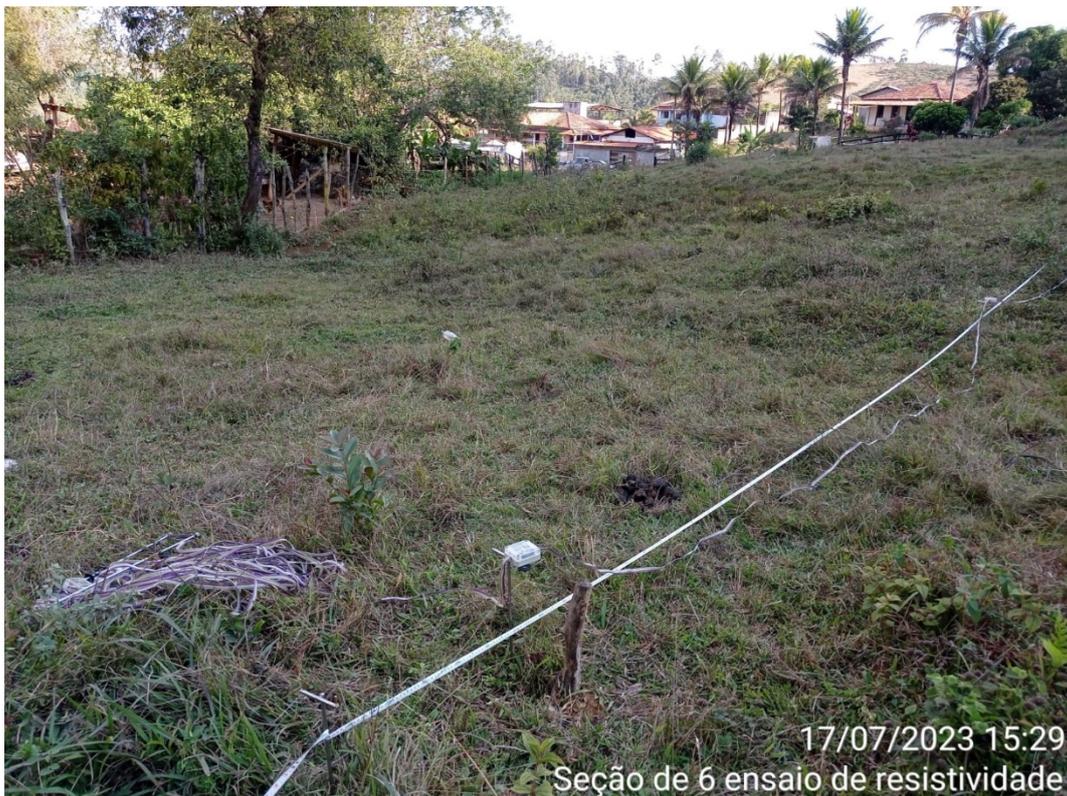
Fonte: Autor, 2023

Figura 65 – Caminhamento elétrico longitudinal.



Fonte: Autor, 2023

Figura 66 – Caminhamento elétrico transversal.



Fonte: Autor, 2023

O aparelho utilizado para a realização do ensaio foi o Resistímetro Lippmann D-94571 representado na Figura 67.

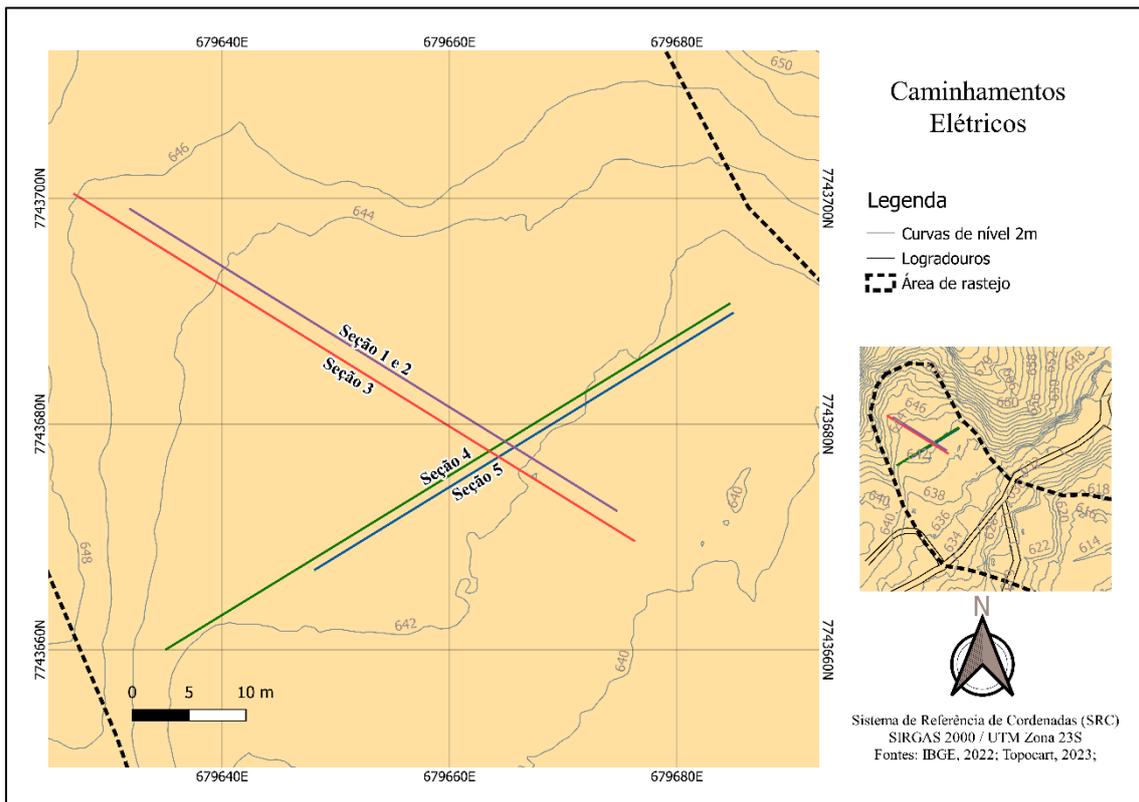
Figura 67 – Resistímetro Lippmann D-94571



Fonte: CMZ Explore, 2024

A Figura 68 exibe a localização desses CE realizados. Variou-se de seção para seção alguns parâmetros, como por exemplo, o espaçamento (a) entre os eletrodos, as profundidades de investigação (n) e o comprimento do caminhamento, conforme Tabela 2. Essas variações foram feitas para analisar as mudanças a fim de encontrar os melhores resultados para a pesquisa.

Figura 68 – Localização dos caminhamentos elétricos



Fonte: autor, 2023

Tabela 2 – Parâmetros para o caminhamento elétrico por seção.

Perfil	Espaçamento (a)	Profundidade (n)	Comprimento do CE
1	2,5 m	1 – 5	47,5 m
2	2,5 m	1 – 6	47,5 m
3	5,0 m	1 – 5	60,0 m
4	5,0 m	1 – 5	60,0 m
5	2,5 m	1 – 5	47,5 m

Fonte: Autor, 2023

Após realização de cada ensaio de cada seção, os dados geofísicos foram levantados e coletados (Figura 69) para o devido tratamento dos resultados.

Figura 69 – Levantamento dos dados geofísicos



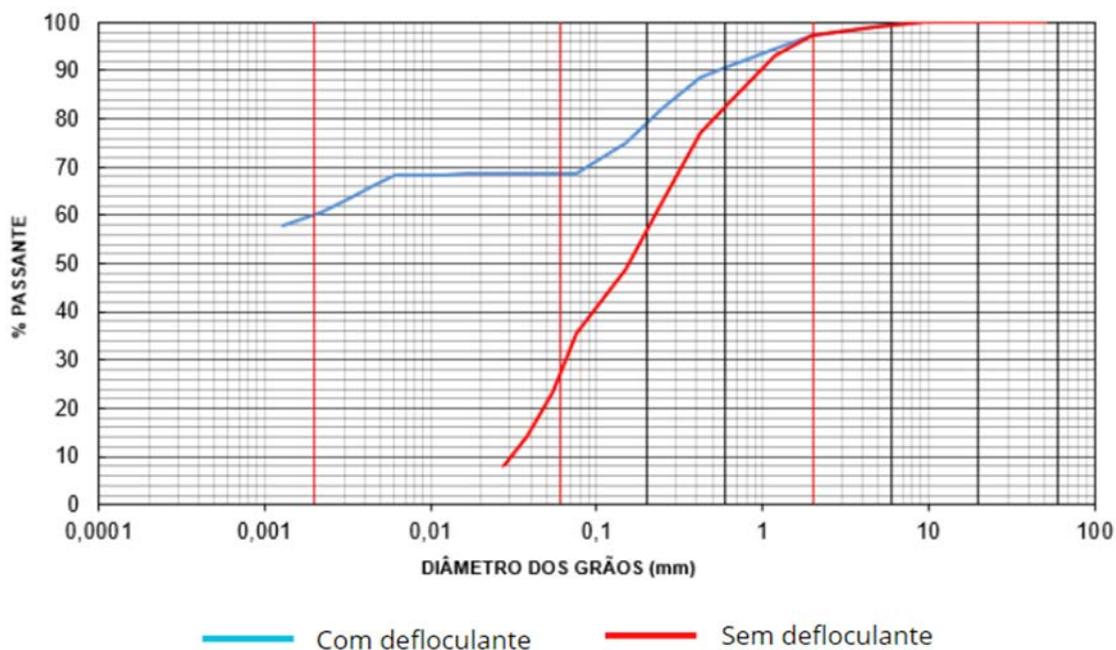
Fonte: Autor, 2023

6. Resultados e discussões

6.1. Análise granulométrica

Após a realização da análise granulométrica conjunta, obteve-se as seguintes curvas de distribuição granulométrica do solo, sendo representadas pelo Gráfico 1.

Gráfico 1 – Curva de distribuição granulométrica com defloculante



Fonte: Autor, 2023

A partir das curvas apresentadas, os dados apresentados na Tabela 3, com as porcentagens de cada tipo de solo de acordo com as dimensões de seus grãos.

Tabela 3 – Distribuição granulométrica do solo

Frações granulométricas	% Solo - Com defloculante	% Solo - Sem defloculante
Pedregulho	2,8%	2,8%
Areia	28,7%	70,2%
Silte	8,5%	27,0%
Argila	60,0%	0,0%

Fonte: Autor, 2023

Esses resultados mostram que o solo naturalmente disperso (sem defloculante) apresenta os grãos de tamanho argila formando grumos da dimensão de silte e de areia fina, como mostrado por Silva (2000). Dessa maneira, o solo natural, sem defloculante, é classificado como areia siltosa, enquanto sua granulometria se caracteriza como uma argila arenosa.

A formação de grumos pode interferir diretamente nas características geomecânicas do solo. O hexametáfosfato de sódio, neste caso, agiu como um dispersor químico do solo. Esse efeito pode ser observado em diversos solos tropicais principalmente associado ao intemperismo químico (Camapum de Carvalho, 2004).

6.2. Limite de Atterberg

Por se tratar de um solo fino, torna-se necessário a realização dos ensaios de LL e LP para sua classificação, e conseqüentemente o cálculo do índice de plasticidade (IP).

Após a realização dos ensaios chegou-se aos seguintes resultados mostrados na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 – Resultado dos limites de Atterberg encontrados

LL (%)	LP (%)	IP (%)
47	27	20

Fonte: Autor, 2023

6.3. Índices físicos e classificação do solo

Os resultados obtidos dos índices físicos são apresentados na Tabela 5 abaixo:

Tabela 5 – Índices físicos

Υ_{nat} (kN/m³)	w (%)	ρ_s (g/cm³)	Índice de vazios (e)	Sr (%)	Porosidade (%)
16,61	36,71	2,71	1,23	80,76	55,23

Fonte: Autor, 2023

Ao analisar o peso específico natural encontrado, nota-se que o valor está abaixo do normalmente encontrado, onde, de acordo com Pinto (2006), situa-se em torno de 19 a 20 kN/m³. A umidade situa-se dentro dos valores geralmente encontrados, entre 10 e 40%, ainda de acordo com Pinto (2006), porém, próximo ao limite superior, destacando assim

um valor elevado. Com a umidade encontrada, LL e LP, é possível calcular o Índice de Consistência (IC) a partir da equação 6, proposta por Terzaghi (Pinto, 2006):

$$IC = \frac{LL - w}{LL - LP} \quad (6)$$

Após cálculos, encontra-se um valor igual a 0,51, esse valor, de acordo com Sousa Pinto (2006), representa uma consistência mole a média, representando uma baixa coesão nos grãos.

O índice de vazios encontra-se dentro da faixa esperada pela literatura, situando-se entre 0,5 e 1,5. No entanto, vale notar que o valor encontrado é considerado elevado, o que está diretamente relacionado com a porosidade do material, a qual apresentou um valor também alto. Pode-se correlacionar esse valor elevado com o baixo valor do peso específico. Isso porque o peso específico é inversamente proporcional ao volume da amostra, dessa forma, quanto maior o índice de vazios, maior o volume da amostra com o mesmo peso, resultando na redução do peso específico.

Quando analisado o grau de saturação (Sr), apresentou um solo muito saturado, alcançando a marca dos 80%, lembrando ainda que a coleta das amostras foi realizada em julho de 2023, época de estiagem, e mesmo assim apresentou um número elevado. Pode-se relacionar esse valor elevado à proximidade da amostra coletada ao nível d'água subsuperficial muito raso, como pode ser observado nos boletins de sondagem (Anexo A).

Em relação a permeabilidade, após a realização do ensaio de permeabilidade de solos argilosos à carga variável, foi encontrado um valor para o coeficiente k igual a $4,62 \times 10^{-4}$ m/s. Esse valor é significativo quanto a permeabilidade do solo no local, uma vez que se trata de uma argila arenosa com coeficiente de permeabilidade similar a uma areia média, conforme valores típicos apresentados por Sousa Pinto (2006). Isso confirma a estrutura em grumos já evidenciada na avaliação da granulometria, onde os grãos de argilas se aglomeram formando assim grãos maiores, com diâmetros similares as areias, o que aumenta a porosidade do solo e deixa-o mais propício à infiltração da água.

A partir dos índices físicos, LL, LP e granulometria, pode-se classificar o solo de acordo com Sistema SUCS (Sistema Unificado) como CL – Argila Pouco Plástica. Trata-se de um solo fino, devido a porcentagem passante pela peneira #200 ter sido maior que 50%, com um LL < 50 e com IP > 7, acima da linha A. O Quadro 2 abaixo representa como foi feita essa classificação a partir dos resultados obtidos em laboratório.

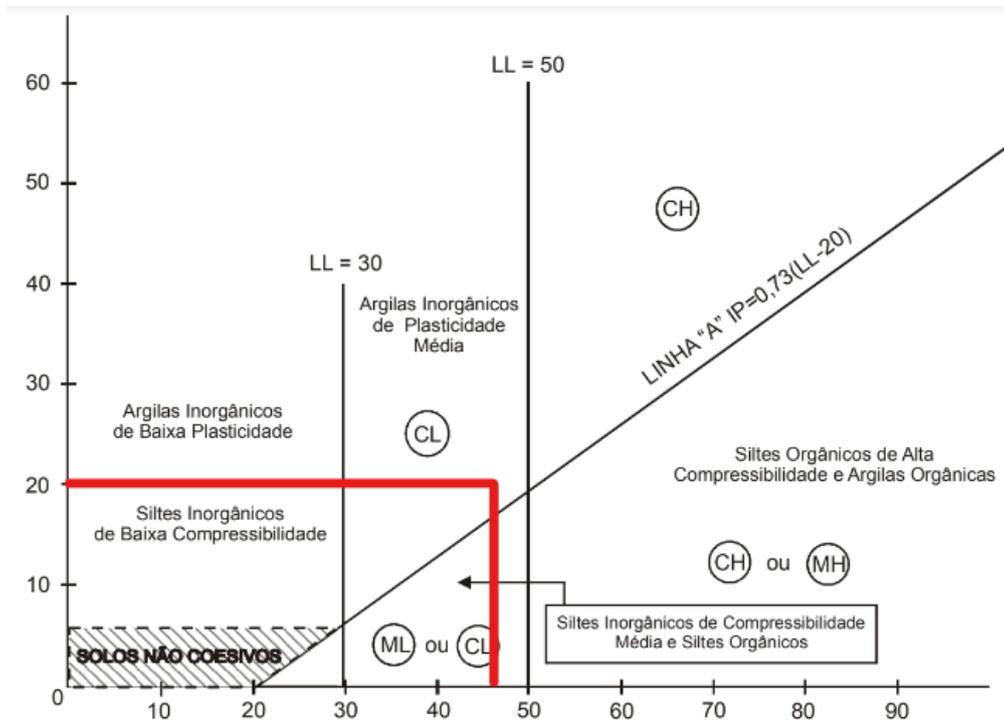
Quadro 2 – Classificação dos solos pelo método SUCS

SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA: mais de 50% retido na peneira nº 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira nº 4	Pedregulho sem finos	GW	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia de ped.com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e ped.com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulho com finos	GM	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped.areia e silte.
			GC	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped.areia e argila.
	Areias: 50% ou mais da fração graúda passando na peneira nº 4	Areias sem finos	SW	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mau graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	SM	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila.
SOLOS DE GRADUAÇÃO FINA: 50% ou mais passando pela peneira nº 200	SILTES e ARGILAS com LL ≤ 50	ML	Siltos inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.	
		CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade - Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.	
		OL	Siltos orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.	
	SILTES e ARGILAS com LL > 50	MH	Siltos - Areias finas ou siltos micáceos - Siltos elásticos.	
		CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.	
		OH	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade.	
	Solos Altamente Orgânicos	PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos.	

Fonte: DNIT, 2006, adaptado pelo autor

Com esses valores inseridos na Carta de Plasticidade de Casagrande (Gráfico 2), pôde-se observar que o solo está localizado acima da linha A, classificando-o como uma argila inorgânica de média plasticidade (CL).

Gráfico 2 – Carta de plasticidade de Casagrande. Linha vermelha indica o posicionamento dos valores correspondentes ao solo estudado



Fonte: DNIT, 2006

Analisando assim, destaca-se que o valor encontrado do IP, demonstra uma argila de alta plasticidade, porque, de acordo com Silva (2018), valores de IP acima de 15 correspondem a argilas muito plásticas. Entretanto, analisando a Carta de Casagrande, o qual diz respeito do solo em estudo, pode-se notar que mesmo com um valor de IP alto, seu LL é menor que 50% e maior que 30%, implicando em um solo de média plasticidade.

Essa classificação condiz com o que foi apresentado pelos boletins de sondagem à percussão (Anexo A), os quais classificam o solo como uma argila silto-arenosa a partir do método tátil visual, isso pode ser observado na curva granulométrica que realmente há presença de silte e areia na composição do solo, mesmo que em menor porcentagem. Entretanto, diante dos resultados imagina-se que a classificação pela metodologia MCT (Miniatura Compactada Tropical) de Nogami e Villibor (1981) seria a mais indicada para a avaliação do solo estudado, pois apresenta melhores resultados para solos agregados com grande porcentagem de finos.

A avaliação dos resultados obtidos com os ensaios geotécnicos indica que o solo estudado possui com grande facilidade em infiltrar água, visto que existem grumos na sua

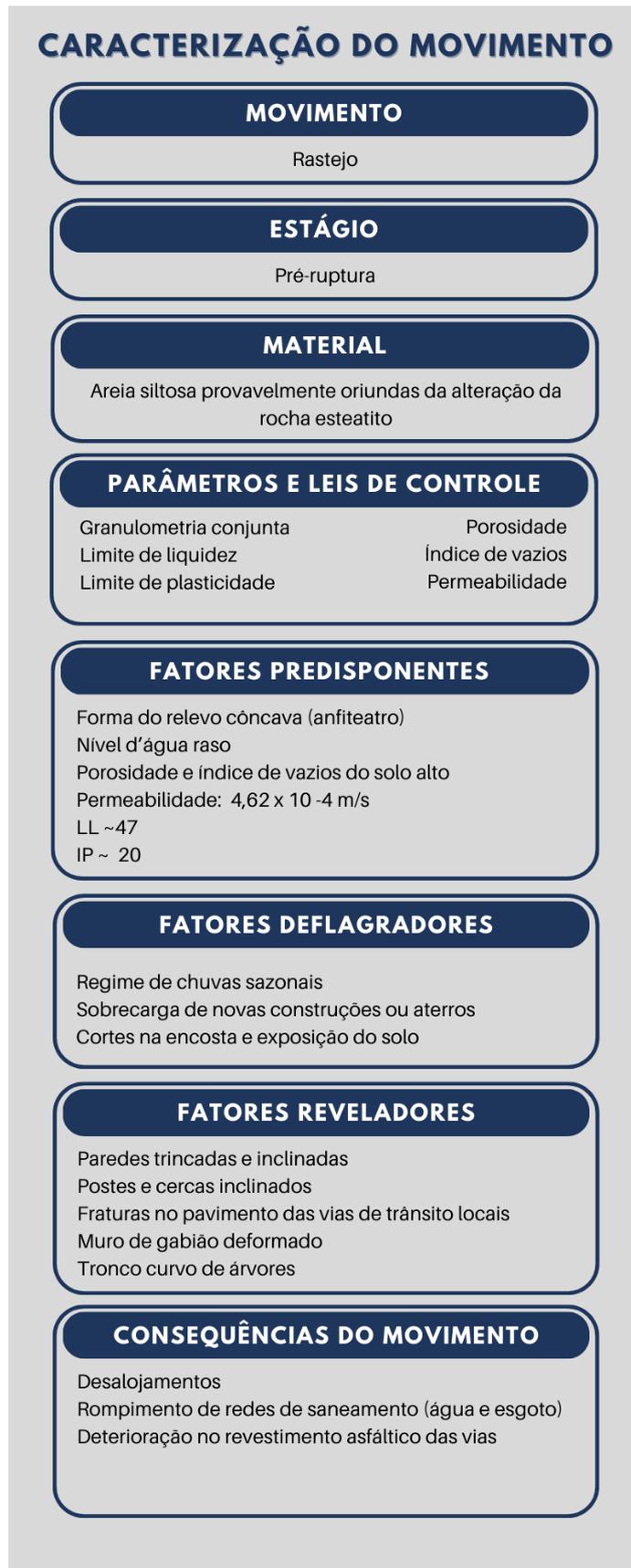
formação, deixando o índice de vazios elevado, juntamente com uma alta porosidade e a alta permeabilidade. Vale ressaltar a importância da permeabilidade para o estudo, o que implica que o solo apresenta significativa capacidade de condução de águas subterrâneas e subsuperficiais corroborando com o que é apresentado pelos dados da sondagem à percussão. Enquanto isso, os limites de Atterberg mostram o comportamento da fração fina do solo em relação à sua umidade e demonstram um solo medianamente plástico.

Com essas características, o solo em estudo pode até se tratar de um solo colapsível, já que, de acordo com Junior e Futai (2010), para ser considerado como tal, obrigatoriamente deve apresentar uma estrutura metaestável, estrutura porosa, caracterizada por um elevado índice de vazios, e a condição não saturada, características que são observadas nos resultados obtidos. No trabalho de Junior e Futai (2010), observa-se uma semelhança nos resultados dos índices físicos encontrados com os resultados do presente trabalho, como o índice de vazios próximo de 1,3 e grau de saturação entre 70 e 75%. Entretanto, é impossível confirmar sem outros ensaios, como por exemplo o ensaio endométrico simples, endométrico duplo e o expansocolapsômetro.

6.4. Caracterização geotécnica

A partir dos resultados apresentados e utilizando a metodologia de caracterização geotécnica do movimento demonstrada por Leroueil e Locat (1998), é apresentada na Figura 70 a caracterização do movimento de rastejo estudado. Os dados foram preenchidos utilizando também as informações coletadas na vistoria de campo e nas discussões sobre o histórico da movimentação e suas consequências.

Figura 70 – Caracterização geotécnica do movimento.



Fonte: Autor, 2023

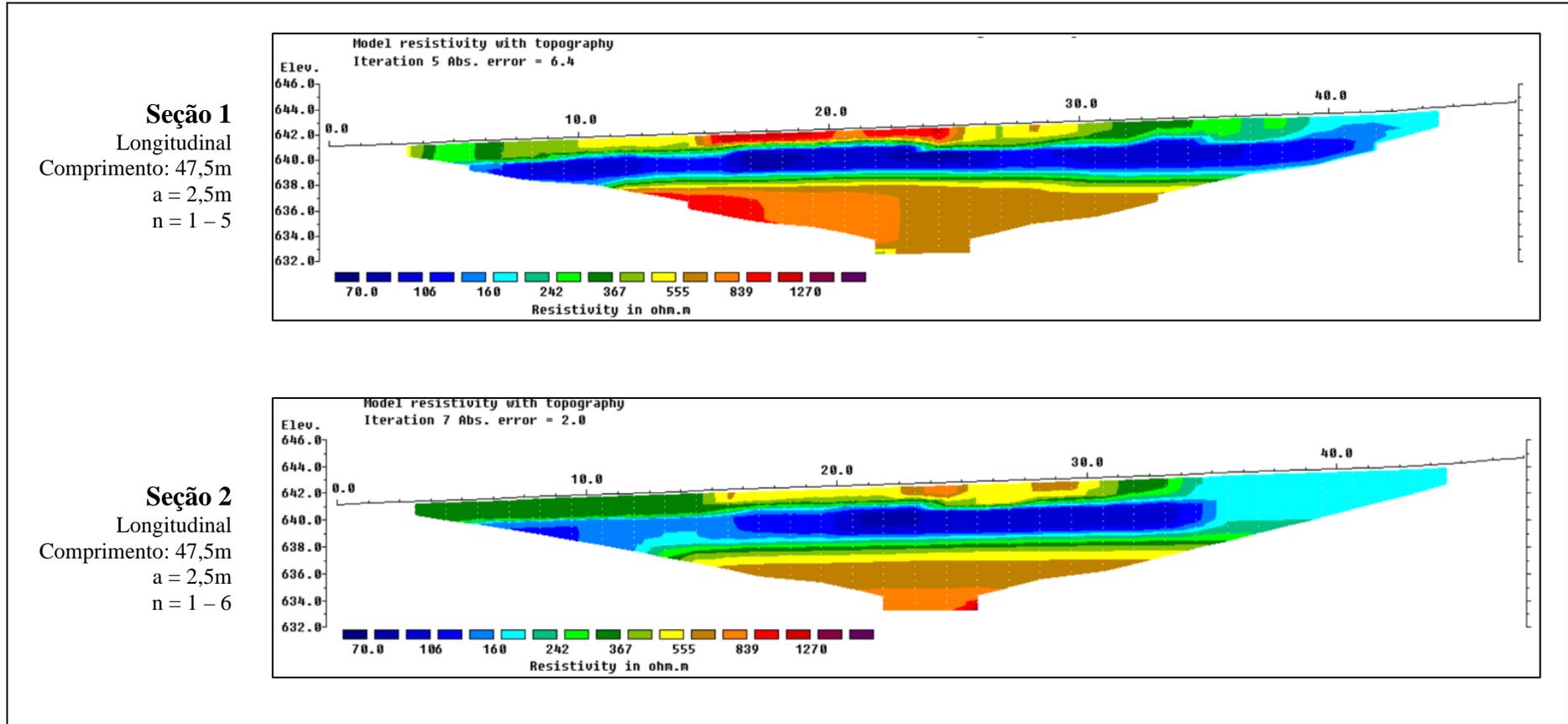
6.5. Seções geofísicas

Com a realização dos caminhamentos elétricos para análise de eletrorresistividade do subsolo obteve-se as seguintes seções geofísicas de acordo com os parâmetros adotados:

As seções 1 e 2 (Figura 71) e seção 3 (Figura 72) foram realizadas no mesmo sentido, longitudinal ao movimento. É possível notar, em todas as seções, a presença da água muito próxima à superfície no sentido do movimento, variando entre 1,5m e 2m, resultados que coincidem com os vistos nos boletins de sondagem do anexo A, com fluxo seguindo a topografia. Com relação a seção 4 (Figura 72) e seção 5 (Figura 73), os caminhamentos foram feitos transversalmente ao movimento, e pode-se destacar que a presença de água se concentra na região central, levando a conclusão da existência de algo semelhante a um curso d'água subterrâneo.

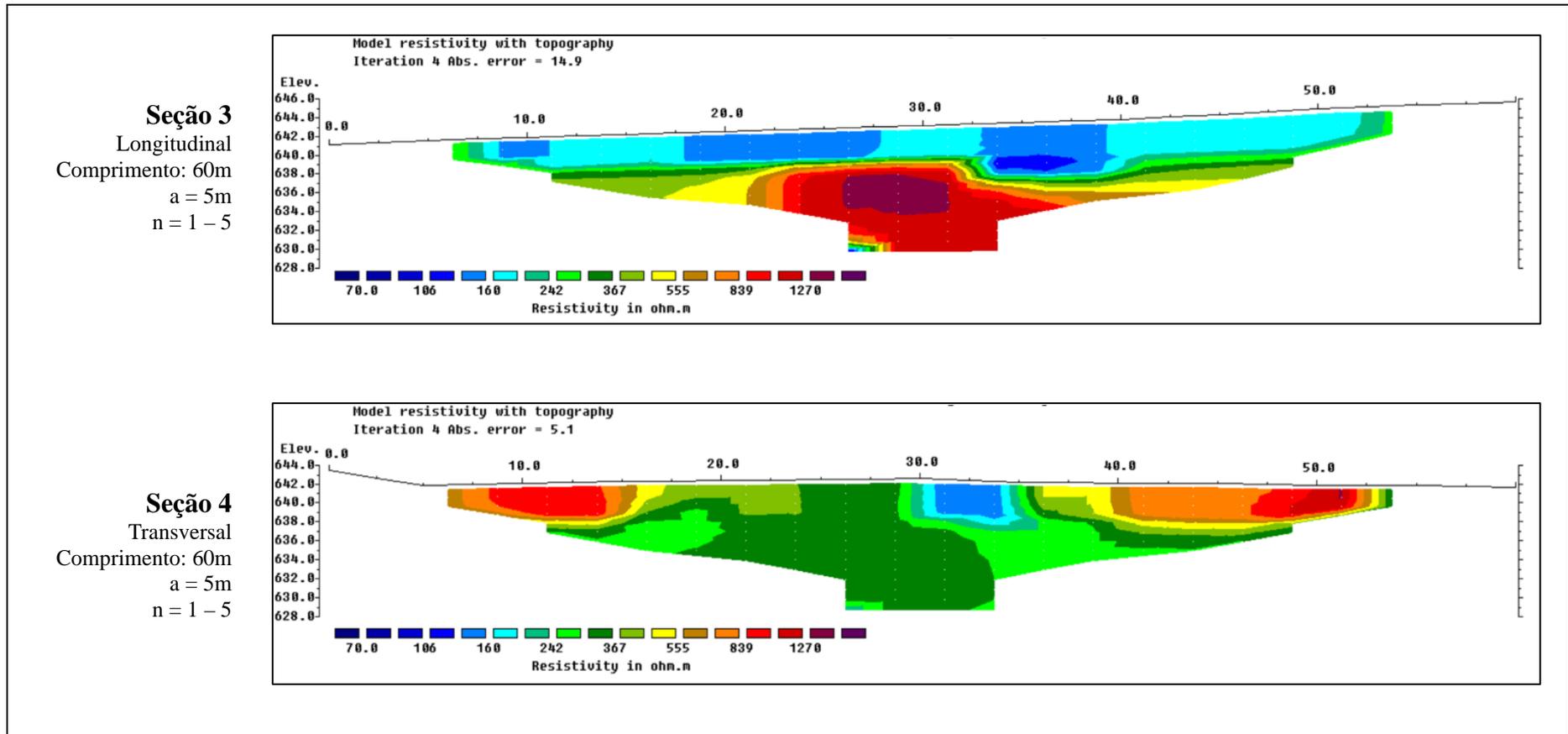
Após análise dos resultados obtidos, sugere-se a influência da água como fator condicionante para a movimentação, visto que ela está presente com abundância, mesmo com os levantamentos realizados fora das épocas de chuvas (julho/2023). Vale destacar um notório aumento do detalhamento da investigação geofísica quando se utiliza espaçamentos menores entre os eletrodos. Em contrapartida, observa-se que nesses casos, a seção abrange profundidades mais rasas, diferente de quando se utilizaram maiores espaçamentos e obteve-se seções mais profundas.

Figura 71 – Seções de resistência elétrica 1 e 2



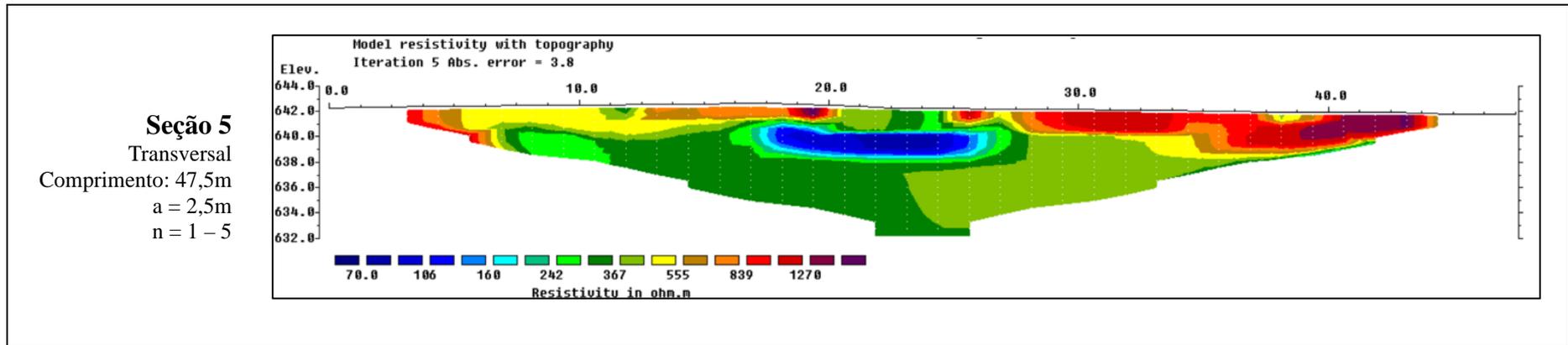
Fonte: Autor, 2023

Figura 72 – Seções de resistência elétrica 3 e 4



Fonte: Autor, 2023

Figura 73 – Seção de resistência elétrica 5



Fonte: Autor, 2023

6.6. Carta de risco geotécnico

Quando se trata da análise urbana da região de estudo, observa-se uma defasagem quanto seu planejamento e restrições construtivas, as quais deveriam implicar na proteção das pessoas que moram nas proximidades do rastejo. Voltando a discutir sobre a Figura 33 (em Caracterização da Área de Estudo), foi observado que o local não apresenta divergência de zoneamento se comparado às regiões vizinhas, sendo até uma parcela da área de movimentação localizada fora do perímetro urbano. Outro destaque é o mapeamento (Figura 34) da Defesa Civil de Mariana, o qual também não apresenta definição de risco para a área.

Diante disso, torna-se necessário propor tratativas e soluções urbanísticas a fim de minimizar os impactos desse fenômeno. Restringir o adensamento populacional é crucial, visto que diante dos resultados encontrados, o solo mais superficial não oferece condições necessárias para a estabilização de uma edificação com fundações convencionais.

Uma característica da localidade que facilitaria essa restrição é a conscientização dos moradores quanto aos riscos associados à construção. Diversos moradores, alguns antigos, relataram sempre as mesmas situações, nas quais alertam sobre a instabilidade do solo quanto a construções, e as poucas estruturas que existem no local já demonstram sinais de patologias devido à movimentação do solo.

Conforme o Plano Diretor de Mariana, a área do rastejo é em parte ZAR 1 (Zona de Adensamento Restrito – 1) e ZPPA (Zona de Proteção Paisagística e Ambiental). Pelas descrições de cada uma, toda a área poderia ser delimitada como ZPPA (conjunto das áreas internas ao Perímetro Urbano destinadas prioritariamente à preservação ambiental, manutenção da qualidade ambiental, proteção da paisagem natural e histórica bem como transição entre o ambiente urbano e o rural); enquanto que o ZAR1 permite a permanência de ocupações (mas controle o adensamento), ainda que destaque a necessidade da preservação da ambiência e proteção da paisagem urbana histórica bem como em função da estrutura urbana existente. Em se tratando de uma área de risco, ali não pode ter ocupação e as edificações já existentes deveriam ser realocadas a partir de programas e políticas públicas para esse fim.

Levando em consideração o mapeamento da defesa civil, nota-se também uma defasagem de informações quanto os riscos associados ao local, dessa maneira torna-se também necessário alterações no mapeamento das áreas de riscos, de modo incluir a área do rastejo como uma área de risco geotécnico. Para a avaliação do risco, de acordo com Parizzi, (2014), é necessário envolver o inventário do perigo (P) associado a movimentação e a vulnerabilidade (V) dos elementos inseridos na área, resultando assim no mapeamento da área de risco (R), de acordo com a equação 7 abaixo:

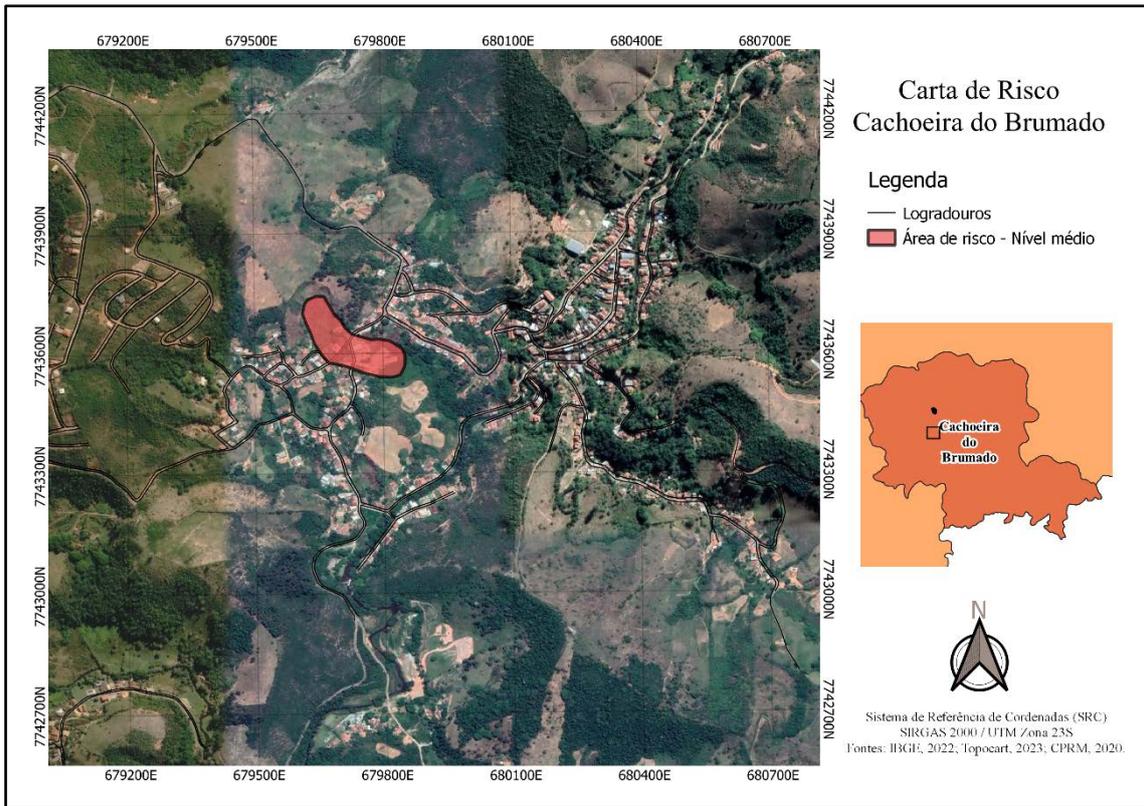
$$R = P \times V \quad (7)$$

Após a análise dos dados coletados durante o estudo, destaca-se um solo com propriedades geomecânicas que representam um considerável perigo. Isso ocorre devido ao fato de ser um colúvio altamente poroso, com um índice de vazios significativo, além de o nível d'água encontrar-se próximo à camada superficial. A combinação desses fatores contribui de maneira conjunta para uma situação de perigo iminente.

Entretanto, ao considerar a vulnerabilidade, destaca-se uma área de baixa densidade populacional, onde a maioria das residências permanece desocupada, sendo utilizada predominantemente para atividades comerciais. Nesse contexto, a aplicação da equação revela um risco moderado. Importante notar que a movimentação do colúvio é caracterizada por uma progressão lenta, proporcionando tempo adequado para que as pessoas nas proximidades possam adotar medidas preventivas diante do iminente desastre.

A carta de risco (Figura 74) abaixo representa sugestão de inclusão de uma nova área de monitoramento, visando continuidade no estudo do local, com intensões de evitar o adensamento e viabilizar projetos para a estabilização do movimento.

Figura 74 – Carta de risco da área de estudo.



Fonte: Autor, 2024

7. Conclusão

O rastejo em curso no distrito de Cachoeira do Brumado impõe desafios e preocupações significativas para o desenvolvimento e o bem-estar da comunidade local. Esse fenômeno é resultado de uma interação complexa de vários fatores que influenciam sua movimentação, incluindo propriedades geotécnicas específicas, associadas a uma notável presença de água, com o nível d'água (NA) extremamente próximo à superfície. Os ensaios laboratoriais e as investigações geotécnicas foram cruciais para entender as características do material presente na área de movimentação.

A movimentação gradual e constante das camadas superiores sobre o substrato rochoso inevitavelmente impacta as edificações e infraestruturas da área. Recalques ocorrem, causando fissuras e trincas nas residências e vias, além de rupturas em redes hidráulicas e o tombamento de postes e cercas. Em alguns pontos, é possível identificar uma delimitação clara da área de movimentação, proporcionando uma definição dessa região impactada.

Infelizmente, propor soluções totalmente eficazes torna-se desafiador sem um entendimento preciso das magnitudes do movimento, como profundidade, velocidade e extensão, uma vez que o rastejo é dinâmico e sujeito a variações em seus fatores condicionantes. Assim, a principal medida protetiva para assegurar a segurança dos moradores é a restrição ao adensamento populacional. Além disso, a implementação de obras de drenagem pode desempenhar um papel crucial na minimização dos impactos, reduzindo as poropressões no solo por meio do rebaixamento do lençol freático.

Para futuras pesquisas na região, sugerem-se abordagens como a utilização de drenos horizontais profundos (DHPs) para o rebaixamento do nível d'água. A realização de ensaios específicos para estudar a possível classificação do solo como colapsível também se mostra pertinente, dado que suas características indicam essa possibilidade. Adicionalmente, é recomendável intensificar o monitoramento da movimentação, tanto em termos de deslocamento quanto na variação do nível d'água, a fim de fornecer dados mais robustos para a compreensão e gestão desse fenômeno dinâmico.

Outras sugestões para pesquisas na área é implementar a classificação dos solos pela metodologia MCT (Miniatura Compacta Tropical) de Nogami e Villibor (1981), isso porque o solo em estudo apresenta caráter tropical, e essa classificação é utilizada justamente para esse tipo de solo, onde apresentam melhores resultados para agregados com grande porcentagem de finos.

Além disso, a geofísica demonstrou ótimos resultados que agregaram valor para o estudo, abrindo portas para pesquisas mais aprofundadas no tema. Considera-se correlacionar a presença de argila, estudando as suas eletrorresistividades e influência com o NA encontrado, analisando principalmente suas alterações quando saturada. Adicionalmente, a investigação geofísica mais profunda seria ideal para o estudo, em perfis de afloramento de rocha e em solo residual, principalmente a passagem da rocha-matriz, observando se há sinais de movimentação, de modo a delimitar a profundidade da massa que rasteja.

8. Referências

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459 – Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6508 – Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181 – Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16867 – Solo – Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas – Método da balança hidrostática. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

AUGUSTO FILHO, O. (1992). Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilha Bela, SP. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – SP, p.162.

BASTOS, Cezar Augusto Burkert. Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. 1999.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Manual de Pavimentação: IPR 719. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2006

BRAJA, M.; SOBHAN, K. Fundamentos de Engenharia Geotécnica. 4ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2019.

BRICALLI, Luiza Leonardi. Caracterização litoestratigráfica e geotécnica e correlações com a ocorrência de processos de movimento de massa em talude da formação barreiras (Cariacica-ES). *Geografares*, n. 19, p. 3-27, 2015.

BORGES, Welitom Rodrigues. Investigações geofísicas na borda da bacia sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade. 2002. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CABRAL, Gilberto Júnio. Alternativas para o reassentamento de moradores em situação de risco nos bairros Piedade e Taquaral, em Ouro Preto/MG. 2023. 95 f. Monografia (Graduação em Engenharia Urbana) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. Propriedades e comportamento de solos tropicais não-saturados. In: Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, 5. São Carlos, SP. 2004, p.597-616.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL; Ação emergencial para reconhecimento de áreas de alto e muito alto risco a movimentos de massa e enchentes, 2016.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL; Mais de 582 mil pessoas vivem em áreas de risco geológico em Minas Gerais, 2024. Disponível em: <<https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202401/mais-de-582-mil-pessoas-vivem-em-areas-de-risco-geologico-em-minas-gerais>>. Acesso em: 08 fev. 2024.

GONÇALVES, Yanna D.'Angelis de Carvalho. ESTUDO DE MOVIMENTO DE MASSA DO TIPO RASTEJO (Creeping) NO MORRO DO BENJAMIN, EM SÃO JOSÉ-SC. 2014. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina.

GUIDICINI, G., NIEBLE, C. M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. São Paulo: Edgard Blücher - Ed. da Universidade de São Paulo. 1984.

HIGHLAND, Lynn M.; BOBROWSKY, Peter. O Manual de Deslizamento—Um Guia para a Compreensão de Deslizamento. Reston, Virgínia, Circular do Serviço Geológico dos EUA, 2008.

IPT/INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (1991). Ocupação de encostas. In: CUNHA, M.A. (coordenador). São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, p.91.

ISSA, Mohamad Ali Ahmad Mohamad. Análise das manifestações patológicas em unidade escolar: o caso da Escola Municipal Anísio Teixeira. Engenharia Civil-Pedra Branca, 2019.

ITO, W. H.; GODOIS, J. V. S.; FUTAI, M. M. Influência do nível d'água no movimento de uma encosta em rastejo na zona norte da cidade de São Paulo. 2012.

JORDT-EVANGELISTA, H.; SILVA, M. E. da. Rochas metaultramáficas de Lamim, sul do Quadrilátero Ferrífero, MG: contribuição ao conhecimento do protólito da pedrasabão. Rem: Revista Escola De Minas, 58(1), 11–20, 2005.

JUNIOR, Ilço Ribeiro; FUTAI, Marcos Massao. Estudo de caso de um melhoramento de solos colapsíveis com compactação. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 2010.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. Geofísica de exploração. John Wiley e Filhos, 2002.

Lei Complementar N° 228, de 22 de dezembro de 2022. Institui o Plano Diretor do Município de Mariana e dá outras providências. Mariana, MG

LEROUEIL, Serge; LOCAT, Jacques. Slope movements—geotechnical characterization, risk assessment and mitigation. In: Geotechnical hazards. CRC Press, 1998. p. 95-106.

MARICATO, Erminia. Brasil, cidades alternativas para crise urbana. 7ª ed. Petrópolis: Editora Vozes, 2001.

VINICIUS MELO NETO, Marcus. Classificação e caracterização geotécnica de dois movimentos de massa no estado de Pernambuco. 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

NOGAMI, J. S. & Villibor, D. F. Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos, São Paulo, Editora Vilibor, 1995, 213p.

NOLA, Iraydes Tálita de Sena. Avaliação de dados geológico-geotécnicos prévios para elaboração de carta de eventos perigosos de movimentos de massa gravitacionais por meio de redes neurais artificiais e probabilidade. 2015. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, Antonio Manoel dos Santos; MONTICELI, João Jerônimo (Eds.) Geologia de engenharia ambiental. São Paulo: ABGE, 2018.

PARIZZI, Maria Geovana. Desastres naturais e induzidos e o risco urbano. Geonomos, UFMG, 2014. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/revistageonomos/article/view/11705>>, acesso em 27 de janeiro de 2024.

QUEIROZ, Rudney C. Geologia e geotecnia básica para engenharia civil. São Paulo, Editora Blucher, 1ª Edição, 2016.

REIS, Gabriel Augusto de Faria. Caracterização geotécnica por ensaio de campo e análise de estabilidade: estudo de caso de uma barragem de rejeitos de bauxita. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

REIS JR, Walter D.; PARIZZI, Maria Giovana. Caracterização das unidades geotécnicas da porção leste da região metropolitana de Belo Horizonte–MG. Geonomos, 2018.

SILVA, T. R. M. Caracterização e Erodibilidade dos Solos de uma Voçoroca na Região de Ouro Preto, Minas Gerais, 2000. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SILVA, Rafael Cerqueira; COSTA, D. P.; EHRLICH, M. Movimentação de Rastejo e Proposta de Estabilização de um Depósito de Solo Residual de Filito. V Simpósio Pan-americano de Deslizamentos (SPD), Salvador, Bahia, Brasil, 2018.

Silva, R. S. R. Retroanálise de um deslizamento de talude ocorrido no morro da Praia Mole/SC-406. UFSC, Florianópolis, 2019.

SOUSA PINTO, Carlos de. Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3ªed. São Paulo, Oficina de textos, 2006.

SUZUKI, S.; LACERDA, W. A.; FUTAI, M. M. Estimativa de Parâmetros de Resistência para Estabilidade de uma Encosta com Base em Ensaios de Laboratório e Retro-Análise.

TEIXEIRA, Paulo César et al. Manual de métodos de análise de solo. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

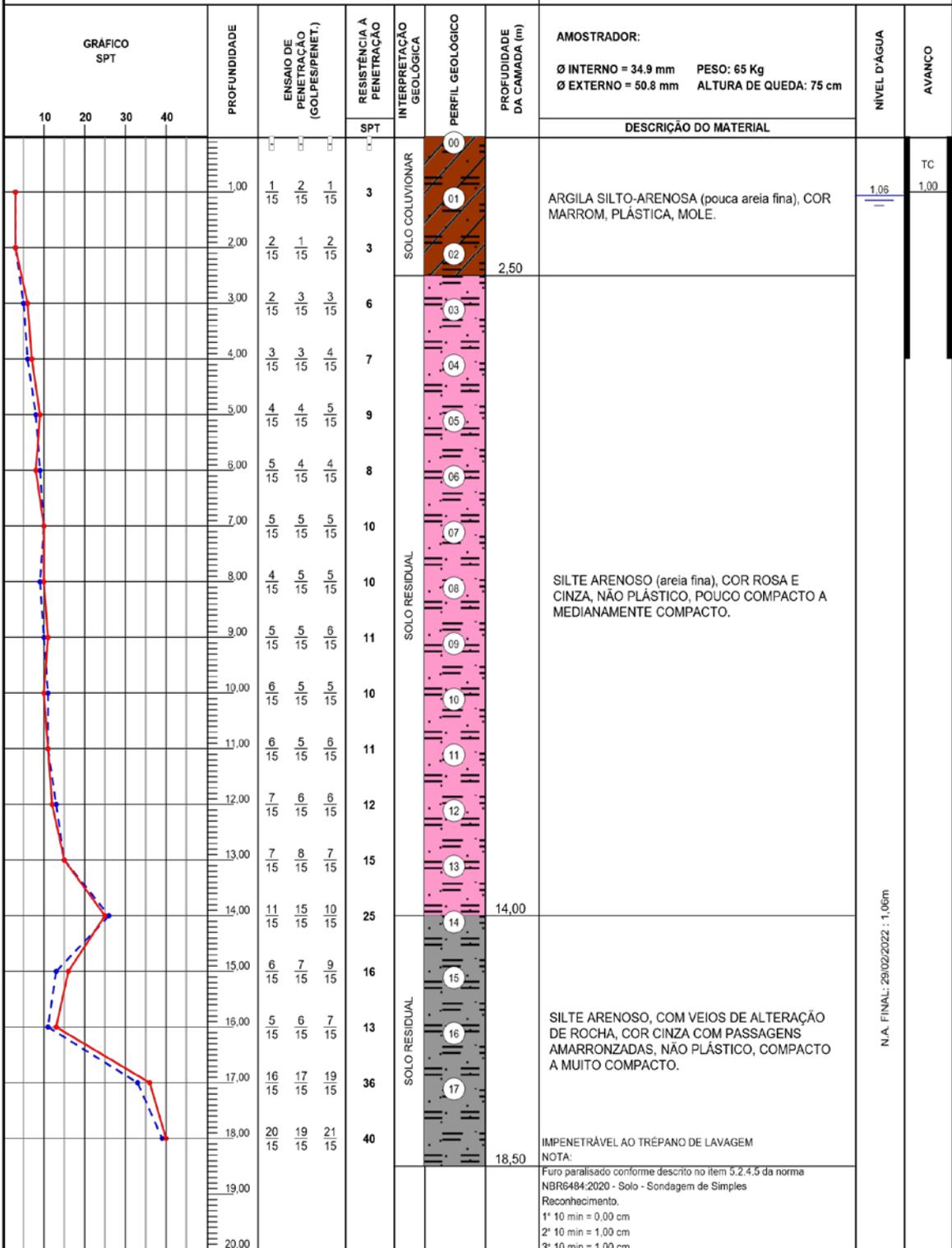
VARNES, D.J. Slope movement types and process. Landslides - analysis and control. Transportation Research Board, Special Report 176, p.11-13, 1978.

ANEXO A

Boletins de sondagem SPT

SONDAGEM DE SIMPLES RECONHECIMENTO DO SOLO COM SPT
NBR 6484/20

CLIENTE: CNM ENGENHARIA LTDA OBRA: RUA TOMBADOURO LOCAL: MUNICÍPIO DE MARIANA - MG	SONDAGEM À PERCUSSÃO SP-04 INÍCIO: 26/02/2022 TÉRMINO: 28/02/2022 COTA: - COORD. N.: - E: -
--	--



OBS.:

LEGENDAS: 30 cm INICIAIS - 30 cm FINAIS - TRADO CAVADEIRA - TC - TRADO HELICOIDAL - TH - CIRCULAÇÃO DE ÁGUA - CA - REVESTIMENTO ATERRO - A - SOLO ALUVIONAR - SA - SOLO COLUVIONAR - SC - SOLO FLUVIAL - SF - SOLO MARINHO - SM - SOLO RESIDUAL - SR - SAPROLITO DE ROCHA - SPR

	DATA:	TRABALHO N°:	FOLHA:	 Eng° Rogério Avelar Marinho 93 (CREA: 12414/D)
	08/03/2022	RLRA 007.7	01	
ESCALA:	DESENHISTA:	SONDADOR:		
1/100	ISADORA M.	WELVERTON		

REGISTRO FOTOGRÁFICO

RUA TOMBADOURO – MUNICÍPIO DE MARIANA – MG

SP-04



Instalação do furo SP-04



Amostragem do furo SP-04

Rua da Paz, 152, Calafate - Belo Horizonte. CEP.: 30.411-580

Tel: (31) 3024-0362 / (31) 98888-6495 / (31) 98696-6258

SONDAGEM DE SIMPLES RECONHECIMENTO DO SOLO COM SPT
NBR 6484/20

CLIENTE: CNM ENGENHARIA LTDA OBRA: RUA TOMBADOURO LOCAL: MUNICÍPIO DE MARIANA - MG	SONDAGEM À PERCUSSÃO SP-09 INÍCIO: 03/03/2021 TÉRMINO: 03/03/2021 COTA: - COORD. N.: - E: -
---	---

GRÁFICO SPT	PROFUNDIDADE	ENSAIO DE PENETRAÇÃO (GOLPES/PENET.)			RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO	INTERPRETAÇÃO GEOLÓGICA	PERFIL GEOLÓGICO	PROFUNDIDADE DA CAMADA (m)	AMOSTRADOR:	NÍVEL D'ÁGUA	AVANÇO
		10	20	30	40				SPT		
	1,00	2/15	3/15	3/15	6	SOLO RESIDUAL	00	5,50	Ø INTERNO = 34.9 mm PESO: 65 Kg Ø EXTERNO = 50.8 mm ALTURA DE QUEDA: 75 cm	2,70	TC 1,00
	2,00	3/15	2/15	3/15	5		01				
	3,00	3/15	3/15	4/15	7		02				
	4,00	4/15	4/15	4/15	8		03				
	5,00	4/15	5/15	6/15	11		04				
	6,00	6/15	5/15	5/15	10	SOLO RESIDUAL	05	13,08	SILTE ARGILO-ARENOSO (areia fina), COR ROSA E CINZA, PLÁSTICO, MOLE A RIJO.	2,70	TC 1,00
	7,00	6/15	7/15	8/15	15		06				
	8,00	8/15	7/15	7/15	14		07				
	9,00	7/15	5/15	5/15	10		08				
	10,00	3/15	3/15	4/15	7		09				
	11,00	6/15	5/15	6/15	11		10				
	12,00	6/15	7/15	8/15	15		11				
13,00	30/5	-	-	-	12	12	IMPENETRÁVEL AO TRÉPANO DE LAVAGEM NOTA: Furo paralisado conforme descrito no item 5.2.4.5 da norma NBR6484:2020 - Solo - Sondagem de Simples Reconhecimento. Ensaio de lavagem: 1° 10 min = 1,00 cm 2° 10 min = 1,00 cm 3° 10 min = 1,00 cm	N.A. FINAL: 04/03/2021 : -2,70m	TC 1,00		
14,00											
15,00											
16,00											
17,00											
18,00											
19,00											
20,00											

OBS.:

LEGENDAS: 30 cm INICIAIS | 30 cm FINAIS | TRADO CAVADEIRA - TC • TRADO HELICOIDAL - TH • CIRCULAÇÃO DE ÁGUA - CA • REVESTIMENTO ATERRO - A • SOLO ALUVIONAR - SA • SOLO COLUVIONAR - SC • SOLO FLUVIAL - SF • SOLO MARINHO - SM • SOLO RESIDUAL - SR • SAPROLITO DE Rocha - SPR

	DATA: 08/03/2022	TRABALHO Nº: RLRA 007.7	FOLHA: 01	 Engº Rogério Avelar Marinh95 (CREA: 12414/D)
	ESCALA: 1/100	DESENHISTA: ISADORA M.	SONDADOR: WELVERTON	

REGISTRO FOTOGRÁFICO

RUA TOMBADOURO – MUNICÍPIO DE MARIANA – MG

SP-09



Instalação do furo SP-09



Amostragem do furo SP-09

Rua da Paz, 152, Calafate - Belo Horizonte. CEP.: 30.411-580

Tel: (31) 3024-0362 / (31) 98888-6495 / (31) 98696-6258