



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
ENGENHARIA CIVIL DE INFRAESTRUTURA

ALISSON DE FREITAS RODRIGUES

AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE MÉTODO GEOFÍSICO DE
ELETORRESISTIVIDADE EM ÁREA DE POTENCIAL RISCO GEOLÓGICO

Joinville
2024

ALISSON DE FREITAS RODRIGUES

AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE MÉTODO GEOFÍSICO DE
ELETORRESISTIVIDADE EM ÁREA DE POTENCIAL RISCO GEOLÓGICO

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador(a): Dr. Julián Asdrubal Buriticá García

Joinville

2024

ALISSON DE FREITAS RODRIGUES

AVALIAÇÃO DA APLICABILIDADE DE MÉTODO GEOFÍSICO DE
ELETRORRESISTIVIDADE EM ÁREA DE POTENCIAL RISCO GEOLÓGICO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 30 de Agosto de 2024.

Banca Examinadora:

Dr. Julián Asdrubal Buriticá García
Orientador/Presidente
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Marcelo Heidemann
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dra. Helena Paula Nierwinski
Membro(a)
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus amados pais, Marli X. de Freitas e Nelson G. Rodrigues, à minha querida irmã, Aline de F. Rodrigues, e à minha incrível namorada, Sabrina C. da Silva, pelo amor e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

É impossível listar todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para que eu pudesse seguir a profissão que escolhi. No entanto, não poderia começar meus agradecimentos senão pela minha família. Tenho a imensa sorte de ter nascido em um lar incrível, que sempre me apoiou de todas as formas possíveis desde a infância. Sou profundamente grato à minha mãe, amorosa e dedicada, que me transmitiu os melhores ensinamentos, e ao meu pai, trabalhador e carinhoso, uma referência de hombridade e integridade. Agradeço também à minha irmã mais velha, que sempre foi um exemplo para mim desde a infância e que hoje se tornou uma mulher inspiradora e uma mãe extraordinária dos meus amados sobrinhos, Sergio e Heitor.

Minha gratidão também vai para minha amada namorada, Sabrina, que esteve ao meu lado de forma inabalável, me apoiando durante os momentos mais difíceis.

Não posso deixar de agradecer aos meus amigos Arthur, Daniel Beber, Gabriel Parise e Vinícius, que tornaram essa jornada mais leve e divertida. Em especial, agradeço ao meu grande amigo Giorgio, com quem tive o privilégio de dividir apartamento por anos. Sua parceria foi fundamental.

Ao meu orientador, Julián, agradeço pela paciência e dedicação ao me guiar neste trabalho. Sua disponibilidade, conhecimento e visão crítica foram indispensáveis para o desenvolvimento deste projeto.

A todos da Elmo Engenharia e Infraestrutura, minha sincera gratidão pela flexibilidade e compreensão demonstradas em relação aos meus horários e aos momentos de dedicação intensa exigidos pela faculdade.

RESUMO

Este trabalho aborda a aplicação dos principais métodos de prospecção geofísica utilizados na engenharia civil, com enfoque no método da eletrorresistividade. Esse método foi aplicado em um projeto de regularização fundiária (REURB) em uma área classificada como assentamento precário, situada em uma zona de potencial risco geológico. O estudo de caso teve como objetivo avaliar se a aplicação da geofísica forneceu informações relevantes para a tomada de decisões de projeto. Os resultados evidenciaram a capacidade do método de caminhamento elétrico, utilizando o arranjo dipolo-dipolo, de gerar perfis detalhados da geometria e da distribuição dos materiais geológicos do subsolo. Apesar dos resultados preliminares positivos, especialmente a constatação do perfil CE-01 como crítico em relação à estabilidade, a localização inicial dos pontos de sondagem SPT e de coleta das amostras indeformadas, afastados das sondagens geofísicas, limitou a possibilidade de uma análise mais sistemática quanto à consistência dos perfis geofísicos gerados.

Palavra-chave: Caminhamento Elétrico. Investigação Geotécnica. Estabilidade.

ABSTRACT

This study addresses the application of the main geophysical prospecting methods used in civil engineering, focusing on the resistivity method. This method was applied in a land regularization project in an area classified as a precarious settlement, located in a zone of potential geological risk. The case study aimed to evaluate whether the application of geophysics provided relevant information for project decision-making. The results demonstrated the capability of the electrical resistivity profiling method, using the dipole-dipole array, to generate detailed profiles of the geometry and distribution of subsurface geological materials. Despite the positive preliminary results, particularly the identification of profile CE-01 as critical regarding stability, the initial placement of SPT borehole points and undisturbed sample collection, located far from the geophysical surveys, limited the possibility of a more systematic analysis regarding the consistency of the geophysical profiles generated.

Keywords

Keywords: Electrical Resistivity Tomography. Geotechnical Investigation. Stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Relação resistividade e resistência	18
Figura 2 – Fluxo da corrente e as equipotenciais.	20
Figura 3 – Esquema de campo para a determinação da resistividade	21
Figura 4 – Relação entre espaçamento AB e resistividade aparente ρ_a para diferentes valores de $MN/2$	26
Figura 5 – Caminhamento Elétrico - Arranjo Dipolo-Dipolo	27
Figura 6 – Caminhamento Elétrico - Arranjo Gradiente	28
Figura 7 – Dados Brutos de Resistividade	29
Figura 8 – Pseudo-seção - Inversão dos dados	30
Figura 9 – Estimativa do erro médio quadrático (RMS)	31
Figura 10 – Intervalos de valores típicos para materiais componentes do subsolo	32
Figura 11 – Correlação ρ vs N_{spt} acima do $N.A$	33
Figura 12 – Correlação ρ vs N_{spt} abaixo do $N.A$	33
Figura 13 – Resistividade dos materiais geológicos	34
Figura 14 – Bandas de Condução.	35
Figura 15 – Relação resistividade vs concentração de eletrólitos ($NaCl$)	38
Figura 16 – Resistividade Média Das Rochas	39
Figura 17 – Elementos básicos de um sistema GPR	45
Figura 18 – Radargrama - Fundações Rasas	47
Figura 19 – Radargrama - Fundações Profundas	47
Figura 20 – Esquema de Inspeção de pavimento com GPR	48
Figura 21 – Localização de duto no radargrama	49
Figura 22 – Propagação de Ondas P e S	50
Figura 23 – Velocidade das ondas S, V_s (m/s)	51
Figura 24 – Velocidade das ondas P, V_p (m/s)	51
Figura 25 – Levantamentos de sísmica de refração com onda S em barragem	52
Figura 26 – Método Downhole e Crosshole Respectivamente	53
Figura 27 – Estrutura da pesquisa	54
Figura 28 – Mapa de localização dos dados	58
Figura 29 – Litotipo da Região	59
Figura 30 – Mapa de Suscetibilidade a Deslizamento	61
Figura 31 – Mapa de Fluxo Superficial	63
Figura 32 – Granulometria - Amostra 01	66
Figura 33 – Granulometria - Amostra 02	67
Figura 34 – Granulometria - Amostra 03	67
Figura 35 – Granulometria - Amostra 04	67

Figura 36 – Granulometria - Amostra 05	68
Figura 37 – Granulometria - Amostra 06	68
Figura 38 – Aspecto das Amostras	70
Figura 39 – Envoltória de Resistência - Amostra 01	71
Figura 40 – Envoltória de Resistência - Amostra 02	71
Figura 41 – Envoltória de Resistência - Amostra 03	72
Figura 42 – Envoltória de Resistência - Amostra 04	72
Figura 43 – Envoltória de Resistência - Amostra 05	73
Figura 44 – Envoltória de Resistência - Amostra 06	73
Figura 45 – Transmissor de corrente Tectrol, utilizado para a aquisição dos dados	75
Figura 46 – Levantamento do alinhamento CE-04 com blocos de rocha superficiais visíveis	75
Figura 47 – Registro fotográfico durante campanha de aquisição de dados . . .	76
Figura 48 – Caminhamento Elétrico 01	78
Figura 49 – Caminhamento Elétrico 02	79
Figura 50 – Caminhamento Elétrico 03	79
Figura 51 – Caminhamento Elétrico 04	79
Figura 52 – Parâmetros de Resistência de Rochas Aproximados	81
Figura 53 – Distribuição dos Grids e Raios	82
Figura 54 – Estabilidade do Bloco 01	83
Figura 55 – Estabilidade do Bloco 02	84
Figura 56 – Estabilidade Translacional CE-01	85
Figura 57 – Estabilidade CE-02	86
Figura 58 – Estabilidade CE-03	86
Figura 59 – Estabilidade CE-04	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Exemplo de folha de campo em levantamento SEV Com Arranjo Schlumberger	25
Tabela 2 – Resistividade dos Minerais Semicondutores	36
Tabela 3 – Equivalentes Químicos de alguns Íons	37
Tabela 4 – Classificação das Águas com Base na Resistividade Elétrica	38
Tabela 5 – Valores médios de resistividade encontrados para os solos não saturado localizados no entorno do aterro de RSU de Bauru	42
Tabela 6 – Valores médios de resistividade encontrados para os solos saturado localizados no entorno do aterro de RSU de Bauru	42
Tabela 7 – Valores de resistividade elétrica determinados para as amostras de solo analisadas em laboratório com lixiviado e água de torneira	43
Tabela 8 – Frequência central das antenas x profundidade máxima de penetração	46
Tabela 9 – Valores de constante dielétrica ϵ'_r , condutividade elétrica σ , velocidade v e atenuação α para alguns materiais geológicos a 100 MHz	46
Tabela 10 – Localização dos dutos no radargrama da Figura 21	49
Tabela 11 – Localização dos Pontos de Sondagem SPT	64
Tabela 12 – Boletim de Sondagem SP_{01}	64
Tabela 13 – Boletim de Sondagem SP_{02}	65
Tabela 14 – Boletim de Sondagem SP_{03}	65
Tabela 15 – Resultados dos ensaios de picnômetro	66
Tabela 16 – LL, LP e IP	66
Tabela 17 – Resumo das frações granulométricas das amostras ensaiadas	68
Tabela 18 – Índices físicos dos corpos de prova da amostra 01	71
Tabela 19 – Índices físicos dos corpos de prova da amostra 02	71
Tabela 20 – Índices físicos dos corpos de prova da amostra 03	72
Tabela 21 – Índices físicos dos corpos de prova da amostra 04	72
Tabela 22 – Índices físicos dos corpos de prova da amostra 05	73
Tabela 23 – Índices físicos dos corpos de prova da amostra 06	73
Tabela 24 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento para as amostras de solo	74
Tabela 25 – Classificação do solo com base na resistividade elétrica	76
Tabela 26 – Parâmetros do Modelo	81

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	PRINCÍPIOS FÍSICOS GERAIS DO ELETROMAGNETISMO	14
2.1.1	Equações de Maxwell	14
2.1.2	Equações constitutivas	15
2.1.3	Relação entre tensão, corrente e resistência	16
2.2	MÉTODO DA RESISTIVIDADE	18
2.2.1	Princípios físicos do método	18
2.2.2	Técnicas de campo	22
2.2.2.1	Sondagem Elétrica Vertical (SEV)	22
2.2.2.1.1	<i>Arranjo Wenner</i>	22
2.2.2.1.2	<i>Arranjo Schlumberger</i>	23
2.2.2.2	Caminhamento Elétrico (CE)	26
2.2.2.2.1	<i>Arranjo Dipolo-dipolo</i>	27
2.2.2.2.2	<i>Arranjo pólo-dipolo e Gradiente</i>	28
2.2.3	Inversão dos dados de resistividade	28
2.2.4	Resistividade dos materiais geológicos	31
2.2.4.1	Propriedade elétrica dos minerais	34
2.2.4.2	Propriedade elétrica das rochas	38
2.2.5	Aplicações na engenharia	39
2.2.5.1	Caracterização de Material de Escavação	39
2.2.5.2	Estabilidade de taludes	40
2.2.5.3	Identificação de topos e fraturas em maciços rochosos	41
2.2.5.4	Estudos hidrogeológicos e de fluxo de água	42
2.3	OUTROS MÉTODOS GEOFÍSICOS RELEVANTES	44
2.3.1	Método Ground Penetrating Radar (GPR)	44
2.3.1.1	Aplicações na engenharia	46
2.3.1.1.1	<i>Deteção de Estruturas Enterradas</i>	46
2.3.1.1.2	<i>Inspeção de Estruturas e Pavimentos</i>	47
2.3.1.1.3	<i>Deteção de tubos enterrados</i>	48
2.3.2	Métodos sísmicos	50
2.3.2.1	Princípios Físicos	50
2.3.2.2	Metodologias de Campo	51

2.3.2.2.1	<i>Método sísmico de refração</i>	51
2.3.2.2.2	<i>Método Crosshole e Downhole</i>	52
3	METODOLOGIA	54
3.1	PROPOSTA	54
3.2	LIMITAÇÕES DA ANÁLISE	55
3.2.1	Escala dos dados	55
3.2.2	Efeitos da interpolação	55
3.2.3	Condições de campo	55
4	ESTUDO DE CASO DE POTENCIAL ZONA DE RISCO GEOLÓGICA	57
4.1	CONTEXTO	57
4.1.1	Relevância do estudo	57
4.1.2	Descrição do local	58
4.1.3	Características geológicas e ambientais	58
4.2	ORIGEM DOS DADOS	64
4.2.1	Sondagens SPT	64
4.2.2	Ensaio de laboratório	65
4.2.2.1	Densidade real dos grãos	66
4.2.2.2	Limites de consistência	66
4.2.2.3	Granulometria	66
4.2.2.4	Ensaio de cisalhamento direto	68
4.2.3	Sondagens geofísicas	74
4.2.3.1	Caminhamento Elétrico 01	77
4.2.3.2	Caminhamento Elétrico 02	77
4.2.3.3	Caminhamento Elétrico 03	77
4.2.3.4	Caminhamento Elétrico 04	78
4.3	APLICABILIDADE	80
4.3.1	Geometria dos elementos rochosos	80
4.3.2	Zonas com presença de água	80
4.3.3	Análise de estabilidade	80
4.3.3.1	Estabilidade geral (CE-01)	82
4.3.3.2	Estabilidade dos blocos (CE-01)	82
4.3.3.3	Estabilidade Translacional (CE-01)	84
4.3.3.4	Estabilidade geral (CE 02, 03 E 04)	85
5	CONCLUSÃO	88
	REFERÊNCIAS	89

1 INTRODUÇÃO

A investigação geotécnica é um pilar fundamental para o desenvolvimento de obras de geotecnia, sendo responsável direta pela precisão dos modelos adotados, uma vez que determina os parâmetros de partida do projeto. Ao caracterizar as condições do solo nos locais de intervenção, é possível melhorar a previsibilidade, executiva e de serviço do projeto, garantindo maior segurança e eficiência econômica durante as etapas de obra. Estudos ligados a obras de infraestrutura recorrentemente dependem da qualidade dos dados geotécnicos, sendo as vezes responsáveis pela viabilidade do empreendimento, seja ela por motivos econômicos, logísticos ou de segurança.

Segundo Caputo (1983), é essencial que uma campanha de investigação geotécnica atenda aos critérios de rapidez e confiança nos resultados obtidos, especialmente em obras linearmente extensas, como rodovias, que exigem um profundo conhecimento geotécnico da região, principalmente na identificação de rochas. O Eurocode-7 (2007) reforça essa ideia, destacando que a investigação geotécnica deve garantir que todos os dados necessários sejam levantados em campo e estejam disponíveis para todas as etapas do projeto, reduzindo os riscos de acidentes, atrasos e danos, ao estabelecer as condições do solo, rocha e água subterrâneas.

Dentre as diversas metodologias de caracterização atualmente mais utilizadas, no Brasil, destaca-se o ensaio a percussão SPT, amplamente utilizado para a caracterização do solo e a determinação da estratigrafia do terreno. Embora forneça informações valiosas sobre a resistência à penetração e permita a inspeção visual de amostras deformadas, a escolha dos pontos de amostragem, podem não ser as mais assertivas, uma vez que, nas fases iniciais do projeto, o engenheiro dispõe de poucas evidências para identificar os melhores pontos de sondagem que representem com precisão as condições do solo, além disso, o caráter pontual das sondagens diretas dificultam uma a definição da distribuição das camadas dos materiais geológicos no subsolo.

Nesse cenário, a geofísica, uma ferramenta ainda pouco utilizada na engenharia civil, pode desempenhar um papel fundamental na otimização dos modelos geotécnicos, complementando o SPT e demais ensaios, assim, reduzindo incertezas.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho se propõe a realizar uma revisão bibliográfica das principais metodologias de investigação geotécnica oferecidas pela geofísica, com ênfase nos métodos da eletrorresistividade, em seguida, conduzido um estudos de caso abordando a aplicação desse método em um projeto de REURB em uma área de potencial risco

geológico no Morro da Cruz em Florianópolis-SC.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral da revisão bibliográfica é abordar os princípios físicos, as técnicas de levantamento, os equipamentos, o processamento e a interpretação de dados, além de suas aplicações práticas na engenharia civil. Já o estudo de caso tem como objetivo avaliar a aplicabilidade do método de caminhamento elétrico no projeto abordado.

1.1.2 Objetivos específicos

- Abordar o funcionamento e aplicações dos métodos de resistividade;
- Abordar o funcionamento e aplicações do método GPR;
- Abordar o funcionamento e aplicações dos métodos de Sísmicos;
- Avaliar o impacto que a aplicação do método de eletrorresistividade pela técnica de campo do caminhamento elétrico, teve efetivamente sobre a investigação geotécnica em um projeto de REURB em uma área de potencial risco geológico no Morro da Cruz em Florianópolis-SC.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Em seu livro, *Prospecção Geométrica Em Corrente Contínua*, Orellana (1972) define a prospecção geofísica como:

“Um ramo da Física Aplicada que se ocupa do estudo das estruturas ocultas no interior da Terra e da localização, neste, de corpos delimitados por contraste em alguma de suas propriedades físicas em relação ao meio circundante, por meio de observações realizadas na superfície da Terra.”
(ORELLANA, 1972, p. 25)

Ou seja, a prospecção geofísica, independentemente da metodologia, utiliza alguma propriedade física detectável do material prospectado, por meio de aparelhos tecnológicos. Dentro dessa lógica, três grupos principais se destacam no contexto da aplicação na engenharia civil: os métodos de resistividade, magnéticos e sísmicos. Cada um desses campos de utiliza determinados parâmetros físicos centrais para a classificação do material analisado.

Os métodos de resistividade baseiam-se na leitura da resistividade aparente (ρ_a), utilizando medições geralmente superficiais, com o auxílio de eletrodos. Os métodos magnéticos utilizam leituras de condutividade elétrica (σ), permissividade dielétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ), empregando equipamentos emissores de ondas eletromagnéticas sobre a superfície do material analisado. Já os métodos sísmicos concentram-se na leitura das velocidades de propagação de ondas elásticas, naturais ou artificiais atuando sobre o meio.

2.1 PRINCÍPIOS FÍSICOS GERAIS DO ELETROMAGNETISMO

A compreensão dos fenômenos eletromagnéticos é fundamental para o entendimento do funcionamento das metodologias geométricas e eletromagnéticas, onde são exploradas as relações entre campos elétricos e magnéticos com o meio geológico. Os métodos geométricos são fundamentados nas relações entre tensão, corrente e resistência elétrica consolidados pela lei de ohm. Já os métodos eletromagnéticos são fundamentados nas equações de Maxwell, que descrevem a interação entre os campos elétricos e magnéticos.

2.1.1 Equações de Maxwell

James Clerk Maxwell, por meio de suas equações, descreveu como cargas elétricas e correntes interagem com o ambiente, gerando campos que governam diversos fenômenos naturais. Essas unificam e consolidam a lei de Gauss para a ele-

tricidade, lei de Gauss para o magnetismo, a lei de Faraday-Lenz e a lei de Ampère-Maxwell:

Lei de Gauss para o campo elétrico:

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

Lei de Gauss para o campo magnético:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

Lei de Faraday da Indução:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

Lei de Ampère-Maxwell:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

Onde:

- \vec{E} : Campo elétrico (V/m)
- ρ : Densidade de carga elétrica (C/m³)
- ϵ_0 : Permissividade elétrica do vácuo (F/m)
- \vec{B} : Campo magnético (T)
- μ_0 : Permeabilidade magnética do vácuo (H/m)
- \vec{J} : Densidade de corrente elétrica (A/m²)

A Equação (1) estabelece que cargas elétricas são fontes do campo elétrico, indicando que o fluxo elétrico através de uma superfície é proporcional à carga elétrica dentro dela.

A Equação (2) afirma que não existem monopolos magnéticos, ou seja, o fluxo magnético total através de qualquer superfície fechada é zero.

A Equação (3) relaciona a variação temporal do campo magnético ao surgimento de um campo elétrico, explicando a indução eletromagnética.

A Equação (4) descreve como correntes elétricas e campos elétricos variáveis geram campos magnéticos, completando a interconexão entre os fenômenos elétricos e magnéticos.

2.1.2 Equações constitutivas

As equações de Maxwell descreveram o comportamento dos campos eletromagnéticos, fornecendo a base teórica necessária para entender como os mesmos interagem e se propagam no espaço, porém, agora faz-se necessário descrever como

os materiais reagem a esses campos eletromagnéticos. As relações constitutivas fazem esse papel, fornecendo informações macroscópicas do comportamento dos materiais sujeitos à atuação dos campos eletromagnéticos, sendo elas:

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (7)$$

Onde:

- \vec{J} : Densidade de corrente elétrica (A/m²)
- σ : Condutividade elétrica (S/m)
- \vec{E} : Campo elétrico (V/m)
- \vec{D} : Densidade de fluxo elétrico (C/m²)
- ε : Permissividade dielétrica (F/m)
- \vec{B} : Densidade de fluxo magnético (T)
- μ : Permeabilidade magnética (H/m)
- \vec{H} : Campo magnético (A/m)

Segundo Annan (2009) essas relações são fundamentais para entender como os materiais interagem com os campos eletromagnéticos. A condutividade elétrica σ , representando a capacidade de um material permitir a passagem de corrente elétrica. Materiais com alta condutividade, como metais, permitem o fluxo fácil de corrente. A permissividade dielétrica ε caracteriza a capacidade de um material de armazenar energia elétrica sob a aplicação de um campo elétrico. Materiais com alta permissividade podem armazenar mais energia, o que é útil em capacitores e outros dispositivos eletrônicos. A permeabilidade magnética μ descreve a capacidade de um material de permitir um campo magnético dentro de si. Materiais ferromagnéticos, como ferro, têm alta permeabilidade e podem ser magnetizados facilmente.

2.1.3 Relação entre tensão, corrente e resistência

A relação entre a densidade de corrente elétrica \vec{J} e o campo elétrico \vec{E} é dada pela Equação (5). Onde, Para um condutor homogêneo, de comprimento L , a densidade de corrente elétrica \vec{J} pode ser expressa em termos da corrente total I que flui através de uma seção transversal uniforme A :

$$\vec{J} = \frac{I}{A} \quad (8)$$

Onde, a relação entre a tensão V e o comprimento L dado por:

$$\vec{E} = \frac{V}{L} \quad (9)$$

Substituindo as equações (8) e (9) na Equação (5), tem-se:

$$\frac{I}{A} = \sigma \cdot \frac{V}{L} \quad (10)$$

Rearranjando, obtêm-se:

$$V = I \cdot \frac{L}{\sigma \cdot A}$$

onde $\rho = \frac{1}{\sigma}$, portanto:

$$V = I \cdot \frac{\rho \cdot L}{A}$$

Considerando que a resistência pode ser expressa por $R = \frac{\rho \cdot L}{A}$, Obtêm-se:

$$V = R \cdot I \quad (11)$$

Onde:

V : Tensão (Volts)

R : Resistência (Ω)

I : Corrente (A)

A Equação (11) é conhecida como a Lei de Ohm, que relaciona a tensão V , a corrente I e a resistência R .

2.2 MÉTODO DA RESISTIVIDADE

Segundo Braga (2001), os métodos de resistividade se baseiam na medição da resistência elétrica dos materiais sob o solo quando uma corrente é aplicada por meio de eletrodos de medição. O conceito fundamental desse método reside no fato de que diferentes materiais apresentam distintas condutividades elétricas. Por exemplo, materiais como rochas e solos secos tendem a oferecer mais resistência à passagem de corrente, ao passo que a água e minerais condutores costumam ser mais condutivos.

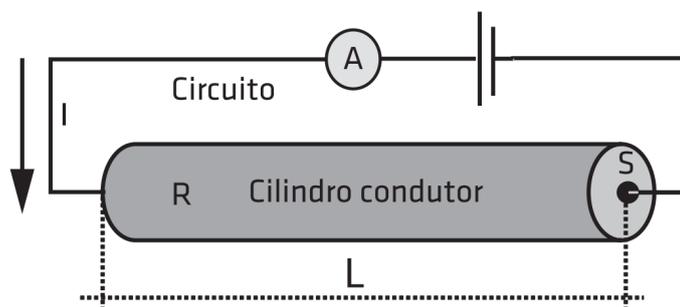
Durante a execução do método, uma corrente elétrica é inserida no solo por meio de um par de eletrodos de corrente, enquanto a diferença de potencial resultante é medida utilizando um par de eletrodos de potencial, a partir dessas medidas, torna-se viável calcular a resistividade do subsolo.

2.2.1 Princípios físicos do método

A abordagem do método é fundamentada nos princípios que regem o eletromagnetismo, conforme abordado no item 2.1. A Lei de Ohm (Equação (11)), expressa uma correlação entre tensão, corrente e resistência elétrica, esse último, de fundamental interesse dentro do campo geológico, pois está diretamente ligado a propriedades minerais e geométricas dos solos. A Lei de Ohm conclui que a tensão é proporcional a corrente, e pode ser determinada por:

Analogamente ao que é exposto em Braga (2016), é possível entender o princípio de funcionamento do método considerando um condutor homogêneo cilíndrico, com comprimento L e seção de área S , conforme abaixo:

Figura 1 – Relação resistividade e resistência



Fonte: Braga (2016)

A corrente elétrica I que flui através de um condutor é resultado do movimento dos elétrons sob uma diferença de potencial V , a resistência elétrica que o material condutor apresentará depende diretamente da resistividade ρ e aspectos geométricos

do mesmo, quanto maior o comprimento L e menor a área da seção transversal S do condutor, maior a resistência, que pode ser expressa por:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (12)$$

E a resistividade por:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L} \quad (13)$$

Onde:

R : Resistência (Ω)

ρ : Resistividade ($\Omega \cdot m$)

S : Área da seção (m^2)

L : Comprimento (m)

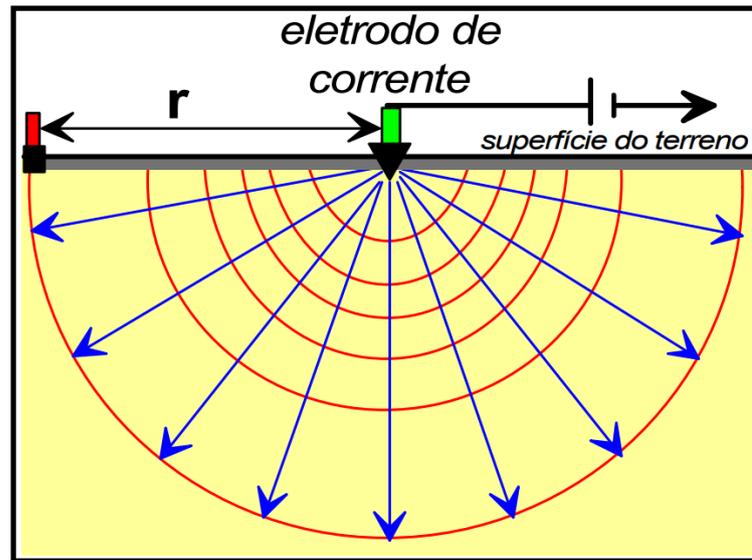
Conforme pontuado em Braga (2001), é de interesse do método utilizar a resistividade e não a resistência, uma vez que a segunda depende dos fatores geométricos do condutor. Entretanto, o objetivo é analisar um parâmetro que reflita a capacidade do material de conduzir corrente elétrica sem depender das dimensões. Nesse sentido, a resistividade fornece informações mais fundamentais, pois está relacionada à composição, porosidade, presença de água, entre outros fatores.

As Equações (12) e (13), não refletem de forma precisa o que acontece no ensaio. Conforme afirmado por Braga (2001), ao considerar um eletrodo injetando corrente sobre um terreno, a mesma irá se espalhar em todas as direções, reproduzindo um padrão que pode ser modelado como um conjunto de superfícies esféricas, conforme pode ser observado na Figura 2.

Analogamente ao que acontece na Figura 1, considerando o meio investigado como isotrópico e homogêneo, a corrente percorrerá uma distância r através de uma seção com área igual à uma superfície semi-esférica S , onde, $S = 2\pi r^2$, obtendo a Equação (14):

$$R = \rho \cdot \frac{r}{2\pi r^2} \quad (14)$$

Figura 2 – Fluxo da corrente e as equipotenciais.



Fonte: Braga (2001)

Substituindo a Equação (14) na Equação (11), é possível estimar a tensão no condutor, a uma distância r do eletrodo, como sendo:

$$V = \frac{\rho \cdot I}{2\pi r} \quad (15)$$

Onde:

V : Tensão (Volts)

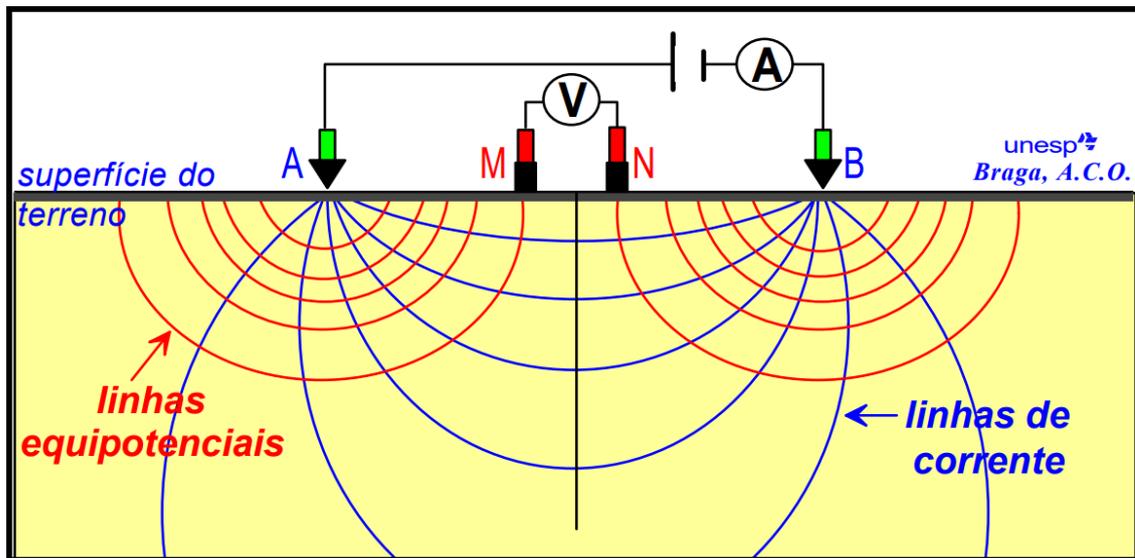
ρ : Resistividade ($\Omega \cdot m$)

I : Corrente (A)

r : Distância (m)

Devido às grandes distâncias entre os eletrodos de corrente, geradas por essa disposição, o autor apresenta a configuração mais comum, com dois eletrodos de corrente (A e B) e dois de potencial (M e N), conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Esquema de campo para a determinação da resistividade



Fonte: Braga (2001)

Considerando a nova disposição dos eletrodos M e N, é possível estimar a diferença de potencial (ΔV) como:

$$\Delta V = V_M - V_N \quad (16)$$

Onde, V_M e V_N podem ser calculados a partir da Equação 15, obtendo-se:

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad (17)$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad (18)$$

Portanto, substituindo as equações (18) e (17) na Equação (16), tem-se:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (19)$$

De forma a simplificar a Equação (19), define-se K , conhecido como coeficiente geométrico, conforme a Equação (20):

$$K = 2\pi \cdot \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1} \quad (20)$$

Sendo assim, substituindo a Equação (20) na Equação (19), tem-se:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{K} \quad (21)$$

ou:

$$\rho = \frac{K \cdot \Delta V}{I} \quad (22)$$

Onde:

ΔV : Diferença de Potencial (Volt)

ρ : Resistividade ($\Omega \cdot m$)

I : Corrente (A)

Em resumo, a Equação (22) permite, através do coeficiente geométrico (K), que depende da disposição dos eletrodos em campo, da corrente induzida (I), e da diferença de potencial (ΔV) entre os eletrodos M e N , determinar a resistividade do terreno em uma profundidade de interesse, associada à distância entre os eletrodos.

2.2.2 Técnicas de campo

Os levantamentos de resistividade podem ser realizados por diferentes técnicas, dependendo do tipo de investigação pretendida, como ao longo de um perfil de profundidade ou de uma seção. Os diversos arranjos de eletrodos permitem a execução dessas metodologias. Segundo Braga (2001), o arranjo refere-se à disposição dos eletrodos no terreno durante a aplicação de técnicas como o caminhamento elétrico e a sondagem elétrica vertical, abordados nos capítulos 2.2.2.1 e 2.2.2.2. Como a profundidade do ponto de sondagem depende diretamente dessa disposição, a escolha do arranjo influencia os resultados obtidos.

2.2.2.1 Sondagem Elétrica Vertical (SEV)

A sondagem elétrica vertical é uma das técnicas dos ensaios geoeletricos, onde se faz sucessivas medições de resistividade do terreno, em diferentes profundidades, centradas em um ponto de interesse. Braga (2001) aborda essa técnica, podendo ser feita por dois principais arranjos, o arranjo Schlumberger e o Wenner.

2.2.2.1.1 Arranjo Wenner

No arranjo Wenner, os eletrodos são dispostos conforme a Figura 3, em $AMNB$, espaçados por uma distância a entre eles. À medida que as medições sucessivas são realizadas, essa distância é aumentada. Sendo assim, considerando a Equação (20):

$$K = 2\pi \cdot \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1}$$

Onde, considerando do espaçamento (a) uniforme do arranjo Wenner:

$$AM = a$$

$$BM = 2a$$

$$AN = 2a$$

$$BN = a$$

Tem-se:

$$K = 2\pi \cdot \left[\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{2a} \right) - \left(\frac{1}{2a} - \frac{1}{a} \right) \right]^{-1}$$

$$K = 2\pi \cdot \left[\frac{1}{2a} + \frac{1}{2a} \right]^{-1} = 2\pi \cdot \left[\frac{1}{a} \right]^{-1}$$

$$K = 2\pi a \quad (23)$$

Substituindo a Equação (23), na Equação (22) determina-se a resistividade aparente para esse arranjo.

$$\rho_a = 2\pi a \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (24)$$

2.2.2.1.2 Arranjo Schlumberger

O arranjo Schlumberger é disposto de forma que a distância MN permanece fixa, enquanto as distâncias AO e OB são variáveis, sendo O o centro geométrico entre M e N . Analogamente ao método Wenner, o coeficiente geométrico pode ser determinado a partir da Equação (20).

$$K = 2\pi \cdot \left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]^{-1}$$

$$K = 2\pi \cdot \left(\frac{BM - AM}{AM \cdot BM} - \frac{BN - AN}{AN \cdot BN} \right)^{-1}$$

Considerando:

$$AM - BM = MN$$

$$AN - BN = MN$$

$$AM = BN$$

$$AN = BM$$

$$K = 2\pi \cdot \left(\frac{MN}{AM \cdot AN} - \frac{MN}{AN \cdot AM} \right)^{-1}$$

$$K = 2\pi \cdot \left(\frac{2 \cdot MN}{AM \cdot AN} \right)^{-1}$$

$$K = \pi \cdot \frac{AM \cdot AN}{MN} \quad (25)$$

Sendo assim, pode-se definir a Equação da resistividade aparente para esse arranjo, considerando a Equação (22), como:

$$\rho_a = \pi \cdot \frac{AM \cdot AN}{MN} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (26)$$

Uma vez parametrizadas as equações de resistividade para o arranjo escolhido, deve-se estabelecer qual a relação entre a geometria do arranjo e a profundidade efetivamente medida existem diversas relações empíricas com esse propósito.

Em seu estudo, Asare *et al.* (2024) avaliou a correlação entre a distância AB e a profundidade teórica de investigação Z_{ti} , o experimento consistiu no preenchimento de uma caixa de madeira com um silte arenoso sobre o terreno natural, seguido de sucessivas medições, onde manteve-se os eletrodos MN fixos e AB variáveis.

Através da análise estatística das medições, pode-se observar que os arranjos Schlumberger e Wenner são eficazes para estimar a profundidade de investigação, apresentando pouca diferença entre eles. Os resultados mostraram que a profundidade de investigação para o arranjo Schlumberger é aproximadamente 0,267 vezes a separação dos eletrodos de corrente AB , aproximadamente $AB/4$, conforme utilizado em Braga (2001), demonstrando ser uma razoável relação para a profundidade teórica de investigação para esses dois arranjos.

Dessa forma, com as relações que determinam a resistividade e profundidade em função dos parâmetros geométricos do arranjo é possível fazer as medições de campo.

Para a realização de uma sondagem SEV satisfatória, Braga (2001) descreve uma série de recomendações práticas relacionadas aos procedimentos sequenciais de campo. O processo inicia pela escolha do ponto de sondagem, evitando-se locais com potenciais interferências de sinal que possam alterar significativamente os resultados, como tubulações ou redes de alta tensão.

Após essa etapa, o procedimento começa com o estaqueamento e a numeração do ponto de inspeção. Os eletrodos são posicionados de forma simétrica em relação ao eixo, conforme o arranjo adotado. Em seguida, são realizadas medições sucessivas, com o afastamento gradual dos eletrodos em relação ao eixo, fornecendo dados de diferença de potencial (ΔV) para profundidades teóricas de investigação ($Z_{ti} \approx AB/4$) cada vez maiores.

Conforme o ensaio avança, as leituras de ΔV tendem a diminuir, podendo atingir níveis que comprometem a precisão do equipamento. Nesses casos, torna-se necessário aumentar progressivamente a corrente. No entanto, devido às limitações do equipamento, pode ser necessária a realização da operação conhecida como embreagem. Essa operação consiste em realizar duas medições de MN com diferentes distâncias, mantendo AB fixo. Isso permite aumentar as leituras de potência sem exigir um aumento significativo da corrente.

A operação embreagem pode ser observada na tabela 1, na qual os valores de $MN/2$ foram gradualmente aumentados, de 0,30 m para 2 m, 5 m, 10 m e 20 m, mantendo as leituras de diferença de potencial sempre acima de 1 V. Além disso, a realização de duas medições de ΔV para dois valores de MN possibilitou a verifica-

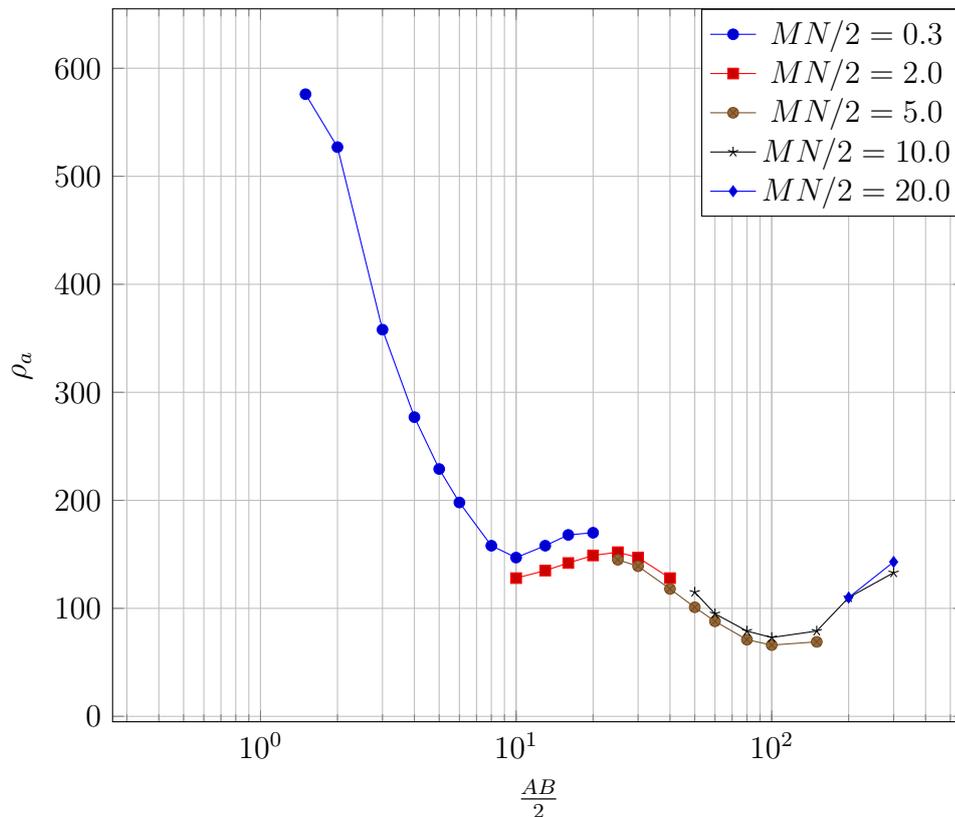
ção da consistência dos dados, os quais, segundo Braga (2016), devem apresentar paralelismo entre si, conforme pode ser observado na Figura 4.

Tabela 1 – Exemplo de folha de campo em levantamento SEV Com Arranjo Schlumberger

$Z_{ti}(m)$	$AB/2(m)$	$MN/2(m)$	K	$\Delta V(V)$	$I (mA)$	$\rho_a (\Omega \cdot m)$
0.75	1.50	0.30	11.31	15300.00	300	576
1.00	2.00	0.30	20.47	8200.00	318	527
1.50	3.00	0.30	46.65	2990.00	389	358
2.00	4.00	0.30	83.30	1300.00	390	277
2.50	5.00	0.30	130.43	657.00	373	229
3.00	6.00	0.30	188.02	401.00	379	198
4.00	8.00	0.30	334.63	165.00	348	158
5.00	10.00	0.30	523.13	93.00	331	147
5.00	10.00	2.00	75.40	360.00	211	128
6.50	13.00	0.30	884.41	59.00	330	158
6.50	13.00	2.00	129.59	220.00	211	135
8.00	16.00	0.30	1339.94	53.00	422	168
8.00	16.00	2.00	197.92	194.00	270	142
10.00	20.00	0.30	2093.92	31.00	382	170
10.00	20.00	2.00	311.02	117.00	244	149
12.50	25.00	2.00	487.73	97.00	311	152
12.50	25.00	5.00	188.50	238.85	311	145
15.00	30.00	2.00	703.72	69.00	330	147
15.00	30.00	5.00	274.89	168.00	330	139
20.00	40.00	2.00	1253.50	32.70	320	128
20.00	40.00	5.00	494.80	76.60	320	118
25.00	50.00	5.00	777.54	43.00	328	101
25.00	50.00	10.00	376.99	100.06	328	115
30.00	60.00	5.00	1123.12	18.20	230	88
30.00	60.00	10.00	549.78	39.74	230	95
40.00	80.00	5.00	2002.77	8.10	226	71
40.00	80.00	10.00	989.60	18.04	226	79
50.00	100.00	5.00	3133.74	8.49	400	66
50.00	100.00	10.00	1555.09	18.78	400	73
75.00	150.00	5.00	7060.73	5.80	594	69
75.00	150.00	10.00	3518.58	13.34	594	79
100.00	200.00	10.00	6267.48	7.98	500	100
100.00	200.00	20.00	3110.18	17.68	500	110
150.00	300.00	10.00	14121.46	4.24	450	133
150.00	300.00	20.00	7037.17	9.14	450	143

Fonte: Adaptado de Braga (2001)

Figura 4 – Relação entre espaçamento AB e resistividade aparente ρ_a para diferentes valores de $MN/2$



Fonte: Adaptado de Braga (2001)

Em se tratando de dados brutos, esses resultados ainda não estão prontos para uma eficiente interpretação, sendo necessário o processo de inversão dos dados, que será abordado mais a diante no item 2.2.3.

2.2.2.2 Caminhamento Elétrico (CE)

De acordo com Braga (2016), o caminhamento elétrico é um método de prospecção geométrica que consiste em dispor eletrodos de corrente e potencial de maneira linear, com a finalidade de obter uma sequência de leituras que serão usadas para determinar a resistividade do solo em vários pontos durante uma seção de análise.

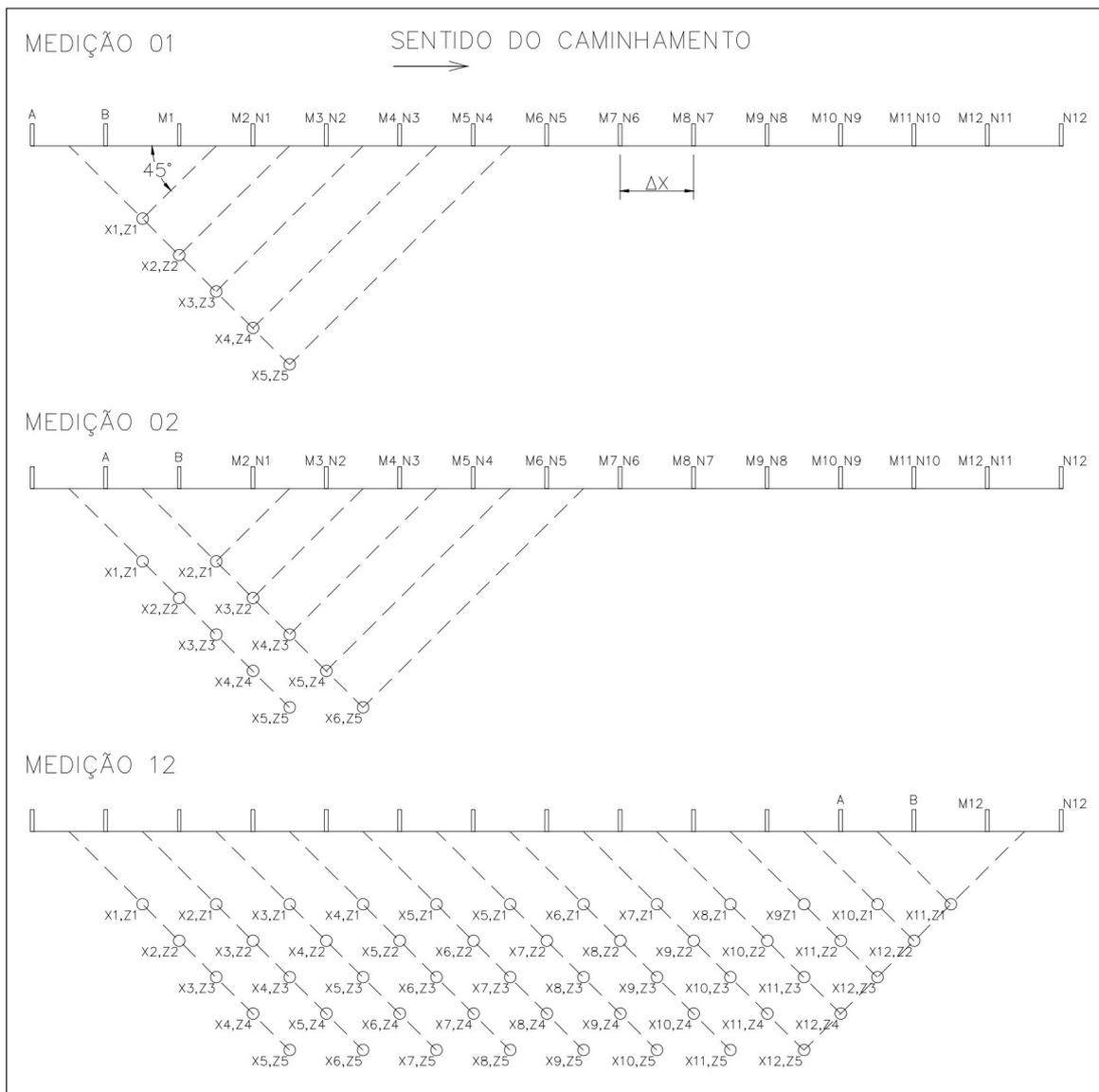
A principal distinção entre o Caminhamento Elétrico (CE) e a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) reside no fato de que o SEV visa efetuar medições repetitivas em uma única dimensão abaixo de um ponto de sondagem selecionado, enquanto o CE pode fornecer dados em duas ou três dimensões.

2.2.2.2.1 Arranjo Dipolo-dipolo

Existem diversos arranjos para essa técnica, sendo o dipolo-dipolo um dos mais precisos e rápidos de serem executados. Esse arranjo é caracterizado pela implantação de uma linha de n eletrodos ao longo de um alinhamento na área a ser investigada. Os eletrodos são dispostos a distâncias iguais de Δx , onde, inicialmente, temos a disposição $A, B, M_1, N_1, M_2, N_2, \dots, M_i, N_i, \dots$, sendo os eletrodos A e B de corrente, e os M_i e N_i de potencial, realizando medições de $\Delta V_{x,z}$, que representam a diferença de potencial estimada no ponto X_i, Z_j por M_i e N_i , na profundidade Z_j .

Após a realização de uma medição nessa disposição, ocorre um avanço ao longo do alinhamento, de forma que o eletrodo A ocupa a posição de B , B a de M_1 , e assim sucessivamente, conforme a sequência de medições, ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Caminhamento Elétrico - Arranjo Dipolo-Dipolo



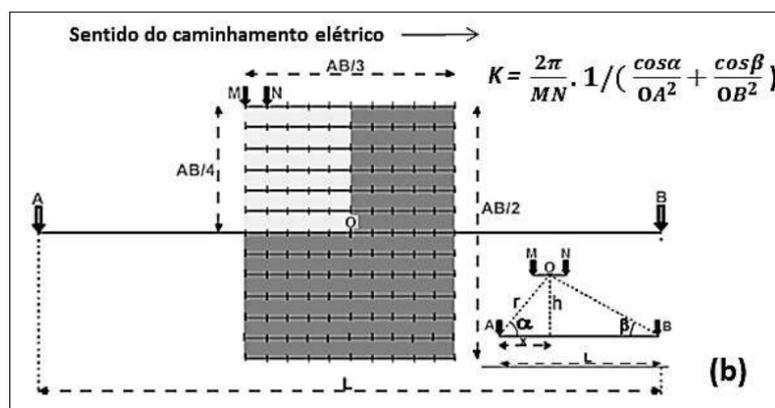
Fonte: Adaptado de Braga (2001)

2.2.2.2.2 Arranjo pólo-dipolo e Gradiente

Embora o arranjo dipolo-dipolo seja o mais empregado no caminhamento elétrico, os arranjos pólo-dipolo e gradiente oferecem alternativas. Segundo Cardoso *et al.* (2022) O arranjo pólo-dipolo se distingue do dipolo-dipolo principalmente pelo número de eletrodos de condução, em vez de dois, utiliza apenas um. Apesar de suas semelhanças metodológicas com o dipolo-dipolo, o mesmo não proporciona ganhos significativos em agilidade e, embora apresente uma resolução comparável, geralmente é inferior, acaba sendo menos empregado.

Por outro lado, o arranjo gradiente apresenta alterações mais significativas, sendo recomendado por Braga (2016) para a determinação de falhas de grandes dimensões. Nesse arranjo, os eletrodos de corrente (A e B) permanecem fixos, enquanto a varredura ao longo das seções de caminhamento é realizada pela variação da posição dos eletrodos de potencial (M e N). O fator geométrico depende diretamente da posição entre o centro geométrico O , definido pelos eletrodos de corrente AB , e o centro O , correspondente aos eletrodos de potencial MN , conforme ilustrado na Figura 6

Figura 6 – Caminhamento Elétrico - Arranjo Gradiente



Fonte: Cardoso *et al.* (2022)

2.2.3 Inversão dos dados de resistividade

Segundo Bortolozzo (2011), as respostas físicas dos levantamentos geofísicos realizados na superfície não indicam diretamente as propriedades físicas do material investigado, sendo inadequadas para classificá-lo.

Nos levantamentos de resistividade, por exemplo, medem-se valores de resistividade aparente em diferentes pontos do solo. No entanto, o objetivo é determinar as propriedades do solo, como a resistividade verdadeira das camadas geológicas.

A inversão é o processo matemático que estima essas propriedades a partir das medições obtidas. Informações de contorno, como o número de camadas geológi-

cas, suas espessuras e resistividades elétricas, permitem obter uma solução particular dentre todas as soluções gerais possíveis. Bortolozo (2011) afirma que um problema direto pode ser modelado como:

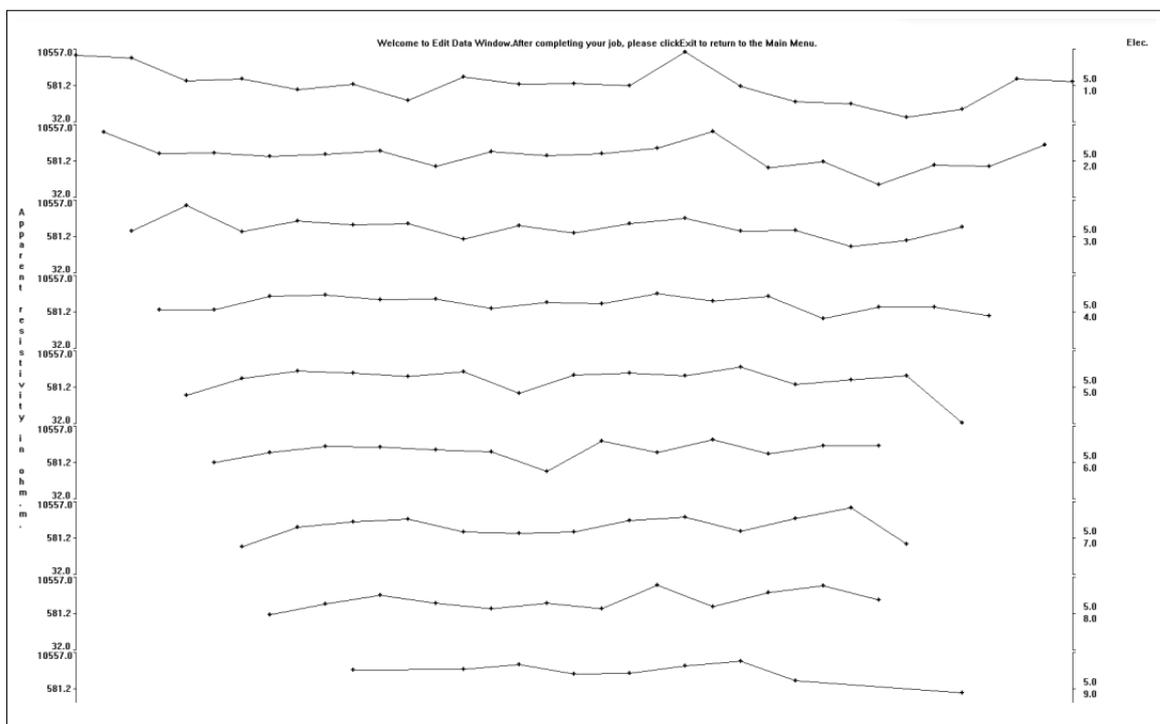
$$d = h(p) \quad (27)$$

Onde, d representa a resposta de um modelo, gerado a partir de parâmetros p (por exemplo, a resistividade de cada camada e suas profundidades), por meio de um funcional $h(p)$. Entretanto, o interesse é o modelo inverso, pois temos a resposta física medida em campo (os dados coletados) e queremos descobrir o modelo que a gerou, ou seja, as propriedades do subsolo.

$$p = h^{-1}(d) \quad (28)$$

A inversão de dados geoeletricos é frequentemente feita com softwares especializados, como o Res2Dinv, cuja as complexidades matemáticas do algoritmo, são melhor abordados por Loke e Barker (1996). A primeira etapa consiste na filtragem dos dados anômalos no software, que é carregado por meio de um arquivo. Na Figura 7, são apresentados os dados brutos a diferentes níveis de profundidade j e suas respectivas resistividades aparentes.

Figura 7 – Dados Brutos de Resistividade

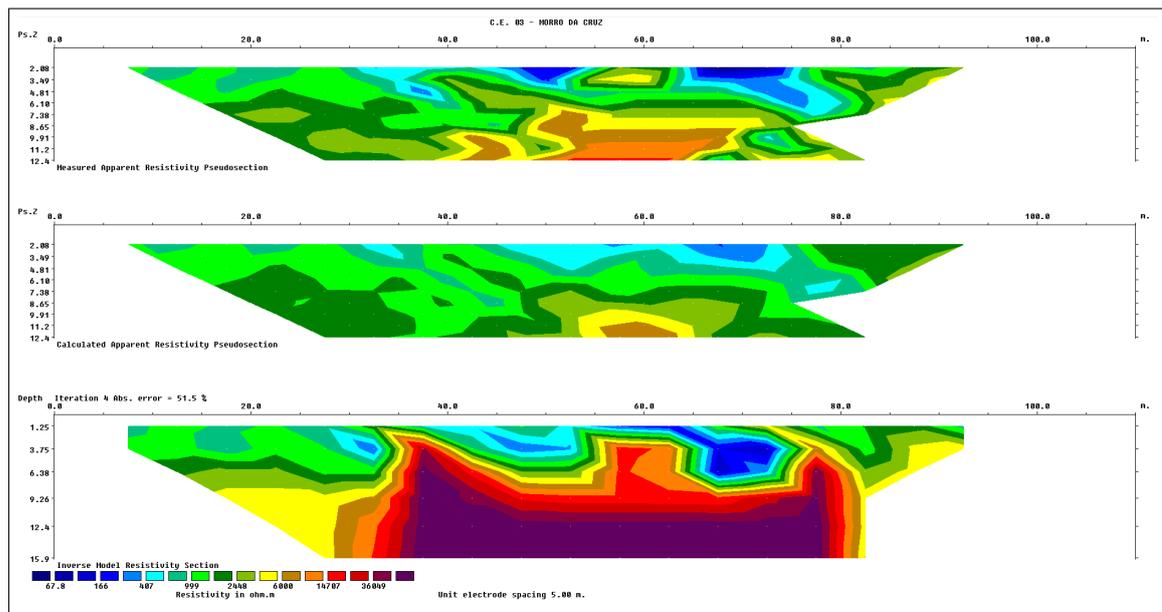


Fonte: Relatório de levantamento geofísico

Após a filtragem inicial dos dados, procede-se ao processamento, que resulta em três pseudoseções (Figura 8) conforme pode ser visto na Figura 8: a primeira,

representando os valores medidos em campo; a segunda, exibindo os valores calculados com base no modelo teórico; e, por fim, a pseudoseção invertida, que reflete a distribuição estimada da resistividade verdadeira do subsolo. Após a etapa de inversão, os dados de resistividade aparente são novamente submetidos à uma filtragem, utilizando ferramentas estatísticas para melhorar a qualidade dos resultados.

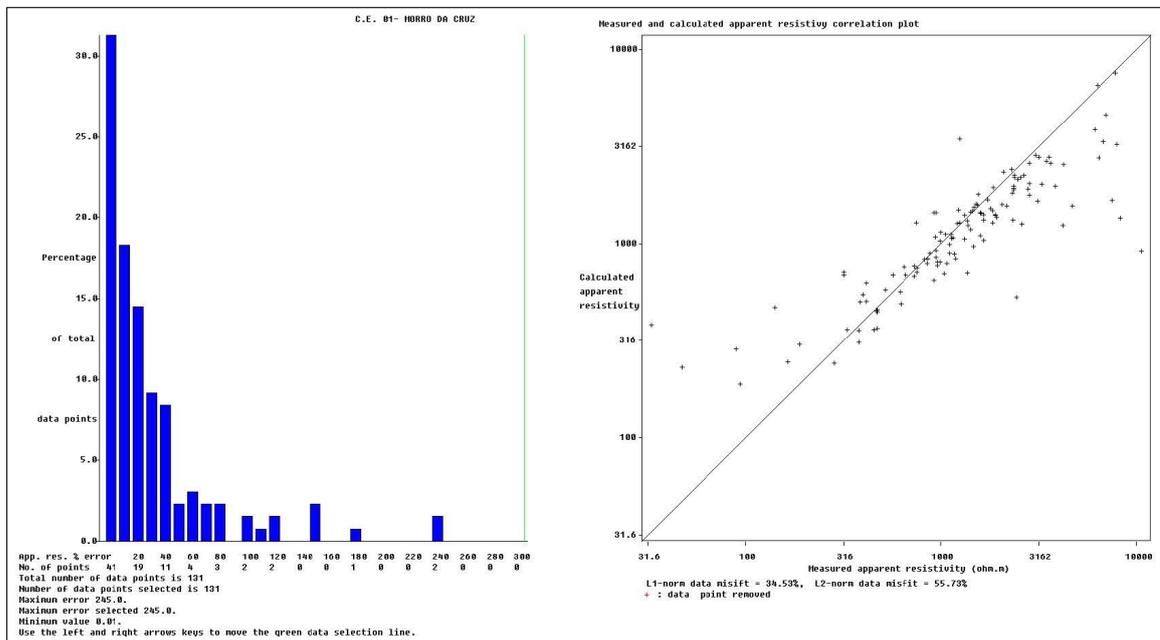
Figura 8 – Pseudo-seção - Inversão dos dados



Fonte: Relatório de levantamento geofísico

O segundo aprimoramento é geralmente realizado por meio da estimativa do erro médio quadrático (RMS) entre a resposta final e os dados brutos adquiridos em campo, conforme a Figura 9. Após a remoção dos outliers, o processo de inversão é refeito, incorporando o ajuste à topografia do terreno. Essa etapa final gera seções refinadas, agora interpretáveis e adequadas para aplicações práticas, como pode ser observado na Figura 50.

Figura 9 – Estimativa do erro médio quadrático (RMS)



Fonte: Relatório de levantamento geofísico

2.2.4 Resistividade dos materiais geológicos

Segundo Aquino *et al.* (2020), os diversos tipos de solos apresentam comportamentos distintos em ensaios de resistividade devido às diferentes propriedades de cada material, onde se destacam a porosidade, teor de umidade, grau de compactação e composição mineralógica.

Os solos argilosos por possuírem alta capacidade de retenção, além de uma estrutura mineral de partículas finas, que favorecem a formação de caminhos condutores, apresentam maiores condutividades.

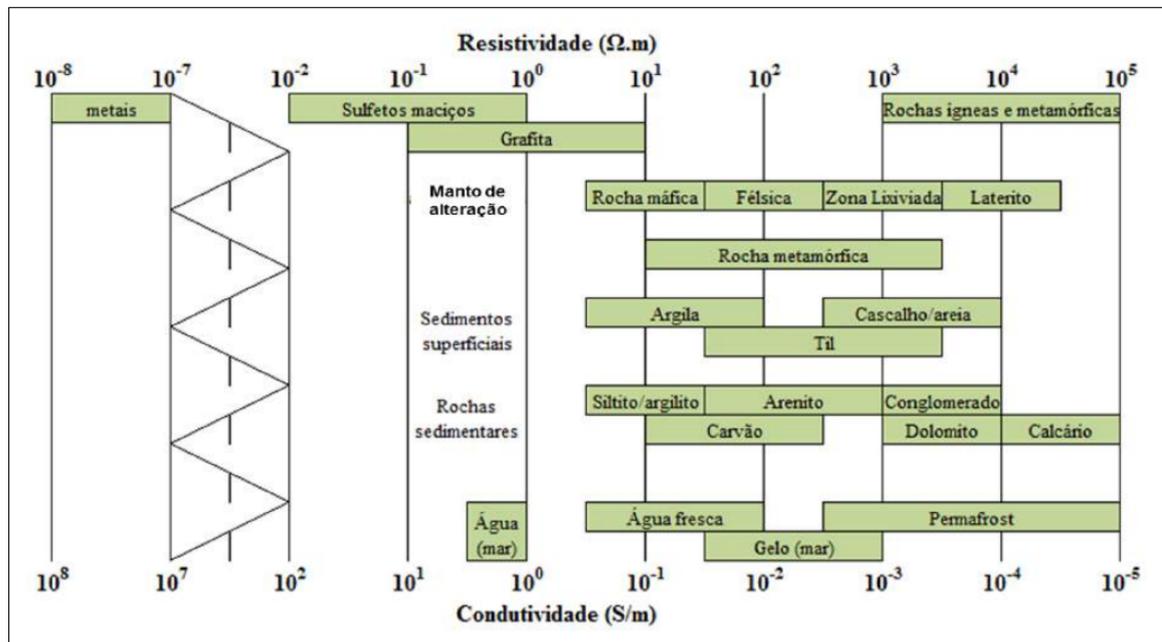
Solos arenosos possuem baixa capacidade de retenção de água, devido a alta porosidade. Dessa forma, a falta de conectividade entre os grãos faz com que solos arenosos apresentem resistividade relativamente alta, especialmente em áreas onde o lençol freático é profundo, além disso, mesmo que saturados, apresentam resistividades maiores do que argilas.

Sites tem características intermediárias, devido a moderada retenção de água e presença de partículas finas, porém, abaixo da condutividade das argilas.

Rochas e matacões possuem estrutura densa e, frequentemente, baixa porosidade e permeabilidade, dificultando a propagação de corrente elétrica, entretanto, fraturas preenchidas com água ou argila podem fornecer caminhos condutivos, em ensaios de resistividade.

Castro (2019) apresenta dados de resistividade média de materiais geológicos típicos, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Intervalos de valores típicos para materiais componentes do subsolo

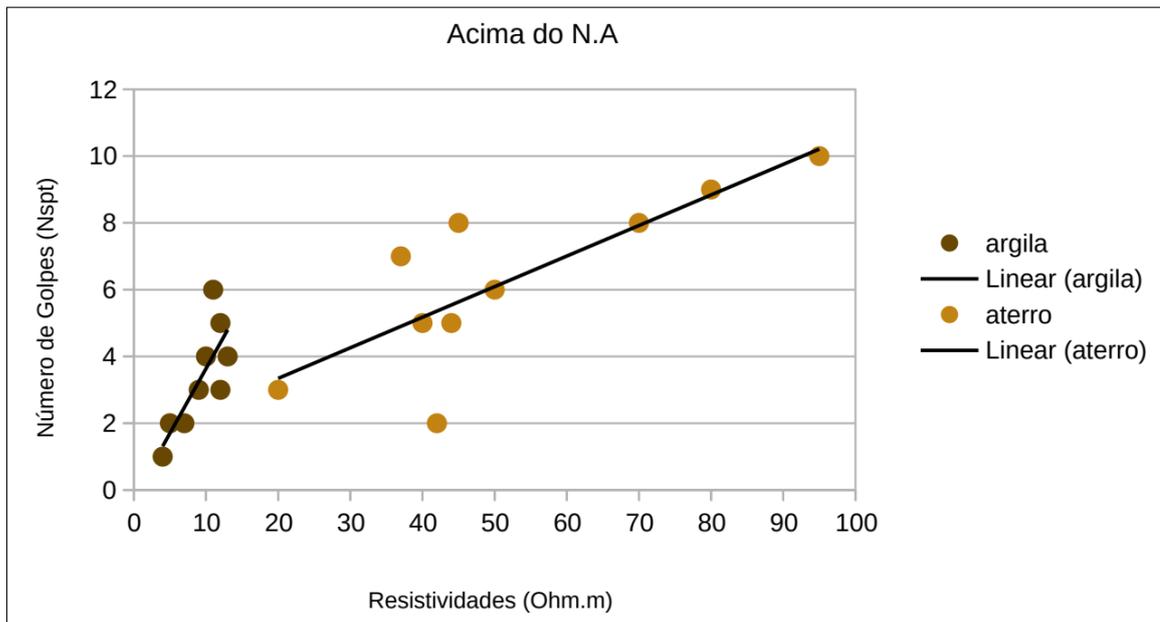


Fonte: Castro (2019)

Gonçalves (2021) apresenta conclusões semelhantes, demonstrando uma aparente correlação direta entre o aumento da resistividade (ρ) e o valor do N_{spt} . Essa correlação é fortemente influenciada pelo nível da água, motivos pelo qual o autor agrupa os dados acima e abaixo do nível da água. Além disso, a redução da porosidade e o aumento do grau de compactação em profundidade estão associados a uma melhor relação entre resistividade (ρ) e N_{spt} , resultando em um coeficiente de determinação (R^2) mais elevado.

Conforme pode ser visto na Figura 11 a camada de aterro composta por solo silte-argiloso contendo areia fina e média, além de pedregulhos, identificou-se uma relação linear positiva entre as variáveis analisadas. A Equação ajustada é $y = 0,09x + 1,50$, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,64.

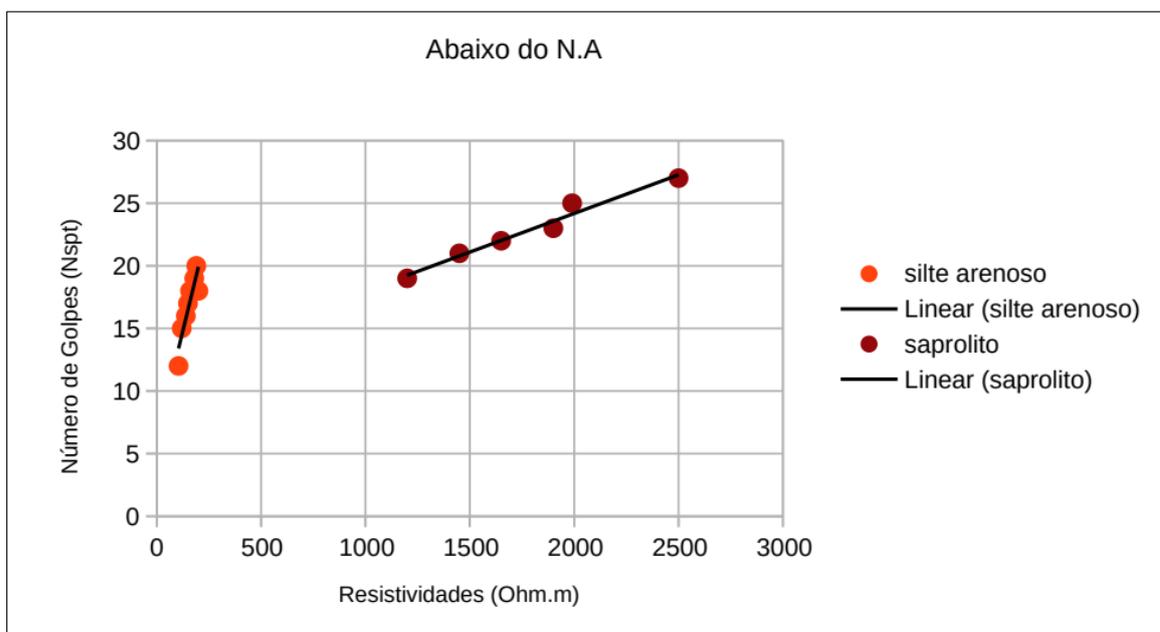
Figura 11 – Correlação ρ vs N_{spt} acima do N.A



Fonte: Gonçalves (2021)

Para a camada de silte arenoso a areia fina e média com pedregulhos, foi identificada uma correlação linear positiva entre as variáveis analisadas, como pode ser visualizado na Figura 12. A Equação de regressão ajustada é $y = 0,07x + 6,20$, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,83.

Figura 12 – Correlação ρ vs N_{spt} abaixo do N.A



Fonte: Gonçalves (2021)

Deve-se deixar claro, que essas estimativas empíricas são pouco fundamen-

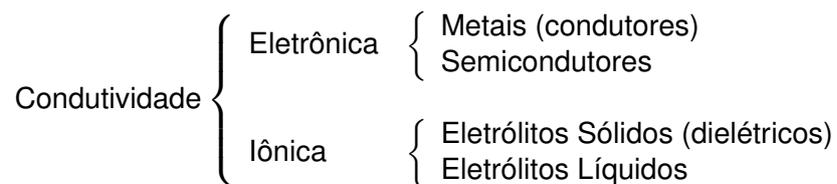
tadas dentro da literatura, sendo ainda muito incipientes, não substituindo de forma alguma a necessidade da realização de sondagens diretas.

2.2.4.1 Propriedade elétrica dos minerais

Segundo Orellana (1972), a aplicação de métodos geoeletricos requer conhecimento prévio das propriedades eletromagnéticas das rochas e minerais, sendo as principais a resistividade (ρ), condutividade (σ), constante dielétrica (ϵ) e a permeabilidade magnética (μ), conforme abordado no item 2.1.

Segundo Orellana (1972), a condutividade nas rochas ocorre de duas formas principais: eletrônica, por meio de elétrons, e iônica, por íons. A condutividade eletrônica pode se manifestar de maneira metálica ou semicondutora, dependendo do tipo de material, enquanto a condutividade iônica ocorre por meio de eletrólitos presentes em sólidos ou líquidos intersticiais.

Figura 13 – Resistividade dos materiais geológicos



Fonte: Orellana (1972)

Para entender a diferença entre os tipos de condutividade deve-se explorar o conceito abordado pela teoria das bandas, que descreve como os elétrons em um material sólido se organizam em diferentes níveis de energia, que é apresentada esquematicamente na Figura 14. A banda de valência é a mais baixa, onde os elétrons estão normalmente presentes, a banda de condução, acima, é onde os elétrons podem se mover livremente e conduzir eletricidade. A separação entre essas bandas é chamada de gap energético.

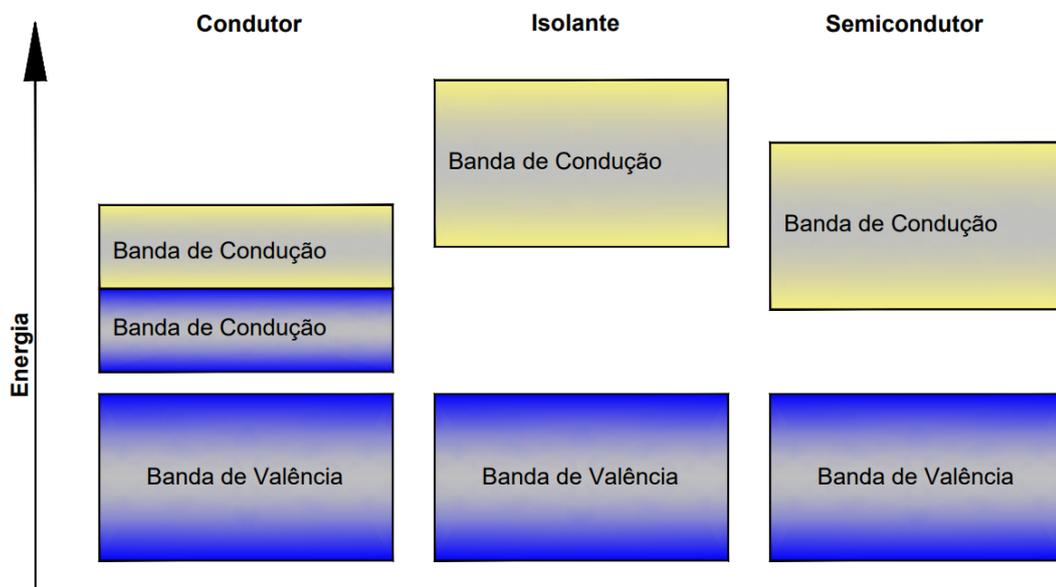
Segundo Orellana (1972), em materiais condutores, a banda de condução se sobrepõe à banda de valência, permitindo que elétrons se movam facilmente, caracterizando os materiais metálicos condutores. Poucos minerais possuem condutividade metálica, como os metais nativos (ouro, prata, cobre). A alta condutividade dos minerais metálicos ocorre porque os elétrons de valência podem se mover livremente pela rede cristalina, formando um nuvem de elétrons livres.

A resistividade dos metais à temperatura normal varia entre 10^{-8} e 10^{-7} ohm·m. Nos metais, os níveis energéticos dos átomos formam bandas contínuas, e a condução ocorre quando os elétrons ultrapassam o nível de Fermi com a presença de um campo externo.

Um semicondutor possui características intermediárias, apresentando um baixo gap de energia, o que lhe permite atuar como condutor ou isolante, dependendo das condições físicas, como temperatura ou corrente. Os minerais que se comportam como semicondutores, apresentados na Tabela 2, são altamente dependentes das impurezas presentes, sendo pouco recomendada a realização de correlações diretas entre as resistividades medidas em campo e a classificação do material sem um estudo geológico adequado.

Segundo Orellana (1972), há diversos exemplos de materiais desse grupo que apresentam discrepâncias relevantes de resistividade ou condutividade em relação à média. Um exemplo é o germânio puro, cuja condutividade pode ser aumentada em até mil vezes com a adição de apenas uma bilionésima parte de impureza de arsênio.

Figura 14 – Bandas de Condução.



Fonte: Autor (2024)

Tabela 2 – Resistividade dos Minerais Semicondutores

Resistividade 10^{-6} a 10^{-3} ($\Omega \cdot m$)		Resistividade 10^{-3} a 10^0 ($\Omega \cdot m$)		Resistividade 10^0 a 10^3 ($\Omega \cdot m$)	
Mineral	Fórmula	Mineral	Fórmula	Mineral	Fórmula
Altaíta	PbTe	Berthierita	FeSb ₂ S ₄	Allemontita	Sb ₃
Arsenopirita	FeAsS	Bornita	Cu ₅ FeS ₄	Bismutina	Bi ₂ S ₃
Bornita	Cu ₅ FeS ₄	Braunita	Mn ₂ O ₃	Cromita	Fe ₃ Cr ₂ O ₄
Calaverita	AuTe	Calcopirita	CuFeS ₂	Cupríta	Cu ₂ O
Calcopirita	CuFeS ₂	Casiterita	SnO ₂	Franckeíta	Pb ₅ Sn ₃ Sb ₂ S ₁₄
Calcosina	Cu ₂ S	Cobaltina	CoAsS	Raveríta	MnS ₂
Covelina	CuS	Galena	PbS	Molibdenita	MoS ₂
Discrásita	Ag ₃ Sb	Hollandita	(Ba, Na, K)Mn ₈ O ₁₆	Pirolusita	MnO ₂
Esmaltina	CoAs ₂	Ilmenita	FeTiO ₃	Rutilo	TiO ₂
Gersdorffita	NiAsS	Jamesonita	Pb ₄ FeSb ₆ S ₁₄	Siderita	FeCO ₃
Glaucodota	(Co, Fe)AsS	Magnetita	Fe ₃ O ₄	Tenorita	CuO
Hauchecornita	Ni ₉ (Bi, Sb) ₂ S ₈	Manganita	MnO(OH)	Tetraedrita	Cu ₃ SbS ₃
Hessita	Ag ₂ Te	Marcasita	FeS ₂	Uranita	UO ₂
Lollingita	FeAs ₄	Molibdenita	MoS ₂	Wolframita	MnFeWO ₄
Magnetita	Fe ₃ O ₄	Oligisto especular	Fe ₂ O ₃	Wurtzita	ZnS
Metacinnabrio	HgS	Pirita	FeS ₂		
Millerita	NiS	Pirolusita	MnO ₂		
Nagiagita	Pb ₆ Au(Se,Te) ₁₄	Psilomelana	KMn ₂ O ₃		
Niquelina	NiAs				
Pirita	FeS ₂				
Pirrotita	Fe ₇ S ₈				
Silvanita	AgAuTe ₄				
Skutterudita	CoAs ₃				

Fonte: Orellana (1972)

Os materiais dielétricos ou isolantes apresentam ligações fortes entre os elétrons, geralmente covalentes ou iônicas, resultando em um alto gap de energia. Nas ligações iônicas os átomos cedem elétrons de valência a outro, completando suas camadas e ficando com íons de cargas opostas e formando um eletrólito, com resistividades geralmente superiores a $10^7 \Omega \cdot m$.

- Anidrita
- Enxofre
- Blenda
- Calcita
- Cinábrio
- Quartzo
- Estibinita
- Feldspatos
- Feldspatoides
- Fluorita
- Hematita
- Hornblenda
- Limonita
- Micas
- Olivina
- Petróleo
- Piroxênios
- Cloreto de sódio
- Silvina

Segundo Orellana (1972) Dentro da categorias ds eletrólitos líquidos, os Cátions e aniões exercem o papel de condutores de carga ao estarem submetidos a uma corrente elétrica. A velocidade de condução desses íons está diretamente relacionada a intensidade de corrente, concentração iônica e mobilidade iônica. Como pode ser descrito na Equação (intensidadedecorrentexconcentracao):

$$I = F \cdot \sum \alpha_i \cdot C_i \cdot m_i \quad (29)$$

Considerando uma diferença de potencial de 1 *volt*, a resistividade pode ser dada por:

$$\rho = \frac{1}{F \cdot \sum \alpha_i \cdot C_i \cdot m_i} \quad (30)$$

Onde:

- I : Corrente Elétrica
- F : Constante de Faraday
- α : Fator de dissociação
- C_i : Concentração iônica
- m : Mobilidade iônica

Considerando a escala dos parâmetros utilizados, Orellana (1972) faz simplificações e apresenta uma correlação aproximada, onde:

$$\rho = \frac{100}{\sum C_i} \quad (31)$$

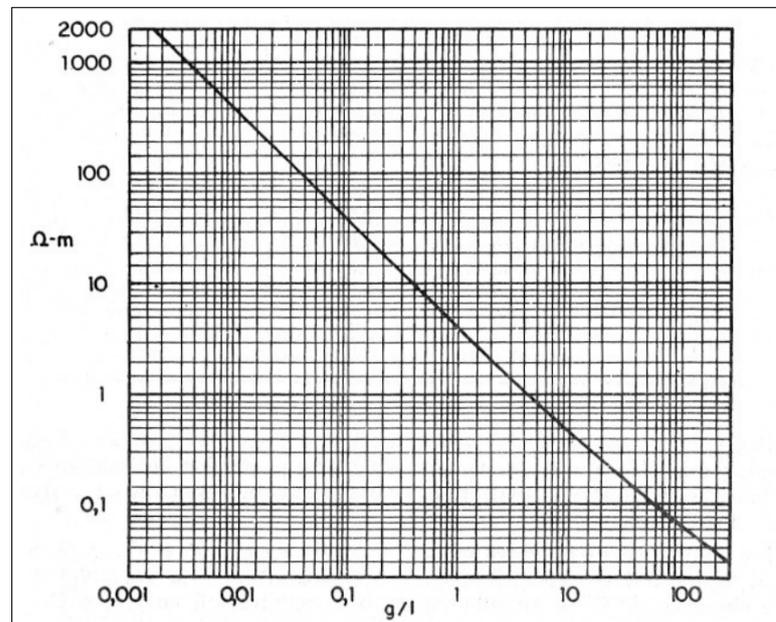
Considerando as propriedades de alguns dos principais íons expostos na Tabela 3, pode-se demonstrar o comportamento resistivo de um fluido em função da concentração iônica de *NaCl* na Figura 15.

Tabela 3 – Equivalentes Químicos de alguns Íons

Íon	Equivalente Químico (g/mol)	Equivalente em NaCl	Mobilidade iônica ($m^2 \cdot \frac{V}{s}$)
K^+	39.1	-	6.55×10^{-8}
Na^+	23	1	4.47×10^{-8}
Ca^{2+}	20.04	0.95	4.62×10^{-8}
Mg^{2+}	12.15	2	4.55×10^{-8}
Cl^{2-}	35.46	1	6.65×10^{-8}
HCO_3^{2-}	61.02	0.27	3.95×10^{-8}
CO_3^{2-}	30	1.27	6.07×10^{-8}
SO_4^{2-}	48.03	0.5	6.95×10^{-8}

Fonte: Orellana (1972)

Figura 15 – Relação resistividade *vs* concentração de eletrólitos (*NaCl*)



Fonte: Orellana (1972)

Conforme exposto na Figura 15, pode-se observar a característica condutora dos eletrólitos. A água em seu estado puro (raro na natureza) apresenta alta resistividade, de aproximadamente $10^5 \Omega \cdot m$, caracterizando-a como um isolante, porém, na natureza a água na imensa maioria das vezes terá eletrólitos (geralmente *NaCl*) diluídos, o que lhe fornece característica condutora.

Tabela 4 – Classificação das Águas com Base na Resistividade Elétrica

Tipo de Água	Resistividade
Águas de lagos e arroios de montanhas altas	10^3 a $3 \cdot 10^3 \Omega \cdot m$
Águas doces superficiais	10 a $10^3 \Omega \cdot m$
Águas salobras superficiais	$23 \cdot 10^3$ a $10 \Omega \cdot m$
Águas subterrâneas	1 a $20 \Omega \cdot m$
Águas de lagos salinos	0,1 a $1 \Omega \cdot m$
Águas marinhas	$< 0,2 \Omega \cdot m$
Águas de impregnação de rochas	0,03 a $10 \Omega \cdot m$

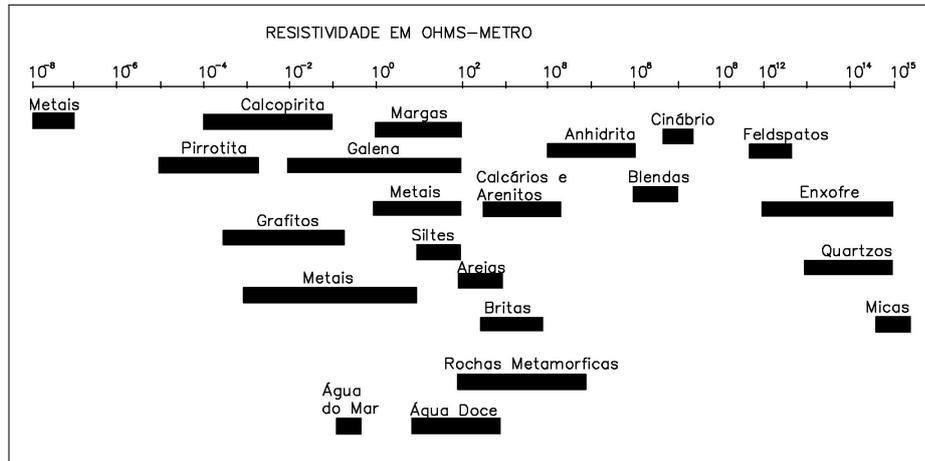
Fonte: (ORELLANA, 1972)

2.2.4.2 Propriedade elétrica das rochas

Como discutido anteriormente, a identificação de rochas apenas por medições de resistividade é complexa devido à grande variação de resistividades observada entre e dentro dos próprios grupos rochosos. A resistividade das rochas depende de diversos fatores ambientais e internos, como impurezas, composição mineralógica, saturação, temperatura, fraturamento, compactação e anisotropia. Por isso, o método

de eletrorresistividade é mais eficaz quando combinado com sondagens e estudos geológicos locais, o que reduz ambiguidades nas interpretações. De acordo com Orellana (1972), é possível estabelecer intervalos aproximados de resistividade para os principais tipos de rochas.

Figura 16 – Resistividade Média Das Rochas



Fonte: Adaptado de Orellana (1972)

2.2.5 Aplicações na engenharia

2.2.5.1 Caracterização de Material de Escavação

Em obras de infraestrutura, a caracterização dos materiais de escavação é um desafio recorrente, especialmente em projetos rodoviários e ferroviários. A ampla extensão desses empreendimentos frequentemente expõe uma grande variabilidade geológica, dificultando a precisão das análises. Métodos convencionais, como sondagens rotativas, SPT e trado, fornecem dados pontuais e, muitas vezes, insuficientes para uma interpolação confiável do perfil estratigráfico do trecho estudado.

O DNIT apresenta em sua norma DNIT 106/2009 - ES a classificação de materiais de escavação em 3 categorias:

- Material de 1ª categoria: Compreende os solos em geral, residuais ou sedimentares, seixos rolados ou não, com diâmetro máximo inferior a 0,15 m, qualquer que seja o teor de umidade apresentado. O processo de extração é compatível com a utilização de “Dozer” ou “Scraper” rebocado ou motorizado.
- Material de 2ª categoria: Compreende os solos de resistência ao desmonte mecânico inferior à da rocha não alterada, cuja extração se processe por combinação de métodos que obriguem a utilização do maior equipamento de escarificação exigido contratualmente; a extração eventualmente pode envolver o uso de explosivos ou processo manual adequado. Estão incluídos nesta categoria os blocos de rocha de volume

inferior a 2 m³ e os matacões ou pedras de diâmetro médio compreendido entre 0,15 m e 1,00 m.

- Material de 3ª categoria: Compreende os materiais com resistência ao desmonte mecânico equivalente à rocha não alterada e blocos de rocha com diâmetro médio superior a 1,00 m, ou de volume igual ou superior a 2 m³, cuja extração e redução, a fim de possibilitar o carregamento, se processem com o emprego contínuo de explosivos.

(DNIT-106, 2009, p. 3)

O estudo realizado por Garcia *et al.* (2022) aborda a aplicação do método de resistividade elétrica na caracterização de materiais de escavação para o projeto da Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL - EF334), localizado nos estados da Bahia e Tocantins, Brasil. A quantificação inicial dos materiais de escavação foi baseada em apenas um furo SPT por corte, o que resultou em discrepâncias significativas nos volumes estimados. O estudo de caso revelou que, devido à heterogeneidade dos materiais encontrados, não houve correlação entre os furos de sondagem e as condições dos materiais *in situ*, o que justifica a grande variabilidade nos volumes de escavação.

A pesquisa demonstrou que a combinação da prospecção geofísica de resistividade elétrica com sondagens geotécnicas convencionais e mapeamento geológico foi fundamental para uma classificação mais precisa dos materiais de escavação. A aplicação dos métodos geofísicos permitiu obter estimativas mais confiáveis do perfil estratigráfico e dos volumes de materiais escavados. No processo de categorização, as zonas foram classificadas em intervalos de resistividade, em que resumidamente, associou valores elevados a materiais mais compactos e rochas pouco fraturados, geralmente mais difíceis de escavar, enquanto as zonas de baixa resistividade indicaram materiais mais fraturados, com presença de água ou argila, mais fáceis de escavar.

Além disso, o estudo pontua que as sondagens de eletrorresistividade oferecem informações tridimensionais. Em projetos rodoviários e ferroviários, isso representa a possibilidade de realizar análises não apenas a partir do perfil longitudinal, mas também por meio de seções transversais, proporcionando uma visão mais completa e detalhada do terreno.

2.2.5.2 Estabilidade de taludes

A capacidade de fornecer uma visão espacial abrangente do terreno de forma não destrutiva é uma das principais razões que tornam os métodos geoeletricos tão atrativos.

Na geotecnia, especialmente no estudo da estabilidade de taludes, a distribuição dos materiais geológicos ao longo da seção analisada é um dos parâmetros mais importantes para a determinação do fator de segurança.

Miranda *et al.* (2021) demonstra a aplicação do método de caminhamento elétrico, utilizando o arranjo dipolo-dipolo, para avaliar a estabilidade de uma barragem de terra de pequeno porte localizada no município de Caçapava do Sul (RS), destacando o papel fundamental da geofísica na definição do perfil geotécnico da barragem e na investigação de possíveis áreas de infiltração.

Por sua vez, Moraes (2019) emprega a mesma técnica para analisar os condicionantes físicos de estabilidade de um talude localizado no Jardim Zoológico de Salvador, possibilitando a identificação do topo rochoso da estrutura.

2.2.5.3 Identificação de topos e fraturas em maciços rochosos

A identificação da geometria de maciços rochosos aterrados representa um desafio significativo na engenharia de infraestrutura, especialmente em projetos como túneis, obras de arte correntes que envolvem cortes e reaterros, estabilização de encostas e a identificação de zonas com fluxo de água.

Conforme discutido no capítulo 2.2.4.2 sobre as características geoelétricas das rochas, é possível identificar zonas de fraturas ou a transição solo/rocha por meio da interpretação das variações de resistividade observadas nas pseudo-seções.

Elis e Zuquette (1995) aplicou o método de sondagem elétrica vertical juntamente com a metodologia de sísmica de refração, com o objetivo de determinar a geometria da interface solo/rocha em uma área com rochas sedimentares em Rio Claro - SP. Foram constatados valores de resistividade e velocidades de propagação abaixo do esperado para basaltos, indicando alteração da rocha. Além disso, obteve-se geometrias de transição solo/rocha bastante compatíveis entre os métodos.

Camargo (2015) avaliou a subsuperfície de uma área destinada à construção de um empreendimento em Cachoeiro de Itapemirim/ES. Utilizando o método da resistividade elétrica com arranjo dipolo-dipolo, foram obtidos dados ao longo de 12 linhas paralelas. Esses dados permitiram a identificação do topo rochoso, que se demonstrou topograficamente irregular, com variações de até 155 metros na elevação e camadas de solo com até 50 metros de espessura. Além disso, foram identificadas anomalias de alta resistividade, atribuídas a matacões.

Maciços rochosos, especialmente os de baixa porosidade, tendem a apresentar valores de resistividade significativamente mais altos em comparação a materiais como argilas, areias e siltes. Garcia *et al.* (2022) demonstrou que, ao identificar mudanças abruptas de resistividade e combiná-las com a análise de ensaios como SPT e inspeções visuais, é possível extrapolar os dados obtidos em campo para delimitar camadas geológicas em diferentes direções.

Essa abordagem permite detectar topos rochosos ocultos, blocos desagregados e falhas, além de fornecer informações sobre a orientação de descontinuidades,

um parâmetro essencial na avaliação da qualidade de maciços rochosos por métodos como o Q-System e o GSI.

2.2.5.4 Estudos hidrogeológicos e de fluxo de água

Os métodos geoeletricos são amplamente utilizados em estudos hidrogeológicos para mapear zonas com água subterrânea ou identificação de contaminação. Em sua tese Saar (2023) utiliza o caminhamento elétrico e a sondagem elétrica vertical (entre outras técnicas geofísicas) para a identificação de zonas com água subterrânea, para a uso na irrigação de uma plantação de milho, apresentando uma excelente correlação entre zonas com baixa resistividade com zonas de basalto fraturado, região com possível presença de água.

De acordo com Nascimento *et al.* (2024), em estudo que abordou a aplicação de metodologias geofísicas para investigação e monitoramento geoambiental do aterro sanitário localizado no município de Bauru-SP. Foram utilizadas diversas técnicas geofísicas, como resistividade, polarização induzida, piezocone de resistividade (RCPTU), essas acompanhadas de ensaios de piezocone (CPTU), SPT e poço de inspeção para coleta de amostras. Com essa abordagem integrada, foi possível identificar valores de resistividade significativamente menores no lixiviado, variando entre 1,50 e 204,4 $\Omega \cdot m$, em comparação com a água de torneira, que apresentou resistividade entre 190 e 6589 $\Omega \cdot m$, como pode ser visualizado na Tabela 7.

Tabela 5 – Valores médios de resistividade encontrados para os solos não saturado localizados no entorno do aterro de RSU de Bauru

Ensaio	Profundidade (m)	Resistividade ($\Omega.m$)
RCPTU 1	0,12 a 4,88	371,1±249,9
RCPTU 4	0,12 a 3,62	352,8±217,3
RCPTU 8	0,12 a 7,12	430,8±362,0
RCPTU 10	0,12 a 3,12	893,6±874,5
RCPTU 13	0,12 a 6,12	861,1±1392,0
RCPTU 14	0,12 a 5,12	200,4±212,7
RCPTU 15	0,12 a 5,12	231,8±200,8

Fonte: Nascimento *et al.* (2024)

Tabela 6 – Valores médios de resistividade encontrados para os solos saturado localizados no entorno do aterro de RSU de Bauru

Ensaio	Profundidade (m)	Resistividade ($\Omega.m$)
RCPTU 1	4,88 a 7,50	111,5±52,8
RCPTU 4	3,62 a 12,02	62,7±35,2
RCPTU 8	7,12 a 11,02	30,7±8,6
RCPTU 10	3,12 a 6,92	100,5±47,5
RCPTU 13	6,12 a 15,04	80,6±69,6

Fonte: Nascimento *et al.* (2024)

Tabela 7 – Valores de resistividade elétrica determinados para as amostras de solo analisadas em laboratório com lixiviado e água de torneira

Amostra	Lixiviado		Água de Torneira	
	R (ohm.m)	Sr (%)	R (ohm.m)	Sr (%)
1	1,91 – 50,3	20,7 – 98,7	559 – 1019	34,6 – 80,2
2	28,84 – 204,4	10,2 – 97,4	190 – 510	32,2 – 82,7
3	3,44 – 11,1	28,7 – 99,6	-	-
4	1,79 – 44,8	21,7 – 98,5	2960 – 6589	41,8 – 97,1
5	1,50 – 41,6	16,6 – 99,6	1165 – 2230	29,5 – 88,2

Fonte: Nascimento et al. (2024)

2.3 OUTROS MÉTODOS GEOFÍSICOS RELEVANTES

2.3.1 Método Ground Penetrating Radar (GPR)

O Ground Penetrating Radar (GPR) é um método de prospecção geofísica não invasivo que utiliza ondas eletromagnéticas para investigar o subsolo. Nesse método, são utilizadas antenas transmissoras, que irradiam ondas em direção ao meio analisado, conforme ilustrado na Figura 17.

Segundo Vieira e Gandolfo (2013), a velocidade de propagação das ondas é medida em nanossegundos (ns) e, para determinar a espessura das camadas estudadas, é necessário conhecer a velocidade de propagação da onda eletromagnética no material. A velocidade (v) de propagação de uma onda eletromagnética em um meio com permissividade dielétrica relativa K pode ser definida como:

$$V = \frac{c}{\sqrt{K}} \quad (32)$$

onde:

- V : Velocidade de propagação da onda (m/ns);
- c : Velocidade da luz no vácuo (m/ns);

A permissividade dielétrica relativa (K) é definida por:

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (33)$$

onde:

- ϵ : Permissividade dielétrica (F/m);
- ϵ_0 : Permissividade do vácuo ($8,89 \cdot 10^{12}$ F/m);

Sendo assim, a velocidade de propagação da onda é inversamente proporcional à constante dielétrica ϵ e deve ser determinada antes do processamento dos dados, sendo frequentemente uma fonte de incerteza. Vieira e Gandolfo (2013) afirma que uma boa forma de obtenção da permissividade dielétrica é através da abertura de uma cava, sabendo a espessura da camada, pode-se estimar a velocidade de reflexão teórica e assim determinar a constante dielétrica.

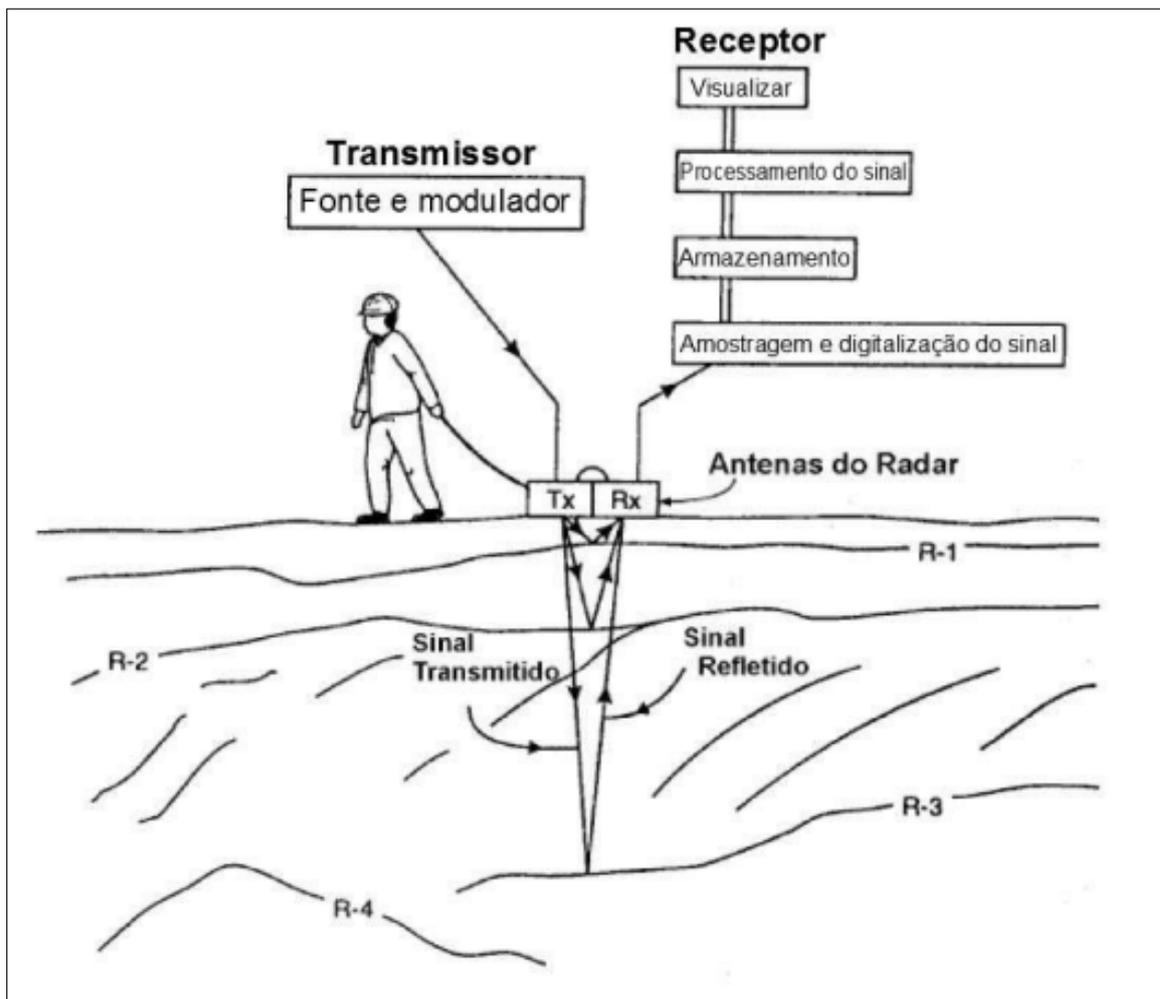
Conforme a Figura 17, à medida que essas ondas viajam pelo subsolo, encontram materiais com diferentes permissividades dielétricas, fazendo com que sejam refletidas, refratadas e difratadas de volta para a superfície, em diferentes velocidades, onde são detectadas pelas antenas, registradas e processadas, de forma a se obter o radargrama. A depender da velocidade de propagação das ondas ou da constante dielétrica, torna-se possível classificar o material, conforme a Tabela 2.3.1.

Segundo Annan (2009), o GPR apresenta melhores resultados em meios resistivos, ou seja, são pouco eficientes em regiões com presença de água subterrânea salina ou ambientes argilosos.

Segundo Santos (2021), a profundidade de prospecção do método GPR está inversamente relacionada à frequência de transmissão (Tabela 8). A transmissão pode ser realizada no modo monoestático (onde uma única antena faz a transmissão e a recepção do sinal) ou biestático (com uma antena transmissora e uma receptora). A relação entre a frequência das antenas e a profundidade pode ser observada na Tabela 8.

No campo, a configuração do GPR envolve o planejamento das rotas de varredura para cobrir a área de interesse, com a antena sendo movimentada ao longo do terreno de forma contínua ou em intervalos regulares.

Figura 17 – Elementos básicos de um sistema GPR



Fonte: Santos (2021)

Tabela 8 – Frequência central das antenas x profundidade máxima de penetração

Frequência (MHz)	Profundidade Máxima (m)
1000	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

Fonte: Santos (2021)

Tabela 9 – Valores de constante dielétrica ϵ'_r , condutividade elétrica σ , velocidade v e atenuação α para alguns materiais geológicos a 100 MHz

Material	ϵ'_r	σ (mS/m)	v (m/ns)	α (dB/m)
Ar	1	0	0,3	0
Água destilada	80	0,01	0,033	2×10^{-3}
Água doce	80	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	3×10^4	0,01	10^3
Areia seca	3 - 5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20 - 30	0,1 - 1,0	0,06	0,03 - 0,3
Calcário	4 - 8	0,5 - 2	0,12	0,4 - 1
Folhelho	5 - 15	1 - 100	0,09	1 - 100
Silte	5 - 30	1 - 100	0,07	1 - 100
Argila	5 - 40	2 - 1000	0,06	1 - 300
Granito	4 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Sal seco	5 - 6	0,01 - 1	0,13	0,01 - 1
Gelo	3 - 4	0,01	0,16	0,01

Fonte: Santos (2021)

2.3.1.1 Aplicações na engenharia

2.3.1.1.1 Detecção de Estruturas Enterradas

A detecção de estruturas enterradas é uma aplicação comum do GPR, sendo amplamente utilizado para de fundações, auxiliando em projetos de construção e na manutenção urbana, prevenindo danos durante escavações.

Manhães *et al.* (2016) demonstrou a aplicação dessa metodologia na investigação de elementos de fundação enterrados em empreendimento comercial no Rio de Janeiro - RJ. Nesse estudo, foi possível delimitar a geometria das estruturas enterradas, conforme pode ser visualizado nas Figuras 18 e 19.

Entanto, a profundidade das fundações profundas não pôde ser determinada com precisão devido à interferência de um aquífero não confinado de água salobra, que afetou os resultados do GPR a partir de uma certa profundidade.

Figura 18 – Radargrama - Fundações Rasas

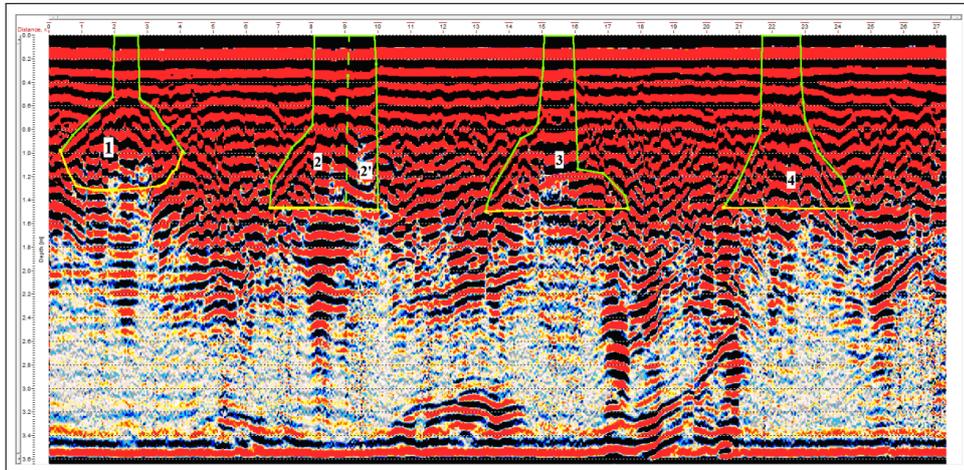
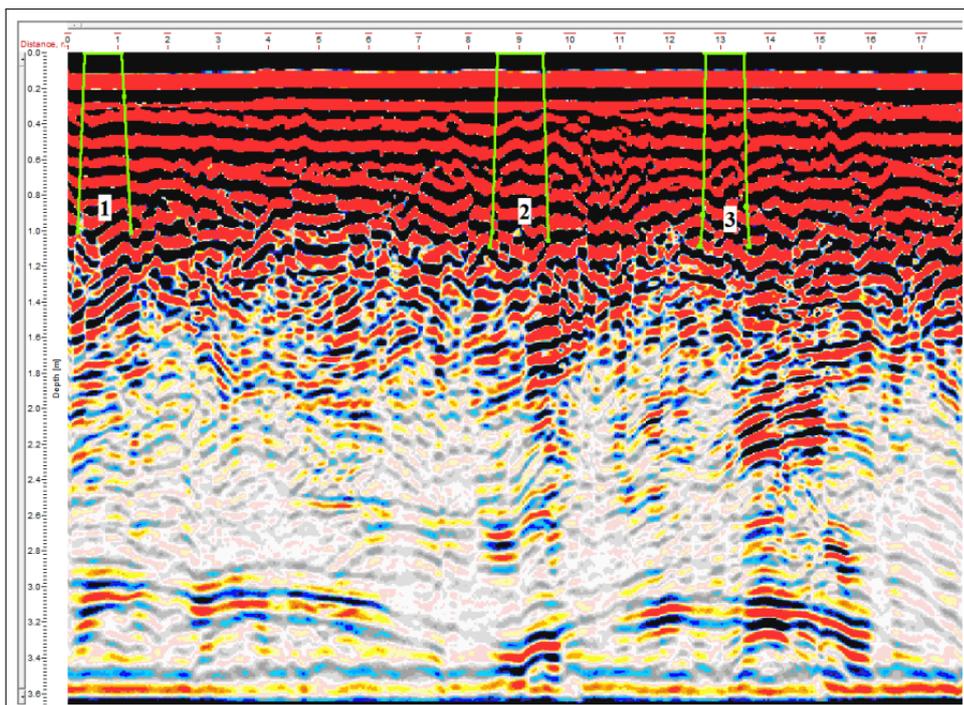
Fonte: Manhães *et al.* (2016)

Figura 19 – Radargrama - Fundações Profundas

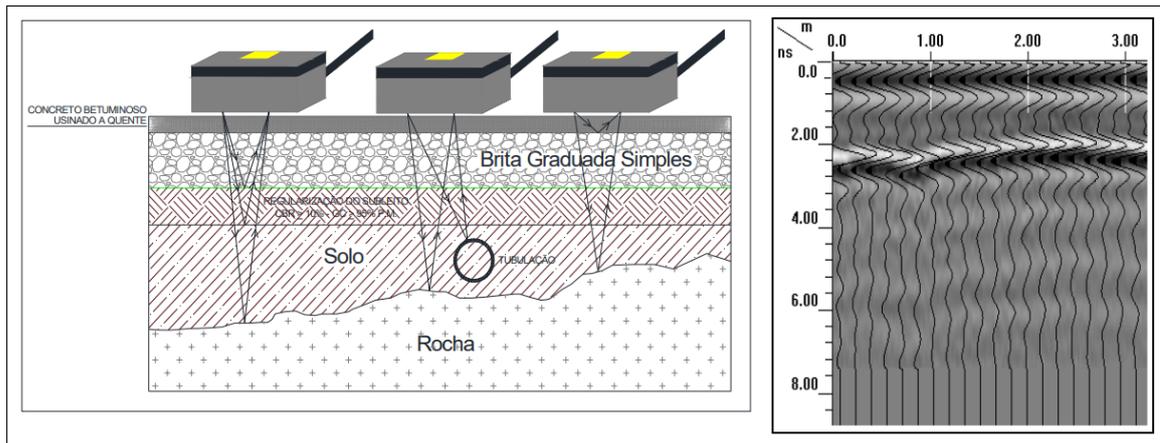
Fonte: Manhães *et al.* (2016)

2.3.1.1.2 Inspeção de Estruturas e Pavimentos

O GPR, ao possibilitar uma análise detalhada da integridade de pavimentos e estruturas de fundação, desempenha um papel crucial na identificação de problemas como vazios, fissuras, laminações e degradações no concreto. Isso facilita o planejamento de reparos e manutenção de forma mais eficiente.

De acordo com Vieira e Gandolfo (2013), a escolha da frequência ideal é um dos principais desafios na inspeção de pavimentos. Para uma análise eficaz, é essencial selecionar uma frequência suficientemente baixa para alcançar todas as camadas, mas ao mesmo tempo garantir que seja alta o suficiente para proporcionar boa resolução para visualização camadas.

Figura 20 – Esquema de Inspeção de pavimento com GPR



Fonte: Vieira e Gandolfo (2013)

A abordagem ofereceu vantagens significativas em termos de redução de custos e tempo, especialmente quando comparada aos métodos tradicionais de avaliação, como a escavação de poços de inspeção. Esses métodos não apenas causam danos locais ao pavimento, mas também exigem a interrupção do tráfego até que as escavações e recomposições sejam concluídas.

Além disso, a tecnologia permite mapear toda a extensão do pavimento, identificando anomalias como vazios, fissuras e discontinuidades, o que torna as inspeções invasivas mais eficientes, direcionando-as de forma precisa e minimizando intervenções desnecessárias.

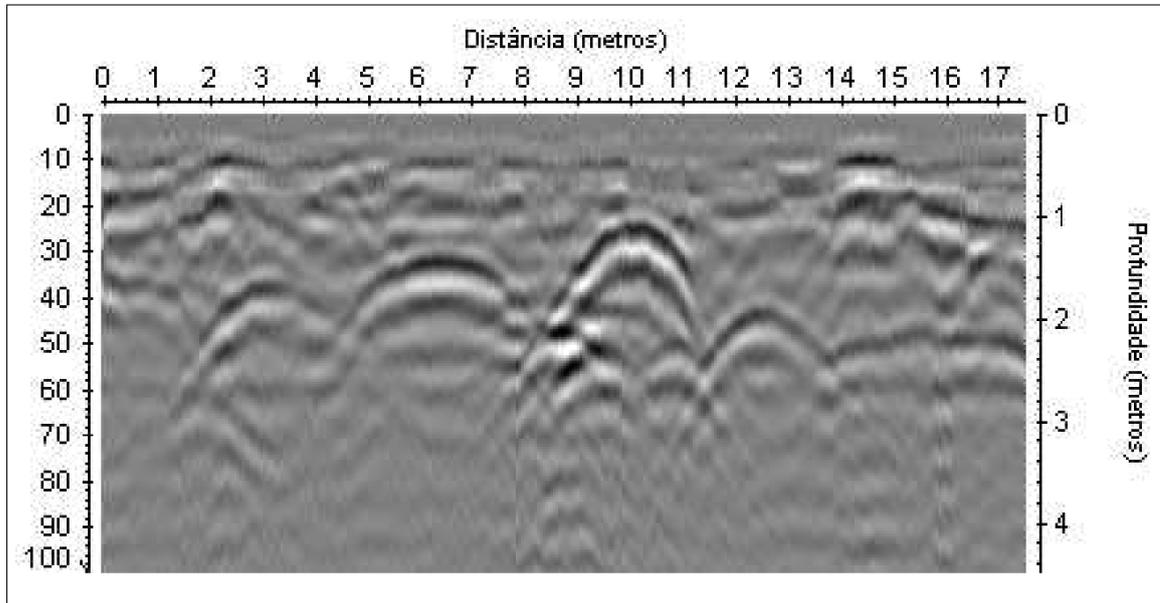
2.3.1.1.3 Detecção de tubos enterrados

Alves (2014) aborda a aplicação do GPR na detecção de tubos enterrados, comparando os resultados sobre a profundidade dos tubos com os obtidos por métodos convencionais, como o método PCM. Foram coletados dados em 10 perfis ao redor do Rio Quiricó - Bahia, utilizando dois equipamentos, foi constatado durante os levantamentos uma variação na qualidade das conforme a proximidade do rio, devido à maior condutividade elétrica.

Os dados foram processados pela técnica de ajuste hiperbólico das difrações, permitindo a definição da geometria da subsuperfície. O GPR foi considerado eficaz na localização dos dutos, mas com limitações na profundidade, especialmente em

solos mais saturados e condutivos. O exemplo de um dos radargramas processados pode ser visto na Figura 21 e a localização dos tubos na Tabela 10.

Figura 21 – Localização de duto no radargrama



Fonte: Alves (2014)

Tabela 10 – Localização dos dutos no radargrama da Figura 21

Duto	Profundidade (m)	Distância ao início do perfil (m)
Duto 1	1,75	3,1
Duto 2	1,49	6,4
Duto 3	1,27	10,1
Duto 4	2,01	12,6

Fonte: Alves (2014)

2.3.2 Métodos sísmicos

Os métodos sísmicos baseiam-se na análise da velocidade de propagação de ondas sísmicas emitidas através de um meio, geralmente de natureza geológica. À medida que essas ondas atravessam camadas com diferentes propriedades físicas, elas sofrem refração, sendo registradas por geofones estrategicamente dispostos na superfície. Esses sinais são então processados por sismógrafos e interpretados para fornecer informações detalhadas sobre o subsolo.

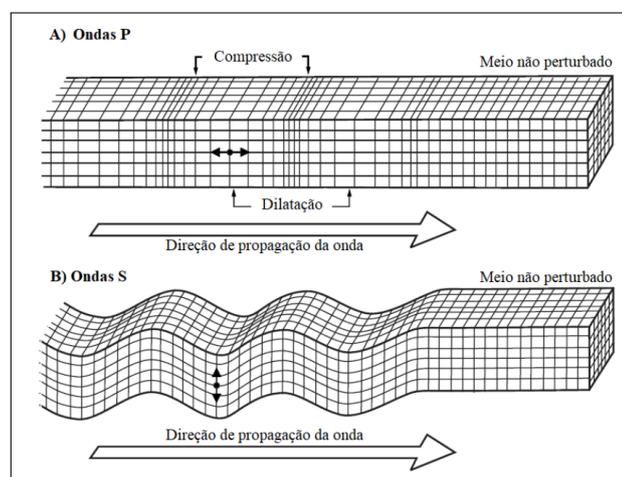
A utilização de ondas elásticas permite estimar propriedades relacionadas ao módulo de elasticidade (E), como grau de consolidação, cimentação, nível de alteração, compactação e saturação do material. Quando esses dados são combinados com informações de sondagens mecânicas, como ensaios de percussão, rotativos ou CPT, é possível obter uma caracterização geológica e geotécnica precisa, conforme destacado por Souza (2012).

2.3.2.1 Princípios Físicos

O método sísmico é fundamentado pela teoria da elasticidade, uma vez que a velocidade de propagação das ondas sísmicas dependem diretamente do módulo de elasticidade E do meio propagado. Conceitualmente, um material pode ter sua geometria alterada a partir de uma deformação provocada pela aplicação de uma carga.

A capacidade do material de retornar a sua forma original antes de entrar no regime plástico é chamada de elasticidade, ou seja, um corpo perfeitamente elástico é aquele que se recupera completamente após ser deformado. As rochas podem ser consideradas perfeitamente elásticas quando submetidas as baixas deformações, como ocorre no caso de exposição as ondas sísmicas (TELFORD *et al.*, 1990).

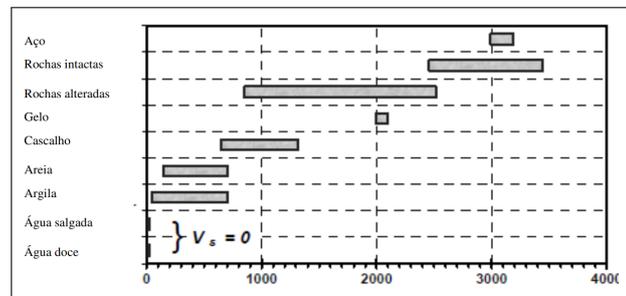
Figura 22 – Propagação de Ondas P e S



Fonte: Meira (2023)

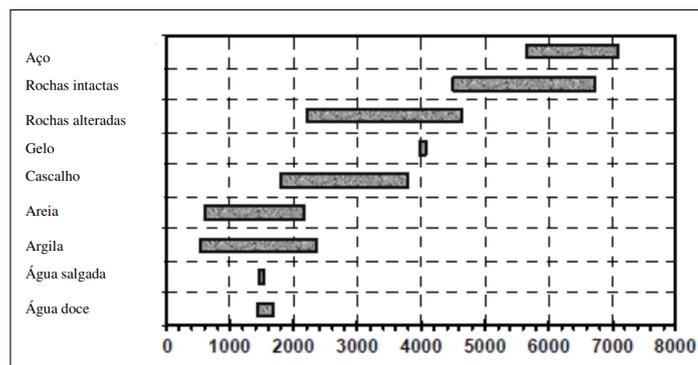
Para praticidade de entendimento Vitali (2011) apresenta faixas de velocidade típicas para materiais geológicos em função do tipo de onda empregado, que pode ser visto nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 – Velocidade das ondas S, V_s (m/s)



Fonte: Vitali (2011)

Figura 24 – Velocidade das ondas P, V_p (m/s)



Fonte: Vitali (2011)

2.3.2.2 Metodologias de Campo

2.3.2.2.1 Método sísmico de refração

Conforme explica Meira (2023), essa metodologia utiliza uma linha sísmica de geofones dispostos longitudinalmente na superfície do terreno. Os geofones, por sua vez, são conectados a um sísmógrafo, que registra as ondas sísmicas refratadas após interagirem com camadas geológicas do subsolo. A geração da energia sísmica necessária para o levantamento é realizada por fontes impulsivas ou explosivas, a depender do alcance desejado.

Para investigações mais superficiais, é comum o uso de marretas, conforme pode ser observado na Figura 25. O ensaio sísmico de refração é atrativo devido à sua capacidade de realizar medições diretamente a partir da superfície, sem a necessidade de perfurações, como é o caso dos ensaios por perfilagem crosshole e dow-

nhole, o que o torna uma opção prática, porém menos aplicada devido à ambiguidade na interpretação dos dados.

De acordo com Souza (2012), os ensaios sísmicos de refração são recomendados na geologia para a identificação do topo de maciços rochosos, além de fornecerem informações importantes sobre o nível de alteração das rochas.

Figura 25 – Levantamentos de sísmica de refração com onda S em barragem

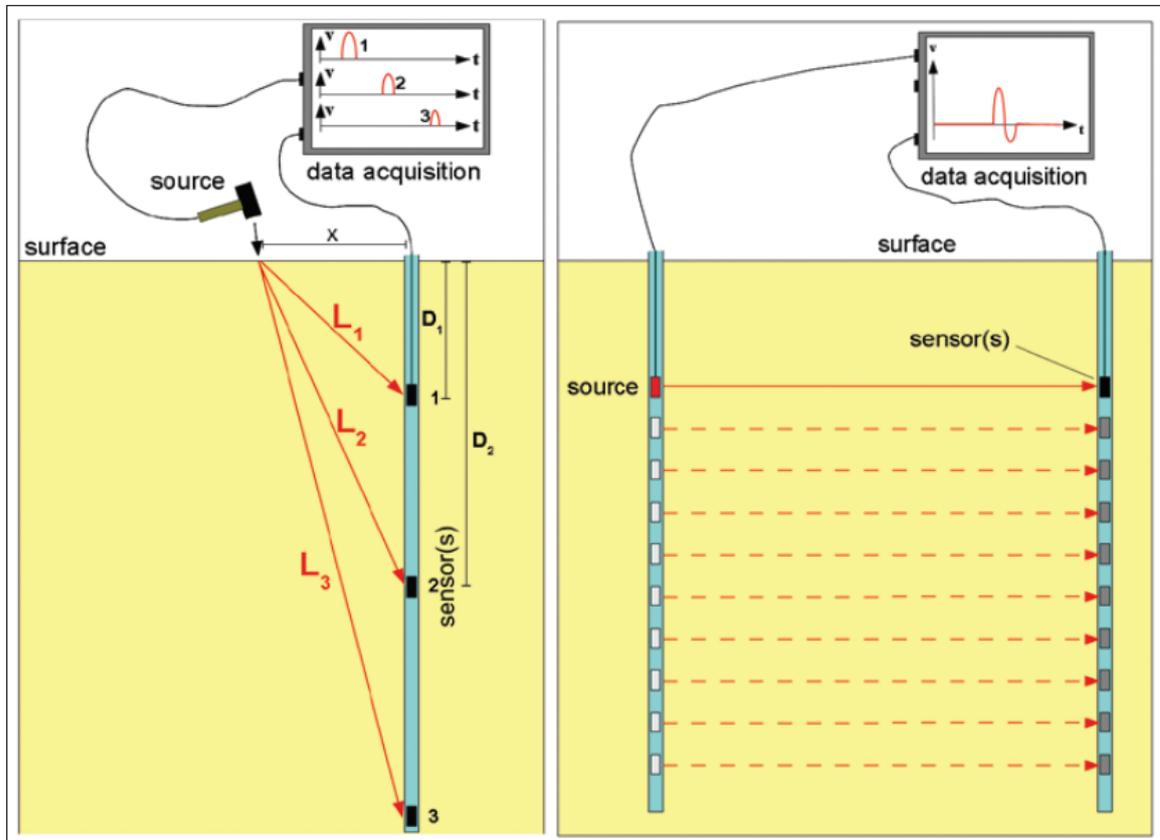


Fonte: IPT *et al.* (2019)

2.3.2.2.2 Método Crosshole e Downhole

Segundo Vitali (2011) o ensaio Crosshole envolve a geração de ondas sísmicas em um furo de sondagem e a sua detecção em outro furo adjacente. Essa técnica fornece informações sobre as velocidades das ondas sísmicas de cisalhamento (S), através da relação tempo/distância percorrido. Essa metodologia apresenta vantagens em relação à direção de propagação da onda que acontece paralelamente à camada (se esta disposta horizontalmente). O ensaio Downhole se diferencia do crosshole por necessitar de apenas um furo, o qual é disposto o geofone, as aplicações de energia são feitas na superfície, removendo a necessidade e dificuldade de executar-se o procedimento no furo.

Figura 26 – Método Downhole e Crosshole Respectivamente



Fonte: Guerreros *et al.* (2016)

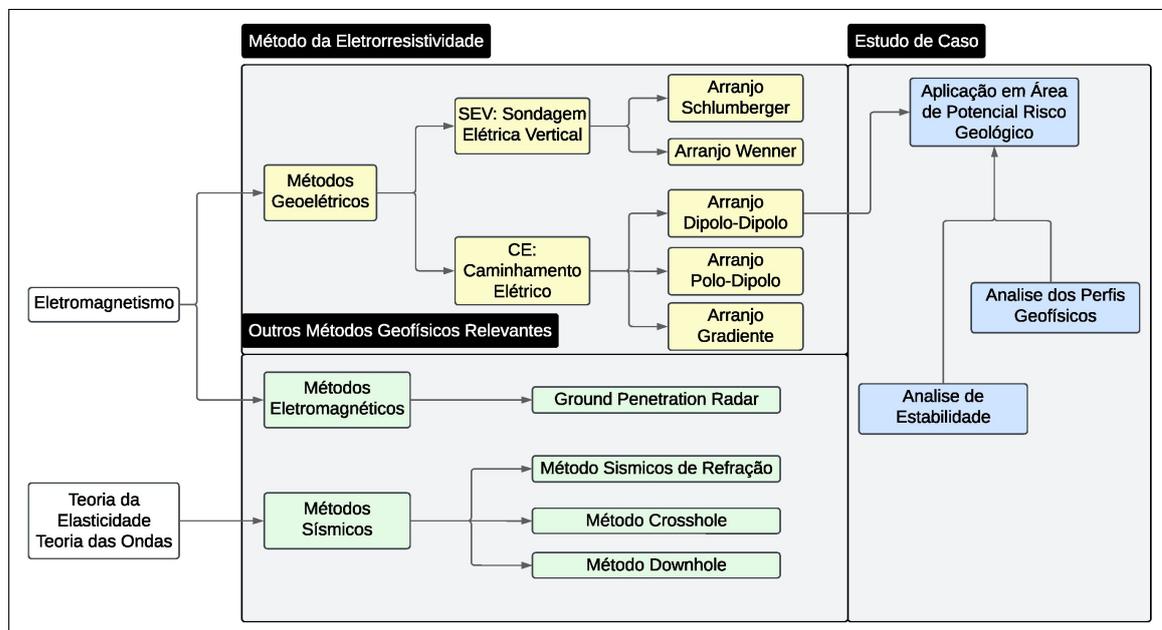
3 METODOLOGIA

3.1 PROPOSTA

Dentro de projetos geotécnicos, é comum encontrar situações de ambiguidade e/ou lacunas de informação, decorrentes principalmente do caráter pontual dos levantamentos geotécnicos convencionalmente aplicados. Nesse panorama, as técnicas geofísicas de prospecção apresentam-se como uma ferramenta contínua e não invasiva poderosa, especialmente quando aplicadas em conjunto com ensaios de campo e um adequado estudo geológico do local.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o funcionamento e as aplicações dos principais métodos geofísicos atuais, com enfoque no método da eletrorresistividade. Este método foi utilizado no estudo de caso abordado, no qual será avaliado o impacto da aplicação do caminhamento elétrico sobre a investigação geotécnica local. Para isso, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre as principais técnicas de campo relacionadas aos respectivos métodos, seguindo a estrutura apresentada na Figura 27

Figura 27 – Estrutura da pesquisa



Fonte: Autor (2024)

3.2 LIMITAÇÕES DA ANÁLISE

3.2.1 Escala dos dados

As avaliações qualitativas do método utilizam, além de dados de campo, informações de caráter bibliográfico, no entanto, essa abordagem apresenta limitações que dificultam conclusões mais precisas sobre a aplicabilidade do método. Isso porque os dados de fontes bibliográficas possuem erros associados à extensão (Área) de análise, que podem ser significativos em relação à área específica do estudo.

Por exemplo, não é adequado usar um mapa pedológico de todo um município para validar a qualidade de uma sondagem em um terreno específico. Embora seja possível realizar comparações e análises cruzadas para identificar similaridades e diferenças entre os dados, é necessário cautela.

Nesse contexto, Frasson *et al.* (2004) realizou medições de condutividade elétrica do solo em quatro áreas na região sudoeste do estado de São Paulo, comparando os dados obtidos com os mapas pedológicos da região. O estudo identificou uma relação direta entre as variações na condutividade elétrica e a classificação pedológica, analisando os desvios estatísticos das comparações.

Embora os resultados tenham demonstrado a viabilidade do uso da condutividade elétrica como ferramenta complementar para validar dados pedológicos, a precisão estimada apresentou variações significativas. Para as medições realizadas a 0,3 m de profundidade, os desvios padrão oscilaram entre 1,487 e 1,799, enquanto, para medições a 0,90 m, os desvios variaram entre 0,725 e 1,195.

Além disso, os desvios padrão foram calculados considerando uma área de extensão de 17,9 ha, se aplicada a mesma comparação a áreas menores, a tendência geral seria apresentar desvios ainda maiores.

3.2.2 Efeitos da interpolação

Além disso, os métodos geofísicos frequentemente apresentam "efeitos de borda", resultantes das limitações inerentes aos modelos matemáticos que geram as seções. Esses efeitos exigem cautela na interpretação dos dados próximos aos limites das seções, pois podem introduzir distorções e reduzir a confiabilidade das informações obtidas nessas áreas.

3.2.3 Condições de campo

Outro fator que deve ser ponderado na análise é quanto a precisão da locação dos dados geofísico. As seções pelas quais o caminhamento ocorreu foram limitadas pelas condições precárias do terreno, que tiveram que ser feitas contornando as ca-

sas e obstáculos. Nesse sentido, os alinhamentos representados na Figura 28 são aproximados.

4 ESTUDO DE CASO DE POTENCIAL ZONA DE RISCO GEOLÓGICA

4.1 CONTEXTO

O estudo em questão está localizado na Ilha de Santa Catarina, especificamente no Morro da Penitenciária, comunidade sobre regularização no município de Florianópolis/SC. Conforme Santos *et al.* (2002), a ocupação da área teve início com a migração de algumas famílias do interior do estado para o local, motivada pela transferência de parentes para a penitenciária da capital. Devido às diversas questões sociais apontadas pela autora, a região apresenta inúmeras irregularidades decorrentes do assentamento precário, hoje ainda presente.

Após mais de 40 anos de ocupação irregular, encontra-se em andamento o processo de regularização fundiária (REURB) conduzido pelo município de Florianópolis, com o objetivo principal de mitigar os riscos associados à ocupação e promover melhorias, principalmente relacionados à infraestrutura e segurança geotécnica para a comunidade local.

4.1.1 Relevância do estudo

A Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012, que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDC), atribui aos municípios a responsabilidade de implementação de políticas de defesa civil, prevendo, entre outras obrigações, a elaboração e execução de projetos voltados à redução de riscos de desastres, incluindo, quando necessário, o reassentamento dos populares.

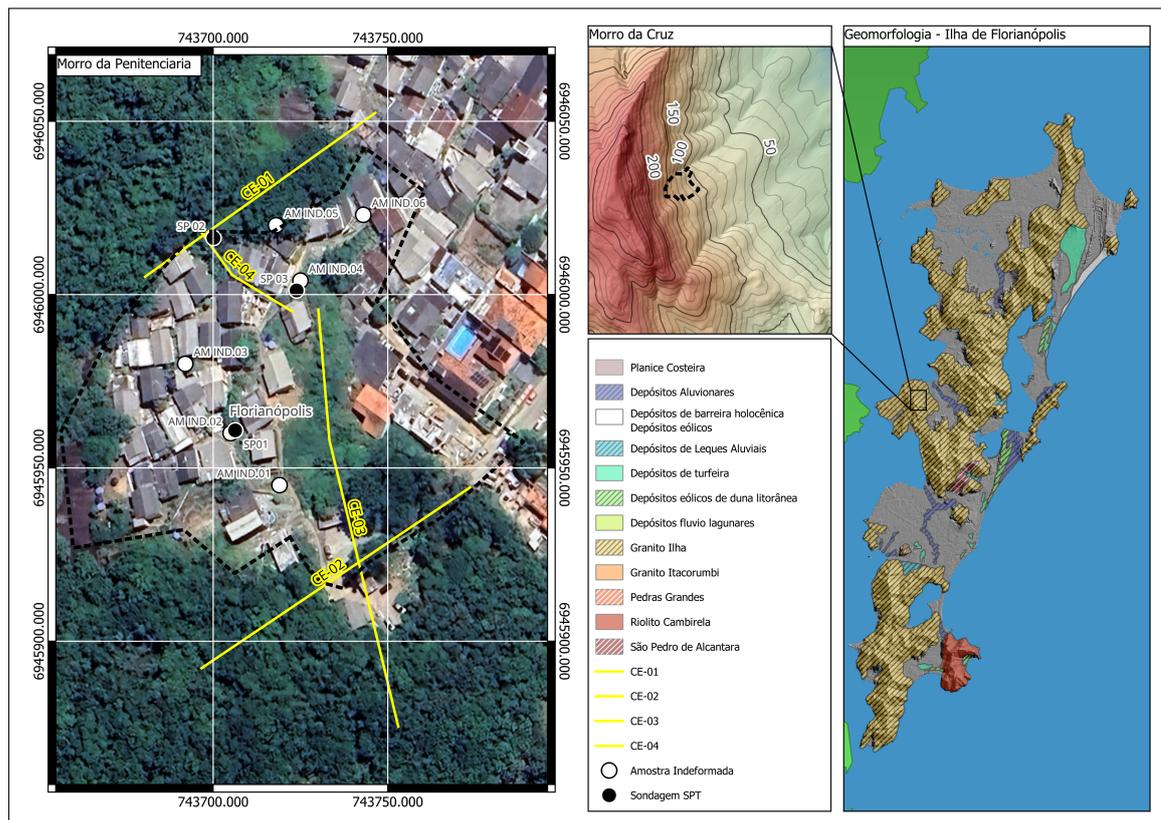
Carvalho e Galvão (2016) discute como a vulnerabilidade a desastres naturais, como deslizamentos de encostas, está profundamente relacionada a aspectos históricos e sociais do Brasil. O autor destaca que cidadãos já em situação de vulnerabilidade social, sem alternativas habitacionais, frequentemente ocupam assentamentos precários localizados em áreas de risco geológico e ambiental. O resultado é uma condição alarmante, no qual os elevados custos associados a obras de prevenção geotécnica, somados aos recursos limitados disponíveis para os municípios, dificultam uma gestão eficiente, abrangente e suficiente.

Esse cenário, traz consigo o desafio da viabilização econômica e logística das técnicas de investigação geotécnica, permitindo a avaliação preliminar dos locais de estudo antes mesmo do uso de técnicas convencionais de prospecção, como SPT, que frequentemente apresenta dificuldades de acesso em regiões de assentamentos precários. O uso de técnicas geofísicas, permite ao engenheiro responsável pelas intervenções, ser mais assertivo e econômico, buscando viabilizar o maior número de processos de REURB possíveis a longo prazo.

4.1.2 Descrição do local

O local de estudo está situado na ilha de Florianópolis/SC, mais precisamente no Morro da Cruz, na parte leste da ilha, na comunidade do Morro da Penitenciaría, com vista para o Bairro Trindade e acesso principal pela Rua José Francisco.

Figura 28 – Mapa de localização dos dados



Fonte: Autor (2024)

4.1.3 Características geológicas e ambientais

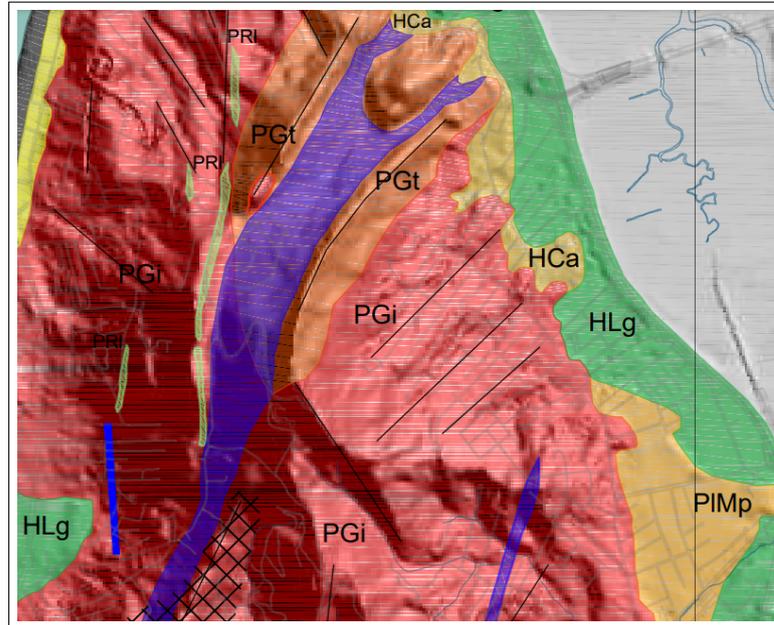
A Ilha de Santa Catarina é composta basicamente por dois domínios geomorfológicos principais: maciços rochosos e planícies costeiras. A Planície Costeira é formada por depósitos sedimentares quaternários inconsolidados.

O domínio dos Maciços Rochosos é composto pelas unidades litoestratigráficas (da mais antiga para a mais recente): Complexo Águas Mornas, Granito São Pedro de Alcântara - Granito Ilha, Suíte Plutono-Vulcânica Cambirela e Enxame de Diques Florianópolis, além de refusões graníticas e rochas miloníticas e cataclásticas (TOMAZZOLI; PELLERIN, 2023).

A área de interesse engloba as rochas do Granito Ilha, Suíte Pedras Grandes, litotipo mais comum na ilha com distribuição homogênea por toda a área de ocorrência. Os enclaves são pontuais e expressos em feições cataclásticas ou miloníticas, e

a composição do corpo oscila entre sienito e monzogranito, com idade datada de 600 a 585 Ma.

Figura 29 – Litotipo da Região



Fonte: Tomazzoli e Pellerin (2023)

O Mapa Geológico da área apresentado foi adaptado do Mapa Geológico da Ilha de Santa Catarina (TOMAZZOLI; PELLERIN, 2023).

Outra questão importante a ser destacada diz respeito à classificação de suscetibilidade à movimentos de massa apresentada na Figura 30.

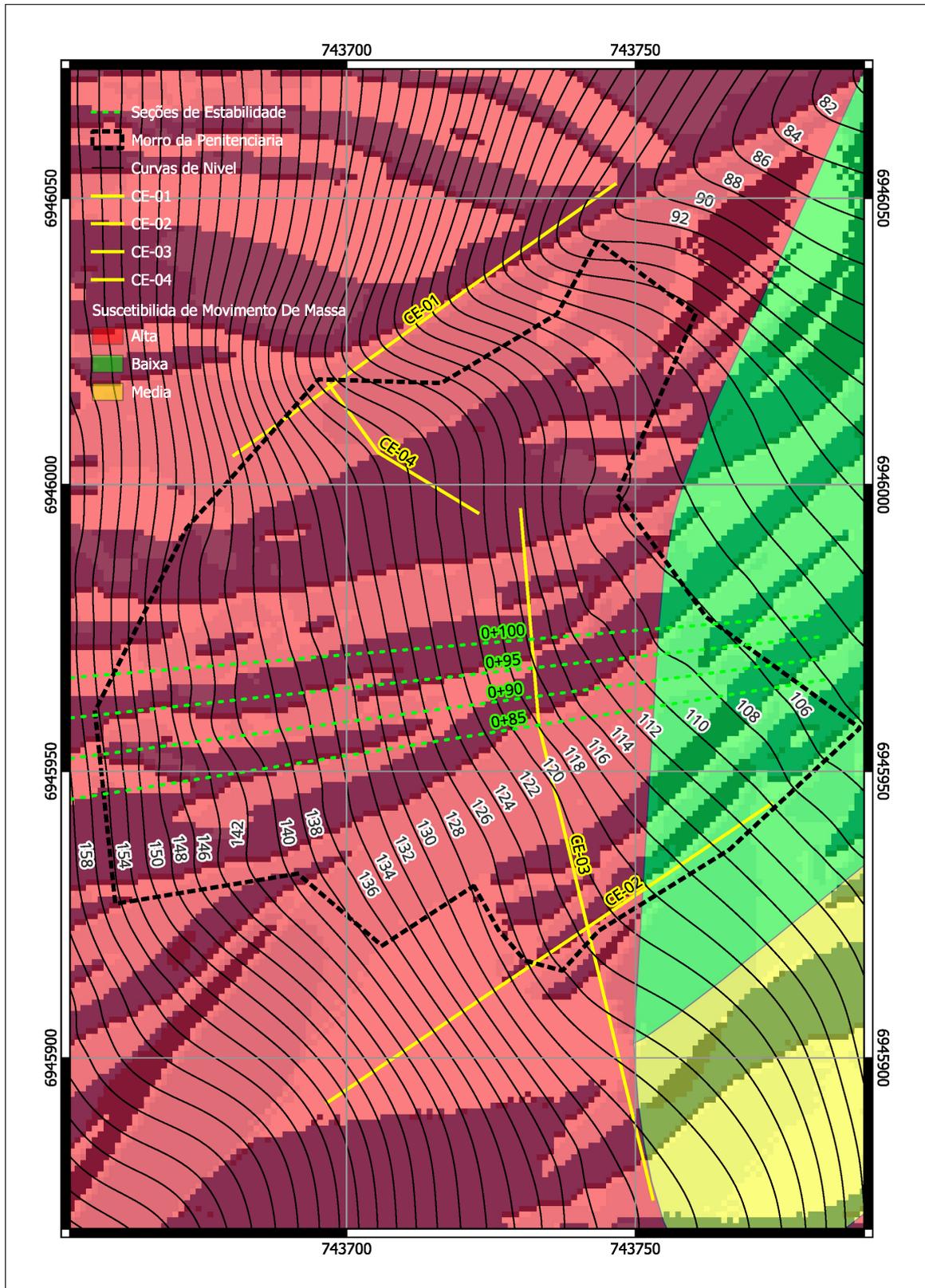
Segundo essa classificação, a maior parte da área de estudo encontra-se em região de alta suscetibilidade a movimentos de massa, o que é corroborado pela caracterização do setor de risco elaborada pela Prefeitura de Florianópolis, conforme Souza (2014) no relatório de revisão do Plano Municipal de Redução de Riscos, que define a região como:

- Tipologia do Uso e Ocupação do Solo: Área urbana.
- Padrão Construtivo: Baixo.
- Sistema de Drenagem Superficial: Inexistente.
- Ambiente Morfológico: Área montanhosa.
- Inclinação/Declividade: De 10° a 36°.
- Substrato Rochoso (Litologia):
 - Localizado na área de Suíte intrusiva Pedras Grandes Granito Florianópolis.
- Grau de Alteração do Solo/Rocha: Solo residual alterado e rocha sã.
- Famílias de Descontinuidades (Estruturas): Esfoliação da rocha.
- Depósitos de Cobertura: Não observados.

- Agentes Potencializadores:
 - Inclinação elevada da encosta.
 - Remoção da cobertura vegetal.
 - Existência de blocos rochosos ao longo da encosta.
 - Diferença de permeabilidade entre solo residual e o maciço rochoso.
 - Ocupação desordenada.
 - Baixo padrão construtivo.
 - Infraestrutura precária.

- Indicativos de Movimentação:
 - Histórico de ocorrência de movimentos de massa.
 - Cicatrizes de escorregamento.
 - Concentrações de fluxo superficial.

Figura 30 – Mapa de Suscetibilidade a Deslizamento



Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2015)

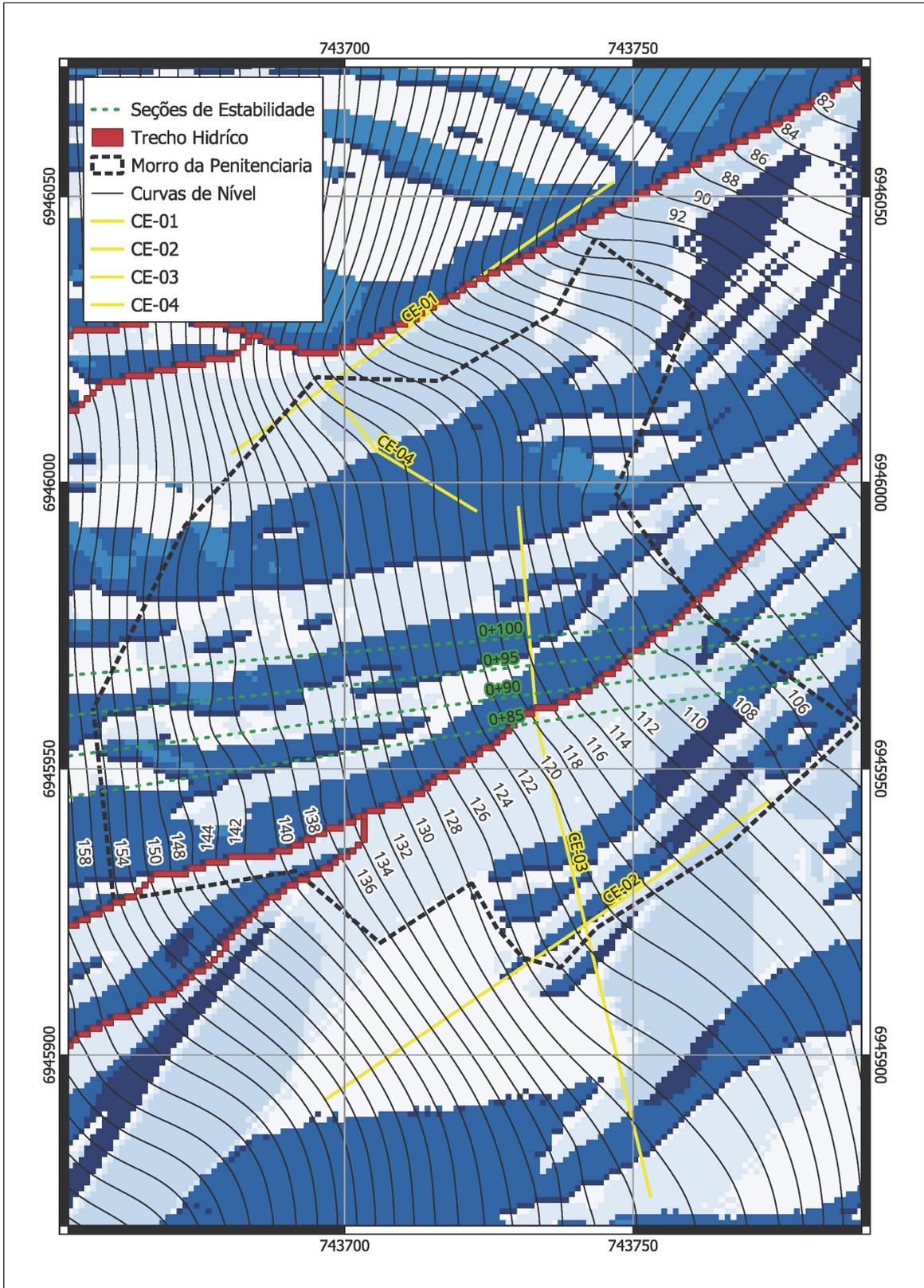
Outro aspecto ambiental relevante é a análise das direções de fluxo superficial, que possibilita a definição da melhor localização para dispositivos de drenagem

superficial nas áreas de interferência. Além disso, essas direções serviram como indicadores das áreas com maior velocidade de fluxo superficial e, por conseguinte, maior potencial de erosão, uma vez que esse é um condicionante que pode desconfinar blocos superficiais menores.

Utilizando dados de elevação aerofotogramétrica do terreno, publicados pelo Estado de Santa Catarina no portal SIGSC, com todos os dados georreferenciados no sistema de coordenadas métricas UTM, Datum SIRGAS 2000, na Zona 22 SM, com resolução espacial de 1 metro, foi possível, por meio de ferramentas de geoprocessamento, determinar as direções de fluxo superficial da região de forma precisa.

Além disso, a expectativa era de que os dados geofísicos pudessem confirmar a localização das áreas de infiltração, indicando as zonas mais sensíveis a movimentos de massas de solo nas áreas de encosta. Essas zonas foram identificadas nas seções geofísicas como as regiões com resistividade inferiores a $200 \Omega \cdot m$.

Figura 31 – Mapa de Fluxo Superficial



Fonte: Adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2015)

4.2 ORIGEM DOS DADOS

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos a partir de ensaios geotécnicos e geofísicos contratados pela empresa responsável pelo projeto de Regularização Fundiária Urbana (REURB) na localidade, os quais foram disponibilizados para os devidos estudos de caso aqui expostos.

Os dados incluem resultados de sondagens a percussão, ensaios laboratoriais para a determinação da densidade real das partículas do solo, limites de liquidez e plasticidade, análises granulométricas, além de levantamentos de resistividade elétrica realizados por meio de caminhamento elétrico utilizando o arranjo dipolo-dipolo. É relevante ressaltar que as investigações geotécnicas e as análises da condição do assentamento ainda estão em elaboração.

4.2.1 Sondagens SPT

A locação das sondagens e pontos de coletas de amostras indeformadas podem ser observadas na Figura 28, as coordenadas podem ser conferidas na Tabela 11:

Tabela 11 – Localização dos Pontos de Sondagem SPT

Sondagem	Leste	Norte
SP01	743701	6946005
SP02	743707	6945960
SP03	743727	6945978

O Boletim SP01 foi posicionado em área de interesse para avaliação de estabilidade, apresentando, de acordo com a classificação *insitu*, duas camadas: uma de argila marrom de consistência média e um silte argiloso amarelado pouco compacto. O ensaio foi paralisado ao identificar o impenetrável a 3,45 m de profundidade, sem atingir o nível da água. Conforme pode ser observado na tabela 12.

Tabela 12 – Boletim de Sondagem SP_{01}

Z(m)	N_{spt1}	N_{spt2}	Z_{camada} (m)	Descrição
0,00	-	-	0 - 0,10	Piso de concreto
1,00	6	7	0,10 - 2,80	Argila marrom de consistência média
2,00	7	8	2,80 - 3,45	Silte argiloso amarelado pouco compacto
3,00	7	9	3,45	Impenetrável
Nível d'Água (NA): Não atingiu o nível da água				

O Boletim SP02 apresentou, segundo a classificação *insitu*, a identificação de uma primeira camada de aterro com pedregulhos, seguida de duas camadas: uma de argila mole marrom e um silte arenoso amarelado pouco compacto. O ensaio foi

paralisado ao identificar o impenetrável a 4,00 m de profundidade, sem atingir o nível da água. Conforme pode ser observado na tabela 13.

Tabela 13 – Boletim de Sondagem SP_{02}

Z(m)	N_{spt1}	N_{spt2}	Z_{camada} (m)	Descrição
0,10	-	-	0 - 0,1	Camada Vegetal
1,00	4	4	0,10 - 0,50	Aterro com pedregulhos
2,00	4	4	0,50 - 2,66	Argila mole marrom
3,00	7	9	2,66 - 4,00	Silte arenoso, amarelado, pouco compacto
4,00	-	-	4,00	Impenetrável
Nível d'Água (NA): Não atingiu o nível da água				

O Boletim SP03 apresentou, segundo a classificação *insitu*, a identificação de uma primeira camada de aterro com entulho, seguida de duas camadas: uma de argila marrom de consistência média e um silte arenoso amarelado pouco compacto. O ensaio foi paralisado ao identificar o impenetrável a 4,50 m de profundidade, sem atingir o nível da água. Conforme pode ser observado na tabela 14.

Tabela 14 – Boletim de Sondagem SP_{03}

Z(m)	N_{spt1}	N_{spt2}	Z_{camada} (m)	Descrição
0,10	-	-	0,00 - 0,30	Aterro com entulho
1,00	4	5	0,30 - 3,90	Argila marrom de consistência média
2,00	5	6	3,90 - 4,50	Silte arenoso, amarelado, pouco compacto
3,00	6	6	4,50	impenetrável
4,00	9	11	-	-
Nível d'Água (NA): Não atingiu o nível da água				

4.2.2 Ensaios de laboratório

Foram realizados uma série de ensaios de laboratório, localizados nos pontos indicados na Figura 11. Os ensaios tiveram como objetivo determinar a densidade real dos grãos, limites de consistência, granulometria e ensaios de cisalhamento direto.

As amostras foram extraídas superficialmente e, no geral, apresentaram diferença significativa de classificação em relação ao campo. As classificações SPT, em sua maioria, indicaram solos superficiais classificados como argilas marrons, pouco compactas.

No entanto, os resultados apresentados nos ensaios de granulometria mostraram classificação com predomínio de pedregulhos, areias e siltes, embora com considerável presença de argila, entre 16% e 33%, conforme pode ser observado na 17.

Além disso, as parcelas de argila presentes no solo apresentaram, no geral, alta plasticidade, conforme pode ser observado na Tabela 16, porém, não dominaram

o comportamento coesivo do solo como um todo, que, no geral, apresentou coesões nulas na maioria das amostras, conforme pode ser observado na Tabela 24.

4.2.2.1 Densidade real dos grãos

Tabela 15 – Resultados dos ensaios de picnômetro

Amostra	G
01	2,689
02	2,625
03	2,647
04	2,682
05	2,688
06	2,657

Fonte: Relatório Interno nº 52/2023

4.2.2.2 Limites de consistência

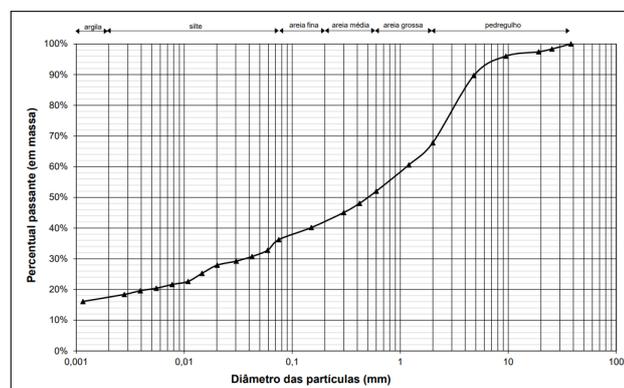
Tabela 16 – LL, LP e IP

Amostra	LL	LP	IP	Plasticidade
01	42,1	24,9	17,3	Alta
02	43,3	27,1	16,2	Alta
03	53,8	24,2	29,5	Alta
04	42,9	29,2	13,8	Média
05	51,8	32,9	18,9	Alta
06	39,3	22,7	16,6	Alta

Fonte: Relatório Interno nº 52/2023

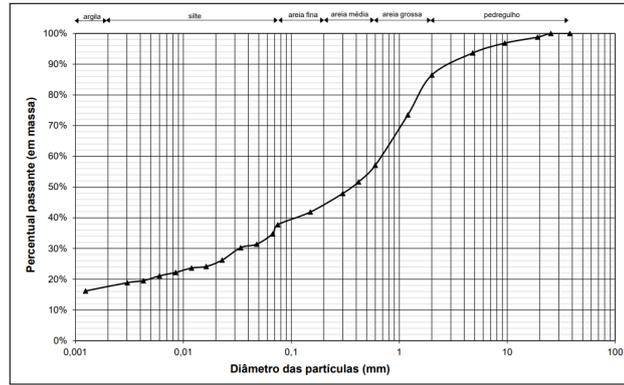
4.2.2.3 Granulometria

Figura 32 – Granulometria - Amostra 01



Fonte: Relatório Interno nº 52/2023

Figura 33 – Granulometria - Amostra 02



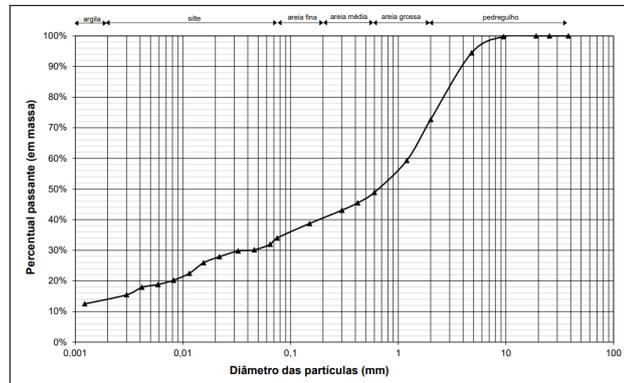
Fonte: Relatório Interno nº 52/2023

Figura 34 – Granulometria - Amostra 03



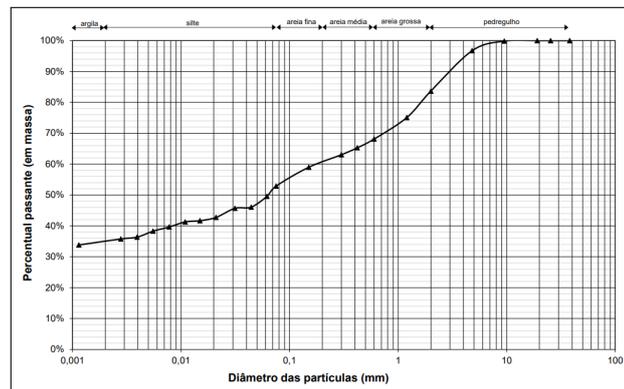
Fonte: Relatório Interno nº 52/2023

Figura 35 – Granulometria - Amostra 04



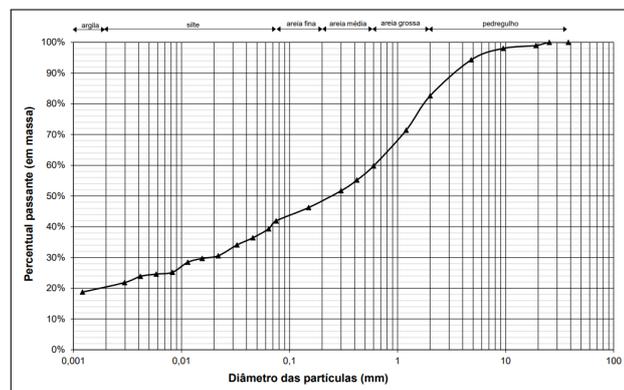
Fonte: Relatório Interno nº 52/2023

Figura 36 – Granulometria - Amostra 05



Fonte: Relatório Interno nº 52/2023

Figura 37 – Granulometria - Amostra 06



Fonte: Relatório Interno nº 52/2023

Tabela 17 – Resumo das frações granulométricas das amostras ensaiadas

Fração	01	02	03	04	05	06
Pedregulho	32,19%	13,54%	12,97%	27,29%	16,35%	17,38%
Areia Grossa	15,78%	29,36%	15,50%	23,81%	15,54%	22,80%
Areia Média	11,87%	15,25%	11,52%	10,16%	9,13%	13,57%
Areia Fina	7,40%	7,11%	9,78%	6,80%	9,41%	6,90%
Silte	16,67%	18,58%	21,06%	19,44%	15,74%	20,58%
Argila	16,09%	16,16%	29,17%	12,51%	33,83%	18,75%

Fonte: Relatório Interno nº 52/2023

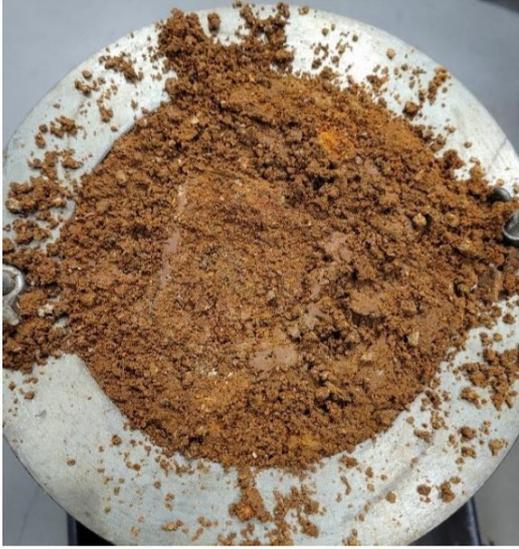
4.2.2.4 Ensaios de cisalhamento direto

Todos os ensaios de cisalhamento direto foram realizados pelo Laboratório de Mecânica dos Solos do Centro Tecnológico de Joinville, que descrevem as amostras como:

- Amostra 01: Solo areno-siltoso, de densidade baixa e coloração variando de laranja a marrom. Apresenta estrutura relativamente homogênea, aparentando ser um solo de aterro pouco compactado.
- Amostra 02: Solo areno-siltoso com presença de entulho e outros resíduos, com coloração marrom a laranja. Possui baixa densidade e corresponde a um material de aterro pouco compactado.
- Amostra 03: Solo areno-siltoso com presença de entulho e outros resíduos, com coloração marrom. Apresenta baixa densidade, caracterizando-se como um material de aterro pouco compactado.
- Amostra 04: Solo areno-siltoso, com densidade muito baixa e coloração marrom clara. Apresenta estrutura heterogênea, aparentando ser um material oriundo de aterro pouco compactado.
- Amostra 05: Solo areno-siltoso, residual de granito, com densidade baixa e coloração variando de marrom claro a laranja. Apresenta estrutura homogênea e ausência de feições relictuais aparentes.
- Amostra 06: Solo areno-siltoso com presença de entulho e outros resíduos, com coloração marrom. Possui textura e densidade heterogêneas, sendo classificado como um material de aterro pouco compactado.

O aspecto das amostras pode ser observado na Figura 38.

Figura 38 – Aspecto das Amostras



Amostra 01



Amostra 02



Amostra 03



Amostra 04



Amostra 05



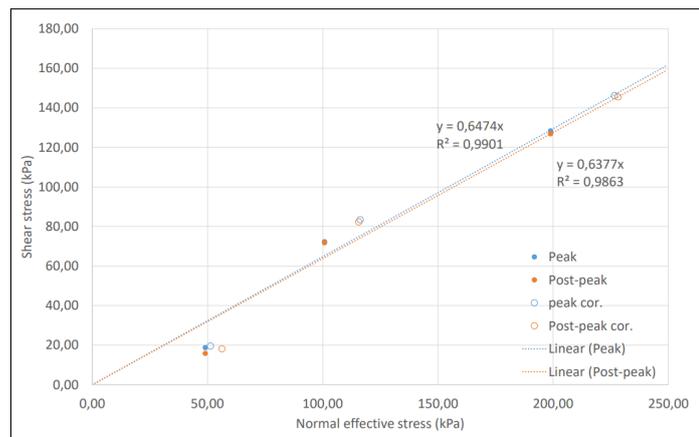
Amostra 06

Tabela 18 – Índices físicos dos corpos de prova da amostra 01

Tensão	w (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e*	Sr* (%)
50 kPa	22,4	17,36	14,19	0,83	71,4
100 kPa	21,4	17,07	14,07	0,85	66,8
200 kPa	21,8	15,87	13,03	0,99	58,0

Fonte: Relatório Interno nº 30/2023

Figura 39 – Envoltória de Resistência - Amostra 01



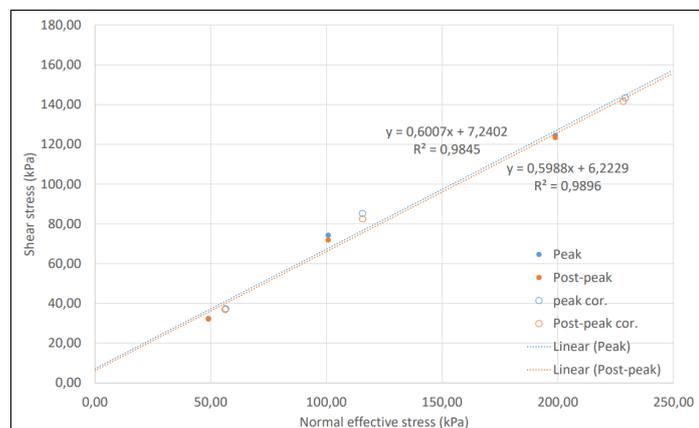
Fonte: Relatório Interno nº 30/2023

Tabela 19 – Índices físicos dos corpos de prova da amostra 02

Tensão	w (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e*	Sr (%)
1 (50 kPa)	21,1	14,83	12,25	1,12	49,8
2 (100 kPa)	20,9	14,42	11,92	1,18	47,0
3 (200 kPa)	21,3	13,74	11,33	1,29	43,6

Fonte: Relatório Interno nº 30/2023

Figura 40 – Envoltória de Resistência - Amostra 02



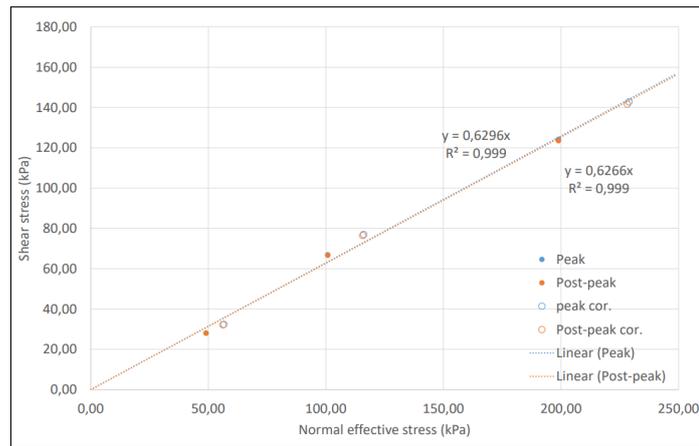
Fonte: Relatório Interno nº 30/2023

Tabela 20 – Índices físicos dos corpos de prova da amostra 03

Tensão	w (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e*	S_r (%)
1 (50 kPa)	16,8	16,00	13,70	0,90	49,5
2 (100 kPa)	21,6	17,71	14,57	0,78	73,0
3 (200 kPa)	21,2	17,20	14,19	0,83	67,6

Fonte: Relatório Interno nº 30/2023

Figura 41 – Envoltória de Resistência - Amostra 03



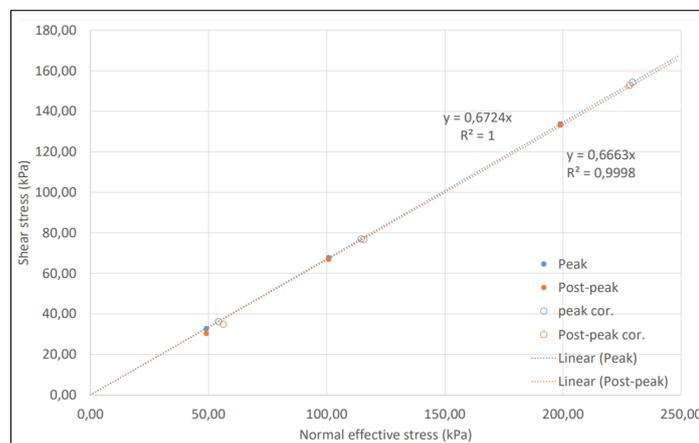
Fonte: Relatório Interno nº 30/2023

Tabela 21 – Índices físicos dos corpos de prova da amostra 04

Tensão	w (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e	S_r (%)
1 (50 kPa)	16,9	17,75	15,19	0,71	62,9
2 (100 kPa)	15,6	17,69	15,30	0,70	59,3
3 (200 kPa)	17,7	17,68	15,03	0,73	64,2

Fonte: Relatório Interno nº 30/2023

Figura 42 – Envoltória de Resistência - Amostra 04



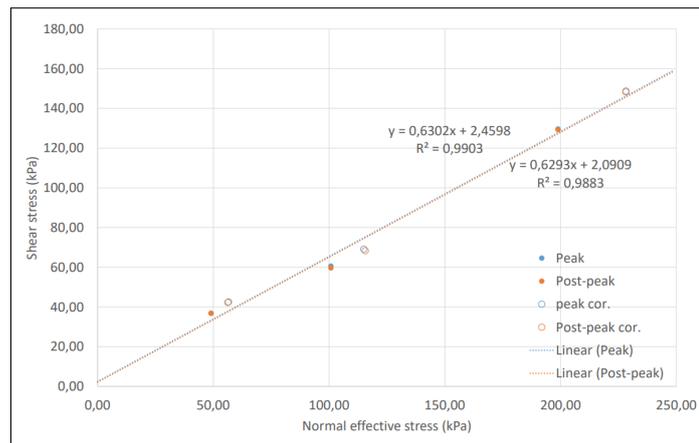
Fonte: Relatório Interno nº 30/2023

Tabela 22 – Índices físicos dos corpos de prova da amostra 05

Tensão	w (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e	S_r (%)
1 (50 kPa)	16,9	24,5	17,38	13,96	0,86
2 (100 kPa)	15,6	22,4	17,19	14,05	0,85
3 (200 kPa)	17,7	22,4	16,64	13,59	0,91

Fonte: Relatório Interno nº 30/2023

Figura 43 – Envoltória de Resistência - Amostra 05



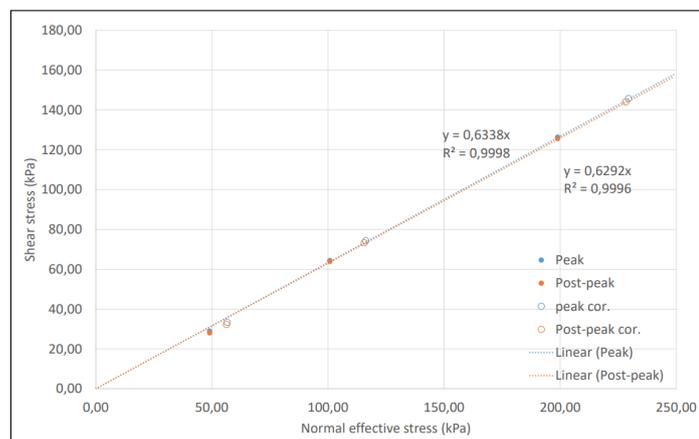
Fonte: Relatório Interno nº 30/2023

Tabela 23 – Índices físicos dos corpos de prova da amostra 06

Tensão	w (%)	γ_{nat} (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e	S_r (%)
1 (50 kPa)	24,7	17,19	13,79	0,89	73,8
2 (100 kPa)	26,0	15,91	12,63	1,06	65,1
3 (200 kPa)	24,6	16,29	13,07	0,99	66,0

Fonte: Relatório Interno nº 30/2023

Figura 44 – Envoltória de Resistência - Amostra 06



Fonte: Relatório Interno nº 30/2023

Tabela 24 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento para as amostras de solo

Amostra	Condição	Intercepto coesivo (c')	Ângulo de atrito (ϕ)
01	Pico	0,00 kPa	32,9°
01	Pós pico	0,00 kPa	32,5°
02	Pico	7,24 kPa	31,0°
02	Pós pico	6,22 kPa	30,9°
03	Pico	0,00 kPa	32,1°
03	Pós pico	0,00 kPa	32,1°
04	Pico	0,00 kPa	33,9°
04	Pós pico	0,00 kPa	33,7°
05	Pico	2,46 kPa	32,2°
05	Pós pico	2,10 kPa	32,2°
06	Pico	0,00 kPa	32,4°
06	Pós pico	0,00 kPa	32,2°

Fonte: Relatório Interno nº 30/2023

4.2.3 Sondagens geofísicas

No contexto do estudo, a contratação dos ensaios geofísicos foi impulsionada principalmente pelas dificuldades de acesso ao local e pelos custos elevados associados às sondagens mistas, que ainda estão sendo avaliadas quanto à viabilidade econômica e logística junto a prefeitura.

Adicionalmente, relatos de moradores e do município sobre desprendimentos de pequenos blocos de rocha guiaram a decisão de uso da geofísica para compreender a geometria dos maciços rochosos nas zonas com mais blocos aflorantes que poderiam não estar assentados sobre rocha sã, aumentando o risco de deslizamentos e deslocamentos.

A hipótese inicial para o desprendimento dos blocos menores (de 15 a 30 cm) relatados considerava que esses desprendimentos poderiam ser causados por processos de erosão do solo que reveste os blocos superficiais devido ao fluxo de água.

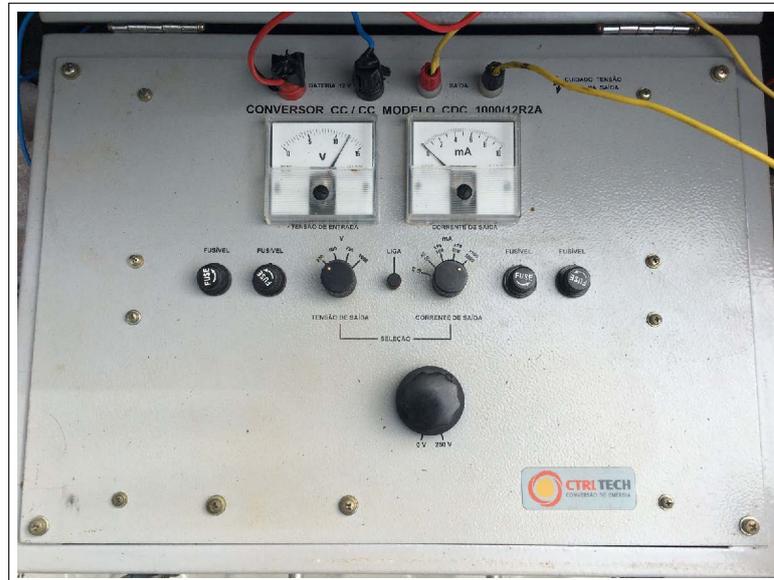
Segundo reportado em relatórios de campo, após a abertura de picadas para facilitar o acesso às linhas de aquisição. Utilizou-se a técnica do caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo, realizando 4 perfis geofísicos com espaçamentos de 5 m (CE-01, CE-02, CE-03) e 2,5 m (CE-04), variando a profundidade de investigação conforme o comprimento das linhas.

Os instrumentos usados incluíram o sistema transmissor de corrente, um multímetro e cabos condutores de 1,5 mm, associados a eletrodos polarizáveis e água salgada para reduzir a resistência de contato.

Apesar de chuvas fortes durante o levantamento do perfil CE-04, o tempo predominante foi ensolarado durante o levantamento dos outros perfis, e as condições

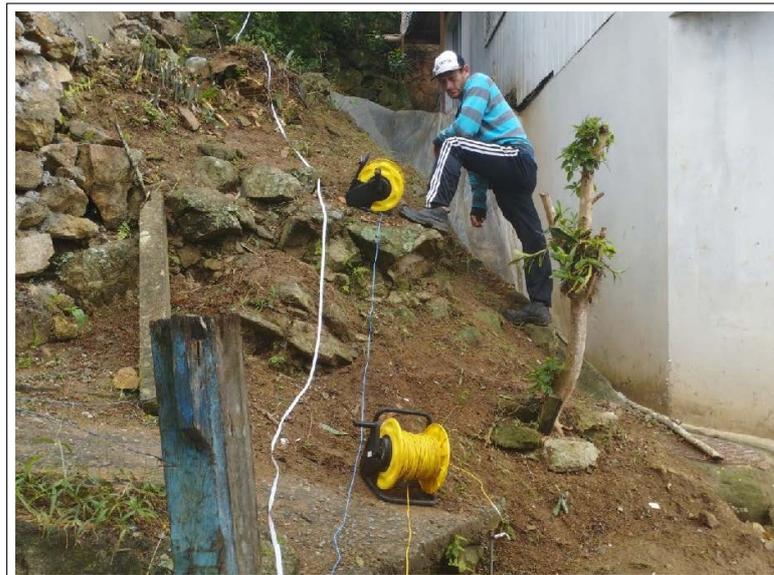
meteorológicas não paralisaram a continuidade do trabalho. Os dados adquiridos foram registrados em formato digital (DAT), contendo valores de corrente, potencial espontâneo e voltagem primária. Esses dados permitiram calcular a resistividade elétrica aparente, fundamental para a análise geofísica.

Figura 45 – Transmissor de corrente Tectrol, utilizado para a aquisição dos dados



Fonte: Relatório de levantamento geofísico

Figura 46 – Levantamento do alinhamento CE-04 com blocos de rocha superficiais visíveis



Fonte: Relatório de campo

Figura 47 – Registro fotográfico durante campanha de aquisição de dados



Fonte: Relatório de campo

Para classificação das camadas geológicas, foi utilizado a Tabela 25.

Tabela 25 – Classificação do solo com base na resistividade elétrica

Resistividade ($\Omega \cdot m$)	Descrição
19 a 50	Solo saturado. Água fresca com possível presença de contaminantes.
50 a 200	Solo úmido.
200 a 500	Solo seco com presença de pequenos blocos de rocha. A faixa pode abranger falhamentos.
500 a 2.000	Blocos soltos maiores. Saprólito; rocha muito alterada. A faixa abrange falhamentos.
2.000 a 5.000	Granito (rocha) pouco alterada e com possível presença de pequenas fraturas.
>5.000	Granito preservado (rocha fresca), embasamento cristalino.

Fonte: Relatório de geofísica - adaptado de Telford et al.(1990):

4.2.3.1 Caminhamento Elétrico 01

O Perfil CE-01 (Figura 48), localizado conforme indicado na Figura 28, foi executado na área considerada mais crítica, com base em relatos de deslizamentos dos blocos. A análise respalda esse cenário, evidenciando materiais menos resistivos, associados à presença de água, no topo da encosta íngreme.

Outro aspecto a ser observado é a proximidade entre a zona com menor resistividade, de 20 a 200 $\Omega \cdot m$, compatível com presença de água e solo úmido, com o curso hídrico observado na análise de fluxo exposto na Figura 31, cruzando o perfil avaliado.

Na mesma seção é possível também observar a presença de blocos maciços, com resistividades superiores a 5000 $\Omega \cdot m$ com grandes dimensões, em maiores profundidades (aproximadamente 2 m), confinados por material sólido desagregado alterado de resistividade média entre 500 a 5000 $\Omega \cdot m$.

Na superfície constata-se resistividades compatíveis com solo com presença de blocos soltos, com faixa entre 200 a 500 $\Omega \cdot m$, o que faz sentido com o observado em campo, conforme a Figura 46.

4.2.3.2 Caminhamento Elétrico 02

O perfil CE-02 (Figura 49) foi realizado na área de acesso à comunidade. Nos trechos anteriores à estaca 0+65, a seção revelou uma camada superficial de solo contendo blocos soltos e água, com espessura variável.

O embasamento foi identificado a aproximadamente 3 a 5 metros de profundidade, apresentando baixa resistividade, o que pode ser associado à presença de água. Contudo, essa característica não foi observada no perfil CE-03 na região onde ambos os perfis se interceptam (estaca 0+40), diferentemente do que era esperado.

Abaixo dessa camada, foi identificada uma zona de transição contínua, caracterizada por material alterado gradativamente passando para rocha sã. Nos trechos inclinados posteriores à estaca 0+65, não foram identificados blocos maciços soltos na porção mais inclinada do alinhamento. A área apresentou homogeneidade e alta resistividade, características compatíveis com rochas sãs.

Entre dois corpos altamente resistivos, associados a rochas com características graníticas, foi observada uma descontinuidade geológica com largura estimada de 5 a 8 metros. Essa descontinuidade foi interpretada como um possível falhamento, preenchido por material menos resistente.

4.2.3.3 Caminhamento Elétrico 03

O perfil CE-03 (Figura 50), foi executado perpendicularmente ao segmento CE-02, acompanhando paralelamente o trecho de encosta na parte intermediária da

comunidade, a seção CE-03 apresentou seus afloramentos rochosos de forma condizente com o observado em campo nas estaca 40 e 60.

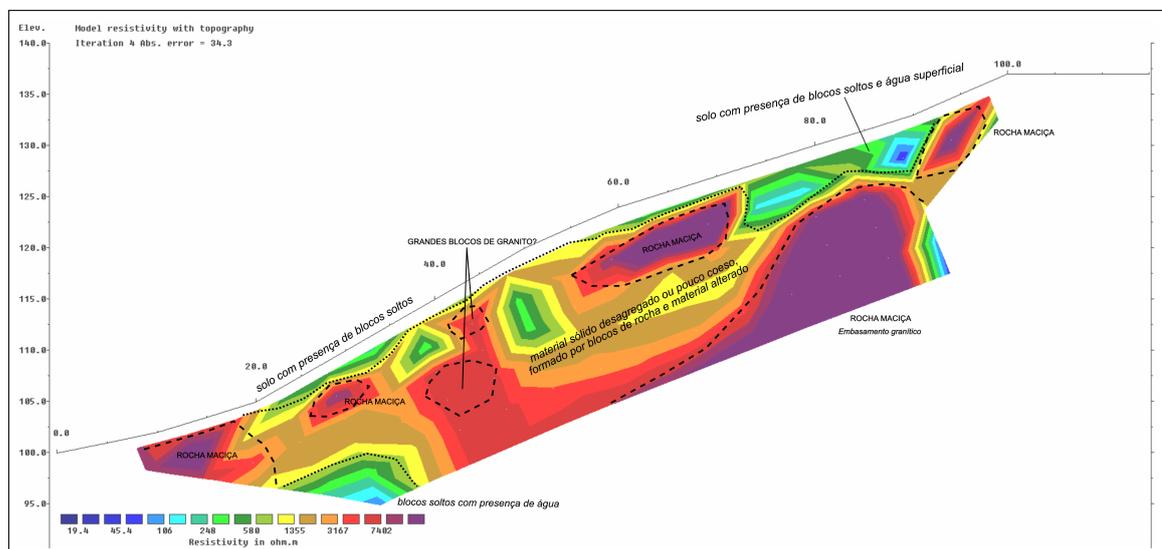
No trecho entre as estacas 50 e 80, pode-se observar solo úmido com blocos soltos, a possível presença de água, que pode estar associada, assim como no perfil CE-01, ao caminho do escoamento superficial representado na Figura 31 que passam perpendicularmente ao perfil, e percola a região com embasamento rochoso mais baixo.

4.2.3.4 Caminhamento Elétrico 04

O perfil CE-04 (Figura 51) foi executado perpendicularmente ao segmento CE-01. De acordo com o relatório técnico, essa seção foi realizada após chuvas intensas, o que pode levantar dúvidas quanto à confiabilidade dos resultados, já que apresentou resistividade média inferior à observada nos demais perfis.

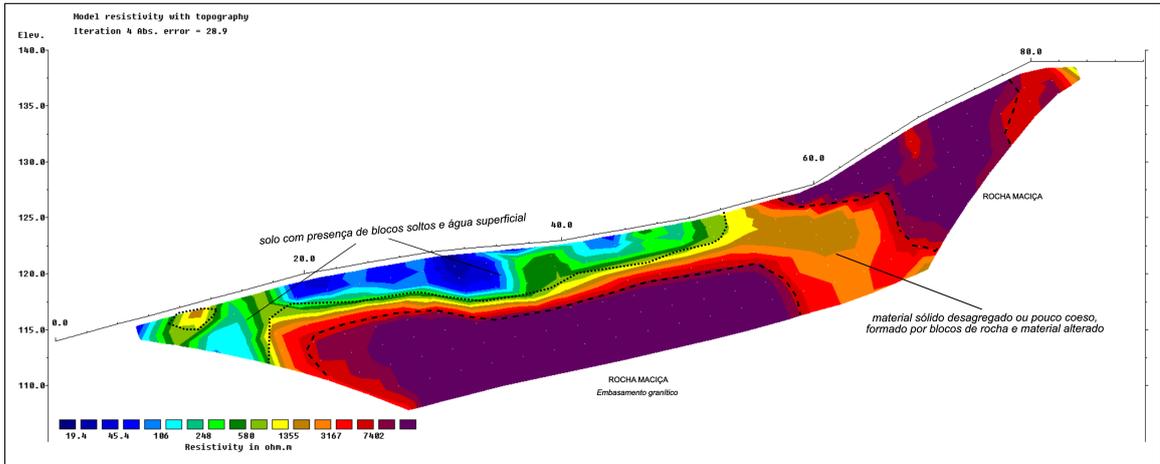
No entanto, conforme esperado, na estaca 0+30, onde intercepta o perfil CE-01, as resistividades foram compatíveis com o bloco de rocha maciço identificado na estaca 0+60 do CE-01. De forma geral, o perfil revelou predominantemente solo e blocos de rocha soltos. Abaixo dessa camada, foi identificada uma zona mais úmida, sem, contudo, atingir o embasamento.

Figura 48 – Caminhamento Elétrico 01



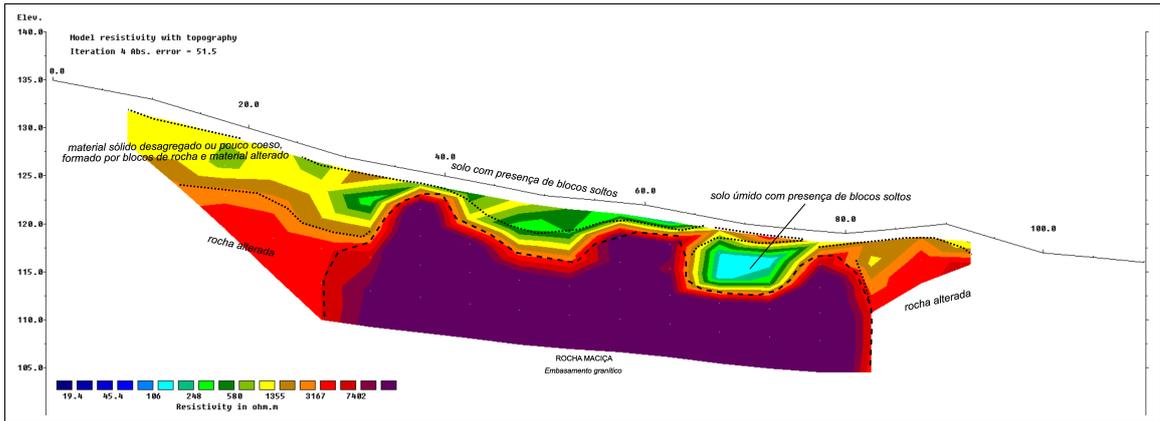
Fonte: Relatório de levantamento geofísico

Figura 49 – Caminhamento Elétrico 02



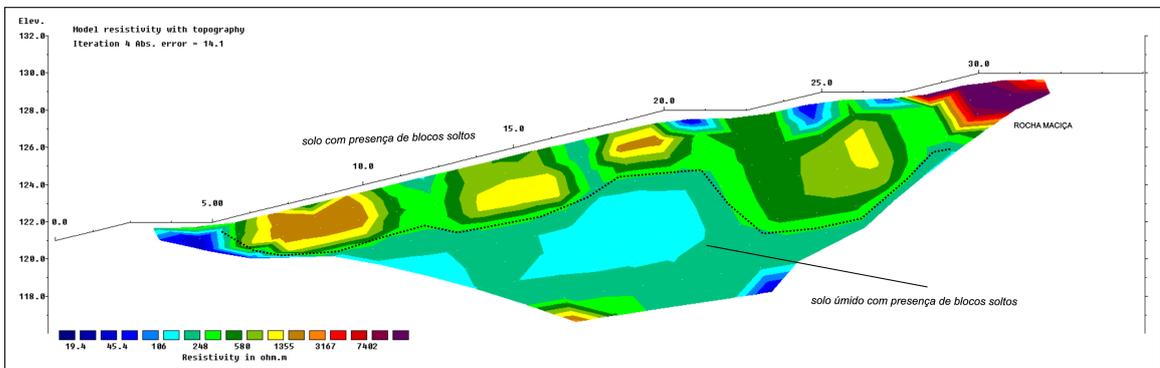
Fonte: Relatório de levantamento geofísico

Figura 50 – Caminhamento Elétrico 03



Fonte: Relatório de levantamento geofísico

Figura 51 – Caminhamento Elétrico 04



Fonte: Relatório de levantamento geofísico

4.3 APLICABILIDADE

Durante todo o período de elaboração do projeto, sem dúvidas, o acesso foi o maior dos desafios, por se tratar de um assentamento precário, em zona com alta declividade, chegando a 65% em algumas regiões, o acesso a equipamentos, equipes de sondagem e até mesmo visitas técnicas foram muito prejudicadas, além disso, a superfície do terreno em sua maior parte estava obstruída por calçamentos de concreto, entulhos, resíduos de construção, lixo e etc. Dessa forma é possível destacar de imediato o dinamismo da metodologia, que pode ser empregada em condições de terreno muito desfavoráveis.

4.3.1 Geometria dos elementos rochosos

A geometria dos blocos rochosos de maiores dimensões apresentaram boa resolução, principalmente relacionados a seção considerada crítica CE-01, que permitiu ver com clareza a disposição e forma dos principais blocos em estado não alterado, além disso, demonstrou bons resultados na identificação das zonas de transição de rocha alterada/sã. Além disso, o ensaio foi crucial para orientar as primeiras soluções de mitigação, barreira de proteção dinâmica a jusante do alinhamento CE-01. A geofísica também desempenhou papel na identificação do possível melhor ponto de ancoragem da tela, que será verificado em campo.

4.3.2 Zonas com presença de água

Apesar de as zonas com presença de água estarem próximas aos trechos hídricos, não é possível estabelecer uma relação clara entre o escoamento superficial e as zonas de baixa resistividade (20 a $200 \Omega \cdot m$) de forma a orientar os melhores pontos de implantação de soluções de drenagem profunda.

4.3.3 Análise de estabilidade

Com a seção crítica CE-01, é possível fazer uma análise, tanto da estabilidade da camada de solo superficial, quanto dos blocos confinados. Considerando os parâmetros do ensaio de cisalhamento relacionados a amostra 02 (Tabela 19), sendo essa a mais próxima a seção de estudo, os parâmetros de resistência apontados por Rocha *et al.* (1976) foram utilizados, para os materiais de rocha alterada e sã, conforme demonstrado na tabela 26.

Figura 52 – Parâmetros de Resistência de Rochas Aproximados

Tipo de rocha	Módulo de deformabilidade E (10 ⁹ kg/cm ²)	Resistência ao corte		Resistência à compressão uniaxial σ_c (kg/cm ²)
		Coesão c (kg/cm ²)	Âng. de atrito ϕ (°)	
Argilitos e siltitos				
resistência baixa	4 - 30	5 - 30	30 - 35	20 - 120
média	30 - 80	30 - 60	35 - 40	120 - 250
elevada	80 - 300	60 - 120	40 - 55	250 - 800
Grés e conglomer.				
resistência baixa	5 - 40	5 - 30	30 - 40	20 - 120
média	40 - 100	30 - 80	40 - 50	120 - 400
elevada	100 - 600	80 - 160	50 - 65	400 - 1500
Calcários				
argilosos	5 - 50	5 - 40	30 - 40	20 - 200
margosos	10 - 100	10 - 60	30 - 40	40 - 300
puros	200 - 1000	100 - 400	40 - 50	400 - 2500
Quartzitos	200 - 1000	150 - 300	45 - 65	700 - 3000
Granitos e gnaisses				
decompostos	4 - 30	4 - 20	35 - 45	15 - 100
alterados	30 - 200	20 - 100	45 - 55	100 - 700
sãos	200 - 1000	100 - 250	55 - 65	700 - 2500
Xistos*				
decompostos	4 - 20	4 - 20	30 - 35	15 - 80
alterados	20 - 150	20 - 100	35 - 40	80 - 400
sãos	150 - 800	100 - 200	40 - 65	400 - 2000

Fonte: (ROCHA *et al.*, 1976)

Tabela 26 – Parâmetros do Modelo

Material	γ (kN/m ³)	c'(kPa)	Ângulo de atrito (ϕ)
Solo Superficial	17,00	2,54	32,20
Blocos de Rocha Graníticas alteradas	26,00	2000	45,00
Blocos de Rocha Graníticas Sã	28,00	100000	55,00

Fonte: Autor(2024)

Para análise de estabilidade, foi utilizado o software GeoStudio, desenvolvido pela Geo-Slope, o mesmo oferece ferramentas para simulações geotécnicas amplamente utilizadas. O objetivo principal é analisar a superfície de ruptura crítica do perfil, além de avaliar a estabilidade das superfícies que poderiam provocar o desprendimento dos blocos observados na seção de resistividade 01.

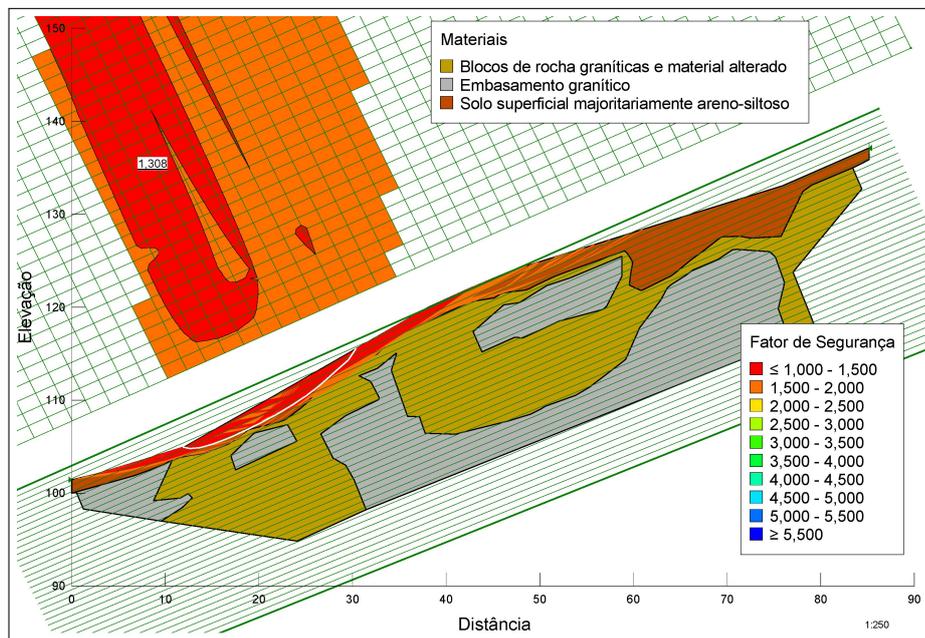
4.3.3.1 Estabilidade geral (CE-01)

Como observado no Capítulo 4.2.1, não foi identificado o nível freático em nenhuma das sondagens SPT, o que era esperado devido à localização em terreno elevado, com declividades acentuadas e presença de solo areno-siltoso.

Portanto, foi adotada a análise drenada para o perfil, utilizando o método de Morgenstern-Price, com o sistema de pesquisa de superfície por grades e raios. Nesse sistema, o usuário define a localização e geometria de uma grade de pontos que representam os centros das superfícies circulares de pesquisa, além disso, também é necessário determinar a grade de raios, que determina os limites até onde se estenderão as superfícies. O resultado é uma análise amostral dos fatores de segurança ao longo de diversas possíveis superfícies de ruptura.

Para essa primeira análise, as grades foram determinadas de forma a passarem por todo o perfil. Os resultados para essa análise demonstram um fatores de segurança críticos na parte inferior da encosta, com valores perfazendo 1,30 a 1,35, se concentrando ao longo do solo superficial.

Figura 53 – Distribuição dos Grids e Raios



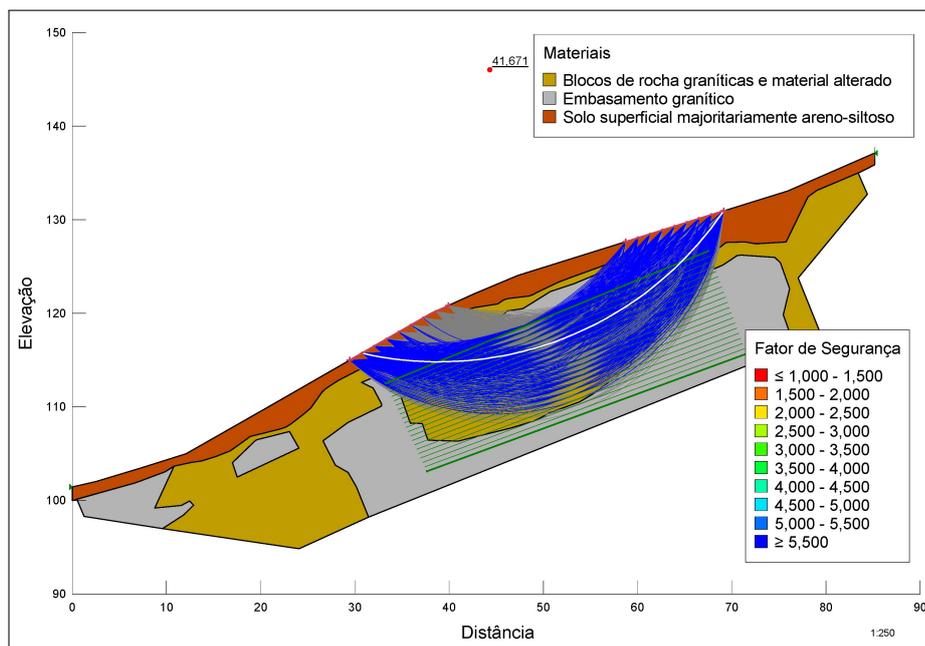
Fonte: Autor (2024)

4.3.3.2 Estabilidade dos blocos (CE-01)

A análise geral, por si só, já indica a estabilidade dos blocos. No entanto, esta segunda análise tem como objetivo avaliar de forma mais detalhada as superfícies que poderiam mobilizar os blocos em uma eventual ruptura profunda do material alterado de granito que os confina.

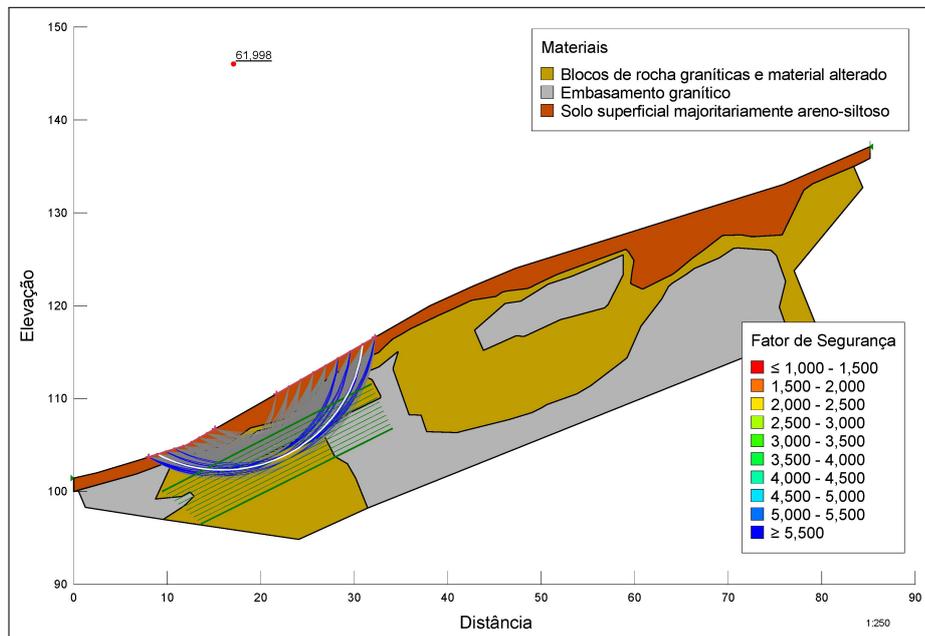
Para isso, foi novamente utilizado o método de Morgenstern-Price, com uma modificação no sistema de pesquisa, que agora considera as linhas de entrada e saída, além de definir a grade de raios que delimita essas superfícies de ruptura. O resultado indicou fatores de segurança muito elevados. Para o bloco 01, localizado na parte superior da encosta, o menor fator de segurança foi de 41,67. Para o bloco 02, localizado na porção inferior, a superfície mais crítica tangenciou a parte superior do bloco, apresentando um fator de segurança (FS) de 61,99.

Figura 54 – Estabilidade do Bloco 01



Fonte: Autor (2024)

Figura 55 – Estabilidade do Bloco 02



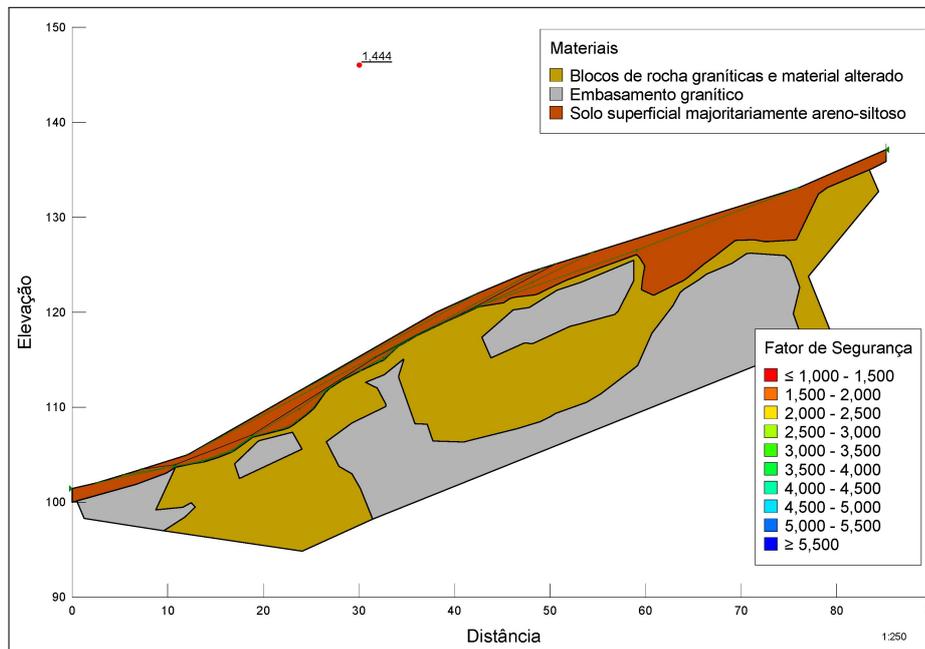
Fonte: Autor (2024)

4.3.3.3 Estabilidade Translacional (CE-01)

Considerando que as camadas abaixo da camada superficial de solo, predominantemente areno-siltosa, possuem parâmetros de resistência muito superiores, existe a possibilidade de ocorrência de ruptura translacional.

Para avaliar essa condição, foram analisadas diversas superfícies aproximadamente lineares, paralelas à interface solo/rocha, com o objetivo de verificar a estabilidade em relação à ruptura translacional. O resultado dessa análise pode ser observado na Figura 56, onde o fator de segurança encontrado foi 1,44.

Figura 56 – Estabilidade Translacional CE-01



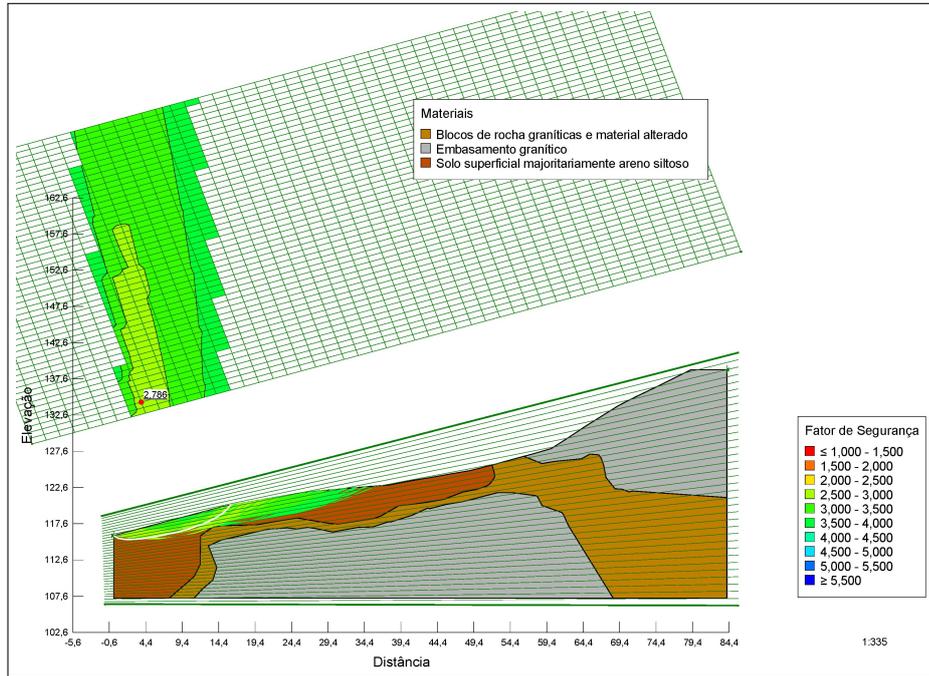
Fonte: Autor (2024)

4.3.3.4 Estabilidade geral (CE 02, 03 E 04)

Para os perfis considerados não críticos, principalmente devido a menores declividades, foram realizadas análises também pelo método de Morgenstern-Price com o sistema de pesquisa de superfície por grades e raios, revelando fatores de segurança superiores a 2,79 para todo perfil CE-02, para o CE-03 foram superiores a 3,02, semelhantemente o perfil CE-04 apresentou fatores superiores a 2,86.

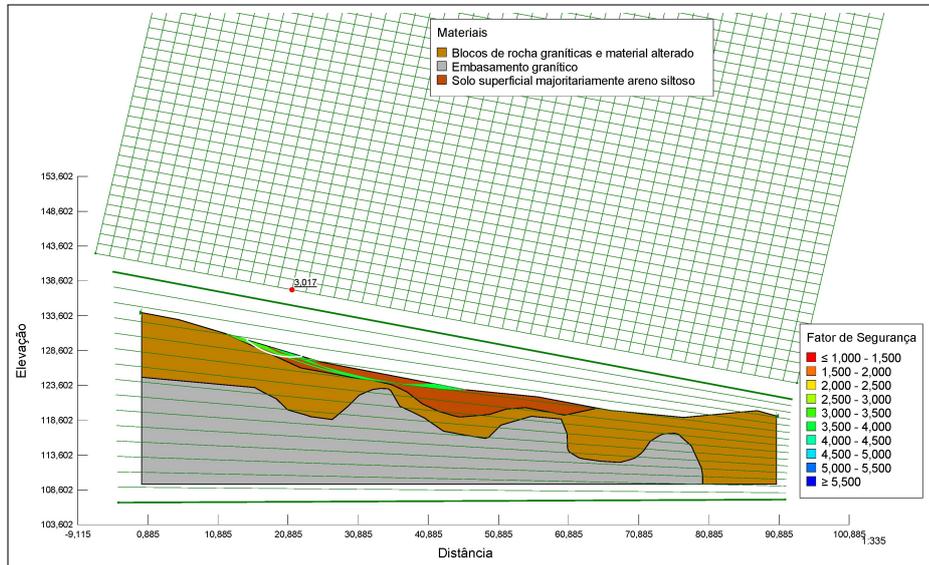
As análises que seguem, as superfícies com fatores de segurança superiores a 4, foram ocultados nos perfis para melhor visualização, além disso, a grade foi estendida de forma que não excluísse qualquer fator de segurança inferior, não sendo limitada ao que é possível visualizar nas Figuras 57 e 58.

Figura 57 – Estabilidade CE-02



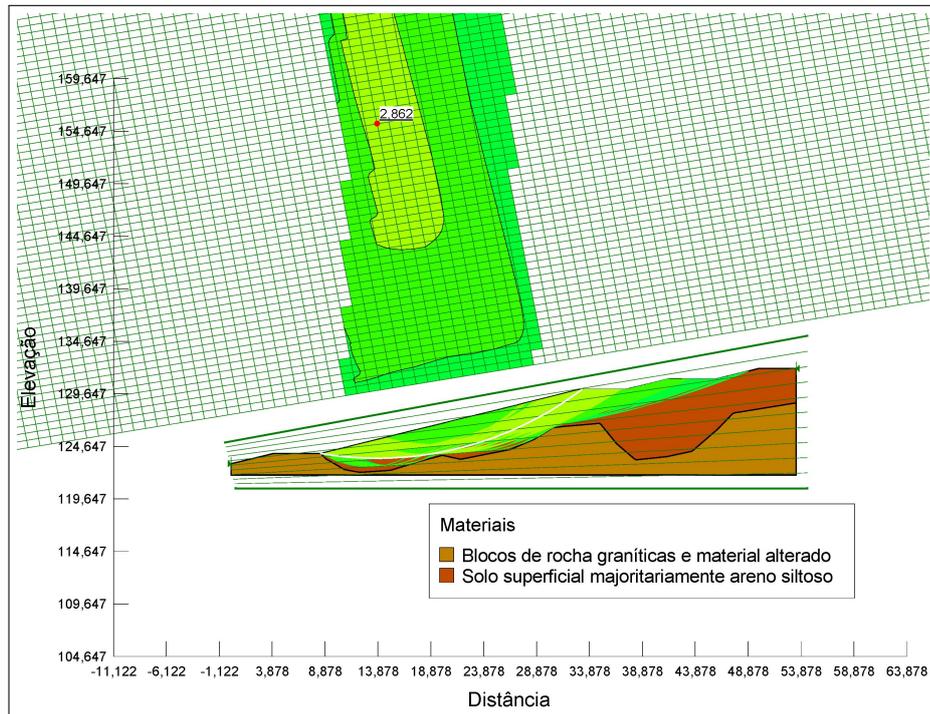
Fonte: Autor (2024)

Figura 58 – Estabilidade CE-03



Fonte: Autor (2024)

Figura 59 – Estabilidade CE-04



Fonte: Autor (2024)

Estas análises possuem caráter preliminar, com a adoção de diversos parâmetros empíricos e aproximações para a construção do modelo, apesar disso, forneceram um cenário claro, no qual é possível identificar uma preocupação maior com o as rupturas do solo sobre o topo rochoso no perfil CE-01.

5 CONCLUSÃO

O uso de metodologias de prospecção indiretas ainda é pouco difundido na engenharia civil. A limitada familiaridade dos profissionais da área com métodos geofísicos, aliada à falta de procedimentos específicos para aplicação na geotecnia, dificulta sua adoção mais ampla. Contudo, a pesquisa bibliográfica e o estudo de caso analisado evidenciam os impactos positivos significativos dessas técnicas nas investigações preliminares.

No estudo de caso abordado, as seções de resistividade preencheram lacunas importantes, apresentando resultados visualmente esclarecedores sobre a distribuição das camadas geológicas. Essas perfis permitiram identificar topos e blocos rochosos, bem como zonas com possível presença de água de forma não invasiva. No entanto, as interpretações dos resultados mostraram um alto grau de ambiguidade, dado que os valores de resistividade apresentados na literatura variam amplamente e, muitas vezes, se sobrepõem. Nesse contexto, as sondagens diretas continuam sendo a melhor alternativa para reduzir essas incertezas.

Um ponto crítico da investigação geotécnica avaliada foi a ausência de sondagens coincidentes com os alinhamentos dos caminhamentos elétricos, o que dificultou a análise de consistência entre os perfis. Embora as seções geofísicas tenham sido suficientes para identificar camadas mais profundas e fornecer informações relevantes para futuras investigações, elas não apresentaram transições claras nas camadas superficiais, como por exemplo, a transição argilas/siltos ou a identificação do topo penetrável observada nos ensaios SPT.

Para melhorar a resolução dos perfis, a redução do espaçamento entre os eletrodos para 1 m seria uma alternativa viável, ainda que mais onerosa em campo. Além disso, a realização de sondagens diretas ao longo dos alinhamentos geofísicos ou prévias prospecção SEV nos pontos de sondagem SPT, teria facilitado a integração das informações, permitindo sua projeção sobre um mesmo perfil. Outra estratégia seria incluir mais alinhamentos paralelos, dispostos longitudinalmente e seguindo a declividade do terreno. Essa abordagem poderia fornecer uma visão mais detalhada da distribuição dos materiais, além de possibilitar a elaboração de modelos mais precisos para avaliar a estabilidade, escavabilidade e fluxo de água e detritos.

Diante das diversas incógnitas, futuros estudos sobre a aplicabilidade da metodologia poderiam priorizar a avaliação da precisão dos métodos de prospecção por eletrorresistividade superficial. A abordagem poderia ser feita através da coleta de amostras após os levantamentos em campo, seguida por medições sucessivas de resistividade dessas em laboratório.

REFERÊNCIAS

- ALVES, R. R. Localização de dutos enterrados com gpr empregando afastamentos fonte-receptor constante. 2014.
- ANNAN, A. P. Electromagnetic principles of ground penetrating radar. **Ground penetrating radar: theory and applications**, Elsevier Amsterdam, v. 1, n. 1, p. 3–41, 2009.
- AQUINO, F. R. de; CASTRO, B. C. de; ARANTE, A. L. O. Método aplicado na obtenção de resistividade elétrica de amostras de solo em laboratório. **TECNOLOGIAS EM PROJEÇÃO**, v. 11, n. 2, p. 23–43, 2020.
- ASARE, A.; OWUSU-NIMO, F.; AMPOFO, B. A. *et al.* Estimating the depth of investigation in electrical resistivity survey: Laboratory measurements. **Journal of Science and Technology (Ghana)**, v. 42, n. 1, 2024.
- BORTOLOZO, C. A. **Inversão conjunta 1D de dados de SEV e TDEM: aplicações em hidrogeologia**. 2011. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.
- BRAGA, A. Métodos geoeletricos aplicados—módulo hidrogeologia. **Universidade Estadual Paulista UNESP/IGCE/DGA. Rio Claro SP. 91p**, 2001.
- OLIVEIRA BRAGA, A. C. de. **Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia**. [S.l.]: Oficina de textos, 2016.
- CAMARGO, M. M. **Modelagem geoeletrica para apoio em investigação geotécnica do subsolo na região de Cachoeiro de Itapemirim-ES**. 2015. Tese (Doutorado) — Instituto de Geociências, 2015.
- CAPUTO, H. P. suas aplicações. **6ª Edição**, v. 1, 1983.
- CARDOSO, L. H.; PEREIRA, V. C.; BACELLAR, L. d. A. P.; WITTIG, S. Modelagem geoeletrica para melhorar o mapeamento estrutural de maciços rochosos a partir de simulação laboratorial. 2022.
- CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas em áreas urbanas. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2016.
- CASTRO, B. C. d. Uso de resistividade elétrica em investigação geotécnica: o caso de palmas-to. 2019.
- DNIT-106. **Terraplenagem - Cortes: Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, RJ, 2009.
- ELIS, V. R.; ZUQUETTE, L. V. Aplicação de geofísica na obtenção de informações para mapeamento geotécnico. **Revista do Instituto Geológico, São Paulo, volume especial**, p. 125–130, 1995.
- EUROCODE-7, B. Eurocode 7. geotechnical design—part 2: Ground investigation and testing. **European Committee for Standardization. The authority of the Standards Policy and Strategy Committee**, 2007.

- FRASSON, F. R.; PEREIRA, W. C.; PAULO, J. Confrontação de mapas de condutividade elétrica do solo com mapas pedológicos e sua aplicação na definição de unidades de gerenciamento para agricultura de precisão. **Agropecuária; resumos**, 2004.
- GARCIA, J.; CORDEIRO, A.; CUNHA, R.; CUNHA, L. The electrical resistivity method and geological mapping for characterization of materials in linear excavation works. *In: ISRM. ISRM Latin American Rock Mechanics Symposium*. [S.l.], 2022. p. ISRM-LARMS.
- GONÇALVES, J. T. D. Integração do método geofísico de eletrorresistividade e ensaios spt na investigação de perfis de subsolos da região metropolitana de salvador (rms). Escola Politécnica, 2021.
- GUERREROS, J. G.; NIEDERLEITHINGER, E.; MACKENS, S.; FECHNER, T. Crosshole and downhole seismics: a new quality assurance tool for jet grout columns. **Near Surface Geophysics**, European Association of Geoscientists & Engineers, v. 14, n. 6, p. 493–501, 2016.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Florianópolis - SC**. CPRM, 2015. Acessado em: 01 dez. 2024. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/23525>.
- IPT, L. G. N.; IPT, O. C. B. G.; MALAGUTTI FILHO, W.; DOURADO, J. C. Integração dos métodos de sísmica de refração de onda se análise multicanal de ondas superficiais (masw) em barragem de terra. 2019.
- LOKE, M. H.; BARKER, R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-newton method1. **Geophysical prospecting**, European Association of Geoscientists & Engineers, v. 44, n. 1, p. 131–152, 1996.
- MANHÃES, P. M. B.; ARARUNA JR, J. T.; MOREIRA, P. J. Uso do ground penetrating radar (gpr) na identificação de elementos de fundação de edificações existentes. 2016.
- MEIRA, G. d. S. Uso dos métodos sísmicos de refração e masw para investigação e caracterização de taludes. 2023.
- MIRANDA, G. M. *et al.* Aplicação do método geofísico de eletrorresistividade e de ensaios geotécnicos para análise de integridade e estabilidade de uma barragem de terra. Universidade Federal do Pampa, 2021.
- MORAES, M. d. A. Integração do método geofísico eletrorresistividade à caracterização dos condicionantes físicos de estabilidade dos taludes. Universidade Federal da Bahia, 2019.
- NASCIMENTO, A. P. do; JUAREZ, M. B.; GIACHETI, H. L.; ELIS, V. R.; MONDELLI, G. A resistividade elétrica para a investigação e o monitoramento geoambiental de um aterro de resíduos sólidos urbanos. 2024.
- ORELLANA, E. Prospección geoelectrica en corriente continua: Madrid. **España, Editorial Paraninfo**, 1972.

ROCHA, M. *et al.* Alguns problemas relativos a mecânica das rochas dos materiais de baixa resistencia. **Geotecnia**, n. 18, p. 03–27, 1976.

SAAR, H. F. **Métodos geofísicos da Eletrorresistividade (ERI e SEV), Eletromagnético Indutivo no domínio da frequência (FDEM) e Polarização Induzida no domínio do tempo (IP), aplicados à exploração de água subterrânea em basaltos fraturados, para uso na irrigação agrícola.** 2023. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2023.

SANTOS, P. G. d. *et al.* Na comunidade do morro da penitenciária: perspectivas e limitações da cidadania feminina. Florianópolis, SC, 2002.

SANTOS, R. V. Aplicação do método gpr (ground penetrating radar) no estudo de vazios em rochas carbonáticas. Universidade Federal da Bahia, 2021.

SOUZA, L. A. de. **Revisão do Plano Municipal de Redução de Risco de Florianópolis - SC: 5ª Etapa: Documento da Versão Preliminar do Plano Municipal de Redução de Riscos, contendo: mapeamento de risco, intervenções estruturais e não estruturais com seus respectivos orçamentos preliminares, fontes de recursos e hierarquização das intervenções.** 2014. Disponível em: https://www.pmf.sc.gov.br/arquivos/arquivos/pdf/17_09_2014_12.18.46.47d9f3cf658ee472868d5324eb4f2c6d.pdf.

SOUZA, L. A. P. de. Métodos geofísicos em geotecnia e geologia ambiental. 2012.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied geophysics.** [S.l.]: Cambridge university press, 1990.

TOMAZZOLI, E. R.; PELLERIN, J. R. G. M. Atlas geológico da ilha de santa catarina e áreas adjacentes. Edições do Bosque/CFH/UFSC, 2023.

VIEIRA, R.; GANDOLFO, O. Investigando a estrutura do pavimento por método não destrutivo (gpr). **Anais, Gramado. Anais. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO**, v. 42, 2013.

VITALI, O. P. M. **Desenvolvimento de um sistema para realização de ensaios sísmicos down-hole em conjunto com o CPT.** 2011. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2011.